

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA IN FISICA

ALBERTO VINCIGUERRA

Indagini strutturali e stratigrafiche con raggi X con tecniche off-line e on-line

TESI DI LAUREA

Relatori:

Chiar.mo Prof. G. PAPPALARDO

Dott. P. FINOCCHIARO

ANNO ACCADEMICO 1997-98

Indice

	Introduzione	pag. 1
1.	Cenni sui raggi X.....	pag. 3
1.1	Struttura atomica.....	pag. 4
1.2	I raggi X.....	pag. 6
1.3	Assorbimento.....	pag. 8
1.3.1	Effetto fotoelettrico.....	pag. 10
1.3.2	Effetto Compton.....	pag. 12
1.3.3	Effetto Rayleigh.....	pag. 14
2.	Tecnica Radiografica Convenzionale "off-line".....	pag. 16
2.1	I raggi X nell'arte.....	pag. 17
2.2	Il tubo a raggi X.....	pag. 21
2.3	Le misure.....	pag. 26
3.	Tecnica Radiografica "on-line".....	pag. 39
3.1	L'apparato sperimentale.....	pag. 40
3.2	La caratterizzazione dello strumento.....	pag. 52
3.2.1	La calibrazione.....	pag. 53
3.2.2	Misure sugli effetti di bordo.....	pag. 55
3.2.3	Misure su un filo.....	pag. 59
3.3	Le misure.....	pag. 63
4.	Confronti sulle due tecniche.....	pag. 73
4.1	I confronti.....	pag. 74
4.2	Le conclusioni.....	pag. 80
	Reference.....	pag. 82
	Ringraziamenti.....	pag. 84

Capitolo 1

Cenni sui raggi X

1.1 Struttura atomica.

1.2 I raggi X.

1.3 Assorbimento.

1.3.1 Effetto Fotoelettrico.

1.3.2 Effetto Compton.

1.3.3 Effetto Rayleigh.

Capitolo 2

Tecnica Radiografica Convenzionale “off-line”

2.1 I raggi X nell'arte.

2.2 Il tubo a raggi X.

2.3 Le misure.

Capitolo 3

Tecnica Radiografica “on-line”

3.1 L'apparato sperimentale.

3.2 La caratterizzazione dello strumento.

3.2.1 La calibrazione.

3.2.2 Misure sugli effetti di bordo.

3.2.3 Misure su un filo.

3.3 Le misure.

Capitolo 4

Confronti sulle due tecniche

4.1 I confronti.

4.2 Le conclusioni.

Introduzione.

L'interesse verso la conoscenza dei materiali e delle tecniche utilizzate per la produzione d'oggetti di natura artistica ed archeologica è sempre stato di rilevante importanza, sia per un eventuale restauro, sia per dare una più precisa collocazione storica all'oggetto in questione.

A tale scopo un'analisi che utilizza dei raggi X in virtù della sua natura non distruttiva ci viene in aiuto.

La non distruttività di detta analisi risiede nel fatto che per dosi non elevate non si riscontrano alterazioni sul materiale e non è necessario asportare una parte; infatti, è sufficiente irradiarlo con un fascio X ed analizzare i raggi trasmessi dal campione tramite un opportuno sistema di rivelazione.

Lo scopo del seguente lavoro è quello di mettere a confronto due differenti tecniche.

Per entrambe le tecniche si è utilizzato un tubo a raggi X in grado di fornire tensioni comprese tra i 18 ed i 50 KV e corrente non superiore ai 1.2 mA.

La prima, una tecnica “*off-line*”, consiste nel porre alle spalle del manufatto da analizzare una lastra simile a quella utilizzata in radiologia che, una volta irradiato il manufatto, ne viene impressionata.

La seconda, una tecnica “*on-line*”, utilizza come rivelatore un sistema costituito da un cristallo di Ioduro di Cesio ed un CCD opportunamente assemblati e collegati ad un P.C. tramite una scheda d’acquisizione.

Il primo capitolo è dedicato alla descrizione dei fenomeni fisici e delle problematiche coinvolte nell’utilizzo di dette tecniche d’analisi; i successivi due capitoli saranno dedicati nello specifico alle due differenti tecniche. A conclusione saranno confrontati i risultati ottenuti.

Capitolo 1

Cenni sui raggi X

1.1 Struttura atomica.

1.2 I raggi X.

1.3 Assorbimento.

1.3.1 Effetto Fotoelettrico.

1.3.2 Effetto Compton.

1.3.3 Effetto Rayleigh.

1.1 Struttura atomica.

Quasi tutta la massa di un atomo è concentrata, con la sua carica positiva, in un piccolo volume, il nucleo. Il diametro del nucleo è dell'ordine di 10^{-13} cm e la densità della materia al suo interno è dell'ordine di 10^{14} g/cm³.

I nuclei atomici possiedono una carica elettrica positiva q che è un multiplo intero del valore assoluto della carica dell'elettrone: $q = Ze$. Il numero intero Z coincide con il numero d'ordine dell'elemento nella tavola periodica degli elementi.

Un'altra importante grandezza caratteristica del nucleo è la massa A . Si definisce come unità atomica di misura $1/12$ della massa del ^{12}C .

Il nucleo di un atomo dell'elemento generico X è rappresentato quindi nella seguente forma **[1]**:



Un nucleo con numero di massa A conterrà Z protoni e $N = A - Z$ neutroni. L'atomo corrispondente conterrà Z elettroni.

Le proprietà spettroscopiche di un elemento sono determinate da Z . Ogni stato elettronico di un atomo è definito da quattro numeri quantici:

n: numero quantico principale;

l: numero quantico angolare;

m: numero quantico magnetico;

s: numero quantico di spin.

Questi quattro numeri godono di opportune relazioni:

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$l = n-1, n-2, n-3, \dots, 3, 2, 1, 0$$

$$-l \leq m \leq l$$

$$s = \pm \frac{1}{2}$$

Il primo guscio elettronico si ha per $n=1$ ed $l=0$. Tutti gli orbitali che hanno $l=0$ sono chiamati di tipo “s”, per $l=1$ di tipo “**p**”, per $l=2$ di tipo “**d**” ecc... ecc.... In ogni orbitale per il principio d’esclusione di Pauli possono coesistere non più di due elettroni, e con gli spin opposti.

1.2 I raggi X.

I raggi X sono onde elettromagnetiche con una lunghezza d'onda compresa tra 10^{-12} e 10^{-7} metri. Essi, nel 1895, furono scoperti da Wilhelm Roentgen [2] e già nella prima metà di questo secolo, utilizzando tecniche basate sui raggi X, si sono realizzati apparati importanti per la fisica; inoltre, fin dal 1950 si è verificato un sostanziale uso di questa tecnica per la caratterizzazione dei materiali.

Oggi tecniche basate sull'assorbimento di raggi X hanno un ruolo importante in campo industriale e medico. Insomma le tecniche analitiche basate su diffrazione e spettrometria dei raggi X, entrambe concepite quasi 70 anni fa, sono divenute indispensabili nell'analisi e studio di materiali organici e inorganici.

La produzione di raggi X deriva dal frenamento d'elettroni ad alta velocità quando penetrano in una sostanza. Questo processo avviene in maniera controllata all'interno di un tubo a raggi X.

In un tubo per raggi X gli elettroni sono accelerati in modo da raggiungere un'alta velocità e poi fatti urtare contro un "bersaglio".

L'interazione tra gli elettroni incidenti e gli atomi bersaglio determina la produzione di raggi X.

1.3 Assorbimento.

Nel caso dei raggi X gli effetti fotoelettrico, Compton e Rayleigh giocano un ruolo determinante nell'interazione con la materia.

La radiazione che attraverserà un materiale omogeneo subirà nel suo cammino un'attenuazione della stessa pari a [3]:

$$I=I_0*e^{-\mu x} \quad 1.1$$

con:

I: intensità della radiazione trasmessa;

I_0 : intensità della radiazione incidente;

μ : coefficiente d'attenuazione lineare;

x: percorso della radiazione all'interno della materia.

Il coefficiente d'attenuazione è funzione del numero atomico Z, della densità del materiale attraversato δ e dell'energia della radiazione incidente E:

$$\mu=\mu (Z, \delta, E) \quad 1.2$$

Il coefficiente d'attenuazione si può inoltre scrivere come somma di tre coefficienti dovuti agli effetti fotoelettrico, Compton e Rayleigh:

$$\mu = \mu_f + \mu_C + \mu_R \quad 1.3$$

Spesso è utilizzato un coefficiente, il coefficiente d'attenuazione massivo, che ha il vantaggio d'essere indipendente dalla densità del materiale.

Esso è definito come:

$$\sigma = \mu / \delta \text{ [cm}^2\text{/g]} \quad 1.4$$

analogamente avremo:

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_C + \sigma_R \quad 1.5$$

1.3.1 Effetto fotoelettrico.

L'effetto fotoelettrico è un'interazione tra un fotone X ed un elettrone fortemente legato ad un atomo dell'oggetto assorbente (fig. 1.1).

Tutta l'energia del fotone è assorbita e trasferita ad un elettrone degli orbitali interni all'atomo per cui, il percorso dell'elettrone liberato è soltanto di pochi micron, e l'atomo eccitato emetterà, nel successivo processo di riempimento del posto lasciato vuoto dall'elettrone emesso, delle radiazioni X.

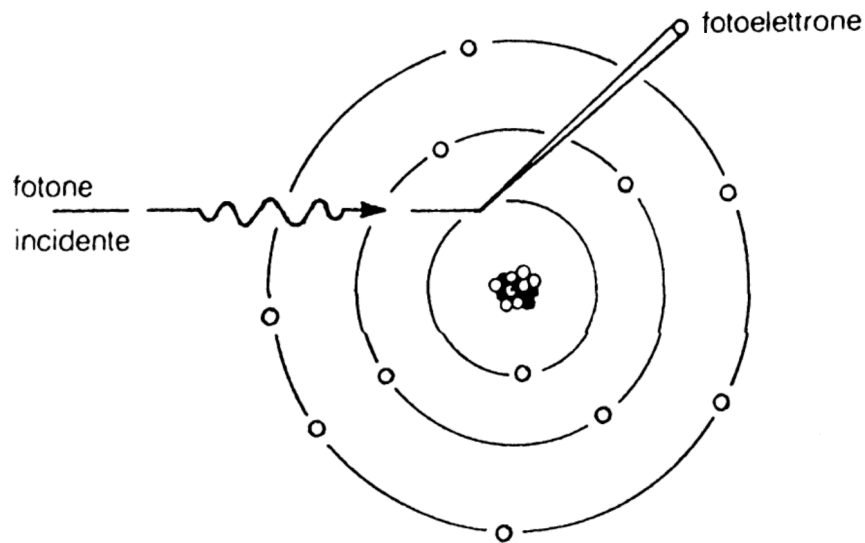


Fig. 1.1: effetto fotoelettrico

L'energia dell'elettrone emesso sarà pari a:

$$E_e = h\nu - W \quad 1.6$$

dove:

E_e = energia dell'elettrone emesso;

$h\nu$ = energia del quanto incidente;

W = energia di legame dell'elettrone.

Il processo fotoelettrico si verifica in maniera altamente selettiva poiché la probabilità d'assorbimento è maggiore in materiali con un alto numero atomico Z . Inoltre condizione necessaria affinché il processo possa avvenire è che risulti $h\nu > W$.

1.3.2 Effetto Compton.

L'effetto Compton consiste nell'interazione tra un fotone X ed elettroni liberi o legati (fig. 1.2).

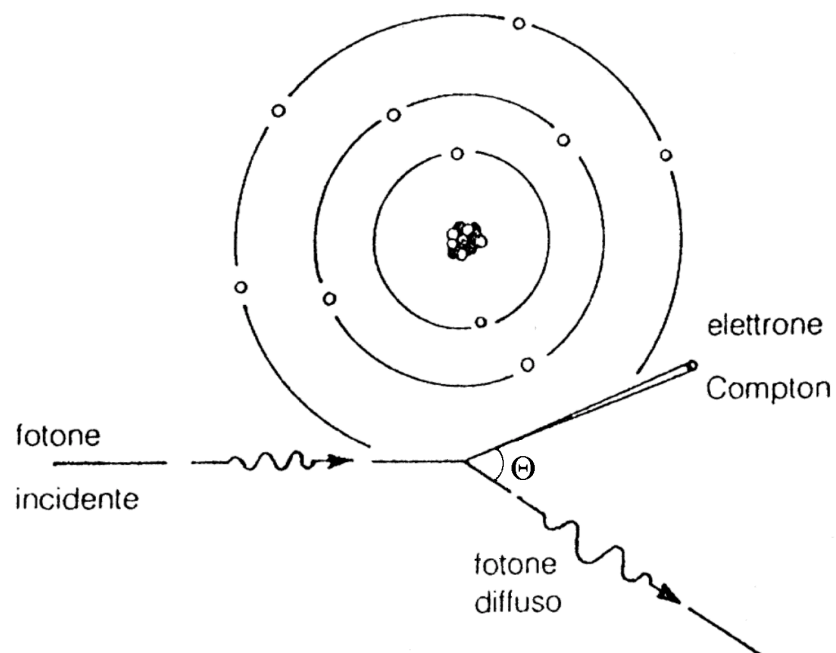


Fig.1.2: effetto Compton

L'energia del fotone diffuso sarà data da:

$$h\nu_{dif} = \frac{h\nu_{inc}}{1 + \frac{h\nu_{inc}}{m_0c^2}(1 - \cos \Theta)} \quad 1.7$$

dove:

$h\nu_{\text{dif}}$: energia del fotone diffuso;

$h\nu_{\text{inc}}$: energia del fotone incidente;

m_0 : massa a riposo dell'elettrone;

c : velocità della luce;

$0 \leq \Theta \leq 180^\circ$.

1.3.3 Effetto Rayleigh.

L'effetto Rayleigh [4], chiamato anche scattering elastico o coerente, avviene quando gli elettroni dell'atomo ritornano al loro stato iniziale dopo l'interazione con i fotoni X incidenti. In questo caso i fotoni saranno diffusi in tutte le direzioni con un'energia pari a quella incidente (fig. 1.3).

A causa di questo fenomeno di diffusione l'oggetto esaminato è sorgente di radiazione indesiderata che, oltre ad irradiare l'ambiente circostante, riduce il contrasto tra le diverse parti dell'immagine.

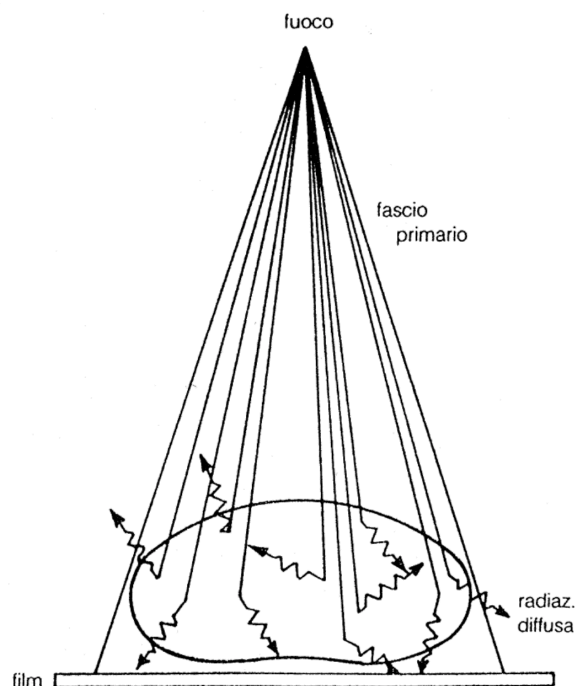


Fig. 1.3: effetto Rayleigh

I tre effetti agiscono nella materia in modo differente in funzione dell'energia incidente, nella fig. 1.4 sono mostrate le percentuali relative di questi effetti per l'acqua.

