

Corsi e ricorsi: dalla Tomografia di Vallebona alla Tomosintesi

Giorgio Cittadini

Questa breve e aformale nota – la cui concezione devo alla cortese insistenza di Fabrizio Levrero, mio prezioso revisore delle tematiche fisiche nella nuova VI edizione del manuale di “Diagnostica per immagini e Radioterapia” – affronta una tecnica di formazione di immagini semplice e brillante, costituente un vero e proprio «ritorno» di una grande *protagonista del passato*, la tomografia di Alessandro Vallebona, più o meno riveduta e corretta tecnologicamente.

La storia della Radiologia – e in senso più estensivo della Diagnostica per immagini – è fatta di «corsi e ricorsi»: i primi verso l'obsolescenza (nessuno è eterno, men che mai le tecniche di studio del vivente!), i secondi – meno comuni – verso la ricerca del tempo perduto. Sono sufficienti, in proposito, alcuni esempi di tecniche e metodiche delle quali è traccia ampia nella memoria dei radiologi meno giovani.

Tecniche obsolete: schermografia; chilmografia (tecnica genovese, come la tomografia, che ha impegnato il nome illustre di Pietro Cignolini); xeroradiografia (della quale sopravvivono, però, i principi tecnologici, riciclati in alcune tecniche radiografiche digitali); ingrandimento diretto radiografico; plesioradiografia; stereoradiografia. *Metodiche obsolete*: pneumoencefalografia, ventricolografia, mielografia e saccoradiculografia (in passato del tutto fondamentali in Neuroradiologia); pneumotorace e pneumoperitoneo diagnostico, pneumoginecografia, pneumomediastino; parietografia gastrica e pneumostratipancreatografia; cistografia a doppio contrasto; colangiografia endovenosa (sopravvive, quale metodica di seconda istanza – se non di terza! – la preziosa colecistografia per os del passato). Non c'è più l'angiografia convenzionale

(essendo oggi divenuta «convenzionale» l'angiografia digitale!), chi pratica oggi più la splenoportografia trans-parietale? La termografia a contatto è obsoleta, resiste (ma con riserve!) la teletermografia, oggi anch'essa convertita al digitale.

Tutto ciò si è manifestato lentamente ma ineluttabilmente a partire dai primi anni '70, soprattutto quale conseguenza dell'avvento e della maturazione delle *neotomografie*, delle *tecniche aradiative*, delle *tecniche digitali*.

Accanto al ritorno, qui considerato, della *tomografia* nella formulazione 1930 secondo Vallebona, non si può tacere l'avvento della *tomografia a coerenza ottica*, tecnica del tutto nuova e sotto certi aspetti similecografica utilizzando la luce in vece degli US. Le *Immagini molecolari* – nei riguardi delle quali il lavoro di ricerca è effervescente in alcuni Centri diagnostici d'avanguardia (ma con preparativi più o meno avanzati un po' ovunque!) – meritano più di un cenno, soprattutto per il più ampio respiro di pensiero che è alla loro base, con capacità di incidere sull'intera struttura pragmatica dell'atto diagnostico.

I principi della Tomosintesi

Con il termine «tomosintesi» si fa riferimento alla ricostruzione (quindi alla «sintesi») di immagini dei singoli strati di un oggetto (quindi di «tomogrammi») a partire da un insieme discreto di sue proiezioni ottenute sotto diverse angolazioni. La tomosintesi, dunque, di per sé è un *principio di acquisizione di immagini*. Ma poiché per «guardare dentro l'oggetto» è necessario il ricorso ai raggi X, la tomosintesi è nel contempo una *tecnica röntgendiagnostica complementare*.

Il lettore è qui invitato, fino a piena comprensione dei limiti di similarità e dissimilarità, a concepire la *tomosintesi* come una

fedele versione contemporanea «elettronica» della *tomografia convenzionale* «geometrica», i cui principi verranno qui riassunti nei loro elementi essenziali.

