

Metodologie di controllo dell'integrità di componenti realizzati con materiali non convenzionali

***OR 6: Impiego di materiali innovativi nella
progettazione delle macchine utensili***

*Responsabile Area 3:
Ricercatore:*

*prof. Michele Monno
ing. Bruno Chinè
ing. Massimo Fossati
ing. Valerio Mussi*

Avvertenza:

Il contenuto del presente report è da considerarsi riservato.

La diffusione non autorizzata di questo documento o di sue parti è assoggettata alla normativa per la tutela della proprietà intellettuale e delle opere dell'ingegno.

Indice

1	INTRODUZIONE	4
2	MATERIALI COMPOSITI E MATERIALI CELLULARI	5
2.1	MATERIALE COMPOSITO A MATRICE METALLICA	5
2.2	MATERIALI CELLULARI	6
3	DIFETTI PRESENTI NEI COMPONENTI REALIZZATI CON SCHIUME METALLICHE	7
3.1	DIFETTI MORFOLOGICI DELLE SCHIUME METALLICHE	7
3.2	DIFETTI DELL'ADESIONE NEI PANNELLI SANDWICH	9
4	TECNICHE NON DISTRUTTIVE.....	12
4.1	TERMOGRAFIA AD INFRAROSSI (IR).....	12
4.1.1	<i>Aspetti teorici</i>	13
4.1.2	<i>Metodi di termografia attiva</i>	14
4.1.3	<i>Termografia pulsata (PT)</i>	14
4.1.4	<i>Riscaldamento a gradini (SH)</i>	15
4.1.5	<i>Termografia lockin (LT)</i>	16
4.1.6	<i>Termografia con fase pulsata (PPT)</i>	17
4.1.7	<i>Vibrotermografia (VT)</i>	17
4.1.8	<i>Materiali ispezionati con la termografia ad infrarossi</i>	17
4.2	ULTRASUONI.....	18
4.2.1	<i>Aspetti teorici</i>	18
4.2.2	<i>Tipi di onde ultrasoniche, velocità ed attenuazioni</i>	19
4.2.3	<i>Metodi di prove non distruttive con ultrasuoni</i>	21
4.2.4	<i>Rilevatore di difetti (flaw detector)</i>	22
4.2.5	<i>Ultrasuoni con laser</i>	23
4.2.6	<i>Materiali ispezionati con gli ultrasuoni</i>	24
4.3	RADIOGRAFIA A RAGGI X E TOMOGRAFIA COMPUTERIZZATA A RAGGI X	25
4.3.1	<i>Principi base di radiografia a raggi X</i>	25
4.3.2	<i>Principi base di tomografia computerizzata a raggi X</i>	27
4.3.3	<i>Materiali ispezionati con raggi X e tomografia computerizzata a raggi X</i>	27
4.4	ALTRI METODI	29
4.4.1	<i>Liquidi penetranti</i>	29
4.4.2	<i>Emissione acustica</i>	29
4.4.3	<i>Correnti parassite</i>	30
4.4.4	<i>Olografia</i>	30
4.4.5	<i>Shearography</i>	31
5	METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DEI COMPONENTI SANDWICH	32
5.1	APPLICAZIONI PER IL CONTROLLO NDT DI COMPONENTI SANDWICH REALIZZATI CON MATERIALE COMPOSITO A MATRICE METALLICA O CON HONEYCOMB.....	32
5.1.1	<i>Ultrasuoni</i>	34
5.1.2	<i>Termografia ad infrarossi</i>	39
5.1.3	<i>Emissione acustica</i>	48
5.1.4	<i>Correnti parassite</i>	48
5.1.5	<i>Radiografia a raggi X e tomografia computerizzata</i>	49
5.2	APPLICAZIONI PER IL CONTROLLO NDT DI COMPONENTI SANDWICH REALIZZATI CON SCHIUME METALLICHE.....	53

CONTENUTI DEL DOCUMENTO

5.2.1	<i>Radiografia a raggi X</i>	53
5.2.2	<i>Tomografia computerizzata a raggi X</i>	55
5.2.3	<i>Liquidi penetranti</i>	64
5.2.4	<i>Correnti parassite</i>	64
5.2.5	<i>Ultrasuoni</i>	66
5.2.6	<i>Termografia infrarossa</i>	68
6	CONCLUSIONI	72
7	BIBLIOGRAFIA	73

1 Introduzione

In questo documento si riportano le metodologie di controllo di tipo non distruttivo che potrebbero essere adoperate per verificare l'integrità strutturale di componenti realizzati con materiali non convenzionali, sia prima della messa in opera che nelle successive fasi del servizio. La ricerca sui controlli non distruttivi disponibili, noti anche come prove non distruttive (non destructive testings, NDT) o tecniche di ispezione/valutazione non distruttive (non destructive inspections/evaluations, NDI/NDE), è stata condotta per l'analisi di componenti strutturali tipo sandwich da fabbricare con schiume metalliche. Ad ogni modo l'esame di queste metodologie è stato allargato anche alla famiglia dei pannelli sandwich convenzionali realizzati con materiali compositi o con altre tipologie di materiali cellulari, molto più diffusi e per i quali esiste nella letteratura scientifica una vasta informazione, sia per la loro caratterizzazione che per il controllo durante la fase di utilizzo. Inoltre, nella sezione che riguarda le schiume metalliche, è stato riportato anche qualche esempio per lo studio dei materiali porosi, calcestruzzo in particolare, in considerazione del fatto che la presenza della porosità comporta delle similitudini, sia in termini di macrostruttura del materiale che di problematiche per le tecniche di controllo non distruttivo. Comunque ritornando sui pannelli sandwich convenzionali, la ragione della loro inclusione si deve al fatto che i pannelli realizzati con questi materiali, molto più diffusi industrialmente, presentano delle analogie importanti dal punto di vista dei controlli delle imperfezioni con quelli che potrebbero essere fabbricati con schiume metalliche. Infatti difetti (flaws) come quelli dovuti alla presenza di cricche, cavità e delaminazioni o i diversi problemi di adesione tra il materiale più interno (nucleo) e la superficie esterna (pelle) sono comuni a tutti questi materiali. Soprattutto nell'industria aeronautica, che da sempre necessita di metodologie NDT per un efficace controllo delle proprietà strutturali dei velivoli, troviamo numerose applicazioni dalle quali possiamo trarre valide indicazioni anche per i nostri materiali di interesse. Nelle seguenti righe cercheremo di introdurre alcuni aspetti delle problematiche di caratterizzazione e ispezione per questa famiglia di materiali innovativi. Prima definiremo brevemente alcune caratteristiche dei compositi a matrice metallica e dei materiali cellulari, soprattutto in funzione delle loro condizioni per un esame NDT e successivamente considereremo le principali tecniche non distruttive adoperate per caratterizzarli e controllarli.

2 Materiali compositi e materiali cellulari

Materiali compositi e materiali cellulari innovativi fanno parte di quel gruppo di materiali intelligenti o *smart materials*, su cui si è concentrato da tempo l'interesse della ricerca industriale e di base con l'obiettivo di risolvere i problemi tecnologici posti dal bisogno di dover ridurre i costi di produzione dei componenti, abbassare l'impatto ambientale, migliorare le proprietà dei prodotti stessi, soddisfare la crescente domanda per coprire nuove settori di applicazione, ecc. Ciò genera allo stesso tempo la necessità di disporre di metodologie di controllo delle proprietà di questi materiali sia durante la fabbricazione che in corso di utilizzo. Se da un lato recenti tecnologie ed applicazioni promuovono lo sviluppo di strumenti scientifici più accurati, migliorando la qualità delle metodologie di controllo, dall'altro le strutture di questi materiali creano delle nuove difficoltà per l'esecuzione e l'affidabilità delle misurazioni. L'esperienza maturata nel campo dei materiali compositi a matrice metallica e dei materiali cellulari può rappresentare una valida guida per sviluppare metodologie di controllo che assicurino l'integrità dei componenti costruiti con schiume metalliche.

2.1 Materiale composito a matrice metallica

I compositi a matrice metallica appartengono a una classe di materiali più ampia, quella dei materiali compositi. Un materiale composito è costituito da una matrice e da un materiale di rinforzo con lo scopo di ottenere delle proprietà ben precise. Sia la matrice che i rinforzi possono essere fabbricati con diversi materiali, comune è il caso sia di matrici che di rinforzi metallici, polimerici e ceramici (Mazumdar, 2002). È così che oggi disponiamo di compositi a matrice metallica MMC, a matrice polimerica PMC o a matrice ceramica CMC ed i ben noti materiali FRP (polimeri rinforzati con fibre) o CFC (compositi con fibre di carbonio). Ad esempio nell'industria aeronautica sono in atto ricerche importanti per utilizzare questi materiali nella costruzione di nuovi motori e strutture. Per quanto riguarda il caso specifico dei materiali compositi con matrice metallica, per intendere meglio l'analisi delle prossime pagine possiamo dare le seguenti definizioni che sono tratte da un documento di Mortensen et al. (2000) del consorzio europeo MMC-Assess:

a) composito

un composito o materiale composito è un materiale che consiste almeno di due costituenti (fasi distinte o combinazioni di fasi) che sono legate lungo l'interfaccia del composito, ognuno dei quali trae origine da un materiale diverso preesistente;

b) composito a matrice metallica (MMC)

un materiale composito nel quale un costituente è un metallo o una lega metallica (**matrice metallica**) formante almeno una rete di percolazione; l'altro costituente è inserito in questa matrice metallica ed in generale rappresenta il **rinforzo**;

c) MMC rinforzato con particolato (PRM)

MMC con un rinforzo di particolato che occupa una frazione in volume maggiore del 5% (altrimenti il particolato rappresenta delle inclusioni);

d) MMC rinforzato con “dispersoide”

composito a matrice metallica con un rinforzo “dispersoide” che occupa un frazione in volume maggiore a 5% (altrimenti il materiale si considera come metallo consolidato per dispersione, cioè può formare la matrice di un MMC);

e) MMC rinforzato con fibre corte (SFRM)

MMC il cui rinforzo sono delle fibre corte, cioè rinforzi cilindrici di diametro maggiore a $1\mu\text{m}$ e relazioni lunghezza/diametro maggiori di 5;

f) MMC rinforzato con whiskers (WRM)

MMC il cui rinforzo sono dei whiskers, cioè dei cristalli allungati di diametro minore di $1\mu\text{m}$ con relazioni lunghezza/diametro generalmente maggiori di 10;

g) MMC rinforzato con fibre continue (CFRM)

MMC con rinforzo di fibre continue, cioè un materiale base cilindrico con diametro nell'intervallo $3 \div 30\mu\text{m}$, prodotto continuamente in modo da formare un rinforzo del composito praticamente senza fine;

h) MMC rinforzato con monofilamento

MMC con rinforzo di monofilamento, essenzialmente una fibra continua ma con diametri maggiori di $100\mu\text{m}$.

2.2 Materiali cellulari

Per quanto riguarda invece i materiali cellulari, distinguiamo i materiali con struttura a nido d'ape o *honeycomb* e le schiume metalliche con celle chiuse o aperte.

I materiali cellulari tipo honeycomb sono delle reti interconnesse regolari, fatte di trabecole o pareti di materiale solido (metallo, polimero, vetro, schiume, ecc.) che costituiscono i bordi e le facce delle celle. Generalmente sono costruiti con celle esagonali, come quelle dei nidi delle api, ma esistono anche strutture con celle triangolari, quadrate o rombiche. Tra i materiali cellulari con struttura a nido d'ape, ricordiamo gli honeycomb in alluminio o materiale polimerico impiegati ampiamente nelle strutture aeronautiche.

Le schiume metalliche invece vengono definite (Degischer, 2002, pag. 5) come materiali eterogenei formati da una matrice metallica tridimensionale con dei pori che contengono gas e che occupano più del 70% del volume. In tutti i modi, così come per i materiali compositi, il materiale della matrice può essere anche un non metallo e a tal proposito ricordiamo la famiglia delle schiume polimeriche. Si tratta comunque di materiali cellulari con celle di forma non regolare che viene generalmente definita poliedrica. Nelle schiume metalliche con celle aperte il solido della matrice è contenuto solamente sui bordi, permettendo la connessione delle celle attraverso le facce, mentre le schiume con celle chiuse sono quelle dove anche le facce sono solide, dando vita a celle che mancano di connessione con quelle limitrofe.

3 Difetti presenti nei componenti realizzati con schiume metalliche

Per poter caratterizzare e controllare adeguatamente componenti realizzati con schiume metalliche, così come pannelli sandwich costruiti mediante l'unione di due superfici che contengono all'interno un nucleo di questo materiale cellulare, è necessario definire innanzitutto i tipi di difetti che vi possono essere presenti. Analizzeremo brevemente prima i difetti morfologici delle schiume metalliche e successivamente quelli dovuti alla cattiva adesione tra schiuma e pelle esterna di un pannello sandwich.

3.1 Difetti morfologici delle schiume metalliche

Il problema della caratterizzazione e controllo delle schiume metalliche è ben sottolineato da Ashby et al. (2000, pag. 1) i quali proprio nell'introduzione del loro libro rilevano che *“le schiume metalliche rappresentano una nuova, ancora imperfettamente caratterizzata, classe di materiali con bassa densità e nuove proprietà fisiche, meccaniche, termiche, elettriche ed acustiche”*. È ben noto che le proprietà dei materiali cellulari dipendono dalla densità e quindi dalla porosità, così come dalla struttura dei pori stessi. Anche Simancik (2002) nel libro sui metalli cellulari degli autori H.-P. Degischer and B. Kriszt, riporta che *“è difficile accettare che un materiale che dovrà sopportare dei carichi possa avere dei pori e persino dei grandi pori”*. Le schiume metalliche, a differenza delle schiume polimeriche, possiedono una struttura di pori altamente disordinata con ampia dispersione sia di dimensione di celle che di forme. Inoltre vi possiamo trovare molte imperfezioni, come fratture o vuoti nelle pareti delle celle, celle corrugate o incurvate, pareti di celle sottili, celle di dimensione o forma eccezionali, ecc. Sia Simancik (2002, pag. 2) che Asbhy et al. (2000, pag. 1) segnalano che se questi aspetti non sono presi in considerazione, caratterizzando questo materiale solo in funzione della sua densità o non controllandone il processo di fabbricazione, allora ci si potrà aspettare una dispersione ampia delle loro proprietà. Ed è proprio questa situazione che è alla base dell'opinione, ampiamente diffusa, sulla non riproducibilità delle proprietà delle schiume metalliche. Lo stesso autore precisa che non è necessaria una struttura uniforme per ottenere delle proprietà accettabili e riproducibili e che la presenza di strutture anisotropiche o con gradienti nella distribuzione dei pori permette di distribuire il materiale a seconda delle condizioni di carico, così come accade per le strutture ossee. Perciò l'obiettivo non è quello di produrre una struttura uniforme, bensì quella di ottenere proprietà riproducibili con strutture non uniformi controllate. Altre importanti conclusioni sulle proprietà che presentano i metalli cellulari sono date sempre da Degischer e Kottar (2002, pag. 358-360), i quali evidenziano che è proprio il metodo di produzione che fissa le proprietà di questi materiali e che la loro dispersione è causata dalle irregolarità nella struttura cellulare presente successivamente nei prodotti che vengono impiegati dall'industria. Per questi materiali le proprietà dipendono dalle variazioni nella struttura cellulare e dalla loro uniformità. Tanto per fare un esempio, non sembra essere sufficiente caratterizzare il componente cellulare con il parametro densità media, visto che le sue proprietà (meccaniche o fisiche più in generale) non sono solamente determinate dalla matrice metallica ma dipendono anche dalle variazioni locali della densità.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

Comunque per poter definire in modo efficace e corretto sia la caratterizzazione che il controllo di questi materiali è bene ricordare che:

1. le *schiume metalliche* possono essere prodotte mediante diversi metodi che danno vita a *diversi tipi di materiali*, le cui caratteristiche dipendono appunto dal metodo di produzione;
2. il *metodo di produzione* influenza la distribuzione del materiale sulle pareti delle celle, in modo tale che non è possibile confrontare le proprietà di materiali ottenuti con metodi di produzione diversi e che il metodo di produzione definisce il campo di applicazione della schiuma metallica;
3. il termine *struttura* di una schiuma si usa per descrivere il materiale a diversi livelli di osservazione, come sono l'architettura geometrica del solido (*scheletro*) nelle celle individuali e loro distribuzione tridimensionale, le variazioni dell'architettura all'interno di un campione o sezione (*grado di uniformità*) ed infine la microstruttura dello stesso solido e la sua superficie;
4. le *celle* della struttura sono formate da bordi tipo plateau (lati e nodi) e da pareti che le connettono tra di loro, laddove è possibile trovare residui di additivi schiumogeni ed altre disomogeneità.
5. le *schiume metalliche* possiedono una *struttura eterogenea* essendo presenti variazioni sia nell'architettura delle celle che nella distribuzione della massa;

ed in fine che:

6. le *schiume metalliche* sono attualmente oggetto di importanti ricerche per correlare loro stesse con parametri di processo e proprietà funzionali, tendenti a sviluppare delle specifiche di qualità.

Per l'importanza nell'ambito dell'integrità dei componenti strutturali, sono da ricordare poi alcuni risultati che dimostrano come i metalli cellulari presentino valori reali di rigidità meccanica e di tensione di snervamento notevolmente inferiori a quelli previsti teoricamente. A tal proposito sono stati ipotizzati vari meccanismi che cercano di dare una spiegazione di questa diminuzione. Interessanti sono le conclusioni di Evans et al. (1999) che suggeriscono le seguenti quattro regole riguardo i difetti strutturali:

1. strutture cellulari chiuse che hanno pareti diritte e bordi con spessore uniforme dovrebbero avere rigidità e resistenza prossimi ai limiti teorici; la presenza di situazioni diverse dalle precedenti, come pareti di celle curve, corrugate, sottili o assenti, così come regioni con densità alta (inclusioni) dovrebbero invece degradare le proprietà meccaniche;
2. la distribuzione della dimensione di cella non è un fattore dominante; materiali a celle chiuse con pareti diritte e celle con assi uguali possono avere un'ampia varietà di dimensioni di celle esibendo ancora proprietà simili a quelle dei materiali con celle periodiche ed uniformi;

3. i difetti che degradano le proprietà elastiche devono essere presenti normalmente con una frazione in volume f relativamente alta; ad esempio la teoria dei compositi suggerisce un fattore di knockdown della rigidezza proporzionale a $1/(1-f)$;
4. lo snervamento del materiale inizia all'interno di piccoli domini con difetti che sono correlati spazialmente.

Gli stessi autori segnalano come da calcoli teorici si possa dimostrare che:

1. la distribuzione del materiale tra le pareti ed i bordi non ha un effetto apprezzabile sulla rigidezza, cioè assottigliando le pareti uniformemente e riallocando il materiale ai nodi, la rigidezza non diminuisce fintantoché le pareti non diventino sottili rispetto al diametro della cella; ciò è spiegato dal fatto che gli effetti di flessione sono contrastati dal materiale posto ai nodi il quale bilancia la riduzione della rigidezza della membrana;
2. pareti cellulari curve e pareti corrugate causano una riduzione drammatica della rigidezza e della resistenza allo snervamento; l'assenza di pareti diminuisce la resistenza allo snervamento, lo stesso vale per il caso delle pareti sottili.

Per concludere citiamo il lavoro di Bart Smith et al. (1998), riferimento importante per la bibliografia sulle schiume, i quali hanno effettuato delle misure mediante l'uso di microscopia ottica e tomografia computerizzata ai raggi X. Gli autori verificano che le condizioni di snervamento delle schiume sono eterogenee ed avvengono all'interno di bande di deformazione. Inoltre precisano che all'eventuale presenza di celle di grandi dimensioni, ma con assi abbastanza uguali, non sono attribuibili quelle condizioni che determinano il *knockdown* delle proprietà meccaniche. Invece sono proprio le celle ellittiche con asse maggiore normale alla direzione di carico ad essere presenti nelle bande di snervamento, qualsiasi sia la loro dimensione. Si inferisce che l'ellitticità della cella provoca effetti di flessione, causa della riduzione della resistenza allo snervamento. Nel caso poi questo fenomeno si ripetesse con una sufficiente frequenza spaziale, allora anche la rigidezza del materiale dovrebbe diminuire. È possibile poi che altri difetti indeboliscano questi materiali e la loro completa quantificazione rappresenta ancora una problema, così come sottolineato nel lavoro di Evans et al. (1999).

3.2 Difetti dell'adesione nei pannelli sandwich

Per la fabbricazione di pannelli sandwich a partire da un nucleo di schiuma e da una pelle esterna esistono fondamentalmente due metodi:

1. applicazione diretta della schiuma ed adesione sulla pelle esterna
2. unione del nucleo di schiuma con la pelle esterna

Giacché il primo metodo prevede che la schiumatura si faccia in presenza del pannello esterno, in modo da realizzare un legame metallurgico fra i due costituenti, questo processo necessita di accorgimenti tecnologici per la costruzione di pannelli sandwich, come per il caso ad esempio delle schiume di Al con pelli esterne di Al. E' ovvio che durante il corso del processo deve evitarsi la fusione o il danneggiamento del pannello di alluminio. Altre importanti applicazioni le troviamo nella produzione di pannelli sandwich con schiuma di Al e pelle in acciaio.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

Il secondo metodo invece si basa su tecnologie classiche per l'unione di componenti ed in particolare quelle dove viene realizzata un'area di contatto, così come descritto nel lavoro di Bernard et al. (2002) che citano varie tecniche quali l'unione mediante rivetti, viti, saldatura ed infine l'incollaggio con adesivi.

Ci riferiremo qui ad alcuni possibili difetti presenti nell'interfase schiuma-pelle ottenuta mediante incollaggio delle superfici con adesivi. Gibson and Ashby (1997, pag. 361) indicano che tra i tipi di collasso, il più difficile da studiare è quello dovuto all'adesione tra nucleo e pelle. Comunque sottolineano che gli adesivi come le resine epossidiche sono generalmente più resistenti dello stesso nucleo. In condizioni di legame perfetto non dovrebbero crearsi quindi situazioni che possano fare insorgere delaminazioni. Se però nell'interfaccia esistono dei difetti, come quelli rappresentati dalle fratture, le stesse durante le normali condizioni di lavoro potrebbero propagarsi potendo creare delle condizioni di rottura fragile, caratterizzando le resine come dei materiali fragili. Whitehead et al. (2000) conducono uno studio per conto del *DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory* di Melbourne (Australia) sulla degradazione di pannelli sandwich nucleo honeycomb di Al e pelle esterna composita o metallica di aviogetti militari F-111 ed osservano che possono esistere grandi aree di separazione dell'adesivo, così come altri danni quali delaminazioni e presenza di corrosione. Comunque attribuiscono la delaminazione ed i fenomeni di corrosione alla presenza di acqua permessa da una cattiva chiusura della struttura o ad lavoro di riparazione non corretto. In Tabella 1 riportiamo alcuni dati estratti dalla loro ricerca relativi a possibili difetti nella regione di adesione nucleo/pannello e che potremmo quindi trovare anche su componenti sandwich di schiuma metallica ottenuti mediante incollaggio delle superfici.

Tabella 1 Difetti durante servizio per pannelli sandwich metallici (Whitehead et al., 2000)

Difetti durante servizio	Rilevanza	Commenti
Delaminazione tra faccia e nucleo	Alta. Può portare all'instabilità della faccia e perdita dell'integrità al taglio.	Generalmente associata con danni da urto, inadeguate preparazioni delle superfici o inclusioni nella linea di adesione.
Inclusioni nella linea di adesione	Moderata. È generalmente un difetto di produzione, spesso riscontrato durante servizio.	
Facce corrose	Bassa. Tensioni sulle facce sono generalmente basse.	
Lacerazioni sulle superfici	Bassa. Livelli di tensione sono bassi, assenza di fatica.	
Fatica	Bassa. Tensioni nei pannelli incollati sono basse.	Indicative di altri danni che dovrebbero essere riparati, così come di fessurazioni.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

Infine citiamo i lavori di Huang et al. (2000) che specificano la differenza tra difetti di produzione e in servizio di pannelli in composito (vedi Tabella 2) e di Yang et al. (2001) che studiano difetti, meccanismi, modelli e metodologie non distruttive per valutare l'adesione nelle strutture dei compositi.

Tabella 2 Difetti nei compositi (Huang et al., 2000)

Difetti di manifattura	Difetti in servizio
Densità; frazione di fibre; porosità; delaminazioni; contaminazioni; qualità dell'interfaccia; fessurazioni termiche; allineamento delle fibre; inclusioni estranee; fibre interrotte; difetti di adesione.	Danni da impatto; degradazione chimico/fisica; presenza di umidità; sovraccarico statico/dinamico; attacco corrosivo; influenza del calore.

Yang et al (2001) identificano le seguenti tre classi principali di difetti, che useremo anche per definirli:

1. vuoti completi, delaminazioni, porosità; in questo caso i vuoti sono causati o da insufficiente applicazione di adesivo all'interfaccia dei due materiali aderenti o da presenza di materiale estraneo;
2. scarsa adesione, cioè un legame debole tra l'adesivo e l'aderente, dovuta all'applicazione di adesivo in un solo aderente e/o applicazione irregolare dello stesso, creando uno spazio tra adesivo ed aderente; altro fattore potrebbe essere rappresentato da una preparazione inadeguata della superficie o da contaminazione delle superfici che devono aderire;
3. resistenza coesiva scarsa, cioè presenza di uno strato adesivo debole che potrebbe essere attribuito alla combinazione di molteplici fattori come un processo di curing improprio, umidità o temperatura dell'adesivo.

4 Tecniche non distruttive

La necessità di una attenzione particolare per la caratterizzazione ed il controllo della struttura di una schiuma metallica è evidenziata da Ashby et al. (2000, pag. 24) nel loro noto libro sulle schiume metalliche. Lo stesso potremmo dire più in generale per un materiale metallico cellulare e per un pannello sandwich realizzato mediante l'unione di due superfici che contengono all'interno un nucleo di questo materiale. Degischer e Kottar poi (2002, pag. 158), analizzando il tema del criterio di qualità per i materiali cellulari, affermano che per poter dare una definizione è comunque necessario ricorrere ad un'analisi basata su tre livelli, precisamente micro-, meso- e macro-scopico. Gli stessi (2002, pag. 174) riconoscono che le prove di qualità a livello *mesoscopico* si basano su prove non distruttive ed in particolare sulla tomografia computerizzata a raggi X (CT), mediante la quale è possibile arrivare a risoluzioni sotto la dimensione delle celle, potendo fornire dati per analisi quantitative di distribuzioni di densità, determinazione di regioni con valori di durezza estremi e di pori con grandi dimensioni.

Nell'industria aeronautica, dove è estremamente importante assicurare la sicurezza del volo, si fa uso già da tempo di tecniche non distruttive che analizzano la presenza di difetti anche in pannelli di materiali compositi e cellulari. Tra questi, i pannelli con materiali a nido d'ape (*honeycomb*) hanno delle importanti similitudini con le strutture realizzate mediante l'impiego di un'altra classe di materiali cellulari, le schiume metalliche. Infatti anche per queste strutture i difetti più comuni sono proprio la mancanza d'adesione tra pelli e nucleo e le imperfezioni presenti all'interno del materiale cellulare. Da un esame delle metodologie impiegate per il controllo dei pannelli honeycomb, risulta che tra le tecniche non distruttive più usate ci sono gli ultrasuoni (UT) e principalmente la tecnica C-scan, la radiografia a raggi X o con neutroni, la termografia a infrarosso (IR), l'olografia ottica con laser e spesso una combinazione delle stesse. Ad ogni modo mediante tecniche NDT si realizzano applicazioni per valutare la correlazione tra proprietà e struttura del materiale, per analizzare le imperfezioni presenti sull'interfase nucleo-pelle o all'interno di questi materiali e per esplorare materiali e tecnologie intelligenti (*smart materials and technologies*) che anticipino e segnalino l'insorgere dei problemi durante il tempo di utilizzo di questi componenti. Questi temi, che sono tuttora oggetto di ricerca, trovano sempre maggiore diffusione anche in altri settori tecnologici, dall'industria dei materiali a quella del nucleare, dalla conservazione e restauro di opere architettoniche al monitoraggio ambientale, ecc. Nelle prossime pagine daremo una descrizione delle tecniche non distruttive principali che riteniamo possano essere impiegate per controllare l'integrità dei componenti realizzati con schiume metalliche.

4.1 Termografia ad infrarossi (IR)

La termografia si può definire come tecnica NDT in grado di fornire una mappa termica della superficie che viene normalmente registrata da una videocamera. La sensibilità della videocamera dipende fortemente dalla conducibilità termica del materiale sotto esame e dagli effetti che su di essa può causare la presenza di difetti materiali.

L'infrarosso è una regione spettrale della radiazione elettromagnetica compresa in un intervallo che va tra i 3×10^{11} ai 4×10^{14} Hz. Negli ultimi anni, grazie anche alle tecnologie disponibili per il rilevamento mediante camere a infrarosso, si sono sviluppate notevolmente le tecniche non

distruttive termografiche. In particolare la *termografia ad infrarossi attiva* rappresenta una tecnica senza contatto per studiare ampie superfici di materiali e permette rilevare difetti di tipo sub superficiale, potendo essere usata come tecnica alternativa o di complemento ad altre metodologie ispettive. La termografia ad infrarosso *attiva*, a differenza dalla termografia *passiva*, necessita di uno stimolo termico esterno per rilevare eventuali contrasti termici nel materiale in esame, mentre la termografia ad infrarossi passiva ispeziona il materiale così com'è, registrando la presenza di possibili anomalie termiche.

In molti processi la temperatura può rappresentare un parametro essenziale per stabilire le condizioni di operazione appropriate. Nel caso del settore industriale la termografia ad infrarossi passiva viene utilizzata nella fase di produzione e per il controllo e la manutenzione preventiva, mentre importanti applicazioni non industriali le troviamo nel rilevamento degli incendi, analisi dell'efficienza termica degli edifici, monitoraggio dei traffici veicolare, ecc. Nel caso invece della termografia ad infrarossi attiva, che trova molteplici applicazioni nei controlli non distruttivi, i valori dello stimolo termico esterno applicato possono essere utilizzati per la caratterizzazione quantitativa dei difetti, come nel caso dello scollamento dei pannelli strutturali realizzati con materiali compositi. In funzione poi del tipo di stimolo termico applicato, possiamo distinguere diverse metodologie quali, la termografia pulsata (PT), il riscaldamento a gradini (SH), la termografia lockin (LT), la termografia con fase pulsata (PPT) e la vibrotermografia (VT). La descrizione che qui segue sulle tecniche non distruttive mediante termografia ad infrarossi (IR) viene sviluppata facendo riferimento al ben noto libro di Xavier Maldague (2001).