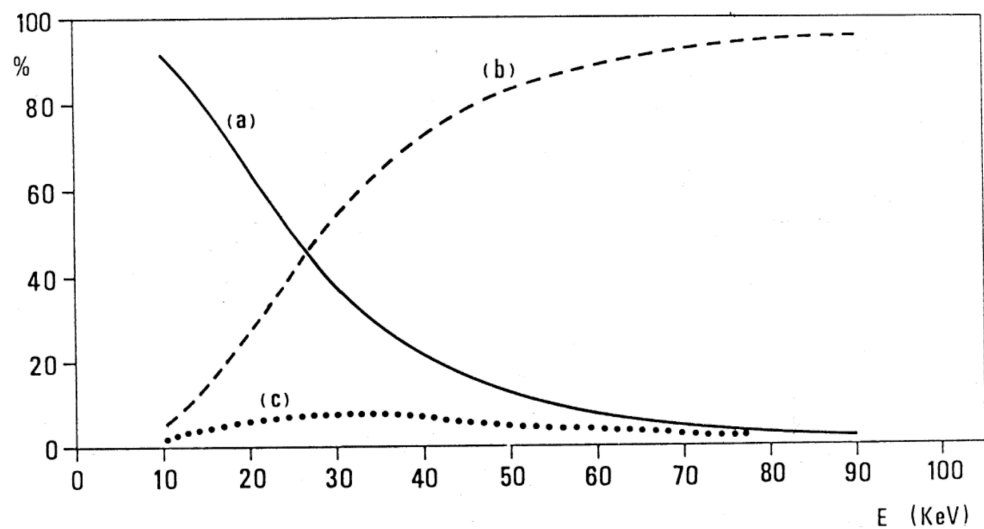


Fig. 1.4: percentuale relativa nell'acqua (a)dell'effetto fotoelettrico; (b)dell'effetto Compton; (c)dell'effetto Rayleigh.

Capitolo 2

Tecnica Radiografica Convenzionale “off-line”

2.1 I raggi X nell'arte.

2.2 Il tubo a raggi X.

2.3 Le misure.

2.1 I raggi X nell'arte.

L'esposizione radiografica è determinata da quattro fattori: la tensione (KV), la corrente (mA), il tempo d'esposizione e la distanza tra il fuoco e il film.

Si può dimostrare che l'intensità della radiazione è inversamente proporzionale al quadrato della distanza fuoco - film, in roentgen/secondi ($3876 \text{ R} = 1 \text{ C/Kg}$) essa sarà data da [5]:

$$\text{Intensità} = K \frac{I * V^n}{D^2} \quad 2.1$$

dove:

K: costante di proporzionalità;

I: corrente espressa in mA;

V: tensione espressa in KV;

n: parametro che varia da due a cinque e dipende dal tubo utilizzato;

D: distanza fuoco – film espressa in metri.

E' importante quando viene acquisita un'immagine considerare la distanza oggetto - film, perché, essa produrrà un allargamento della stessa sul film (fig. 2.1).

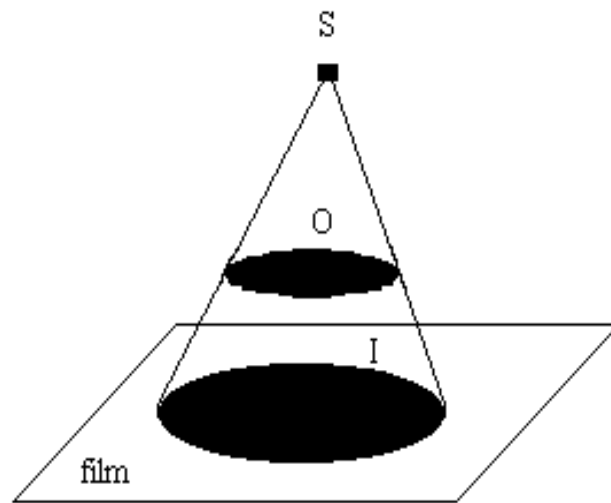


Fig. 2.1: allargamento dell'immagine dovuto ad una distanza fuoco – film dove: S = sorgente; O = oggetto; I = immagine.

L'allargamento dell'immagine sarà dato da:

$$A = \frac{d_{sf}}{d_{so}} \quad 2.2$$

dove:

A = allargamento;

d_{sf} = distanza sorgente - film;

d_{so} = distanza sorgente - oggetto.

In commercio esistono svariate marche di lastre che, secondo il modello, richiedono una differente dose di raggi per essere impressionate (Tab. 2.1) [6]. Generalmente per analisi non distruttive, come quelle utilizzate

per analizzare dipinti, si utilizzano lastre che richiedono una dose di $0.3 \div 0.4$ rem ($1 \text{ r} = 0.01 \text{ Sv}$).

KODAK		AGFA		GEVAERT		DU PON	
Tipo	Dose (r)	Tipo	Dose (r)	Tipo	Dose (r)	Tipo	Dose (r)
AA	$0.05 \div 0.1$	D4	$0.3 \div 0.4$	D7	$0.05 \div 0.1$	NDT 75	$0.05 \div 0.1$
T	$0.1 \div 0.2$			D4	$0.3 \div 0.4$	NDT 65	$0.1 \div 0.2$
M	$0.3 \div 0.4$			D2	$1 \div 1.5$	NDT 55	$0.3 \div 0.4$

Tab. 2.1: tabella comparativa di alcune lastre esistenti in commercio.

Per il presente lavoro si sono utilizzate delle lastre AGFA del tipo D4 che posseggono una media sensibilità ed offrono un elevato contrasto grazie ad una grana extra fine. Dopo svariate prove è stato rilevato che la migliore dose per impressionare dette lastre era di circa 0.3 r.

Per effettuare le misure è stato utilizzato un tubo a raggi X modello P.N. 102301 fornito dalla EIS SRL ed i dipinti venivano posti a circa un metro di distanza da esso.

Nella Tab. 2.2 [7] sono riportati i gradi d'assorbimento dei colori principali in funzione della natura chimica degli stessi. Gli altri colori sono ottenuti dalla composizione di quelli principali.

Color	Name	Chemical composition	X-ray absorption
White	Silver White	Silver-lead carbonate	very high
	Flake White	Lead carbonate	very high
	Zinc White	Zinc oxide	high
	Chinese White	Zinc oxide	high
	Lime mortar white	Calcium carbonate	medium
Yellow and Orange	Chromo Yellow (light, deep, orange)	Lead chromate	very high
	Cadmium Yellow (light, medium, deep, orange)	Cadmium sulphide	high
	Zinc Yellow	Zinc chromate	high
	Aurora Yellow	Cadmium sulphide	high
	Yellow Ochre (gold, transparent, brown, stone ochre, raw Siena, burnt Siena)	Iron oxide, alumina	medium - high
	Gamboge	Gamboge resin (organic)	low
	Naples Yellow	Lead antimonide	very high
	Massicot	Lead oxide	very high
	Mars Yellow	Iron oxide	medium
	Yellow Lake	Lacquer (organic)	low
Red	Red Lead	Lead oxide	very high
	Vermilion-Cinnabar	Mercury sulphide	very high
	Venetian Red	Iron oxide	medium
	Carmine Lake	Lacquer (organic)	low
	Rose, Brown, Purple Madder	Organic	low
	Raw and Burnt Umbra	Iron oxide-alumina	medium - high
Brown	Florence Brown	Copper cyanide	high
	Mars Brown	Iron oxide	medium
	Prussian Brown	Iron cyanide	medium
	Sepia	Organic	low
	Bistre	Organic	low
	Bitumen	Organic	low
Blue	Cerulean Blue	Cobalt stannate	high
	Cobalt Blue	Cobalt aluminate	medium
	Light Ultramarine	Sodium sulphide	medium
	Prussian Blue	Iron cyanide	medium - high
	Indigo	Organic	low
Violet	Cobalt Violet	Cobalt phosphate	medium
	Mars Violet	Iron oxide	medium - high
	Mineral Violet	Manganese phosphate	medium
Green	Emerald Green	Copper arsenate	high
	Chrome Green	Chrome oxide	medium
	Cobalt Green	Zinc, cobalt oxide	high
	Green Lake	Organic	low
Grey and Black	Ivory Black	Calcium phosphate and organic	medium
	Iron Black	Iron oxide	medium - high
	Bleu Black	Organic	low
	Lamp Black	Organic	low
	Carbon Black	Organic	low
All colors	Acrylic	Organic	low

Tab.2.2: tabella dei diversi gradi d'assorbimento dei raggi X in funzione della natura del colore utilizzato.

2.2 Il tubo a raggi X.

Il tubo utilizzato per le misure è stato fornito dalla EIS SRL, il modello è P.N. 102301 e le caratteristiche sono le seguenti:

- Tensione Max 50 KV;
- Corrente Max 1.2 mA;
- Fuoco 0.6 mm;
- Contenitore esterno in lega d'alluminio anticorrosione AC61 con qualche percentuale di Si e Mg dello spessore di 0.3 mm.

Per ricavare lo spettro del tubo si è impostata una tensione di 40 KV con una corrente di 0.5 mA. La calibrazione è stata effettuata ponendo dei campioni puri di piombo e stagno all'uscita del tubo. I due campioni formavano un angolo di 45° rispetto alla direzione dei fotoni uscenti. Il rivelatore al silicio – litio, caratterizzato dall'avere una finestra di berillio di 0.0254 mm ed una risoluzione a 5.9 KeV di 180 eV, è stato posto in direzione ortogonale all'uscita del tubo ad una distanza di 50 cm. I dati in uscita dal rivelatore sono stati acquisiti utilizzando un multicanale della ORTEC ed un P.C. attraverso il programma “MAESTRO 2”. Nella figura seguente è schematizzato il sistema utilizzato per la calibrazione.

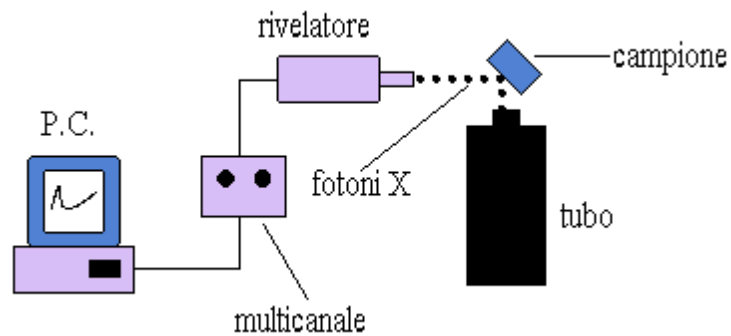


Fig. 2.2: schema del sistema utilizzato per la calibrazione

Il risultato della calibrazione è visualizzato nella figura seguente.

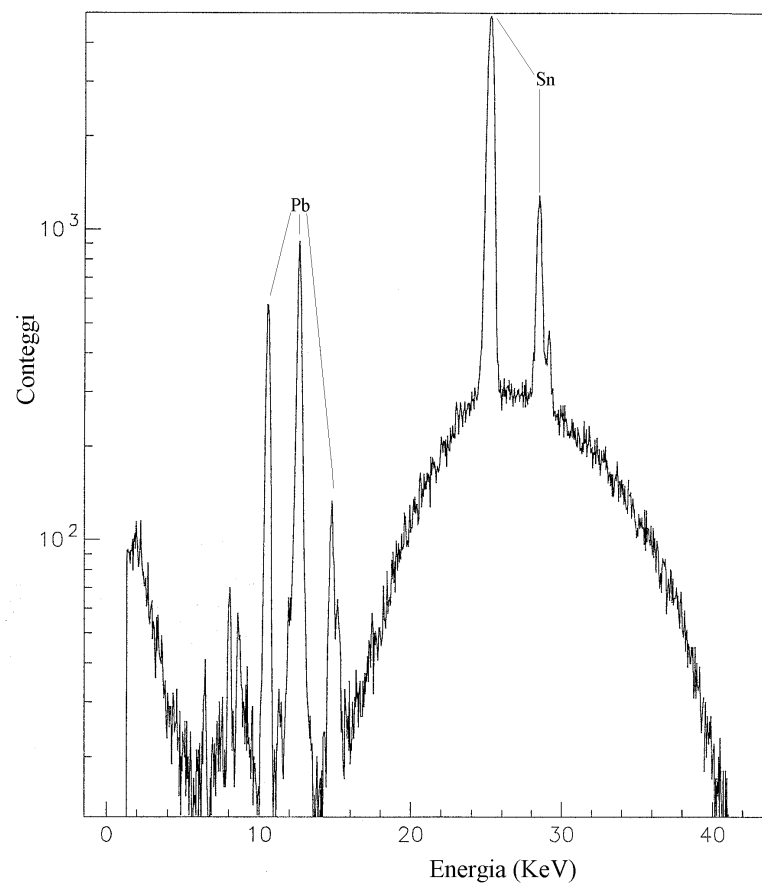


Fig. 2.3: calibrazione del tubo a raggi X. I picchi corrispondono alle “emissioni caratteristiche” dei due campioni ed hanno le seguenti energie: Pb: 10.562 KeV, 12.644 KeV, 14.825 KeV; Sn: 25.284 KeV, 28.506 KeV.

Una volta effettuata la calibrazione, mantenendo invariati i valori di tensione e corrente e sostituendo il piombo e lo stagno con un campione di polietilene, è stato ricavato lo spettro d'emissione dove si evincono dei picchi dovuti ad impurità di Stronzio e Bario.

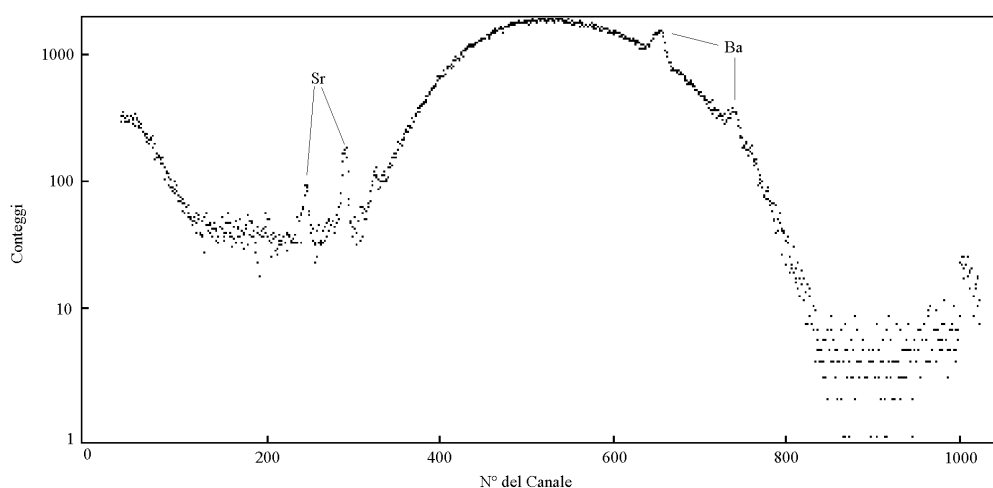


Fig. 2.4: spettro d'emissione del tubo a raggi X. I picchi dovuti alle impurità hanno le seguenti energie: Sr: 14.162 KeV, 15.904 KeV; Ba: 32.078 KeV, 36.360 KeV.

Nelle figure che seguono sono riportate un'immagine del tubo con relativo alimentatore e le sue dimensioni.