Le immagini radiografiche sono «immagini di sommazione» che riproducono su un unico piano una traccia più o meno evidente di tutte le strutture che il fascio di raggi X incontra nei piani compresi tra quello d'ingresso e quello d'uscita nella regione corporea in studio. Intrinseci al procedimento sono quindi i fenomeni di sommazione e di sottrazione di ombre, potenziali responsabili della *produzione di falsi reperti positivi* e del *mascheramento di veri reperti positivi*. Classico, in proposito, è l'esempio dell'infiltrato precoce tisiogeno di Assmann-Redeker non visibile nel radiogramma toracico perché mascherato dalla clavicola.

La tecnica röntgendiagnostica complementare che mira a formare «immagini analitiche», rappresentative cioè delle sole strutture presenti in strati prelezionati della regione in studio, fu definita nel 1930 dal suo ideatore e realizzatore, ALESSANDRO VALLEBONA, *stratigrafia* e infine denominata *tomografia* dalla Commissione internazionale specificamente preposta.

Nella **tomografia convenzionale** il tubo a raggi X e il detettore (la tradizionale cassetta contenente il sistema schermo/pellicola) sono assoggettati a un movimento traslatorio lineare o pluridirezionale, continuo, simultaneo ma contrapposto, «vincolato», facente fulcro su un asse posizionato preliminarmente alla profondità dello strato corporeo del quale si intende ottenere l'immagine tomografica. La profondità è variata spostando, nelle successive acquisizioni di immagini, l'asse del movimento vincolato del sistema tubo/detettore.

Questo movimento fa sì che la proiezione sul detettore delle singole strutture presenti nei piani attraversati dal fascio di raggi X si sposti in modo tale che solo le strutture dello strato prescelto, lo *strato*

fisso, saranno proiettate sempre nella stesso punto e quindi rappresentate in maniera netta, mentre le strutture situate al di sopra o al di sotto dello strato fisso saranno costantemente proiettate in punti differenti e di conseguenza verranno più o meno sfumate sovrapponendosi all'immagine dello strato fisso in forma di «ombre parassite», secondo la dizione di Vallebona, o «rumore di fondo», secondo la moderna dizione elettronica. Lo spessore dello strato fisso varia da 1 a 3 mm.

Punti critici della tomografia convenzionale sono:

1. la limitata risoluzione di contrasto consentita dalla natura intrinsecamente «sfumata» dell'immagine;
2. la presenza di ombre parassite;
3. la dose di radiazione elevata somministrata al paziente nel complesso delle molteplici acquisizioni sequenziali degli strati ritenuti utili.

La **tomosintesi**, tecnica concepita più di 30 anni fa ma solo del tutto recentemente oggetto di specifica attenzione, mira a superare a questi punti critici.

Primo passo (del tutto determinante!) per la sua implementazione è la sostituzione del detettore radiografico tradizionale (il sistema schermo/pellicola) con un detettore digitale (i detettori a pannello piatto ormai largamente diffusi in radiologia, veloci nell'acquisizione dei dati, ne costituiscono la piattaforma ideale). Diviene così possibile procedere, durante un singolo movimento combinato del sistema tubo/detettore, all'acquisizione dei dati di trasmissione dei raggi X relativi a un numero «discreto» di proiezioni dell'intera regione in studio. Il fulcro di questo movimento è fisso e disposto al di sopra della regione corporea in studio.

In fig. 1 è illustrato schematicamente il procedimento di acquisizione delle proiezioni come realizzato nello studio della mammella, che costituisce al momento attuale il punto di massimo successo della tomosintesi.

mine del procedimento, quindi, i valori relativi a strutture sopra- o sottostanti, che possono nascondere nel singolo strato un reperto anormale o generarne uno falsamente tale, hanno un peso molto minore. Come per altre tecniche 3D, le immagini possono essere combinate per creare una vista tridimensionale che porti le strutture in rilievo e può essere ruotata nello spazio per una più attenta osservazione.

