

LA TOMOGRAFIA INDUSTRIALE COMPUTERIZZATA (CT)

di Giuseppe Corvo, Resp. Area Prove Non Distruttive AQM srl e Gabriele Ceselin CEO & GM AQM srl
www.aqm.it

INTRODUZIONE ALLA TECNICA DI CONTROLLO VOLUMETRICO TRIDIMENSIONALE A RAGGI X SEMPRE PIÙ DIFFUSA E DI GRANDE POTENZIALITÀ NELL'AMBITO DELLA FONDERIA



Fig.1: Sir Godfrey Hounsfield. Insieme al fisico sudafricano Dr. Allan Cormack, realizzarono il primo tomografo nel 1967

In piena Era 4.0 anche i metodi diagnostici e di controllo qualità hanno ricevuto un corposo contributo, portando sempre più nell'uso quotidiano industriale una delle tecniche d'ispezione moderne che in molti conoscono col termine Tomografia. Ci muoviamo nell'ambito degli esami Non Distruttivi e Senza Contatto, due caratteristiche assai interessanti che hanno fatto della Tomografia Industriale o Tomografia Computerizzata (in versione inglese: CT - Computed Tomography) un esame sempre più intensamente sfruttato nel mondo della fonderia per il suo enorme potenziale in termini di capacità di svolgere controlli di qualità accurati e ricerca di situazioni difettologiche dei getti; attività che singolarmente o in combinazione fra loro hanno il vantaggio di permettere l'ottimizzazione dei processi produttivi e dei prodotti. Le

moderne strumentazioni disponibili in ambito industriale traggono origine ed esperienza dall'impiego dei Raggi X, radiazioni elettromagnetiche prodotte con specifici generatori ma sono state poi le tecnologie elettroniche e computazionali che hanno permesso d'impiegare questo potente mezzo con precisione ed accuratezza per raggiungere risultati assai utili, benché non privi di difficoltà e specificità interpretative.

Origini e principio di funzionamento della Tomografia Computerizzata

Storicamente la Tomografia Computerizzata è una tecnica che deriva dal metodo di controllo radiografico (RT), un esame di tipo volumetrico (ovvero avente lo scopo d'indagare il volume di un oggetto e non semplicemente le caratteristiche di super-

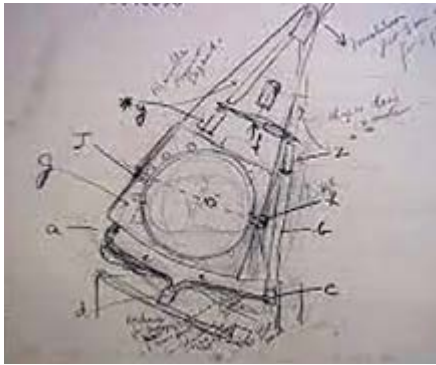


Fig. 2: Bozza del primo disegno di un tomografo

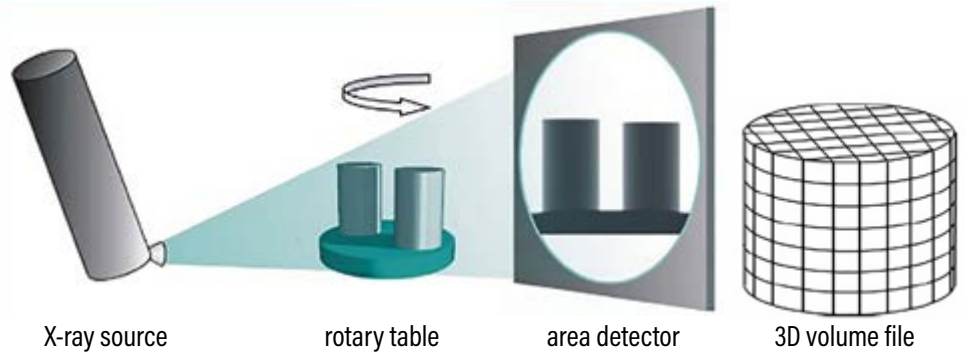


Fig. 3: Schema di funzionamento dell'acquisizione d'immagini CT

ficie), suddivisibile in:

- Tecnica radiografica con pellicola (film);
- Tecnica radioscopica ("tecnica semplificata" metodo RT);
- Tecnica radiografica diretta (DR – Direct Radiography);
- Tecnica radiografica computerizzata (CR – Computed Radiography);
- Tecnica tomografica computerizzata (CT – Computed Tomography).

La tecnica CT si sviluppò nel campo medico diagnostico per essere adattata successivamente alle applicazioni industriali.

Più propriamente rappresenta una tecnica d'indagine radiodiagnostica (diagnostica per immagini), che sfrutta l'interazione della radiazione (RX) quando attraversa la materia (ionizzazione), caratterizzata da un coefficiente lineare d'assorbimento (μ).

La tecnica CT è in grado di rappresentare componenti in immagini tridimensionali ed analizzare tutto il volume con sezioni virtuali (immagini in sezione). La metodica circolare, che è alla base della Tomografia Assiale Computerizzata (TAC), deriva dai principi di geometria proiettiva, che definirono la stratigrafia, e fu concepita già nel 1967 dall'Ingegnere inglese Sir Godfrey Hounsfield, che insieme al fisico sudafricano Dr. Allan Cormack, realizzarono il primo tomografo, ottenendo il premio Nobel

per la medicina nel 1979, condiviso con lo scienziato Dr. Allan McLeod Cormack, che sviluppò il primo tomografo computerizzato commerciale. L'esame tomografico, avendo la possibilità d'acquisire immagini con angolazioni diverse a seguito di una scansione con metodica circolare (360°), ha la capacità di elaborare le stesse con algoritmi di ricostruzione matematici mediante calcolatore, permettendo di ricostruire un oggetto in forma tridimensionale.

Il principio su cui si basa la ricostruzione tomografica è che acquisendo tante proiezioni radiografiche dello stesso oggetto ad angolazioni diverse è possibile ricostruire l'oggetto nelle due dimensioni.