Fig. 2.5: foto del tubo con relativo alimentatore

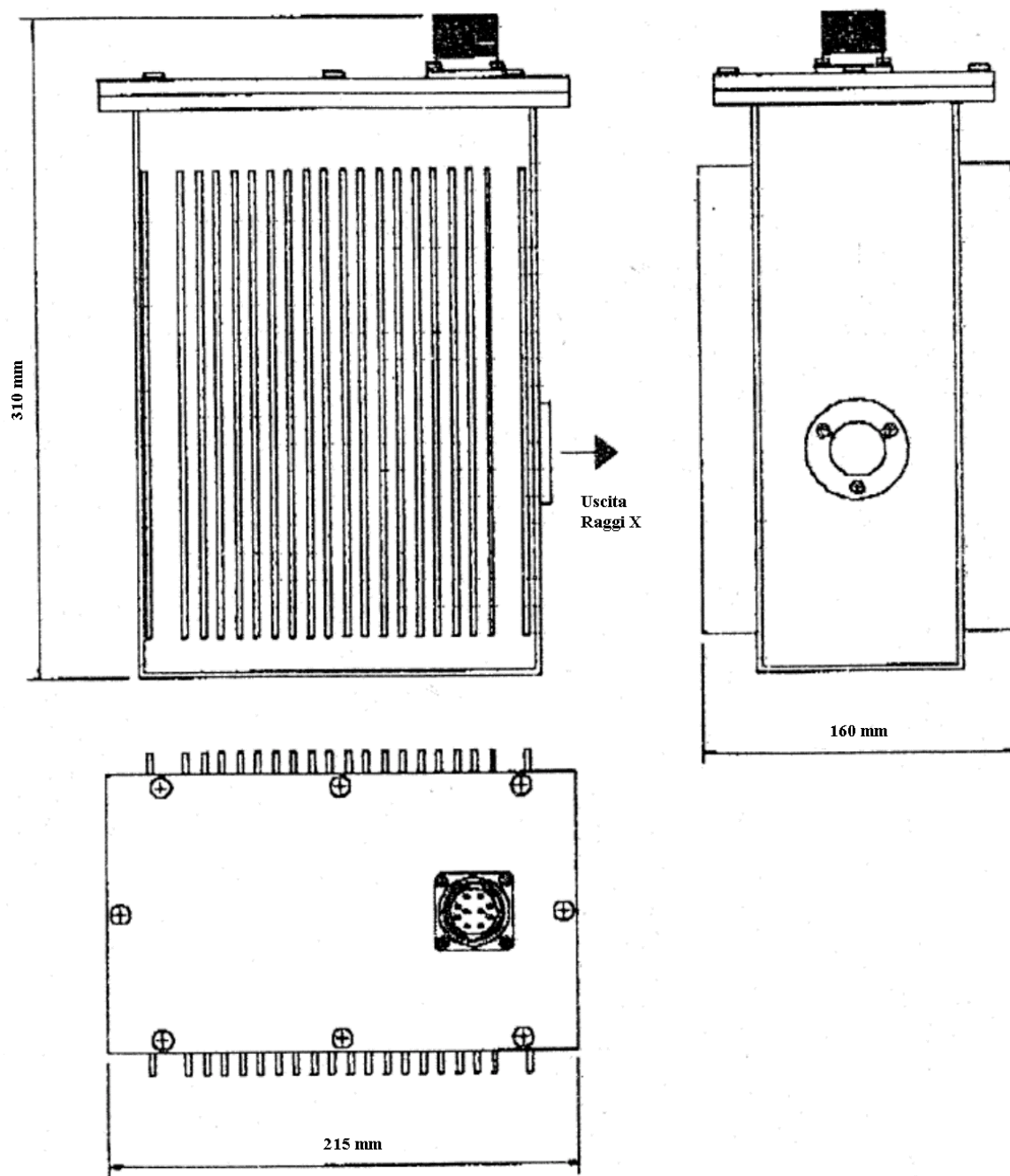


Fig. 2.6: dimensioni del tubo a raggi X

2.3 Le misure.

I dipinti da analizzare, posti ad un metro dall'uscita del tubo a raggi X, avevano le lastre adagiate alle spalle della tela (vedi striscia rossa a sinistra del dipinto in fig. 2.7) per limitare il fenomeno dell'allargamento dell'immagine sul film.



Fig. 2.7: misura di un dipinto con la tecnica off-line

I dipinti erano posti ad un metro dal tubo perché questa era la minima distanza che consentiva al fascio X di irradiare in maniera sufficientemente uniforme le lastre, inoltre, poiché il tubo non era in grado di operare ad alta tensione in maniera costante per lunghi periodi, si è scelto di lavorare con bassi valori di tensione.

Si è calcolato che per ottenere una dose di 0.3 r, con una tensione di 25 KV ed una corrente di 1 mA, era necessario esporre il dipinto per un tempo di 20 minuti.

Una volta che la lastra veniva impressionata era immediatamente sviluppata in loco grazie ad una sviluppatrice che ha, nella figura che segue, schematizzato il suo principio di funzionamento.

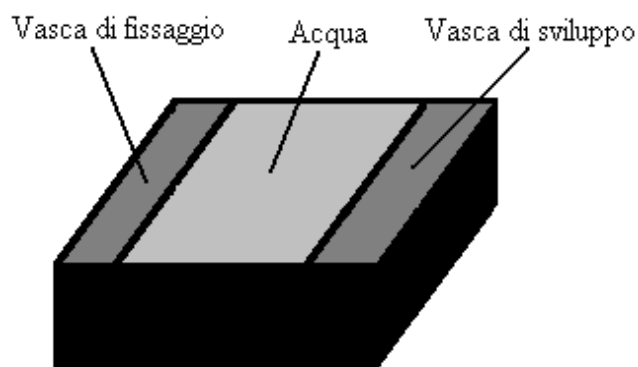


Fig. 2.8: schema della sviluppatrice

Dopo aver portato i liquidi all'interno delle tre vasche della sviluppatrice ad una temperatura di circa 30° C utilizzando una resistenza elettrica posta nel suo interno, si effettuava lo sviluppo utilizzando la seguente procedura:

- 1° Immergere la lastra nel bagno di sviluppo per circa 3 min.;
- 2° Sciacquare la lastra;
- 3° Immergere la lastra nel bagno di fissaggio per circa 4 min.;

4° Sciacquare la lastra.

Per questo lavoro di tesi sono stati analizzati quattro dipinti, per tutti sono state utilizzate le medesime condizioni di lavoro:

- Tensione 25 KV;
- Corrente 1 mA;
- Distanza tubo - lastra = 1 metro;
- Tempo d'esposizione = 20 min.

Nelle pagine seguenti si potrà notare come, nelle lastre ottenute con la tecnica off-line, si riescano a distinguere particolari non visibili nei vari dipinti come chiodi, trama della tela, ritocchi, “ripensamenti” dell’artista, colori precedentemente depositati e “macchie” di colori che non trovano alcuna corrispondenza con ciò che appare sul dipinto

1° DIPINTO



Fig. 2.9a: foto del 1° dipinto

LASTRA



Fig. 2.9b: lastra del 1° dipinto, in essa si distingue chiaramente la trama della tela, inoltre, in tutta la lastra vi sono “*tracce*” che non trovano alcuna corrispondenza con ciò che appare sul dipinto, il tetto e la finestra della barca a destra mostrano “*un ripensamento*” dell’artista, a sinistra della casupola della stessa barca in corrispondenza della scaletta c’è l’evidente traccia di un ritocco.

2° DIPINTO



Fig. 2.10a: foto del 2° dipinto

LASTRA

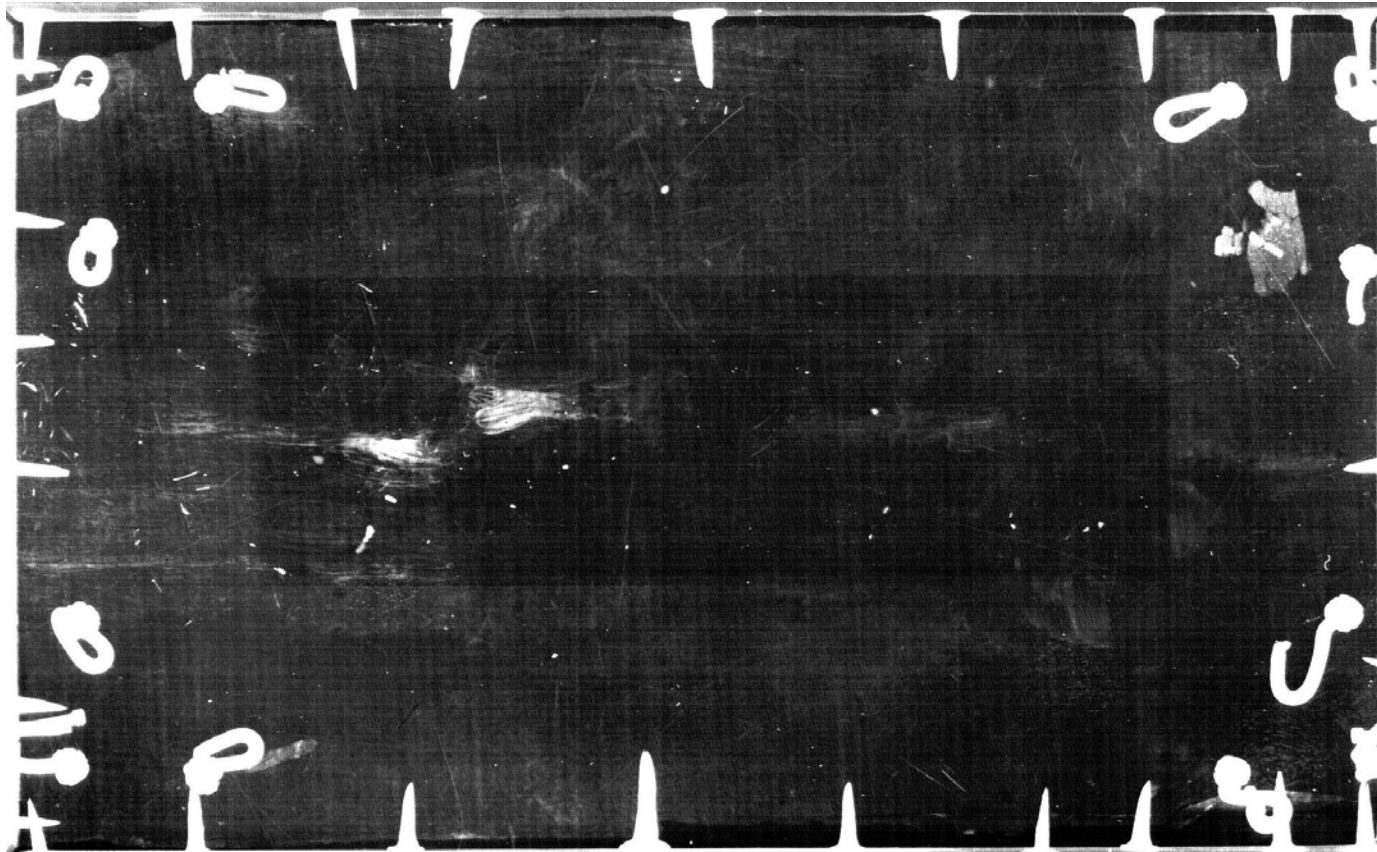


Fig. 2.10b: lastra del 2° dipinto, in essa la trama della tela appare confusa, si vedono chiaramente i chiodi presenti nell'intelaiatura di legno, in tutta la lastra vi sono evidenti “tracce” che non trovano alcuna corrispondenza con ciò che appare sul dipinto.

3° DIPINTO



Fig. 2.11a: foto del 3° dipinto

LASTRA

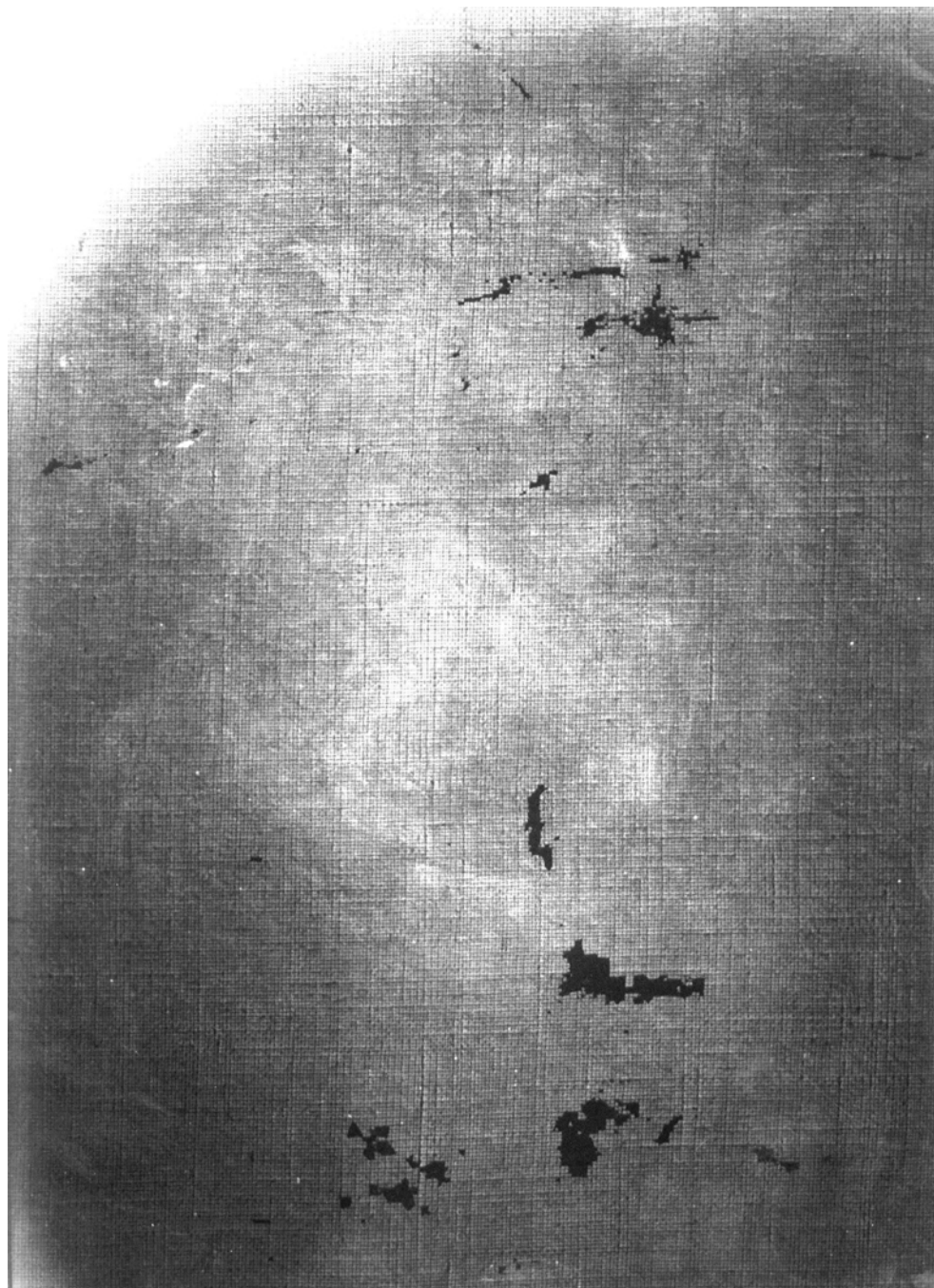


Fig. 2.11b: lastra del 3° dipinto, si distingue chiaramente la trama della tela, l'immagine appare confusa, in tutto il dipinto vi sono delle “*macchie nere*” probabilmente dovuti a lacerazioni della tela.