4.1.1 Aspetti teorici

Concetti fondamentali della radiometria sono quelli del corpo nero e della legge di Plank.

Il corpo nero, che rappresenta un valore di riferimento per l'emissione termica dei solidi, costituisce un'entità capace di assorbire completamente tutta la radiazione incidente e di emetterla uniformemente in tutte le direzioni. Per un corpo nero in equilibrio termico, la radianza spettrale $N_{\lambda,b}$ viene definita mediante la seguente legge di Plank:

$$(1) \quad N_{\lambda,b} = \frac{2hc^2}{h^5 \left(1 - \exp\left(-\frac{hc}{\lambda KT}\right) \right)}$$

dove h è la costante di Plank ($=6,63 \times 10^{-34}$ Js), c la velocità della luce ($=3 \times 10^8$ m/s), K la costante di Boltzmann ($=1,381 \times 10^{-23}$ J/K), λ la lunghezza d'onda della radiazione emessa in μm e T la temperatura del corpo nero in K. Nel caso invece degli oggetti reali, l'assorbimento della radiazione non è affatto completo e solamente una parte dell'energia viene irradiata dalla superficie in funzione dell'emittanza ε della superficie stessa. Per questi corpi la radianza spettrale è data dalla seguente relazione:

$$(2) \quad N_{\lambda} = \varepsilon N_{\lambda,b}(\lambda, T)$$

Generalmente il valore di ε , compreso tra 0 e 1, dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione λ , dalla temperatura del corpo T , dall'angolo di osservazione e da alcune caratteristiche superficiali quali rugosità, presenza di ossidazioni, contaminazioni chimico-fisiche. Nel caso di un

corpo con bassa emissività è difficile misurare la temperatura mediante metodi termografici e bisogna ricorrere alla tecnica di “*backpainting*”, quella cioè di ricoprire la superficie con una vernice rimovibile ad alta emittanza (circa 0,9). Ora la relazione fondamentale della termografia mette in relazione la radianza N_{cam} ricevuta dalla camera rilevatrice con quella emessa N_{sup} dalla superficie del solido ad una determinata temperatura T , trascurando i contributi dell’atmosfera circostante. Quindi se si considera l’atmosfera trasparente alle lunghezze d’onda di interesse e per piccole distanze, si ha:

$$(3) \quad N_{cam} \approx \varepsilon N_{sup} + (1 - \varepsilon) N_{amb}$$

dove N_{amb} è la radianza dell’ambiente circostante che viene considerato come corpo nero. Nel caso poi che l’emittanza della superficie sia alta, si ottiene:

$$(4) \quad N_{cam} \approx N_{sup}$$

che mediante la conoscenza della curva di calibrazione $N_{cam}(T)$ della camera infrarossa permette ottenere la temperatura della superficie.

4.1.2 Metodi di termografia attiva

Nella realizzazione delle prove non distruttive mediante termografia IR i metodi principali per l’applicazione dello stimolo termico sono, come abbiamo già anticipato, la termografia pulsata (PT), il riscaldamento a gradini (SH), la termografia lockin (LT), la termografia con fase pulsata (PPT) e la vibrotermografia (VT). Di seguito si descrivono le caratteristiche peculiari dei vari metodi.

4.1.3 Termografia pulsata (PT)

La PT è una delle tecniche di stimolazione termica più conosciute, molto rapida, con pulsii di durata di pochi ms per l’ispezione di materiali con alta conducibilità termica come per esempio i metalli, o di pochi s per provini con bassi valori di conducibilità termica come le plastiche, i materiali compositi polimerici, ecc. In pratica la tecnica consiste nel dirigere un flusso termico di breve durata sul provino in esame e nel registrare la curva di decadimento della temperatura. Applicando l’impulso termico la temperatura del provino all’inizio aumenta e successivamente - dopo l’impulso diminuisce, infatti l’energia del fronte termico si propaga sotto la superficie a causa della diffusione del calore. Generalmente la presenza di un difetto sub superficiale riduce la velocità di diffusione del calore, facendo apparire un’area con valori di temperatura più alti rispetto alle zone circostanti. Inoltre tali fenomeni sono funzione del tempo, di modo che difetti più profondi vengono osservati dopo un tempo maggiore presentando anche un contrasto termico di tipo “diluito” o “diffuso”. Esiste la seguente relazione approssimata che mette in relazione il tempo di osservazione t con il quadrato della profondità z del difetto sub superficiale, in un materiale di diffusività termica α :

$$(5) \quad t \approx \frac{z^2}{\alpha}$$

Altra regola empirica è quella che determina il raggio R del difetto più piccolo rilevabile in funzione della profondità z sotto la superficie che deve soddisfare le seguente relazione:

$$(6) \quad R \geq (1 \div 2) z$$

il che vuol dire che i difetti piccoli potranno essere rilevati solamente se non sono molto profondi.

Esistono poi le seguenti configurazioni possibili:

a) ispezione puntuale

riscaldando con laser o con un fascio di luce focalizzato permette un riscaldamento uniforme, ripetitivo, ma ha l'inconveniente di rendere lenta la tecnica;

b) ispezione lineare

riscaldando con lampade lineari, fili caldi, laser a scansione, linee a getto d'aria permette una rapida ispezione, uniforme, ma ha lo svantaggio di rendere disponibile solamente una parte della curva storica di temperatura a causa del movimento laterale del provino e della distanza fissa tra stimolo termico e rivelatore del segnale;

c) ispezione superficiale

riscaldando con lampade, lampade flash, laser a scansione, cannoni di calore, microonde, permette l'analisi completa del fenomeno giacché si registra la curva storica completa della temperatura, ma ha lo svantaggio di usare un riscaldamento non uniforme.

Infine riguardo i modi possibili di osservazione, esiste l'alternativa di operare in:

1. *modo riflessione*, quando la fonte termica ed il detector vengono sistemati dallo stesso lato del materiale, usato principalmente per lo studio di difetti posizionato vicini alla superficie riscaldata;
2. *modo trasmissione*, quando fonte e detector vengono posizionati su lati opposti rispetto al materiale in esame, adoperato generalmente per rivelare difetti presenti sulla parte posteriore del provino.

4.1.4 Riscaldamento a gradini (SH)

In questo caso non è d'interesse il decadimento della temperatura del provino, bensì il monitoraggio dell'aumento di temperatura causato dall'applicazione di un impulso termico a passi (impulso lungo), ottenuto mediante riscaldamento con bassa energia del campione. Il metodo è definito anche come radiometria a IR risolta nel tempo (TRIR), poiché la temperatura viene osservata durante e dopo il processo di riscaldamento. È una metodologia ampiamente applicata per la valutazione di spessori di rivestimenti, integrità dell'adesione del substrato di rivestimento, presenza di corrosione nelle strutture aeronautiche. Uno schema tipico prevede un laser ad Argon per il riscaldamento puntuale o lineare del provino ed un modulatore acusto-ottico che permette una serie di lunghezze temporali di impulsi. Il riscaldamento della superficie avviene se il materiale della stessa è opaco alla lunghezza d'onda del laser dell'argon (= 0,514 μm), mentre la sincronizzazione del riscaldamento mediante laser e la velocità d'acquisizione della camera si realizza con un sistema elettronico dedicato. Esistono tre modi fondamentali di misura: a) scansione della temperatura di una linea in corrispondenza di un valore specifico di tempo dopo il

riscaldamento; b) collezione di scansioni di temperatura di linee in funzione del tempo, cioè lo sviluppo della temperatura nel tempo in una determinata posizione sul provino; c) ricostruzione di immagini in un tempo determinato. Un vantaggio importante della metodologia TRIR è dato dalla sua veloce risoluzione temporale, poiché le immagini termiche sono acquisite solamente lungo una linea e non sull'intera regione. Ovviamente lo svantaggio è quello di richiedere maggior tempo per effettuare una scansione completa di una superficie.

4.1.5 Termografia lockin (LT)

Mediante la LT si generano delle onde termiche all'interno del componente in esame sottoponendolo a degli stimoli termici periodici di tipo sinusoidale, riscontrando delle onde termiche dispersive ed altamente attenuate in prossimità della superficie dello stesso. Ad esempio, un metodo comune per depositare periodicamente del calore sulla superficie di un provino è quello di usare delle lampade, dando origine così alla tecnica della *termografia lockin foto-termica*.

Il termine "lockin" si riferisce al fatto che deve essere registrata la relazione temporale esatta tra il segnale termico in uscita dal campione e quello di riferimento in entrata che è di tipo modulato. Quindi dopo aver superato una prima fase transitoria, il campo di temperatura oscillante che ne deriva in condizioni stazionarie emette delle radiazioni IR e viene registrato in remoto, potendosi osservare sia la fase che l'ampiezza del segnale termico proveniente dal campione. Una differenza sostanziale tra la termografia pulsata precedentemente descritta e la LT, si deve al fatto che le immagini termografiche di quest'ultima possono essere messe in relazione con il tempo di propagazione, nel caso delle immagini di fase, e con la diffusività termica nel caso delle immagini di ampiezza. Invece la tecnica della termografia pulsata PT fornisce delle immagini termografiche che dipendono semplicemente dalla potenza termica IR emessa. Sono proprio le immagini di fase un punto di forza di questa tecnica poiché danno delle informazioni indipendenti dalle caratteristiche ottiche e termiche della superficie. Nel caso dell'immagine dell'ampiezza il campo delle profondità viene stimato ricorrendo alla *lunghezza di diffusione termica* μ in $m/(K \text{ rad})^{1/2}$, inversamente proporzionale alla frequenza di modulazione ω (rad/s) e data da:

$$(7) \quad \mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega \rho C}}$$

dove k è la conducibilità termica in $W/(m \text{ K})$, ρ la densità in kg/m^3 e C il calore specifico in J/kg . Quindi si osserva che per poter rilevare i difetti mediante la tecnica della termografia lockin è necessario selezionare correttamente il valore di ω : ad esempio per poter condurre delle osservazioni a grandi profondità è necessario ricorrere a basse frequenze di modulazione, situazione che risulta essere simile a quella degli ultrasuoni.

Recentemente sono state introdotte delle tecniche di stimolazione termica (*termografia lockin con perdita d'angolo*) che fanno uso anche di trasduttori ultrasonici il cui segnale di frequenza maggiore viene modulato assieme ad un segnale in bassa frequenza. In questo caso, il segnale di bassa frequenza crea un'onda termica con una determinata lunghezza d'onda mentre le onde ultrasoniche servono per trasportare l'energia termica all'interno del campione.

4.1.6 Termografia con fase pulsata (PPT)

Si tratta di una metodologia che combina qualche vantaggio sia della tecnica PT che di quella LT. Infatti il campione in esame viene riscaldato mediante applicazioni di calore pulsate come nel caso della PT, poi l'insieme delle frequenze delle onde termiche convogliate sul campione viene decifrato sviluppando delle trasformate di Fourier del decadimento di temperatura, pixel per pixel. In questo modo si ottengono delle immagini di fase come nel caso della termografia LT. La differenza sta nel fatto che la metodologia PPT si realizza in modo transitorio, mentre in quella LT il segnale viene registrato in modo stazionario con qualità delle immagini superiore, dovuto al processo di sommatoria del metodo stesso.

4.1.7 Vibrotermografia (VT)

La vibrotermografia è una tecnica termografica attiva nella quale il calore viene rilasciato mediante frizione in prossimità di imperfezioni come cricche e delaminazioni, sotto l'effetto di vibrazioni meccaniche di determinate frequenze che vengono indotte dall'esterno sulla struttura in esame. In questi esperimenti si origina una conversione diretta di energia meccanica a termica ed i difetti vengono ad essere eccitati in corrispondenza di specifiche risonanze meccaniche, potendo poi risuonare indipendentemente dal resto della struttura. Ciò significa che cambiando le frequenze di eccitazione meccanica i gradienti termici locali possono apparire o scomparire, anche se poi praticamente si utilizza una frequenza di eccitazione fissa. La tecnica ha il vantaggio di poter esplorare in situ grandi aeree ma con al difficoltà di dover usare carichi meccanici notevoli.

4.1.8 Materiali ispezionati con la termografia ad infrarossi

In linea di massima le tecniche non distruttive che fanno uso della termografia IR possono essere applicate a molti materiali, ma bisogna tenere in considerazione alcuni aspetti importanti.

Il primo di questi è che la termografia IR è una tecnica definita "*di limite*", cioè è più sensibile a difetti localizzati in prossimità della superficie di un determinato componente, anche se ciò dipenderà dal tipo di materiale presente. Infatti viene riportato come sia possibile rilevare difetti a profondità di 2 cm nel calcestruzzo, ma solamente a 2 mm di profondità nel caso di un materiale composito fortemente anisotropo come le plastiche rinforzate con fibre di carbonio (CFRP).

Il secondo aspetto da tenere in conto è il difetto stesso, le cui proprietà termiche devono essere diverse da quelle dell'ambiente circostante in modo che possa esserne rilevata la presenza. Come regola generale queste tecniche sono sensibili a vuoti, inclusioni, fratture, delaminazioni e presenza d'acqua.

Il terzo ed ultimo punto interessa l'emittanza delle superfici, poiché sotto la soglia di 0,2 non è possibile osservare direttamente eventuali differenze di temperatura esistenti nel materiale.

Per quanto riguarda l'ispezione di componenti fabbricati con leghe metalliche ricordiamo l'analisi di rivetti e giunti sovrapposti nelle fusoliere di alluminio di aerei, corrosione negli acciai, adesione nei laminati di alluminio, processi di fusione dell'acciaio e dell'alluminio, ecc.

Nel caso delle plastiche l'applicazione riguarda il controllo di anomalie termiche e per i ceramici le determinazioni di spessori e scollamenti.

Nei pannelli sandwich, come sappiamo, alcuni possibili difetti sono: a) la perdita di adesivo (bolle, strati di aria, materiali estranei), b) i difetti di coesione (rottture all'interno dell'adesivo) e c) i difetti di incollaggio (rottture dell'interfase adesivo-superficie). Analogamente alle altre prove non distruttive le tecniche termografiche ad infrarossi offrono delle buone possibilità per la determinazione del primo tipo di difetto (caso a).

Infine per i materiali con strutture grafite- epossidiche, costituite da una matrice di fibre di carbonio annegata in un bagno di resine epossidiche, le applicazioni principali riguardano la determinazione di delaminazioni, inclusioni, danni da impatto, contenuto ed orientazioni delle fibre.

4.2 Ultrasuoni

Gli ultrasuoni rappresentano una regione spettrale delle onde meccaniche con una frequenza che va dai 2×10^4 ai 2×10^9 Hz, cioè giusto al di sopra della regione udibile che si trova tra i 20 e i 2×10^4 Hz. Oggigiorno le tecniche che fanno uso di ultrasuoni sono tra i principali metodi di controllo e valutazione non distruttiva di materiali e componenti industriali. Vengono utilizzate generalmente per ispezionare metalli e leghe, ma hanno importanti applicazioni anche per i materiali polimerici, ceramici e compositi. Tra gli usi principali degli ultrasuoni ricordiamo il rilevamento e la caratterizzazione di difetti interni e le misure di spessori, ma anche lo studio dei difetti superficiali e dei livelli di corrosione. Di recente le tecniche con ultrasuoni sono state impiegate per determinare alcune proprietà microstrutturali dei materiali tra cui dimensione dei grani, fasi e costanti elastiche.

Queste tecniche si basano sulla generazione, mediante trasduttori perlopiù piezoelettrici, e successiva trasmissione di onde acustiche nel materiale sotto esame. Gli ultrasuoni hanno bisogno di un mezzo per potersi propagare, da qui la necessità di un buon sistema di accoppiamento tra il trasduttore e il campione da esaminare. Giacché le onde acustiche, che si propagano nella maggior parte dei materiali strutturali, vengono dissipate o riflesse dall'eventuale presenza di disomogeneità o discontinuità, la misura dell'energia trasmessa e riflessa può essere messa in relazione con l'integrità stessa del materiale. Bisogna comunque tenere in considerazione aspetti quali propagazione dell'onda, assorbimento, diffusione, attenuazione, ecc. affinché si possa avere una corretta applicazione della tecnica e relativa interpretazione delle misure sperimentali. Seguendo gli autori Raj et al. (2004) possiamo raggruppare le tecniche non distruttive con ultrasuoni nei seguenti gruppi principali: a) pulse echo; b) contatto; c) trasmissione; d) immersione; e) pitch-catch; f) risonanza; g) onde superficiali. Prima di descrivere alcuni di questi metodi di controllo non distruttivo, è bene rivedere brevemente alcuni concetti teorici che svilupperemo facendo riferimento all'opera già citata di Raj et al.

4.2.1 Aspetti teorici

Se O è l'origine di un treno di onde (vibrazioni) di ampiezza A [m], frequenza f [Hz], lunghezza d'onda λ [m] e velocità angolare $\omega = 2\pi f$ [rad/s], che viaggiano in direzione x positiva con velocità U (Figura 1) [m/s], lo spostamento di una particella in O nel tempo t [s] è di tipo sinusoidale e segue la legge:

$$(8) \quad y = A \sin \omega t$$

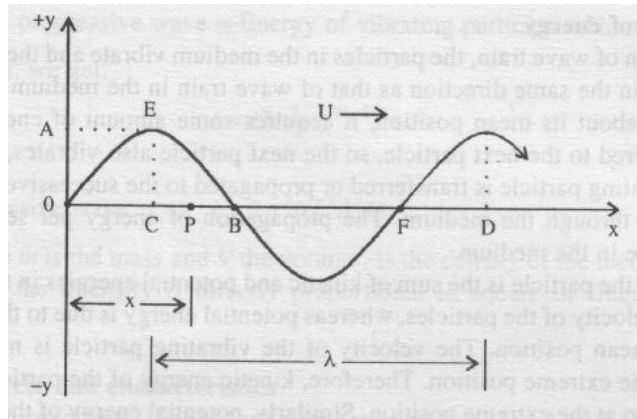


Figura 1 Onda che viaggia in direzione x con velocità U (Raj et al., 2004)

Allo stesso tempo t lo spostamento di una particella vibrante posta in P a una distanza x positiva da O è dato da:

$$(9) \quad y = A \operatorname{sen} \omega \left(t - \frac{x}{U} \right)$$

e definendo con k il numero di onda $2\pi/\lambda$ quest'ultimo sarà (Raj et al., 2004):

$$(10) \quad y = A \operatorname{sen}(\omega t - kx)$$

Quindi lo spostamento di un punto Q vibrante posto a una distanza x da O negativa sarà:

$$(11) \quad y = A \operatorname{sen}(\omega t + kx)$$

Dalla teoria del moto armonico semplice ricordiamo poi che la velocità v della particella che vibra in direzione y viene data da:

$$(12) \quad v = \omega \sqrt{A^2 - y^2}$$

Ora durante la propagazione del treno d'onda in un mezzo le particelle dello stesso vibrano mentre le onde viaggiano, quindi l'energia si propaga nella stessa direzione del treno d'onda. Quando le particelle del mezzo vibrano attorno alla loro posizione media acquistano energia che viene trasferita alle particelle vicine, facendole vibrare, e a sua volta questa energia, cinetica più potenziale, viene propagata. La velocità di propagazione dell'energia dipende dalla velocità delle particelle nel mezzo cosicché l'intensità dell'onda I in J, somma delle energie di tutte le particelle vibranti, può essere calcolata conoscendo la densità ρ [kg/m^3] e il volume V [m^3] del mezzo attraverso la relazione seguente:

$$(13) \quad I = 2\pi^2 \rho f^2 A^2 V$$

4.2.2 Tipi di onde ultrasoniche, velocità ed attenuazioni

Come abbiamo visto le onde ultrasoniche rappresentano delle vibrazioni meccaniche di piccola lunghezza d'onda che tra l'altro può cambiare durante l'attraversamento di un mezzo. La variazione della lunghezza d'onda è causata dalle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali

e dalle vibrazioni indotte delle particelle. In funzione dei modi di vibrazione delle particelle relativamente alla direzione di propagazione delle onde iniziali, le onde ultrasoniche vengono suddivise in onde longitudinali o di compressione, onde trasversali o di taglio, onde di superficie o di Rayleigh e onde di placca o di Lamb.

Si definiscono *onde longitudinali o di compressione* quelle dove le particelle vibrano nella stessa direzione di propagazione delle onde, potendosi avere zone di compressione alternate a zone rarefatte, cioè zone con presenza di forze di compressione alternate a zone con forze di dilatazione.

Le *onde di tipo trasversale o di taglio* sono invece caratterizzate da particelle con vibrazioni che avvengono nella direzione perpendicolare a quella di trasferimento dell'onda. La loro velocità è generalmente la metà di quella delle onde longitudinali poiché l'energia dell'onda viene impiegata per realizzare delle oscillazioni che non sono lungo la direzione di avanzamento del treno d'onda.

Le *onde di superficie o di Rayleigh* sono dovute alla propagazione che avviene in una superficie che separa uno spazio elastico dal vuoto o da un ambiente abbastanza rarefatto come nel caso dell'aria. Queste onde sono caratterizzate dal fatto che il movimento delle particelle è ellittico, avendo sia una componente longitudinale che trasversale e che la loro ampiezza decade molto velocemente con la profondità della propagazione nel mezzo. Infatti in pratica non esistono vibrazioni di particelle al di sopra di una distanza superiore alla lunghezza d'onda dell'oscillazione.

Le *onde di placca o di Lamb* hanno origine quando un'onda superficiale viene immessa in un materiale con spessore inferiore a tre volte la lunghezza dell'onda. In questo caso il materiale inizia a vibrare con un'onda che comprende tutto lo spessore della placca.

Per quanto riguarda invece la velocità delle onde, bisogna anzitutto premettere che nel caso di onde longitudinali, trasversali e di superficie questa dipende dal tipo di materiale e dalla frequenza dell'onda, mentre nel caso delle onde di Lamb la velocità è funzione anche dello spessore della placca. Infatti se indichiamo con Y il modulo di Young in GPa, σ il coefficiente adimensionale di Poisson e G il modulo di rigidezza in GPa, la velocità U viene data dalle seguenti relazioni:

$$(14) \quad U_L = \left[\frac{Y(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)} \right]^2$$

per le onde longitudinali,

$$(15) \quad U_T = \left[\frac{Y}{2\rho(1+\sigma)} \right]^{1/2}$$

o

$$(16) \quad U_T = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{1/2}$$

per le onde trasversali e

$$(17) \quad U_T = 0,9U_T$$

per le onde superficiali.

Siccome le caratteristiche microstrutturali dei materiali influenzano le grandezze quali densità, modulo elastico e altre proprietà meccaniche, queste a loro volta hanno effetto sui valori delle velocità ultrasoniche. Si definisce impedenza acustica Z la resistenza che un materiale presenta alla propagazione di un onda acustica nel suo interno, valutabile in Pa·s/m mediante l'espressione:

$$(18) \quad Z = \rho U$$

Ora l'intensità dell'onda decresce o si attenua con la distanza dalla sorgente mentre l'onda si propaga nel mezzo, a causa delle perdite di energia. Queste perdite che sono dovute a meccanismi di diffusione, assorbimento e diffrazione fanno sì che l'intensità dell'onda registrata ad una estremità del mezzo sia minore quindi dell'intensità dell'onda trasmessa.

La *diffusione o scattering* delle onde acustiche si deve alla disomogeneità del materiale attraversato dalle onde, in particolare al cambio di impedenza acustica provocato da limiti di grano, inclusioni, pori, dimensione dei grani, ecc.

Il fenomeno dell'*assorbimento* invece è dovuto al riscaldamento che il passaggio di un onda acustica produce in un dato materiale, facendo sì che parte dell'energia acustica si trasformi in calore, diminuendone quindi il suo valore.

Infine la *diffrazione* delle onde acustiche viene definita come la distribuzione dell'energia in bande energetiche di alto e basso valore a causa della sovrapposizione di piani di onda frontali. Infatti due onde acustiche, dovute per esempio a due fasci di onde distinti, potrebbero interferire tra di loro e formare campi energetici di massimi e minimi.

4.2.3 Metodi di prove non distruttive con ultrasuoni

Pulse echo rappresenta il metodo più comune per le prove non distruttive mediante ultrasuoni. L'energia acustica viene trasmessa sotto forma di impulsi nel materiale in esame e ricevuta mediante impulsi con tempi determinati. Inoltre in un brevissimo tempo viene generato un treno di impulsi, quindi avremo dei pacchetti di brevi impulsi intervallati tra di loro. Lunghezza dell'impulso e intervallo di tempo sono due parametri di questo metodo.

Il *metodo di contatto* è un caso particolare della tecnica *pulse echo* nel quale la sonda che trasmette e quella ricevente coincidono, con il vantaggio che la misura viene effettuata solamente da una parte del campione in esame. La presenza di un difetto verrebbe indicata dall'arrivo di un eco precedente all'arrivo dell'eco dovuto alla superficie posteriore del campione e la calibrazione effettuata sullo schermo dell'oscilloscopio potrebbe darci direttamente la posizione del difetto.

Nel *metodo a trasmissione* la tecnica *pulse echo* si realizza disponendo le due sonde, quella trasmittente e quella ricevente, su lati opposti del provino in esame dando origine al metodo a

trasmissione (*through transmission*). Se tra le due sonde esistesse un difetto, allora l'energia acustica si ridurrebbe sino a scomparire completamente nel caso di grossi difetti.

L'*immersione* è un metodo di contatto nel quale il campione viene sommerso in acqua per facilitare l'accoppiamento del trasduttore (a contatto con l'acqua) con lo stesso campione da esaminare. L'immersione può essere considerata come la tecnica principale per il rilevamento di difetti, automazione e applicazioni per immagini. Se si invia il segnale acustico con un angolo rispetto alla normale alla superficie del provino è possibile generare allora un'onda di taglio.

Le *onde superficiali* sono delle prove non distruttive con ultrasuoni che fanno uso di onde acustiche superficiali come le onde di Rayleigh e Lamb e che trovano oggi importanti applicazioni nell'industria aeronautica ed automobilistica. La maggior parte dell'energia viene concentrata sulla superficie e ciò permette di analizzare più efficacemente la presenza di difetti superficiali o sub superficiali.

4.2.4 Rilevatore di difetti (flaw detector)

Per l'importanza che riveste nel settore delle tecniche di diagnostica con prove non distruttive, conviene analizzare brevemente il funzionamento del dispositivo rilevatore di difetti o flaw detector e le metodologie di scansione che vengono utilizzate comunemente.

Il dispositivo flaw detector è una unità controllata elettronicamente che sviluppa delle operazioni seguendo le indicazioni date da un istruttore con l'obiettivo di determinare la presenza di difetti in un componente materiale. In fig. 2 si traccia un diagramma a blocchi di un rilevatore di difetti ultrasonico di tipo pulse echo composto da ricevitore ultrasonico, generatore temporale, trasmettitore e sonda per le prove, al quale bisogna poi aggiungere un tubo a raggi catodici (CRT) per la visualizzazione dei segnali. Nel momento in cui il clock fa partire simultaneamente il generatore temporale e il trasduttore, si origina un impulso ultrasonico dalla sonda e contemporaneamente un punto luminoso inizia a muoversi sullo schermo del CRT.

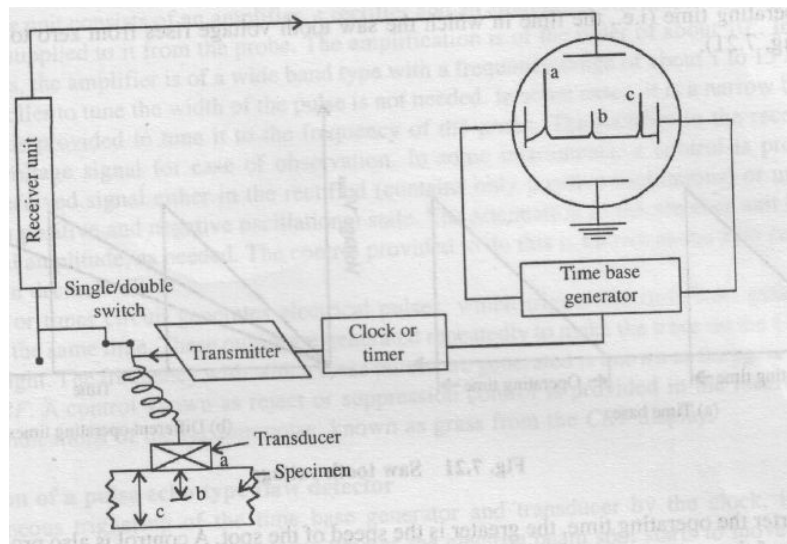


Figura 2 Diagramma a blocchi di un rilevatore di difetti ultrasonico di tipo pulse echo (Raj et al., 2004)

In Figura 2 il segnale a rappresenta l'impulso trasmesso inizialmente o *impulso principale* a che si mantiene sullo schermo poiché il segnale ultrasonico pulsato continua a essere generato dalla sonda. Successivamente quando l'impulso ultrasonico raggiunge la superficie riflettente b, parte di questo impulso viene riflesso verso la sonda che lo invia all'unità ricevente e poi allo schermo del tubo a raggi catodici. La parte rimanente dell'impulso iniziale raggiunge la superficie più lontana c e viene visualizzato anch'esso sullo schermo. Gli impulsi b e c vengono definiti rispettivamente come *eco del difetto* b e *eco della superficie posteriore* o *eco del fondo* c. Ovviamente bisogna prestare molta attenzione per regolare le frequenze di ripetizione degli impulsi principali generati - cioè gli impulsi/tempo, poiché bisogna evitare che la sonda invii un secondo segnale prima che siano ricevuti gli echi del difetto e del fondo, situazione che dipenderà dallo spessore del provino e che potrebbe generare confusione nelle misure.