Per ottenere la terza dimensione si utilizzano complessi algoritmi matematici che elaborano i pixel delle successive scansioni tra i quali i metodi di retroproiezione filtrata (algoritmo Filtered Back Projection, FBP) se il fascio di raggi X è parallelo o a ventaglio, il metodo di Feldkamp se il fascio è conico oppure metodi iterativi.

Ovviamente, per poter applicare questi algoritmi è necessario riprendere le proiezioni radiografiche in immagini digitali, cioè una matrice di numeri organizzata, il cui più piccolo elemento è chiamato pixel e il valore al suo interno è un numero in scala di grigi a cui corrisponde una misura dell'attenuazione del fascio in quel punto.

Dopo aver applicato gli algoritmi di ricostruzione s'ottiene un'immagine digitale generata mediante conversione analogico-digitale dei segnali elettrici provenienti dai detettori, che rappresenta la distribuzione della densità dell'oggetto in una sua sezione interna (slice).

Trattandosi di dati digitali, la distribuzione delle informazioni di attenuazione dei fotoni dei Raggi X che colpiscono il detector (correlate alla variazione di densità della materia attraversata dai raggi X in una data posizione) non è continua, ma discreta, e approssima tanto meglio la distribuzione continua reale quanto maggiore è la loro frequenza di campionamento.

La rappresentazione spaziale dei dati di densità avviene mediante il loro inserimento in una matrice di $m \times n$ elementi, nei quali viene suddiviso il campo di vista (Field Of View - FOV). In ambito CT vengono generalmente impiegate matrici di ricostruzione quadrate di $N \times N$ elementi, detti voxel. Ciascun voxel è costituito da un parallelepipedo d'altezza equivalente allo spessore di strato e lato di base pari a: $l = dFOV/N$, dove $dFOV$ è l'ampiezza del FOV. In altri termini, il voxel è l'elemento costitutivo dell'immagine fisica, che è la rappresentazione spaziale delle densità degli elementi della matrice in cui viene riprodotta ciascuna sezione CT con spessore di

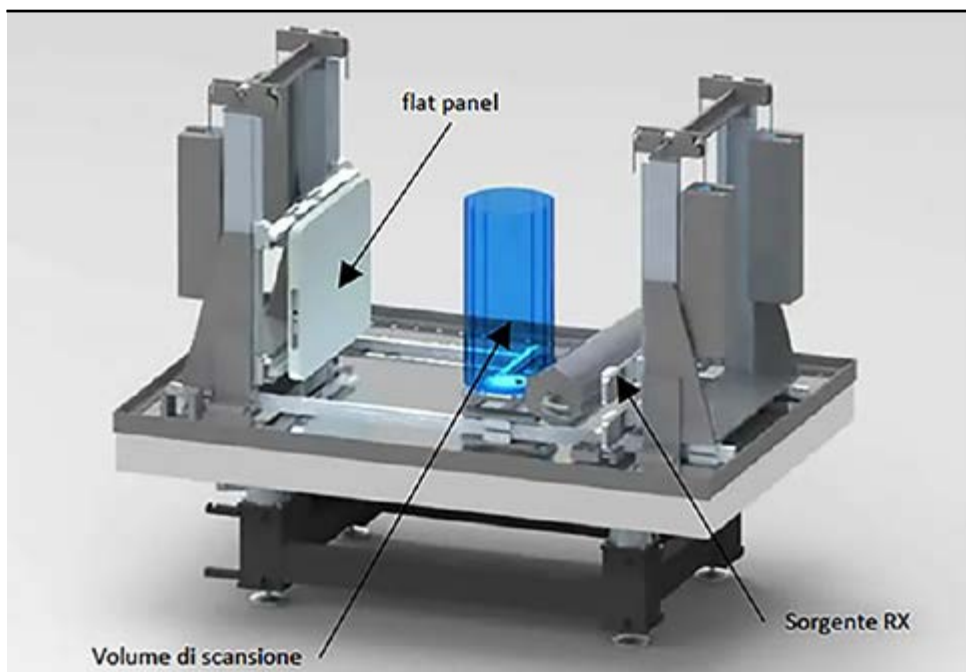


Fig. 4: Struttura essenziale di un tomografo: detector a flat panel, sorgente RX e volume di scansione (area blu) generato dalla rotazione del piatto rotante

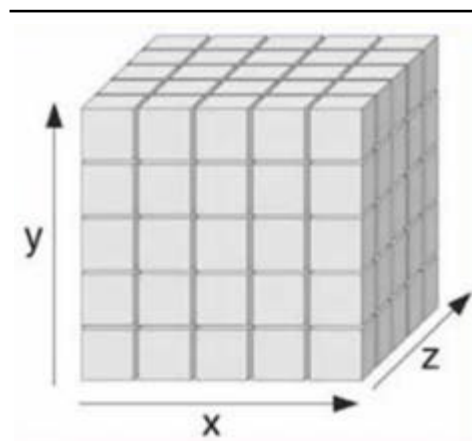
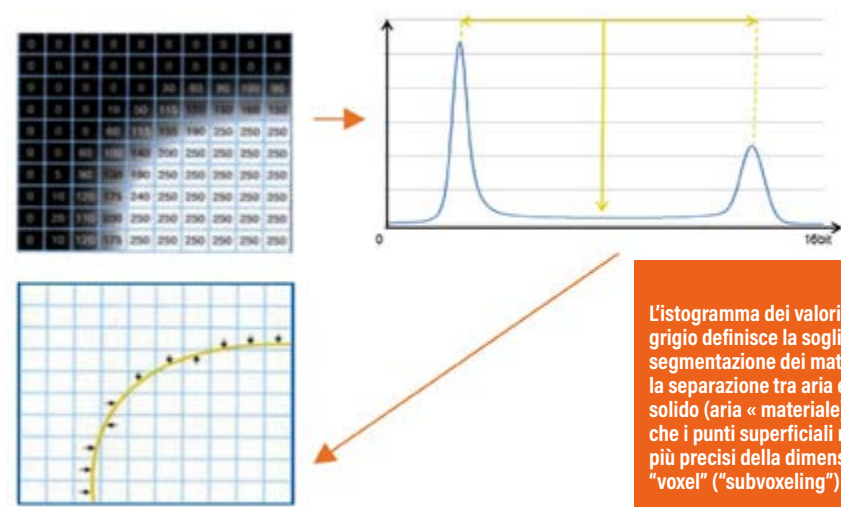