4° DIPINTO

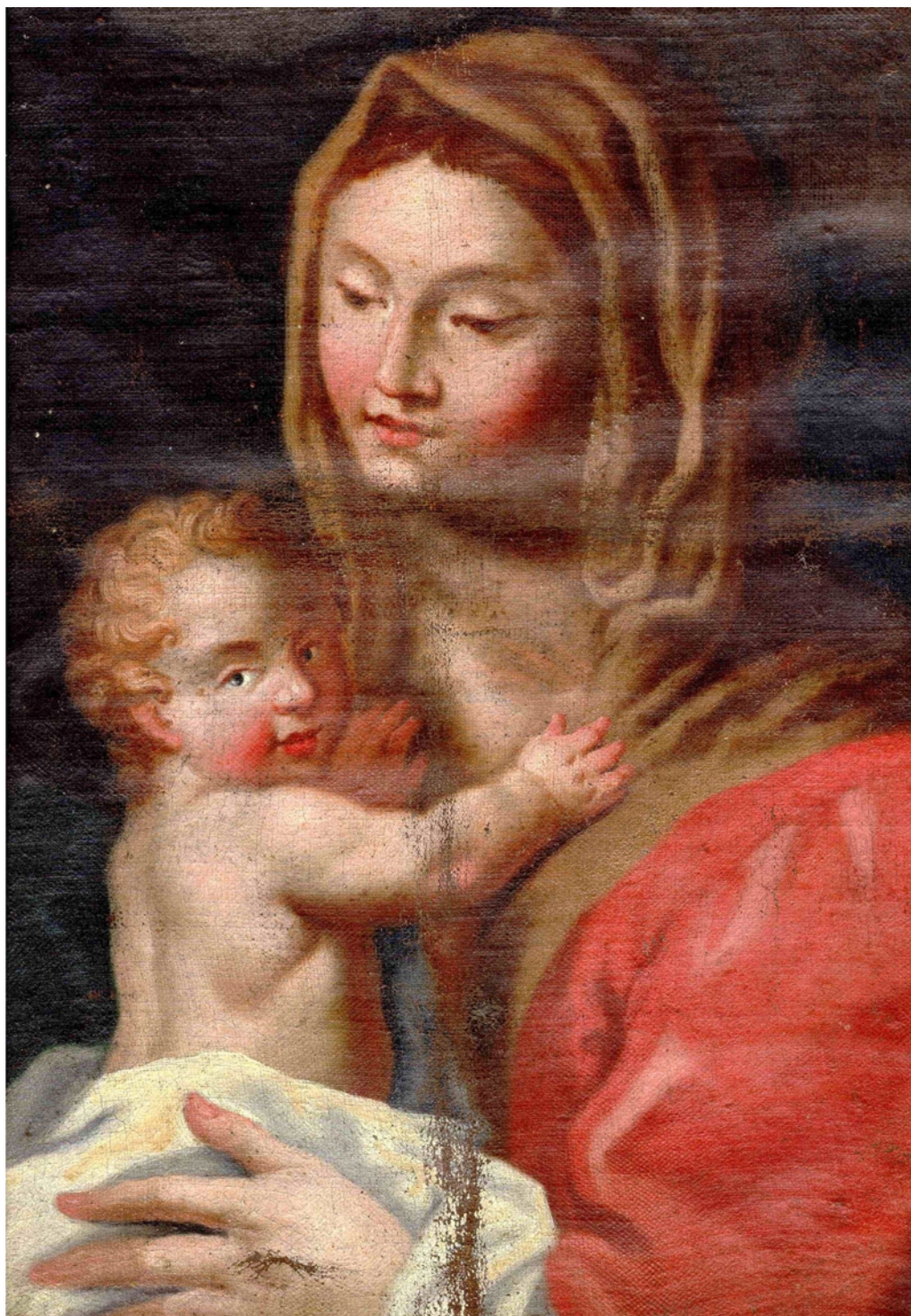


Fig. 2.12a: foto del 4° dipinto

LASTRA



Fig. 2.12b: lastra del 4° dipinto, si distingue chiaramente la trama della tela, sul volto e sulla spalla sinistra della madonna vi sono evidenti “tracce” che non trovano alcuna corrispondenza con ciò che appare sul dipinto e che fanno pensare ad un successivo ritocco.

Le lastre, una volta sviluppate, sono state acquisite all'interno di un P.C. tramite uno scanner, della "HEWLETT PACKARD" modello "SCANJET 6100 C", utilizzando una risoluzione pari a 300 dpi, in modo da avere un'immagine digitale e quindi facilmente riproducibile delle stesse.

In tutti e quattro i dipinti si è notata la presenza di evidenti "*tracce*" che non hanno alcuna corrispondenza con quello che invece appare sulla tela, inoltre, come ad esempio in fig. 2.12b, in corrispondenza di zone di colore uniforme sulle lastre si possono notare dei diversi gradi d'assorbimento dovute ad un chiaro segnale di successivi ritocchi.

Con la stessa procedura utilizzata per analizzare i dipinti è possibile analizzare degli oggetti d'uso comune. A tal scopo sono state caratterizzate due comuni spine, una con attacco di tipo industriale ed una con attacco di tipo tedesco.

Per una buona analisi degli oggetti in questione è stata sufficiente una dose di raggi X inferiore a quella utilizzata normalmente, le condizioni di lavoro sono state le seguenti:

- Tensione 25 KV;
- Corrente 1 mA;
- Distanza tubo - lastra = 1 metro;

- Tempo d'esposizione = 5 min.

LE SPINE

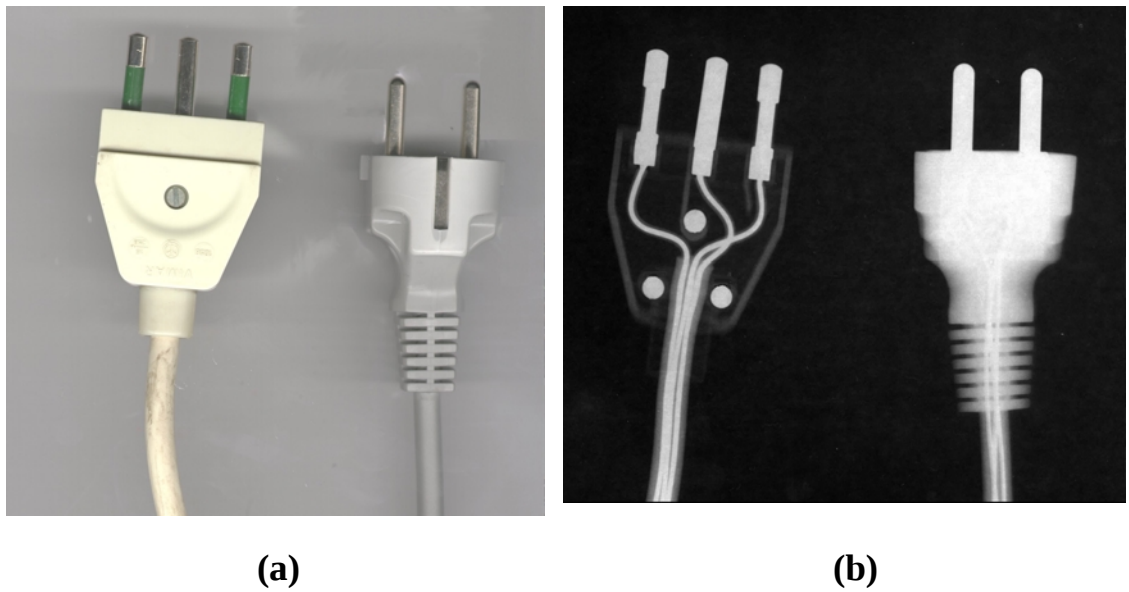


Fig. 2.13: (a)foto delle spine utilizzate per la misura; (b)lastra delle stesse, in essa si possono distinguere chiaramente i fili, inoltre, c'è una netta definizione dei particolari di plastica.

Capitolo 3

Tecnica Radiografica “on-line”

3.1 L'apparato sperimentale.

3.2 La caratterizzazione dello strumento.

3.2.1 La calibrazione.

3.2.2 Misure sugli effetti di bordo.

3.2.3 Misure su un filo.

3.3 Le misure.

3.1 L'apparato sperimentale.

La tecnica che sarà descritta in questo capitolo ha il vantaggio di permettere un'analisi on-line dell'oggetto esaminato; infatti, grazie ad un sistema formato da un cristallo di Ioduro di Cesio, un CCD ed un monitor è possibile istantaneamente visualizzare la risposta del campione all'irraggiamento. Inoltre, grazie ad una scheda d'acquisizione ed un P.C. è possibile registrare la stessa immagine su di un "file".

Questa tecnica, nuova nel suo genere, ha nell'apparato sperimentale, che sarà successivamente descritto, il suo primo prototipo. Altre tecniche hanno utilizzato un CCD per effettuare un'analisi on-line di oggetti, ma, nessuna ha utilizzato come elemento scintillante un monocristallo di Ioduro di Cesio drogato con Tallio.

Nelle figure che seguono vi è uno schema dell'apparato sperimentale nella sua interezza ed una foto di come esso appare durante una misura, successivamente sarà data una breve descrizione degli elementi che sono stati utilizzati per la realizzazione dell'apparato sperimentale e dei motivi che hanno condotto a tale scelta.

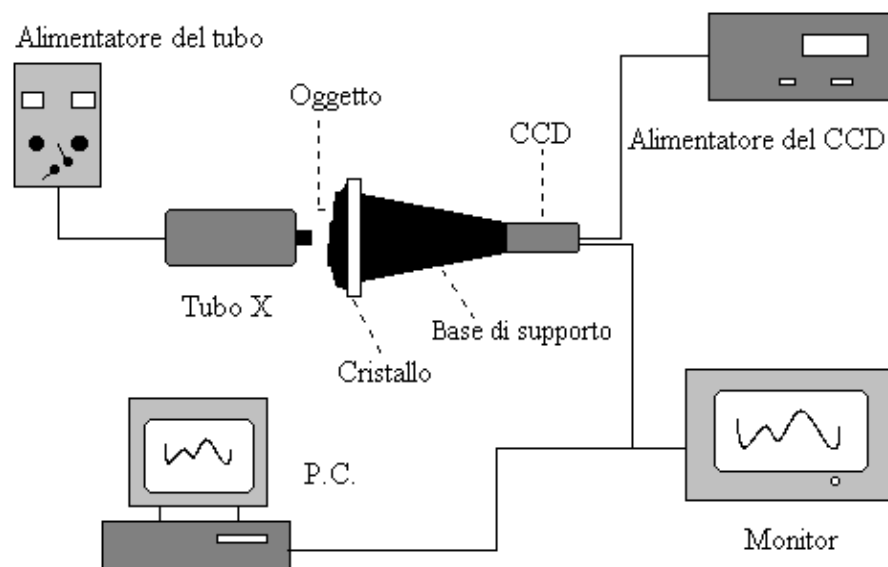


Fig. 3.1: schema dell'apparato sperimentale



Fig. 3.2: foto dell'apparato sperimentale durante la misura su di un dipinto

Il cristallo di Ioduro di Cesio (CsI (Tl))

Lo ioduro di cesio [8], depositato su di un'opportuna cornice di supporto, è fatto crescere, drogandolo opportunamente con Tallio, in modo da ottenere un unico cristallo. Il materiale così ottenuto ha la caratteristica di propagare in modo uniforme la luce ottenendo così una notevole qualità dell'immagine.

Il cristallo colpito dai fotoni X ne convertirà l'energia in luce visibile che sarà successivamente emessa dal materiale. Una percentuale di fotoni, funzione di diversi parametri successivamente descritti, sarà diffusa ed assorbita all'interno del cristallo.

Lo Ioduro di Cesio è generalmente utilizzato come scintillatore sia se drogato con Tallio sia con Sodio, ha, inoltre, un'alta resistenza alle sollecitazioni termiche e meccaniche.

Lo Ioduro di Cesio è solubile in vapore d'acqua, quindi, per maneggiarlo in atmosfera è necessario un particolare processo che lo renda resistente all'umidità. Il cristallo drogato con il Tallio è in ogni caso meno igroscopico che quello drogato con il Sodio o di un cristallo di Ioduro di Sodio drogato con Tallio (NaI(Tl)).

La massima produzione di luce per il cristallo drogato con il Tallio avviene alla lunghezza d'onda di 550 nm (la stessa lunghezza d'onda ottenuta utilizzando delle fibre ottiche) contro i 420 del cristallo drogato con Sodio ed i 415 dello Ioduro di Sodio.

La produzione di luce dovuta ai fotoni è maggiore nel cristallo di Ioduro di Cesium drogato con Tallio che negli altri due.

Le caratteristiche dei tre cristalli sopra menzionati sono riportate nella tabella seguente [9].

Tipo di cristallo	CsI(Tl)	CsI(Na)	NaI(Tl)
Densità [g/cm ³]	4.51	4.51	3.67
Temperatura di fusione [K]	894	894	924
Coefficiente di espansione termica [K ⁻¹]	54*10 ⁻⁶	49*10 ⁻⁶	47.4*10 ⁻⁶
Igroscopico	Leggermente	Si	Si
Lunghezza d'onda alla massima emissione [nm]	550	420	415
Indice di rifrazione alla massima emissione [nm]	1.79	1.84	1.85
Tempo di decadimento [μs]	1	0.63	0.23
Ultimo bagliore (dopo 6 ms.) [%]	0.5-5	0.5-5	0.3-5
Produzione di luce [fotoni/ MeV γ]	52-56*10 ³	38-44*10 ³	38*10 ³

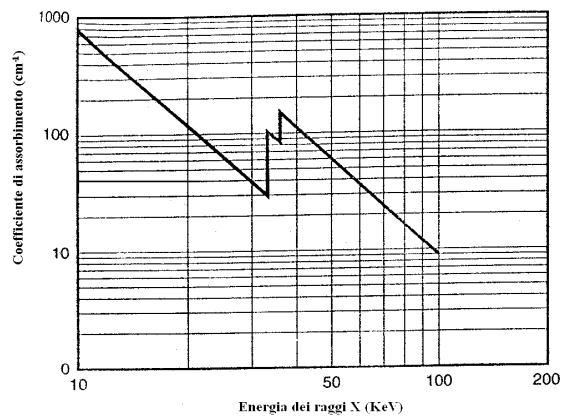
Tab. 3.1: proprietà di CsI(Tl), CsI(Na), NaI(Tl)

Per il presente lavoro è stato utilizzato un cristallo di **CsI(Tl)** delle dimensioni 100*100*2 mm³. Poiché si è previsto di lavorare con valori d'energia di circa 45 KeV ed a temperatura ambiente (circa 300 K),

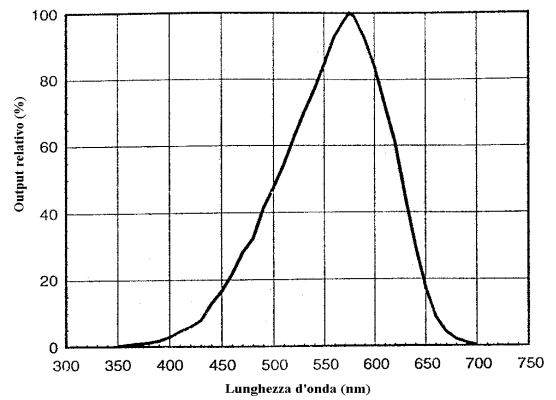
utilizzando le caratteristiche riportate in fig. 3.3 si è previsto un coefficiente di assorbimento di 70 cm^{-1} ed una riduzione della massima intensità luminosa ottenibile di circa il 10 %.

E' chiaro che si sarebbe potuto avere una migliore efficienza del sistema se lo spessore del cristallo fosse stato inferiore a quello utilizzato, infatti, è stato previsto, per una successiva fase del progetto, l'acquisto di un cristallo avente le stesse caratteristiche ma uno spessore di soli $100 \mu\text{m}$.

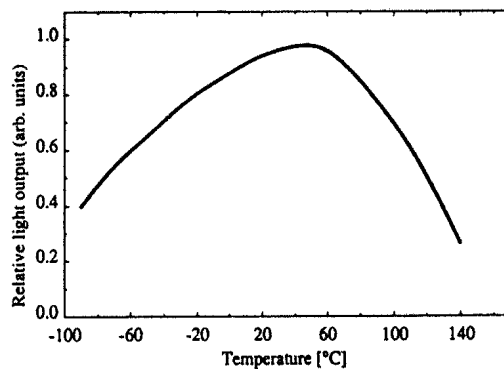
Utilizzando tale dispositivo si ridurranno drasticamente le diffusioni e gli assorbimenti di fotoni all'interno del cristallo ottenendo così una migliore resa luminosa.