Come abbiamo appena descritto gli echi ultrasonici possono venire trasferiti elettronicamente su uno schermo di un tubo a raggi catodici o su altri dispositivi di registrazione. Tre visualizzazioni o presentazioni principali dei segnali possono essere adoperate con un rilevatore di difetti e sono classificate come *scansione A*, *scansione B* e *scansione C*. Nel caso della *scansione A*, che tra l'altro è quella più comune, la linea orizzontale sullo schermo viene ad indicare il tempo trascorso mentre il segnale verticale rappresenta l'ampiezza dell'eco. Quindi mediante l'analisi della posizione e dell'ampiezza del segnale è possibile stimare sia la localizzazione del difetto che la sua dimensione. La *scansione B* ci permette di osservare una sezione trasversale del materiale in esame potendo così mostrare sia la larghezza che la profondità del difetto. Questo tipo di scansione visualizza le riflessioni delle superfici anteriore e posteriore, sia del provino che del difetto. Il vantaggio della *scansione B* è proprio quello di mantenere sullo schermo un'immagine del materiale con il suo eventuale difetto per un tempo sufficiente che permetta effettuare delle analisi. Nel caso della *scansione C* il dispositivo flaw detector viene costruito in modo da poter dare una registrazione permanente della prova durante l'effettuazione di test automatici ad alte velocità. Questa tecnica visualizza i difetti in un piano ma ha lo svantaggio di non poter apprezzare né la profondità né l'orientamento degli stessi. Particolarità dello strumento è quella di essere dotato di una porta elettronica che permette la ricezione degli echi dopo che sono trascorsi dei tempi determinati dal momento dell'invio del impulso iniziale. Questi tempi sono proporzionali alla distanza che separa tra la superficie anteriore e quella posteriore del componente in esame e la durata dell'apertura della porta elettronica è anch'essa proporzionale allo spessore del componente. Generalmente la porta elettronica viene impostata in modo che le riflessioni anteriore e posteriore siano appena visibili sullo schermo.

4.2.5 Ultrasuoni con laser

Nella tecnica degli ultrasuoni con laser (*laser ultrasonics*) le onde acustiche vengono generate e rilevate mediante dispositivi ottici. Infatti per la generazione si impiega un impulso breve di un laser di alta potenza, mentre per il rilevamento si ricorre a un impulso laser lungo e a un demodulatore ottico (interferometro confocale di Fabry-Perot). La tecnica è vantaggiosa in quanto permette che generazione e rilevamento delle onde siano realizzabili a distanza, senza dover usare un materiale accoppiante e facilitando le misure su parti complesse. Comunque bisogna tener presente che l'interazione tra laser e superficie del materiale (o del rivestimento) deve essere efficiente in modo che si generino onde ultrasoniche adatte per le misure, cioè

lunghezza d'onda e durata dell'impulso vanno selezionate. Generalmente si usa laser CO₂ per i materiali compositi, mentre la piccolissima lunghezza d'onda del laser Nd:YAG è più adatta per i materiali metallici.

4.2.6 Materiali ispezionati con gli ultrasuoni

Le tecniche non distruttive con ultrasuoni vengono praticamente applicate ad ogni genere di materiale, ispezionando oggi componenti metallici, polimerici, ceramici e compositi. Una volta trasmesso il segnale ultrasonico all'interno di un materiale questo si propagerà per tutta la profondità. Considerata la notevole capacità di penetrazione degli ultrasuoni è possibile analizzare anche difetti a profondità di alcuni metri, come nel caso di lunghi alberi in acciaio e rotori in metallo forgiato. Il metodo è sensibile anche per difetti di piccole dimensioni, poiché permette rilevare imperfezioni con lunghezze di pochi mm in pezzi con spessore di alcuni cm. Inoltre è molto accurato nel valutare la posizione dei difetti interni, le loro dimensioni, orientamenti, forme e caratteristiche. Il controllo elettronico adoperato dalla strumentazione con ultrasuoni facilita il rilevamento istantaneo delle imperfezioni presenti nei materiali, consentendo l'effettuazione di interpretazioni on-line, automazioni, scansioni rapide, metodologie molto utili per il monitoraggio della produzione e il controllo dei processi. Alcune difficoltà invece sono date dalle applicazioni per materiali che presentino parti con forme irregolari, componenti molto piccoli o eterogenei o dalle applicazioni per il rilevamento di discontinuità molto prossime alla superficie. La tecnica con ultrasuoni necessita poi della presenza di una sostanza accoppiante tra trasduttore e campione da esaminare e usa degli standard di riferimento sia per la calibrazione degli strumenti che per la valutazione delle misure.

Nel campo dei materiali metallici sono da ricordare le applicazioni per l'analisi delle saldature, dei manufatti forgiati o di fonderia e dei pezzi che sono stati sottoposti a trattamento termico. Importanti applicazioni sono anche rappresentate dai controlli mediante ultrasuoni e misure di spessore di tubazioni di impianti petrolchimici, produzione dell'energia o di impianti in generale. Nel caso delle ghise applicazioni comuni riguardano l'analisi di densità, microstrutture, ecc. mediante la valutazione della diffusione delle onde ultrasoniche all'interno della struttura disomogenea del materiale. In questo caso la presenza di particelle con struttura variabile può produrre molteplici echi, riducendo l'intensità degli ultrasuoni trasmessi. Altre applicazioni di interesse le troviamo nel settore del calcestruzzo con il metodo di analisi dell'eco ultrasonico prodotto mediante un impatto meccanico (*impact-echo test method*). Un uso diffuso delle tecniche di controllo con ultrasuoni viene fatto anche per ricavare la presenza di delaminazioni e cricche nelle unioni saldate o per la caratterizzazione delle unioni realizzate mediante incollaggio di superfici, metalliche e non, nei componenti strutturali tipo sandwich, ampiamente utilizzati nei settori aeronautico ed automobilistico. Inoltre controlli e valutazioni non distruttive mediante ultrasuoni, sviluppati per la caratterizzazione dei materiali, vengono impiegati per la misura del modulo elastico, del modulo di Poisson e di molteplici proprietà meccaniche tra le quali resistenza, durezza e tenacità. Infine importanti applicazioni sono quelle realizzate per studiare le microstrutture, misurare le dimensioni di grani, precipitati, ricristallizzazioni ed anche per valutare composizioni chimiche, porosità, discontinuità ecc.

4.3 Radiografia a raggi X e tomografia computerizzata a raggi X

I metodi di controllo non distruttivo che fanno uso dei raggi X e più recentemente di strumenti più sofisticati quali i tomografi computerizzati a raggi X rivestono un ruolo importante per lo studio, caratterizzazione e controllo dei materiali, soprattutto dei materiali innovativi che presentano una struttura alquanto complessa e porosa, come nel caso delle schiume metalliche.

La radiografia o con altri termini radiologia, radioscopia ecc. a raggi X rappresenta un metodo di ispezione che si basa sul diverso assorbimento della radiazione radiante come le radiazioni elettromagnetiche di piccola lunghezza d'onda X ($0,1 \div 10^{-7} \mu\text{m}$), γ (circa $10^{-4} \div 10^{-6} \mu\text{m}$), o le radiazioni nucleari di particelle α , β e neutroni. La radiazione radiante, quando incide su materiali diversi o su regioni di uno stesso materiale con spessori diversi o con differenze di densità, composizione, ecc. viene assorbita in forma diversa e le variazioni dell'assorbimento possono essere monitorate mediante la visione e/o registrazione su film, carta, schermo, computer, ecc. della radiazione che attraversa l'oggetto e che non viene assorbita. Nella tomografia computerizzata (CT), tecnica di diagnostica che cominciò ad applicarsi industrialmente a partire dagli anni 70, le stesse radiazioni possono essere usate per generare viste trasversali o fette trasversali di un oggetto opaco. Attraverso degli algoritmi vengono poi ricostruite le immagini volumetriche dell'oggetto, migliorando in questo modo le tecniche di osservazione e identificazione dei piccoli difetti nei materiali.

Per la descrizione degli aspetti teorici di questi metodi di valutazione non distruttiva ci rifaremo al manuale ASM ed in particolare alla sezione dei metodi non distruttivi (ASM Handbooks Online-Committee, 2002), analizzando prima il caso della radiografia e successivamente quello della tomografia computerizzata.

4.3.1 Principi base di radiografia a raggi X

La radiografia a raggi X necessita fondamentalmente di tre elementi, la sorgente radioattiva, l'oggetto da ispezionare ed un materiale sensibile che sia in grado di registrare le differenze di radiazioni che, attraversando il campione in esame, possano mettere in evidenza la presenza di anomalie, difetti interni e strutture varie mediante immagini di diversa intensità, contrasti, ombre, ecc.

Un'unità a raggi X (Figura 3) prevede generalmente un dispositivo elettronico o tubo a raggi X per convertire energia elettrica in raggi X. Il tubo è formato da una struttura catodica con filamento generalmente di tungsteno e una struttura anodica (target), entrambe contenute all'interno di una camera vuota a forma di tubo, quasi sempre di vetro o di altro materiale ceramico ma anche di metallo. Una corrente elettrica scalda il filamento che reso incandescente emette una nube elettronica, successivamente focalizzata e accelerata verso l'anodo dall'elevata differenza di potenziale esistente tra questi e il catodo. Il bombardamento di elettroni sull'anodo produce sia i raggi X ma soprattutto (anche 100 volte di più) energia termica che deve essere evacuata.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

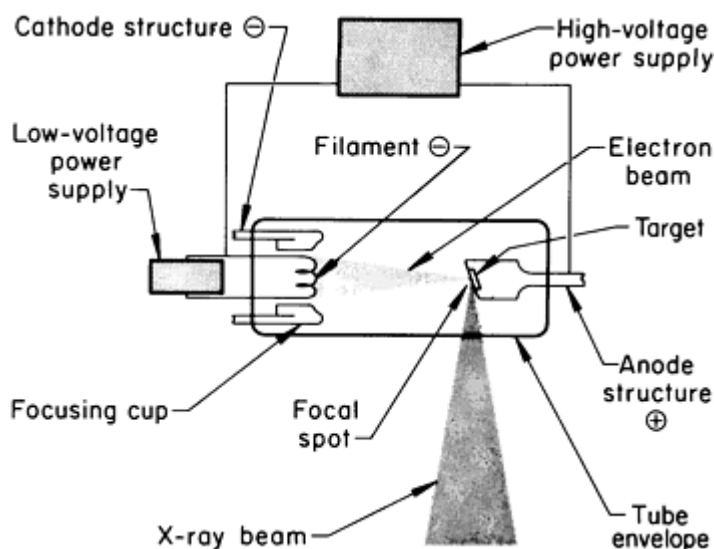


Figura 3 Schema di una unità a raggi X (ASM Handbooks Online-Committee, 2002)

In funzione della dimensione dello spot focale raggiunto dal fascio di raggi X, i tubi possono essere classificati in convenzionali o micro focus per applicazioni con risoluzioni elevate. Quest'ultimi hanno degli spot al di sotto del millimetro, sino a raggiungere spot di piccolissime dimensioni sino all'ordine dei micron.

L'energia in MeV dei raggi X ha poi un ruolo importante per le prove non distruttive, poiché da essa dipende la capacità di attraversare o meno uno spessore importante di un determinato materiale. La Figura 4, che si riferisce al caso dell'acciaio, indica la relazione esistente tra la differenza di potenziale che può essere applicata per accelerare gli elettroni nel tubo a raggi X e lo spessore di acciaio che è possibile penetrare durante le prove. Per applicazioni con energie superiori bisogna ricorrere a altri metodi per la generazione dei raggi X, poiché non esistono versioni commerciali standard di tubi a raggi X con differenze di potenziale superiore a 500 KV. In questi casi bisogna utilizzare altri dispositivi per alte energie anche sino a 30 MV, tra i quali gli acceleratori lineari, betatroni, generatori di Van de Graaff o tubi a raggi X con trasformatore risonante.

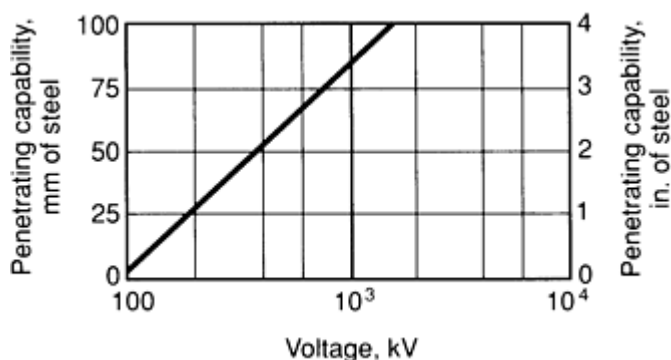


Figura 4 Effetto del voltaggio del tubo a raggi X sulla capacità di penetrazione dei raggi nell'acciaio (ASM Handbooks Online -Committee, 2002).

4.3.2 Principi base di tomografia computerizzata a raggi X

A differenza di altre tecniche di immagine, la tomografia computerizzata mantiene il fascio incidente di energia radioattiva e il dispositivo di rilevamento nello stesso piano della superficie che deve essere scansionata e non in un piano perpendicolare. Quindi è necessario disporre di un procedimento matematico per calcolare, localizzare e visualizzare, punto per punto, l'attenuazione dell'energia mentre attraversa la struttura del materiale in esame.

La Figura 5 illustra schematicamente il principio su cui si basa la CT. Un fetta sottile del campione da esaminare viene scansionata con un fascio di raggi X, la cui attenuazione durante l'attraversamento, come abbiamo già detto, è funzione della densità e dello spessore del materiale, oltre che della sua composizione chimica e dell'energia del fascio incidente. La tecnica utilizza queste informazioni scansionando l'oggetto da diverse posizioni angolari e ricostruendo la configurazione trasversale mediante algoritmi di calcolo.

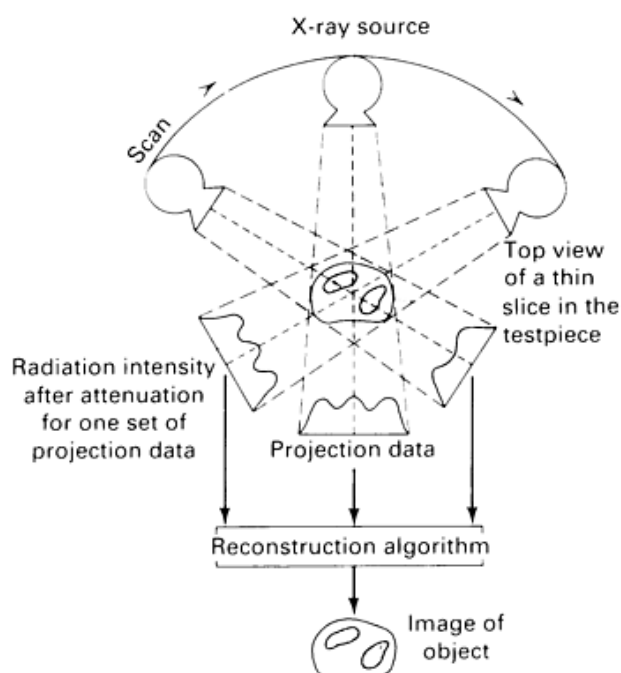


Figura 5 Principio base della tomografia computerizzata (ASM Handbooks Online -Committee, 2002).

Il sistema di scansione è provvisto di sorgente radioattiva e detector della radiazione, generalmente costruito con una serie di sensori dei raggi X disposti linearmente. I sensori registrano il segnale della radiazione che viene poi convertito in valori numerici ed infine processato al computer. In pratica l'algoritmo di calcolo genera, con metodi iterativi o di trasformazione, un'immagine 2D a partire da misure unidimensionali di radiazione effettuate dal tomografo che è capace di dirigere il fascio radioattivo da diverse posizioni angolari.

4.3.3 Materiali ispezionati con raggi X e tomografia computerizzata a raggi X

La radiografia a raggi X può essere impiegata quindi per analizzare le caratteristiche di un componente che esibisce variazioni di spessore o densità in relazione all'ambiente circostante. In pratica è possibile analizzare la maggior parte dei materiali solidi, ferrosi e non ferrosi, non metallici, compositi, con eccezione dei materiali molto densi o di bassissima densità. Discontinuità

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

quali, vuoti, fratture, inclusioni, ecc. possono essere rilevati facilmente se l'orientamento dell'oggetto relativamente al fascio incidente è appropriato. Comunque, eventuali delaminazioni nei pannelli sandwich, fratture non parallele al fascio radioattivo o molto strette, micro fessure, microporosità, sono quasi sempre non rilevabili. Vantaggi della tecnica sono quelli di poter rilevare difetti interni nei materiali, i cambi di composizione negli stessi e di poter registrare in modo permanente queste informazioni. Applicazioni importanti sono quelle effettuate per caratterizzare pezzi di fonderia e saldature, specialmente nella valutazione della presenza di difetti interni nelle caldaie, contenitori a pressione, componenti di turbine, ecc. Altre applicazioni di interesse riguardano materiali da forgiatura, stampi e sistemi meccanici in generale, ma anche semiconduttori ed altri dispositivi elettronici.

Sulle applicazioni con tomografia computerizzata, tralasciando quelle molto diffuse della medicina, bisogna ricordare che questa tecnica fornisce un modo unico per ottenere dei dati sulla struttura interna di un materiale. Possiamo già anticipare che sono da tempo in atto importanti lavori di ricerca riguardo la caratterizzazione e il controllo delle schiume metalliche con tomografia computerizzata, tema che esamineremo più in avanti nel capitolo 5, quando analizzeremo le metodologie di controllo dell'integrità dei componenti sandwich realizzati con schiume metalliche. Ad ogni modo la strumentazione CT può essere configurata per scansione oggetti di grandi dimensioni, anche se la risoluzione spaziale in questi casi si riduce se confrontata a quella dei sistemi di analisi CT per oggetti piccoli. Alcune limitazioni possono derivare dalla quantità di dati che devono essere processati computazionalmente, specialmente per le scansioni effettuate su grandi volumi. In questi casi è preferibile limitare le immagini a piccole regioni di interesse o a specifiche posizioni all'interno del campione. La tomografia computerizzata è comunque molto adatta per l'ispezione dei materiali compositi, sia in fase di produzione che di utilizzo, in particolare nel settore aeronautico. Infatti mediante questa metodologia è possibile osservare le strutture interne delle resine, stabilire ad esempio le condizioni per il periodo di curing, determinare gli orientamenti delle fibre, valutare le variazioni di densità, ecc. Altre applicazioni industriali riguardano la produzione di piccoli pezzi mediante forgiatura e fusione di precisione e l'ispezione di grandi prodotti di fonderia per il settore aeronautico. Altri casi importanti sono quelli per la caratterizzazione della porosità nei materiali e lo studio dei materiali ceramici. Alcune informazioni interessanti ed attuali sono riportate presso il sito web (<http://www.ctlab.geo.utexas.edu/>) del Dipartimento di Scienze Geologiche della University of Texas di Austin, il quale dispone di un laboratorio di CT fornito dalla Bio-Imaging Research di Lincolnshire, IL, USA. Loro obiettivo è quello di sviluppare uno strumento che dovrebbe aggiungere alle caratteristiche già esistenti negli strumenti a scansione medicali, quelle di poter penetrare oggetti da bassa a moderata densità con risoluzioni spaziali dell'ordine di pochi micrometri. Per far ciò adottano due sottosistemi, il primo che fornisce una risoluzione *ultra-alta* con raggi X di bassa energia, l'altro invece che penetra oggetti più densi impiegando raggi X più energetici e raggiungendo una risoluzione di tipo *alta*. Il primo sistema (*ultra-alta*) possiede una fonte a raggi X micro focale di 200 kV ed è per provini di pochi cm con risoluzioni spaziali da 250 a 5 μm . Il secondo sottosistema (*alta*) invece impiega una fonte di raggi X di 420 kV (tungsteno) per campioni di peso sino a 50 kg e può usare due detector con sensibilità diverse. Comunque possono essere analizzati oggetti con diametro sino a 50 cm, la fonte ed il detector hanno un movimento verticale sino a 75 cm (il sistema è alto 1,5 m, quindi si possono effettuare sino a due

scansioni di 75 cm ciascuna per oggetti più lunghi) e le risoluzioni spaziali possono essere di pochi mm sino a 250 μm . Inoltre un completo ed adeguato laboratorio di analisi digitale delle immagini completa l'infrastruttura precedente. Tra i tanti lavori pubblicati da questo Dipartimento citiamo quello sperimentale di Louis et al. (2007) che studia la compattazione a 140 MPa e distribuzione delle deformazioni che ne derivano in piccoli provini di rocce sedimentarie. Applicando la CT, assieme alle tecniche di correlazione di immagini digitali (DIC), gli autori studiano la distribuzione delle deformazioni e l'effetto che hanno sul modo di collasso delle rocce alcuni aspetti dovuti alle condizioni stratigrafiche delle stesse.

4.4 Altri metodi

Oltre alla termografia ad infrarossi, agli ultrasuoni e alle metodologie a raggi X, esistono altre tecniche, non sempre di minore importanza, che potrebbero essere utilizzate per caratterizzare e controllare componenti da costruire con materiali non convenzionali. Comunque è bene annoverarle, per le eventuali applicazioni che potrebbero essere investigate, senza trascurare il fatto che alcune di esse richiedono delle attrezzature molto ridotte ed economiche. Nei paragrafi successivi diamo un breve descrizione delle stesse.

4.4.1 Liquidi penetranti

Le ispezioni con liquidi penetranti rappresentano uno dei metodi non distruttivi con maggior diffusione. La loro popolarità si deve a due fattori principali, facilità di impiego e flessibilità. La tecnica è basata sulla capacità di un liquido di essere assorbito per capillarità all'interno di un difetto che interrompe una superficie cosiddetta "pulita". Questo metodo, molto economico, è adatto per il rilevamento di difetti superficiali e rappresenta un valido sostituto dei metodi con particelle magnetiche per materiali non magnetici. Svantaggi della tecnica con liquidi penetranti sono l'incapacità di evidenziare difetti sub-superficiali e la perdita di risoluzione durante il controllo di materiali porosi. Tra i materiali ispezionati con liquidi penetranti ricordiamo i metalli, ceramici (vetro) e polimeri (plastiche, gomma) mentre tra i difetti rilevabili annoveriamo cricche per fatica, cricche causate da trattamenti termici o da lavorazioni, fratture per impatto o sovraccarico, porosità, problemi in saldature e brasature.

4.4.2 Emissione acustica

L'emissione acustica si mette in relazione con le onde prodotte da stati di tensione nel momento in cui viene liberata rapidamente l'energia di deformazione a seguito di cambi microstrutturali nei materiali. Quando le onde da tensione raggiungono la superficie del campione, i piccoli spostamenti che ne derivano possono essere rilevati da un trasduttore. La tecnica si applica caricando elasticamente una struttura, per esempio flettendo una trave, applicando un momento ad un albero meccanico o pressurizzando un serbatoio e monitorando la risposta acustica emessa dal materiale. Durante i cambi strutturali, l'instaurarsi di condizioni quali deformazioni plastiche, inizio e propagazione di cricche, cambi nell'orientamento dei limiti di grano, fenomeni di frizione e usura in superfici, ecc. sono fonte di segnali acustici che possono essere rilevati mediante dei sensori generalmente costruiti con elementi piezoelettrici ceramici. Il segnale amplificato viene poi processato, registrato ed infine analizzato. Questi segnali elettrici sono influenzati da aspetti di propagazione delle onde da tensione, tra le quali diffusione geometrica, perdite dovute all'assorbimento del materiale, traiettorie dirette e riflesse lungo il tragitto che va dalla sorgente di emissione acustica al trasduttore, diverse velocità di propagazione e dispersione delle onde da

tensione. L'emissione acustica permette monitorare nel tempo il procedere del danno, distinguere tra i diversi meccanismi del micro-danno e stabilire anche le loro coordinate spaziali e temporali. Comunque l'interpretazione è difficile e si basa su una corrispondenza tra le caratteristiche di emissione acustica del segnale ed i diversi modi di danno conosciuti per i materiali. Applicazioni da ricordare sono quelle relative al monitoraggio di strutture sotto carico.

4.4.3 Correnti parassite

Se una bobina, definita bobina di eccitazione, che conduce corrente elettrica si posiziona vicino ad un materiale conduttore, si crea un campo magnetico alternato che induce delle correnti parassite nel materiale. A loro volta le correnti parassite generano un secondo campo magnetico e possono essere raccolte da una seconda bobina, detta bobina di rilevamento. L'interazione dei due campi modifica il capo magnetico risultante, alterando la distribuzione dei flussi nella bobina di rilevamento e causando un cambio della sua impedenza. Un gran numero di fattori può provocare questo cambio, tra gli altri la dimensione e forma sia della bobina che del materiale in esame, la stessa distanza tra bobina e materiale, le proprietà elettromagnetiche di quest'ultimo e la frequenza della corrente principale. Quindi la misura del cambio di impedenza può essere sfruttata per risalire al tipo di materiale in esame e per misurare i suoi valori di conducibilità elettrica e permeabilità magnetica. Altro aspetto da tenere in conto è quello legato alle variazioni locali della resistività nel materiale o all'interruzione dei campi di correnti parassite, causati dalla presenza di difetti strutturali che a loro volta modificano l'impedenza e quindi permettono di essere rilevati. Il segnale di risposta della tecnica con correnti parassite si caratterizza generalmente sia in termini di ampiezza che di angolo di fase ed i valori sperimentali registrati possono essere messi in relazione con la dimensione di questi difetti. Bisogna ancora una volta sottolineare che la risposta spaziale della sonda, per esempio la sua sensibilità ad un data dimensione di difetto, dipenderà comunque dalla geometria della bobina, dalla frequenza guida, dalla distanza di misura, ecc. Un fattore critico è rappresentato poi dalla scelta della frequenza guida poiché generalmente si usano alte frequenze per le misure che interessano le regioni superficiali del campione, mentre le basse frequenze vengono impiegate per le osservazioni sub superficiali, richiedendo quindi l'uso di strumenti multifrequenza.

4.4.4 Olografia

Si tratta di un metodo per diagnosticare la presenza di difetti nei materiali mediante metodologie ottiche. Così come per le altre prove non distruttive di questa famiglia, il principio su cui si basa è quello della riduzione delle caratteristiche di rigidezza di un materiale che viene sottoposto ad un carico incrementale. Localmente infatti, in prossimità di un difetto, si manifesta una deformazione che presenta delle anomalie rispetto a una deformazione di una zona libera di difetti. Le caratteristiche delle aree con anomalie sono funzione della dimensione e posizione del difetto oltre che del modo con il quale sia applica il carico incrementale. Quindi queste prove non distruttive basate su metodi ottici possono venir visti come processi di identificazione di regioni anomale in un provino caricato esternamente, successivamente completati di calcoli meccanici per quantificare forma, dimensione e posizione del difetto.

Per quanto riguarda la tecnica, se si impiega luce visibile l'ologramma della regione di interesse viene registrato generalmente mediante un dispositivo ottico (olocamera). Inizialmente (ASM Handbooks Online -Wagner, 2002) un fascio laser monocromatico di luce coerente in fase viene

diviso in due mediante uno splitter. Il primo fascio, quello che va a illuminare l'area del materiale in esame, viene poi allargato e filtrato mediante un filtro spaziale con lenti e forellino, in maniera da ridurre la presenza di corpuscoli, polvere, ecc. sulla traiettoria del fascio. Successivamente viene inviato sul materiale per illuminarlo uniformemente, quindi parte della luce laser che viene riflessa dal materiale viene intercettata su una placca fotografica ad alta risoluzione. Il secondo fascio, che rappresenta invece un fascio di riferimento, attraversa un secondo filtro spaziale e viene poi guidato direttamente sulla placca fotografica, senza riflettere sull'oggetto. Se uno dei due fasci laser fosse assente, allora si avrebbe una placca esposta uniformemente, mentre con i due fasci laser che incidono contemporaneamente si crea un modello di interferenza come risultato dell'interazione coerente dei due fasci. Questo modello di interferenza, impressionato sulla placca dall'emulsione fotografica, contiene l'informazione necessaria per ricostruire un'immagine 3D altamente fedele della regione in esame.

Tra le applicazioni principali dei controlli non distruttivi mediante tecniche olografiche ricordiamo, l'ispezione di componenti sandwich per rilevare presenze di scollamenti, dei laminati, di cricche e loro spostamenti nei metalli, dei compositi per una loro caratterizzazione.

4.4.5 Shearography

La shearography è una tecnica di misura ottica sviluppata per superare alcune limitazioni dell'olografia, infatti viene considerata un metodo più stabile in quanto non è necessario usare il fascio di luce di riferimento. Le applicazioni coincidono in pratica con quelle già citate nel paragrafo precedente.

Il metodo prevede due alternative: la prima è quella di misurare lo spostamento di una superficie della regione in esame, la seconda quella di misurare la derivata di questo spostamento o velocità della deformazione (strain). Si basa sullo stesso principio dell'olografia, cioè quello della riduzione delle caratteristiche di rigidità di un materiale sottoposto ad un carico incrementale. In questo caso però, dopo aver registrato le condizioni del provino prima e dopo l'applicazione del carico, il modello di frange ottiche ricostruito fornisce sia le curve di livello degli spostamenti che delle derivate degli spostamenti e permette il rilevamento di scollamenti, cricche ed altri difetti a partire dalle frange perturbate.

La tecnica della shearography (Hung et al., 2000) richiede l'uso di un dispositivo per lo shearing delle immagini. Questo dispositivo viene posto di fronte ad una olocamera convenzionale in maniera da focalizzare sul piano dell'immagine due prese della superficie in esame, spostate lateralmente tra di loro. Le due immagini si riferiscono a due diversi punti presenti sulla superficie del campione, per i quali è possibile rilevare otticamente le loro traiettorie relative o gradienti delle deformazioni e le velocità di queste deformazioni.

5 Metodologie di controllo dell'integrità dei componenti sandwich

Ricordiamo che è nostro interesse quello del controllo di componenti sandwich da realizzare con *materiali non convenzionali* quali le schiume metalliche. Quindi nelle prossime pagine analizzeremo le tecniche di prove non distruttive attualmente in uso per valutare l'integrità di componenti sandwich realizzati con questa classe di materiali cellulari, allargando però il nostro esame anche ad alcuni *materiali convenzionali* quali compositi a matrice metallica, materiali cellulari con struttura a nido d'ape o honeycomb ed aggiungendo infine alcune applicazioni per materiali porosi. In particolare nella sezione 5.1 riporteremo prima alcuni lavori sul controllo di componenti fabbricati con compositi a matrice metallica (eventualmente a matrice polimerica quando ritenuto di utilità) o costruiti con materiali con struttura a nido d'ape o honeycomb. Successivamente nella sezione 5.2 ci riferiremo invece a studi che sono stati portati a termine per la caratterizzazione ed il controllo di schiume metalliche completandoli con alcuni lavori per la valutazione di materiali porosi. Ciò è dovuto sia alle possibili similitudini in termini di struttura e difetti che tutti questi materiali hanno con le schiume metalliche che ai numerosi lavori pubblicati nella letteratura scientifica internazionale riguardo le prove non distruttive per la caratterizzazione di questi materiali. L'informazione è molto utile per comprendere problematiche e limitazioni che le specifiche tecniche non distruttive dovrebbero affrontare in questo campo. Infatti le schiume metalliche rappresentano una tipologia di materiali metallici cellulari per i quali la quantità dei dati disponibili è scarsa, se si eccettua il caso degli studi effettuati con metodologie a raggi X.

