

Tomografia Computerizzata (TC)

per applicazioni industriali

YXLON

Tomografia Computerizzata (TC)

per applicazioni industriali

**Le caratteristiche, i campi applicativi e la tecnica
dei moderni sistemi 3D a raggi X**

Una pubblicazione di YXLON International

Indice

Introduzione	5
Acquisizione e ricostruzione	6
Tipiche applicazioni TC	6
Individuazione di porosità e inclusioni	6
Metrologia (confronto tra valori nominali ed effettivi)	8
Metrologia (rilievo dimensionale di strutture interne)	9
Analisi strutturale: blocco di calcestruzzo / cemento / campioni geologici	10
Reverse Engineering con la TC	11
Analisi di unità assemblate	12
Analisi di materiali compositi	13
Analisi di componenti elettronici e circuiti stampati	14
Componenti di un sistema TC	15
Manipolatore	15
Sorgente radiogena	16
Detector	19
Software	19
Ricostruzioni digitali	21
Campo di scansione normale (FoV) ed esteso (FoVE)	21
Dal pixel al voxel	21
Durata di una scansione TC	22
Determinazione della superficie	23
TC + metrologia	23
La scelta del sistema TC	25
Installazione del sistema TC	27
Documentazione dei dati tecnici	27
Formare le competenze e certificare gli operatori	27
Installazione e corsi di formazione	28
Supporto per il collaudo finale del cliente	29
Nota conclusiva	29

Introduzione

La tomografia computerizzata (TC) rappresenta la tecnologia più interessante in assoluto per i test non distruttivi (NDT - non-destructive testing). Il Dataset ottenuto da una scansione TC permette al cliente di esaminare il campione di materiale, osservando difetti, eseguendo misure e individuando variazioni a livello di densità. Ingegneri, costruttori, ricercatori e scienziati possono così scoprire caratteristiche che non potevano prima essere esaminate senza distruggere l'oggetto del test.

I dati ottenuti permettono di sviluppare nuovi materiali e nuove geometrie. Un provino completo, inquadrabile in una sola scansione, consente di rilevare possibili difetti e contemporaneamente le dimensioni. In passato tali scansioni e le successive fasi di elaborazione duravano diverse ore, a volte addirittura giorni; oggi, con i moderni sistemi hardware e software in commercio, scansioni e analisi sono disponibili in pochi minuti.

Chi non dispone di un sistema industriale TC può portare o inviare il campione di materiale a un ente che offre questo servizio di analisi, per far eseguire la scansione previo compenso.

Il termine tomografia è costituito dai termini greci *tomos* (taglio) e *graphein* (scrivere) e letteralmente significa „raffigurazione a sezioni o strati“. La scansione TC genera una serie di immagini proiettate mono o bidimensionali, da diversi angoli di rotazione. Il software di ricostruzione assembla queste immagini strato dopo strato per generare il volume tridimensionale dell'oggetto da analizzare. I dati possono essere di particolare importanza per ricercatori, costruttori o produttori, in quanto la procedura permette di esaminare caratteristiche interne dei componenti senza doverli tagliare in blocchi o strati - una procedura distruttiva che solitamente rende inutilizzabile il componente.

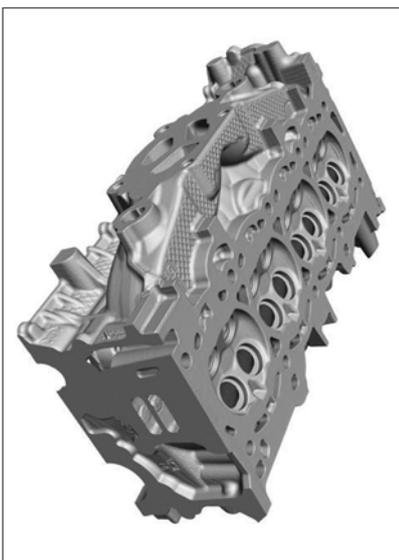


Fig. 1: volume TC di una testa di cilindro

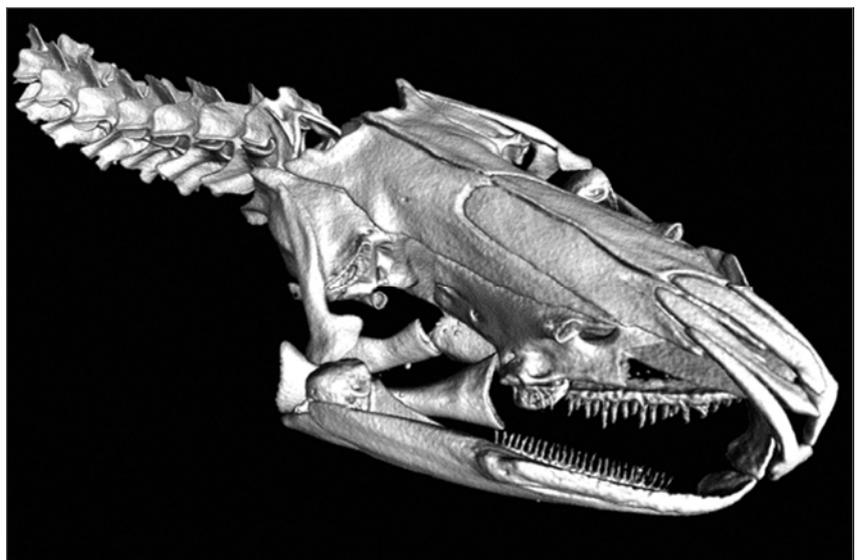


Fig. 2: scansione TC di un preparato biologico

Le origini della tecnologia TC di scansione risalgono agli anni Settanta. La tomografia computerizzata è stata sviluppata da due ricercatori, Godfrey Hounsfield e Allan Cormack, che nel 1979 si sono aggiudicati, per le loro ricerche, il premio Nobel del settore fisiologia o medicina. La TC era stata inizialmente progettata per analizzare il cervello umano, ma i campi di applicazione sono rapidamente passati anche al settore industriale e alla ricerca.

Acquisizione e ricostruzione

Per generare un Dataset TC è necessario effettuare la ripresa di una serie di immagini radioscopiche bidimensionali, solitamente su una rotazione completa a 360°. Un algoritmo di ricostruzione calcola i tomogrammi partendo dalle singole proiezioni ottenute.

I tomogrammi sono „fette“ 3D virtuali di un oggetto tridimensionale, nelle quali ogni livello di grigio rappresenta un valore diverso della densità. Tanto più chiaro è il livello di grigio, tanto più denso è il materiale dell'oggetto. Il nero corrisponde al vuoto o all'aria. Il Dataset bidimensionale è principalmente una sequenza di centinaia o migliaia di tomogrammi. La procedura che permette di realizzare dai dati ottenuti un modello tridimensionale realistico è il cosiddetto rendering volumetrico, grazie al quale sono possibili visualizzazioni dettagliate e fotorealistiche della geometria esterna e interna dell'oggetto. Volendo, si possono anche adeguare ombre, punti non trasparenti e angolo della telecamera, o realizzare video.

Tipiche applicazioni TC

Prima di occuparci approfonditamente della tomografia computerizzata e dei componenti del sistema, esaminiamo e paragoniamo le tipiche applicazioni industriali.

Individuazione di porosità e inclusioni

L'applicazione in esame riguarda un componente essenziale di un respiratore di rianimazione. Il componente è costituito da due elementi fusi, saldati su due lati di una lastra. La TC permette di individuare tipici difetti di fusione e saldatura, comprese le porosità nei due elementi fusi. Le informazioni ricavate permettono al produttore di ottimizzare i processi produttivi, minimizzando le porosità nei cordoni di saldatura.

La rappresentazione tridimensionale del Dataset della lastra saldata (Fig. 3) ha una superficie trasparente, per permettere la visione interna del pezzo. Si sono usati colori diversi per rappresentare difetti di varia entità.

La sezione attraverso il cordone di saldatura mostra la porosità causata dalla procedura di saldatura.

Nella sezione inferiore del cordone di saldatura (Fig. 4) i difetti sono codificati a colori, per renderne immediatamente evidente l'entità. È anche possibile visualizzare i difetti per evidenziarne la forma e la posizione (Fig. 5). Spesso pori al di sotto di una determinata grandezza non sono critici per il funzionamento del componente. In questo genere di applicazione è importante anche la posizione: i punti difettosi appena al di sotto della superficie sono più critici rispetto a quelli interni, circondati da una massa maggiore di materiale.

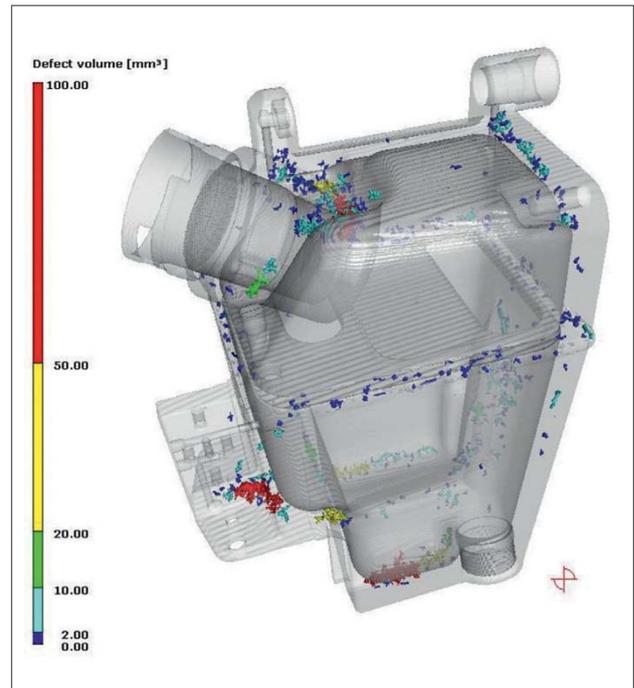


Fig. 3: Componenti di un respiratore. Volumetria dei difetti (mm³)

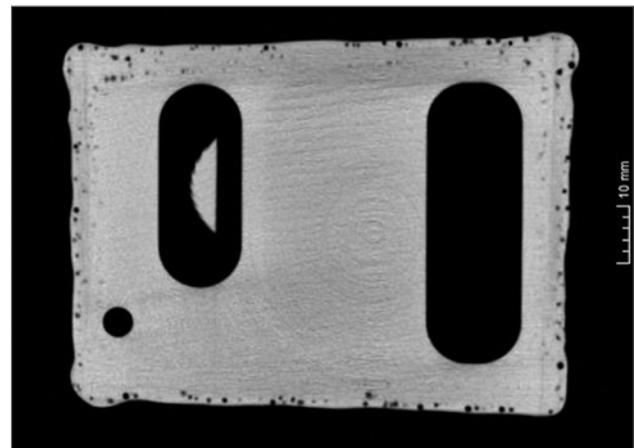


Fig. 4:
Porosità formatasi durante il
processo di saldatura

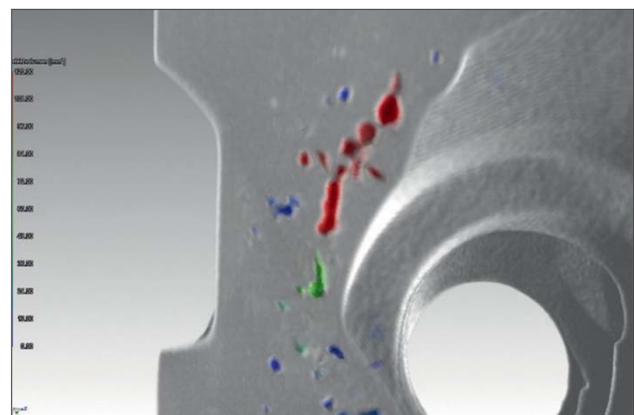


Fig. 5:
Difetti classificati in
base all'entità

Questo elenco di difetti individuati automaticamente (porosità) comprende caratteristiche come „Grandezza“ e „Posizione“. L'istogramma (Fig. 6) indica il numero di difetti per diversa entità. Nell'esempio la maggior parte dei punti difettosi è relativamente grande, con dimensione < 0,08 mm (evidenziati in blu).