Fig. 5: Esempio di voxel isotropico di matrice 5x5x5

The Periodic Table of the Elements

The Periodic Table of the Elements																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Key																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
atomic symbol																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
atomic (proton) number																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000

Fig. 6: Tabella periodica degli elementi con elementi meno penetrabili ai raggi X progressivamente più scuri in blu



L'istogramma dei valori di grigio definisce la soglia per la segmentazione dei materiali, ovvero la separazione tra aria e materiale solido (aria « materiale). Ne deriva che i punti superficiali risultanti sono più precisi della dimensione di un "voxel" ("subvoxeling")

strato definito (z). Dunque, il voxel, è una suddivisione di uno spazio, digitalizzato in un volume tridimensionale cubico, idealmente avente le stesse dimensioni in tutti i suoi lati (isotropico). La penetrazione dei raggi X all'interno di un oggetto sottoposto ad un'analisi/esame in CT è fortemente dipendente dalla densità della materia che costituisce l'oggetto stesso, così come si evidenzia bene dall'immagine relativa alla tabella periodica degli elementi che colora in modo più tenue gli elementi più facilmente attraversabili dai raggi X. Come detto, l'immagine CT digitale dell'oggetto stesso (ed elementali) codificate in valori di grigio a 16 bit. L'istogramma dei valori di grigio definisce la soglia per la segmentazione dei materiali, ovvero la separazione tra aria e materiale solido (aria « materiale). Ne deriva che i punti superficiali risultanti sono più precisi della dimensione di un "voxel" ("subvoxeling").

Applicazioni della Tomografia Computerizzata

La CT permette le seguenti attività:
 - **Reverse Engineering**, ovvero ingegneria inversa con digitalizzazione in 3D di un

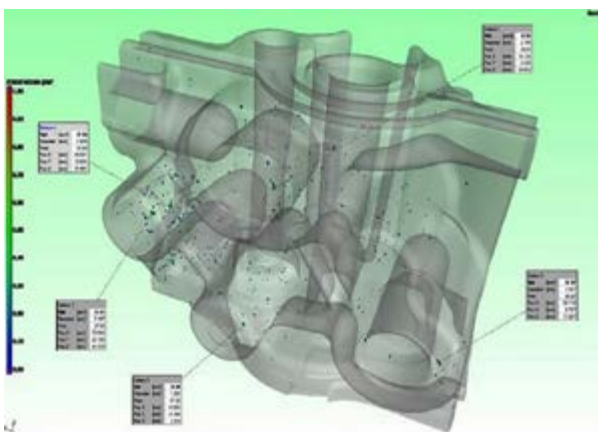


Fig. 7: Immagine Tomografica, analisi delle porosità di cui sono visibili le giaciture e le dimensioni indicate nelle tabelle collegate

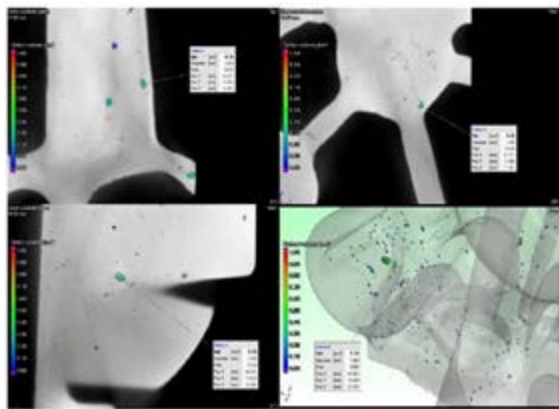


Fig. 8: Immagini tomografiche di alcune sezioni ed analisi delle porosità in rappresentazione tridimensionale (in basso a dx)

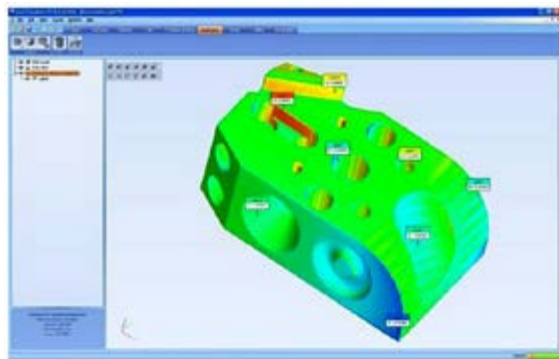


Fig. 9: Mappa cromatica a falsi colori, indicante gli scostamenti geometrici-dimensionali rispetto al modello CAD tridimensionale dell'oggetto. Risultato ottenuto dalla sovrapposizione con scansione CT

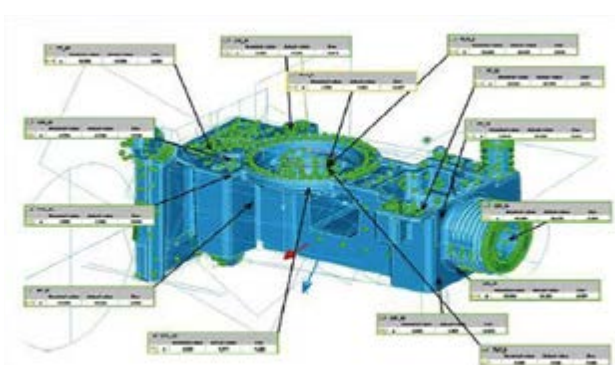


Fig. 10: Report di controllo dimensionale per punti discreti con riferimento al modello CAD tridimensionale dell'oggetto

oggetto per effettuare un'analisi o per eseguire una ri-modellazione computerizzata con l'uso di software specifici;

• **Analisi dimensionale** (metrologia) consentendo misurazioni molto accurate anche su superfici complesse (punti non raggiungibili da altri strumenti), o su elementi interni del volume dell'oggetto non direttamente accessibili con tecniche a contatto o di scansione ottica.