I materiali compositi e cellulari trovano già ampia applicazione nell'industria, per esempio nei settori aeronautico ed automobilistico, tanto per citare due esempi molto comuni. Allo stesso modo quindi sono state sviluppate le prove non distruttive per questi materiali, avendo avuto una notevole diffusione nei settori menzionati, ma anche in quello energetico, nucleare, della conservazione dei beni architettonici e più in generale dei materiali. Grazie alla ricerca, oggi esistono molteplici tecnologie e strumenti che permettono di analizzare la struttura di un componente, caratterizzarlo e valutare la presenza di eventuali difetti, danni, discontinuità, ecc. sia in fase di fabbricazione che in quella di utilizzo.

5.1 Applicazioni per il controllo NDT di componenti sandwich realizzati con materiale composito a matrice metallica o con honeycomb

Per la descrizione di questo tema ci rifacciamo innanzitutto al documento di Huang et al. (2000) prodotto sempre dal consorzio europeo MMC-Assess che, seppur non molto recente, fornisce una rassegna molto completa sulle principali tecniche NDT applicate per identificare i difetti prodotti durante la fabbricazione o in servizio dei materiali compositi a matrice metallica. Inoltre analizzeremo anche altri articoli scientifici per il caso dei pannelli con materiale con struttura a nido d'ape o honeycomb, potendo includere anche lavori portati a termine per la caratterizzazione ed il controllo di compositi a matrice polimerica quando sia ritenuto di utilità per completare l'informazione precedente.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

Huang et al. (2000) sottolineano che l'obiettivo è sempre quello di assicurare la qualità e l'integrità strutturale di un particolare componente e che esistono due approcci fondamentali sull'uso delle tecniche NDT, il primo che tende a fornire una valutazione della qualità, il secondo meno soggettivo che impiega degli standard di accettazione quantitativi. Suggestiscono di utilizzare sempre almeno due metodi di prove non distruttive per valutare il danno di un composito, poiché ciascun metodo ha delle sensibilità diverse a secondo del tipo di danno. Nella Tabella 3 si riportano le tecniche NDT usate per questi materiali, con descrizione dei vantaggi/svantaggi di ogni singola tecnica, così come compilate dagli autori citati.

Tabella 3 NDT usate per i compositi (Huang et al., 2000)

Metodi	Tipico difetto individuabile	Affidabilità	Sensibilità	Velocità	Facilità d'uso	Costo
Ultrasuoni convenzionali	Delaminazioni; porosità; fratture; inclusioni; distribuzione delle fibre; allineamento delle fibre; condizioni di curing.	Buona se automatizzata.	Molto buona per le delaminazioni, inclusioni, vuoti, porosità..	Relativamente lenta: prove punto a punto.	Scarsa, necessita di accoppiante.	Basso se prove manuali, alto se automatizzate.
Radiografia a raggi X	Inclusioni; allineamento delle fibre; distribuzioni delle fibre; fratture; vuoti.	Buona.	Buona per le inclusioni, translaminare.	Buona.	Scarsa, necessita di operazioni di screening, ecc.	Modesto per i sistemi elementari, alto per quelli più flessibili.
Termografia	Delaminazioni; concentrazioni di fibre; difetti di adesione; inclusioni.	Buona con sorgente termica adatta ed immagini ottenute con intervallo temporale adatto.	Moderata per le delaminazioni ed inclusioni; non applicabile ad altri difetti.	Buona.	Discreta.	Alto.
Metodi a bassa frequenza	Frazioni in volume di fibre incorrette; fratture; grandi delaminazioni; angolo di avvolgimento incorretto.	Relativamente bassa.	Povera, utile solamente per delaminazioni relativamente grandi.	Lenta per coprire aree grandi.	Buoni strumenti portatili, adatta per lavori in terreno.	Basso.
Ultrasuoni laser	Delaminazioni; fratture delle interfacce; inclusioni; allineamento delle fibre.	Buona.	Buona.	Abbastanza buona.	Discreta.	Molto alto.
Shearography	Delaminazioni solamente; inclusioni.	Buona se con eccitazione soddisfacente	Moderata per delaminazioni e inclusioni; non applicabile ad	Buona.	Discreta.	Alto.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

			altri difetti.			
Correnti parassite	Composizione del laminato; fratture.	Buona.	Adatta per controllare la frazione in volume del rinforzo.	Buona.	Semplice da usare, senza contatto con il provino.	Basso.
Emissione acustica	Fratture; delaminazioni; propagazione del danno	Buona se è stata sviluppata la corrispondenza tra le caratteristiche del segnale ed i diversi modi di danno.	Buona per il rilevamento dell'accumulazione del danno all'interno di volumi di provini.	Buona.	Buona, facile da eseguire, restrizioni su dimensioni del provino e forma.	

Nei paragrafi successivi vengono riportati alcuni lavori sull'uso delle principali tecniche NDT per i materiali MMC e honeycomb fondamentalmente.

5.1.1 Ultrasuoni

La tecnica NDT con ultrasuoni (UT) trasmette e riceve gli ultrasuoni generalmente con un trasduttore di frequenza fissa nell'intervallo $1 \div 10$ MHz. Come abbiamo visto il metodo consiste nel dirigere un fascio di energia ultrasonica in un campione e nel misurare poi o l'energia trasmessa attraverso il campione oppure l'energia riflessa da un difetto nel campione. La propagazione degli ultrasuoni in un composito è condizionata da diversi parametri del materiale quali rigidità, densità e da caratteristiche microstrutturali. Inoltre anche fattori come condizione delle superfici, frequenza e tipo di onda ultrasonica incidente influenzano la propagazione. I metodi *pulse-echo* che misura l'energia riflessa da discontinuità o difetti presenti nel materiale e *through-transmission* che misura invece l'energia che attraversa il campione del composito, rappresentano i due metodi di base delle prove con ultrasuoni. È stato già rilevato che lo svantaggio principale dell'ispezione con ultrasuoni è la necessità di dover usare un mezzo accoppiante tra il trasduttore e la struttura. Altra peculiarità è quella di dover effettuare scansioni lungo due direzioni perpendicolari in modo da realizzare uno studio completo. Le velocità ultrasoniche sono correlate in primo luogo con la frazione volumetrica del rinforzo, quindi possono essere usate per dare delle valutazioni non distruttive su questo parametro del materiale. Anche l'attenuazione ed il comportamento di *backscattering* sono in relazione con la frazione volumetrica delle fibre e quindi si usano per valutare la distribuzione delle stesse all'interno della matrice. Inoltre l'analisi con ultrasuoni rappresenta uno strumento efficace per studiare le proprietà elastiche e per caratterizzare l'anisotropia dei MMC sulla base delle velocità di onde longitudinali e trasversali. Può essere usata per controllare l'omogeneità elastica del materiale, permettendo il calcolo del modulo elastico con molta più accuratezza dei metodi convenzionali di trazione (Huang et al., 2000).

Un lavoro di caratterizzazione per un metallo composito con matrice di alluminio e fibre di Al_2O_3 , mediante tecniche di immersione e metodologia con scansione C sviluppato da Lee and Park (1995), mostra che le velocità ultrasoniche (longitudinali e trasversali) possono venire correlate effettivamente con la frazione volumetrica delle fibre (Figura 6), dalla quale dipendono anche

l'attenuazione e la diffusione delle onde ultrasoniche, permettendone quindi una valutazione non distruttiva.

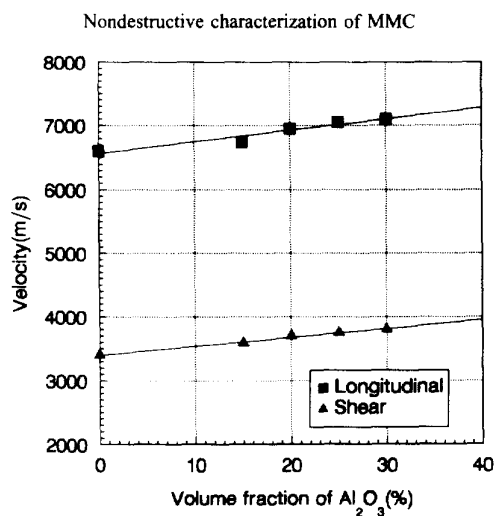


Figura 6 Velocità ultrasoniche longitudinali e trasversali in funzione del contenuto di fibre in un materiale composito MMC (Lee and Park, 1995).

Krishnamurty et al. (1995) invece applicano onde ultrasoniche trasversali e longitudinali per valutare il processo di consolidamento di due diversi compositi con matrice metallica, entrambi con rinforzo di carburo di silicio, il primo realizzato con lega Ti-14Al-21Nb ed il secondo con lega Ti-6Al-4V. La tecnica usata è quella del pulse-echo, le misure ultrasoniche con onde trasversali impiegano un trasduttore di 25 MHz, mentre quelle con onde longitudinali un traduttore di 50 MHz in maniera da assicurare la stessa lunghezza d'onda (o risoluzione), pari a 130 μ m in entrambi i casi. Le immagini del materiale ottenute mediante ultrasuoni vengono poi confrontate con quelle osservate al microscopio su sezioni metallografiche degli stessi campioni, dimostrando che la tecnica è capace di caratterizzare la microstruttura dei compositi a matrice metallica.

Gieske e Rumsey (1997) sviluppano una tecnica acustica con ultrasuoni per valutare l'integrità strutturale di una pala di turbina, più esattamente dell'interfaccia con incollaggio epossidico tra un inserto metallico e un composito epossidico con fibra di vetro. Usano le tecniche pulse-echo, pitch-catch e trasmissione di Figura 7 e mediante scansione C forniscono delle immagini di delaminazioni del composito e perdita di incollaggio provocati sia da fenomeni di fatica e condizioni operative che da aspetti di costruzione della pala stessa. Riportano che le immagini hanno una buona coincidenza con quelle che vengono ottenute mediante ispezione visiva di questo componente. Misure preliminari come quelle di Figura 8, ottenute con immagini via scansione C e tecnica di ultrasuoni per trasmissione, mostrano due difetti creati appositamente sull'interfaccia dell'incollaggio.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

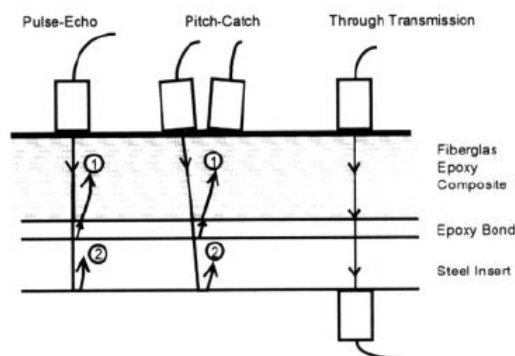


Figura 7 Set up delle tre tecniche ultrasoniche usate da Gieske e Rumsey (1997).

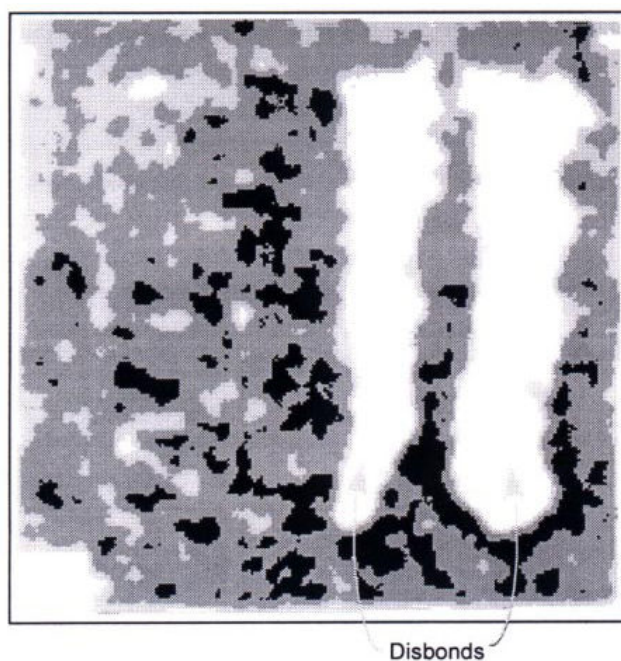


Figura 8 Immagini ultrasoniche mediante tecnica a trasmissione e scansione C di due scollamenti creati artificialmente sull'interfaccia adesiva (Gieske e Rumsey, 1997).

Altro interessante lavoro di ricerca, per valutare con prove non distruttive compositi a matrice metallica in alluminio, è stato portato a termine da Rosset (2003) per conto dell'US Army Reserach Laboratory. L'autore usa fondamentalmente la tecnica a ultrasuoni pulse-echo con scansione C mediante un trasduttore a 5 MHz. Inizialmente esamina cinque campioni di materiale con difetti imposti e conosciuti in maniera da determinare la sensibilità della strumentazione. Successivamente applica la metodologia su altri provini, ben rilevando la presenza di grossi difetti quali fratture, delaminazioni, aree con basso contenuto di fibre, ecc. ma con qualche problema quelle di imperfezioni minori, come le ondulazioni delle fibre di rinforzo del composito. Inoltre viene osservata una dipendenza tra volume di fibre e velocità delle onde ultrasoniche e una attenuazione del segnale ultrasonico con l'aumento dello stesso volume di fibre, situazione che può condurre a false interpretazioni dei risultati sperimentali. In Figura 9 si mostra un dettaglio del set up sperimentale all'interno del contenitore riempito con acqua che permette la trasmissione delle onde ultrasoniche dalla sonda alla superficie del campione. Il tipo di segnale

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

ultrasonico ottenuto mediante la tecnica pulse-echo utilizzata da Rosset viene riportato in Figura 10, dove si può osservare il picco del primo eco della superficie del fondo, del secondo eco, cioè di quello che ha attraversato il materiale due volte, del terzo (tre volte) e così via.

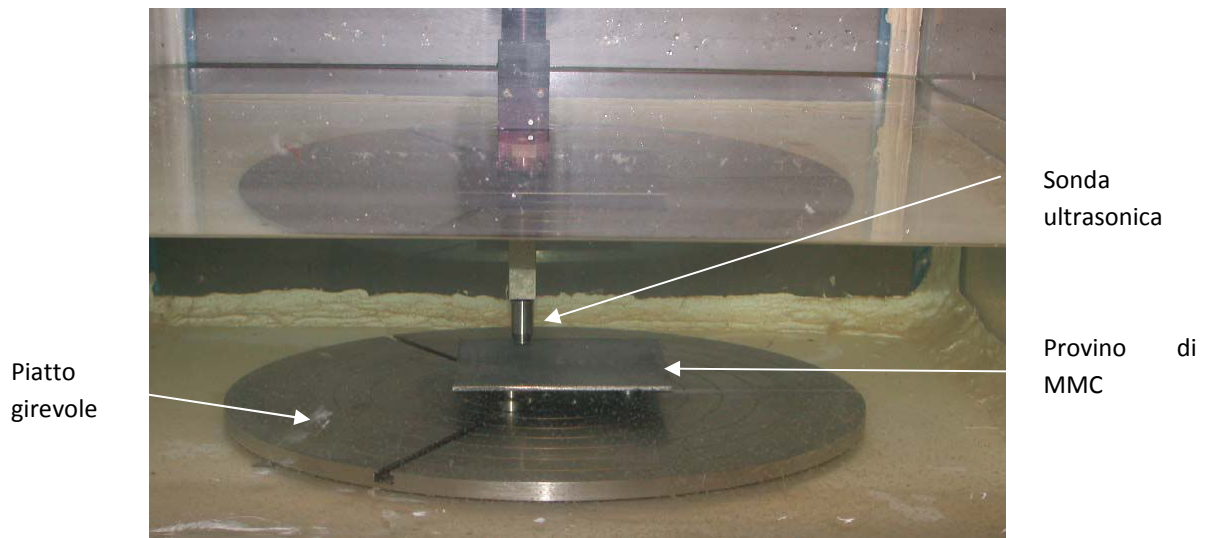


Figura 9 Dettaglio del set up sonda ultrasonica-campione di MMC immersi in acqua (Rosset, 2003)

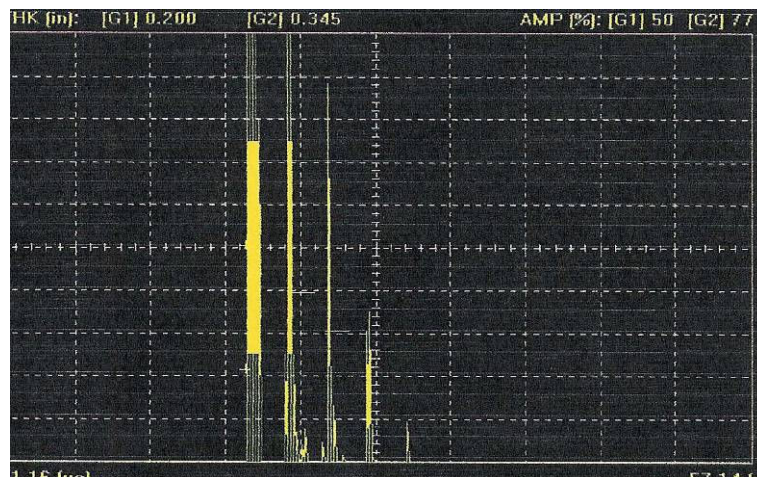


Figura 10 Esempio di echi ultrasonici ottenuti (Rosset, 2003)

Con la Figura 11 si dà un esempio di scansione ultrasonica di tipo C, che mette in evidenza regioni del materiale composito con un segnale di ritorno forte (aree rosse), con un segnale di ritorno debole (aree blu) e notevolmente debole (aree bianche). Nelle aree bianche la percentuale di fibre presenti è minore, costituendo quindi un difetto che la tecnica è in grado di rilevare. Infine la Figura 12 permette apprezzare molto chiaramente la direzione a 45 ° sulla quale giacciono le fibre del materiale composito.

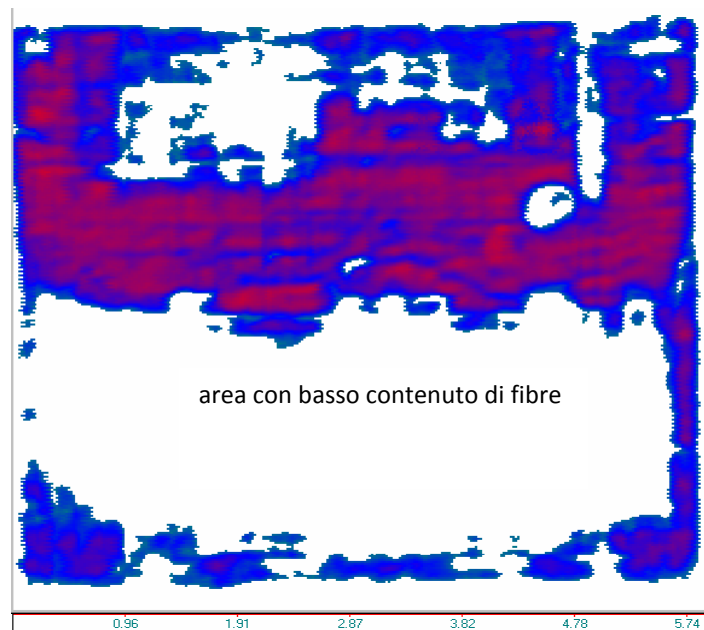


Figura 11 C che evidenzia un'area con basso contenuto di fibre (Rosset, 2003)

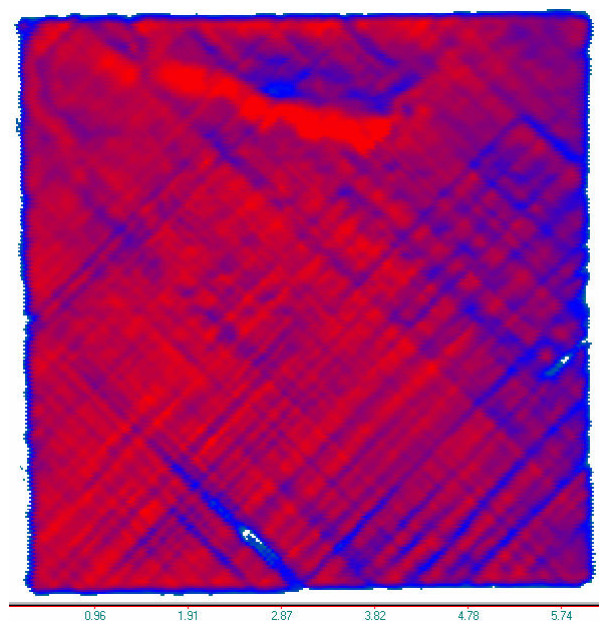


Figura 12 Scansione C che mostra l'allineamento a 45° delle fibre nel composito (Rosset, 2003)

Riegert et al. (2006) analizzano alcune metodologie innovative per l'ispezione mediante tecniche non distruttive di componenti strutturali aeronautici. Tra le tecniche considerate riportano anche alcuni risultati riguardanti l'applicazione di ultrasuoni *air-coupled*, cioè senza l'utilizzo di liquidi accoppianti, che risultano essere efficienti quando in corrispondenza di certi angoli di incidenza si riescono ad eccitare le onde di placca (onde di Lamb). In Figura 13 si mostrano due immagini ricavate mediante prove con ultrasuoni *air-coupled*, per rilevare la presenza di delaminazioni tra un nucleo honeycomb e laminati di polimero rinforzato con fibra di carbonio (CFRP) di un pannello sandwich. Le delaminazioni sono state prodotte artificialmente sulle interfacce a diversa profondità, mediante inserti triangolari di materiale politetrafluoroetilene (PTFE).

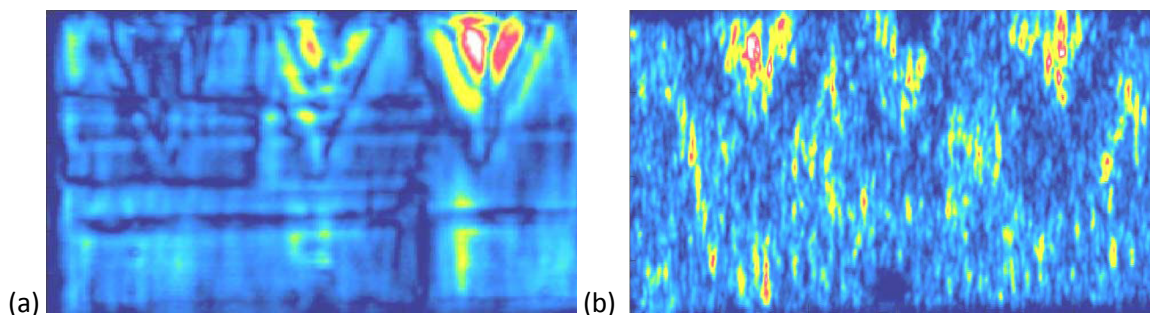


Figura 13 : Immagini di delaminazioni sulle interfacce di un nucleo honeycomb e laminati di materiale CFRP, ottenute con ultrasuoni air copuled (Riegert et al., 2006): (a) delaminazioni del lato anteriore ; (b) delaminazioni del lato posteriore.

5.1.2 Termografia ad infrarossi

Abbiamo già visto che quando un flusso di calore uniforme viene applicato sulla superficie di un componente, si crea un flusso termico attraverso la struttura del componente e che lo schema del flusso termico che ne deriva è alterato dalla presenza dei difetti presenti nella struttura. Le differenze locali di temperatura prodotte sulla superficie esterna del componente, se rilevate, possono dare valide indicazioni sull'entità e localizzazione dei difetti. La termografia ad infrarossi costituisce una tecnica non distruttiva ampiamente utilizzata per il controllo di componenti sandwich, sviluppata soprattutto per i componenti in materiale composito in uso nell'industria aeronautica, anche se sono stati realizzati veramente pochi lavori nel campo dei materiali MMC (Huang et al., 2000).

Quin e Bao (1996) valutano la risoluzione delle ispezioni termografiche per il controllo di difetti artificiali quali scollamenti e delaminazioni in strutture honeycomb incollate a pannelli esterni. In Figura 14 si riporta uno schema del sistema usato durante il lavoro sperimentale, nel quale un flusso di aria calda può scaldare la superficie posteriore di un componente sandwich, evidenziando zone con alta e bassa (difetto) conduzione di calore, registrabili per mezzo di una camera a infrarosso che permette la rilevazione di immagini ogni 1/30 s e con risoluzione delle lenti microscopiche sino a 250 μm . La Figura 15 presenta un'immagine termografica della superficie anteriore di un pannello sandwich fabbricato con nucleo honeycomb in alluminio e pelli in resina rinforzate con fibra di vetro. I due spot scuri sono attribuibili ad un difetto di adesione tra i due materiali. Infine in Figura 16 è possibile riscontrare l'immagine di difetti di delaminazione di forma quadrata, triangolare e circolare creati artificialmente in un materiale composito costruito mediante strati di materiali diversi.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

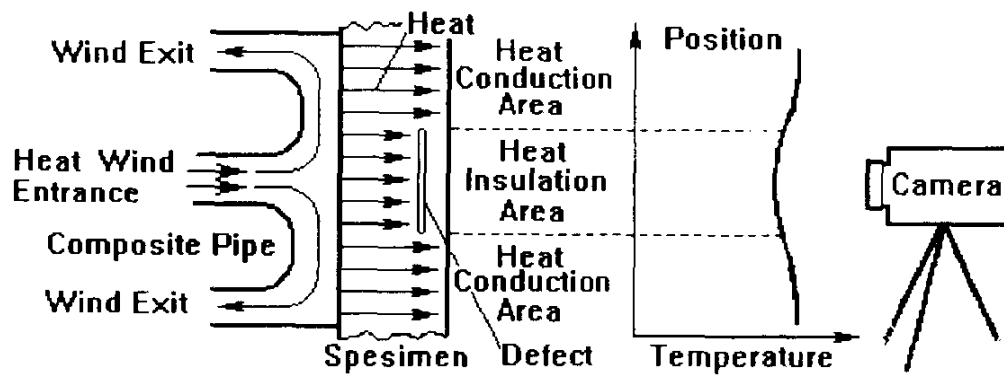


Figura 14 Sistema sperimentale per ispezioni termografiche di difetti in pannelli sandwich impiegato da Quin e Bao (1996).

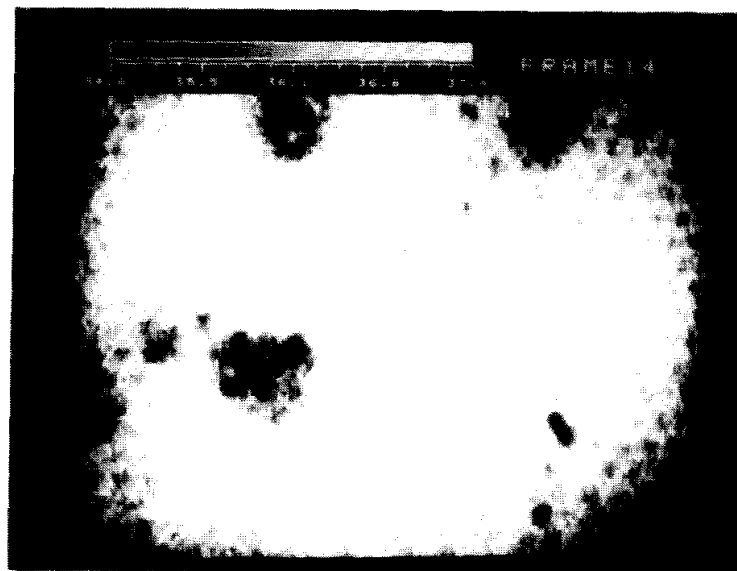


Figura 15 Immagini termografica di difetti di adesione (spot oscuri) in un pannello sandwich nucleo honeycomb in Al/pelli esterne in resina con fibra di carbonio (Quin e Bao, 1996).

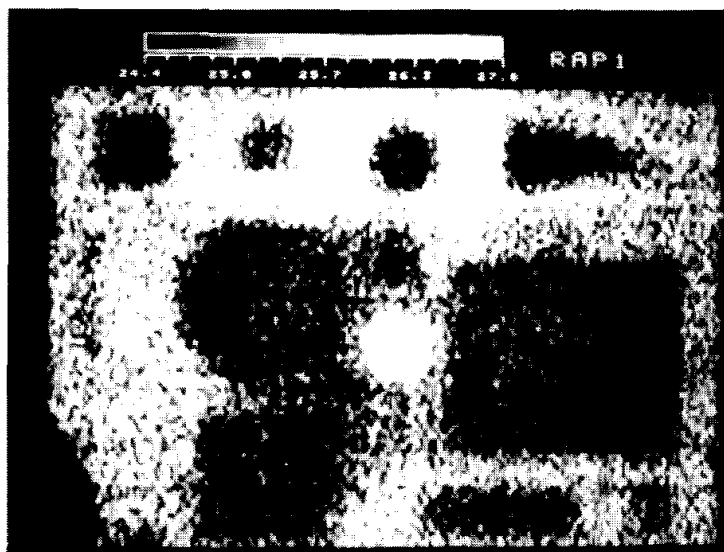


Figura 16 Immagine termografica di difetti di delaminazioni artificiali con forme diverse, in un materiale composito fabbricato mediante strati di diversi materiali (Quin e Bao, 1996).