Applicazioni cliniche

V'è giustificato ottimismo su sviluppi significativi della tomosintesi nello studio della *mammella* e del *polmone*, per i quali le apparecchiature «dedicate» sono già prossime alla approvazione, negli USA, da parte degli Enti preposti. Segnalazioni di un certo interesse sono presenti relativamente all'uso in *angiografia*, *ortopedia* e *radiologia odontoiatrica*.

Nello studio della *mammella* assumono rilievo alcune osservazioni. Il contrasto dei reperti nodulari e delle distorsioni parenchimali rispetto al fondo è aumentato data la maggiore sfumatura delle strutture appartenenti ai piani sopra- e sottostanti, e quindi il minore «rumore» sussistente (fig. 3). Per lo stesso motivo, ombre parassite sono presenti con minore frequenza. La dose di radiazione erogata all'intera struttura mammaria è inferiore a quella di una mammografia convenzionale con 2 proiezioni. La compressione della mammella di

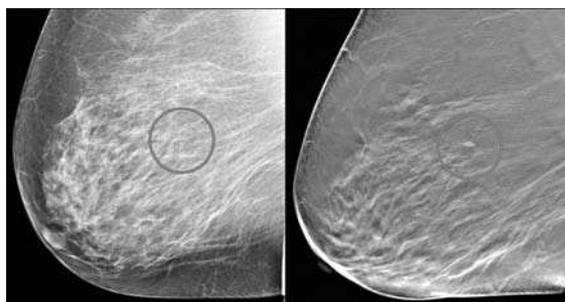


Fig. 3. La presenza di «rumore» apportato dalla sommazione di «ombre» di strutture ubicate nei diversi piani della mammella maschera nell'immagine mammografica convenzionale (a sinistra) la piccola formazione nodulare presente nell'area racchiusa dal cerchio a scopo di riferimento, bene evidenziata nell'immagine tomografica (1 mm di spessore!) ottenuta mediante tomosintesi (a destra). Per cortesia di Hologic Inc.

entità e durata minore di quanto necessario nella mammografia convenzionale costituisce elemento di particolare gradimento da parte delle pazienti sottoposte a indagine.

Secondo i dati emersi nelle prime sperimentazioni, la tomosintesi consente l'individuazione di una percentuale maggiore di carcinomi mammari rispetto alla mammografia convenzionale, riducendo i FN di una percentuale stimabile intorno al 15% (fig. 4). La localizzazione dei reperti nel contesto dell'organo è più immediata e precisa, agevolando l'esecuzione delle biopsie mirate. Il numero di FP è ridotto di una percentuale stimabile intorno all'80%: conseguentemente divengono significativamente minori i richiami inutili di pazienti per supplementi di indagini (fig. 5).

La tomosintesi della mammella si prospetta dunque, in un futuro molto prossimo, esame vantaggioso sia in fase diagnostica, sia nei programmi di screening, destinato verosimilmente a sostituire (o ad affiancare nella stessa apparecchiatura!) la mammografia convenzionale. Secondo una felice espressione di E. Rafferty, che ha partecipato al progetto di validazione clinica della tomosintesi mammaria in via di completamento al Massachusetts General Hospital, «la tomosintesi capitalizza i punti forti e le accertate capacità della mammografia; in effetti, è una mammografia migliore della mammografia». Il medico che analizza le immagini potrà, con efficace similitudine, «sfogliare» come le pagine di un libro l'interno della mammella senza la sovrapposizione di altri tessuti. L'uso di MdC, a tutt'oggi in fase del tutto iniziale, potrà forse aggiungere informazioni sulla dinamica del rifornimento ematico delle lesioni individuate più ricche rispetto a quanto ottenibile con la mammografia convenzionale.

