

# Tomografia industriale ad alta risoluzione con fasci di fibre ottiche coerenti

*Matteo Bettuzzi\**, *Andrea Berdondini\**, *Rosa Brancaccio\**, *Franco Casali\**, *Alexander Flisch\*\**, *Alice Miceli\*\**, *Maria Pia Morigi\**

*\*Dipartimento di Fisica - Università di Bologna, \*\*EMPA*

## Sommario

Un rivelatore innovativo per la tomografia computerizzata ad alta risoluzione, da impiegare per le energie tipicamente usate in campo industriale, è stato realizzato recentemente dai ricercatori del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna. In seguito, esso è stato provato presso un centro di ricerca svizzero, l'EMPA, istituto di ricerca sui materiali e per le prove non distruttive, da tempo specializzato in questo tipo di analisi, dove si trova installata una sorgente di raggi X da 450kV.

Questo rivelatore, che si avvale di un particolare sistema di fibre ottiche coerenti per raccogliere e convogliare le immagini su di un CCD, è in grado di raggiungere una risoluzione molto elevata, con un pixel inferiore ai 25 micron. La geometria è di tipo lineare, ed il rivelatore ha una estensione orizzontale di 50cm, che permette di scansionare oggetti di dimensioni piuttosto grandi, come ad esempio testate di motori. Attraverso un sistema di rotazione si può effettuare la scansione dell'oggetto e ricostruire la sezione corrispondente all'area del rivelatore. Attraverso la scansione di più sezioni si può ottenere infine la ricostruzione tridimensionale del pezzo. La caratterizzazione in termini di prestazioni ed i risultati delle prime prove sono presentati in questo lavoro insieme ai dettagli costruttivi del sistema sperimentale impiegato.

## Introduzione

La tomografia computerizzata è ormai diventata uno strumento avanzato di analisi in molti settori della produzione industriale che richiedono accurati controlli di qualità. La radiografia veniva impiegata già da tempo nel campo delle prove non distruttive su componenti la cui difettosità poteva essere critica per il funzionamento di una macchina o per la sicurezza. Tuttavia, la tomografia computerizzata (Computer Tomography, o CT), che permette di ricostruire tutto l'oggetto in tre dimensioni, rappresenta lo standard verso il quale i sistemi di diagnostica e di controllo di qualità si stanno muovendo oggi. Essa fornisce infatti informazioni dimensionalmente accurate sia riguardo alla localizzazione ed alla grandezza degli eventuali difetti, sia riguardo alle caratteristiche stesse del pezzo, che è poi possibile confrontare direttamente con il disegno originario per verificare eventuali deformazioni o incongruenze emerse durante del ciclo produttivo (Flisch, 2003). Diverse applicazioni richiedono spesso differenti soluzioni, per questo motivo la ricerca svolge un ruolo decisivo nello sviluppo di nuovi rivelatori digitali di radiazione e nella realizzazione di sistemi tomografici per il settore industriale in una fase nella quale questa tecnologia sta crescendo e si sta diffondendo rapidamente. E' richiesta infatti un'approfondita conoscenza delle problematiche fisiche coinvolte nell'impiego di radiazione di elevata

energia. Ancora oggi, infatti, risulta difficile ottenere risoluzioni molto alte su oggetti di elevata densità e spessore come quelli che si incontrano spesso nel settore meccanico, ad esempio, quali fusioni metalliche, testate di motori o pale di turbine, ovvero parti che spesso hanno dimensioni di diverse decine di centimetri. La difficoltà non consiste solo nell'elevato numero di punti di campionamento necessari per ottenere una buona definizione, ma i problemi sorgono anche per le elevate energie che è necessario impiegare per attraversare i materiali ed ai particolari fenomeni fisici che, in questo caso, entrano in gioco. Un rivelatore per questo tipo di applicazione deve inoltre essere veloce, avere una buona efficienza ed un buon range dinamico.