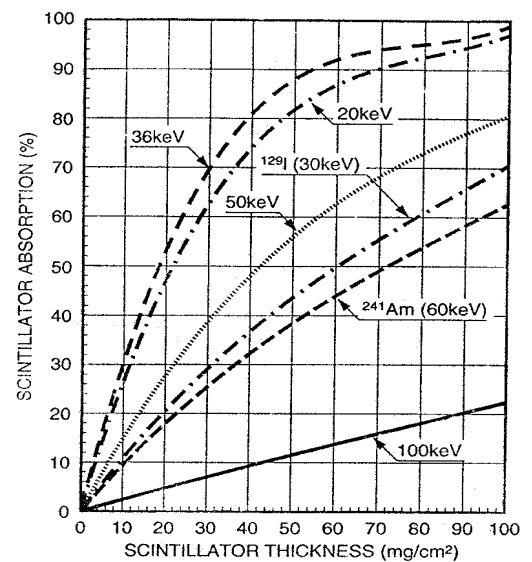
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.3: caratteristiche del CsI(Tl); (a)coefficiente d'assorbimento in funzione dell'energia dei raggi X incidenti, (b)risposta del cristallo in funzione della lunghezza d'onda, (c)intensità luminosa in funzione della temperatura, (d)percentuale d'assorbimento in funzione dello spessore.

La scheda di acquisizione.

All'interno di un P.C. 486DX con 8 Mb di memoria è stata installata una scheda fornita dalla Data Translation, inc. serie DT2867 modello CCIR/PAL che ha le seguenti caratteristiche [10]:

- 4 canali di input monocromatici;
- Una risoluzione di $768 \text{ O} * 512 \text{ V} * 8 \text{ bit}$;
- Possibilità di modificare il guadagno via software;
- Un processore interno 16 bit 25MHz;
- 2 memorie di buffer a 8 bit per l'immagazzinamento dei dati;
- 1 memoria di buffer a 16 bit per il processamento dei dati;
- 3 ALU, 3 moltiplicatori e 3 buffer per processare 3 pixel ed ottenere l'immagine risultante istantaneamente;
- Un circuito di normalizzazione;
- Un generatore di istogrammi;
- Utilizza per la visualizzazione 256 livelli monocromatici di grigio.

Il CCD.

E' stato utilizzato un CCD della COHU appartenente alla serie 4910 modello RS170 in grado di trasmettere un segnale video sia in presenza di una

luce molto intensa sia in condizioni di bassa luminosità. Il CCD ha le seguenti capacità [11]:

- Area d'immagine : $6.4 * 4.8$ mm;
- Elementi attivi : $768 O * 494 V$;
- Grandezza delle celle : $8.4 * 9.8$ μm ;
- AGC : 26 dB, guadagno variabile;
- Velocità di Clock interno : 28.6363 MHz;
- Capacità di sovraccarico : 1000:1;
- Sensibilità : a tutto schermo senza AGC di 0.65 lux.

Lo spettro di risposta è riportato nella figura seguente.

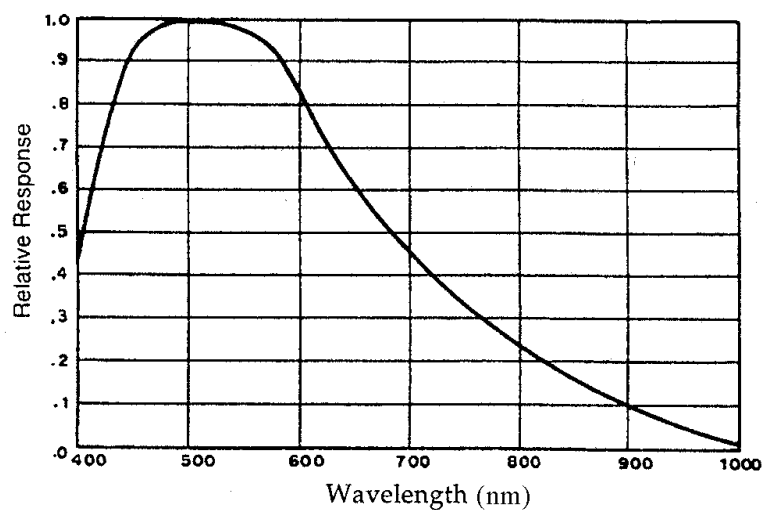


Fig. 3.4: spettro di risposta del CCD in funzione della lunghezza d'onda

La telecamera ed il cristallo sono stati assemblati in un unico corpo inserendoli agli estremi di un tronco di piramide a base quadrata di 30 cm di altezza (fig. 3.5).



Fig. 3.5: foto del corpo cristallo - CCD

Tutte le misure sono state effettuate utilizzando la seguente procedura:

- 1°) Si effettua un'acquisizione con il tubo spento;
- 2°) Si effettua un'acquisizione d'immagine senza l'oggetto;
- 3°) Si pone l'oggetto di fronte al cristallo come in fig. 3.6;
- 4°) Si acquisisce l'immagine al P.C.;

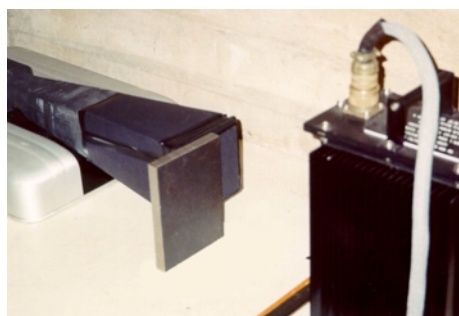


Fig. 3.6: esempio di posizionamento di un oggetto per un'acquisizione.

Terminata la procedura di acquisizione avremo tre immagini che per comodità saranno chiamate “*rumore*”, “*sfondo*” e “*immagine*”. E’ necessario per una corretta analisi acquisire le prime due immagini per i seguenti motivi:

1°) Il CCD è affetto da un rumore statistico intrinseco che si viene a sommare ogni qualvolta noi acquisiamo un’immagine, quindi, se noi sottraessimo questo rumore ad ogni immagine ne otterremmo una migliore definizione.

2°) Si acquisisce lo “*sfondo*” perché, quando noi irradiano direttamente il cristallo, il singolo pixel avrà un’intensità luminosa che possiamo supporre essere pari ad A , quando invece poniamo un oggetto davanti al cristallo l’intensità dello stesso pixel sarà pari ad $Ae^{-\lambda x}$, quindi, facendo il rapporto tra le due immagini, otterremo il termine $e^{-\lambda x}$ che non è altro che l’immagine dell’oggetto [12].

Utilizzando alcuni algoritmi, da me ottimizzati, sono state effettuate operazioni di sottrazione e divisione sulle immagini utilizzando la seguente procedura:

1°) “*immagine*” - “*rumore*” = “*immagine pulita*”;

2°) “*sfondo*” - “*rumore*” = “*sfondo pulito*”;

3°) “*immagine pulita*” / “*sfondo pulito*” = “*immagine finale*”.

Tutte le immagini che sono utilizzate ed ottenute da questa procedura sono bitmap da 768*512 ad 8 bit.

I file bitmap utilizzati sono composti, oltre ad una prima stringa di caratteri identica per tutti i file, da 393216 (768*512) byte corrispondenti ad altrettanti pixel, ognuno dei pixel contiene un'informazione che corrisponde al proprio livello di grigio. I livelli di grigio hanno un valore compreso tra 0 e 255, quindi, in base a tali informazioni, l'algoritmo utilizzato per la sottrazione delle immagini è stato il seguente:

- Leggi il valore del primo pixel di entrambe i file;
- Fai la differenza tra il contenuto del 1° file e del 2° file;
- Scrivi il valore della differenza in un terzo file;
- Ripeti le stesse operazioni per i restanti 393215 pixel.

L'algoritmo utilizzato per la divisione delle immagini è stato il seguente:

- Chiama numeratore il contenuto del 1° file e denominatore il contenuto del 2° file
- Leggi il valore del primo pixel di entrambe i file;

- Se il valore del denominatore è uguale a zero il risultato della divisione è 255;
- Se il valore del denominatore è diverso da zero ed il valore del numeratore è zero il risultato della divisione è zero;
- Se i valori del denominatore e del numeratore sono diversi da zero il risultato della divisione è dato dal minimo tra 255 e $\frac{\text{numeratore}}{\text{denominatore}} * 255$;
- Scrivi il risultato della divisione su un terzo file;
- Ripeti le stesse operazioni per i restanti 393215 pixel.

Gli algoritmi sopra menzionati e quelli che lo saranno successivamente sono stati implementati tutti utilizzando il FORTRAN.

3.2 La caratterizzazione dello strumento.

Per caratterizzare lo strumento e calcolare la risoluzione del singolo pixel sono stati utilizzati tre oggetti:

- Una griglia con passo noto di 2.54 mm;
- Una lastra d'acciaio dello spessore di 2mm con un lato perfettamente tagliato;
- Un filo d'acciaio di 0.5 mm di diametro.

Gli oggetti sono stati adagiati a ridosso del cristallo (esempio in fig. 3.6) con l'uscita del tubo posta ad una distanza di 15 cm dal cristallo. Per tutte le acquisizioni è stata impostata via software la condizione **Frame=255**, cioè, l'immagine che alla fine veniva visualizzata, ed eventualmente registrata, era ottenuta come media di 255 immagini acquisite.

Il sistema per acquisire le 255 immagini impiegava circa tre min.

3.2.1 La calibrazione.

Per la calibrazione si è utilizzata una griglia di rame dello spessore di 0.5 mm caratterizzata dall'avere un passo costante di 2.54 mm; le condizioni di lavoro sono state le seguenti:

- Tensione 30 KV;
- Corrente 0.83 mA.

Alla fine delle operazioni d'acquisizione, sottrazione e divisione delle immagini si è ottenuto il seguente risultato:

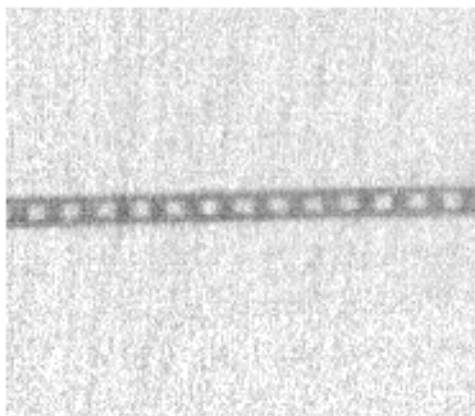


Fig. 3.7: immagine ottenuta utilizzando la tecnica on-line della griglia di calibrazione

A questo punto, utilizzando un ulteriore programma da me ottimizzato, il cui algoritmo è riportato nella pagina seguente, è stato ricavato il profilo dell'immagine. Successivamente, utilizzando un FIT sinusoidale del tipo:

$$\alpha_1 + \alpha_2 * x + \alpha_3 * \text{sen}(\alpha_4 * x + \alpha_5) \quad 3.1$$

in cui α_1 , α_2 , α_3 , α_4 e α_5 sono dei parametri liberi, si è calcolata la dimensione equivalente del singolo pixel che è risultata di 190*190 μm .

Utilizzando le informazioni sui file, descritte nel paragrafo precedente, è stato ricavato il seguente algoritmo:

- Si definisce inserendo le coordinate (x , y) di due punti la zona dell'immagine da cui si desidera estrarre il profilo;
- se si desidera il profilo orizzontale somma i “*valori dei pixel*” contenuti nelle varie colonne una per una e ne scrive i vari risultati in un file;
- se si desidera il profilo verticale somma i “*valori dei pixel*” contenuti nelle varie righe una per una e ne scrive i vari risultati in un file;

3.2.2 Misure sugli effetti di bordo.

Per le misure sugli effetti di bordo si è posta una lastra d'acciaio dello spessore di 2 mm davanti al cristallo in modo da oscurarne circa la metà, le condizioni di lavoro sono state le seguenti:

- Tensione 48 KV;
- Corrente 1.17 mA.

Alla fine delle medesime operazioni d'acquisizione, sottrazione e divisione delle immagini si è ottenuto il seguente risultato:

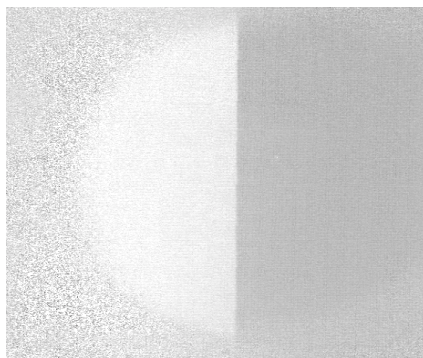


Fig. 3.8: immagine ottenuta con la tecnica on-line di una lastra d'acciaio posta davanti al cristallo. La parte più chiara è dovuta alla presenza di una maggiore intensità di raggi X su quella zona.

A questo punto utilizzando il solito software si sono ottenuti i seguenti profili:

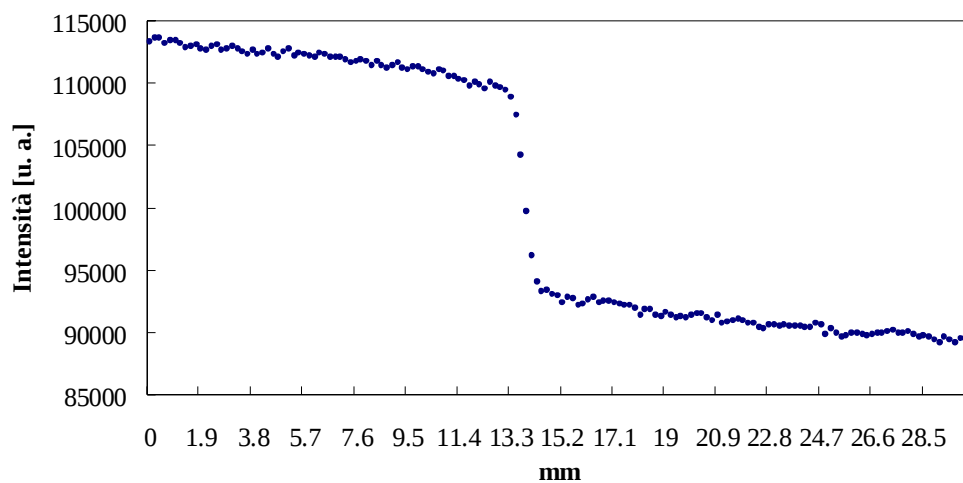


Fig. 3.9: Profilo completo del bordo della lastra, la pendenza dei dati è dovuta ad un non perfetto allineamento tra fascio X incidente e cristallo

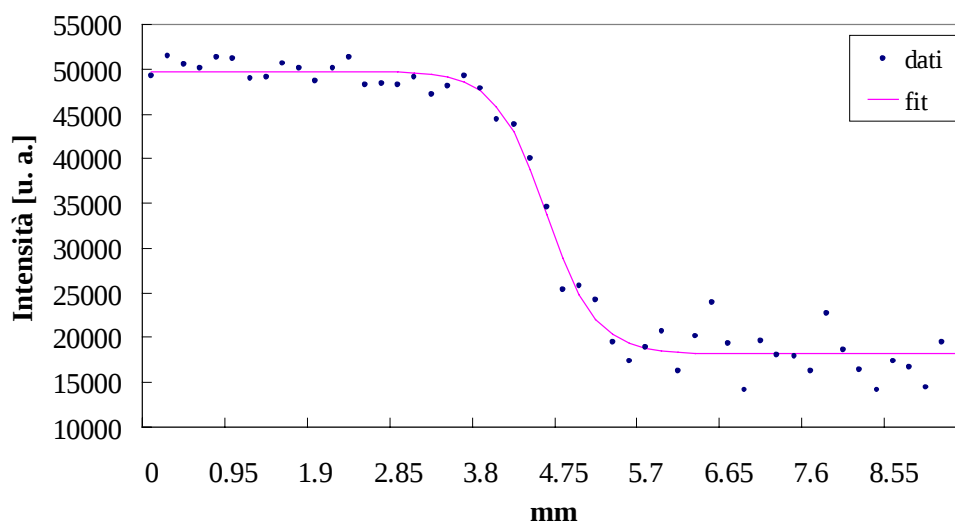


Fig. 3.10: profilo ottenuto intorno al bordo della lastra utilizzando un'area, da cui si è estratto il profilo, inferiore alla precedente

I dati sperimentali sono stati "fittati" utilizzando una funzione a gradino del tipo [13]:

$$\alpha_2 + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{1 + \exp(\frac{x - \alpha_4}{\alpha_3})} \quad 3.2$$

in cui α_1 , α_2 , α_3 e α_4 sono dei parametri liberi.