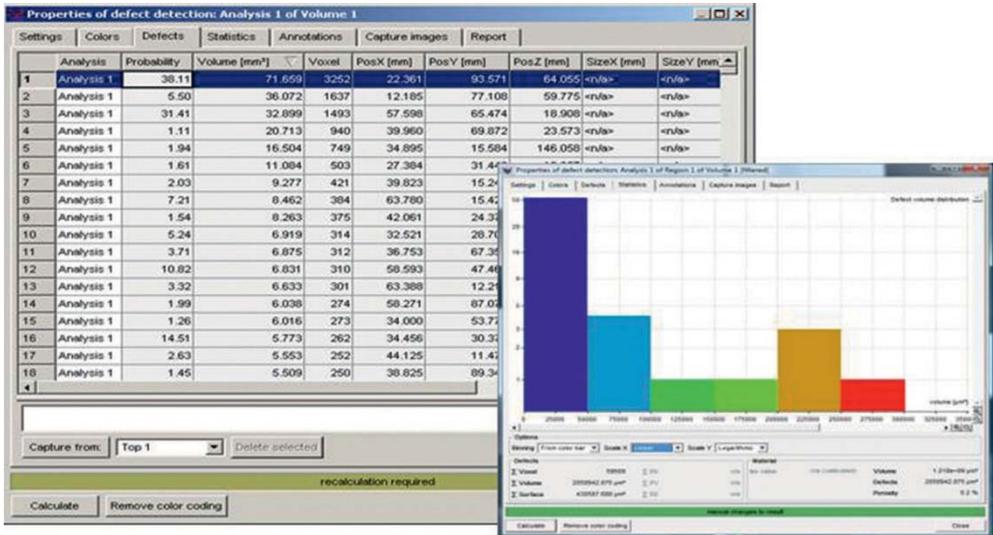


Fig. 6:
Istogramma dei difetti

Metrologia (confronto tra valori nominali ed effettivi)

Le scansioni tridimensionali sono spesso utilizzate per un confronto delle superfici. La TC può fornire modelli precisi e nitidi delle superfici, anche di quelle interne e di interfaccia, per un'analisi non distruttiva delle caratteristiche interne.

In particolare, risulta possibile confrontare una scansione TC con un modello CAD, oppure paragonare due scansioni tra di loro. Una volta allineati i Dataset, le differenze tra le rispettive superfici sono tipicamente rappresentate per classi di colori.

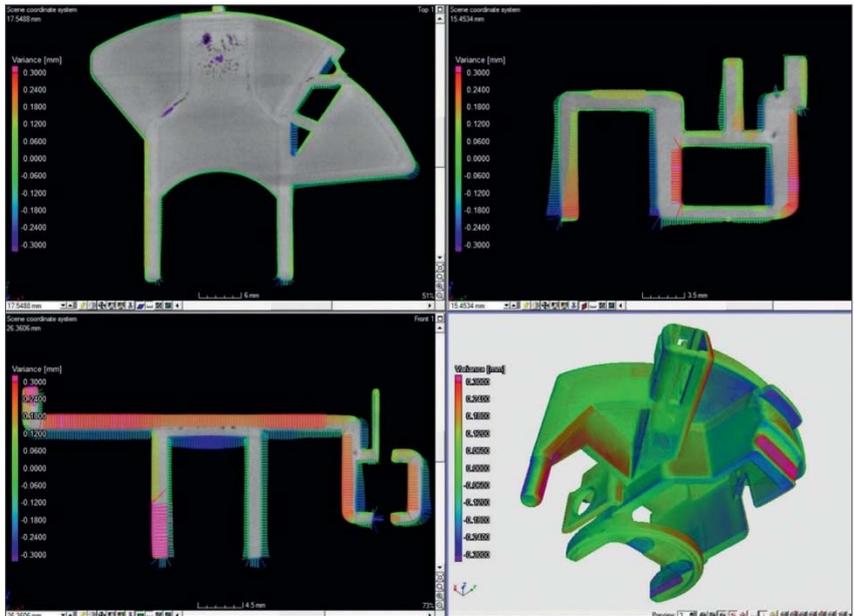


Fig. 7:
Confronto di Dataset

Questa funzione è utilizzata per:

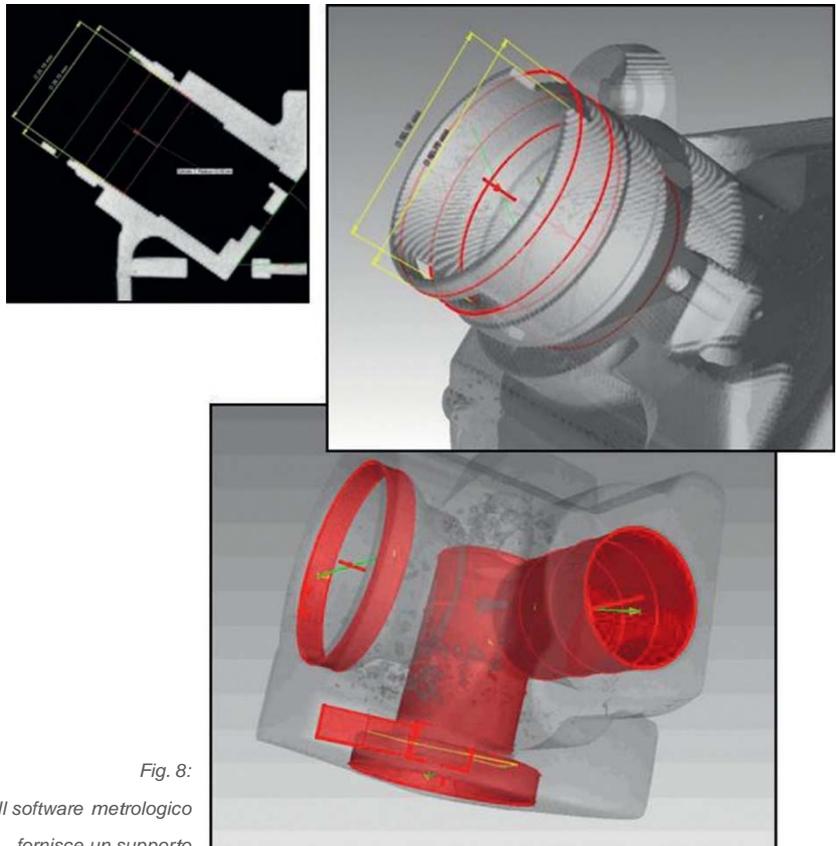
- Confronto delle distanze superficiali di un pezzo fuso con quelle del modello CAD, per rilevare variazioni di forma rispetto al valore teorico.
- Confronto di due pezzi realizzati in tempi diversi dallo stesso stampo, per valutarne il grado di usura nel tempo.
- Confronto di un pezzo fuso con un file CAD per individuare pori prossimi a superfici di lavorazione che potrebbero innescare perdite e/o trafilamenti.

Metrologia (rilievo dimensionale di strutture interne)

La TC è spesso utilizzata per la raccolta di dati destinati a verbali di conformità sulle singole cavità di stampi multi-impronta nello stampaggio a iniezione di materiale plastico. La stessa procedura è indispensabile anche per redigere il rapporto di ispezione primo articolo (First Article Inspection Report - FAIR) per una determinata procedura produttiva. Anche per lo stampaggio in plastica, la TC consente di identificare l'usura utensile, semplicemente con una scansione di pezzi prodotti in tempi diversi. In tal modo si ricavano e si visualizzano le modifiche dimensionali.

Negli ultimi anni la tomografia computerizzata è diventata un'alternativa riconosciuta agli strumenti di misura a coordinate, in quanto permette di misurare caratteristiche interne senza dover distruggere il provino. Le moderne costruzioni tecniche sfruttano il sistema GD&T (Geometric Dimension & Tolerancing) per monitorare le tolleranze. Norme come l'ASME Y14.5 e l'SO 1101 offrono regolamentazioni quadro oggi applicate nell'intero settore industriale.

Dataset TC di alta qualità permettono di verificare rapidamente e con ottima precisione molte caratteristiche, con i rapporti generati dal software. Tra i pacchetti software disponibili si annoverano VGStudio MAX, Geomagic, PolyWorks e qualsiasi altro programma in grado di elaborare grandi file STL (Standard Tessellation Language - formato per interpretare la superficie mediante triangoli) o Dataset point cloud.



*Fig. 8:
Il software metrologico
fornisce un supporto
in fase di verifica.*

La metrologia TC offre diversi vantaggi:

- Semplice ripetibilità: si possono realizzare scansioni di diversi pezzi da cavità diverse e subito dopo effettuarne la misurazione.
- Dataset omogenei: la TC non richiede la fusione dei dati né lo smoothing. Pertanto i Dataset STL di superficie risultano „ermetici“.
- I test non distruttivi permettono misurazioni senza contatto direttamente sulla riproduzione digitale del particolare: dopo aver generato i dati volumetrici, è possibile indagare qualsiasi caratteristica dimensionale, anche a distanza di tempo e non disponendo più del pezzo fisico.
- Per i materiali morbidi (come la gomma), la scansione senza contatto è particolarmente preziosa, poiché non deforma l'oggetto durante la rilevazione della misura.

Analisi strutturale: blocco di calcestruzzo / cemento / campioni geologici

La TC permette di esaminare l'interno di svariati campioni geologici e di materiali sintetici. Questa tecnologia è utilizzata per un'ampia gamma di applicazioni:

- Analisi di carotaggi: valutare la granulosità del campione e simulare le caratteristiche di permeabilità di un fluido che attraversa materiali porosi.
- Studio delle caratteristiche dei materiali edili usati per la costruzione di strade e ponti: i provini di calcestruzzo possono essere analizzati quantitativamente prima e dopo l'affaticamento o il carico.
- Nel settore dei materiali, per esaminare l'integrità e le dimensioni dei materiali edili leggeri, usati per ridurre il peso di autovetture, velivoli e veicoli spaziali.