Un lavoro per valutare l'abilità delle tecniche di immagine termografiche nel registrare difetti sub superficiali creati ad hoc in quattro materiali compositi di diversa matrice si deve a Roth et al. (1997). I difetti sono rappresentati da fori con fondo piano di diametro variabile che va da 1 a 13 mm e posti a profondità diverse, comprese tra 0,1 e 2,5 mm ricavate all'interno di materiali con spessore di circa 2-3 mm. Lo strumento di controllo non distruttivo prevede un sistema ottico di scansione a specchio, lenti infrarosse di focalizzazione, un rilevatore infrarosso di tellurio mercurio-cadmio per ottenere immagini infrarosse con alta risoluzione e lampade al xenon con flash di alta intensità posizionate sullo stesso lato della camera a infrarosso. Il materiale composito a matrice metallica scelto era in lega di titanio con fibre in carburo di silicio (MMC SiC/Ti), il quale fu adeguatamente ricoperto di una vernice nera, possedendo una superficie lucente argentata con bassa emittanza. Le immagini furono acquisite con intervalli di 70-150 ms, mediante le quali gli autori furono in grado di definire le soglie di rilevamento sulla base di profondità e diametri dei fori per ognuno dei materiali studiati. Le immagini termografiche di Figura 17 mostrano i difetti di un campione di MMC SiC/Ti rilevate dopo diversi tempi t dal riscaldamento con flash. Un confronto con immagini radiografiche a raggi X e ultrasoniche, ottenute nel corso dello stesso lavoro sperimentale, evidenzia che la tecnica a raggi X è quella che dà i migliori risultati, in grado di rilevare efficacemente anche i fori piccoli e a profondità maggiori. Inoltre è stato stabilito che: a) il tempo necessario affinché un difetto appaia è proporzionale al quadrato della profondità; b) la perdita di contrasto termico, cioè la differenza rilevata di temperatura tra area del difetto e regione sana, è proporzionale al cubo della profondità.

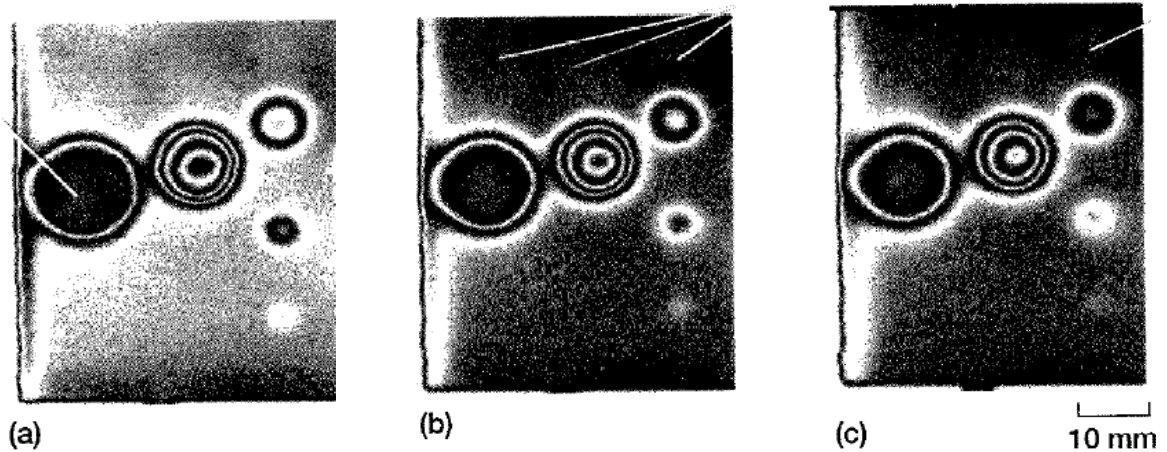


Figura 17 Immagine termografica di un campione MMC SiC/Ti che mostra i difetti dopo diversi tempi t dal riscaldamento con flash: a) $t = 270$ ms; b) $t = 450$ ms; c) $t = 630$ ms. (Roth et al., 1997).

L'analisi della fase di un segnale rilevato mediante tecniche di termografia lockin può evidenziare anche un eventuale allentamento dei bulloni delle viti che tengono unite due placche metalliche di strutture aeronautiche (Wu et al., 1998), mettendo in relazione il valore di picco della fase del segnale con il valore della coppia in Nm usato per stringere il bullone sulla vite (Figura 18). La stessa tecnica di termografia lockin, ma con una sorgente ultrasonica al posto della lampada termica, permette poi di studiare difetti quali la presenza di zone corrosive nei materiali, come nel caso del componente aeronautico in alluminio di Figura 19.

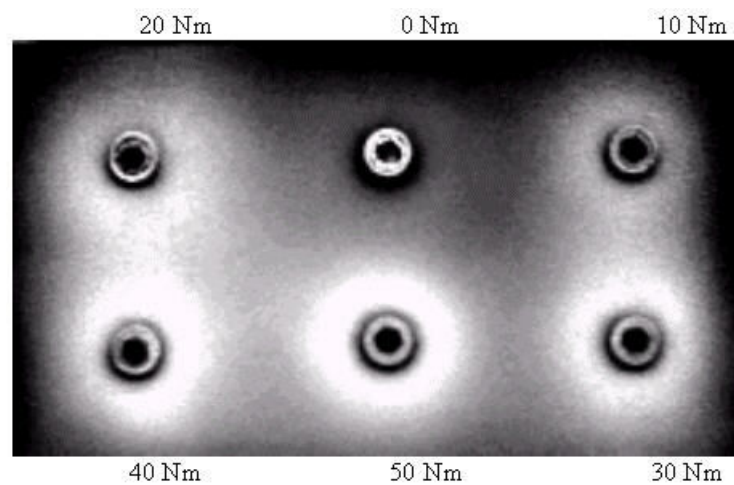


Figura 18 Immagine della fase termografica lockin ricavata su unioni mediante vite bullone di placche metalliche, strette tra loro con diverse coppie in Nm (Wu et al., 1998).

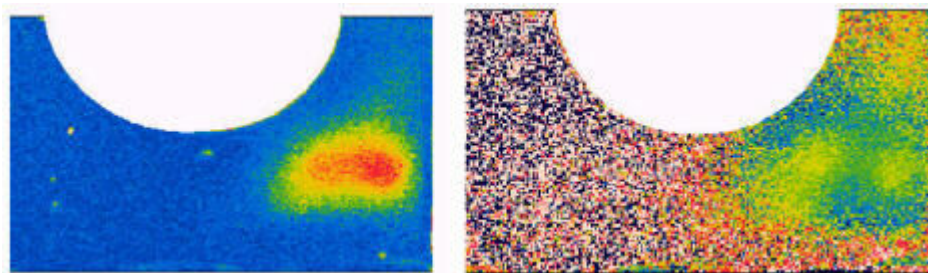


Figura 19 Immagini mediante termografia lockin che evidenziano la presenza di una regione corrosa (spot brillanti) in un componente aeronautico in Al (Wu et al., 1998).

Dattoma et al. (2001) caratterizzano termograficamente tre diversi tipi di difetti, quali presenza eccessiva di colla, presenza di acqua e scollamento in un pannello sandwich costruito con nucleo in schiuma di cloruro di polivinile (PVC) e pelli in plastica rinforzata con fibre di vetro. Successivamente studiano la presenza di questi difetti in una pala di una turbina eolica realizzata con lo stesso materiale, ottenendo dei buoni risultati mediante l'analisi del segnale registrato, durante la fase di raffreddamento del materiale, da uno scanner termografico. La sorgente di riscaldamento e lo scanner vengono posizionati nello stesso lato (anteriore) del materiale. In Figura 20 si mostra un termogramma dopo 1 min dall'inizio del raffreddamento che evidenzia la presenza di scollamento nella regione destra, area che presenta una conduzione di calore minore e quindi una temperatura superficiale più alta. Nella regione di sinistra invece risalta la presenza di slot di 1 mm di spessore, presenti a scacchiera nella schiuma di PVC (struttura di una *schiuma scored*) in maniera da ottenere le superfici curve della pala.

Prove non distruttive mediante termografia pulsata in modo riflessione e lockin sono state eseguite da Meola et al. (2004), per valutare difetti di adesione in campioni di pannelli per strutture aeronautiche fabbricati con diversi tipi di materiali. I risultati dello studio dimostrano che sia la tecnica della termografia pulsata che quella lockin sono adatte per visualizzare la presenza di disomogeneità nei materiali, ma anche scollamenti e delaminazioni, difetti e presenza di corpi estranei nelle strutture sandwich. Inoltre gli autori confermano che la metodologia lockin è capace di valutare sia gli effetti dello spessore dell'adesivo che quelli indotti da trattamenti sub superficiali dei materiali. La Figura 21 presenta l'immagine della fase termografica emessa dalla pelle di un campione di pannello sandwich costruito con nucleo honeycomb in materiale NOMEX® e pelli in materiale plastico rinforzato con fibre di carbonio (CFRP).

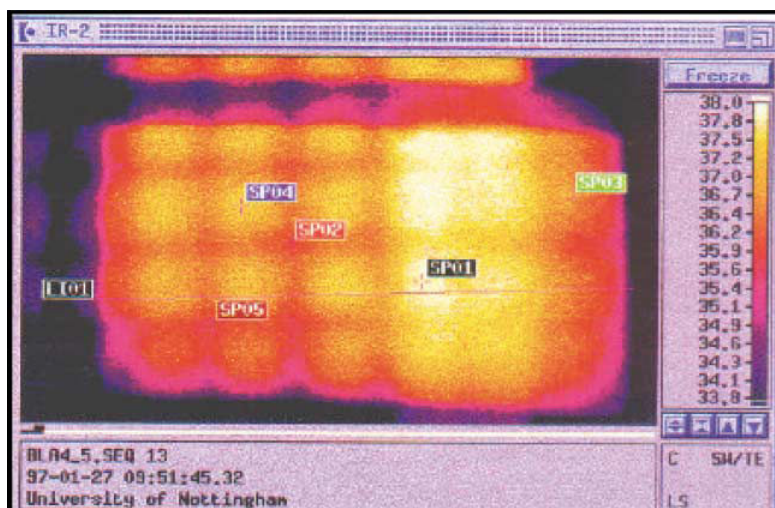


Figura 20 Termogramma di una regione di una pala di turbina eolica che evidenzia la presenza di struttura tipo schiuma scored (a sinistra) e di scollamento (a destra) (Dattoma et al., 2001).

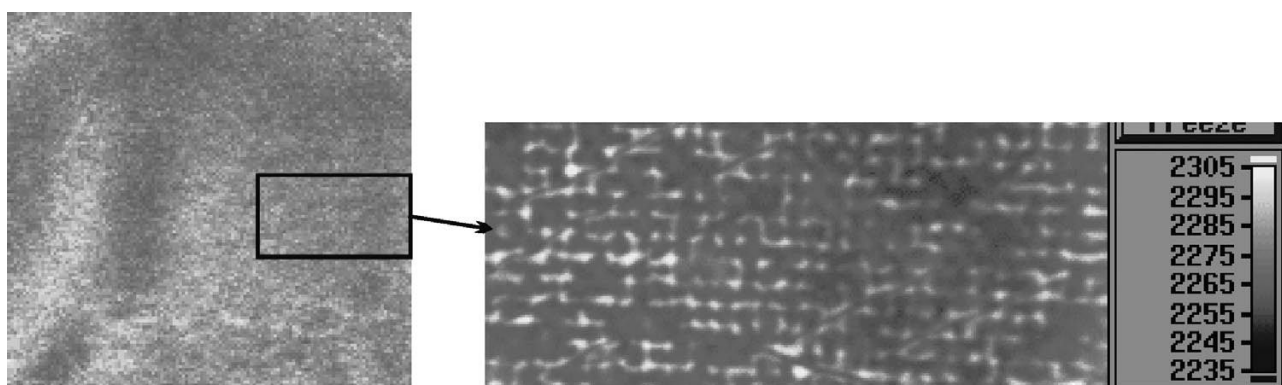


Figura 21 Immagine della fase termografica della pelle di un campione di pannello sandwich costruito con nucleo honeycomb in materiale NOMEX® e pelli in CFRP (Meola et al., 2001).

Nella figura di sinistra è possibile apprezzare la differenza tra aree scure dovute ad eccesso di materiale adesivo ed aree chiare prodotte da delaminazioni. L'immagine di destra, ottenuta con una risoluzione spaziale di 4,5 pixel/mm, ingrandisce una regione del campione, visualizzandone perfettamente la struttura cellulare a nido d'ape (honeycomb). In questo caso le regioni scure rappresentano celle riempite di adesivo, mentre quelle chiare indicano celle fratturate. Infine in Figura 22 si presenta una immagine di fase molto nitida rilevata ad una frequenza maggiore di 0,47 HZ che mette in evidenza le stesse celle fratturate (circolo 1) e la presenza di inclusioni (circolo 2).

Riegert et al. (2006), ispezionando con prove NDT componenti strutturali aeronautici, riportano alcuni risultati interessanti per il rilevamento di vari difetti. La Figura 23a mostra un'immagine ricavata con tecnica di termografia lockin e generazione del calore con metodi ottici OLT (*lockin-thermography with optical excitation*) di un area di una fusoliera di un aereo Airbus 340 con presenza di rivetti, mentre la Figura 23b mostra la stessa aerea scansionata mediante termografia lockin e generazione del calore con metodi ultrasonici ULT (*ultrasound-lockin-thermography*). In quest'ultima figura è possibile apprezzare la qualità dei rivetti, mediante la differenza di colore

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

che i rivetti allentati (colore brillante) hanno rispetto dei rivetti che non lo sono, situazione da attribuire al riscaldamento per frizione in prossimità dei rivetti allentati.

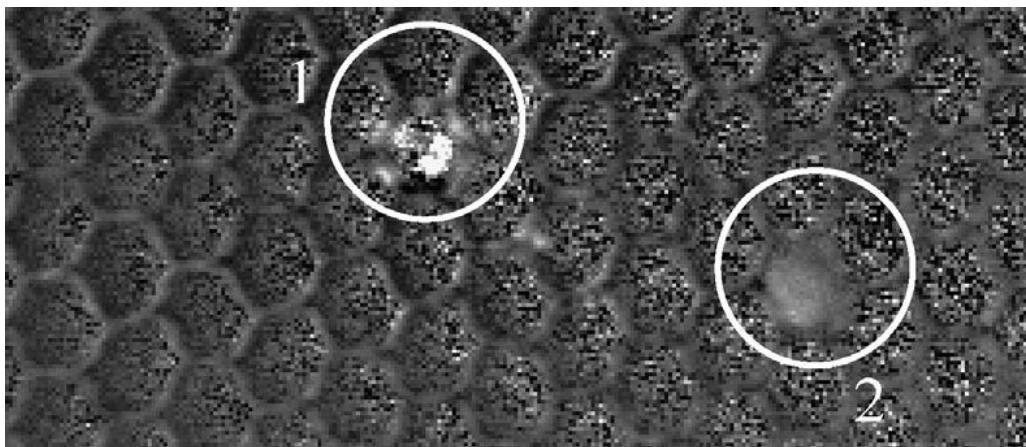


Figura 22 Immagine di fase termografica a 0,47 Hz del campione di pannello con nucleo honeycomb in materiale NOMEX® che mette in evidenza celle fratturate (circolo 1) e presenza di inclusioni (circolo 2) (Meola et al., 2001).

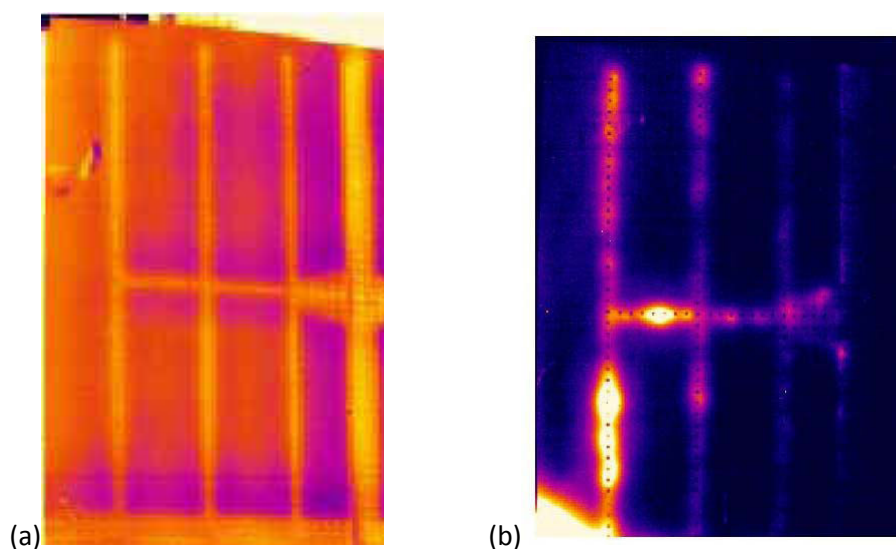


Figura 23 Immagini di un'area rivettata di una fusoliera di un aereo Airbus 340 ricavate con: (a) tecnica di termografia lockin e generazione del calore con metodi ottici OLT (lockin-thermography with optical excitation); (b) termografia lockin e generazione del calore con metodi ultrasonici ULT (*ultrasound-lockin-thermography*). La tecnica di fig.(b) rileva i rivetti allentati, identificabili mediante un colore più brillante (Riegert et al., 2006).

La Figura 24a e la Figura 24b presentano delle scansioni con metodo termografico ULT di un flap aereo di atterraggio costruito con materiale plastico rinforzato con fibra di carbonio (CFRP) realizzate per identificare l'eventuale presenza di fibre scollate. L'immagine di fase con eccitazione a frequenza costante di 20 kHz è quella di Figura 24a che risulta poco chiara, mentre la Figura 24b si riferisce alle stesse misure ma effettuate con una frequenza modulata tra 15 e 25 kHz, tecnica che elimina le onde statiche e permette una più chiara visualizzazione della rottura del rinforzo.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

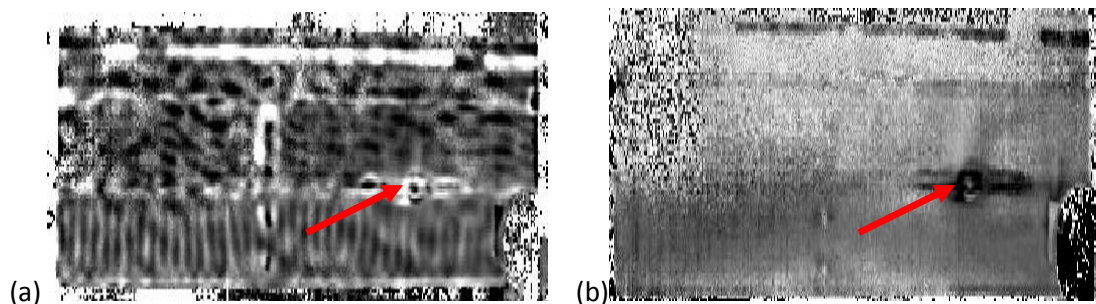


Figura 24 Immagini di fase in un flap d'atterraggio ottenute con tecnica di termografia lockin e generazione del calore con metodi ultrasonici ULT: (a) immagine di fase con eccitazione a frequenza costante di 20 kHz; (b) immagine di fase con eccitazione modulata tra 15 e 25 kHz che mostra chiaramente la rottura della fibra (Riegert et al., 2006).

In Figura 25a e Figura 25b gli stessi Riegert et al. (2006) mostrano invece delle immagini ricavate con tecnica di termografia OLT per rilevare la presenza di delaminazioni artificiali a forma triangolare. Le immagini sono state ottenute in un pannello sandwich con un nucleo honeycomb e laminati di polimero rinforzato con fibra di carbonio (CFRP) e la delaminazione triangolare era stata mostrata anteriormente nella sezione sugli ultrasuoni.

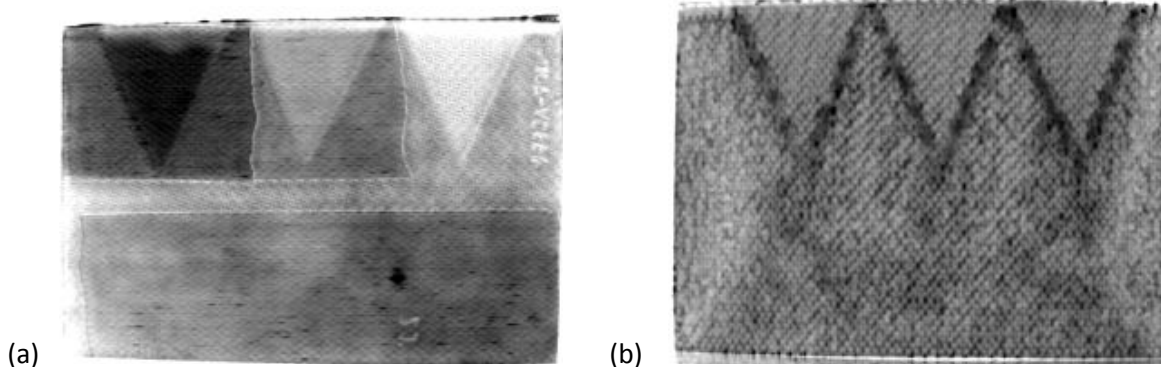


Figura 25 Immagini di delaminazioni sulle interfacce di un nucleo honeycomb e laminati di materiale CFRP, ottenute con prove di termografia OLT: (a) delaminazioni del lato anteriore ; (b) delaminazioni del lato posteriore (Riegert et al., 2006).

Un altro lavoro per l'ispezione non distruttiva con la tecnica della termografia lockin di materiali e strutture impiegati dall'industria aeronautica si deve a Meola et al. (2006). L'attività sperimentale interessa in particolare cinque campioni di una vasta gamma di materiali comprendente compositi, compositi ibridi (laminati metallici rinforzati con fibre), metalli e pannelli sandwich e mira alla determinazione dei difetti più comuni quali delaminazioni, danni da impatto e per fatica. Il test consiste nello stimolare termicamente la superficie del singolo campione, mediante un flusso di calore sinusoidale prodotto da una lampada al quarzo di 1 kW e nell'acquisire delle immagini con una camera a infrarosso di frequenza d'onda compresa tra i 3,75 Hz e i 0,0037 Hz. Inizialmente viene impiegata un frequenza alta per la determinazione dei difetti superficiali o poco profondi, successivamente la frequenza viene man mano diminuita con il proposito di rivelare i difetti a profondità maggiori. La Figura 26 mostra le immagini di fase di un campione CarbStep con profilo a gradini e con spessore inferiore ai 2 mm, costruito con strati di resina impregnata di carbonio, all'interno del quale sono stati inseriti degli inserti di teflon provvisti di

difetti artificiali. I difetti sono visibili quando viene diminuita la frequenza d'onda della termocamera, condizione che permette apprezzare anche la forma del difetto.

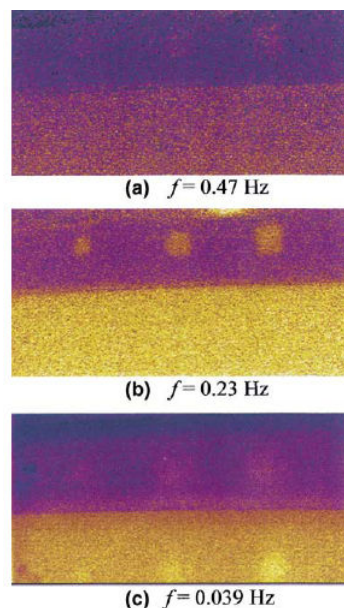


Figura 26 Immagine di fase termografica di difetti in un campione di materiale CarbStep a diverse frequenze: (a) 0,47 Hz; (b) 0,23 Hz; (c) 0,039 Hz (Meola et al., 2001).

La Figura 27 invece si riferisce al campione realizzato con il composito ibrido GLARE®, materiale innovativo costituito da diversi laminati di alluminio con interposizione di strati epossidici con fibre di vetro. Il campione viene forato ricavando un foro di diametro pari a 8 mm e poi caricato meccanicamente con due modalità diverse, con e senza dei vincoli laterali che sostengono il campione durante il carico. In assenza dei vincoli laterali (Figura 27a), le misure termografiche mettono in evidenza l'esistenza nella regione superiore del campione di un arco scuro 1 seguito da un arco chiaro 2, come indicato dalle due frecce. I due archi indicano che è avvenuta la delaminazione delle superfici di alluminio e lo spostamento delle fibre di vetro. In presenza dei vincoli laterali (Figura 27b) si osserva una maggiore elongazione del foro, frutto del maggior carico che il campione è in grado di sopportare con questi supporti. Il trasferimento del carico ai vincoli laterali crea la formazione di altri archi scuri e leggeri visibili nella stessa Figura 27.

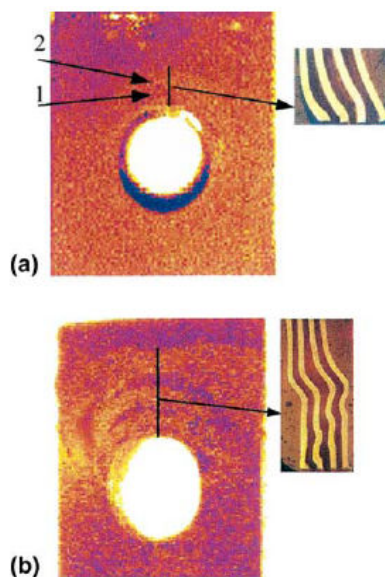


Figura 27 Immagine di fase termografica a 0,039 Hz e micrografie (riquadri piccoli) delle sezioni indicate con linee verticali, in un campione di composito ibrido GLARE® sottoposto a carico: (a) campione caricato senza vincoli laterali; (b) campione caricato con vincoli laterali (Meola et al., 2001).

5.1.3 Emissione acustica

Huang et al (2000) osservano che l'emissione acustica è molto sensibile nel registrare le lunghezze incrementali di fratture nei materiali fragili con alte velocità di fatturazione, mentre è piuttosto insensibile per i più grandi aumenti di fatturazione nei materiali molto duttili con basse velocità di fatturazione.

5.1.4 Correnti parassite

Nel caso dei materiali compositi con matrice metallica la risposta alle correnti parassite dipende dalla densità del materiale e dalla frazione in volume del rinforzo. Per questa ragione la tecnica è stata sviluppata per determinare la frazione volumetrica nei MMC, associando un concetto micromeccanico alle misure di conducibilità elettrica anisotropica. Infatti viene messa in relazione la conducibilità elettrica misurata con quella prevista teoricamente ed in questo modo può essere calcolata la frazione volumetrica del rinforzo. Giacché poi la tecnica con correnti parassite è sensibile alle irregolarità superficiali del materiale, risulta essere molto efficace nel determinare le variazioni di densità vicino alle superfici. Inoltre è efficiente anche per identificare caratteristiche chimiche e dimensioni delle polveri leganti della matrice e per stimare il volume totale del rinforzo e del composto intermetallico che viene a formarsi durante il processo di produzione.

Altre applicazioni riguardano in particolare i componenti strutturali aeronautici come nel caso delle ispezioni di unioni rivettate. Un lavoro interessante a tal proposito è stato sviluppato per conto della FAA (Federal Aviation Administration) negli USA (Spencer, 1998) con l'obiettivo di valutare le capacità d'ispezione di alcune strumentazioni commerciali. Il lavoro sperimentale prevede la valutazione di fratture artificiali su unioni rivettate con lunghezze delle fratture di 0,1, 0,15 e 0,2 mm, stabilendo i valori di soglia determinabili da ciascuna strumentazione. Le fratture sui rivetti in alluminio rappresentano dei difetti dovuti a fatica del materiale e la loro o meno rivelazione, mediante le prove non distruttive con correnti parassite, permette costruire le cosiddette curve *PoD* (*probability of detection*) dello strumento (Figura 28). Le due curve tracciano

dati sperimentali ottenuti in corrispondenza di due diverse regolazioni dello strumento, quella di sinistra con un setup per fratture di 0,2 mm (0.080 in) e quello di destra per fratture di 0,15 mm (0.060 in).

5.1.5 Radiografia a raggi X e tomografia computerizzata

Nello studio dei compositi si utilizzano diverse particelle e raggi penetranti, basando l'osservazione sui diversi assorbimenti che si hanno da parte dei materiali attraversati. Tra questi ricordiamo i neutroni, i raggi gamma ed i raggi X. A causa delle variazioni di spessore o delle differenze delle caratteristiche di assorbimento generate da cambi di composizione del materiale, le diverse parti di un componente materiale assorbono quantità diverse di radiazione. La radiazione che non viene assorbita può essere registrata su una pellicola, vista su uno schermo fluorescente o monitorata con un rivelatore di radiazione. Per quanto riguarda invece la tecnica delle tomografia computerizzata (CT), questa opera combinando le capacità di un computer con le tecniche tradizionali della radiazione a raggi X. Infatti i difetti vengono rilevati ruotando l'oggetto rispetto alla sorgente radioattiva ed a un gruppo di rivelatori. La sorgente consiste o di un isotopo (iridio 192 o cobalto 60) che emette raggi gamma o di un tubo a raggi X di alta intensità. I rivelatori di radiazione raccolgono i dati provenienti dall'oggetto da diverse posizioni angolari e li trasmettono ad un computer dove vengono trasformati in una mappa bidimensionale della densità della sezione trasversale considerata. Raccogliendo delle scansioni multiple dell'oggetto, il computer è in grado di ricostruire mediante un software un quadro tridimensionale di questo oggetto.

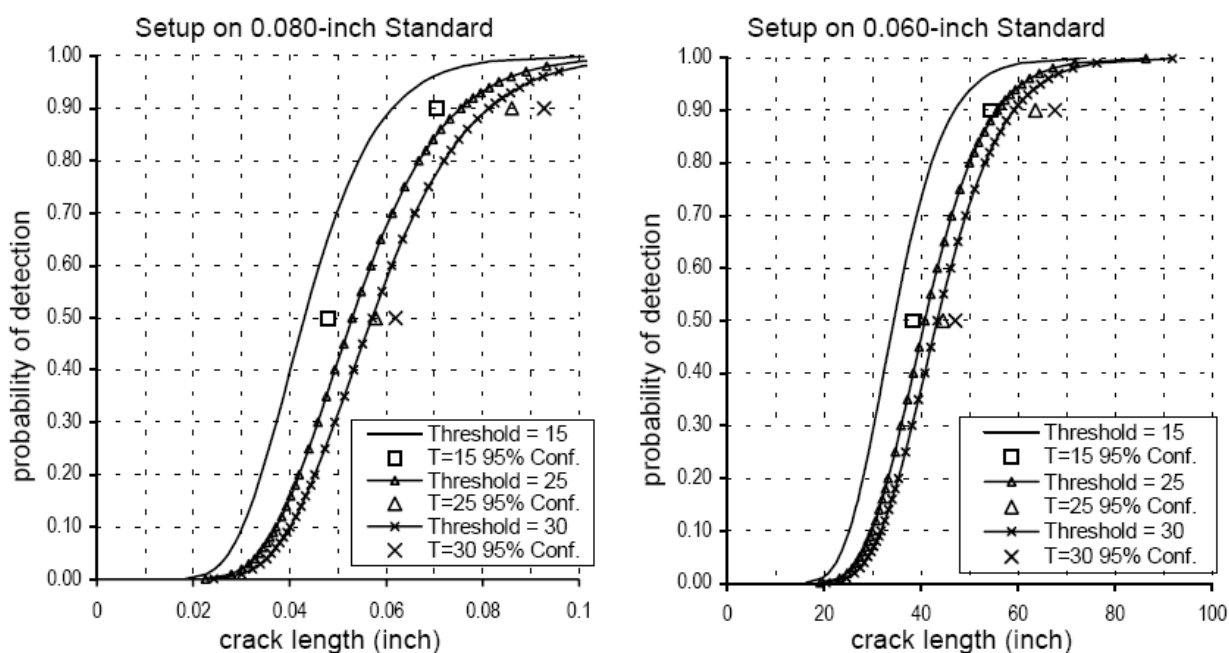


Figura 28 Curve PoD (probability of detection) di uno strumento commerciale NDT a correnti parassite per rilevare, su rivetti di strutture aeronautiche, fratture dovute a fatica. Strumento regolato per fratture rispettivamente di lunghezza 0.080 in (=0,20 mm - curva di sinistra) e 0.060 in (=0,15 mm- curva di destra), Spencer (2006).