Le scansioni tomografiche possono essere "sovrapposte" e confrontate col modello matematico CAD di riferimento rilevando scostamenti, anche sotto forma di mappe cromatiche a falsi colori.

Nelle condizioni di scansione ideali, i migliori esami tomografici per applicazioni metrologiche possono raggiungere MPE dell'ordine di $2\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$;

• **Analisi difettoscopiche e Failure Analysis** per la diagnosi su rotture o malfunzionamenti o la semplice individuazioni di discontinuità interne derivanti dal processo di produzione (porosità, delaminazioni, ecc);

• **Studio morfologico** di qualsiasi materiale radiotrasparente fra cui: componenti in acciaio, ghisa, leghe leggere, materiale plastico, resine, materiali compositi, materiali realizzati con "Additive Manufacturing". L'efficienza dello studio è connessa alla capacità delle caratteristiche costruttive del tomografo d'attraversare la materia e quindi alla densità dell'oggetto in esame.

I settori d'applicazione della tomografia computerizzata (CT) sono molteplici, fra cui:

- Metallurgico;
- Biomedicale;
- Automotive;
- Aerospaziale;
- Materiali polimerici e compositi;
- Additive manufacturing (stampa 3D);
- Packaging;
- Alimentare;
- Moda;
- Beni culturali

Caratteristiche costruttive ed operative di un tomografo industriale

Le componenti principali di un impianto tomografico industriale sono:

- **Il tubo radiogeno** (sorgente RX), solitamente metalceramico chiuso, ovvero sotto vuoto (ci possono essere tubi aperti che vengono portati alle condizioni di lavoro in vuoto mediante pompe a vuoto).

Esso è caratterizzato dalla dimensione della *macchia focale* costruttiva (target) e apparente (detta fuoco ottico o focal spot), espressa in mm, μm o nm in relazione alla sua dimensione, si parlerà quindi di apparecchiature a RX con *minifuoco*, *microfuoco* o *nanofuoco*. Tipicamente un tomografo per applicazioni in campo industriale in grado di essere impiegato per controlli dimensionali e controlli d'integrità ha una macchia focale di alcuni μm .

La tensione d'accelerazione (kV): Il catodo è un piccolo elemento (filamento) metallico riscaldato all'incandescenza applicando una bassa tensione, che emette elettroni per effetto termoionico. All'interno del tubo catodico, in cui è stato praticato un vuoto spinto, questi elettroni vengono diretti in un fascio per mezzo di un'elevata differenza di potenziale elettrico tra catodo e anodo;

L'intensità di corrente (mA): rappresenta la corrente anodica cioè il numero di elettroni che vengono spostati da catodo ad anodo. La potenza (W) ottenuta dal prodotto della tensione per l'intensità di corrente;

- **Rilevatore a pannello piatto** (Flat Panel detector), detto anche detettore in silicio amorfo a substrato singolo, caratterizzato da una dimensione utile a garantire la più grande area sensibile. I pannelli più grandi disponibili sul mercato hanno un'area sensibile di 41,0x41,0 cm, dimensione del pixel 100 μm e matrice di acquisizione 4.096x4.096 pixel (65.536 livelli di grigio

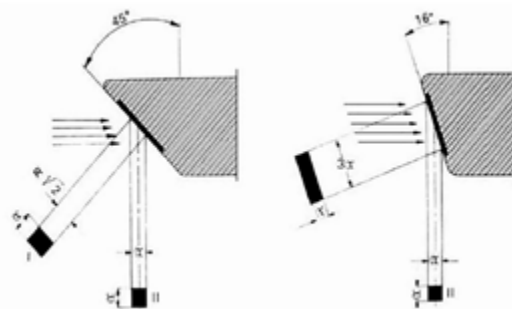


Fig. 11: Effetto dell'inclinazione del piano anodico sulle dimensioni del fuoco ottico

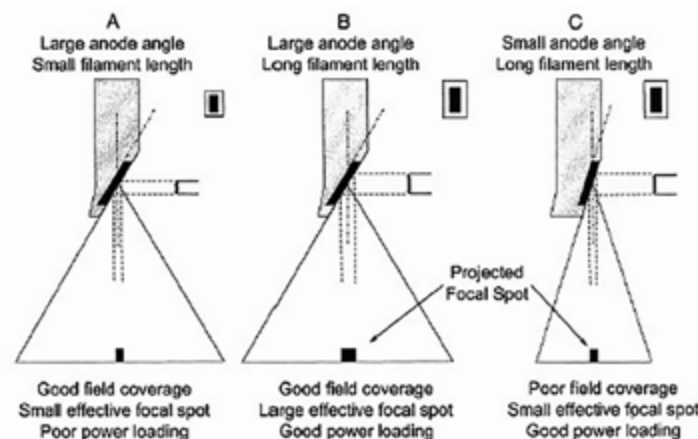


Fig. 12: Effetto dell'inclinazione del piano anodico e della lunghezza del filamento sulla dimensione del fuoco ottico

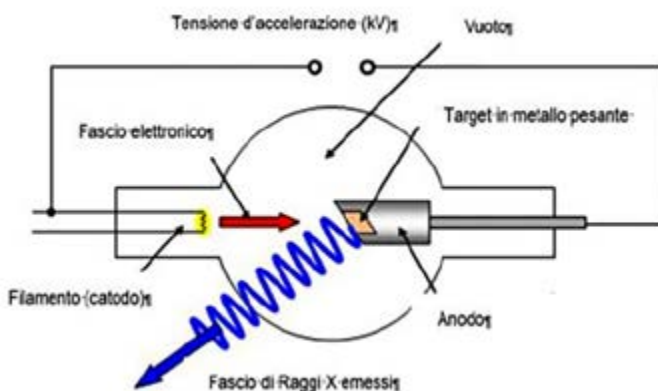


Fig. 13: Schema di un tubo radiogeno chiuso



Fig. 14: Tubo radiogeno minifuoco (sx) e schema di tubo radiogeno (dx)



