

# Tomografia computerizzata per applicazioni industriali

A. Miceli, A. Flisch, R. Thierry, J. Hofmann

*Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research,  
Electronics/Metrology Laboratory*

## Sommario

La richiesta di sistemi di tomografia computerizzata (CT) per applicazioni industriali è considerevolmente aumentata negli ultimi anni. Prima, la CT era applicata raramente come metodo per indagini non distruttive. Nella maggior parte dei casi erano analizzate solo alcune sezioni dell'oggetto per definire l'esatta posizione di un difetto nel materiale. Con i computer oggi giorno disponibili e la possibilità di visualizzazione 3-D dei dati tomografici si è aperto un vasto campo di interessanti opportunità. La CT per applicazioni industriali è eccellente anche come metodo per la misurazione e per la rivelazione dei difetti, soprattutto per oggetti di alluminio, in particolare motori per veicoli. La CT sta diventando un metodo standard per la digitalizzazione del volume, soprattutto per comparare le dimensioni del prototipo di un nuovo prodotto rispetto alle dimensioni nel modello CAD prima di iniziarne la produzione in serie. I dati 3-D possono essere inoltre utilizzati per l'analisi automatica dei difetti e per l'identificazione di spessori critici nell'oggetto. Il laboratorio federale di prove sui materiali e ricerca (Empa) che ha sede a Dübendorf (Svizzera) ha quattro sistemi di tomografia per applicazioni industriali. L'EMPA, nell'ambito di un progetto europeo, ha ottimizzato il processo di ispezione dei prototipi, dall'acquisizione dei dati alla comparazione con il modello CAD.

## 1. Introduzione

La CT per applicazioni industriali ha visto negli anni scorsi la sua maggiore applicazione nella rivelazione di difetti, analisi dei guasti, misure di dimensioni di parti non accessibili e analisi statistica delle proprietà dei materiali, come la distribuzione di densità. Soltanto singole slice in determinate posizioni erano acquisite e utilizzate per ulteriori analisi [1].

Oggi, la CT per applicazioni industriali è diventata un metodo standard per la digitalizzazione del volume specialmente nell'ambito dell'ispezione del primo articolo di getti di alluminio [2, 3] come, per esempio, motori di veicoli. I dati 3-D possono poi essere usati per l'analisi automatica dei difetti e l'analisi dello spessore delle pareti [4]. La digitizzazione del volume per mezzo della CT sta diventando un importante strumento anche per le simulazioni e l'analisi degli elementi finiti. I risultati sono più affidabili se basati su dati ottenuti dall'oggetto fisico invece che sul modello CAD teorico.

Le industrie automobilistiche e motociclistiche mostrano un forte interesse nelle nuove possibilità che la CT offre. Usando questa nuova tecnologia è, infatti, possibile ridurre il tempo che intercorre dall'ideazione di un prodotto alla sua effettiva commercializzazione [1].

## 2. Sistemi CT per applicazioni industriali

Oggigiorno una vasta gamma di sistemi CT per applicazioni industriali è disponibile sul mercato. Sistemi CT capaci di esaminare parti pesanti alcune tonnellate utilizzano acceleratori lineari in grado di penetrare fino a 300 mm di acciaio. Sistemi portatili con risoluzione minore di 1  $\mu\text{m}$  sono utilizzati per indagini non distruttive di parti microelettroniche. Risoluzioni sub-micrometriche possono essere raggiunte con la luce di sincrotrone.

I getti sono analizzati da sistemi CT equipaggiati con rivelatori lineari (sistemi 2-D CT) e tubi a raggi X da 450 kVp. Questi sistemi acquisiscono il volume dell'oggetto slice per slice. Nonostante questo processo sia lungo e costoso i sistemi CT 2-D rimangono i più appropriati per analizzare cilindri motore di autoveicoli. I sistemi 2-D hanno una buona risoluzione locale e un'elevata qualità dell'immagine.

Sistemi CT più veloci, che utilizzano un rivelatore ad area (sistemi 3-D CT) invece che un rivelatore lineare sono disponibili per sorgenti a raggi X fino a 250 kVp. Ciò li rende inadatti per analizzare i getti più larghi.

Nell'ambito di un progetto di ricerca europeo, EMPA e altri nove partner stanno sviluppando un nuovo sistema CT in grado di acquisire i dati 3-D dieci volte più velocemente dei sistemi CT 2-D disponibili sul mercato mantenendo la stessa risoluzione spaziale ed un software per la ricostruzione più veloce del modello CAD dai dati CT. Inoltre è prevista l'integrazione di questi nuovi strumenti nella catena della prototipazione rapida.