Secondo promettente campo di applicazione della tomosintesi è costituito dal *polmone* con particolare riferimento alla individuazione dei piccoli noduli (fig. 6).

Le modalità di acquisizione delle immagini sono simili a quelle della tomosintesi mammaria. In linea di massima, però, è necessario acquisire un numero maggiore

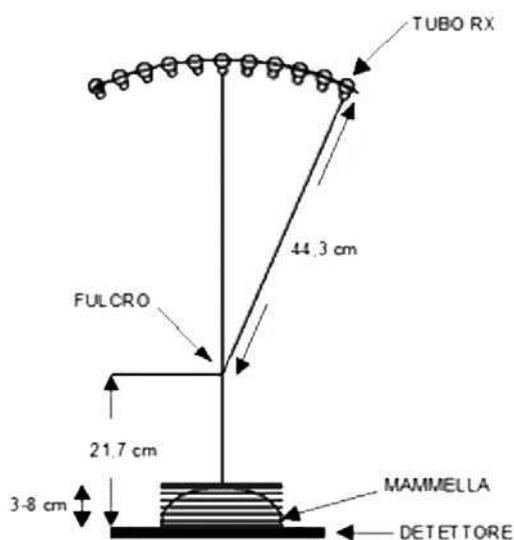


Fig. 1. Il movimento tubo/detettore secondo il procedimento adottato da Hologic Inc. (Bedford, MA, USA), per la tomosintesi della mammella. La mammella è posizionata esattamente come avviene per la mammografia convenzionale, ma la compressione applicata è minore avendo il solo scopo di mantenerne l'immobilità durante l'acquisizione. Il tubo si muove lungo un arco di 50° con fulcro attorno a un'asse situato a 21,7 cm dal piano del rivelatore. Durante il movimento sono acquisite, in un tempo di circa 7 secondi, 11 proiezioni dell'intero organo da angolazioni diverse regolarmente equispaziate. I dati di trasmissione sono inviati al computer ove ha luogo la ricostruzione strato per strato delle immagini tomografiche.

Poiché durante il movimento la regione corporea in studio è attraversata sotto differenti angoli dal fascio di raggi X appresenti a ventaglio, gli elementi del rivelatore ricevono in successione temporale informazioni correlate su ciascun elemento di volume dell'oggetto. *L'insieme delle proiezioni digitali contiene quindi una completa informazione strutturale su tutti gli strati dell'oggetto.*

Secondo passo è l'ordinamento e la corretta somministrazione dei valori di proiezione (fig. 2) mediante opportuni algoritmi implementati sul calcolatore devoluto, consentendo quale risultato finale di ottenere sezioni paragonabili (ma, come vedremo, ampiamente corrette da criticità!) a quelle della tomografia convenzionale. Lo spessore di strato è di 1 mm; la risoluzione spaziale 0,1 mm.