Fig. 15: Flat Panel 16" 16 bit-Varex XRD1611



Fig. 16: Sistema Gilardoni SCOPIX CT HP7 225 kV con manipolatore di precisione a 7 assi con tavola rotante

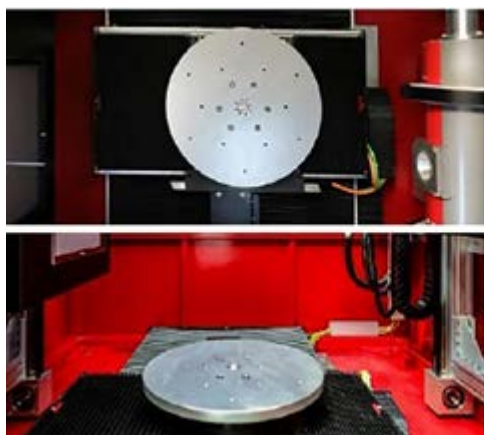


Fig. 17: Cabina con dimensioni: H 2650 mm, P 2310 mm, L 2810 mm. Impianto Gilardoni XE-L HE 450 kV per radioscopia e tomografia difettoscopica



Fig. 18: Tomografo Wenzel exaCT U 300 kV per tomografia metrologica. Exa CT U può essere adattato con la sorgente radiografica variabile da 135 a 450 kV

ADC 16 bit, frequenza di fotogrammi fino a 15 per secondo - FPS).

La dimensione del pixel e la dimensione della matrice, data dal numero di pixel presenti in ogni linea moltiplicato per le colonne della matrice, caratterizzano l'accuratezza spaziale e quindi la risoluzione.

▪ **Sistema di movimentazione e manipolatore.** Gli impianti dedicati alla tomografia metrologica sono solitamente dotati di guide lineari in granito e tavola girevole su cuscinio d'aria, il sistema di altissima precisione è in grado di garantire assenza di vibrazioni e massima accuratezza nelle misure. Gli impianti dedicati alla tomografia difettoscopica sono dotati di manipolatore di precisione a 7 assi con tavola rotante, capaci di movimentare componenti dai 100 Kg ai 500 kg di peso;

▪ **Cabina.** Le cabine, che possono avere ingombri diversi, sono concepite nell'ottica

di soddisfare le varie esigenze nell'ambito industriale con caratteristiche di elevata versatilità e flessibilità, esempio: carico-scarico di particolari con dimensioni e peso importanti, garantendo un'assoluta sicurezza per la radioprotezione. All'interno della cabina trovano allocazione il tubo RX, il detector ed i sistemi di movimentazione: del tubo RX, del detector e dell'oggetto in esame. In particolare, più è preciso e ripetibile il sistema di movimentazione/rotazione del pezzo più saranno accurate le scansioni tomografiche.

▪ **Interfaccia Software.** Per acquisire le immagini generate dai sensori ed elaborarle, i costruttori di impianti di tomografia computerizzata hanno sviluppato software che si interfacciano con flessibilità ai sistemi di acquisizione immagini e i software di analisi post-processo come VGSTUDIO, che rimane ad oggi quello più diffuso su tutto il mercato nazionale ed internazionale.

Interazione dei raggi X con la materia: proprietà ed effetti

Densità e spessore dell'oggetto: La capacità della tecnica CT di attraversare i materiali dipende dalla loro densità; materiali ad alta densità richiedono maggiore energia della radiazione e quindi tensioni applicate più elevate anche fino a 600 kV.

Non vi è alcun problema ad attraversare matrici plastiche o polimeriche né materiali compositi a bassa densità o componenti in lega di alluminio.

A titolo puramente indicativo, recuperando le procedure d'esposizione tipiche della radiografia classica (tecnica radiografica diretta o DR - Direct Radiography), i massimi valori di tensione applicabili al tubo radiogeno (kV), relativi allo spessore attraversato e al materiale in esame, sono riportati nella seguente figura (21).