La prototipazione rapida è una tecnologia che rende possibile la produzione di oggetti di geometria comunque complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD tridimensionale.

### 3. Sistema CT all'EMPA

Il sistema CT per applicazioni industriali dell'EMPA prodotto dalla CITA Systems (US) consiste dei seguenti componenti:

- Sorgente a R. X: Philips MG 451, 450 kV / 2 mA con macchia focale 2.5 mm  
angolo dell'anodo 30°, filtrazione inerente 2.3 mm Fe + 1.0 mm Cu
- Rivelatore: Rivelatore lineare composto da 125 CdWO<sub>4</sub> scintillatori  
individualmente collimati di larghezza totale 250 mm
- Sistema di assi: Per oggetti fino a 400 mm di diametro, 600 mm di altezza e 25 Kg di peso
- Computer: Sun Workstation Blade 2000 (per l'acquisizione e la ricostruzione dei dati)

La dimensione del rivelatore permette l'acquisizione dei dati in geometria fan-beam per oggetti fino a 250 mm di diametro. Il tempo necessario per acquisire una slice è tra i 2 e 3 minuti. Per oggetti il cui diametro è maggiore della larghezza del rivelatore è necessario eseguire la scansione in modalità transazione. Utilizzando questa modalità di acquisizione i tempi per acquisire una slice sono circa tre volte più lunghi. La scansione è completa-

mente automatizzata. Le sezioni 2-D vengono poi sovrapposte per formare il volume. La migliore risoluzione possibile ottenibile con questo sistema è dell'ordine di 50  $\mu\text{m}$ .

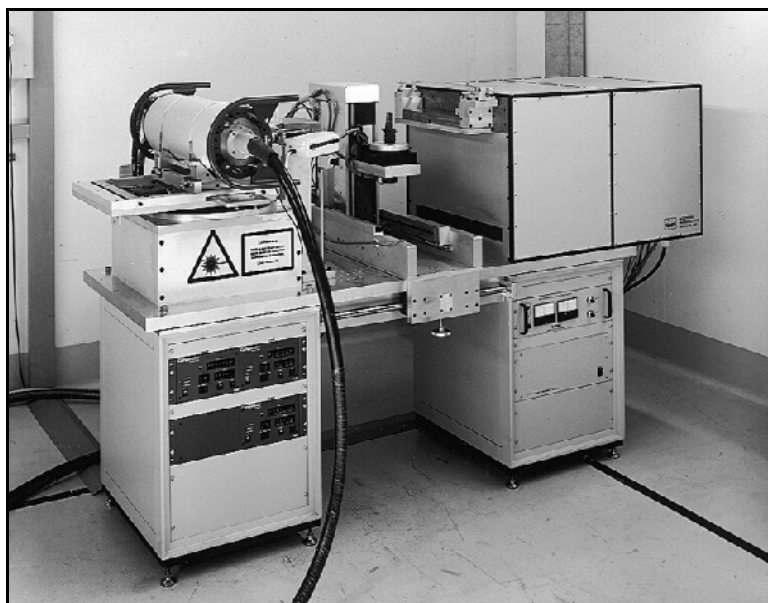


Figura 1 – Sistema CT 2-D per applicazioni industriali (EMPA)

#### 4. Applicazioni

Oltre alla tomografia computerizzata esistono altri metodi per l'acquisizione di dati volumetrici. Comparata con le macchine di misura a coordinate e i sistemi di misura ottici, per i quali la superficie dell'oggetto deve essere accessibile o visibile, la CT ha il vantaggio di poter studiare anche le strutture interne in modo non distruttivo.

Oggi i sistemi CT tendono ad essere integrati nella catena di produzione dei prodotti assistita da elaboratore. Le industrie, per rimanere competitive sono forzate a diminuire il tempo che intercorre dall'ideazione del prodotto alla sua effettiva commercializzazione. Metodi come la prototipazione rapida e le simulazioni, che sono già ampiamente utilizzati, richiedono la digitalizzazione 3-D del prodotto. I dati 3-D ottenuti con la CT possono essere usati anche per la rivelazione di difetti ad uno stadio avanzato della produzione del prodotto.