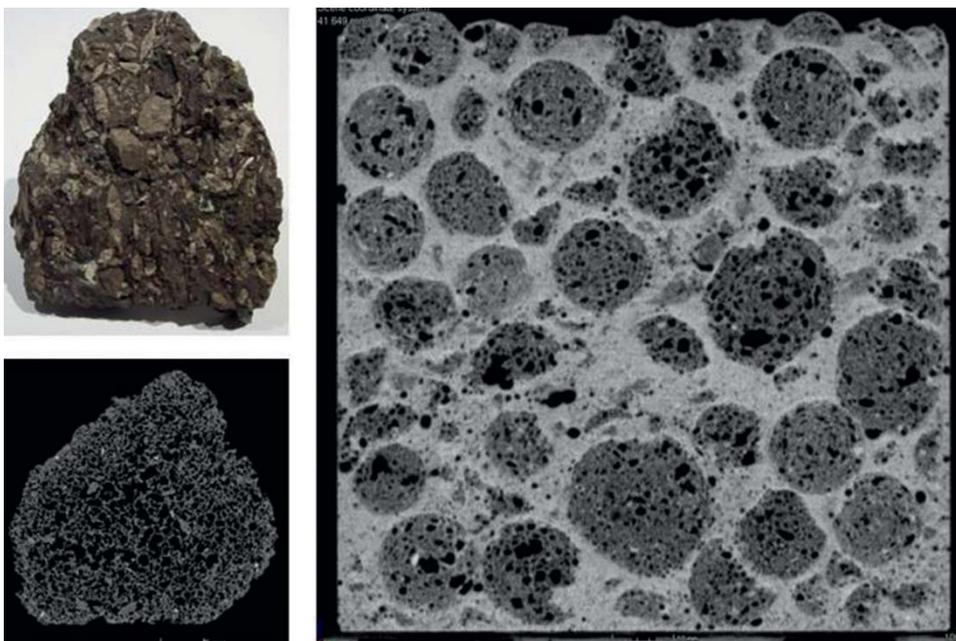


Fig. 9:
Analisi di campioni
di roccia

Reverse Engineering con la TC

In merito al Reverse Engineering, la TC offre diversi processi di supporto.

Un metodo (Fig. 10) permette di misurare le caratteristiche dimensionali nella TC per poi ricostruirle con l'ausilio del software CAD (ad es. AutoCAD, SolidWorks, Catia NX o altri).

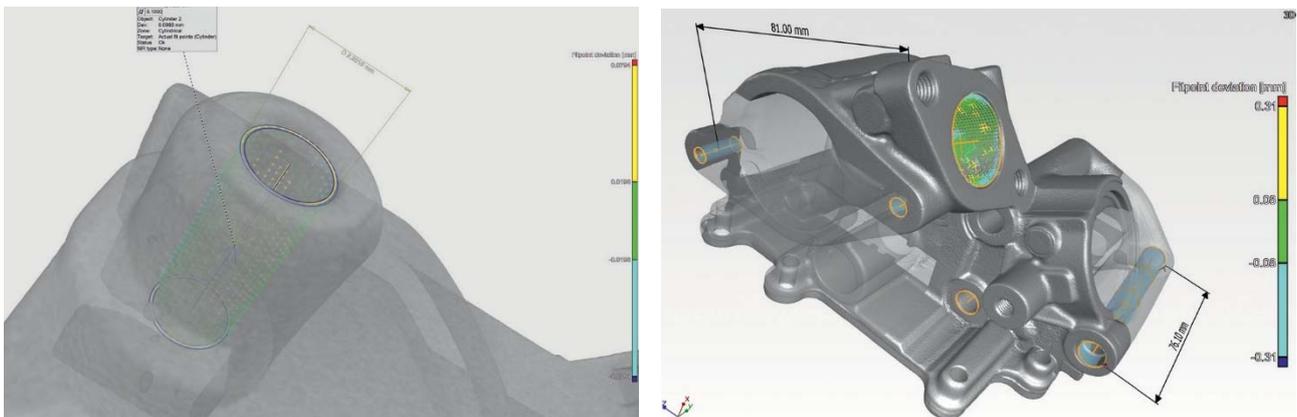


Fig. 10: Reverse Engineering con misurazione

Un altro metodo consiste nell'estrarre da un Dataset TC elementi geometrici di forma regolare (cilindri, piani ecc.) e nel trasformare un file STL (Standard Tessellation Language) in un file STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data - la norma relativa alla descrizione dei dati di prodotto) (v. Fig. 11).

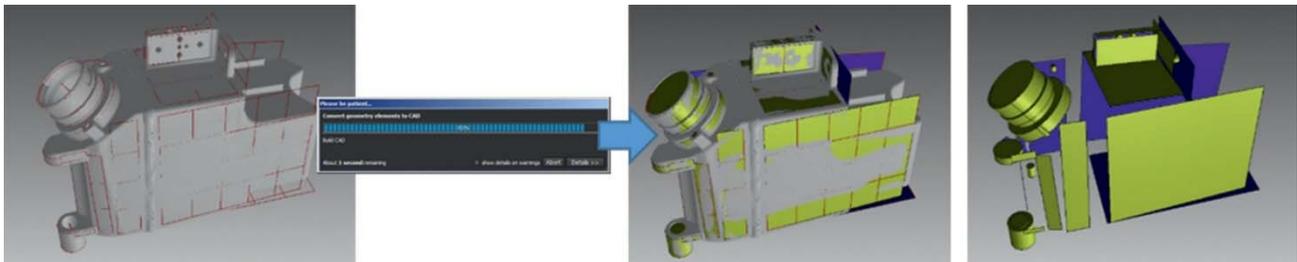


Fig. 11: Reverse Engineering con estrazione di geometrie regolari e memorizzazione come file CAD

Un'ulteriore possibilità di Reverse Engineering consiste nell'acquistare un software appositamente realizzato per questo scopo (Geomagic Design X di Laser Design, PolyWorks di InnovMetric e Verisurf X9 di Verisurf sono alcuni esempi di prodotti presenti sul mercato). Come rappresentato nella Fig. 12, si possono sfruttare diversi metodi per il riconoscimento dei contorni. Partendo dalla qualità delle scansioni, basandosi sui dati CAD e mediante un algoritmo apposito, viene creato un modello tridimensionale della superficie. La mesh definitiva (il reticolo a poligoni) può essere memorizzata come file STL.



Modello tridimensionale della superficie basato su dati TC

Fig. 12: Software per il Reverse Engineering.

In applicazioni di Additive Manufacturing (stampa 3D) si possono inviare direttamente alla stampante 3D file STL corretti di ottima qualità, previa esecuzione di piccole modifiche con appositi software di modellazione. Spesso questa applicazione non richiede un vero e proprio software di Reverse Engineering. Nella figura in alto a destra la mesh „ermetica“ (senza buchi e senza vuoti) è costituita da circa 500.000 triangoli.

Analisi di unità assemblate

La capacità della TC di digitalizzare diverse densità è spesso usata per controllare l'accoppiamento di campioni assemblati. Spesso si usa la tomografia computerizzata anche per analizzare singoli componenti di un assemblato, verificandone la presenza e la disposizione. La Fig. 13 rappresenta la posizione interna della spirale di una sigaretta elettronica.

Il software TC esterno di analisi VG Studio MAX permette all'operatore di scomporre l'assemblato nei componenti costituenti, assegnando a ciascuno di essi un colore (ad es. il giallo per la spirale della sigaretta in Fig. 14).

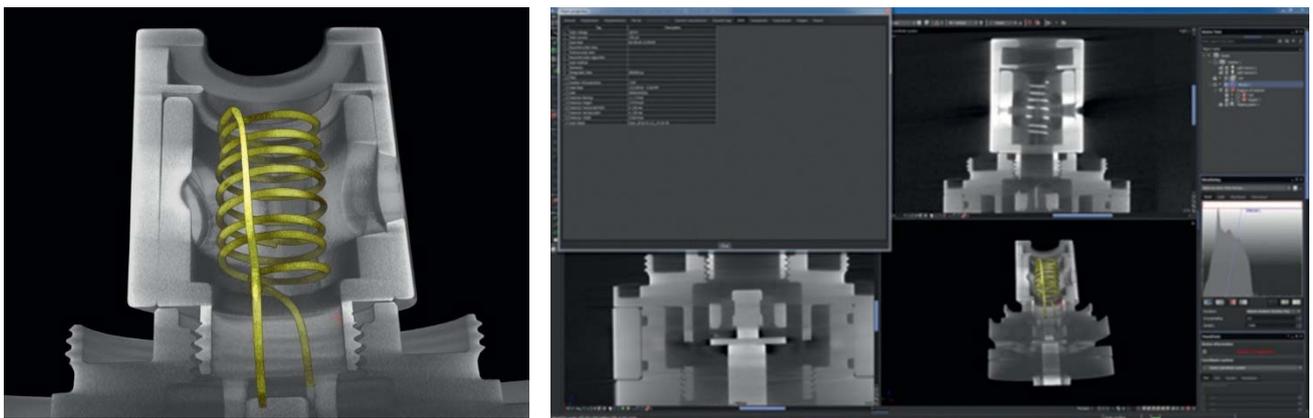


Fig. 13 + 14: Posizione dell'elemento di riscaldamento in una sigaretta elettronica, evidenziata con i software TC

L'esempio che segue riguarda il tubo di Pitot, un apparecchio per misurare la portata d'aria in quota, per il quale il sistema di ispezione pre-volo del pilota ha identificato un problema. Grazie alla scansione TC è stato possibile individuare con precisione la posizione del filo spezzato (a destra in alto nella Fig. 15), causa del problema. La scansione permette inoltre di esaminare la struttura del componente, realizzato circa 50 anni fa (Fig. 16).

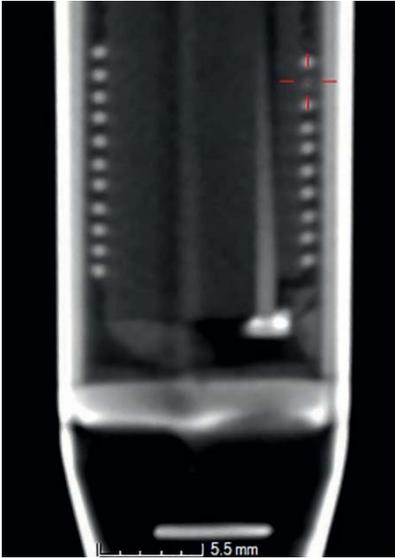


Fig. 15: Filo spezzato in un tubo di Pitot

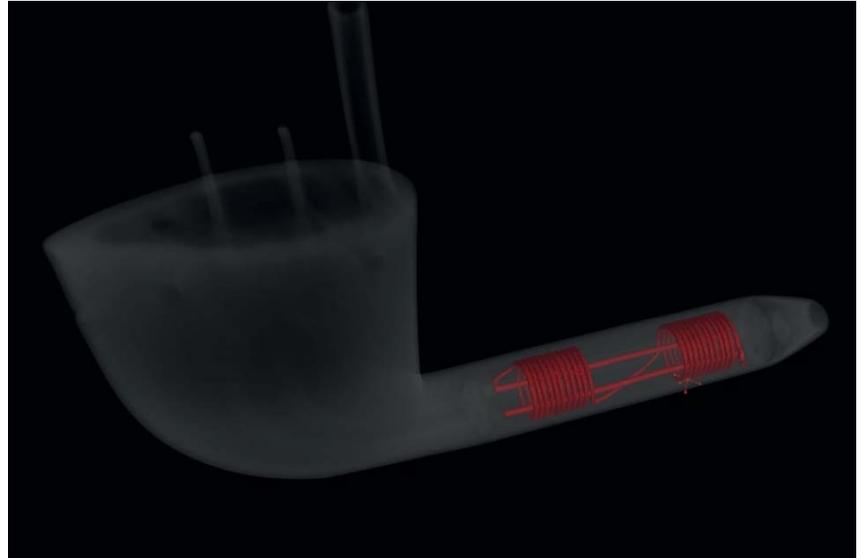


Fig. 16: Scansione completa di un tubo di Pitot

Analisi di materiali compositi

La direzione delle fibre rappresenta, per alcuni manufatti, un fattore critico di funzionamento. Tra questi spiccano i materiali compositi.