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

Applicazioni della radiografia a raggi X sono state realizzate per valutare la densità di compositi, per osservare imperfezioni come rottura di fibre e vuoti e per analizzare spostamenti ed orientazioni delle fibre.

Buffière et al. (1999) valutano in situ, mediante tomografia computerizzata a raggi X ad alta risoluzione, l'inizio e lo sviluppo di difetti all'interno di un campione di materiale MMC sottoposto a un carico di trazione. Il materiale composito ha una matrice di alluminio ed è rinforzato con particelle di carburo di silicio di dimensione media attorno ai 150 μm . I raggi X vengono prodotti da un sincrotrone situato a una distanza di circa 150 m dal campione e poi diretti su quest'ultimo al quale è permesso di girare su se stesso. In questo modo vengono registrate 600 immagini bidimensionali dell'oggetto per 600 rotazioni con le quali vengono ricostruiti al computer i volumi del campione. La tecnica permette di osservare la struttura iniziale del materiale (Figura 29a), la rottura delle particelle del rinforzo (Figura 29b) e di attribuire alla stessa l'origine della deformazione plastica del materiale composito.

Huang et al. (2000) riportano che la CT ed in particolare la tecnica μCT , cioè una tomografia computerizzata con micro focalizzazione, permette visualizzare difetti fino a dimensione di 25 μm e registrare distribuzioni eterogenee di particelle e porosità a scala mesoscopica, che dovrebbe equivalere alla dimensione del rinforzo per i MMC (a quella delle celle nel caso si trattasse invece di schiume metalliche). Inoltre mediante questa tecnica è possibile apprezzare la presenza di delaminazioni, fratture di particelle e presenza di fratture nelle matrici.

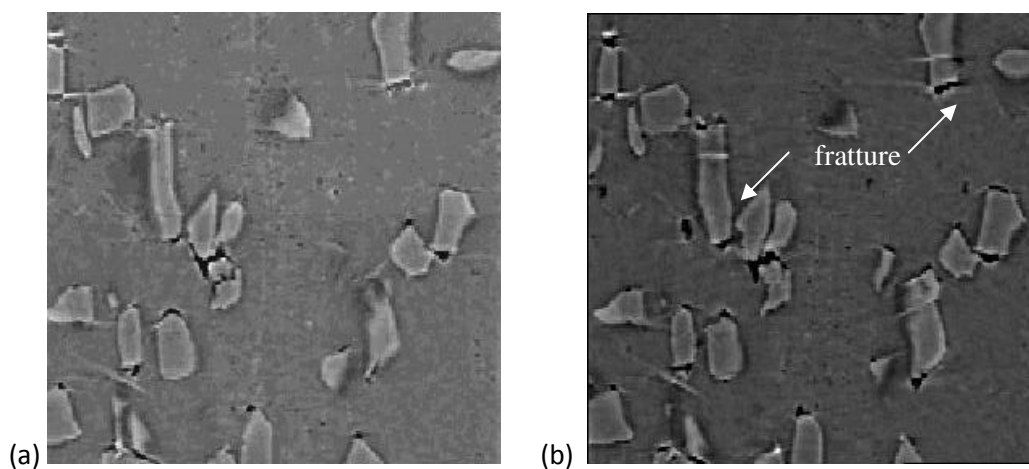


Figura 29 Immagini ricostruite di un campione di materiale composito con matrice di Al e fibre di SiC: (a) allo stato iniziale; (b) sotto carico (Buffière et al., 1999).

Esperimenti per caratterizzare microstrutture e danni su diversi materiali sono state sviluppati da Maire et al. (2001) i quali ricorrono al sincrotrone ESRF installato a Grenoble in Francia per disporre di fasci a raggi X con alta risoluzione ed energia compresa tra i 23 e i 33 keV. La strumentazione viene completata con un sistema meccanico che permette di caricare a trazione i provini in esame. La Figura 30 presenta un'immagine tomografica a raggi X ricostruita di un composito con matrice in alluminio e rinforzato con sfere di zirconio/silice. In Figura 31 viene evidenziata la presenza di difetti cresciuti in prossimità degli spazi vuoti creati da sfere di rinforzo staccatesi dalla matrice metallica.

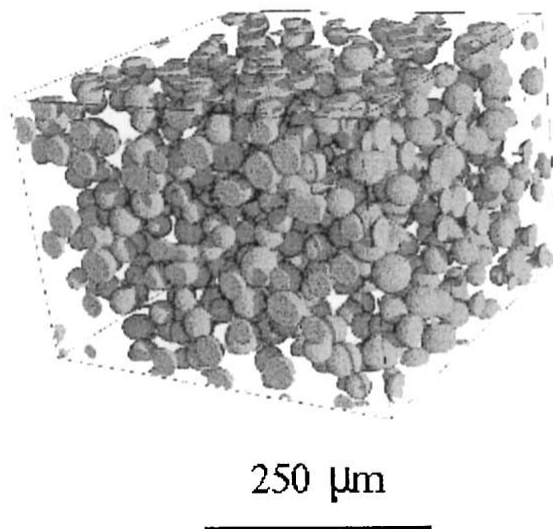


Figura 30 Immagine tomografica a raggi X 3D ricostruita in un composito con matrice di Al rinforzato con sfere di zirconio/silice, dopo aver rimosso il materiale della matrice (Maire et al., 2001).

Muller et al. (2006) applicano invece tecniche di topografia per rifrazione a raggi X che si basa sulla dispersione ad angoli ultra piccoli (*Ultra Small Angle Scattering-USAXS*) dei raggi X incidenti su elementi microstrutturali quali fratture, pori, particelle, limiti di fase, ecc. Siccome la lunghezza d'onda dei raggi X è inferiore a 0.1 nm, la dispersione della luce quindi è sensibile alle superfici interne ed interfacce con dimensioni attorno ai nanometri. Per analizzare i difetti nei materiali MMC gli autori dispongono di un convenzionale tubo a raggi X fine focus.

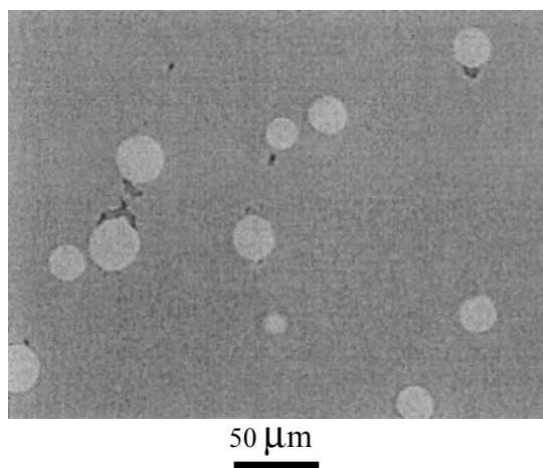


Figura 31 Immagine tomografica a raggi X ricostruita in un composito con matrice di Al e rinforzato con sfere di zirconio/silice che evidenzia la presenza di grossi buchi (Maire et al., 2001).

Successivamente però potenziano la tecnica usando un tomografo computerizzato 3D a rifrazione (Figura 32) con energia radioattiva, compresa tra i 5 e i 60 keV, prodotta da un sincrotrone e con risoluzioni dell'ordine dei nanometri. Per applicare la metodologia di topografia a rifrazione scelgono un campione di un composito con matrice in lega di titanio e rinforzato con fibre di carbonio, materiale innovativo e utilizzato per la costruzione di compressori leggeri dei motori aeronautici. Il lavoro viene realizzato con lo scopo di determinare se fratture e rotture di fibre, conseguenti all'applicazione di un carico di prova a trazione, sono di tipo localizzato o risultano

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

distribuite omogeneamente sull'intero campione in esame. La Figura 33 riporta due immagini ottenute dal tomografo rispettivamente, con tubo a raggi X di 100 kV quella di sinistra e con sincrotrone da 50 keV quella di destra.

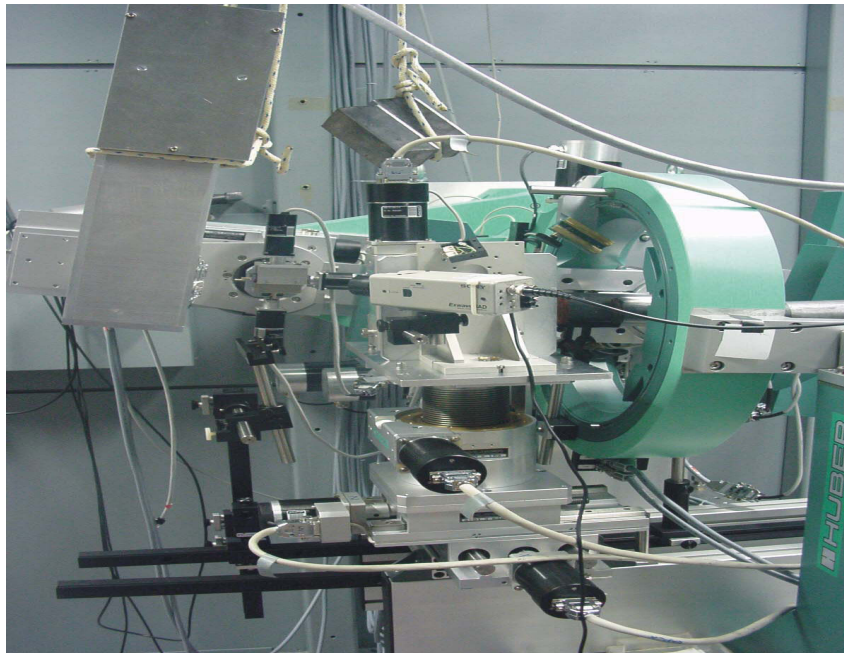


Figura 32 Tomografo computerizzato 3D a rifrazione con energia da sincrotrone del BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) di Berlino (Muller et al., 2006).

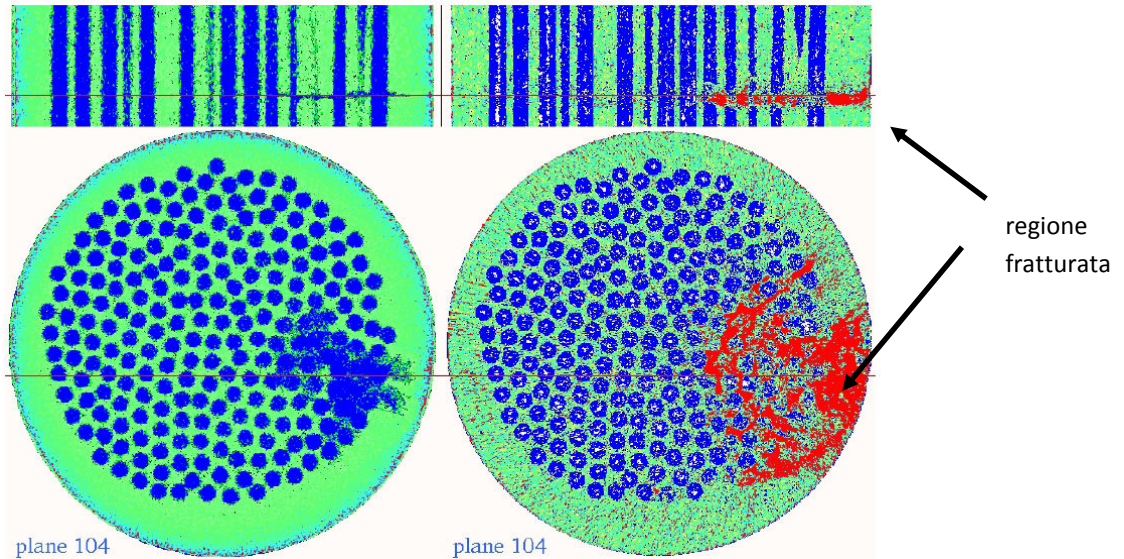


Figura 33 Sezioni trasversali di un materiale MMC, ottenute mediante scansione con tomografia computerizzata 3D a rifrazione, che mostrano la posizione delle fibre di rinforzo e rivelano una regione con fibre fratturate. Immagine di sinistra ottenuta con tubo a raggi X, immagine di destra mediante sincrotrone (Muller et al., 2006).

Entrambe le immagini rivelano la presenza di fratture ma la scansione che usa l'energia del sincrotrone permette ricostruire un'immagine più nitida, capace di rilevare inoltre lo scollamento di alcune fibre che sono identificabili mediante la presenza di anelli circostanti colorati di rosso.

5.2 Applicazioni per il controllo NDT di componenti sandwich realizzati con schiume metalliche

È proprio John Banhart dell'IFAM (Fraunhofer-Institute für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung) di Brema che nel 2000 pubblica uno studio interessante (Banhart, 2000) che prende in esame, tra l'altro, le tecniche NDT per caratterizzare le schiume metalliche. L'autore analizza solamente le tecniche impiegate fino a quel momento e quelle per le quali si prevedeva un uso in questa direzione. Vista la completezza del documento, si riportano qui di seguito alcune delle indicazioni date dall'autore in merito a questo argomento che saranno inoltre completate con altri lavori reperiti nella letteratura scientifica.

5.2.1 Radiografia a raggi X

Banhart (2000) ricorda innanzitutto che se un fascio radioattivo attraversa un materiale metallico cellulare, l'attenuazione che ne viene misurata costituisce un segnale integrato su tutto il materiale interessato, quindi l'attenuazione stessa è da mettere in relazione con la massa totale di una colonna di materiale attraversato. Aggiunge che se si considerano degli strati di schiuma con spessore dell'ordine del diametro medio dei pori, è possibile allora determinare i singoli pori e procedere ad un mapping della reale morfologia dei pori. Se invece gli strati fossero più spessi allora non sarebbe possibile rilevare i singoli pori, neanche i pori grandi o pori con dimensione pari al 25% dello spessore dello strato di schiuma. In Figura 34 si riporta un'immagine fornita da Banhart per una schiuma di piombo (strato di spessore 6 mm ed area 60x20 mm²) dove si osservano alcuni pori di grandi dimensioni, mentre quelli di dimensione minore non sono visibili a causa della sovrapposizione delle immagini dei pori.

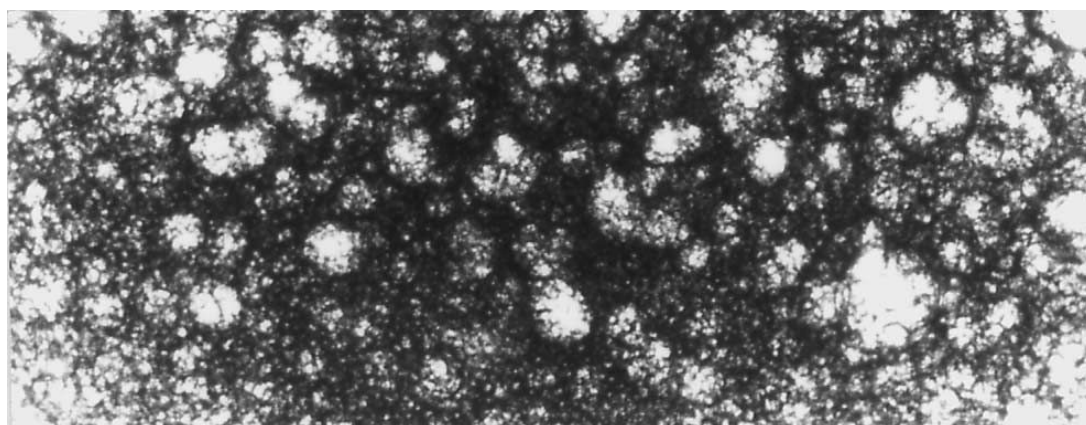


Figura 34 Immagine di una schiuma di piombo ottenuta con tecniche di radiografia a raggi X che mostra grandi pori provocati dall'agglomerazione dell'agente schiumogeno del precursore. Fetta di spessore 6 mm ed area 60x20 mm² (Banhart, 2000).

L'autore conclude osservando che mediante radioscopio con sincrotrone è possibile analizzare campioni di spessore fino a 10 mm.

Helfen et al. (2000) e Banhart et al. (2001) pubblicano alcuni risultati ottenuti da un gruppo di ricerca facente capo a due istituti Fraunhofer tedeschi, l'IZFP di Dresda e l'IFAM di Brema, che assieme al centro ESRF di Grenoble sviluppano dei sistemi di radiografia e tomografia

computerizzata con alte capacità. I ricercatori usano delle tecniche di radiografia a raggi X con contrasto di fase per migliorare le osservazioni di materiali con basso coefficiente di assorbimento delle radiazioni, campioni costituiti da materiali diversi ma con coefficienti di assorbimento simili ed oggetti molto sottili. Questa tecnica sfrutta le caratteristiche d'onda dei raggi X ed in particolare i modelli d'interferenza prodotti dalla diffrazione di Fresnel. La radiazione radioattiva incidente possiede un'alta coerenza spaziale che può essere data sia da sorgenti quali i tubi a raggi X micro focus che dai sincrotroni di terza generazione. Con il ricorso a questi sistemi sperimentali cominciano ad essere obsolete le osservazioni tipo *ex-situ* dei processi di produzione delle schiume metalliche, cioè quelle che vengono effettuate interrompendo il processo in un determinato istante e portando in laboratorio un campione del materiale. I sistemi a raggi X permettono di eseguire analisi in tempo reale direttamente *in situ*, permettendo quindi misure più vicine alla realtà di volumi, densità, strutture o di altre proprietà fisiche delle schiume. La Figura 35 traccia uno schema del set up sperimentale impiegato da Banhart et al. (2001) per osservare l'evolversi della struttura interna di una schiuma metallica. Sulle pareti del forno di processo vengono ricavate due finestre in alluminio e raffreddate ad acqua che permettono l'attraversamento dei raggi X di un sincrotrone. Il fascio di 33.17 keV, alto 15 mm e largo 40 mm, genera radiografie da assorbimento che vengono successivamente catturate da una camera elettronica CCD (charge-coupled device). La camera ha pixels di dimensioni pari a 40 μm e fornisce un totale di 500-950 radiografie in ogni processo di schiumatura. La Figura 36 mostra invece delle radiografie con contrasto di fase ottenute durante il processo di riempimento di una struttura sandwich con schiuma in lega di Al. Le pelli esterne sono costituite da una lega di Al con maggior punto di fusione rispetto alla precedente lega impiegata per il nucleo del pannello. Le ultime due radiografie in basso evidenziano la distruzione della schiuma precedentemente creata e distinguibile nelle prime tre immagini superiori, così come la fusione indesiderata delle due pelli, conseguenza di un cattivo raffreddamento del pannello dopo aver ultimato il processo di schiumatura.

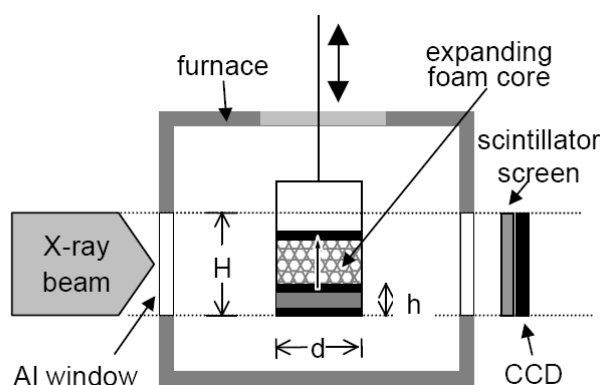


Figura 35 Set up sperimentale usato da Banhart et al. (2001) per lo studio, mediante radiografia a raggi X, del processo di riempimento di un pannello sandwich con schiuma di Al.

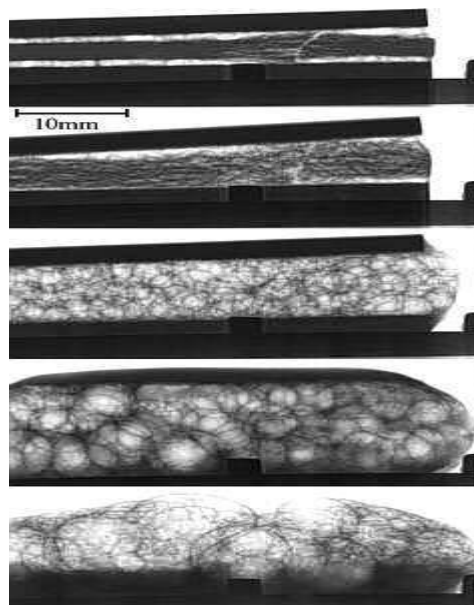


Figura 36 Immagini ottenute mediante radiografia a raggi X con contrasto di fase che mostrano il processo di riempimento di una struttura sandwich con schiuma in lega di Al (Helfen et al. , 2000).

5.2.2 Tomografia computerizzata a raggi X

La tomografia computerizzata a raggi X rappresenta sicuramente una tecnica di valutazione non distruttiva molto potente che i maggiori centri che effettuano ricerche sulle schiume metalliche hanno già in dotazione. È evidente che da questa tecnica ci si aspettano dei risultati fondamentali per la comprensione di questi materiali innovativi, per la loro produzione, caratterizzazione e non ultimo il controllo durante la fase di utilizzo. In Europa e soprattutto in Francia e Germania, dove la ricerca sulle schiume metalliche si è sviluppata da tempo, i gruppi di ricerca impegnati su questo tema fanno ampio uso di questa metodologia. Oggigiorno i lavori di ricerca dispongono delle maggiori risoluzioni che sono disponibili sui tomografi attuali e con i quali è possibile sviluppare misure di microtomografia computerizzata o tomografia computerizzata micro focus, entrambe dall'acronimo μ CT. In Germania, dove è in atto il Programma Prioritario "Schiume Metalliche e Metalli Cellulari" finanziato dal DFG (Deutschen Forschungsgemeinschaft), i ricercatori Illerhaus B. e Jasiüniene E. del BAM (Bundesanstalt für Materialprüfung und –forschung) di Berlino hanno a carico il progetto MC1 "Ricerca sulla struttura 3D dei Materiali Metallici Cellulari e Correlazione con Proprietà Meccaniche". Si informa nel loro sito web (http://www.spp-metallschaeume.uni-erlangen.de/Projects/Project_MC1/project_mc1.html) che il proposito della ricerca è quello di usare la μ CT 3D per studiare la struttura interna dei materiali metallici cellulari, giacché questa metodologia permette un'analisi non distruttiva della geometria interna e della densità di parti complesse. Con tale tecnica si può esaminare la qualità della schiuma (dimensione e distribuzione dei pori) ma anche la struttura interna di piccole regioni (comportamento della deformazione, tracking della distorsione). A tal fine si devono sviluppare dei moduli di software ed integrare a sistemi di analisi AVS standard. I moduli possono essere usati per il calcolo della resistenza e della formabilità.

Altro esempio è quello di Leuven in Belgio, presso la KUL (Katholieke Universiteit Leuven), dove la docente Martine Wevers del Dipartimento di Metallurgia ed Ingegneria dei Materiali è la

coordinatrice del progetto di ricerca *“Performance dei materiali e valutazione non distruttiva”*. Un tema di ricerca è rappresentato dallo studio della struttura interna dei materiali e nel loro sito web (<http://www.mtm.kuleuven.ac.be/Research/NDT/MicrofocusCT/index.html>) si fa riferimento alla μ CT quale tecnica in uso per l'identificazione e quantificazione di danni e strutture interne e per la valutazione dei processi produttivi di materiali avanzati. Presso i loro laboratori sono installati due attrezzature di μ CT, un sistema Sky Scan 1072 ed un sistema AEA Tomohawk. Il sistema Sky Scan 1072 è provvisto di una fonte di raggi X di 130 kV e 300 μ A, un detector, un manipolatore dell'oggetto (23 cm di movimento lineare, 2 cm di elevazione e 360 gradi di rotazione), una dimensione della regione vista di 6,6 cm ed infine software per la scansione, ricostruzione e visualizzazione delle immagini. Il sistema AEA Tomohawk ha una fonte di raggi X Philips HMOX 161 con 160 kV e 3,2 mA, un detector con campo visivo 220mm/170mm/115mm, camera di acquisizione di 25 frame/s e vari software per la scansione, ricostruzione e visualizzazione delle immagini.

Nelle pagine successive si riportano i risultati di alcuni lavori di ricerca sviluppati, con l'ausilio della tomografia computerizzata a raggi X, su schiume metalliche e materiali porosi e considerata l'importanza del metodo si completerà l'informazione anche con dati di carattere più generale.

Un lavoro fondamentale si deve a Bart Smith et al. (1998) che sono tra i primi a studiare il meccanismo di deformazione a compressione nei materiali cellulari di Al, sia con celle aperte che chiuse. Il tomografo utilizzato ha una differenza di potenziale di 130 kV per l'accelerazione degli elettroni, il fascio di raggi X in uscita ha una risoluzione spaziale di 0,5 mm e viene impiegato per esaminare la schiuma di Al dal nome commerciale Alporas® con celle di diametro pari a 3 mm. La schiuma viene osservata prima senza carico, successivamente caricata e condotta al tomografo per le scansioni finali. In questo modo gli autori raggiungono delle conclusioni interessanti sui meccanismi di deformazione delle schiume, determinando che sono le celle di forma ellittica quelle che innescano per prime le deformazioni di flessione, influenzando la resistenza allo snervamento della schiuma stessa.

La Figura 37 invece è tratta dal lavoro di Banhart (2000) e mostra un'immagine di una schiuma di zinco di volume $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$, ottenuta con un fascio di raggi X di energia pari a 52 keV generati da sincrotrone. La risoluzione spaziale è di 5 μm , risultando maggiore a quella normalmente data da tomografi medicali o commerciali che invece è di frazioni di mm. L'autore osserva che anche l'uso di queste risoluzioni minori è sufficiente per effettuare dei controlli di qualità dei materiali cellulari, poiché i dati di CT dai quali si ottengono le distribuzioni 3D della densità sono mediati su regioni più grandi. Aggiunge che la scelta della dimensione strumentale dipende dal tipo di informazione voluta e conclude affermando che se si vogliono rivelare delle regioni più o meno compatte della schiuma, allora il volume da mediare è dell'ordine del volume medio delle celle, quindi nell'intervallo di mm.

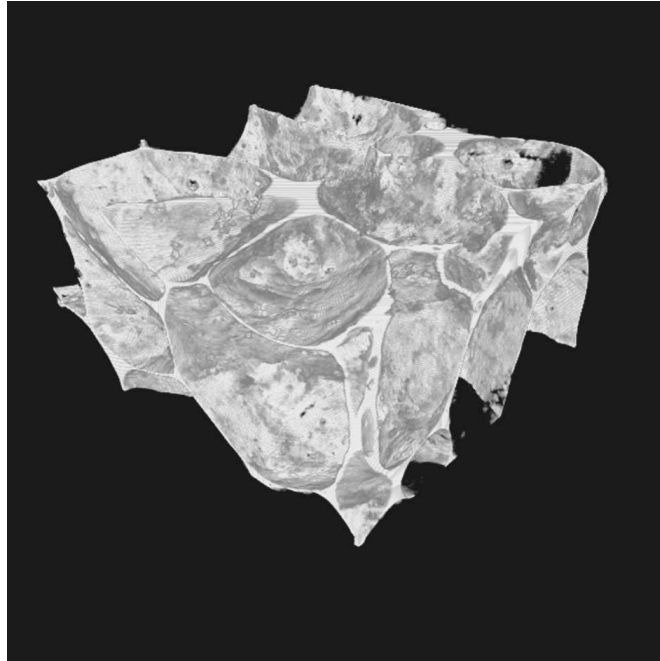


Figura 37 Immagine di un campione di schiuma di zinco di dimensioni $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ ottenuta con tomografia computerizzata a raggi X (Banhart, 2000).

Qualche anno fa Jasiūniene et al. (2000), descrivendo l'attrezzatura disponibile presso il BAM di Berlino, riportavano che era possibile studiare oggetti con diametro di 20 cm e risoluzione di 1 mm sino a diametri di 1 mm con risoluzione di $1,5 \mu\text{m}$. Precisavano che le immagini con la tecnica CT erano ottenute allora mediante un tubo a raggi X microfocus con 120 kV e 200 mA e nello stesso lavoro indicavano che avrebbero installato un nuovo tubo a raggi X microfocus con 320 kV. Per la ricostruzione dell'immagine 3D, a partire dai dati raccolti dell'oggetto studiato, ricorrevano all'algoritmo di Feldkamp. Con questa attrezzatura svilupparono delle scansioni per osservare il piegamento delle pareti di celle, all'interno di provini cubici di schiume sottoposti a prove di compressione. Inoltre effettuarono delle misure di caratterizzazione sempre su campioni di schiume, calcolando le variazioni localizzate della densità e le distribuzioni delle dimensioni dei pori.

Contemporaneamente Wevers et al. (2000) informavano che il tomografo AEA Tomohawk, disponibile presso la KUL di Leuven, poteva analizzare oggetti di diametro sino a 13 cm con peso massimo di 5 kg. Nello stesso lavoro venivano descritte due applicazioni su schiume metalliche, la prima per schiume prodotte con processo di colata e la seconda per schiume ricavate con la metallurgia delle polveri. I risultati forniti riguardavano osservazioni sulla struttura interna e successiva ricostruzione 3D delle due schiume.

Presso i citati laboratori di Leuven, Benouali et al. (2002) studiano il comportamento a compressione delle schiume di Al a celle chiuse, per applicazioni automotive, prodotte sia con metallurgia delle polveri (LKR) che con metodi di fusione (Hydro). Il lavoro sperimentale permette di trarre conclusioni importanti sul meccanismo di deformazione e di correlarlo a composizione chimica e microstruttura della schiuma, così come di valutare l'effetto della densità sulle proprietà

del materiale. La Figura 38° e la Figura 38b mostrano rispettivamente la ricostruzione 3D di un campione di schiuma Hydro e quella di una schiuma LKR.