##### 4.1 Ispezione del primo articolo – Motore di un motociclo

L'ispezione del primo articolo è parte del processo di produzione del prodotto. Prima che sia autorizzata la produzione in serie di un nuovo prodotto si controlla l'accuratezza delle dimensioni sul così chiamato "primo articolo". Il primo articolo è il primo pezzo prodotto sotto la condizione della produzione in serie. Il pezzo è scannerizzato slice per slice, i tomogrammi sono quindi sovrapposti per formare il volume. Le superfici interne ed esterne del volume sono trasformate in una nuvola di punti. La nuvola di punti è poi comparata con il modello CAD del pezzo. Le deviazioni sono mostrate utilizzando un codice a colori nelle sezioni o nelle rappresentazioni isometriche. La figura 2 mostra l'ispezione del primo articolo, compiuta all'EMPA, di un cilindro motore di un motociclo: il cilindro motore (a), i tomogrammi (b), la nuvola di punti (c), il modello CAD del pezzo (d) e le deviazioni (e).

Invece di comparare i dati della CT col modello CAD è possibile comparare direttamente i dati della CT di due pezzi teoricamente identici per rivelarne le deviazioni.

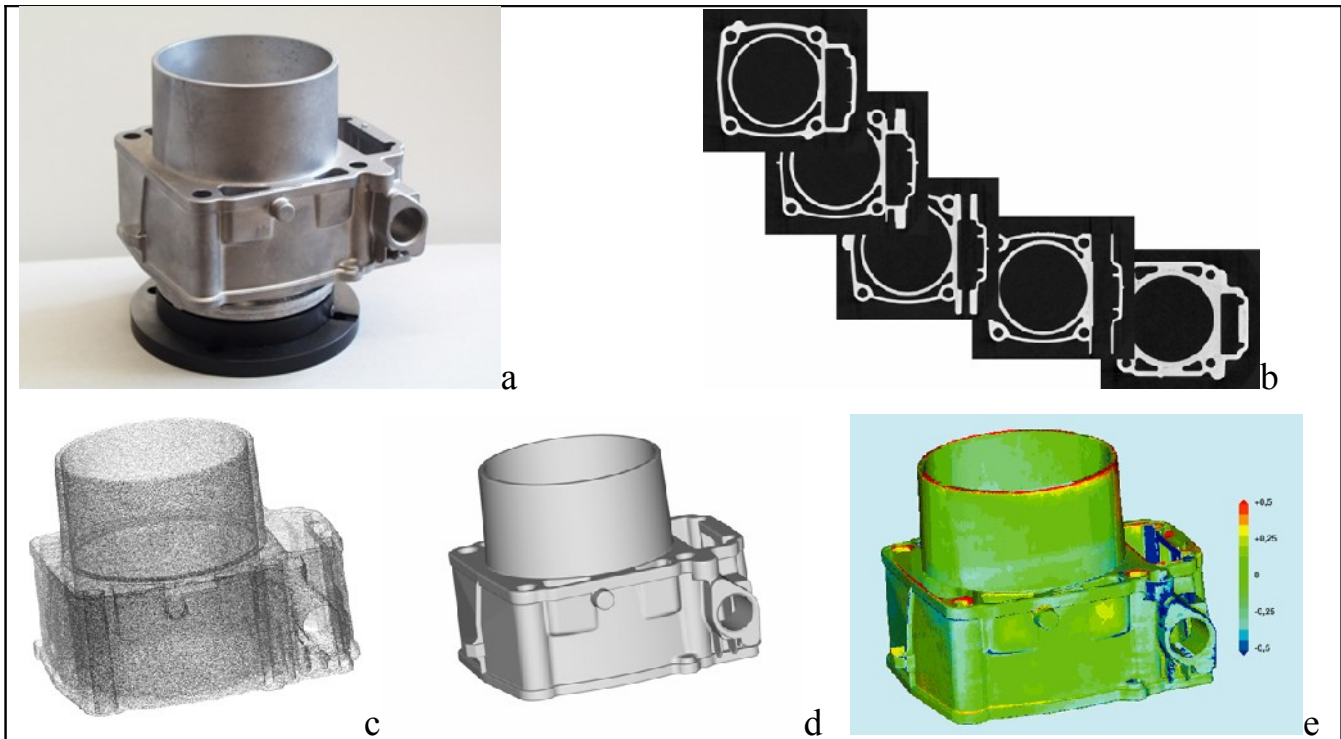


Figura 2 – Ispezione del primo articolo nel caso di un cilindro motore di un motociclo

#### 4.2 Ingegneria inversa di una testa cilindro di un'automobile

Con il termine ingegneria inversa (RE) si individua una metodologia che consente, partendo dal modello fisico, di risalire alla sua descrizione matematica. Dalla nuvola di punti, ottenuta dai dati 3-D della CT è possibile ricostruire il modello 3-D (CAD 3-D). RE è un'alternativa nel caso in cui il modello CAD non sia disponibile. Per esempio RE è una necessità, quando un componente difettoso di un'unità complessa non più sul mercato, deve essere sostituito.