La derivata della risposta al gradino è una curva a campana che contiene informazioni sulle prestazioni ottenibili dallo strumento nel suo insieme in termini di risoluzione spaziale. Tale campana è la risposta ad una (ipotetica) sollecitazione di tipo funzione δ .

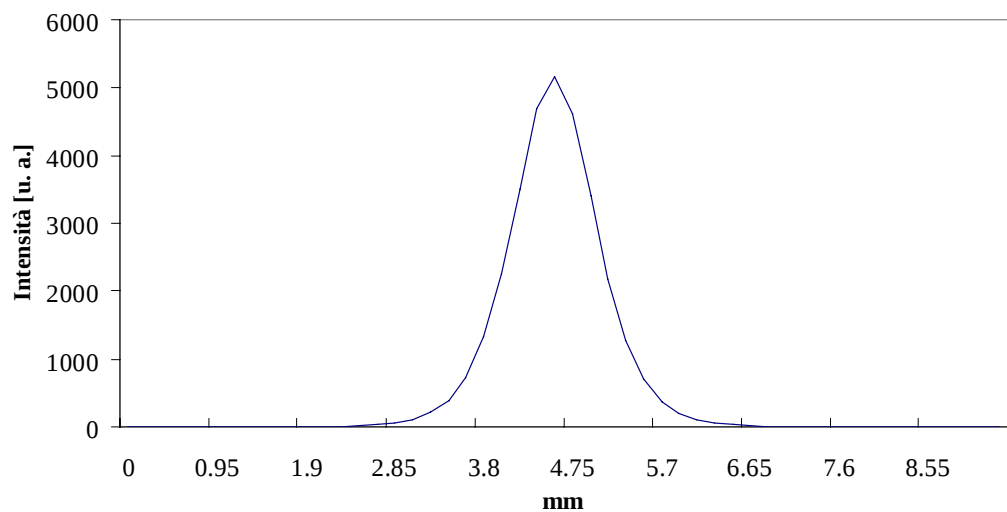


Fig. 3.11: funzione a campana ottenuta dalla derivata della risposta al gradino

Se s'immagina di effettuare un'analisi di Fourier sull'immagine in termini di frequenza spaziale (linee/mm), la risposta dello strumento non sarà

uniforme, bensì avrà un andamento dipendente dalle diverse frequenze spaziali presenti nell'immagine primaria. La funzione MTF (Modulation Transfer Function) ci dice con quale efficienza lo strumento risponde alle varie frequenze.

Una buona approssimazione si ottiene utilizzando la seguente funzione [14]:

$$MTF = \frac{1}{1 + 4\pi^2 \sigma^2 \nu^2} \quad 3.3$$

in cui il σ è quello ottenuto dalla derivata della risposta al gradino e risulta essere pari a 0.26 mm.

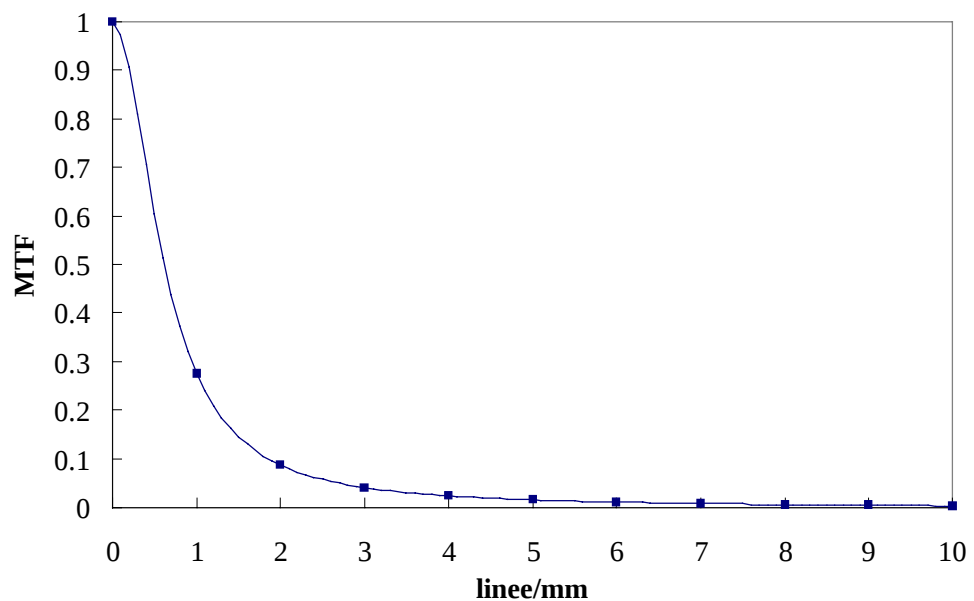


Fig. 3.12: MTF del bordo della lastra d'acciaio

3.2.3 Misure su un filo.

Per le misure sul filo d'acciaio da 0.5 mm le condizioni di lavoro sono state le seguenti:

- Tensione 30.1 KV;
- Corrente 0.81 mA.

Ultimate le solite operazioni di acquisizione, sottrazione e divisione delle immagini si è ottenuto il seguente risultato:

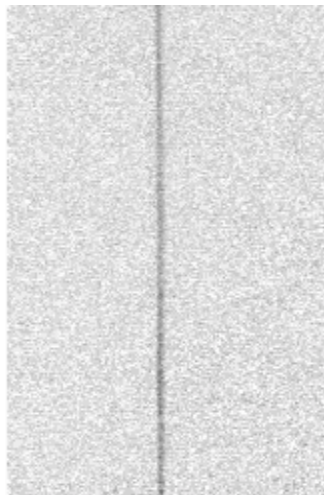


Fig. 3.13: immagine ottenuta con la tecnica on-line di un filo d'acciaio di $\phi=500\ \mu\text{m}$

Attraverso analisi software sono stati successivamente ottenuti i seguenti profili:

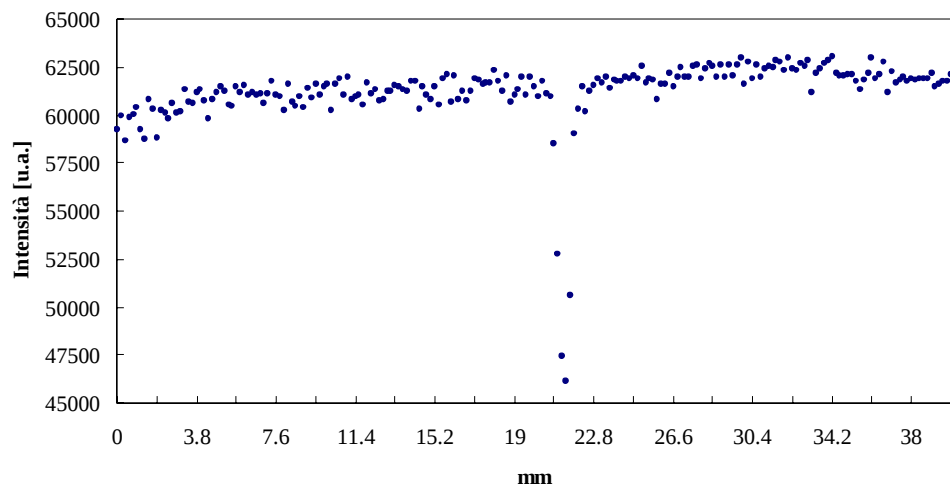


Fig. 3.14: Profilo completo del filo, la pendenza dei dati è dovuta ad un non perfetto allineamento tra fascio X incidente e cristallo

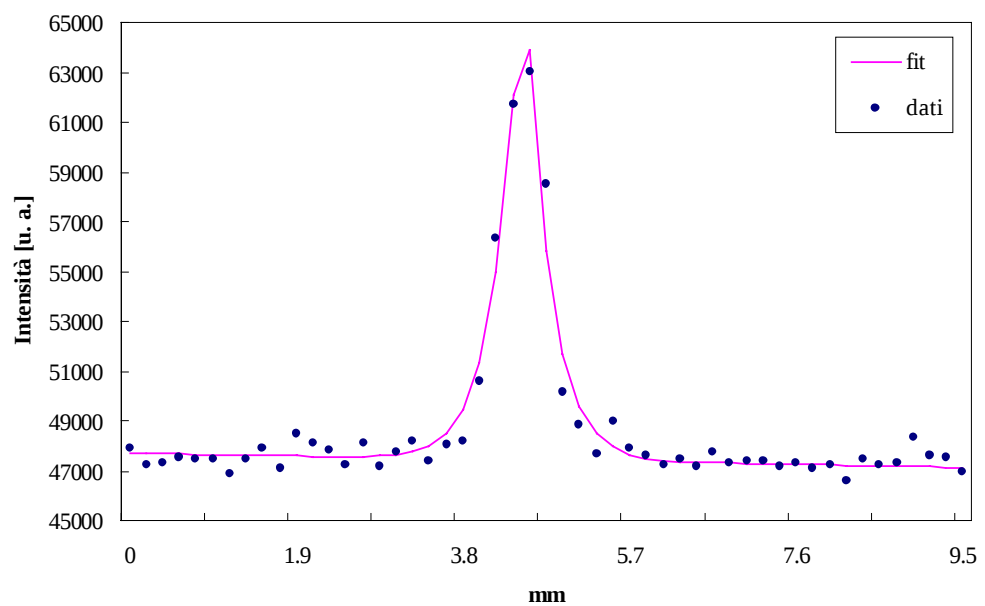


Fig. 3.15 profilo ottenuto intorno al filo utilizzando un'area, da cui si è estratto il profilo, inferiore alla precedente; il profilo è stato inoltre rovesciato per poterlo fittare con una funzione di tipo gaussiano

La campana nella fig. 3.15 è stata capovolta utilizzando la seguente funzione:

$$\text{new_value} = \text{max_value} - \text{old_value} + \text{min_value} \quad 3.4$$

I dati sperimentali sono stati fittati utilizzando una funzione del tipo [15]:

$$\alpha_1 + \alpha_2 x + \exp\left(-\frac{|x - \alpha_3|}{\alpha_4}\right) \quad 3.5$$

con α_1 , α_2 , α_3 e α_4 sempre parametri liberi. Per il calcolo dell'MTF si è utilizzata la (3.3) in cui $\sigma = \alpha_4 = 0.28$ mm (valore ottenuto dopo il FIT).

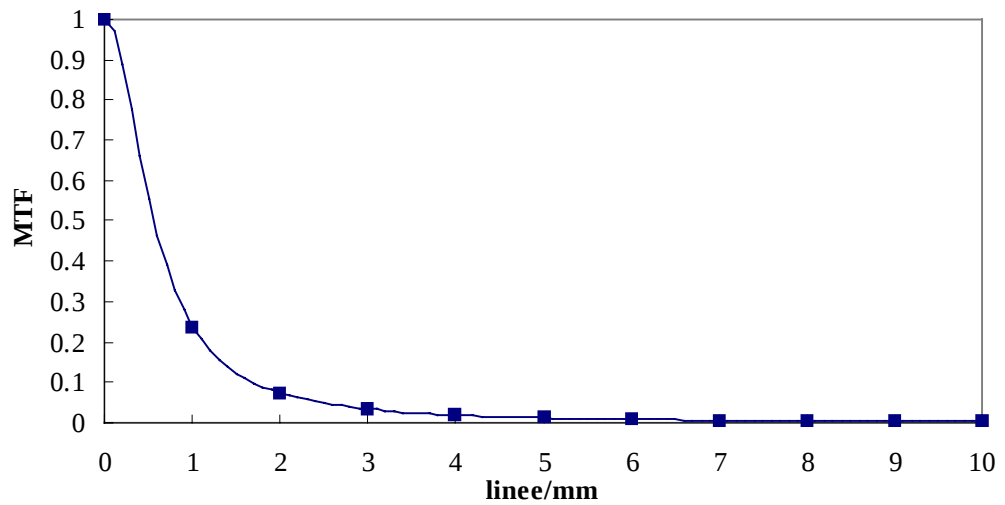


Fig. 3.16: MTF del filo di acciaio

In ultimo sono confrontati gli MTF ottenuti nei due casi.

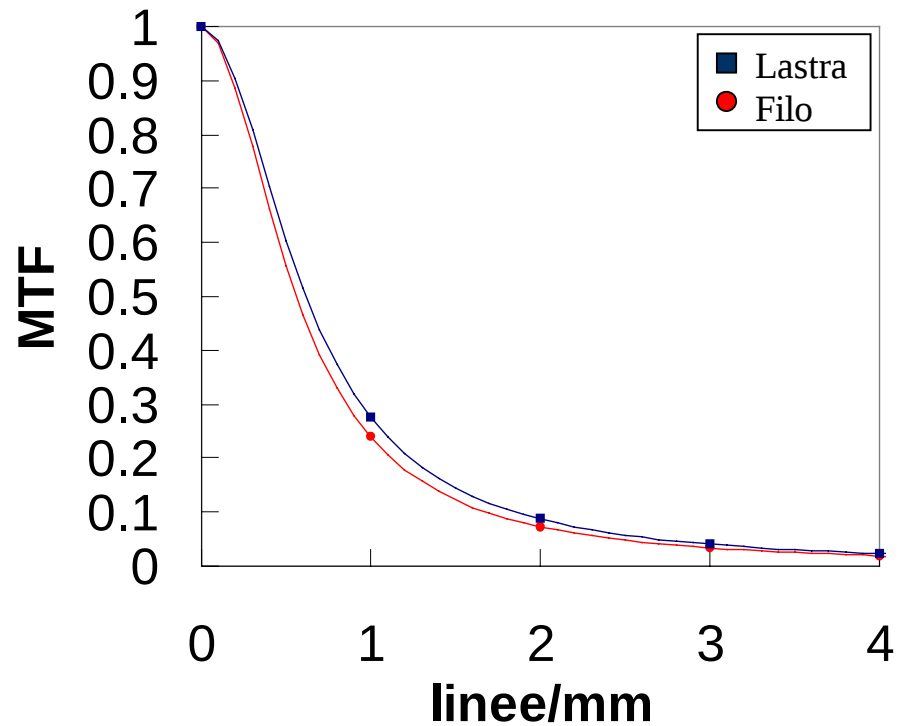


Fig. 3.17: confronto tra gli MTF ottenuti nei due casi, la curva in rosso è riferita ai valori ottenuti con il filo d'acciaio, la curva in blu è riferita ai valori ottenuti con la lastra d'acciaio

Dal grafico è evidente come le due misure effettuate con metodi indipendenti diano risultati equivalenti.

Il rapido peggioramento della risposta al crescere della frequenza spaziale è da imputare sia alla dimensione equivalente del pixel ($190 \times 190 \mu\text{m}$) che all'elevato spessore dello schermo in CsI(Tl).

3.3 Le misure.

Utilizzando questa nuova tecnica sono stati analizzati gli stessi oggetti visti nel capitolo precedente. La procedura d'acquisizione delle immagini è stata la stessa di quella utilizzata per la caratterizzazione dello strumento.

Le misure dei dipinti sono state effettuate ponendo la parte dipinta della tela a ridosso del cristallo (fig. 3.18), poiché i raggi X producono sul cristallo della luce, le immagini ottenute, al contrario delle lastre, sono dei positivi.