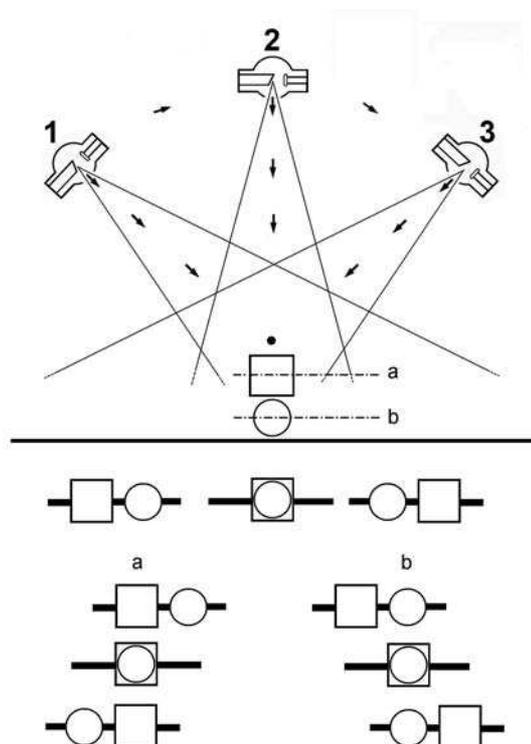


Fig. 2. La figura, che può essere utile confrontata a quella relativa alla sfumatura tomografica delle strutture situate al di fuori del piano obiettivo in tomografia convenzionale, evidenzia il più semplice approccio «sposta e somma» in grado di consentire nella tomosintesi la ricostruzione degli strati cui appartengono il cubo (a) e la sfera (b) a partire dalle misure relative a tre delle molteplici viste assunte dal sistema tubo/detettori.

La tomosintesi, dunque, non fornisce immagini dirette di proiezione, ma immagini ricostruite dei singoli strati. Gli algoritmi disponibili in proposito sono molteplici e più o meno efficienti: dall'algoritmo di retroproiezione utilizzato in TC opportunamente modificato, ad algoritmi non lineari iterativi, a metodi di ottimizzazione appositamente adattati. Tutti mirano a eliminare nel singolo strato ricostruito il «rumore strutturato» di quelli sopra- e sottostanti.

In linea di principio, se le traiettorie del sistema tubo/detettori sono progettate in modo opportuno le matrici numeriche costituite dai dati di trasmissione possono essere ordinate in modo tale che solo i valori relativi alle strutture presenti in un certo piano dell'organo in studio (quindi in un singolo strato!) si sovrappongano esattamente prima di essere sommati. Al ter-

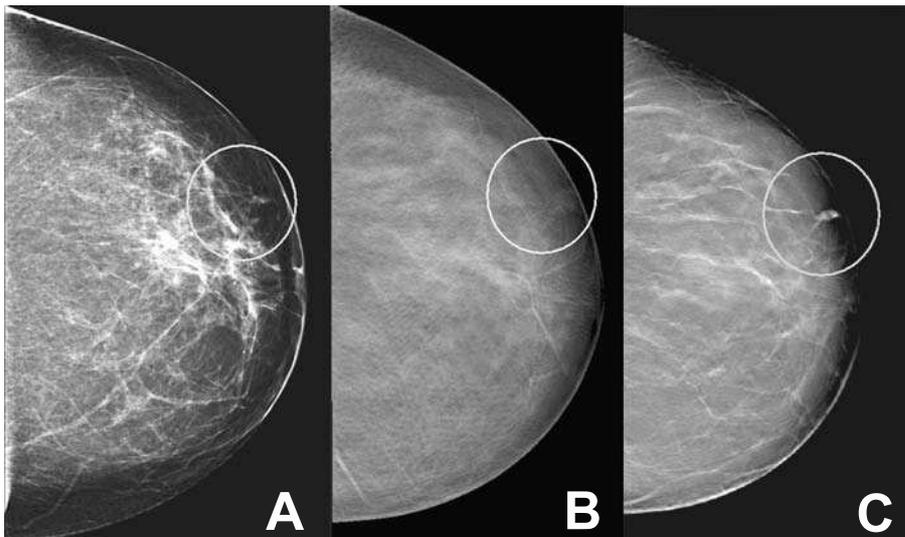


Fig. 4. I falsi negativi mammografici. La storia di questa paziente è esemplare nel male e nel bene. Il mammogramma (A), eseguito in un'indagine di screening, fu giudicato BI-RADS1, cioè normale. Qualche settimana dopo la paziente si presentò spontaneamente avendo notato la palpabilità di un nodulo nella mammella poco al di sopra del capezzolo e verso l'esterno. L'ecografia individuò la presenza del reperto e ne guidò la biopsia (carcinoma duttale *in situ*). La revisione retrospettiva del mammogramma esitò nuovamente nel giudizio di non visibilità di reperti sospetti (in particolare nell'area racchiusa dal cerchio). La revisione retrospettiva della tomosintesi (effettuata a suo tempo quale complemento sperimentale) consentì di evidenziare chiaramente la lesione in forma di nodulo di opacità assai tenue a contorni sfumati e irregolari situato nello spazio radiotrasparente sottocutaneo (B) e di struttura similduttale ispessita contenente una piccola lacuna nel suo contesto (C). Perché la tomosintesi non fu valutata all'atto dell'acquisizione? Perché, trattandosi di indagine eseguita con apparecchiatura non ancora approvata per l'uso clinico, non fu utilizzata per la valutazione diagnostica, ma solo per la successiva valutazione sperimentale! Per cortesia di Hologic Inc.