Grazie alla TC l'operatore è in grado di visualizzare e quantificare la direzione delle fibre in un provino. Uno speciale software assegna a ogni angolo dello spazio un determinato colore. Le Figure 17 - 19 mostrano le matrici delle fibre di carbonio composite di diversi provini. Gravi errori di direzione risultano così di facile identificazione.

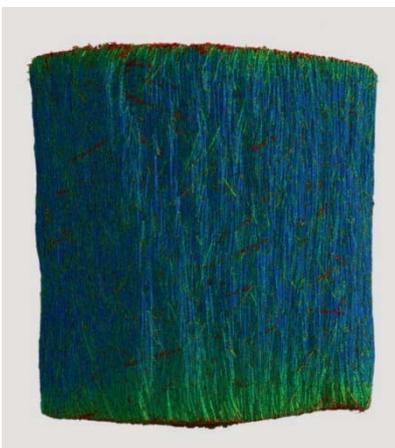


Fig. 17: Matrice di fibre di carbonio composite

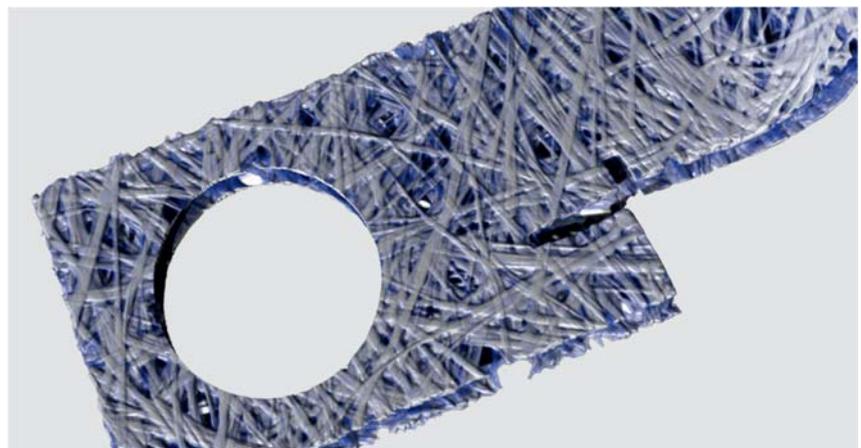


Fig. 18: Lastra di fibre di carbonio

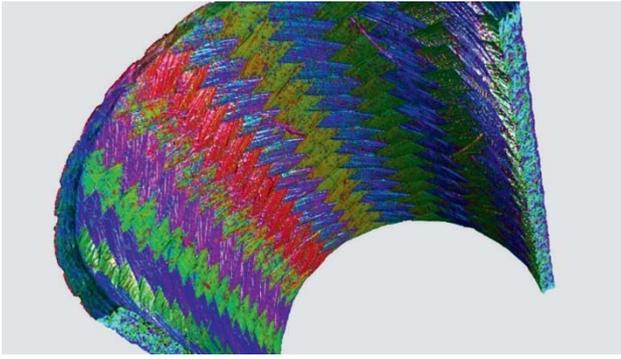


Fig. 19:
Analisi delle fibre di carbonio
con classificazione a colori

Analisi di componenti elettronici e circuiti stampati

Questa applicazione permette di analizzare componenti elettronici individuandone difetti mediante TC con apposite sorgenti radiogene micro-fuoco (JCT) (Fig. 20 e 21).

Con questo metodo si possono esaminare componenti di piccole dimensioni ricorrendo all'uso della magnificazione (ingrandimento ottico dell'area inquadrata). Si ottengono così informazioni 3D sui difetti presenti, come l'estensione dei punti di ritiro, le dimensioni delle superfici di contatto (le cosiddette pad) con pasta saldante sollevata o la struttura della superficie di contatto se la pasta saldante non è saldata. Queste informazioni dettagliate semplificano l'analisi delle cause di failure.

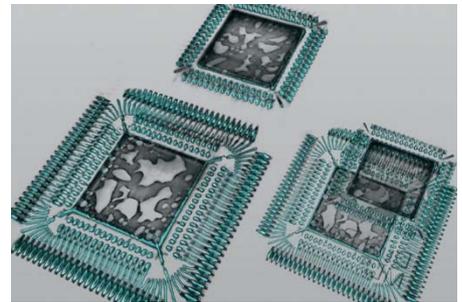


Fig. 20:
TC a micro-fuoco (μ CT) per
i test su componenti di
piccole dimensioni.

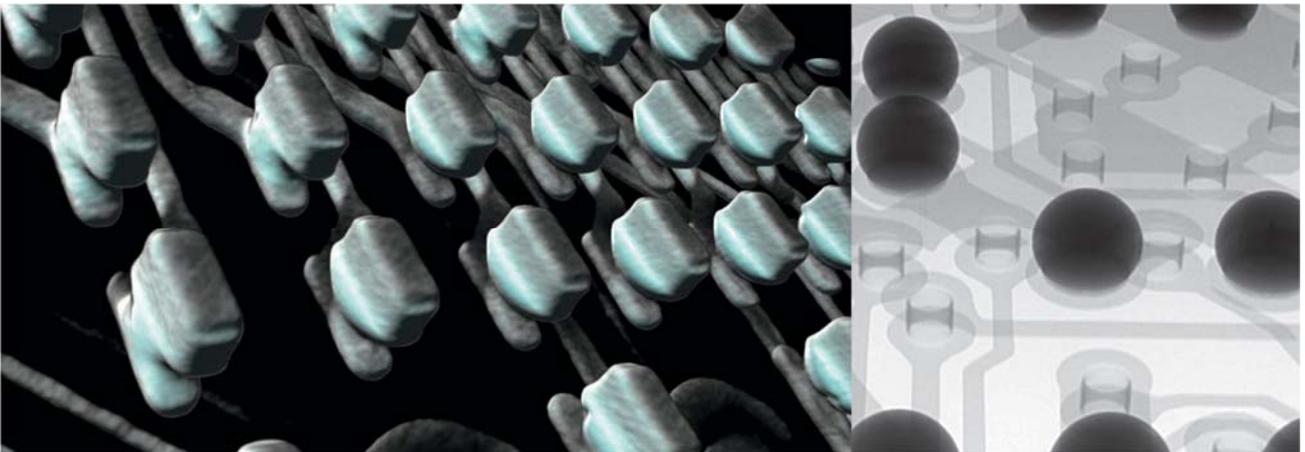


Fig. 21: La metodologia Ball Grid Array - BGA (letteralmente Sfere Allineate in Griglia) può essere controllata completamente solo con esame radiologico (3D / 2D).

La metodologia Ball Grid Array (BGA) riportata nella Figura 21 è una soluzione nella quale i punti di saldatura sono nascosti tra il componente e la scheda di circuito. Solo con l'ausilio della tecnologia a raggi X è possibile controllare in modo ottimale la qualità dei punti di saldatura.

Prendiamo in esame le ispezioni di unità a semiconduttore: sistemi radioscopici ad alta risoluzione permettono l'analisi di strutture micrometriche all'interno dei propri alloggiamenti. Grazie a questa analisi possono essere pertanto identificati eventuali difetti nel processo di produzione o in fase di sviluppo prodotto.

- Filo di rame / filo d'oro
- Fili bonderizzati spezzati o scissi
- Fili bonderizzati mancanti
- Fili bonderizzati con contatto
- Analisi di superfici incollate

Componenti di un sistema TC

Manipolatore

Come già indicato dal nome, il manipolatore movimentata il provino, ed eventualmente il detector e/o la fonte radiogena, per un'acquisizione ottimale delle immagini radioscopiche o delle proiezioni. A seconda dell'applicazione e del grado di precisione richiesto, alcuni manipolatori sono costituiti da un telaio in acciaio, mentre altri poggiano su una base di granito con attuatori lineari. Fondamenta massicce e robuste garantiscono un'elevata stabilità meccanica e una calibrazione semplice, fattori che migliorano la precisione del sistema TC.

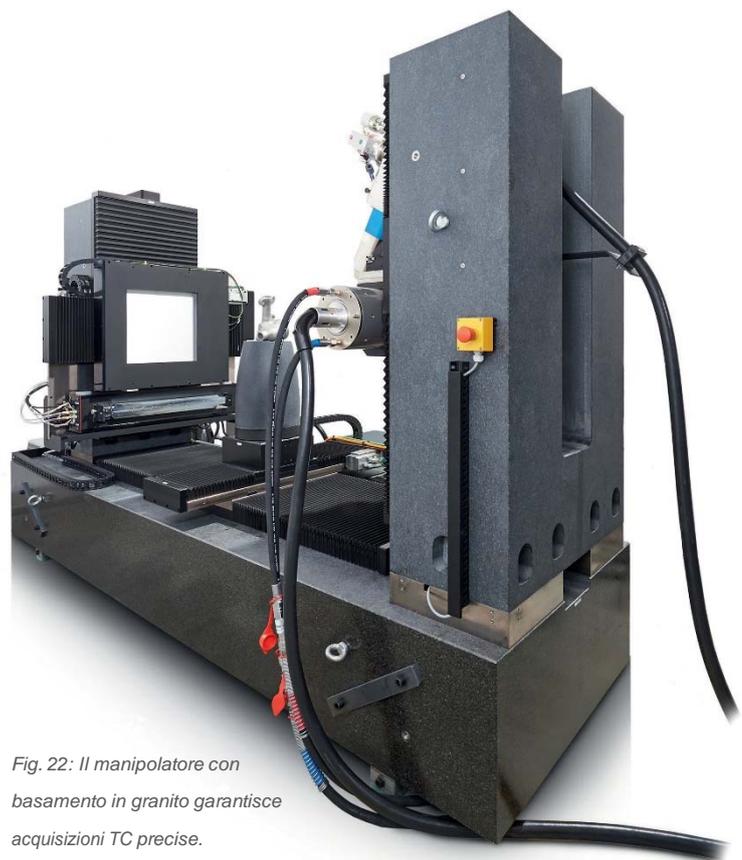


Fig. 22: Il manipolatore con basamento in granito garantisce acquisizioni TC precise.

Sorgente radiogena

I sistemi TC moderni sfruttano essenzialmente due tipi di fonti radiogene (Fig. 22).

I tubi radiogeni a mini-fuoco sono più potenti dei tubi radiogeni a micro-fuoco, con energia che spazia da ~20 keV (Kiloelettronvolt) fino a ~600 keV, con potenza massima da 100 W fino a ~1500W. Le dimensioni delle macchie focali (o spot) per il mini-fuoco variano da ~ 0,25 mm a ~ 2 mm. Risultano ideali per l'esame di componenti strutturati in applicazioni del settore automobilistico, aereo e aerospaziale.