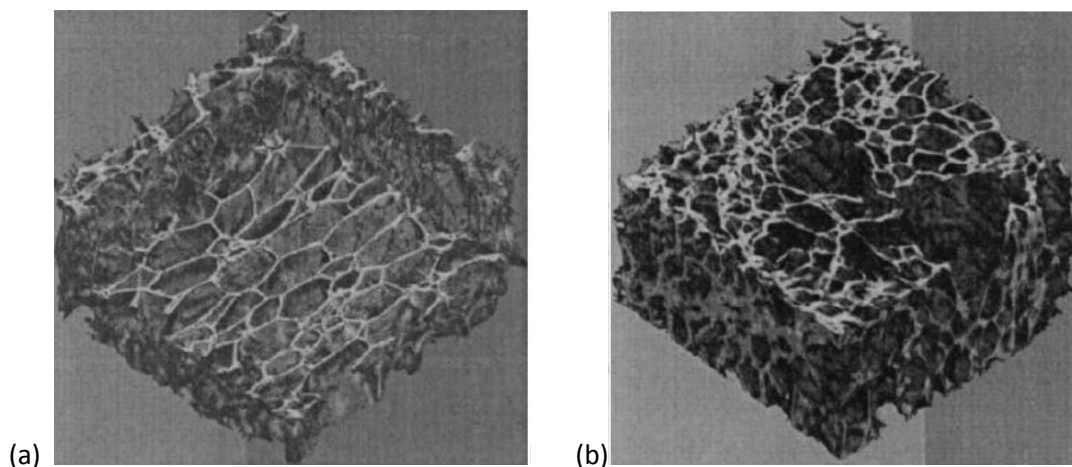


Figura 38 Ricostruzioni 3D mediante tomografia computerizzata su campioni di schiume di Al: (a) schiuma Hydro con densità media pari a $0,16 \text{ g/cm}^3$ prodotta via fusione; (b) schiuma LKR con densità media pari a $0,27 \text{ g/cm}^3$ prodotta con processo di metallurgia delle polveri (Benouali et al., 2002).

La microtomografia computerizzata viene impiegata (Olurin et al., 2002) per caratterizzare la microstruttura e l'architettura interna di diverse schiume di Al a celle chiuse, esplorando le capacità della tecnica per lo studio tridimensionale dei parametri morfometrici. Il sistema di microtomografia dispone di una sorgente a raggi X di 40-60 keV con una corrente iniziale di 100-180 μA e una camera che può raggiungere anche risoluzioni di 1000 proiezioni per fetta con fette costituite da 2048×2048 pixels isotropici al massimo. I parametri morfometrici della schiuma vengono poi stimati mediante dei modelli che fanno uso delle osservazioni ricavate su un sub-volume dell'oggetto scansionato. Vengono così valutati gli effetti della risoluzione delle misure, del tempo d'integrazione dei dati e di altri fattori secondari sui parametri morfometrici stessi.

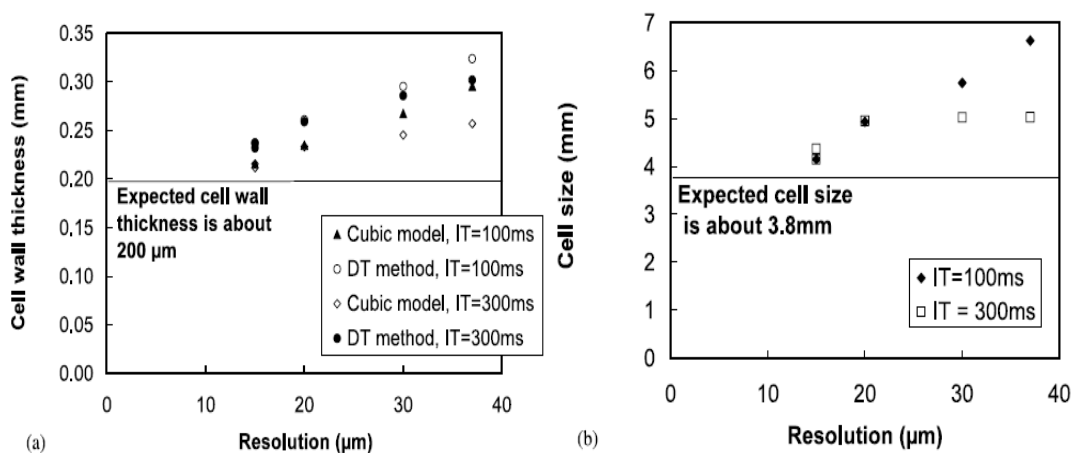


Figura 39 Effetto della risoluzione delle misure e del tempo d'integrazione della tecnica di microtomografia computerizzata applicata a schiume di alluminio con celle chiuse: (a) effetto sullo spessore della parete cellulare; (b) effetto sulla dimensione della cella. Vengono inoltre precisati i metodi di calcolo adoperati e i valori previsti delle due variabili cellulari (Olurin et al., 2002).

In Figura 39 è possibile apprezzare l'influenza della risoluzione adottata durante la misura e del tempo d'integrazione sul valore misurato della dimensione di cella e spessore della parete cellulare, in funzione anche del modello di calcolo adoperato. I risultati di questo interessante lavoro dimostrano che i valori stimati di densità della schiuma, spessore delle pareti e dimensione delle celle sono confrontabili con quelli ottenuti mediante altre tecniche sperimentali.

Elmoutaoukkil et al. (2002) sviluppano delle analisi strutturali quantitative su schiume di alluminio ottenute con tre procedimenti diversi, schiuma IFAM ottenuta con metallurgia delle polveri e agente schiumogeno TiH_2 , schiuma Norsk-Hydro che utilizza un gas per la schiumatura e schiuma Alporas mediante arricchimento con Ca e uso dell'agente TiH_2 . L'attività sperimentale fa uso del sincrotrone dell'ESRF di Grenoble con raggi X di 25 keV e una risoluzione di 30 μm , sufficiente per avere un numero adeguato di celle ed osservare tutte le loro pareti. La scansione interessa un volume di materiale con dimensioni $21 \times 21 \times 14 \text{ mm}^3$ ed inizialmente vengono analizzate delle fette 2D ricavate dal volume scansionato, ottenendo informazioni sulla distribuzione della dimensione delle celle, frazione di solido sui bordi delle celle e sulla connettività e morfologia delle celle. La Figura 40 presenta delle immagini 2D estratte dal volume osservato per ognuna delle tre schiume. Successivamente si elaborano dei metodi di analisi 3D introducendo delle operazioni morfologiche per stimare la distribuzione della grandezza delle celle. Viene stabilito che le schiume IFAM e Norsk-Hydro posseggono delle distribuzioni con una piccola frazione di celle grandi, mentre la schiuma Alporas esibisce una distribuzione monomodale.

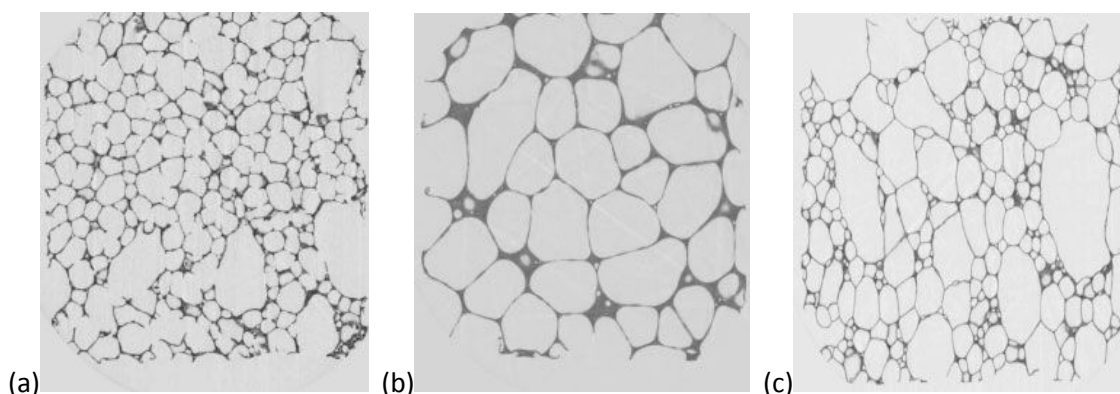


Figura 40 Immagini 2D delle tre schiume studiate: (a) IFAM; (b) Alporas; (c) Norsk-Hydro. È possibile osservare il maggiore allungamento delle celle chiuse della schiuma (c) (Elmoutaoukkil et al., 2002)

Inoltre gli autori dimostrano che le schiume Norsk-Hydro e Alporas sono costituite quasi totalmente da celle chiuse, la prima di loro avente un maggior numero di celle allungate e caratterizzata da poche celle grandi e molte celle di piccole dimensioni (Figura 40c).

Risultati di applicazioni di microtomografia ad alta risoluzione e radiografia veloce, per la caratterizzazione in tempo reale ed in situ della microstruttura di schiume metalliche di Al da metallurgia delle polveri, vengono ancora diffusi dal gruppo di ricerca franco tedesco legato agli istituti Fraunhofer di Dresda e Brema e all'ESRF di Grenoble (Baumbach et., 2004). Usando radiazioni da sincrotrone con energia di 18 keV viene studiato lo sviluppo del processo di schiumatura nel tempo. Le visualizzazioni fanno uso di un volume di griglia (*voxel*) di 6,7 μm e mettono in mostra, mentre la schiuma si espande, la morfologia della struttura dei pori assieme

alla localizzazione della matrice metallica e dell'agente schiumante (Figura 41). Per poter distinguere materiali che presentano piccole differenze di coefficiente di assorbimento della radiazione, gli autori sviluppano anche osservazioni di tomografia computerizzata olografica, cioè usano radiazione monocromatica e coerente che permette recuperare la modulazione dell'ampiezza e la fase del segnale a raggi X che emerge dal campione in esame. Per far ciò viene predisposto nel sistema sperimentale un accorgimento che permette posizionare la camera di acquisizione CCD a diverse distanze dall'oggetto in osservazione, in maniera da registrare immagini di interferenza dei raggi X dovute al fenomeno della diffrazione di Fresnel. La Figura 42 presenta due immagini di una stessa regione di un campione di schiuma metallica con precursore AlSi7 (7% in peso di Si), ottenute, quella superiore con la tomografia computerizzata per assorbimento delle radiazioni a raggi X e quella inferiore con la tomografia computerizzata olografica dei raggi X. Nell'immagine superiore si riescono a distinguere le particelle di silicio nella matrice di alluminio del precursore AlSi7, particelle che nell'immagine inferiore non sono apprezzabili. Come gli autori sottolineano, la tecnica olografica apre delle nuove possibilità per lo studio del meccanismo di nucleazione dei pori promosso dall'agente schiumante con diversi precursori di schiume metalliche.

Lavori di ricerca del BAM di Berlino che fanno uso per la metodologia a raggi X di quattro tomografi con diversi ordini di grandezza sono pubblicati da Goebbels et al. (2004). Per lo studio dei materiali, le attrezzature sperimentali disponibili utilizzano energia radioattiva da sincrotrone nell'intervallo 8÷80 keV la prima, mentre le restanti possono disporre di tre diversi tubi a raggi X micro focus. Il primo di questi è un tubo di 100 kV di tipo a trasmissione, il secondo rappresenta un tubo convenzionale di 225 kV e l'ultimo un tubo bipolare di 320 kV ad alta energia. Anche i tipi di detectors disponibili sono molteplici, tra questi quelli a pannello piatto, gli intensificatori di immagini a raggi X e detector a lamina di scintillatori. Le varie attrezzature che il BAM possiede permettono di scegliere il sistema sperimentale più adatto al tipo di struttura che deve essere irradiata.

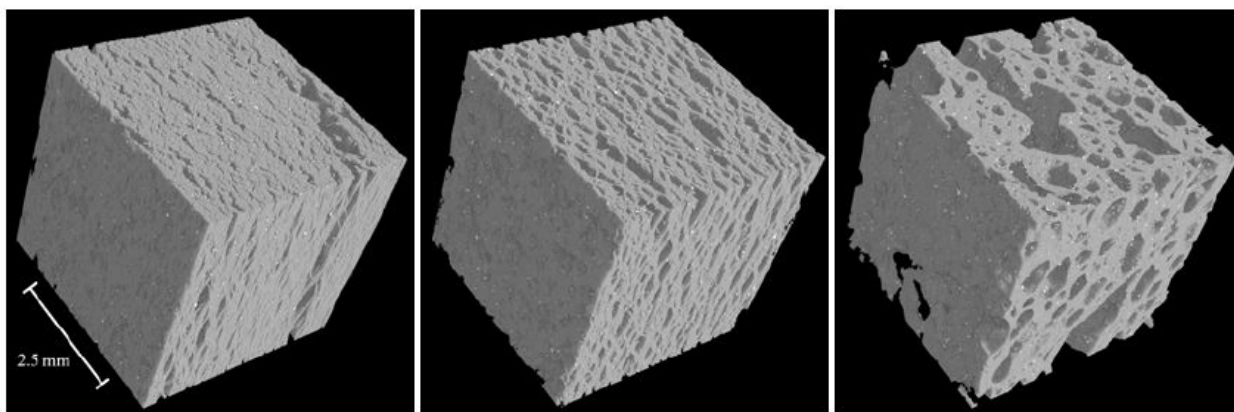


Figura 41 Interpretazioni 3D mediante microtomografia di tre diversi stadi del processo di espansione di una schiuma metallica. Da sinistra e destra la porosità è rispettivamente 0,30; 0,44 e 0,56. La matrice metallica di Al è grigia e gli spot brillanti rappresentano il rimanente dell'agente schiumante (Baumbach et., 2004).

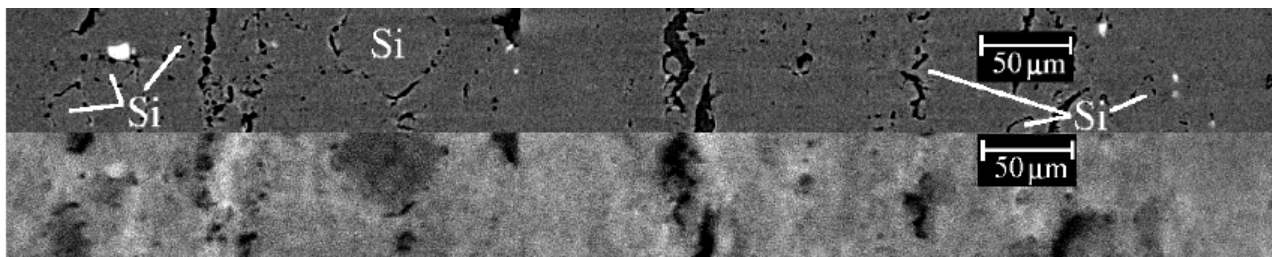


Figura 42 Immagini trasversali mediante microtomografia computerizzata di una schiuma AlSi7 parzialmente espansa, ricostruite con 1400 direzioni di proiezione e una energia di raggi X di 18 keV. In entrambe le immagini i pori sono neri e l'agente schiumante TiH_2 è bianco. Nell'immagine inferiore, ottenuta con metodi olografici, le particelle di Si sono caratterizzati da un colore grigio scuro nella matrice grigia chiara di Al. Nell'immagine superiore, ottenuta con semplice assorbimento radioattivo, queste particelle non sono comunque distinguibili (Baumbach et., 2004).

Riguardo le schiume metalliche, oltre a studi per la determinazione della distribuzione dei pori all'interno della microstruttura e loro dimensioni, vengono eseguite prove di caratterizzazione per la valutazione delle proprietà meccaniche e dei meccanismi di deformazione a compressione di questi materiali. In questo caso viene identificata e scansionata inizialmente con il tomografo una regione interna della schiuma, ripetendo la scansione dopo l'applicazione del carico di compressione. Un test effettuato riguarda un campione quadrato di schiuma Alulight prodotto via metallurgia delle polveri di dimensioni laterali pari a 20 mm e con altezza di 30 mm, ottenuto a partire di pannelli quadrati di dimensioni 400mm x 400mm x 30 mm. L'immagine di Figura 43 mostra l'evoluzione della deformazione interna della schiuma durante la prova a compressione e rivela il collasso delle bolle centrali. Il diverso grado di deformazione che si sviluppa nella struttura della schiuma durante le prove di compressione viene presentato invece in Figura 44.

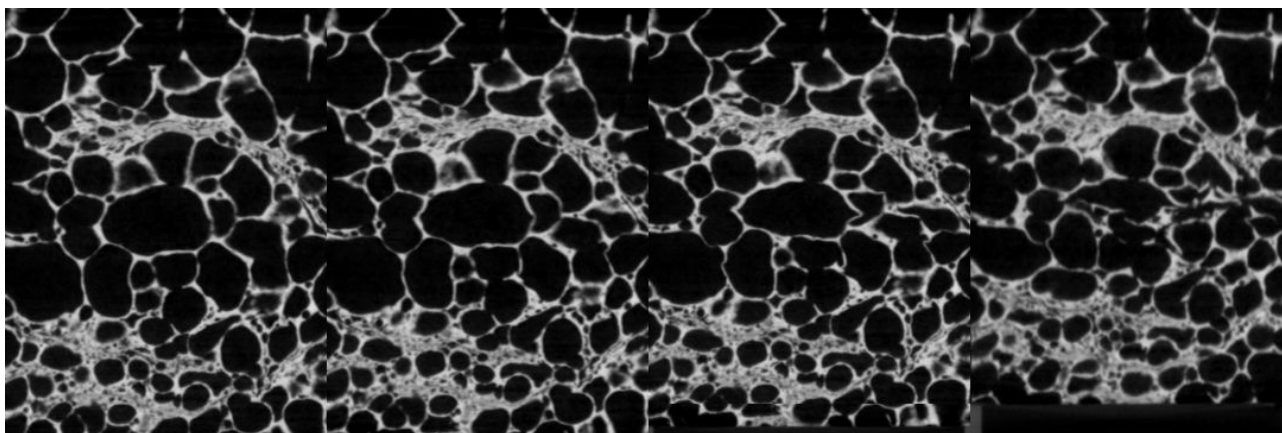


Figura 43 Immagini all'interno di un campione di schiuma Alulight che mostrano l'evoluzione delle deformazioni durante prove di compressione e collasso finale delle bolle centrali. (Goebbels et al., 2004).

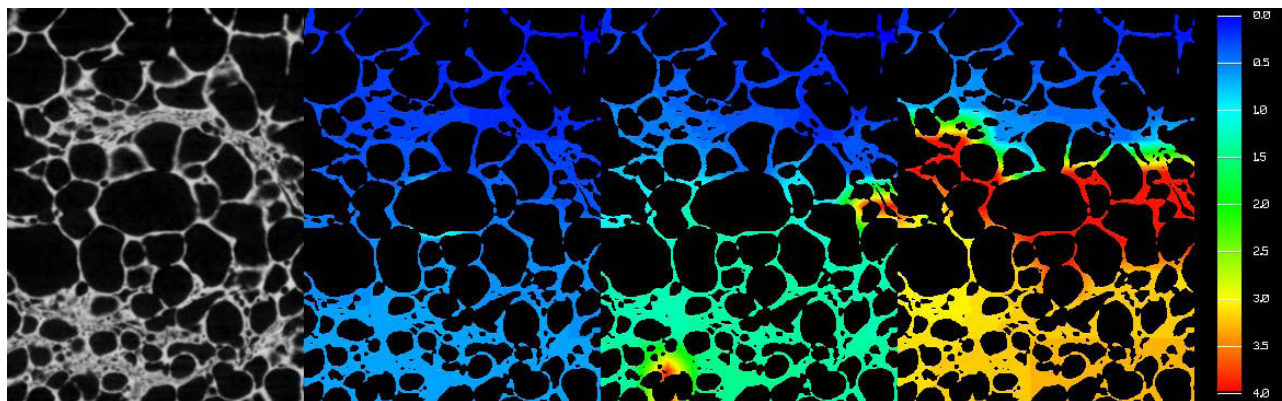


Figura 44 Immagini che mostrano il diverso grado di deformazione e rispettiva evoluzione durante prove di compressione su un campione di schiuma Alulight. Colore rosso: maggior grado; colore blu: minor grado (Goebbels et al., 2004).

Rack et al. (2004) studiano lo sviluppo dei primi stadi del processo di schiumatura di schiume metalliche realizzate con Al e Zn mediante un tomografo che permette risoluzioni spaziali sino a $3,6 \mu\text{m}$, con energia di 25 keV per l'alluminio e di 60 keV per lo zinco. Il software per l'analisi delle scansioni ricorre anche a metodi di algebra booleana delle immagini attraverso la quale poi si ottengono dati statistici su distribuzione delle dimensioni, caratteristiche delle forme cellulari, porosità della schiuma e il minimo spessore di parete cellulare (Figura 45).

Un lavoro interessante è quello di Benouali et al. (2005) i quali studiano l'influenza dell'anisotropia delle forme cellulari, quindi del rapporto tra dimensione cellulare maggiore e minore, sul comportamento meccanico di due schiume a celle chiuse di alluminio caricate a compressione. I due materiali sono rispettivamente, schiuma LKR ottenuta con metallurgia delle polveri e schiuma Norsk Hydro da processo allo stato liquido. Gli autori determinano che esiste una anisotropia significativa della resistenza meccanica per le schiume Hydro, mentre le schiume LKR mostrano un comportamento abbastanza isotropico, comunque entrambe le schiume danno dei valori di resistenza meccanica al di sotto delle soglie teoriche. Quindi, per giustificare questa diminuzione dei valori, Benouali et al. ottengono con lo strumento AEA Tomohawk della KUL di Leuven delle immagini 2D (Figura 46) e 3D (Figura 47) della struttura cellulare, su provini di dimensioni $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 2,6 \text{ cm}$ irradiando con fasci a raggi X di energia pari a 21 keV osservano una certa orientazione delle celle nel caso delle schiume Hydro assieme all'esistenza di celle rotte, pareti curve e presenza di corrugamenti, mentre verificano la presenza di alcune fratture per il caso delle celle delle schiume LKR. Il loro lavoro si conclude analizzando l'influenza dell'orientazione anisotropica delle celle sul comportamento meccanico delle due schiume.

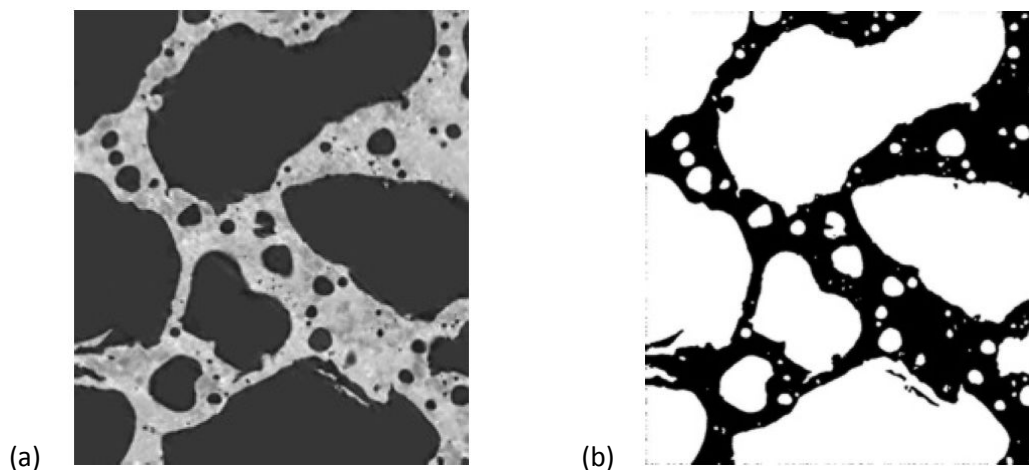


Figura 45 Immagine 2D di una schiuma AlSiCu con porosità del 70%: (a) immagine mediante tomografia, (b) immagine booleana di (a) (Rack et al., 2004).

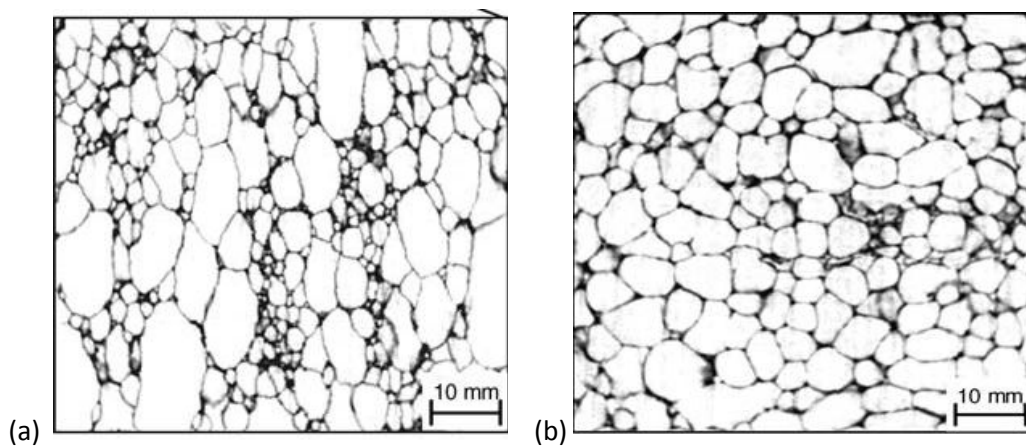


Figura 46 Immagine 2D di schiume di Al: (a) schiuma Norsk Hydro di densità $0,19 \text{ g/cm}^3$, (b) schiuma LKR di densità $0,24 \text{ g/cm}^3$ (Benouali et al., 2005)

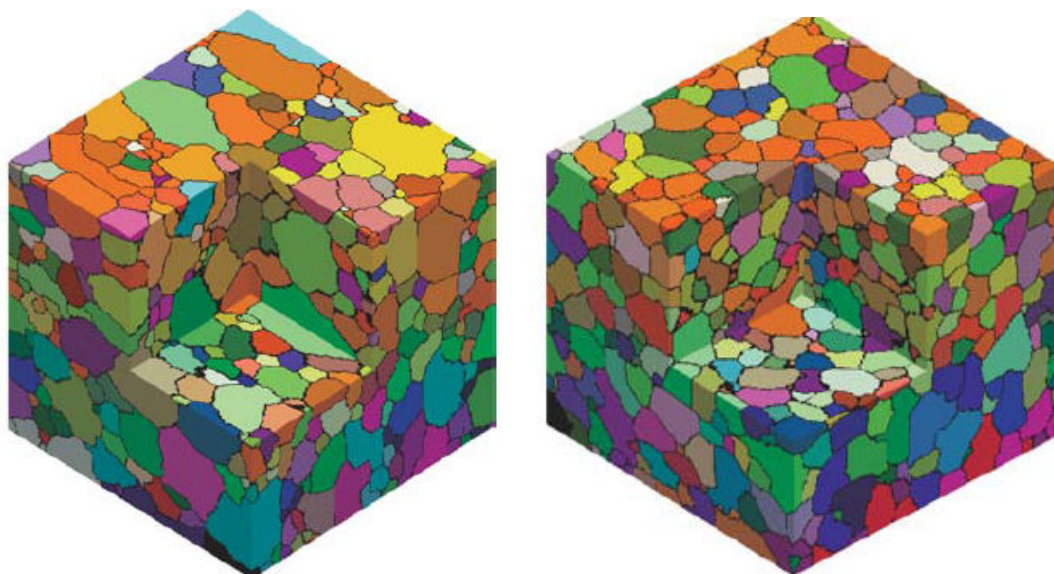


Figura 47 Ricostruzioni 3D di schiume di Al: (a) schiuma Norsk Hydro di densità $0,19 \text{ g/cm}^3$, (b) schiuma LKR di densità $0,24 \text{ g/cm}^3$ (Benouali et al., 2005)

5.2.3 Liquidi penetranti

Banhart (2000) precisa che durante la produzione delle schiume metalliche, specificatamente durante il processo di raffreddamento successivo alla fase di schiumatura, si formano delle imperfezioni, come piccoli fori o fratture sulle pareti delle celle o sulla pelle esterna ed indica che la tecnica dei liquidi penetranti è ideale per rilevare tali difetti. Infatti il fatto stesso che il liquido possa penetrare ed essere successivamente rilevato proprio in prossimità del difetto ne fa una tecnica molto adatta per questo scopo.

5.2.4 Correnti parassite

Come osservato precedentemente, le correnti parassite che vengono generate in un materiale metallico cellulare dipenderanno soprattutto dalle proprietà di quest'ultimo, dalla presenza di difetti, dal grado di porosità, ecc. Per quest'ultimo caso si sa che la porosità ha un effetto marcato sul valore del segnale di prova risultante, conseguenza del fatto che la conducibilità elettrica delle schiume metalliche diminuisce con l'aumento di porosità. Quindi la conoscenza di un valore di conducibilità media permetterà risalire al valore della porosità media di una schiuma metallica sottoposta a prova. Banhart (2000) afferma che in linea di principio, dopo aver provveduto ad una adeguata calibrazione della strumentazione, il metodo può essere applicato per la misura di densità locali e di altri parametri dei pori.

Ma e Peyton (2004) usano la tecnica di misura con correnti parassite per la caratterizzazione di schiume metalliche di Al e in lega Al-Si. Le schiume di Al prodotte con metallurgia delle polveri vengono usate per la fabbricazione di due barre cilindriche di diametro pari a 10 mm e lunghezza di 200 mm. I componenti sandwich fabbricati con schiume metalliche in lega Al-Si, caratterizzate da pareti cellulari sottili ed ondulate, danno vita invece a tre campioni con una superficie rettangolare di dimensione 47,0 mm x 42,7 e tre spessori diversi, rispettivamente uguali a 4,5 mm, 9,2 mm e 14,6 mm. Le porosità medie, ottenute pesando i campioni, sono rispettivamente di 71,83% e 80,41% per le due barre e di 85% per tutti e tre i campioni sandwich. La strumentazione di misura che prevede una coppia di bobine, una per l'eccitazione l'altra per il rilevamento, fa uso di una coppia con forme solenoidali per le misure sulle superfici cilindriche e di una coppia con forme a spirale, fatta di quadrati concentrici, per le misure sulle superfici rettangolari. Per avere dei riferimenti le prove vengono effettuate anche su campioni pieni di Al e bronzo, sia di forma cilindrica che rettangolare. I grafici di Figura 48 e Figura 49 danno i valori della conducibilità elettrica dei diversi materiali in esame, la Figura 48 riporta le variazioni della conducibilità in funzione della frequenza di eccitazione per il caso delle barre in schiuma di Al, mentre la Figura 49 traccia le stesse variazioni di conducibilità per il caso dei campioni di pannelli sandwich in schiuma Al-Si. A partire dai valori di conducibilità media gli autori determinano il grado di porosità media dei diversi campioni, constatando una buona corrispondenza con i valori reali.