Di seguito, l'esempio di RE di una camera d'acqua di una testa cilindro di un'automobile. Le dimensioni della testa cilindro sono  $450 \times 300 \times 150 \text{ mm}^3$ . Abbiamo acquisito 946 tomogrammi aventi una spaziatura di 0.5 mm e una dimensione del pixel di  $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$  usando una tensione del tubo a raggi X di 450 kV ed una corrente di 2 mA. Per eliminare la parte molle del fascio di raggi X abbiamo utilizzato un filtro di rame di 1.5 mm. L'acquisizione dei dati è durata alcuni giorni. Poiché ogni slice aveva  $1600 \times 1000$  pixel ed ogni pixel era un valore in virgola mobile a 4 bit, l'intero volume conteneva 6 GB di dati. Si è quindi resa necessaria la riduzione dei dati per salvare spazio sul disco e maneggiare i dati più facilmente. Dopo aver compiuto la riduzione dei dati abbiamo generato la nuvola di punti della parte superiore ed inferiore della camera d'acqua usando un algoritmo di interpolazione lineare 3-D. La nuvola di punti è stata poi importata nel software "Surfacer" (Imageware Corporation). La figura 3 mostra il modello CAD ottenuto.

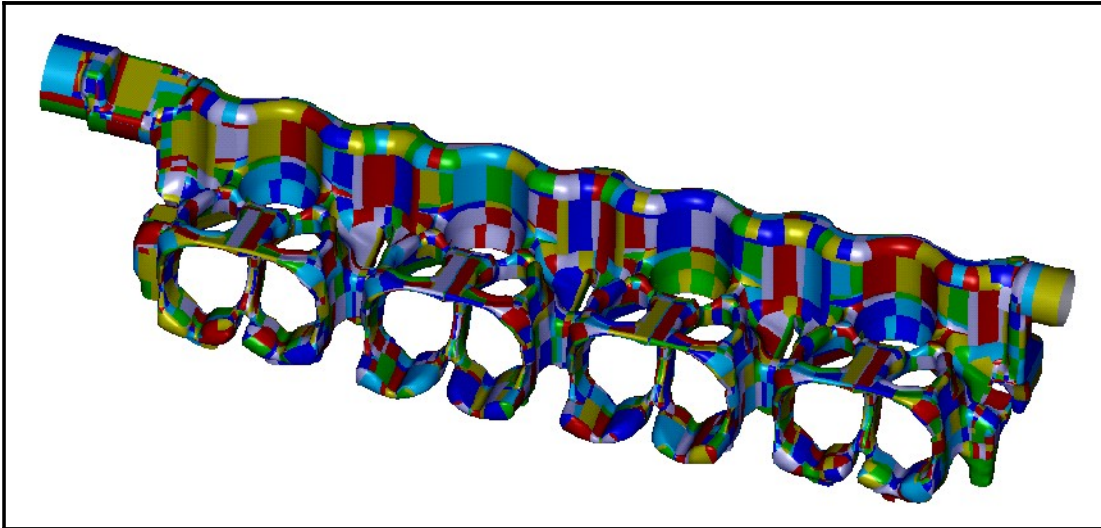


Figura 3 – Modello CAD della camera d'acqua generato dai dati CT

#### 4.3 Analisi tridimensionale dello spessore delle pareti di un cilindro motore

La CT consente di verificare alcuni parametri essenziali di un progetto come, ad esempio, lo spessore delle pareti, per controllare che un prodotto si comporti nel modo desiderato, sin dalle prime fasi dello sviluppo.

Il software VGStudioMax della Volume Graphics permette all'utente di visualizzare un'immagine ottenuta dai dati CT con un codice a colori di un definito intervallo dello spessore delle pareti. Dall'immagine tridimensionale e dalle sezioni ortogonali si può identificare in modo molto veloce lo spessore critico delle pareti. La figura 4 mostra l'analisi 3-D dello spessore delle pareti di un cilindro motore ottenuta usando VGStudioMax.