I ricercatori del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, che hanno portato avanti una linea di ricerca nel settore della CT ormai da più di un decennio, sono coinvolti in numerosi progetti a livello sia nazionale che internazionale per lo sviluppo di sistemi di tomografia computerizzata (Casali, 2003). In questo lavoro viene presentato un nuovo rivelatore per tomografia computerizzata adatto alle energie impiegate nel settore industriale, ovvero a partire dalle sorgenti da 300-450kV, in grado di raggiungere, su campi dell'ordine delle decine di centimetri, una risoluzione spaziale molto elevata (Casali, 2003). Le prove sono state effettuate in collaborazione con alcuni partner internazionali, quali ad esempio l'EMPA, un importante istituto svizzero di ricerca sui materiali e sulle prove non distruttive, che si trovano coinvolti insieme alle Università ed alle aziende italiane in progetti a livello europeo per lo sviluppo della CT e della tecnologia ad essa collegata nel campo industriale.

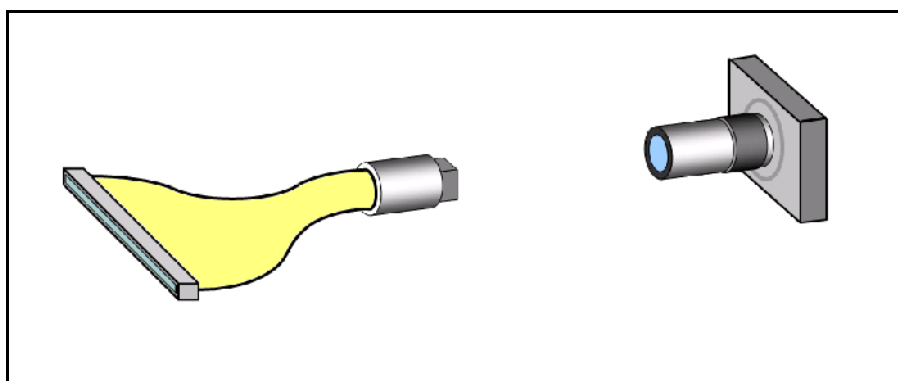


Figura 1 - schema semplificato del detector.

## Descrizione del detector

Il detector ha un campo di vista di 500mm in orizzontale e di 7mm in verticale. Si tratta quindi di un rivelatore lineare adatto alla geometria di irraggiamento di tipo fan-beam. Sulla superficie del rivelatore una striscia di materiale scintillatore produce radiazione visibile quando viene colpita dai raggi X. Uno speciale fascio di fibre ottiche coerenti è stato accoppiato allo scintillatore per convogliare la luce così prodotta fino all'uscita, inquadrata da una telecamera digitale (Figura 1). Mentre l'area di ingresso è lineare, quella di uscita è invece di forma quadrata. Questo sistema permette di passare dal formato lineare, necessario per le misure, ad uno che meglio si accorda con quello di una camera CCD. Le fibre ottiche sono dunque non solo una guida di luce coerente ma anche un trasduttore di formato (Bettuzzi, 2003, 2004). Utilizzando un obiettivo macro ed una telecamera da 3.2 Megapixel è possibile avere una dimensione del pixel di 25 micron

(definizione ~1000 dpi) su questo campo di vista, molto esteso in lunghezza. Con una camera da 9 Megapixel, potenzialmente, la dimensione del pixel del rivelatore può scendere a 16 micron (definizione ~1500 dpi). La geometria lineare permette di utilizzare una elevata collimazione del fascio e di ridurre fortemente, in questo modo, la radiazione diffusa dall'oggetto sul rivelatore (Berdondini, 2005). Questo è molto importante, nella tomografia computerizzata, per avere una corretta ricostruzione, ovvero prima di cosiddetti artefatti. La telecamera CCD utilizzata ha una elevata sensibilità, ed essendo raffreddata il rumore è molto basso. Questo consente di ottenere una buona dinamica, come richiesto da questo tipo di applicazioni. La flessibilità delle fibre ottiche permette di posizionare la camera lontano dal fascio di radiazione, riducendo il rumore causato dagli eventi spuri o i potenziali danni all'elettronica causati dai raggi X di alta energia. E' possibile inoltre cambiare il tipo di scintillatore per ottimizzare sia il materiale che il suo spessore a seconda dell'energia impiegata.