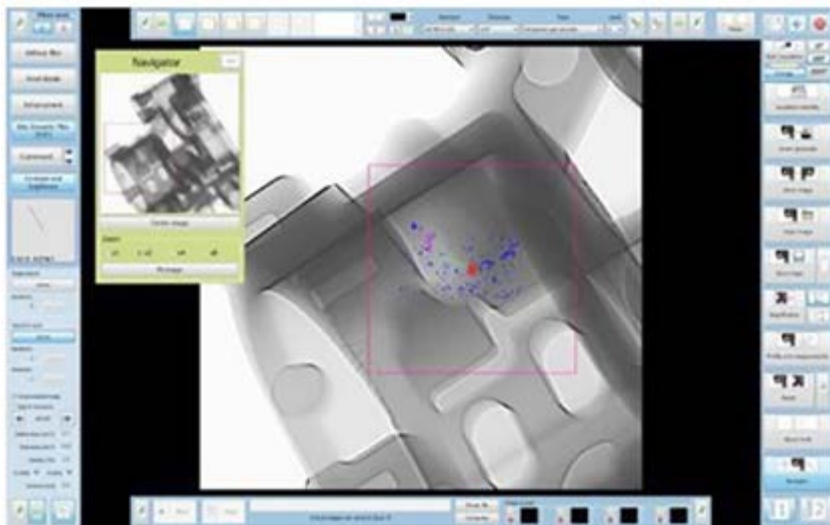


Fig. 19: Immagine d'analisi estratta dal Software delfis Eidosolutions-Gilardoni

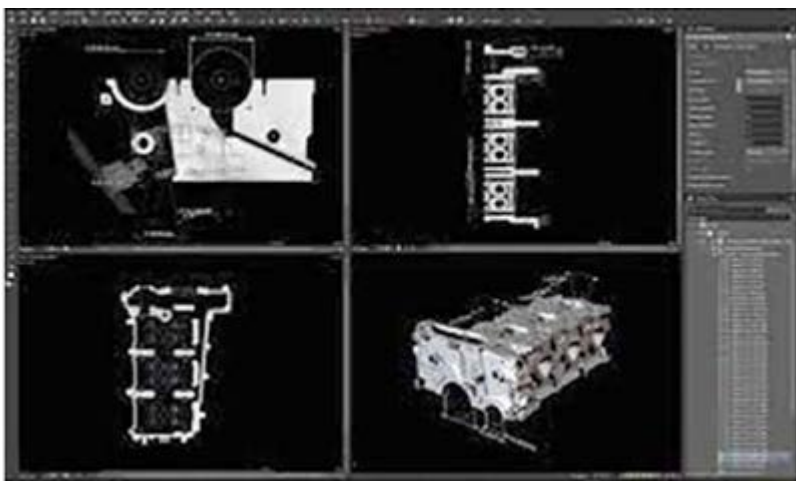


Fig. 20: Software di analisi e ricostruzione VGSTUDIO MAX

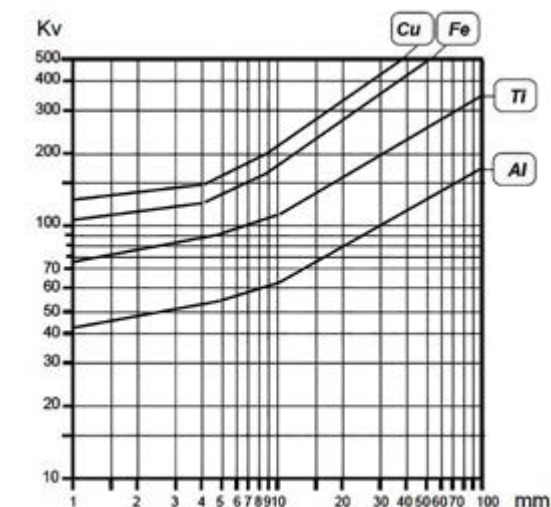


Fig. 21: Tensione massima da applicare al tubo radiogeno per attraversare lo spessore del materiale indicato con tecnica DR - Direct Radiography

In alcuni casi ci si trova ad esaminare componenti costituiti da diversi materiali con densità diversa e con differenti coefficienti lineari di assorbimento. In questi casi, soprattutto se la densità dei materiali è molto diversa, per ottenere un buon esame tomografico, che ci permetta di visualizzare tutte le parti costituenti il componente, è necessario utilizzare un valore di tensione mediato con l'elaborazione del software e utilizzando una filtrazione della radiazione. La filtrazione può essere di tipo "inerente" per tubi chiusi e quindi il tubo radiogeno è già dotato di un filtro in Be (berillio), in questa fase avviene l'assorbimento di fotoni di bassa energia. La filtrazione può essere anche "aggiuntiva", utilizzando delle piastrelle di vario spessore (da qualche decimo di mm a qualche mm) in rame (Cu) o in alluminio (Al), posizionate all'uscita del fascio di radiazione X.

Questa filtrazione produce:

- un cambiamento nello spettro dei raggi X con rimozione preferenziale di radiazione di bassa energia (responsabile del fenomeno di diffusione che influisce negativamente sulla qualità d'immagine);
- uno spostamento del massimo dello spettro verso le energie più elevate e quindi un aumento dell'energia media dello spettro. Questo fenomeno è chiamato indurimento del fascio RX;
- una riduzione dell'intensità del fascio radiogeno;
- uno spostamento dell'energia minima verso l'energia più elevata;
- nessun cambiamento nell'energia massima.

L'obiettivo principale di filtrare la radiazione X è quello di ottimizzare il fascio in modo da tagliare i raggi X più deboli senza compromettere la qualità dell'esame, diminuendo troppo il contrasto.

In effetti la filtrazione riesce a creare una maggiore latitudine radiografica dell'im-

TABELLA 1

Percentuale di fotoni attenuati in relazione all'energia utilizzata con filtrazione aggiuntiva con Al

Energia fotoni dei raggi X (KeV)	spessore piastra alluminio (mm) vs. % fotoni attenuati			
	1 mm	2 mm	3 mm	10 mm
10	100	100	100	100
20	58	82	92	100
30	24	42	56	93
40	12	23	32	73
50	8	16	22	57
60	6	12	18	48
80	5	10	14	48
100	4	8	12	35

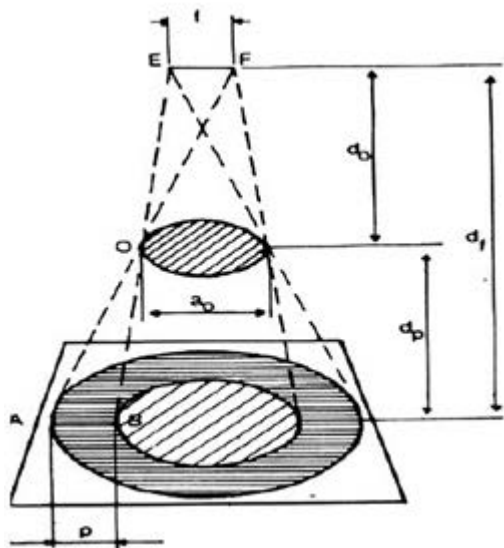


Fig. 22: P (Ug)= penombra geometrica (anello esterno a tratteggio orizzontale)

magine, permettendo la visione di spessori sensibilmente differenti o variazioni dovute alle densità diverse dei materiali.

La percentuale di fotoni attenuati in relazione all'energia utilizzata (a basse energie) con filtrazione aggiuntiva in alluminio viene fornita per esempio nella tabella seguente.