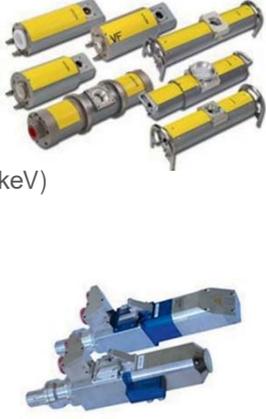
<p>Componenti del sistema: fonte radiogena</p> <p>Mini-fuoco</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Energia da ~ 20 keV fino a ~ 600 keV▪ Potenza: da alcuni 100 W fino a ~ 1500 W▪ Dimensioni delle macchie focali da ~ 0,25 mm fino a ~ 2 mm▪ Disponibile come sistema monopolare (fino a 225 keV) o bipolare (> 225 keV) <p>Micro-fuoco</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Energia da ~ 20 keV fino a ~ 750 keV▪ Potenza: < 1 W fino a ~ 300 W▪ Dimensioni delle macchie focali da ~ 1 um fino a ~ 3 um▪ Struttura meccanica come emettitore a trasmissione o diretto	
---	--

Fig. 23: Tubi radiogeni con mini-fuoco e micro-fuoco

I tubi radiogeni a micro-fuoco sono disponibili con energie da ~ 20 keV fino a ~ 750 keV. La potenza in uscita rientra tra valori inferiori a 1W e fino a ~ 300 W. Le dimensioni delle macchie focali del micro-fuoco rientrano tra ~ 1 um e ~ 300 um.

Per valutare la fonte radiogena di un sistema TC destinata a una particolare applicazione, si dovrebbe tener conto dei seguenti importanti parametri operativi:

Dimensioni e stabilità della macchia focale:

Questa caratteristica influenza la potenza in uscita del raggio e la nitidezza con cui si acquisiscono le immagini TC, fattore questo che incide nel livello di dettaglio del provino. I tubi radiogeni a micro-fuoco sfruttano macchie focali piccole, che permettono di ottenere raffigurazioni molto ingrandite e risoluzioni a livello di micrometro (~ 1 um).

I tubi radiogeni a mini-fuoco invece hanno macchie focali più grandi e quindi radiazioni a energia decisamente maggiore. Di solito sono utilizzati per campioni grandi e massivi, come pressofusi in alluminio, elementi in ghisa grigia o in acciaio colato. Elevate variazioni di temperatura possono causare un'espansione dell'alloggiamento del tubo radiogeno e successiva instabilità del campo elettrico, con deriva (drift) della macchia focale. La conseguenza è un'immagine ricostruita poco nitida. Raffreddando l'alloggiamento si limitano le fluttuazioni di temperatura e il drift delle macchie focali, migliorando notevolmente la qualità delle immagini.

keV (Kiloelettronvolt):

E' la differenza di potenziale necessaria ad accelerare gli elettroni di un circuito percorso da corrente, al fine di creare fotoni di raggi X. Tanto maggiore è il potenziale energetico della fonte, tanto maggiore è il potere penetrante della radiazione. All'aumentare delle dimensioni del particolare da scansionare, aumenta anche il fabbisogno energetico.

Milliampere (mA):

Indica la corrente che passa nel catodo. L'energia potenziale accelera gli elettroni dal catodo verso l'anodo. L'anodo è detto anche "target" ed è la sorgente della radiazione X. Maggiore è il flusso di corrente, maggiore sarà il numero di elettroni che colpiranno il target e, quindi, maggiore sarà la quantità di raggi X emessi dalla sorgente.

Per ottenere complessivamente la migliore qualità d'immagine possibile per la relativa applicazione, si deve ottenere un equilibrio tra i fattori sopra indicati delle fonti radiogene. Non esiste una soluzione universale per tutte le applicazioni.

Si distinguono quattro tecniche essenziali per la tomografia computerizzata: TC fan beam (fascio a ventaglio), TC cone beam (fascio conico), TC spirale (Helical) e laminografia (Fig. 24 - 26).

TC Fan beam (fascio a ventaglio):

questa tecnica sfrutta un fascio di raggi X a ventaglio, rilevato da un detector lineare (Linear Detector Array - LDA). Nei sistemi TC fan beam il singolo strato di sezione (slice) è rilevato ad ogni rotazione completa dell'oggetto. Una seconda rotazione completa permette di scansionare lo strato successivo. La sequenza si ripete fino alla scansione completa dell'area di interesse. Dati i tempi di scansione elevati, i sistemi TC fan beam sono ideali per la scansione ad alta energia (≥ 450 kV) di componenti molto grandi e densi, limitatamente alla regione di interesse (e non a tutto il campione).

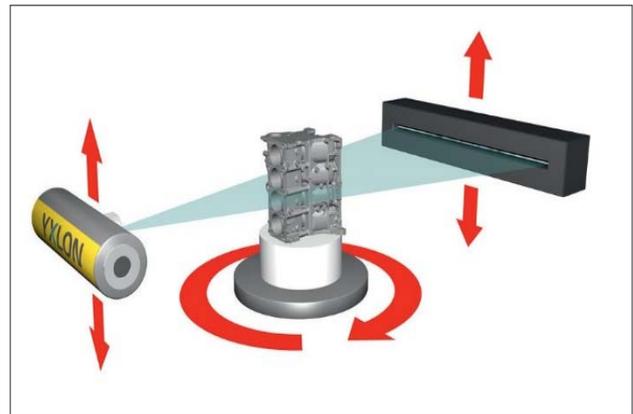


Fig. 24: Principio di funzionamento della TC fan beam

CT Cone beam (fascio conico):

con questa tecnica il fascio conico di raggi X viene rilevato da un flat panel detector (Digital Detector Array - DDA). I sistemi cone beam sono particolarmente indicati per piccoli elementi fusi, componenti elettronici e altri provini di medie dimensioni (< 300 mm \varnothing) o con densità ridotta. La TC cone beam rappresenta spesso la migliore scelta di compromesso in applicazioni dove si richiede un modello 3D completo dell'oggetto di buona qualità e, nel contempo, tempi di scansione relativamente contenuti. Con una sola rotazione completa dell'oggetto, è possibile registrare un normale Dataset in un quarto d'ora o ancora meno.

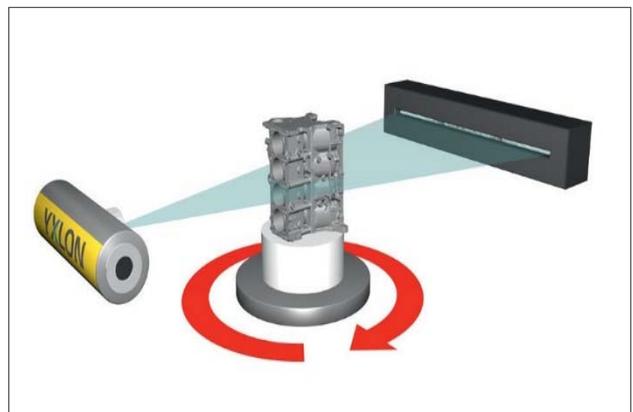


Fig. 25: Principio di funzionamento della TC cone beam

Nel caso di campioni molto grandi o molto densi (ad es. superleghe) la TC cone beam può dar luogo ad anomalie (artefatti TC). In questo caso conviene utilizzare la TC fan beam, in grado di offrire immagini migliori, focalizzando la scansione sulla singola regione di interesse.

TC spirale

durante la scansione il campione segue una traiettoria elicoidale (rotazione e movimento verticale contemporanei) rispetto alla fonte radiogena. Un detector DDA misura la radiazione emessa da una parte del fascio conico proveniente dalla fonte. Questa tecnica offre numerosi vantaggi, primo fra tutti quello di minimizzare gli artefatti del fascio conico, permettendo di ottenere dati qualitativamente migliori. La TC spirale è particolarmente indicata per oggetti di altezza elevata, evitando il laborioso processo a mosaico („stitching“) di composizione meccanica e digitale delle immagini.

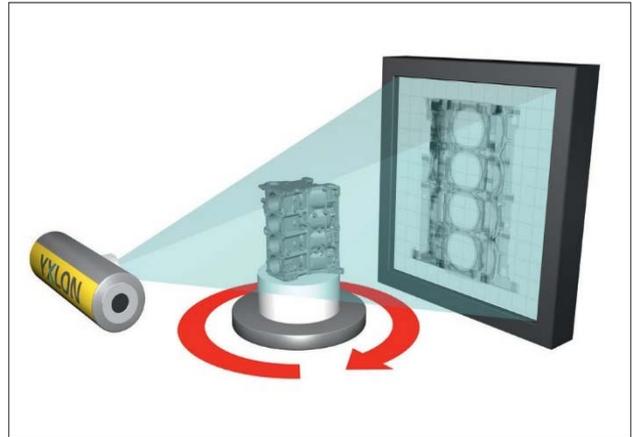


Fig. 26: Principio di funzionamento della TC spirale (elicoidale)

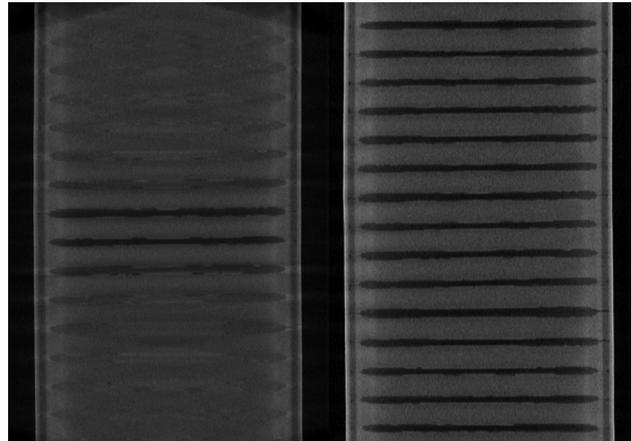


Fig. 27: Confronto tra una scansione circolare e una scansione a spirale

Laminografia:

questa tecnica permette di scansionare un'area bidimensionale (piano) di una regione dell'oggetto di specifico interesse, ignorando le aree sovrastanti e sottostanti e determinando l'altezza desiderata per la sezione TC di attenzione. La laminografia è molto utile per campioni di ingombro elevato che, a causa del notevole rapporto laterale, non possono ruotare durante la scansione. Infatti, a seconda dell'applicazione, si può far ruotare il campione oppure, quando questo non è possibile, far ruotare la sorgente radiogena e il detector attorno al campione immobile. In questo caso, il fascio conico di raggi penetra il campione da diversi angoli e l'immagine viene elaborata in strati TC singoli o multipli.

Detector

I moderni sistemi TC sono solitamente dotati di un flat-panel Digital Detector Array (DDA) o di un Linear Detector Array (LDA).

I **detector DDA** si stanno imponendo come la migliore alternativa alle applicazioni tradizionali con pellicola radiografica o CR. I moderni modelli garantiscono ottime caratteristiche di sensibilità, risoluzione e profondità di bit e permettono di ottenere immagini nitide con uno straordinario contrasto. La superficie piana e i pixel quadrati evitano problemi di distorsione. Le dimensioni dei pixel variano principalmente tra $\sim 50 \mu\text{m}$ e $\sim 400 \mu\text{m}$. Solitamente hanno una frequenza di ripetizione delle immagini da $\sim 2 \text{ fps}$ fino a $\sim 100 \text{ fps}$ e offrono livelli di amplificazione regolabili in termini di sensibilità.



Fig. 28: Digital Detector Array (DDA).