### **Misure di caratterizzazione**

Il nuovo rivelatore è stato provato presso l'EMPA a Duebendorf (Zurigo-CH), effettuando dapprima una caratterizzazione approfondita, intesa alla determinazione delle prestazioni di un possibile sistema CT basato su di esso, ed in seguito dei test di tomografia computerizzata per valutare i risultati dal punto di vista pratico e concreto. Si era particolarmente interessati ai test di sensibilità e di efficienza del rivelatore, caratteristiche che consentono di ridurre i tempi di scansione e la dose di radiazione impiegata, ed alla misura della risoluzione spaziale e della dinamica di rivelazione, che definiscono più direttamente la qualità dei risultati ottenuti. Tutti questi parametri possono variare a seconda delle componenti impiegate nella realizzazione del detector. Il fascio di fibre ottiche coerenti rappresenta l'elemento più innovativo. E' stato costruito appositamente per questo prototipo da un importante centro di ricerca russo, l'Istituto "Vavilov" di San Pietroburgo. Esso ha caratteristiche ottiche ben precise e non può essere ottimizzato in questa fase. La telecamera digitale, una Apogee Alta U32 da 2184×1472 pixel con convertitore a 12/16 bit, è sicuramente un componente di alto livello. E' possibile eventualmente sostituirla con una camera dalle prestazioni superiori (cioè con un maggior numero di pixel, una maggiore sensibilità ed una maggiore dinamica), anche della stessa casa produttrice. Questi due elementi, tuttavia, al momento sono da considerarsi fissati. Sono stati invece provati tre diversi tipi di scintillatore, per stabilire quello che presentava le caratteristiche funzionalmente più adatte. Si tratta di una striscia di ossisolfuro di gadolinio (GOS), impiegata in radiologia industriale ma ad energie solitamente più basse; un campione di ioduro di cesio strutturato ad aghi (CSI) di spessore 0.5 mm ed alcune barrette di fibre ottiche scintillanti (FOS) dello spessore di 12mm (Nagarkar, 1997). I tre scintillatori presentano caratteristiche di efficienza nella conversione della radiazione in luce e di risoluzione spaziale diverse. La misura di efficienza è stata effettuata ponendo gli scintillatori a contatto con la finestra di ingresso del rivelatore e misurando il livello di segnale registrato dalla camera digitale a parità di condizioni di erogazione della radiazione X. La figura 2 mostra i risultati ottenuti sotto forma di curve di esposizione/luminosità. Lo scintillatore più efficiente è risultato lo ioduro di cesio strutturato ad aghi anche se il suo spessore è di appena 0.5mm contro i 12mm delle fibre ottiche scintillanti. E' stata quindi valutata la risoluzione spaziale. Per quanto riguarda il CSI non è stato possibile realizzare un corretto contatto ottico con il fascio di fibre e la

risoluzione risulta per questo motivo degradata. Possiamo vedere nella figura 3 un grafico che riporta la Modulation Transfer Function (MTF) per i tre materiali. La funzione di modulazione ottica riassume le caratteristiche di nitidezza dell'immagine alle diverse frequenze spaziali (Casali, 2006). Questa funzione è direttamente correlata alla risoluzione spaziale. Di solito si considera come risoluzione limite del rivelatore il valore della frequenza spaziale che corrisponde al 5% della MTF.

Si ottiene così una risoluzione massima, utilizzando le FOS, di circa 7-8 lp/mm che corrispondono ad un dettaglio separabile di 60-70 micron. La risoluzione reale, misurata è dunque più bassa di quella nominale (o di Nyquist), come spesso succede nei rivelatori, soprattutto se formati da più componenti ottiche. Si tratta in ogni caso di una risoluzione molto buona, che sull'oggetto può diventare anche di 50 micron. Il GOS sembra avere prestazioni evidentemente più scarse per quanto riguarda la risoluzione spaziale rispetto alle FOS, ed in misura minore anche come efficienza di conversione, per cui è sicuramente inferiore. Del resto, si tratta del materiale più diffuso ed anche più economico. Diverso il discorso per il CSI che presenta una efficienza di conversione molto più alta degli altri due scintillatori, ma non è stato possibile ricavare una MTF realmente significativa a causa del non perfetto contatto ottico. Questo problema potrebbe tuttavia essere risolto.