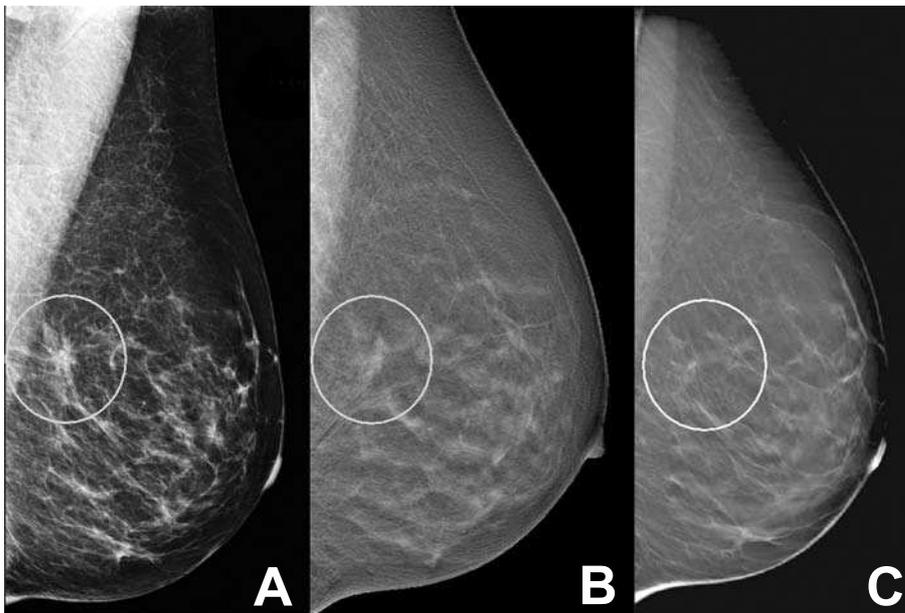


Fig. 5. I falsi positivi mammografici. Il sovvertimento focale dell'architettura mammaria, irregolare e con aspetto stellato, ben visibile nel mammogramma convenzionale nell'area racchiusa dal cerchio (A), fu ritenuto altamente sospetto di malignità. Il reperto era presente anche nella proiezione cranio-caudale e nei mammogrammi complementari estemporaneamente assunti. La presunta lesione fu sottoposta a biopsia, nella quale non furono

individuati reperti neoplastici. Le due immagini ottenute mediante tomosintesi (B e C), effettuata quale immediato complemento, isolando strati adiacenti di spessore di 1 mm, inducono ad attribuirne la causa a una semplice sovrapposizione di parenchima ghiandolare. Alcune piccole calcificazioni prive di significato patologico, situate nel contesto della cute poco al di sopra del capezzolo, sono appena apprezzabili nella riproduzione tipografica delle immagini. Per cortesia di Hologic Inc.

di proiezioni equidistanziate durante la corsa del sistema tubo/detettori, onde poter ricostruire almeno 50 strati di 5 mm di spessore. Il tempo di acquisizione necessario è di circa 10 secondi, compatibile quindi con il mantenimento dell'apnea da parte del paziente.

Le immagini, liberate dalla fastidiosa sovrapposizione delle coste e caratterizzate da una più nitida rappresentazione delle diramazioni vasali, consentono, secondo le prime sperimentazioni cliniche, un sostanziale miglioramento nella visibilità dei noduli polmonari rispetto al radiogramma PA (del quale la tomosintesi sembra destinata a divenire un complemento utile).