Una volta effettuate le solite operazioni d'acquisizione ed elaborazione descritte nel paragrafo 3.1, le immagini finali, per essere facilmente confrontate con quelle ottenute con la tecnica off-line, sono state invertite via software con un programma per il trattamento delle immagini.



Fig. 3.18: esempio di posizionamento di un dipinto nella tecnica on-line

1° DIPINTO

Sul dipinto sono state effettuate due differenti analisi, una con il tubo posto a 40 cm dal cristallo ed una con il tubo posto a 20 cm. In entrambi i casi si è analizzata la stessa zona, nel primo caso il fascio irradiava in maniera uniforme il cristallo, nel secondo caso, invece, solo la zona segnata dalla circonferenza di colore rosso in fig. 3.19a ne era irradiata. Le condizioni di lavoro sono state per entrambe i run di misura:

- Tensione 50 KV;
- Corrente 1,17 mA.

Poiché nel secondo caso la zona del cristallo irradiata era soggetta ad una dose di raggi X quattro volte maggiore del primo (la distanza era dimezzata), l'immagine che ne è scaturita è risultata essere più leggibile della prima ed i particolari nettamente più contrastati.

I risultati delle misure sono stati elaborati con un ulteriore software, il cui algoritmo è riportato nella pagina seguente, che oltre ad effettuare la divisione tra due immagini, come nel caso della caratterizzazione dello strumento, possiede un secondo algoritmo che evita di ridurre la dinamica d'intensità a causa dell'arrotondamento ad interi dopo la divisione (problema che invece si presenta utilizzando dei software commerciali).

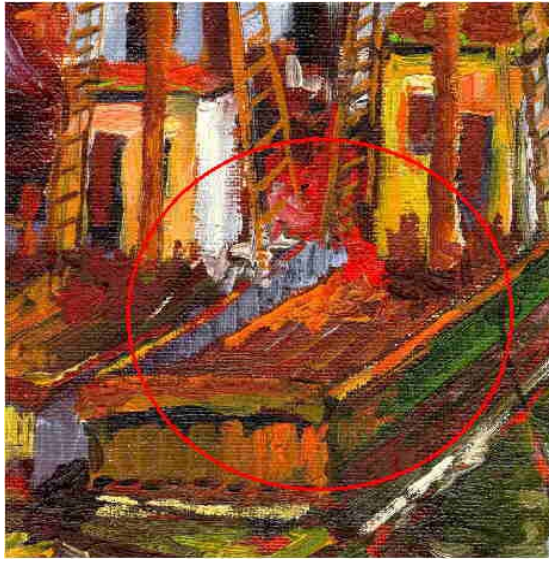
L'algoritmo utilizzato è il seguente:

- - Chiama numeratore il contenuto del 1° file e denominatore il contenuto del 2° file;
- Definisci x_1 e x_2 gli estremi dello spettro che desideri allargare;
- Leggi il valore del primo pixel di entrambe i file;
- Se il valore del denominatore è uguale a zero il risultato della divisione è 255;
- Se il valore del denominatore è diverso da zero ed il valore del numeratore è zero il risultato della divisione è zero;
- Se i valori del denominatore e del numeratore sono diversi da zero il risultato della divisione è dato dal minimo tra 255 e $\frac{\text{numeratore}}{\text{denominatore}} * 255$;
- Se il risultato della divisione è minore di x_1 allora scrivi su di un terzo file zero;
- Se il risultato della divisione è maggiore di x_2 allora scrivi su di un terzo file 255;
- Se il risultato della divisione è compreso tra x_1 e x_2 allora scrivi su di un terzo il risultato della seguente operazione:

$$\frac{val_div - x_1 + 1}{x_2 - x_1 + 1} * 255 \quad 3.6$$

- Ripeti le stesse operazioni per i restanti 393215 pixel.

I risultati delle “*due misure*” sono visualizzati rispettivamente in fig. 3.19b e 3.19c.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.19: a)particolare del 1° dipinto, la zona all'interno del cerchio rosso corrisponde a quella esaminata con il tubo posto a 20 cm; b)immagine ottenuta con il tubo posto a 40 cm; c)immagine ottenuta con il tubo posto a 20 cm; nella prima immagine la trama della tela non è ben definita, nella seconda immagine la stessa trama è chiara ed i particolari sono più contrastati, sono anche visibili particolari che nella prima immagine non appaiono, in entrambe, in corrispondenza della scaletta di destra, si può notare il ritocco dell'artista.

2° DIPINTO

Per analizzare questo dipinto è stata effettuata una misura con le seguenti condizioni di lavoro:

- Distanza cristallo – tubo = 40 cm;
- Tensione 50 KV;
- Corrente 1,18 mA.

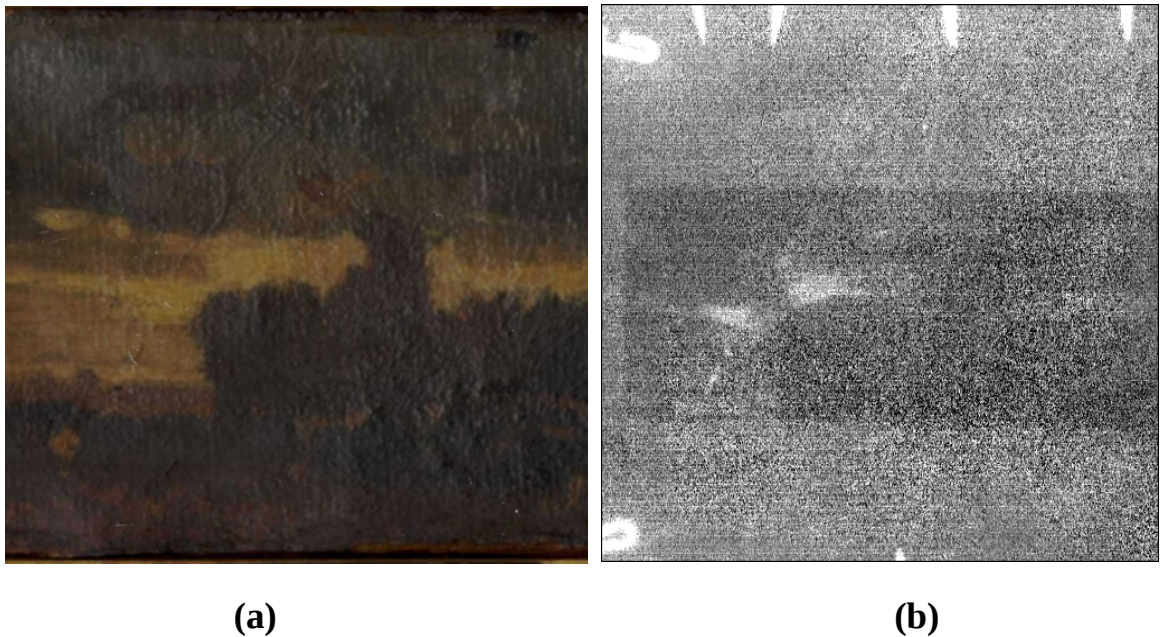


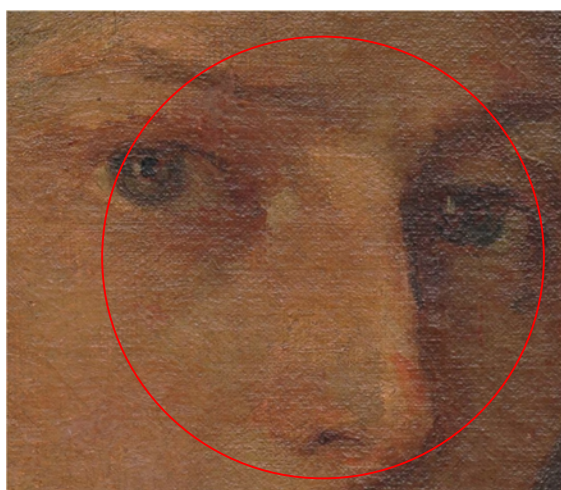
Fig. 3.20: a)particolare del 2° dipinto; b)immagine ottenuta con la tecnica on-line; in fig. b la trama della tela appare confusa, si notano delle “macchie” che non trovano alcuna corrispondenza con ciò che appare sul dipinto, i chiodi sono invece ben definiti.

3° DIPINTO

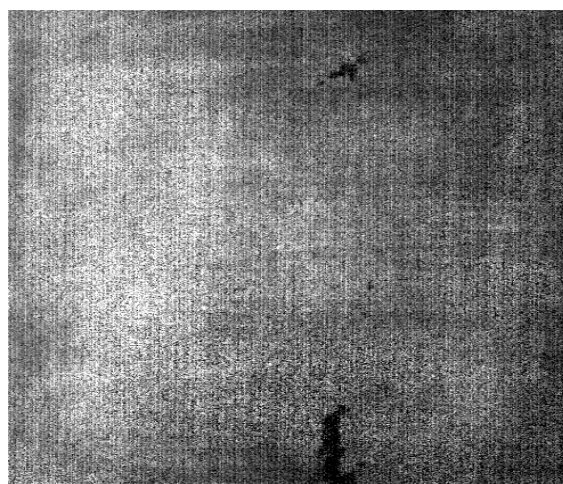
Per analizzare questo dipinto sono state effettuate due misure, sulla stessa zona, una col tubo a 40 cm dal cristallo ed una a 20 cm, le condizioni di lavoro sono state le stesse in entrambe i casi:

- Distanza cristallo – tubo = 40 cm;
- Tensione 50 V;
- Corrente 1,18 mA.

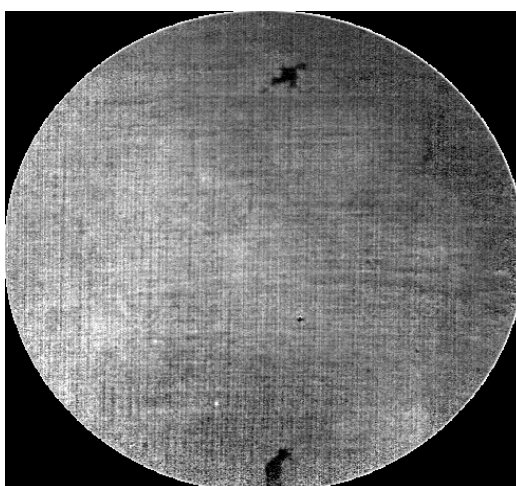
Anche in questo caso l'immagine ottenuta con il tubo posto a 20 cm, corrispondente alla zona segnata dalla circonferenza di colore rosso in fig. 3.21a, e riportata in fig. 3.21c, ha una definizione migliore di quella ottenuta col tubo posto a 40 cm e riportata in fig. 3.21b.



(a)



(b)



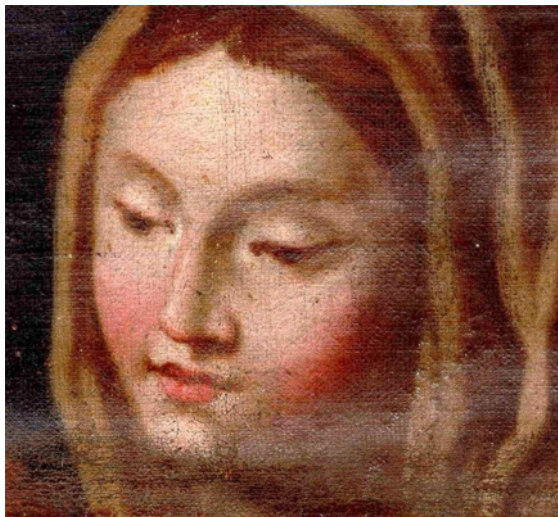
(c)

Fig. 3.21: a) particolare del 3° dipinto, la zona all'interno del cerchio rosso corrisponde a quella esaminata con il tubo posto a 20 cm; b) immagine ottenuta con il tubo posto a 40 cm; c) immagine ottenuta con il tubo posto a 20 cm; nella prima immagine la trama della tela appare confusa, si notano delle “*macchie nere*” probabilmente dovute a lacerazioni della tela, nella seconda immagine la trama appare ben definita e i particolari sono più contrastati.

4° DIPINTO

Per analizzare questo dipinto è stata effettuata una misura con le seguenti condizioni di lavoro:

- Distanza cristallo – tubo = 40 cm;
- Tensione 48 KV;
- Corrente 1,17 mA.



(a)



(b)

fig. 3.22: a)particolare del 4° dipinto; b)immagine ottenuta con la tecnica on-line; in fig. b la trama della tela è ben definita, si riescono a distinguere i particolari del volto, nella parte destra dell'immagine ed accanto al naso si possono notare delle “macchie” che non hanno corrispondenza sul dipinto.

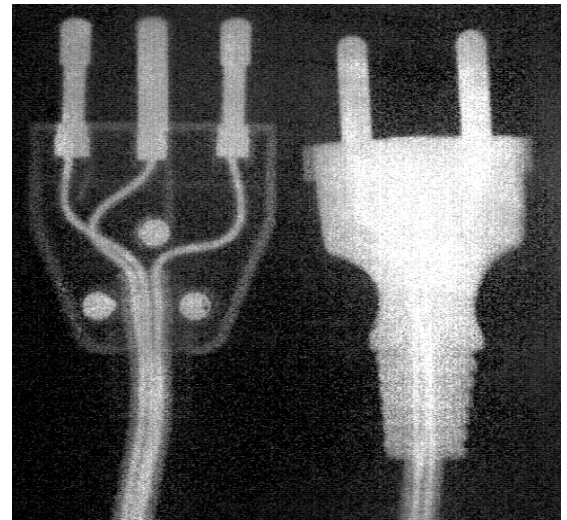
LE SPINE

Per analizzare le spine è stata effettuata una misura con le seguenti condizioni di lavoro:

- Distanza cristallo – tubo = 40 cm;
- Tensione 48 KV;
- Corrente 1,17 mA.



(a)



(b)

Fig. 3.23: a)foto delle spine; b)immagine ottenuta con la tecnica on-line; in fig. b si possono distinguere nettamente i fili, c'è una netta definizione dei particolari di plastica.

Capitolo 4

Confronti sulle due tecniche

4.1 I confronti.

4.2 Le conclusioni.

4.1 I confronti.

Nel seguente paragrafo si confronteranno i risultati ottenuti con le due differenti tecniche.

Le lastre ottenute con la tecnica **off-line** sono state acquisite al P.C. tramite uno scanner utilizzando una risoluzione pari a 300 dpi, quindi, si avrà una definizione del singolo pixel pari a circa 84.7 μm .

Di contro, con la tecnica **on-line**, si era ottenuta una risoluzione del singolo pixel di 190 μm , quindi, le immagini finali ottenute con la tecnica **off-line**, come si potrà notare nelle pagine seguenti, avranno una definizione migliore.

Per finire, si potrà notare come le immagini ottenute con la tecnica **on-line**, appaiano più “*chiare*” e con i contorni più “*morbidi*” rispetto alle immagini ottenute con la tecnica **off-line**.