Penombra geometrica - (Ug): La tecnica di tomografia computerizzata (CT), sfruttando i principi del metodo radiografico (RT), segue le stesse leggi fisiche, legate alle tecniche radiografiche e radioscopiche.

Un primo fattore, importante per la qualità d'immagine e causa di perdita di definizione (bordi sfuocati), è la penombra geometrica Ug (Geometric Unsharpness), che dipende dalla dimensione della macchia focale e dal rapporto delle distanze sorgente-pannello e sorgente-oggetto in relazione diretta con il fattore d'ingrandimento, come riportato di seguito.

Con riferimento all'immagine seguente si ha che la penombra geometrica **Ug** (Geometric Unsharpness) è calcolabile con la seguente equazione:

$$Ug = d \times (FDD - FOD) / FOD$$

dove:

d = dimensione della macchia focale;

FDD = distanza sorgente-pannello;

FOD = distanza sorgente-oggetto.

Test arrangements; relation between geometric unsharpness and geometric magnification

The X-ray projection enlargement is shown graphically in Figure A.1.

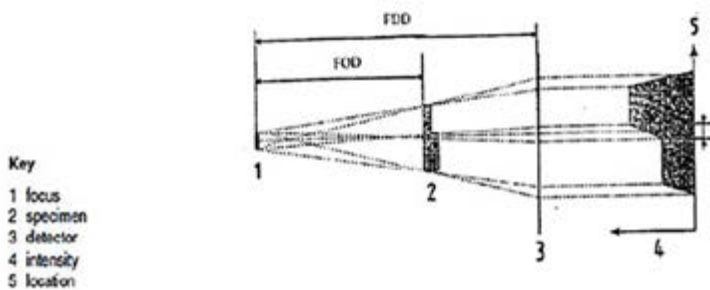


Fig. 23: Schema di correlazione tra ombra ed ingrandimento geometrici

Quando siamo in presenza di ingrandimento geometrico (M), Ug diventa:

$$Ug = d \times (M - 1) \text{ con } M = FDD / FOD$$

Ingrandimento geometrico - (M): Un oggetto esposto a radiazioni elettromagnetiche determina un certo ingrandimento geometrico (M) della sua immagine proiettata sullo sfondo verticale, in funzione della sua distanza con la sorgente e il pannello (detector).

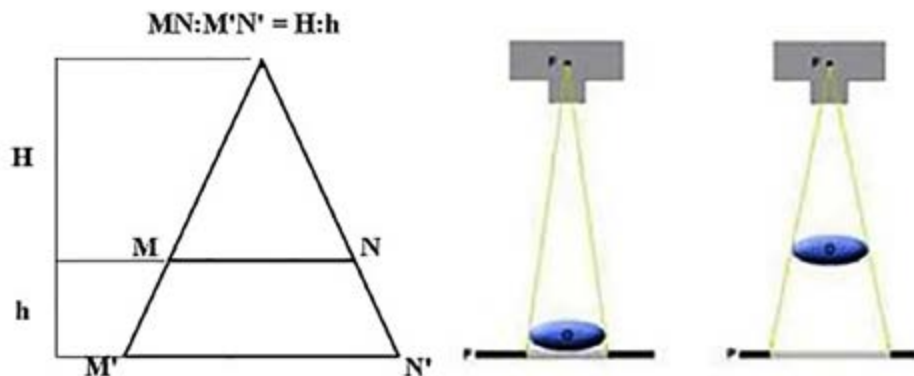


Fig. 24: Ingrandimento geometrico

Tale ingrandimento può essere modificato avvicinando o allontanando l'oggetto dalla sorgente e quindi dal pannello. L'ingrandimento aumenta al diminuire della distanza dell'oggetto dalla sorgente mentre diminuisce più l'oggetto s'avvicina al pannello detector.

Risulta chiaro ora come lavorando col mix dei parametri geometrici, ovvero: penombra geometrica ed ingrandimento geometrico, si influenzeranno le informazioni e la loro qualità relative alle scansioni acquisite con una tomografia. Maggiore sarà la penombra geometrica peggiore sarà la definizione della proiezione radiografica e maggiore sarà l'ingrandimento geometrico migliore sarà l'amplificazione geometrica di un dettaglio. Purtroppo, a parità di macchia focale l'ottimizzazione dei due parametri è antitetica fra loro, e quindi la migliore scansione si otterrà scegliendo parametri di compromesso.

Rumore casuale (SNR): I due fattori che influenzano la qualità delle immagini CT sono:

- la non definizione della geometria, per le ragioni già sopra esposte;
- il rumore casuale.

La non definizione della geometria limita la risoluzione spaziale del sistema CT, cioè la sua abilità di catturare piccoli dettagli

TOMOGRAFIA E NORMAZIONE TECNICA

Di seguito elenchiamo alcune Norme e Standard relativi alla tecnica tomografica computerizzata (CT):

- **ASTM E1441 (19):** Standard Guide for Computed Tomography (CT);
- **ASTM E1570 (19):** Standard Practice for Fan Beam Computed Tomographic (CT) Examination;
- **ASTM E1695 (20):** Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance;
- **ASTM E1814 (14):** Standard Practice for Computed Tomography (CT) Examination of Castings
- **UNI EN ISO 15708-4:** 2019 - Prove non distruttive - Metodi radiativi per tomografia computerizzata - Parte 4: Qualificazione;
- **UNI EN ISO 15708-2:** 2019 - Prove non distruttive - Metodi radiativi per tomografia computerizzata - Parte 2: Principi, attrezzatura e campioni;
- **UNI EN 16016-1:** 2011 Prove non distruttive - Metodo radiografico - Tomografia computerizzata - Parte 1: Terminologia;
- **UNI EN 16016-2:** 2011 Prove non distruttive - Metodo radiografico - Tomografia computerizzata - Parte 2: Principi generali, attrezzature ed oggetti da esaminare;
- **UNI EN 16016-3:** 2011 Prove non distruttive - Metodo radiografico - Tomografia computerizzata - Parte 3: Procedure operative e interpretazioni dei risultati;
- **UNI EN 16016-4:** 2011 Prove non distruttive - Metodo radiografico - Tomografia computerizzata - Parte 4: Qualificazione.
- **UNI EN ISO 5579:** 2014. Prove non distruttive. Esame radiografico di materiali metallici mediante raggi X e gamma. Regole generali.

strutturali di un oggetto mentre il rumore casuale limita la sensibilità al contrasto del sistema CT, cioè la sua abilità di identificare la presenza o l'assenza di caratteristiche in un oggetto.