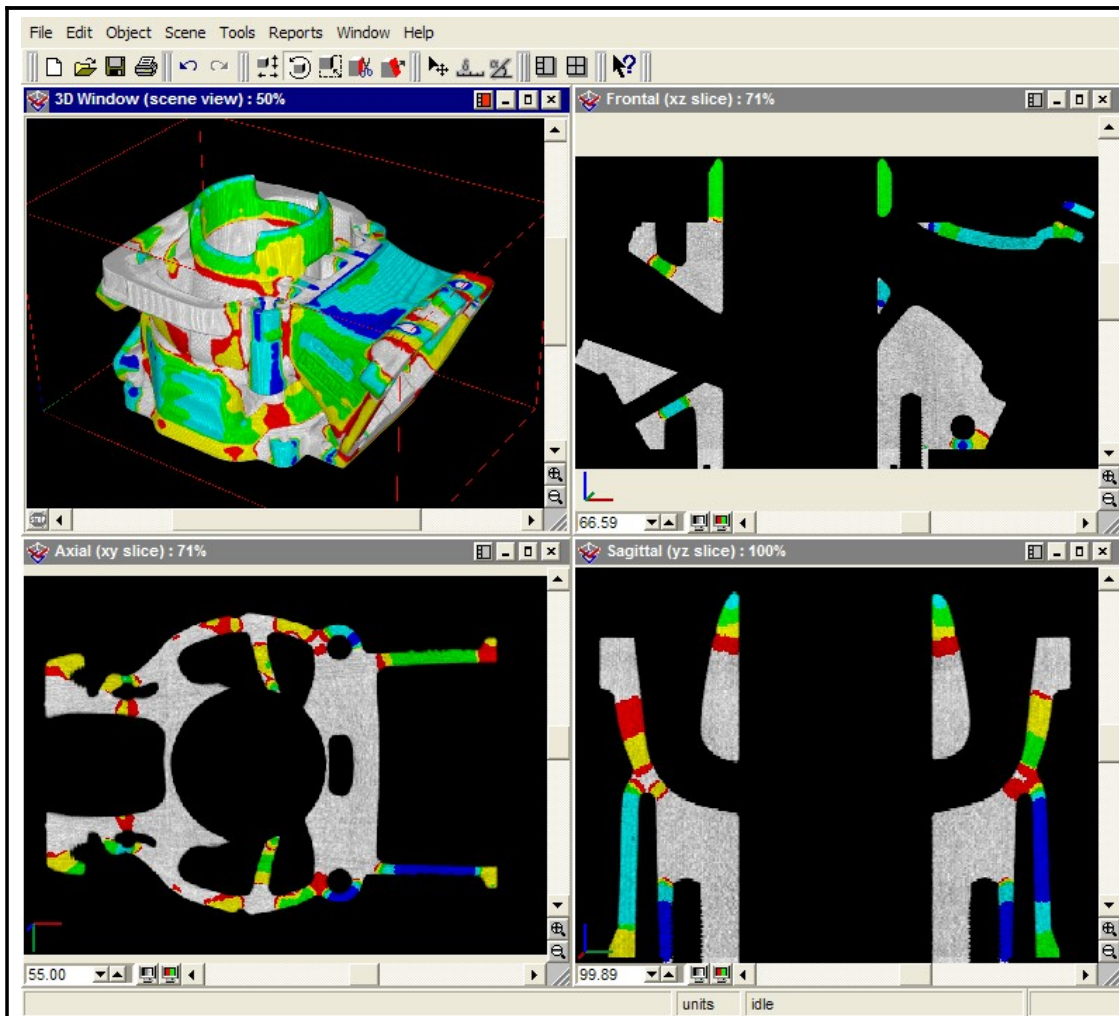


Figura 4 – Analisi 3-D dello spessore delle pareti di un cilindro motore

#### 4. 4 Analisi volumetrica dei difetti di una testa cilindro

Lo stesso software può essere usato per l'analisi tridimensionale dei difetti. Questo è un'interessante ed efficiente metodo per rivelare pori o cavità in un pezzo e compiere un'analisi statistica. I difetti sono codificati mediante un codice a colori per dimensione e la loro posizione e dimensione viene mostrata in una tabella. La figura 5 mostra l'analisi volumetrica dei difetti ottenuta con VGStudioMax nel caso di una testa cilindro. Nella figura sono mostrate la vista frontale, sagittale ed assiale insieme alla lista dei difetti con la loro posizione spaziale e dimensione.