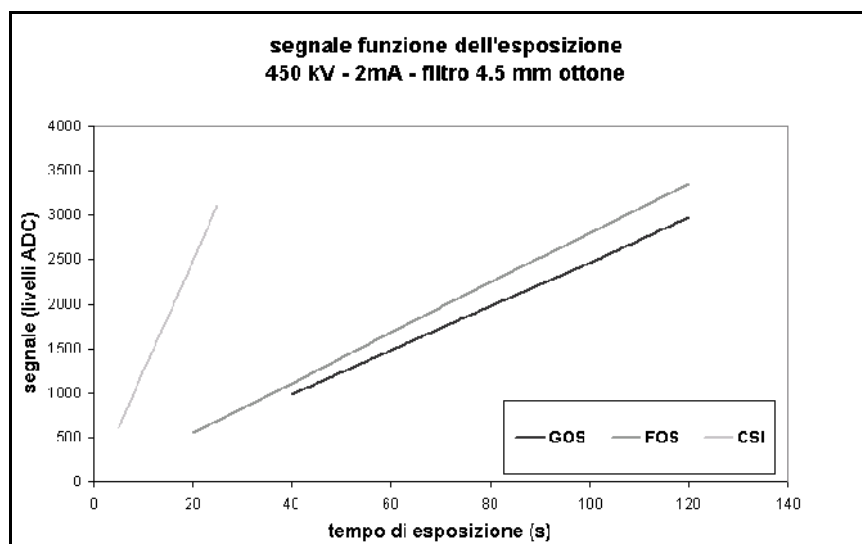


Figura 2 - efficienza nella conversione X-luce per i diversi scintillatori.

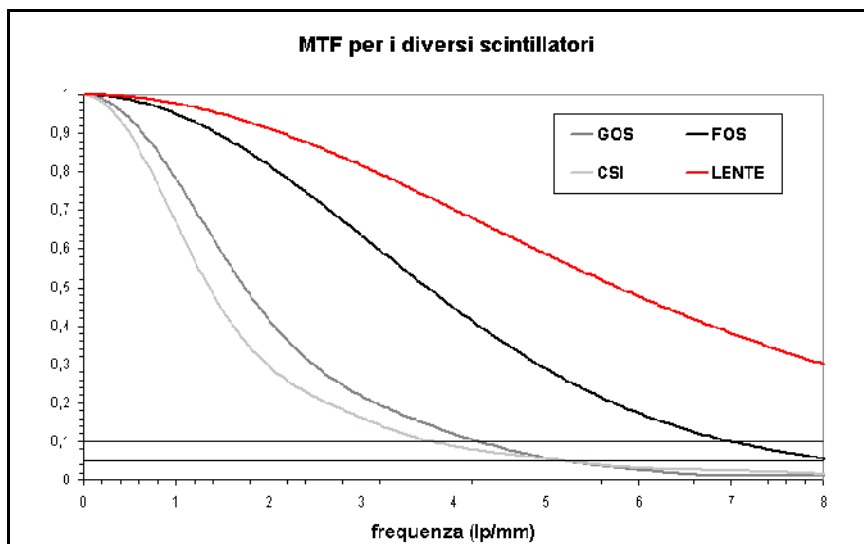


Figura 3 - MTF misurata per i diversi scintillatori.

La dinamica del sistema è stata valutata mediante la costruzione della curva di assorbimento del fascio di raggi X attraverso l'alluminio. Il range dinamico si estende per tutto l'intervallo sul quale il sistema risponde seguendo una legge approssimativamente esponenziale. Quando la trasmissione dei raggi X attraverso l'alluminio è quasi completa la curva si appiattisce ed il sistema non distingue più il segnale dal rumore di fondo. La curva che si è ottenuta per il nostro rivelatore è riportata in figura 4. La risposta del rivelatore, a 450kV e con una cospicua filtrazione aggiunta del fascio di 4.5mm di ottone, risulta, con buona approssimazione, esponenzialmente decrescente e si estende per due interi ordini di grandezza. La dinamica corrispondente si può quantificare quindi in 40dB. Non si tratta di un valore molto alto. Tuttavia, da altre misure, è emerso che la camera CCD ha una dinamica intrinseca di 50dB circa, che quindi il rivelatore non può superare. Lo scarto è probabilmente dovuto al rumore statistico del fascio di radiazione molto indurito. La dinamica può essere aumentata utilizzando la tecnica della media di immagini, pagando però il prezzo di un maggiore tempo di scansione.