Per rumore di un'immagine possiamo intendere "un indesiderato sottoprodotto dell'acquisizione d'immagini che aggiunge informazioni scorrette ed estranee". Per SNR (Signal-to-Noise Ratio) si intende il rapporto che misura la quantità di informazione contenuta nell'immagine fisica in relazione al rumore in essa contenuto. Questo rumore, poiché obbedisce alle leggi della meccanica quantistica, prende il nome di rumore quantico. Per rumore digitale si intende l'errore dovuto alla digitalizzazione del segnale rilevato, mentre per rumore elettronico si intendono le tolleranze dei componenti elettronici reali dello scanner. Quindi il rumore complessivo dell'immagine sarà la risultante della somma tra rumore quantico, rumore digitale e rumore elettronico.

I fattori che influenzano il SNR sono:

- la dimensione del pixel;
- la tensione (kV) del tubo, ovvero: impostando una tensione più alta, si avrà un aumento del numero e dell'energia media dei fotoni che raggiungono il detector, con un aumento proporzionale del SNR;
- l'esposizione (mAs): il prodotto tra corrente anodica (mA) e tempo di rotazione del complesso tubo-detector (s) genera il numero di fotoni utilizzati per ottenere l'immagine e quindi la dose che condiziona direttamente il valore del SNR.

Rischio d'errori interpretativi e valutativi

In base a quanto abbiamo descritto sin ora, risulta chiaro come la tomografia computerizzata industriale (CT) rappresenti una tecnica d'indagine formidabile



Fig. 25: Artefatto a sfere di rubino per il controllo della calibrazione metrologica del tomografo Wenzel Exa CT U 300 di AQM srl

ma altrettanto complessa e soggetta alla necessità di conoscere approfonditamente i meccanismi d'interazione tra i Raggi X e la materia oltre alle caratteristiche funzionali specifiche dell'apparecchiatura e dei SW di generazione ed elaborazione delle scansioni in CT.

È risultato altrettanto chiaro come l'optimum di un lavoro in CT, sia esso di natura radioscopica o morfologica/dimensionale, risulterà da una scelta di compromessi tra le varie condizioni al contorno ed i parametri operativi del tomografo e del SW.

L'inevitabile conseguenza di scelte operative non ottimali o da condizioni estreme d'applicabilità della tecnica CT sarà la generazione di così detti artefatti.

Un artefatto è qualsiasi discrepanza tra i valori ricostruiti nell'immagine e i veri coefficienti di attenuazione dell'oggetto e non corrisponde a una caratteristica fisica reale

dell'oggetto in esame.

Gli artefatti da ricostruzione sono problemi comuni nella tomografia computerizzata; essi possono influenzare la qualità di un'immagine al punto da renderla inutilizzabile.

Monitoraggio delle prestazioni metrologiche di un tomografo industriale

Le misurazioni metrologiche eseguibili sulle scansioni di un tomografo industriale moderno si basano sull'applicazione di specifici SW di misurazione che analizzano le scansioni digitali convertite in nuvole di punti tridimensionali elaborate in file opportunamente leggibili dai SW di misurazione.

Non è questo l'ambito in cui approfondire l'argomento tecnico sul come vengono realizzate misurazioni ma è sufficiente ri-

cordare che anche il sistema CMS (Coordinate-Measurement-System) costituito da Tomografo+SW, sia un sistema a coordinate tridimensionali soggetto come tutti i sistemi a fenomeni di deriva e scalibrazione. Nasce quindi la necessità di assicurare il monitoraggio periodico delle prestazioni metrologiche del sistema e qualificarne le prestazioni.

Esistono diverse metodologie ma in ambito metrologico si stanno diffondendo sempre più metodi di verifica che impiegano artefatti metrologici costituiti da sfere in rubino, di diverso diametro, posizionate in punti fissi su piani piatti di riscontro fissati mediante supporti in fibra di carbonio, come quello rappresentato nella figura seguente, messo a punto dal Centro di Tomografia Metrologica AQM-Wenzel di Provaglio d'Iseo. Ovviamente dimensione e posizione delle sfere dell'artefatto sono oggetto di taratura con tecniche di misurazione più accurate e precise della tecnica CT.

BIBLIOGRAFIA

- UNI EN ISO 5579:2014. Prove non distruttive. Esame radiografico di materiali metallici mediante raggi X e gamma. Regole generali.
- Elementi di Tomografia computerizzata a cura di Lorenzo Faggioni, Fabio Paolicchi, Emanuele Neri. Edizioni Springer.
- Manuali d'uso del tomografo Wenzel exaCT U 300 kV;
- ASTM E1441 (19): Standard Guide for Computed Tomography (CT);
- ASTM E1570 (19): Standard Practice for Fan Beam Computed Tomographic (CT) Examination;
- UNI EN ISO 15708-2: 2019 - Prove non distruttive - Metodi radiativi per tomografia computerizzata - Parte 2: Principi, attrezzatura e campioni;
- UNI EN 16016-1: 2011 Prove non distruttive - Metodo radiografico - Tomografia computerizzata - Parte 1: Terminologia;
- UNI EN 16016-2: 2011 Prove non distruttive - Metodo radiografico - Tomografia computerizzata - Parte 2: Principi generali, attrezzature ed oggetti da esaminare;