I **detector LDA** sono particolarmente indicati per precise scansioni TC fan beam su componenti di spessore elevato. Sono disponibili con pixel da $\sim 80 \mu\text{m}$ fino a $\sim 800 \mu\text{m}$. Per molti di essi è possibile regolare la temperatura, mantenendo il rendimento elevato e le prestazioni stabili. In alcuni modelli il detector si compone di singoli moduli, facilmente sostituibili, con conseguente risparmio sui costi di manutenzione. I detector LDA possono raggiungere frequenze di ripetizione d'immagine da $\sim 30 \text{ fps}$ a $\sim 600 \text{ fps}$.



Fig. 29: Linear Detector Array (LDA).

Software

Per quanto le performances dell'hardware definiscano un limite operativo del sistema, conviene sempre porsi delle domande per valutare correttamente il software adatto a un sistema TC:

- L'interfaccia utente è di facile utilizzo?
- Il software dispone di algoritmi per compensare gli artefatti?
- Come è possibile migliorare la qualità della scansione 3D generata dal sistema TC?
- Con quale grado di precisione è possibile visualizzare un oggetto?
- Quali strumenti accessori possono essere utilizzati per supportare l'analisi dei materiali (porosità/inclusioni, materiali compositi a fibre, struttura schiumosa, fenomeni di trasporto ecc.) e l'analisi dimensionale (misurazioni, confronto dimensionale modello teorico e reale, spessore delle pareti, etc.)?

- Quali strumenti di reportistica sono contenuti nel pacchetto?
- È possibile integrare il software di analisi nell'ambiente software dell'azienda?
- Quali delle seguenti caratteristiche dispone il software del sistema TC?
 - Scansioni a 180°
 - Scansione di pezzi in sequenza
 - Misurazioni in accordo alla direttiva ASTM E1695
 - Calcolo automatico off-set detector
 - Calibrazione detector
 - Scansione estesa (Field-of-View-Extension)
 - Calibrazione geometrica
 - TC spirale
 - Laminografia
 - Correzione dell'effetto di Beam hardening
 - Algoritmi per ridurre gli artefatti
 - Scansione di una regione di interesse
 - Formato dati DICOM

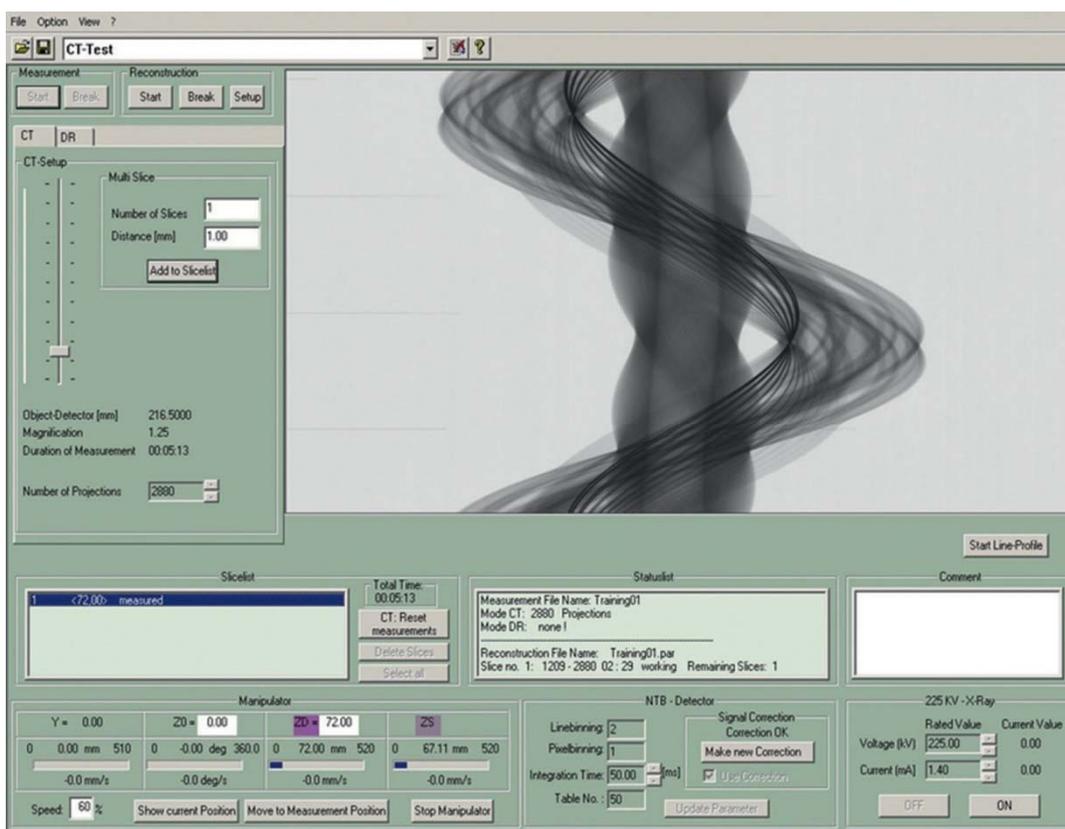


Fig. 30: Screenshot del software YXLON per l'analisi dei sinogrammi.

Ricostruzioni digitali

Campo di scansione normale (FoV) ed esteso (FoVE)

Il campo di scansione (Field of View - FoV) di una TC determina la porzione di volume dell'oggetto che può essere acquisita come immagine dal detector durante una scansione. Il campo di scansione raggiunge il valore massimo quando l'ingrandimento geometrico è minimo, cioè in prossimità del detector. La risoluzione, in questo caso, dipende sostanzialmente dalle dimensioni fisiche del singolo pixel del detector. Il campo di scansione, invece, si riduce all'aumentare dell'ingrandimento geometrico, quando cioè il componente si allontana dal detector. In questo caso la risoluzione della scansione aumenta, sebbene il livello di dettaglio dell'immagine dipenda anche dalla dimensione della macchia focale del tubo radiogeno.

Per l'acquisizione di oggetti di grandi dimensioni, si hanno due possibilità per ampliare il campo di scansione di un sistema (Field of View Extension - FoVE):

- Utilizzare il software per ingrandire virtualmente le dimensioni del detector lineare (LDA), per quanto l'oggetto non rientri del tutto nel campo di scansione (FoV). Questa procedura potrebbe generare un'immagine meno nitida o prolungare i tempi della scansione.
- Spostare fisicamente il flat-panel detector (DDA) durante la scansione, per acquisire proiezioni supplementari.
Questa procedura richiede tempi di scansione superiori e un software in grado di supportare la funzionalità descritta.

Dal pixel al voxel

Con una scansione TC, ogni pixel proveniente da una singola immagine radioscopica si trasforma in un voxel, unità fondamentale del volume 3D generato. Il pixel è l'elemento base di un'immagine bidimensionale, mentre il voxel è l'elemento fondamentale di un volume tridimensionale. Il volume ricostruito è cioè discretizzato in voxels, cui è associata una stima della densità relativa in ogni punto del campo di scansione, grazie ad un algoritmo di ricostruzione che ricava la media del coefficiente di attenuazione del materiale scansionato.

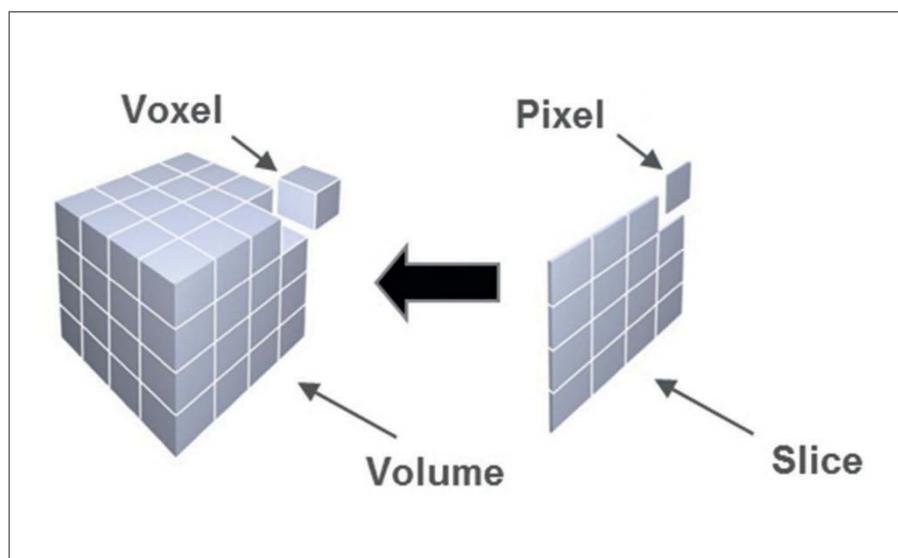


Fig. 31: Dal pixel al voxel

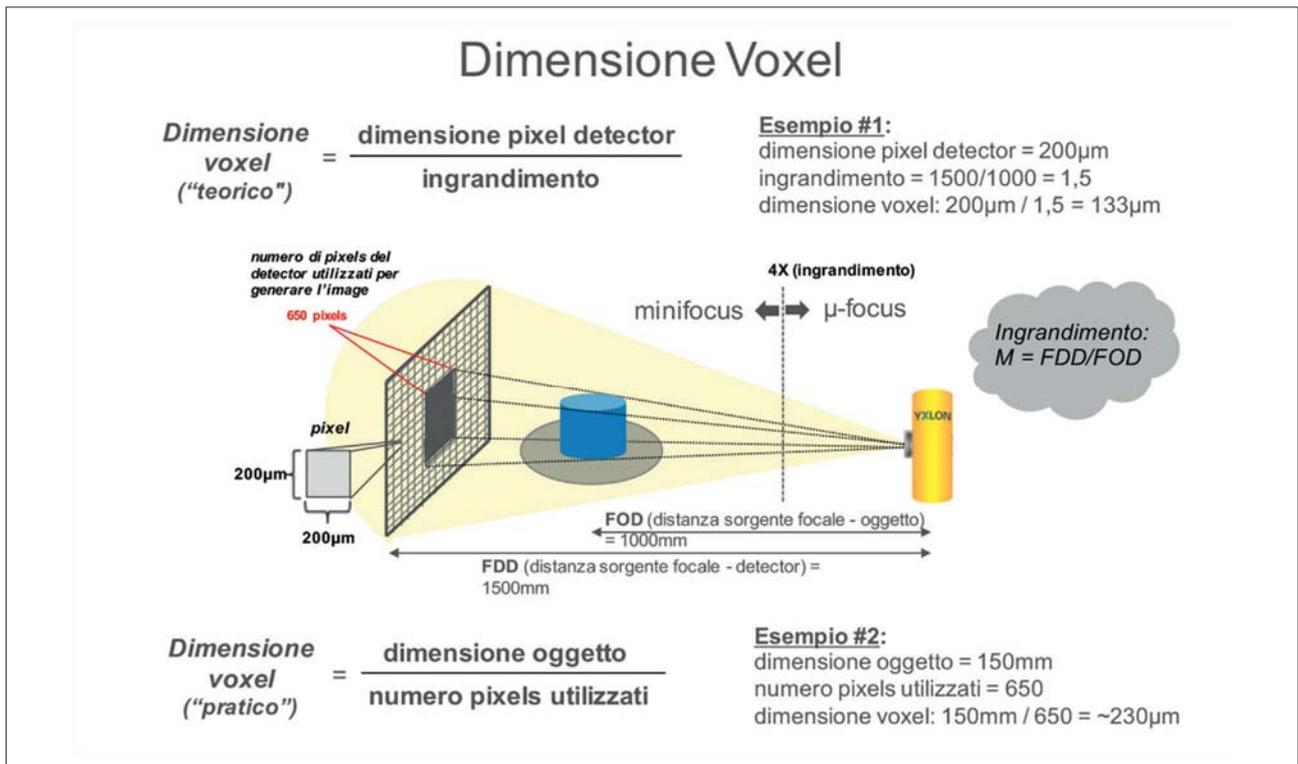


Fig. 32: Calcolo delle dimensioni del voxel

Durata di una scansione TC

È possibile calcolare la durata di scansione di un provino mediante la formula riportata in Fig. 32.