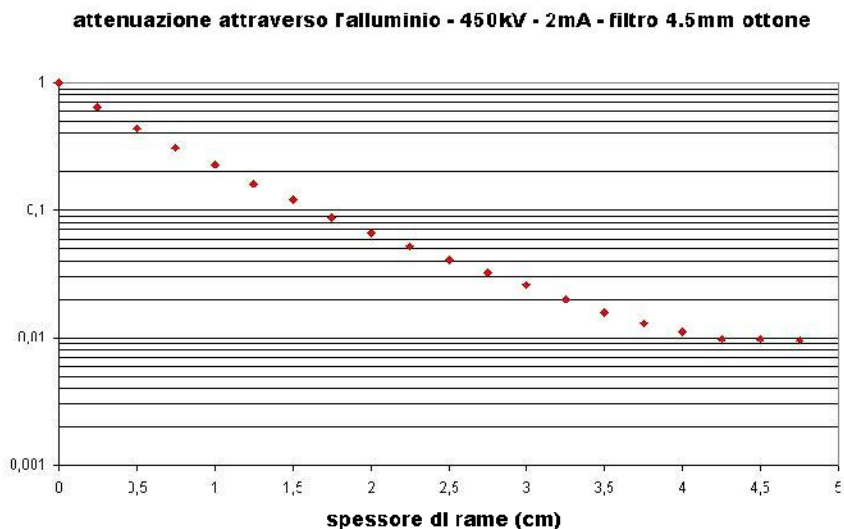


Figura 4 - curva di attenuazione attraverso l'alluminio.

PARAMETRI DELLA TOMOGRAFIA					
<b>Macchia focale</b>	(mm)	2,5	<b>distanza sorgente-riv.</b>	(mm)	830
<b>Tensione del tubo</b>	(kV)	450	<b>distanza sorgente-ogg.</b>	(mm)	680
<b>Corrente anodica</b>	(mA)	2	<b>distanza oggetto-riv.</b>	(mm)	150
<b>Filtrazione aggiunta</b>	(mm)	4.5 ottone	<b>Fattore di magnificazione</b>		0,82
<b>Tempo di esposizione</b>	(s)	7	<b>Pixel del rivelatore</b>	( $\mu$ m)	24
			<b>Dimensione del Voxel</b>	( $\mu$ m)	80
<b>Range angolare</b>	(deg)	360	<b>Binning hardware</b>		4x4
<b>Passo di rotazione</b>	(deg)	1	<b>pixels del CCD</b>		546x368
<b>Numero di proiezioni</b>		360	<b>numero di bit</b>		12
			<b>pixels della proiezione</b>		1400x16
<b>Scintillatore</b>		GOS/FOS	<b>pixels della slice</b>		1400x1400
<b>Tempo di scansione</b>	(s)	3600	<b>Numero di slices</b>		16

Tabella 1 - parametri della scansione tomografica.