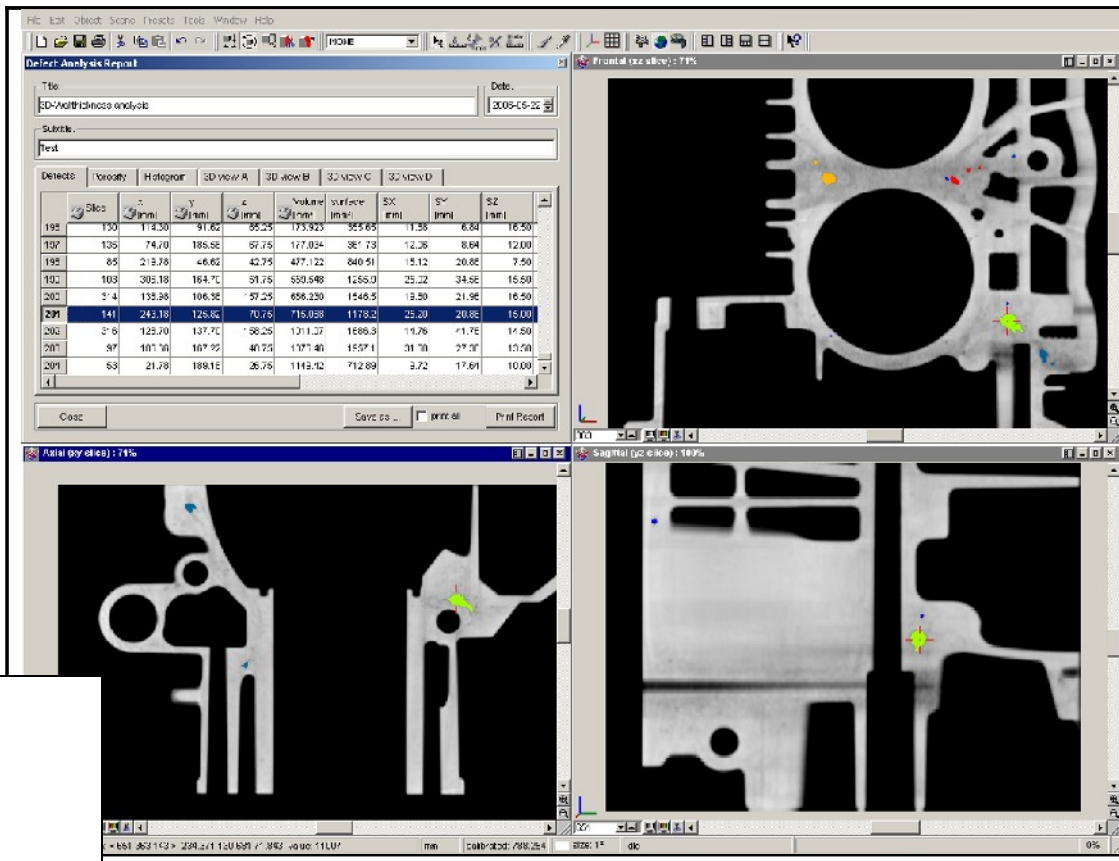


Figura 5 – Analisi volumetrica dei difetti di una testa cilindro

## Conclusioni

La tomografia computerizzata è un metodo eccellente per la misura delle dimensioni di parti non accessibili, per l'identificazione di difetti, per l'analisi degli spessori critici delle pareti e per la ricostruzione della geometria tridimensionale di getti complessi. La richiesta di analisi tomografiche di getti di metalli leggeri è cresciuta considerevolmente negli ultimi anni. EMPA ed altri nove partner, nell'ambito di un progetto di ricerca europeo, stanno sviluppando un nuovo sistema CT in grado di acquisire i dati 3-D più velocemente dei sistemi 2-D ora disponibili mantenendo la stessa risoluzione spaziale. Questo ridurrà i costi dell'acquisizione dei dati e presumibilmente allargherà ulteriormente le applicazioni della tomografia computerizzata per applicazioni industriali.

## Bibliografia

1. A. Flisch et al. – "Industrial computed tomography in reverse engineering applications", DGZfP-Proceedings BB 67-CD, Paper 8, 1999.
2. A. Obrist et al. - "First article inspection based on industrial X-ray computed tomography", Proceedings of International Conference on material testing and research, 2001, Nuremberg.
3. A. Flisch et al. – "Efficient volume digitizing with adaptive computed tomography", DGZfP-Proceedings BB 84-CD, Paper 17, 2003.
4. Sauerwein et al. – "25 years of industrial CT in Europe", DGZfP-Proceedings BB 84-CD, Paper 10, 2003.