(Numero di proiezioni) x (Tempo di esposizione) x (Numero di fotogrammi integrati) x (Numero di strati)

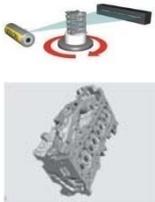
Esempio: Gruppo motore in alluminio - TC Fan beam		
Numero di proiezioni:	1440	
Tempo di esposizione singolo fotogramma:	33 ms = 0,03 secondi	
Numero di fotogrammi in ogni posizione:	1	
Numero di strati (LDA):	500	
(1.440 proiezioni) x (0,03 secondi) x (1 fotogramma) x (500 strati) = 21.600 secondi = 360 minuti = 6 ore		
Esempio: Connettore in materiale plastico - TC Cone beam:		
Numero di proiezioni:	720	
Tempo di esposizione singolo fotogramma:	300 ms = 0,30 secondi	
Numero di fotogrammi in ogni posizione:	4	
(720 proiezioni) x (0,30 secondi) x (4 fotogrammi) = 864 secondi = 14,4 minuti		

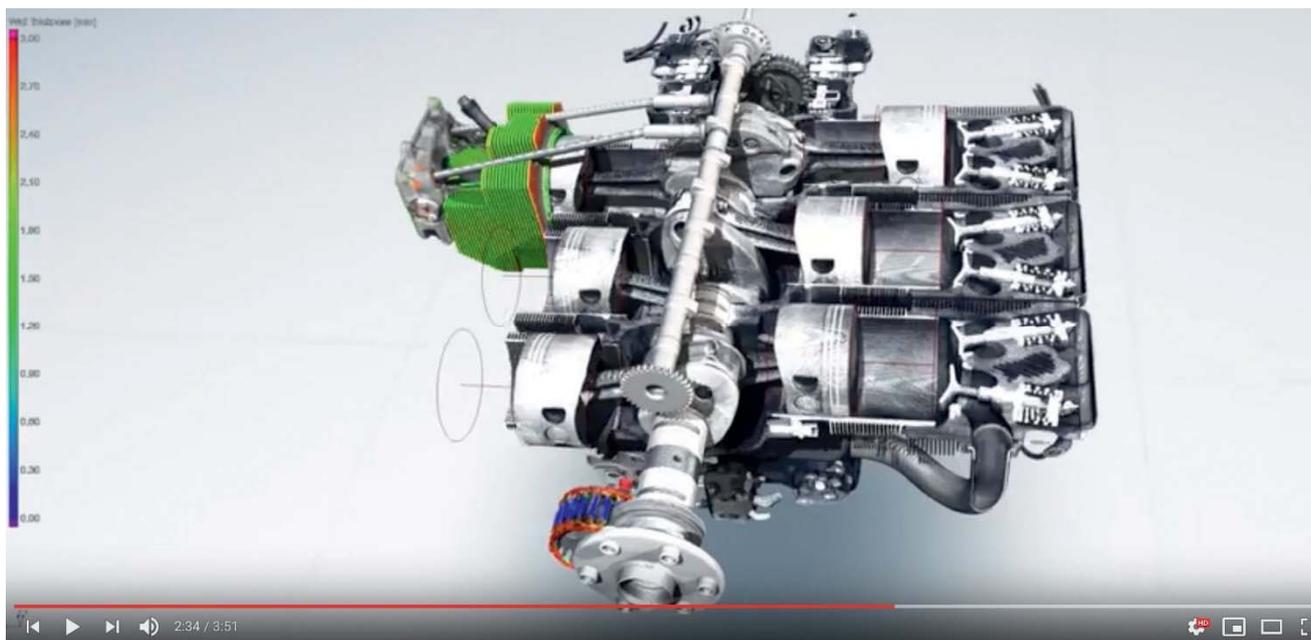
Fig. 33: Quanto dura la scansione del mio componente?

Determinazione della superficie

Non appena il volume tridimensionale è stato generato, è possibile definire una superficie nel volume TC. I metodi per definire la superficie di un modello tridimensionale sono svariati, come il metodo ISO 50%, il valore limite localizzato e molti altri, generalmente scelti in funzione della qualità delle immagini TC. Dopo aver determinato la superficie, i punti di frontiera che delimitano le superfici interne ed esterne della scansione, detti “nuvola di punti”, sono salvati in un file che può avere diversi formati. Ad esempio, la nuvola di punti salvata come superficie di elementi triangolari genera un file STL (.stl). Il Dataset ottenuto può essere utilizzato da software specifici per rilevare misure o operare reverse engineering.

TC + metrologia

Tradizionalmente, la metrologia con metodi non distruttivi può essere applicata solo su geometrie esterne dei componenti, avvalendosi di un dispendioso sistema di misura a coordinate (CMM) o tattile, o di un sistema ottico per la mappatura di superfici esterne. Metodi di misurazione interna delle geometrie si avvalgono invece della radiografia bidimensionale o di metodi distruttivi.



[Cliccare qui per visionare una presentazione video di metrologia + TC di VG Studios, YXLON e Victor Aviation Services.](#)

Oggi, grazie alla tomografia computerizzata, è possibile digitalizzare dettagliatamente le superfici interne ed esterne dell'oggetto sottoposto a scansione, avendo accesso ad aree che risultano irraggiungibili con i tradizionali sistemi tattili e ottici. Molti campioni sono difficilmente misurabili dall'esterno con un sistema tattile, poiché la forza applicata dal contatto della sonda di misura può deformare la superficie o fornire una falsa lettura. Con la TC si ottiene invece un numero quasi illimitato di punti di superficie, eseguendo non solo misurazioni da punto a punto, ma anche confronti precisi tra l'oggetto 3D acquisito e il modello teorico CAD, ivi compresa la misurazione di tolleranze geometriche (planarità, circolarità, cilindricità, etc).

Con la TC industriale è possibile rilevare il volume di un oggetto in modo non distruttivo, esaminando la struttura interna nelle reali condizioni di funzionamento. In aggiunta, risulta possibile esaminare componenti collegati tra di loro senza ricorrere al disassemblaggio. Alcuni software per la scansione TC industriale permettono di effettuare misure direttamente dal rendering volumetrico del Dataset acquisito, utili per ricavare le reali distanze tra parti accoppiate.

Le tecniche TC sono ampiamente diffuse in vari settori: analisi dei materiali, identificazione difetti, analisi dei guasti, controllo statistico di processo, metrologia, analisi di assemblaggio, analisi agli elementi finiti, applicazioni di Reverse Engineering, identificazione di componenti elettronici difettosi nelle schede di circuito e controllo di componenti per velivoli. La TC viene utilizzata per ottenere un feedback sui parametri operativi di additive manufacturing e individuare difetti interni anche bidimensionali, come fessure o cricche, inclusioni o residui di polvere di additivazione.

Oggi molti componenti sono progettati, realizzati e assemblati in più impianti produttivi - anche in paesi o continenti diversi. Pertanto è essenziale poter verificare se un componente rispetta le tolleranze del modello CAD, specialmente se parte integrante di un assemblato realizzato in impianti diversi. La TC industriale permette di confrontare il modello 3D con i dati CAD in modo che eventuali deviazioni della geometria sia interna che esterna siano immediatamente visibili, attraverso la rappresentazione 3D della mappa cromatica oppure mediante i cosiddetti "whisker plot" nella schermata 2D. La procedura è particolarmente utile quando si vuole eseguire il confronto tra componenti provenienti da fornitori diversi, quando si esaminano le differenze tra pezzi in ogni cavità di uno stampo o quando si verifica la conformità del campione rispetto al disegno originale.

I sistemi YXLON FF20 CT Metrology e YXLON FF35 CT Metrology sono stati concepiti appositamente per applicazioni di metrologia. Presentano caratteristiche essenziali per eseguire misurazioni corrette:

- Misurazione precisa e non distruttiva, anche di strutture interne
- Misurazioni anche di strutture minuscole
- Rapida e non sequenziale acquisizione dei dati con numero di punti di misurazione pressoché illimitato
- Notevole risparmio di tempo grazie all'analisi difettologica e al confronto dati nominali/effettivi
- Cicli di correzione ridotti
- Diminuzione dei costi di correzione
- Conformità alla Direttiva VDE/VDI 2630

La scelta del sistema TC

Un sistema tomografico rappresenta un investimento importante ed è necessario, pertanto, ponderare adeguatamente su quale sistema orientarsi. Di seguito elenchiamo alcuni importanti fattori da considerare nella scelta del sistema TC ideale:

Essere ben a conoscenza della propria/e applicazione/i, fornendo indicazioni dettagliate allo staff specializzato del rivenditore, il cui compito è quello di dimensionare la soluzione ideale per il cliente.

Spesso tale procedura è molto più complessa di quanto ci si attenda - a meno che non si cerchi un sistema adatto ad una singola e specifica operazione, circostanza questa non comune. A volte risulta anche difficile descrivere cosa sia veramente necessario per ogni tipo di campione. Pertanto è importante chiarire dettagliatamente il tempo ciclo dell'operazione, insieme alle performances richieste in termini di individuazione del difetto, sia in termini di forma che di dimensione.

Se si intende utilizzare il sistema tomografico per compiti diversi, è opportuno classificare tutte le applicazioni e assicurarsi che ciascuna di esse sia svolta in egual misura dal sistema scelto.

Stabilire delle priorità e accettare compromessi per le esigenze proposte.

Per quanto sia importante puntare a una „soluzione perfetta“ alle esigenze specifiche del cliente, bisogna tener presente che, in molti casi, è impossibile coprire il 100% delle richieste con un solo sistema TC. Esistono sistemi prossimi alla „soluzione perfetta“, ma spesso risultano decisamente più costosi di quanto non sia veramente necessario.

In fase preliminare le applicazioni richieste dovrebbero essere suddivise in gruppi, assegnando a ciascuno di essi una priorità in graduatoria. I gruppi potrebbero essere, ad esempio, „Dimensioni oggetto“, „Confronto CAD“, „Metrologia“ o „Misurazione dello spessore parete“, cui associare un valore di ponderazione che fornisca un'idea chiara della loro importanza rispetto all'economia dell'investimento. Probabilmente da questa procedura emergerà che un'applicazione di bassa importanza (come ad es. un componente di grandi dimensioni prodotto solo una volta al mese) causi uno sfioramento non giustificabile del budget.