## Tomografia di un componente industriale

Un componente metallico del diametro di circa 12cm è stato scansionato come test del nuovo rivelatore. La tabella 1 riassume i parametri usati nella tomografia. Corrente, tensione e filtrazione sono stati mantenuti come nelle misure di caratterizzazione. Ciò che è cambiato invece è il numero di pixel. E' stato infatti utilizzato un binning hardware di  $4 \times 4$  pixel, in questo caso, per ridurre le dimensioni delle proiezioni che avrebbero contato, a piena risoluzione, sui 5600 pixel in orizzontale. Questa mole di dati è difficile da gestire con un ordinario personal computer, soprattutto nella fase di ricostruzione. Anche i tempi di scansione sarebbero stati molto lunghi a risoluzione piena. Con il binning, è stato guadagnato un fattore 16 nel segnale. Quindi, con un'esposizione di circa 7-8 secondi per immagine, è stato possibile effettuare la scansione in circa un'ora. Mostriamo in figura 5 la foto del sistema e del pezzo utilizzato nelle misure. Al centro, una piattaforma rotante controllata via software e sincronizzata con la telecamera CCD permette di acquisire un'immagine dell'oggetto per ogni angolo su 360 gradi mentre il tubo emette il fascio di raggi X. A sinistra è visibile il collimatore orizzontale mentre destra si può vedere la testa del fascio di fibre ottiche da 50cm, con lo scintillatore accoppiato e montato in un telaio di alluminio. Il sistema così realizzato corrisponde ad un rivelatore lineare multi-slice, in quanto più di una linea orizzontale di dati viene acquisita contemporaneamente. A piena risoluzione le slices sono 64 mentre nel nostro caso sono 16. Sono quindi state raccolte 360 immagini e poi create le proiezioni attraverso un processo di ricomposizione via software di ciò che la camera CCD ha registrato in uscita. Le proiezioni vengono quindi lette da un programma di ricostruzione tomografica proiettate all'indietro sul piano virtuale dell'oggetto, secondo un procedimento, usato come standard da quasi tutti i sistemi topografici per via della elevata velocità di elaborazione, chiamato Filtered Back-Projection algorithm (FBP). Il risultato di questo processo è l'immagine di una sezione dell'oggetto sul piano normale all'asse di rotazione rispetto al sistema. Ne vediamo un esempio, ottenuto in questo caso usando le FOS come scintillatore, in figura 6.

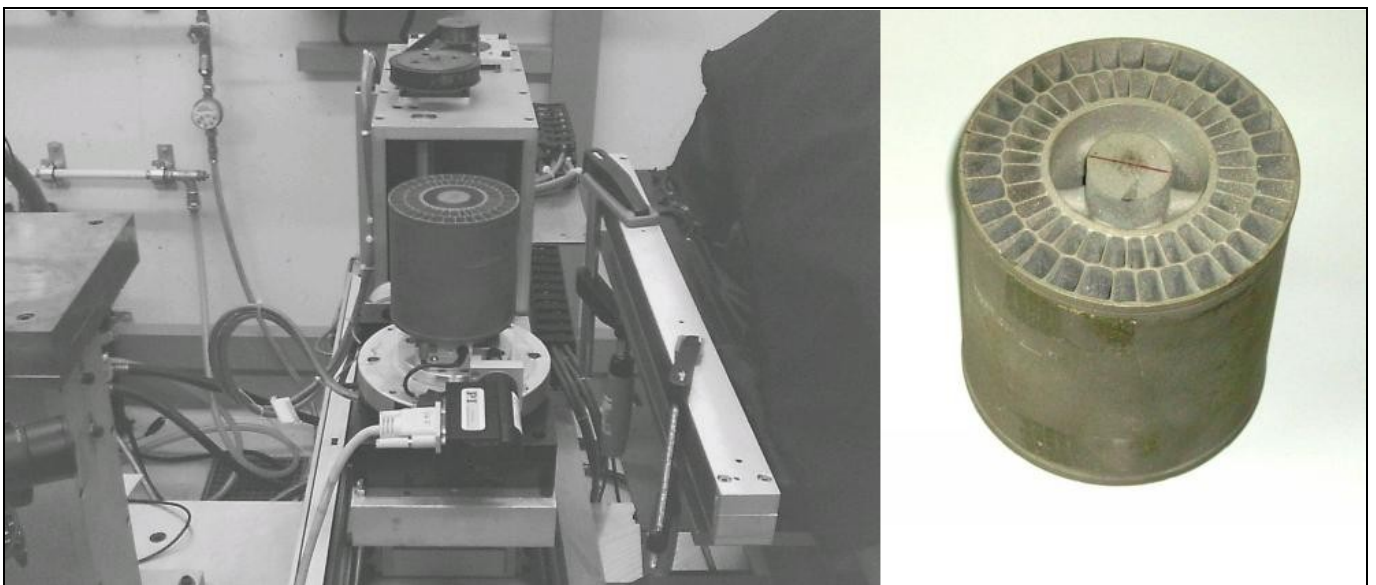


Figura 5 - sistema tomografico e testa del rivelatore.