Particolare del 1° dipinto

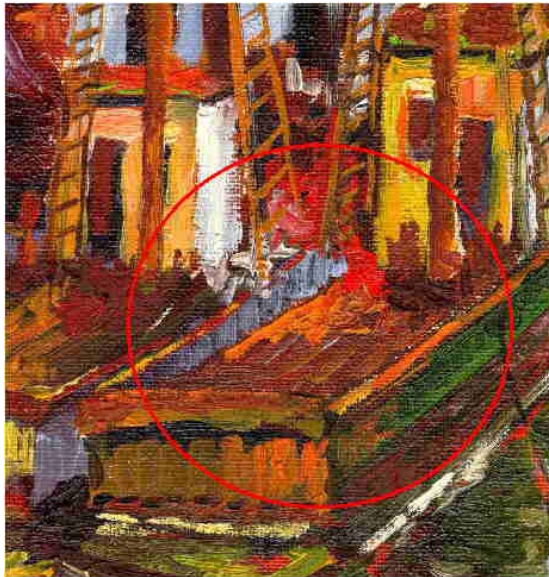


Fig. 4.1a

Tecnica off-line

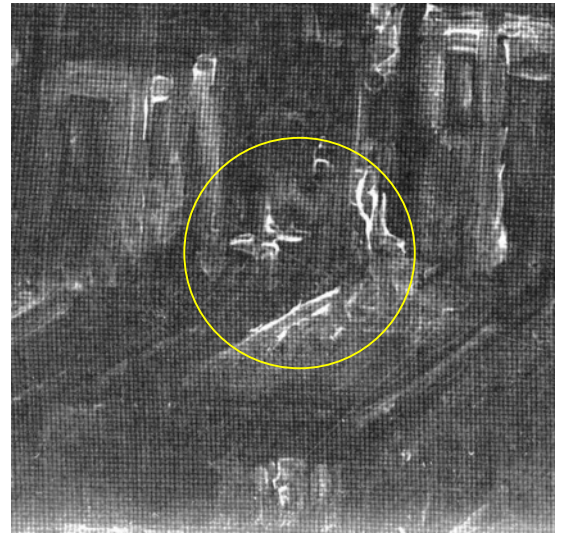


Fig. 4.1b

Tecnica on-line



Fig. 4.1c

Il cerchio di colore rosso nella fig. 4.1a rappresenta la zona esaminata con la tecnica **on-line**.

Con entrambe le tecniche si riescono a notare gli stessi particolari.

Osservando all'interno dei due cerchi di colore giallo, oltre al "ritocco" dell'artista, si può chiaramente notare come l'immagine ottenuta con la tecnica **off-line** abbia una definizione migliore di quella ottenuta utilizzando la tecnica **on-line**.

Particolare del 2° dipinto



Fig. 4.2a

Tecnica off-line

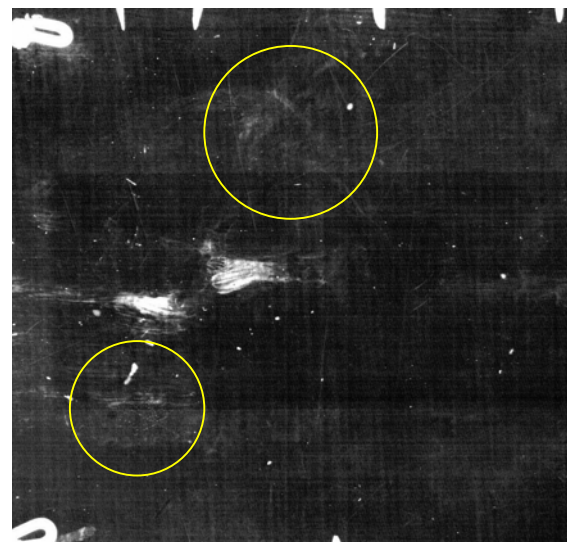


Fig. 4.2b

Tecnica on-line

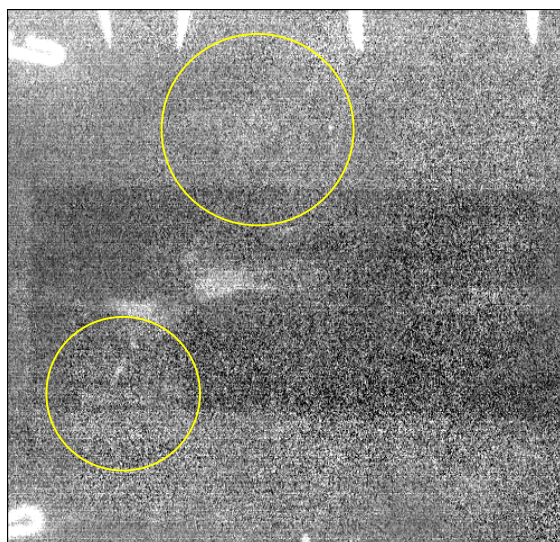


Fig. 4.2c

All'interno dei cerchi gialli di fig. 4.2b si possono notare dei particolari che non sono visibili in fig. 4.2c.

I chiodi sono perfettamente visibili con entrambe le tecniche anche se appaiono meglio definiti con la tecnica **off-line**.

Particolare del 3° dipinto

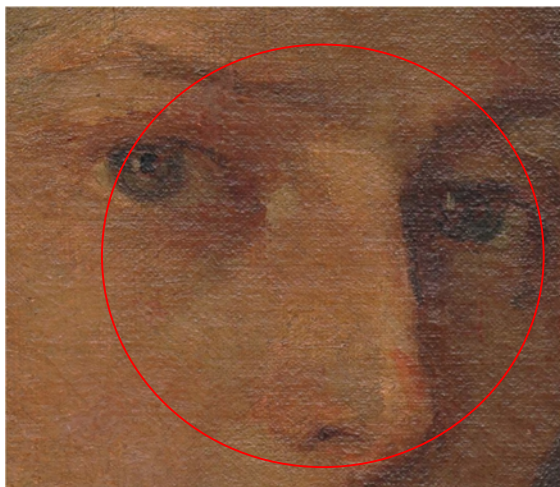


Fig. 4.3a

Tecnica off-line

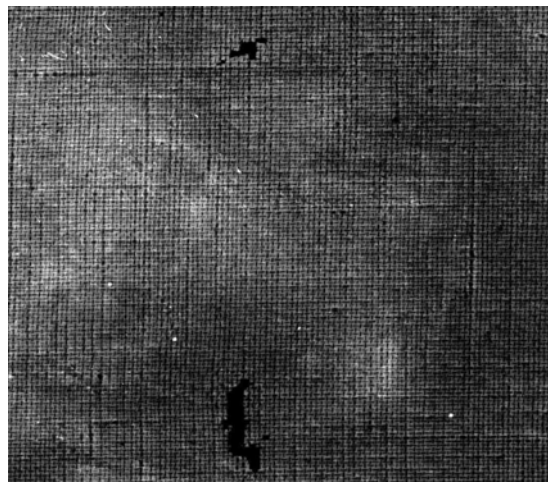


Fig. 4.3b

Tecnica on-line

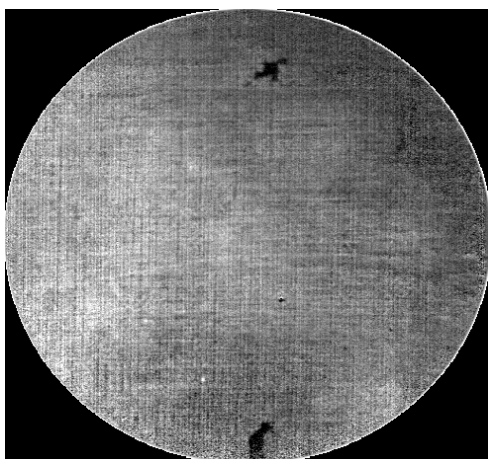


Fig. 4.3c

La circonferenza rossa presente in fig. 4.3a rappresenta la zona esaminata con la tecnica **on-line**.

Con entrambe le tecniche non è possibile distinguere i particolari del volto ma solo la trama della tela ed alcune “*macchie*”.

Sia in fig. 4.2b sia in fig. 4.2c sono presenti le stesse “*macchie nere*”, dovute probabilmente a lacerazioni della tela, che si riescono a distinguere più facilmente con la tecnica **on-line** perché l’immagine della trama della tela appare meno marcata rispetto a quella ottenuta con la tecnica **off-line**.

Particolare del 4° dipinto

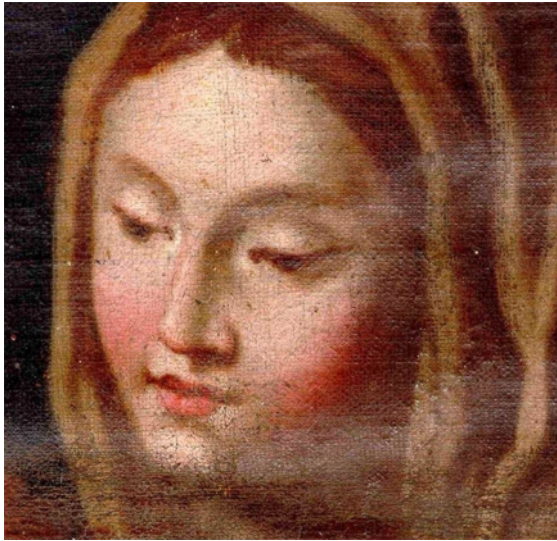


Fig. 4.4a

Tecnica off-line



Fig. 4.4b

Tecnica on-line



Fig. 4.4c

Con entrambe le tecniche si riescono a notare gli stessi particolari.

Il volto della madonna appare ben definito con entrambe le tecniche anche se in fig. 4.4b i particolari appaiono meglio definiti che in fig. 4.4c.

Foto delle spine

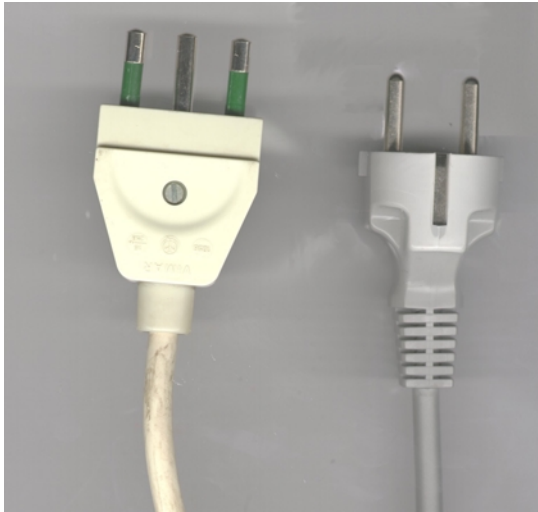


Fig. 4.5a

Tecnica off-line

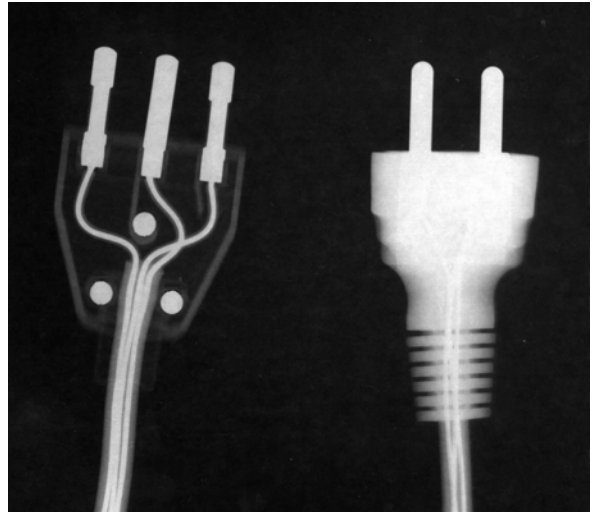


Fig.4.5b

Tecnica on-line

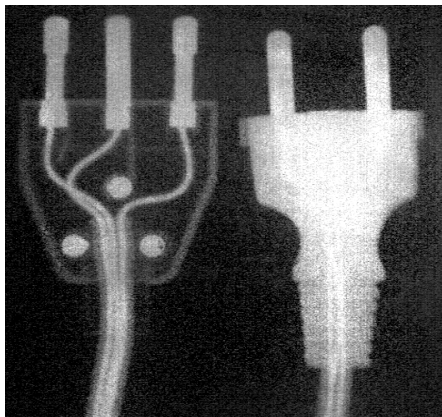


Fig. 4.5c

Con entrambe le tecniche si riescono a notare gli stessi particolari, la qualità dell'immagine appare identica.

Osservando le fig. 4.5b e 4.5c si può notare che, tra un'acquisizione e l'altra, la spina con attacco di tipo tedesco è stata leggermente ruotata e che la spina con attacco industriale è stata capovolta.

4.2 Le conclusioni.

Il presente lavoro ha mostrato come sia possibile, utilizzando due differenti tecniche, effettuare un'analisi non distruttiva su manufatti di varie origini ed aventi differenti caratteristiche.

In base a quanto riportato nei capitoli precedenti e dai confronti effettuati nel paragrafo precedente, si evince che i risultati ottenuti con la tecnica **off-line** risultano apparentemente migliori di quelli ottenuti con la tecnica **on-line**.

Se analizziamo separatamente le due differenti tecniche noteremo che:

- La tecnica **off-line** richiede, per una corretta analisi, in virtù delle caratteristiche delle lastre radiografiche che sono utilizzate, un'esposizione dell'oggetto ad una dose di raggi X di circa 0.3 rem ($1 \text{ r} = 0.01 \text{ Sv}$), inoltre, con questa tecnica è possibile analizzare i risultati ottenuti solo dopo aver sviluppato la lastra.
- La tecnica **on-line** richiede, in virtù delle caratteristiche del sistema utilizzato, un'esposizione del manufatto ad una dose di circa 0.2 rem. A causa del tempo morto, dovuto alla scheda d'acquisizione, solo il 5% (0.01 rem) di tale dose è utilizzata per la misura. La

tecnica **on-line**, inoltre, permette, tramite il monitor, una visualizzazione “*on-line*” dell’analisi.

I risultati, apparentemente peggiori, ottenuti con la tecnica **on-line** sono quindi dovuti alle caratteristiche del sistema d’acquisizione utilizzato, infatti, è stata prevista una seconda fase di sviluppo per tale tecnica in cui, oltre alla sostituzione del cristallo di Ioduro di Cesio drogato con Tallio (CsI(Tl)) con uno di spessore inferiore, saranno acquistati un CCD ed una scheda d’acquisizione d’ultima generazione che consentiranno di abbassare notevolmente i tempi morti d’acquisizione e di migliorare la risoluzione intrinseca del singolo pixel.

Nota: In seguito a misure accurate di energia degli X si è evidenziato uno *shift* rispetto ai valori letti e riportati nel presente lavoro. Tale inconveniente non inficia i risultati ottenuti e le conclusioni tratte.

REFERENCE.

- [1] W.S.C. Williams, Nuclear and Particle Physics, Oxford Science Publication.
- [2] Roberto Cesareo, Nuclear Analytical Techniques in Medicine, Elsevier.
- [3] Rolf Woldseth, X-Ray Energy Spectrometry, Wiley Interscienze Publication.
- [4] Ron Jenkins, X-Ray Fluorescence Spectrometry, Wiley Interscienze Publication.
- [5] Gilardoni – Ascani Orsini – Taccani, X-Rays in Art, Gilardoni S.p.a..
- [6] Ibidem.
- [7] Ibidem.
- [8] Hamamatsu, Fiber Optic Plate with Scintillator for Digital X-Ray imaging, Tecnical information, feb. 1996.
- [9] HARSHAW, Scintillator Detectors, Reference Guide.
- [10] Data Translation, DT2867 - CIR/PAL User Guide.
- [11] COHU, 4910 – RS170 User Guide.
- [12] William R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer- Verlag.

- [13] E. Bertolucci et al., IEE Transactions on Nuclear Science, v.45, No 3, June 1998, p. 406.
- [14] V. Kaftandjian et al., J. X-ray Sci. Tech., v.6, 1996, p.205.
- [15] F. Yin et al., Med. Phys., v.17, No 17, No 6, 1990, p.962.

Ringraziamenti.

Ai relatori della presente tesi vanno i miei più sentiti ringraziamenti, al prof. Giuseppe. Pappalardo per l'assistenza e la premura concessami durante il lavoro di tesi, al dott. Paolo Finocchiaro del Laboratorio Nazionale del Sud per i preziosi consigli ed il consistente e continuo aiuto mirato alla realizzazione della nuova tecnica radiografica di misura denominata “*on-line*”.

Un particolare ringraziamento va al prof. Giuseppe Calvi per il valido supporto mirato alla realizzazione di misure utilizzando la tecnica radiografica denominata “*off-line*”.

Ringrazio inoltre, i dott. Gianluigi Cosentino, Paolo Romano ed Antonio Carastro per l'aiuto offertomi per la realizzazione del presente lavoro ed il sig. Carmelo Marchetta per la sua continua disponibilità.