In questi casi converrebbe affidare le applicazioni a bassa ripetitività e/o criticità ad una società esterna di servizi di TC. Spesso gli stessi produttori o rivenditori di sistemi TC offrono questi servizi ai propri clienti.

Conoscere approfonditamente le possibilità tecniche del proprio sistema TC. A seconda del tipo di applicazioni, alcune scelte tecniche possono garantire risultati migliori rispetto ad altre. Se una convezionale TC Fan beam o Cone beam non fornisce l'immagine in grado di rispondere alle proprie esigenze, forse la TC spirale o la laminografia possono portare a risultati migliori.

Saper interpretare cifre e dati. Le schede tecniche possono essere fuorvianti, soprattutto se ci si concentra su singoli fattori, come ingrandimento massimo, risoluzione, velocità ecc. La valutazione di un sistema deve basarsi sull'adeguatezza delle caratteristiche alle proprie applicazioni e non su semplici valori di massimo, minimo, più veloce, più frequente ecc. La possibilità di ottenere un ingrandimento di 1.000 volte, ad esempio, non è rilevante se il proprio oggetto, a causa dell'ingombro, può essere ingrandito al massimo 50 volte. Anche una risoluzione elevata va considerata con prudenza. Un detector ad alta risoluzione può avere un campo dinamico ridotto o un ritardo elevato, fornendo un'immagine di qualità scadente, nonostante il valore ottimale di risoluzione dichiarato.

Osservare con attenzione l'interfaccia operatore. Poiché ogni produttore sostiene di offrire un software di facile utilizzo, si suggerisce, in fase decisionale, di far visualizzare e utilizzare l'interfaccia software ai futuri operatori del sistema TC, presso il fornitore del sistema oppure tramite sessioni in remoto. Si consiglia anche di valutare opportunamente la relazione tra hardware e software.

Scegliere un rivenditore con uno staff di assistenza adeguato. Si consiglia un rivenditore in grado di offrire personale adeguato per interventi regolari di manutenzione e pronto supporto in caso di emergenza. E' importante chiarire il numero di tecnici disponibili per il pronto intervento sullo specifico sistema TC utilizzato (e non quanti sono disponibili a livello generale), gli anni di esperienza maturati, la sede operativa, le tempistiche medie di attesa per l'arrivo in sito.

Assicurarsi che il rivenditore offra corsi di formazione adeguati. Quando si acquista il primo sistema TC, i propri dipendenti devono seguire un corso di formazione generale sulla tomografia computerizzata. L'operatore deve acquisire le competenze per l'utilizzo del sistema in stretta correlazione alle applicazioni specifiche in cui è chiamato ad operare. Idealmente i corsi dovrebbero svolgersi sullo stesso sistema TC acquistato dal cliente. Non tutti i rivenditori possono offrire una soluzione di questo tipo; si consiglia pertanto di controllare i corsi di formazione previsti da contratto, per stabilire se siano adeguati alle proprie esigenze. Qualora si ritenga che il training sia sottodimensionato, è consigliabile chiedere al rivenditore una deroga all'offerta standard di formazione, come anche verificare quali costi comporti la formazione di nuovi operatori, in modo da essere pronti ad affrontare il turnover fisiologico dei dipendenti.

Raccogliere referenze. Dopo aver limitato la cerchia dei possibili rivenditori, è opportuno chiedere ad ognuno di essi un elenco dei clienti acquisiti. È consigliabile preparare una lista di domande sui casi di normale impiego e/o malfunzionamento del sistema (Quali sono stati i tempi di reazione del rivenditore? Ha subito indicato un responsabile per far fronte al problema?).

Da questa indagine è possibile capire se il campo di specializzazione del rivenditore è in linea con le competenze richieste e se le sue priorità corrispondono alle proprie.

Installazione del sistema TC

Una volta presa la decisione di investire in un tomografo, bisogna redigere assieme al rivenditore prescelto il piano di implementazione del sistema, riportando i costi previsti, il tempo previsto di ritorno dell'investimento, un programma di attuazione e un riassunto degli obiettivi da conseguire. Va sottolineato quanto sia importante prevedere tempo e risorse sufficienti per un'installazione corretta, per corsi di formazione e aggiornamento, adoperandosi affinché tutte le parti forniscano il loro contributo.

Documentazione dei dati tecnici

La documentazione dei dati tecnici del sistema è fondamentale per un processo di implementazione adeguato. Le

specifiche del sistema TC devono riportare le condizioni ambientali di esercizio. È importante garantire che il layout della sede di installazione sia pronto in tempo per la consegna. In alcuni casi il fornitore richiede un certificato che attesti l'adeguatezza della sede di destinazione, sia per la consegna che per il collegamento del sistema. Tra gli ulteriori punti opzionali spiccano la qualità della rete elettrica disponibile, il layout della configurazione di rete, l'installazione della messa a terra, etc. Di solito viene coinvolto anche il settore informatico; alcune società richiedono infatti determinati componenti hardware per i calcolatori, specifici protocolli di rete o strategie di salvataggio dati.

Un altro argomento di fondamentale importanza riguarda le direttive di protezione dalle radiazioni in vigore per azienda, regione e paese. Idealmente la documentazione di compravendita dovrebbe contenere la procedura utilizzata per il collaudo del sistema, con chiare segnalazioni sulle operazioni di controllo da seguire. Lo schema deve riportare voci come la qualità delle immagini in accordo alle norme vigenti, una specifica del dispositivo digitale di visualizzazione, compresa la „Bad Pixel Map“, durata prevista del ciclo, rapporti delle tempistiche operative del sistema, etc.

Nel caso di sistemi TC più complessi, è opportuno investire maggiori risorse in fase di accettazione, per il controllo del progetto in fase di realizzazione e per dei meeting periodici di aggiornamento.

Va segnalato che i dati tecnici riportati per iscritto non sempre sono utilizzabili dal punto di vista pratico, pertanto un controllo personale dell'interfaccia software presso il produttore del sistema TC rappresenta spesso un più valido supporto di controllo. L'accettazione finale, soprattutto nel caso di sistemi TC complessi, dovrebbe sempre essere seguita personalmente.

Formare le competenze e certificare gli operatori

Spesso si sottovaluta il tempo necessario per formare le competenze e certificare gli operatori. Molti nuovi utenti attendono la fornitura del sistema TC, prima di occuparsi delle necessarie misure di formazione, rallentando il processo di pieno utilizzo del sistema. In alcuni casi limite, il sistema TC ottiene il benessere del cliente senza aver ultimato la necessaria formazione, rimanendo inattivo in attesa che gli operatori raggiungano un livello di competenza adeguato.

Avviare con dovuto anticipo l'addestramento al sistema TC è una soluzione che porta spesso a risultati migliori per gli operatori, perché permette di sfruttare al meglio le risorse applicative disponibili in fase di installazione, qualifica e accettazione. Si consiglia vivamente di richiedere che la fase di training e certificazione degli operatori rientri nell'acquisto del sistema, sollecitando una bozza del piano di installazione e training. Si tratta di una misura che velocizza anche la procedura di collaudo.

Per quanto la fase di training sia pianificata verso la fine dell'installazione del sistema TC, in numerosi casi è possibile seguire dei corsi già prima della consegna. Ad esempio, è possibile avviare il training degli operatori grazie all'acquisizione di immagini digitali di altri sistemi presenti in sedi differenti (trasmesse digitalmente), in modo da accumulare le ore di ispezione digitale necessarie alla certificazione.

Installazione e corsi di formazione

La fase di training su un sistema TC rappresenta di fatto uno dei punti chiave per la messa in esercizio dell'investimento.

Si raccomanda di pianificare attentamente la data di installazione, tenendo conto delle esigenze produttive durante la fase transitoria di installazione e formazione e avendo cura di informare cautelativamente tutti i reparti coinvolti direttamente e indirettamente.



Fig. 34: Corsi di formazione teorici e pratici garantiscono agli operatori i risultati desiderati

Una strategia aggiuntiva di formazione:

ad alcune settimane di distanza dal corso originario di formazione, invitare nuovamente i docenti direttamente in sede, per un approfondimento delle conoscenze acquisite. Questa misura è particolarmente utile nel caso di sistemi TC complessi e per nuove procedure di imaging. Con essa si raggiungono due obiettivi: in primo luogo, si compensa il sovraccarico di informazioni cui sono normalmente esposti gli operatori, normalmente non avvezzi alla tecnologia propria dei sistemi TC. E' infatti irrealistico pretendere che i propri operatori recepiscano in due o tre giorni il materiale didattico fornito. Il secondo beneficio risiede nell'approccio personale sviluppato durante le prime settimane, grazie al quale gli operatori acquisiscono esperienza con il sistema, consolidano la teoria recepita e scoprono aspetti meritevoli di approfondimento. È a questo punto che un secondo confronto con il fornitore del sistema fornisce il maggior contributo, recuperando concetti sbiaditi o non compresi e incentivando approfondimenti ad alto valore di specializzazione, sulla base di richieste specifiche degli operatori in formazione.

Supporto per il collaudo finale del cliente

Una volta che il sistema TC è installato e i corsi di formazione conclusi potrebbe essere necessario un collaudo finale del cliente prima di poter dare il via ai test sui suoi prodotti, poiché non sempre è possibile far approvare in anticipo le specifiche procedure di scansione e analisi.

Fortunatamente, è più semplice raccogliere dati e condividere le immagini dopo aver installato il sistema digitale. Tutti gli interessati devono essere costantemente aggiornati sulla pianificazione delle scadenze, in modo da evitare difficoltà dovute a mancate disponibilità di personale.

Una volta terminato il collaudo del sistema TC e/o del software, potrebbe essere necessario soddisfare altri requisiti industriali, come quelli previsti dal programma internazionale di cooperazione NADCAP (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program) per il settore aerospaziale. E' perciò necessario assicurarsi che le norme industriali vigenti siano state comprese e trattate accuratamente durante i corsi di formazione. Alcuni fornitori offrono corsi di formazione speciali per ottenere le autorizzazioni e gli audit di pertinenza. In tal senso, la disponibilità di esperti in materia può rappresentare una componente contrattuale strategica.

Nota conclusiva

La tomografia computerizzata ha aperto nuovi orizzonti nel campo dei test non distruttivi.

Utenti provenienti da tutti i settori, dalla ricerca alla biologia e all'ingegneria, possono utilizzare questa tecnologia per:

- ispezionare i componenti in modo più preciso e completo
- individuare automaticamente i difetti
- condurre attività metrologiche accurate
- generare superfici che, tramite il Reverse Engineering, supportino la produzione additiva
- collaborare con utenti di tutto il mondo

Per domande o richieste di applicazioni di carattere specifico, si prega di chiamare il numero (+39 338 3688709) oppure di inviare una e-mail a brigida.michele@xrayconsult.it

Visitate il nostro sito web www.xrayconsult.it

YXLON International si riserva il diritto di modifiche ai dati tecnici e/o di sospendere il prodotto senza preavviso e senza obbligo di darne comunicazione. YXLON International non risponde inoltre di nessuna conseguenza dovuta all'utilizzo della presente pubblicazione.



XRAYCONSULT di Brigida Michele
Via A.Uboldo 2/c
20063 Cernusco sul Naviglio (MI)
brigida.michele@xrayconsult.it
Mob.: 338 3688709



Automotive



Foundries



Science & research



Metrology



Electronics



Aerospace



Weld inspection

YXLON