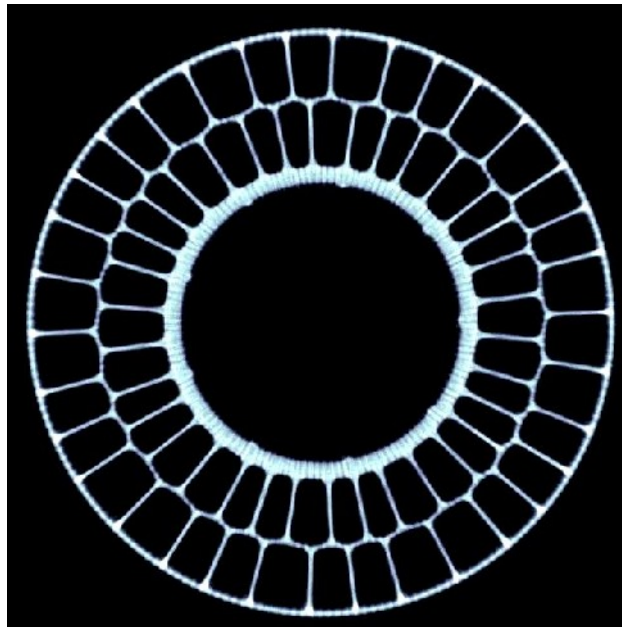


Figura 6 - ricostruzione di una slice tomografica dell'oggetto.

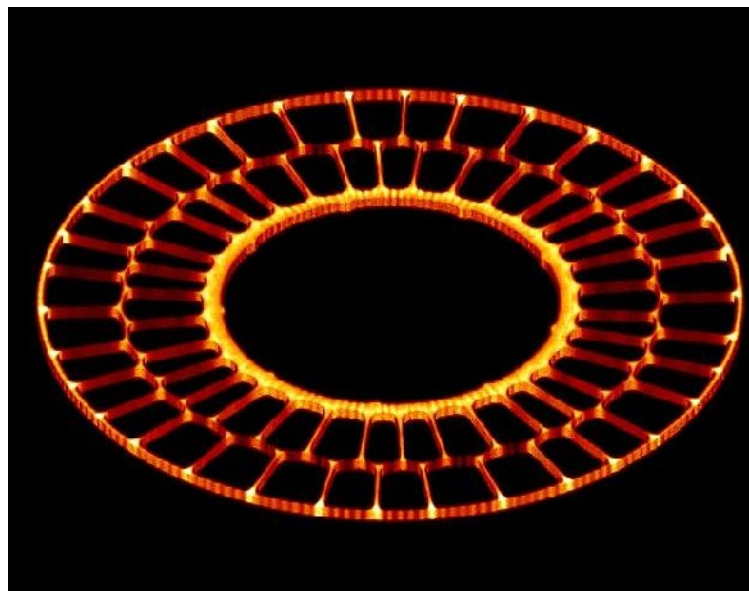


Figura 7 - ricostruzione 3D della sezione tomografia dell'oggetto composta da 16 slices.

La sezione appare ricostruita accuratamente. Essendo il materiale una lega omogenea non vi sono differenze nelle densità ed i livelli con cui l'immagine viene rappresentata appaiono uniformi. Dal momento che il rivelatore ha acquisito 16 slices, è possibile effettuare una ricostruzione tridimensionale della sezione di oggetto scansionata. La vediamo in figura 7. Con un rivelatore lineare, per ottenere la scansione 3D di tutto l'oggetto occorre ripetere il processo per tante volte quanto è necessario a seconda delle dimensioni in verticale del pezzo e del campo di vista verticale del rivelatore. La scansione completa con un rivelatore lineare può risultare quindi piuttosto lunga, ma in queste applicazioni è spesso l'unico modo per ottenere una risoluzione molto alta.