La trasformazione di una moderna apparecchiatura radiografica del torace dotata di detettore a pannello piatto in senso pro-tomosintesi comporta modifiche non proibitive economicamente: l'aggiunta di un motore che generi il movimento controllato del tubo e naturalmente del software specializzato. Le apparecchiature destinate alla tomosintesi del torace sono già prossime alla approvazione da parte degli Enti preposti.

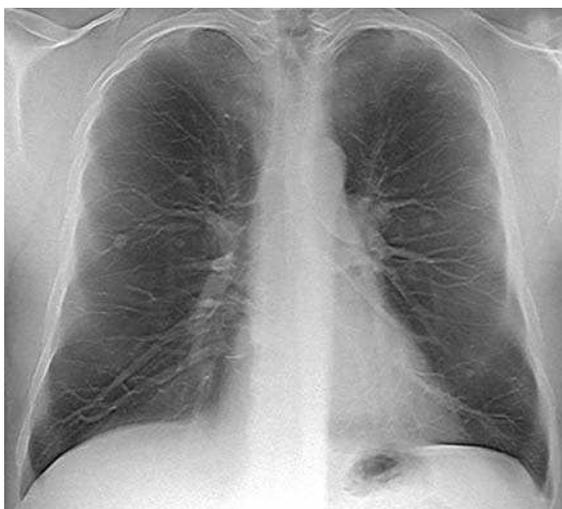


Fig. 6. Tomosintesi del polmone. L'immagine, riprodotte uno strato frontale di 5 mm di spessore situato a metà profondità nel parenchima polmonare, mette in chiara evidenza bilateralmente alcune piccole opacità nodulari metastatiche. Si osservi la nitida rappresentazione delle ramificazioni vasali polmonari e l'assenza di sovrapposizioni costali. Osservazione del Duke University Medical Center, Durham, NC, USA.

Le possibili applicazioni della tomosintesi in *angiografia* sono molteplici. Le moderne apparecchiature angiografiche consentono di per sé la rotazione del braccio a C intorno al lettino di supporto del paziente, sì che si rende necessario solamente aggiungere il modulo elettronico supplementare destinato all'elaborazione dei dati e alla conseguente ricostruzione di immagini tridimensionali delle strutture vasali o di immagini simil-TC.

Molti interventi di *chirurgia ortopedica* (in particolare, l'apposizione di chiodi intramidollari) sono preprogrammati sulla base di immagini tridimensionali. L'acquisizione di questo tipo di immagini può essere resa possibile anche nella sala operatoria utilizzando, come avviene per l'angiografia, un braccio a C motorizzato e opportuni algoritmi di ricostruzione tomografica.

In maniera analoga, in *odontoiatria* la tomosintesi può consentire utili ricostruzioni tridimensionali dei mascellari e delle arcate dentarie con erogazione di una dose di radiazione minore di quanto necessario in caso di uso di apparecchiature radiosopiche rotazionali isocentriche simil-TC.

Applicazione interessante della tomosintesi è stata prospettata nella *programmazione dei trattamenti radioterapici*, in particolare nella localizzazione di fili e semi radioattivi impiantati in brachiradioterapia.

Esulano dalla presente nota le possibili *applicazioni industriali* per l'esame di componenti piatti come schede di circuiti stampati o di giunture di saldatura in componenti di grosse dimensioni.

Un sintetico (e conclusivo!) postscriptum: l'interesse nei riguardi della tomosintesi è dimostrato in maniera semplice dall'alto numero di voci bibliografiche presenti sui moderni motori di ricerca. Google alla voce "tomosynthesis" (ahimé, strapotere scientifico della lingua anglosassone!) ne elenca al momento attuale 57200! Ciò può di per sé rendere conto dell'assenza di una bibliografia nella presente nota.