## Conclusioni

Al Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, in una ricerca che prosegue ormai da alcuni anni, è stato studiato e realizzato un nuovo rivelatore digitale, adatto alle energie in gioco nella tomografia industriale. In seguito è stato possibile provarlo grazie alla collaborazione dell'EMPA, istituto svizzero di ricerca situato nell'area di Zurigo, per verificarne le prestazioni con una sorgente appropriata e comunemente utilizzata per il servizio di CT industriale di routine per numerosi clienti, tra cui anche aziende italiane. Il nostro rivelatore si caratterizza per la risoluzione spaziale molto elevata in rapporto alle dimensioni ispezionabili, ovvero una risoluzione reale misurata di 60 micron su 50 centimetri (il rapporto è circa 10000:1). Vi sono rivelatori che possono arrivare ad avere un pixel di 50 micron su queste dimensioni, ma la risoluzione spaziale reale è sempre inferiore, come abbiamo visto, a quella nominale. Inoltre con una camera CCD dotata di un maggior numero di pixel (ad esempio una da 9Mp già in nostro possesso) possiamo ottenere una risoluzione ancora più alta, arrivando ad un dettaglio separabile di 25-30 micron. Abbiamo già ottenuto questo risultato in campo medicale per lo studio dell'osteoporosi e stiamo lavorando per portarlo anche nel settore industriale (Baruffaldi, 2006).

Il rivelatore, essendo ancora in fase di sviluppo, presenta caratteristiche di versatilità, molto utili nella ricerca, ma che lo rendono per il momento poco adatto ad un impiego di servizio in un sistema reale. Questo lascia spazio però ad una ulteriore ottimizzazione dei componenti. Riteniamo ad esempio che l'utilizzo dello ioduro di cesio strutturato come scintillatore, che ha una grande efficienza di conversione X-luce, possa aumentare notevolmente le velocità di scansione (ad esempio di un fattore 4, misurato, per uno spessore di 0.5mm di CSI, o di un fattore 8 per uno spessore di 1mm di CSI).

L'utilizzo di una telecamera con CCD retro-illuminato, di efficienza quantica molto elevata (superiore al 90%), renderebbe l'acquisizione del segnale ancora più rapida.

Possiamo ritenere quindi che i risultati ottenuti siano molto promettenti e che vi sia un margine di miglioramento tale da consentire realmente la realizzazione di un sistema di tomografia industriale all'avanguardia.

## Referenze

1. A.Flisch et al., "Efficient Volume Digitizing with Adaptive Computerized Tomography", Proceedings of the International Symposium on Computed Tomography and Image Processing for Industrial Radiology, June 23-25, 2003, Berlin, 17 1-5, 2003.
2. F.Casali et al., "Development of high resolution X-ray DR and CT systems for non medical applications", Proceedings of the International Symposium on Computed Tomography and Image Processing for Industrial Radiology, Berlin, Germany, 23-25 June 2003, BB 84-CD 329-336, 2003.
3. F.Casali et al., "A new system for Digital Radiography and Computed Tomography using an intensified linear array detector", Proceedings of the International Symposium on Computed Tomography and Image Processing for Industrial Radiology, Berlin, Germany, 23-25 June 2003, BB 84-CD 317-324, 2003.



4. M.Bettuzzi et al., “Un rivelatore lineare innovativo per Radiografia Digitale e Tomografia Computerizzata”, Atti 10° Congresso Nazionale AIPnD, Ravenna 2003, pp. 683-691, 2003.
5. M.Bettuzzi, et al., “A new linear array detector for high resolution and low dose digital radiography”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 213 227-230, 2004.
6. A.Berdondini et.al, “Monte Carlo optimization of an industrial tomography system”, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, Vol.2, 2005, pp.856- 859, 2005.
7. V.V.Nagarkar et al., “Structured CsI(Tl) scintillators for X-ray imaging applications”, IEEE Trans. Nucl. Sci. 45 492, 1998.
8. F.Casali, “Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage”, Chapter 2, 41-123, Elsevier, 2006.
9. F.Baruffaldi et al., “An Innovative CCD-Based High-Resolution CT System for Analysis of Trabecular Bone Tissue”, IEEE Transactions on Nuclear Science, 53 5 2584-2590, 2006.