Anche se non impiega correnti parassite, citiamo il lavoro di Kim et al. (2004) i quali valutano modulo elastico e resistenza meccanica di schiume metalliche mediante la determinazione della conducibilità elettrica con metodologie resistive. I provini sperimentali di dimensioni 35 x 35 x 40 mm³ sono prodotti con una schiuma in lega Al-3Si-2Cu-2Mg ottenuta via metallurgia delle polveri. Questi provini vengono successivamente sottoposti a misure di resistività elettrica, collocandoli in un circuito elettrico conosciuto e misurando la differenza di potenziale che scaturisce dall'applicazione di una corrente elettrica. Ottenuta la conducibilità elettrica dal valore reciproco

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

della resistività, gli autori calcolano le proprietà meccaniche della schiuma attraverso delle espressioni funzionali tra conducibilità e densità ed infine tra densità e proprietà meccaniche. I valori ottenuti concordano con quelli misurati direttamente mediante prove meccaniche distruttive. Nel caso del modulo elastico una riprova è data in Figura 50, dove si tracciano sia i valori ottenuti sperimentalmente attraverso misure di compressione che quelli ricavabili mediante le relazioni conducibilità-densità-modulo elastico.

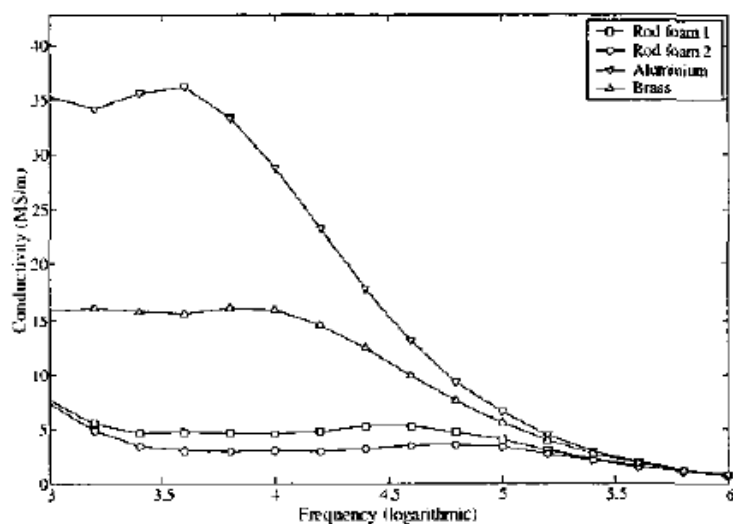


Figura 48 Valori di conducibilità elettrica di barre cilindriche in schiuma di Al e barre cilindriche di riferimento. I valori sono determinati via tecniche di misura a correnti parassite con bobine solenoidali ed in funzione della frequenza di eccitazione (Ma and Peyton, 2004).

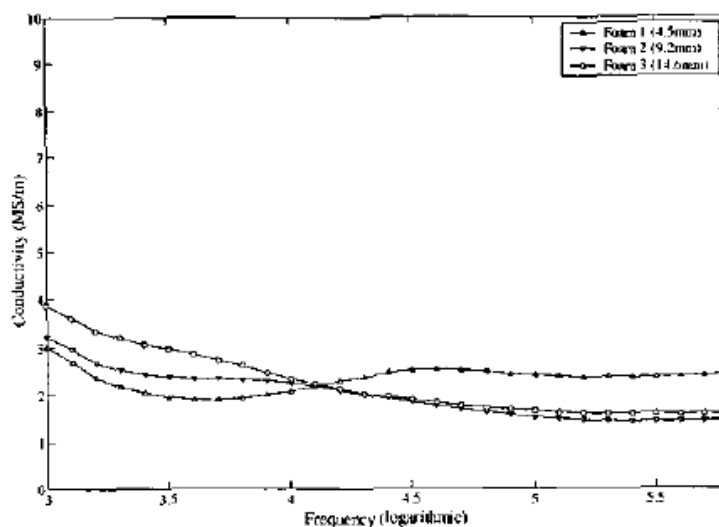


Figura 49 Valori di conducibilità elettrica di campioni sandwich in lega Al-Si di diversi spessori. I valori sono determinati via tecniche di misura a correnti parassite con bobine a quadrati concentrici ed in funzione della frequenza di eccitazione (Ma and Peyton, 2004).

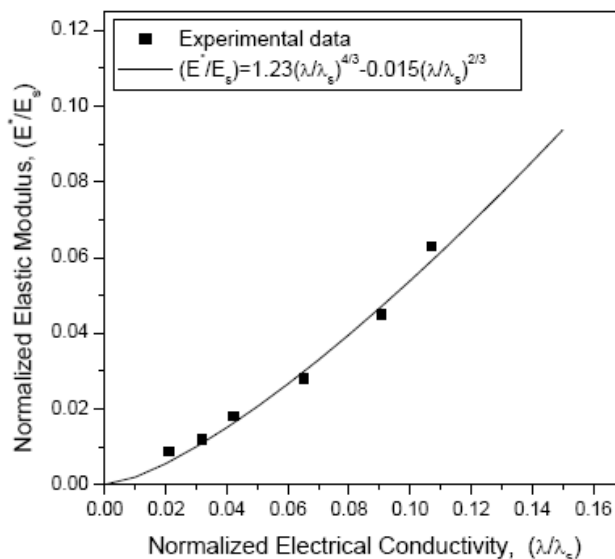


Figura 50 Valori normalizzati di modulo elastico verso conducibilità elettrica di schiume in lega Al-3Si-2Cu-2Mg. I dati discreti si riferiscono a prove sperimentali di compressione, la curva continua è stata ottenuta attraverso espressioni algebriche conducibilità elettrica -densità e densità-modulo elastico e usando valori sperimentali di conducibilità elettrica (Kim et al., 2004).

5.2.5 Ultrasuoni

Banhart (2000) non cita alcun lavoro riguardo l'applicazione delle tecniche ad ultrasuoni per le schiume metalliche. In effetti da un'analisi preliminare, possiamo aggiungere che il problema dell'applicazione di questa metodologia a materiali più complessi, quali sono le schiume, è reso difficile dal fenomeno della grande attenuazione degli ultrasuoni. L'attenuazione degli ultrasuoni può essere dovuta a fenomeni di diffusione o di assorbimento delle onde ultrasoniche. Nel caso delle schiume il problema è la diffusione degli ultrasuoni causata dalla porosità di questo materiale.

Attualmente si stanno impiegando dei metodi ad ultrasuoni senza contatto, ad esempio gli ultrasuoni generati con laser che sembrerebbe possano dare delle soluzioni al problema dell'attenuazione degli ultrasuoni delle schiume. Ricerche sono in atto tra l'altro presso l'Industrial Materials Institute del National Research Council del Canada, la School of Electrical and Electronic Engineering dell'Università di Nottingham in Inghilterra.

Alcune misure che impiegano la tecnica degli ultrasuoni con laser vengono sviluppate per la valutazione della rigidità elastica (moduli elastici di Young e di taglio) e dell'attenuazione acustica di strutture metalliche cellulari con cavità e fabbricate con polveri metallurgiche in lega Inconel 625 (Queheillalt et al., (2002). Le prime due grandezze vengono stimate misurando le velocità delle onde acustiche e risultano dipendere dalla frazione volumetrica dei pori. La terza è invece funzione del decadimento temporale delle onde acustiche stazionarie indotte da laser e può essere messa in relazione sia con la precedente frazione volumetrica che con la dimensione dei pori.

Campagne et al. (2004) presentano alcune misure di caratterizzazione non distruttiva mediante ultrasuoni con laser, realizzate per valutare le proprietà elastiche di schiume metalliche altamente porose. La tecnica usa un laser pulsato con un alto picco in potenza per la generazione degli

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

ultrasuoni, un laser per il rilevamento, un interferometro ottico ed un modulo di controllo per sincronizzare gli impulsi laser con l'acquisizione delle misure. Il laser pulsato generato interagisce con il materiale creando un'onda ultrasonica che si propaga nel mezzo, mentre un laser continuo o a grandi impulsi testa il movimento superficiale ultrasonico del materiale. Il movimento superficiale produce una modulazione della fase della luce dispersa che dalla superficie è inviata all'interferometro dove si realizza la conversione da modulazione della fase a modulazione dell'intensità. L'applicazione della tecnica prevede l'eccitazione locale del campione di schiuma metallica e la registrazione dei modi di vibrazione dell'intera struttura che, attraverso la frequenza di vibrazione, sono legati alla geometria e alle proprietà elastiche del materiale. Usando un laser a CO₂ per gli impulsi, laser Nd:YAG per il rilevamento e metodologia degli ultrasuoni in modo trasmissione (Figura 51) gli autori caratterizzano dei provini circolari di schiuma metallica in lega di titanio Ti-6Al-4V. I segnali ultrasonici vengono poi generati per diverse posizioni angolari del campione circolare, al quale è permesso di ruotare, permettendo di rilevare eventuali caratteristiche di anisotropia sulle proprietà elastiche di queste schiume. Due sono i modi fondamentali di vibrazione naturale rilevati, il primo è un modo di trazione, mentre il secondo è di flessione.

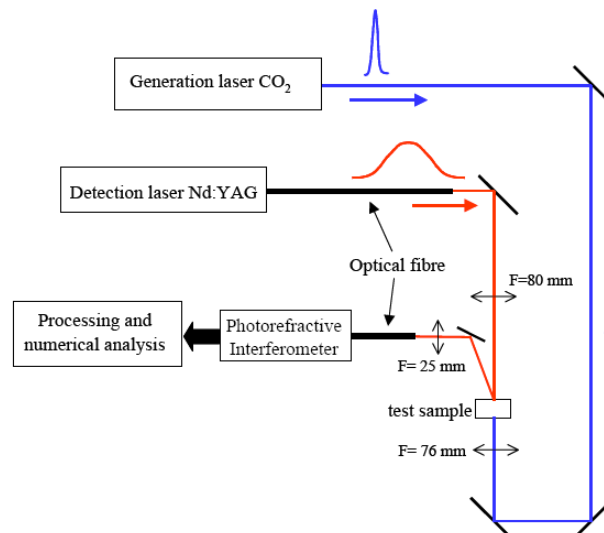


Figura 51 Set up sperimentale della metodologia ultrasuoni con laser usata per lo studio delle proprietà elastiche di una schiuma metallica in lega Ti-6Al-4V (Campagne et al., 2004).

La Figura 52 presenta un diagramma polare dei due modi naturali, evidenziando il carattere anisotropico del modo di trazione.

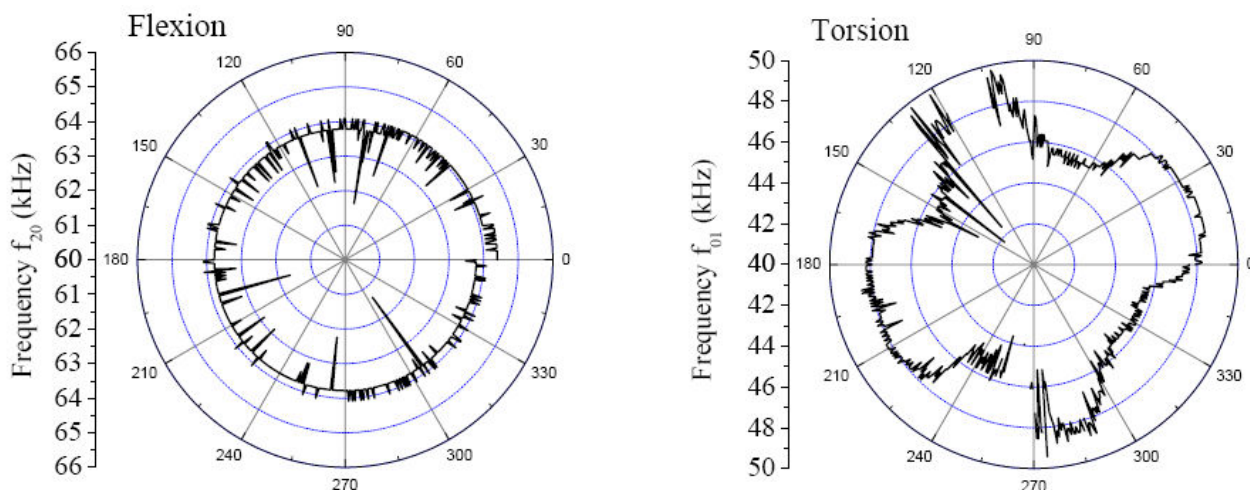


Figura 52 Diagramma polare dei primi due modi di frequenza naturale di vibrazione per un campione di schiuma metallica in lega Ti-6AL-4V misurati mediante tecnica di ultrasuoni con laser (Campagne et al., 2004).

5.2.6 Termografia infrarossa

Vi sono veramente poche attività sperimentali pubblicate sull'applicazione della termografia a infrarosso per la caratterizzazione di schiume metalliche, è possibile invece reperire qualche lavoro nel settore di altri materiali porosi.

Hu et al. (2002) usano termografia IR sia attiva che passiva per ispezionare alcuni materiali strutturali e perseguire due obiettivi. Il primo è quello rilevare la presenza di vuoti d'aria nelle interfasi di incollaggio tra materiali compositi polimerici rinforzati con fibre di carbonio e substrati di calcestruzzo (Figura 53). La seconda applicazione è per poter prevedere l'inizio di fessurazioni e relativa propagazione all'interno di travi di calcestruzzo rinforzato con materiali polimerici che a loro volta presentano un rinforzo in fibra di vetro (GFRP). I vuoti d'aria, introdotti artificialmente mediante dei cilindri con 1 mm di profondità e diametri tra compresi tra 16 mm e 30 mm, vengono monitorati remotamente a distanza mediante una termocamera con risoluzioni di 0,1 °C. La tecnica sfrutta la minor conducibilità termica dell'aria rispetto al materiale composito o al calcestruzzo, quindi applicando calore al campione di prova le regioni subito dietro le cavità d'aria saranno più calde delle circostanti e potranno essere rilevate termograficamente (Figura 54). Il calcestruzzo rinforzato con GFRP viene invece sottoposto prima a uno sforzo di flessione applicando un carico puntuale di tipo statico o ciclico e successivamente analizzato con immagini termografiche. Qui il concetto è quello di sfruttare il calore che si genera passivamente per frizione e usura in corrispondenza delle fratture generate dal carico e di registrare le immagini con una termocamera dalla risoluzione di 0,01 °C. La Figura 55 mostra un'immagine termografica che mette in evidenza la presenza di un piano di frattura a 45° nel materiale composito, dopo averlo sottoposto a un carico ciclico compreso tra le soglie di 45 e 55 kN.

Rodriguez-Perez et al. (2003) sviluppano misure termografiche con la tecnica a sorgente piana transitoria (*Transient Plane Source-TPS*) per stimare la conducibilità termica di campioni di schiume di alluminio AlSi7 con dimensioni 60x65x65 mm³ e densità variabile.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

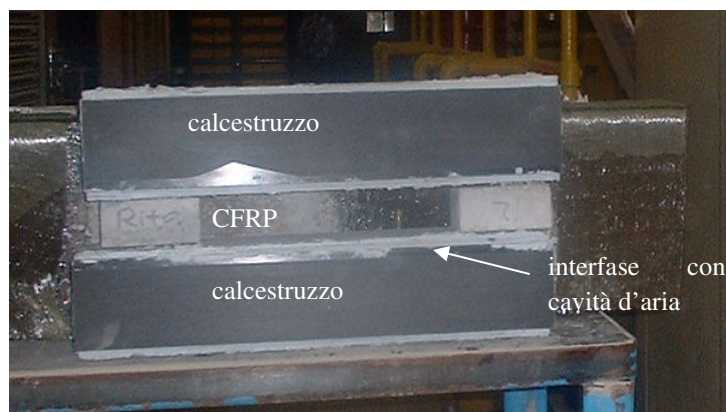


Figura 53 Placca di materiale composito polimerico rinforzato con fibre di carbonio (CFRP) incollata a due substrati di calcestruzzo con cavità d'aria artificiali nelle interfaci di incollaggio (Hu et al., 2002).

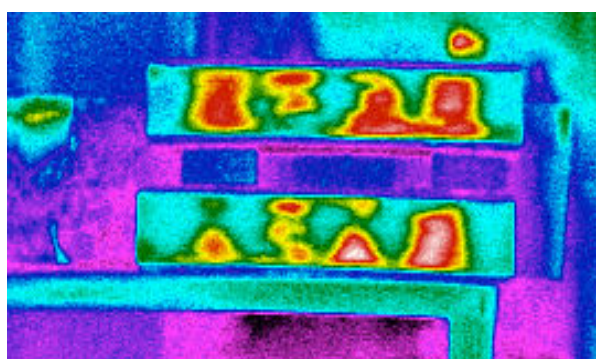


Figura 54 Immagine termografica IR che rivela le cavità d'aria artificiali nelle interfaci di incollaggio (Hu et al., 2002).

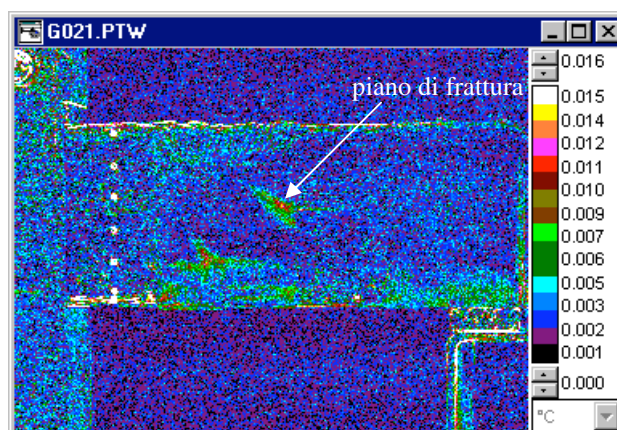


Figura 55 Immagine termografica IR con metodologia passiva che rivela la presenza di un piano di frattura a 45° in un trave di calcestruzzo rinforzata con un composito GFRP, sottoposta a deformazioni per flessione (Hu et al., 2002).

Nello stesso tempo valutano il impiego della tecnica come strumento di controllo non distruttivo per rilevare la presenza di disomogeneità prodotte durante il processo di produzione della schiuma. Queste metodologie prevedono che l'elemento TPS durante la misura possa fungere sia come sorgente di calore che come sensore termico. Il dispositivo TPS è costituito da un foglio molto sottile (10 μm) di nickel a forma di spirale doppia che conduce una corrente elettrica e rappresenta un disco caldo, racchiuso da uno strato isolante in kapton di spessore 70 μm . Due superfici della schiuma in esame vengono poste a contatto con due facce del sensore che viene

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

scaldato dal passaggio di una corrente elettrica (Figura 56). L'aumento di temperatura del sensore è funzione della conducibilità termica della schiuma ed è modellata da una espressione di cui si conoscono tutti i parametri ad eccezione appunto della conducibilità. Mediante rilevamenti della temperatura del sensore e tecniche di regressione è possibile determinare infine la conducibilità termica della schiuma. La Figura 57 mostra invece le variazioni di temperatura registrate in un campione e che sono da attribuire in questo caso dalla presenza di uno strato sottostante di materiale più denso.

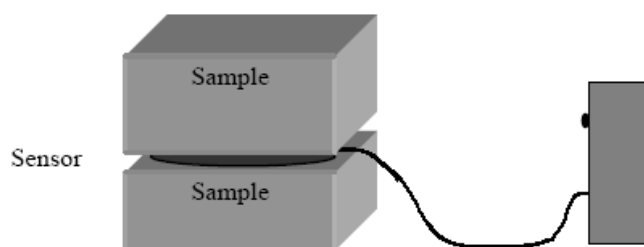


Figura 56 Set up sperimentale per la misura della conducibilità termica dove si mostra il sensore TPS a contatto con due campioni della stessa schiuma in esame (Rodriguez-Perez et al., 2003)

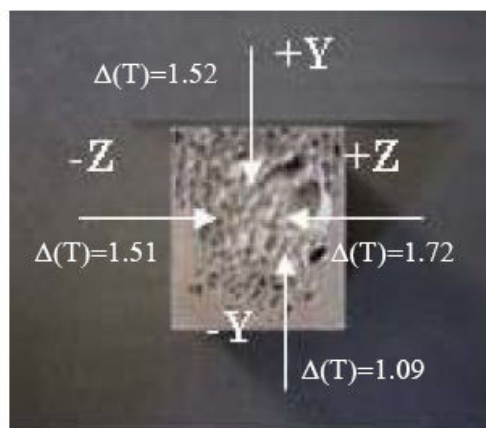


Figura 57 Differenze di temperatura rilevate con la tecnica TPS in una schiuma metallica AlSi7, dovute alla presenza di uno strato di materiale più denso al fondo del campione (Rodriguez-Perez et al., 2003).

Maierhofer et al. (2007) ricorrono alla termografia pulsata per valutare l'influenza delle proprietà del calcestruzzo sulla possibilità di rilevare la presenza di vuoti vicini alla superficie di strutture fabbricate con questo materiale. Lo studio interessa alcuni provini con diversi valori di porosità nella matrice di cemento, porosità dell'aggregato e densità del rinforzo. Inoltre per stimare l'influenza dell'età del calcestruzzo vengono sottoposti a prove termografiche alcuni provini con diversi tempi di idratazione. Le prove prevedono riscaldamento con tre radiatori di 2500 W ciascuno e tempi tra i 5 e i 30 min, successiva registrazione del raffreddamento mediante camera IR e analisi dei dati con valutazione delle frequenze attraverso metodi di termografia con fase pulsata. Il grafico di Figura 58 traccia i valori delle temperature superficiali rilevati in una regione senza pori, in corrispondenza dei pori e la loro differenza. Il valore massimo della differenza, osservato per un tempo specifico, dipende da profondità e dimensione del poro, dal tempo di riscaldamento e dalle proprietà del materiale.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

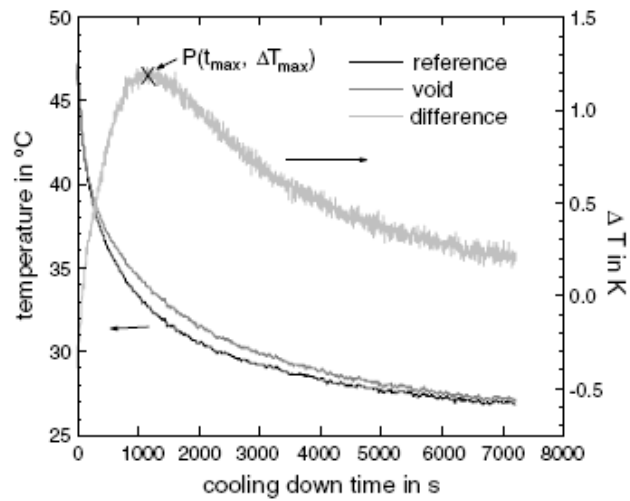


Figura 58 Temperature superficiali rilevate con termografia pulsata in un provino di calcestruzzo mostrando i valori termici della regione senza poro sottostante (*reference*), della regione sopra il poro (*void*) e la loro differenza (*difference*) (Maierhofer et al., 2007).

6 Conclusioni

In merito all'applicazione delle tecniche non distruttive per il controllo di componenti realizzati con materiali compositi o cellulari, possiamo trarre alcune considerazioni finali, giustificate dall'esame delle pubblicazioni esaminate nelle precedenti pagine.

1. Le principali tecniche NDT (emissione acustica, radiografia a raggi X, ultrasuoni, correnti parassite, termografia) sono ampiamente applicate per la caratterizzazione ed il controllo dei **compositi a matrice metallica MMC**, diversa è invece la situazione per quanto riguarda i **metalli cellulari**, che tra l'altro hanno minore diffusione. Di conseguenza esiste un volume importante di dati e risultati scientifici riguardo l'applicazione delle metodologie NDT per i materiali MMC, mentre più scarsa è la documentazione reperibile riguardo ai metalli cellulari.
2. Nel caso dei metalli cellulari e quindi per le schiume metalliche a cui siamo interessati, sembrerebbe che l'orientamento attuale sia quello di utilizzare la **tomografia computerizzata** per la **microcaratterizzazione** di questi materiali, come confermano tra l'altro le ricerche in atto presso i centri che si interessano di schiume metalliche.

Per il controllo globale dei pannelli si dovrebbe comunque esplorare la possibilità di associare altre tecniche, quali gli **ultrasuoni**, la **termografia**, visto che l'interesse può essere anche quello di effettuare valutazioni di tipo **macroscopico**. Tanto per fare degli esempi potrebbe essere necessario analizzare la densità della schiuma, verificando l'esistenza interna di grandi difetti o la presenza di pori grandi, completando con delle valutazioni per stabilire eventuali condizioni di cattiva adesione tra gli strati.

Da quanto emerso in questa indagine si evidenzia l'intenzione di verificare l'applicabilità ai pannelli con schiume metalliche di tecniche di ispezione simili a quelle utilizzate dall'industria aeronautica per analizzare macrodifetti in pannelli di materiali compositi. Tecniche quali gli ultrasuoni principalmente la tecnica C-scan, la termografia ad infrarosso, l'olografia ottica con laser, ecc., potrebbero fornire delle soluzioni per lo studio di determinati problemi strutturali. A loro volta queste tecniche potrebbero essere combinate con l'uso della microtomografia computerizzata, degli ultrasuoni con laser ecc. per analizzare la struttura di questo materiale complesso, studiare i difetti di dimensioni minori (1 mm e frazioni) e per il controllo del processo stesso di schiumatura. Infine altre alternative potrebbero essere rappresentate dall'uso delle tecniche di tomografia computerizzata a raggi X applicate per la scansione veloce dei componenti da realizzare con schiume metalliche. A questo proposito ci si potrebbe riferire alle applicazioni di tipo industriale di queste tecniche, come nel caso delle scansioni attuali ai raggi X di componenti aeronautici, per la determinazione di difetti nelle strutture honeycomb, piastre di materiali compositi, ecc.

7 Bibliografia

- [1] Asbhy M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W. and Wadley H.N.G., *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth Heinemann, 2002.
- [2] ASM Handbook Online, Volume 17: *Nondestructive Evaluation and Quality Control- Radiographic Inspection*, revised by ASM Committee , 2002.
- [3] ASM Handbook Online, Volume 17: *Nondestructive Evaluation and Quality Control- Optical Holography*, revised by James W. Wagner , 2002.
- [4] Banhart J., *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams*, Progress in Materials Science, 46, 2001, 559-632.
- [5] Banhart J., Stanzick H., Helfen L., Baumbach T. and Nijof K., *Real-time x-ray investigation of aluminium foam sandwich production*, *Advanced Engineering Materials*, 3 (407), 2001.
- [6] Baumbach T., Helfen L., Schladitz K., Pernot P., Stanzik H. and Banhart J., *High resolution microtomography and fast radiography for real time and in-situ characterization of porous microstructures*, 16th World Conference on Non-destructive Testing, Montreal, 30 August- 3 September, 2004, http://www.ndt.net/article/wcndt2004/html/htmltxt/784_baumbach.htm
- [7] Bart-Smith H., Bastawros A.F., Mumm D.R., Evans A.G., Sypeck D.J. and Wadley H.N.G., *Compressive deformation and yielding mechanism in cellular Al alloys determined using X-ray tomography and surface strain mapping*, *Acta materialia*, 46 (10), 1998, 3583-3592.
- [8] Benouali A.H., L. Froyen, Delerue J.F, and Wevers M., *Mechanical analysis and microstructural characterisation of metal foams*, *Journal of Materials Science* , 40 (22) 2005, 5801 -5811.
- [9] Benouali A.H., L. Froyen, Dillard T., Forest S. and N'Guyen F., *Investigation on the influence of cell shape anisotropy on the mechanical performance of closed cell aluminium foams using micro-computed tomography*, *Materials Science and Technology*, 18, May 2002, 489-494.
- [10] Bernard T., Bergman H.W., Haberling C. and Haldenwanger H.G., *Joining Technologies for Al-Foam-Al-Sheet Compound Structures*, *Advanced Engineering Materials*, 4(10), 2002, 798-802.
- [11] Buffière J.Y., Maire E., Cloetens P., Lormand G. and Fougères R., *Characterization of internal damage in a MMC using X-ray synchrotron phase contrast microtomography*, *Acta materialia*, 47 (5), 1999, 1613-1625.
- [12] Campagne B., Blouin A. and Lefebvre L.P., *Laser-ultrasonics probing of materials with large ultrasonics attenuation*, 16th World Conference on Non-destructive Testing, Montreal, August 30 - September 3, 2004, http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/laser_ultrasonics/682_campagne.pdf

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

- [13] Dattoma V., Marcuccio R., Pappalettere C. and Smith G.M., *Thermographic investigation of sandwich structure made of composite material*, NDT&E International, 34, 2001, 515-520.
- [14] Degischer H.P. and Kottar A., *Considerations on Quality Features*, in Handbook of Cellular Metals, Hans-Peter Degischer H.P. and Kriszt B. ed., Wiley-VCH, 2002.
- [15] Degischer H.P., *Material Definitions Processing, and Recycling*, in Handbook of Cellular Metals, Hans-Peter Degischer H.P. and Kriszt B. ed., Wiley-VCH, 2002
- [16] Elmoutaoukkil A., Salvo L. and Maire E., *2D and 3D Characterization of Metal Foams Using X-ray Tomography*, Advanced Engineering Materials, 4(10), 2002, 803-807.
- [17] Evans A.G., Hutchinson J.W. and Ashby M.F., *Multifunctionality of cellular metal system*, Progress in Materials Science, 43, 1999, 171-221.
- [18] Gibson L.J. and Ashby M.F., *Cellular solids. Structure and properties*, 2nd edition, Cambridge University Press, 1997.
- [19] Gieske J.H. and Rumsey M.A., *Nondestructive Evaluation (NDE) of Composite/Metal Bond Interface of a Wind Turbine Blade Using an Acousto-Ultrasonic Technique*, 1997 ASME Wind Energy Symposium, AIAA/ASME, 1997, 249-254.
- [20] Goebbels J., Illerhaus B., Onel Y., Riesemeier H., Weidemann G., *3D-computed tomography over four orders of magnitude of X-ray energies*, 16th World Conference on Non-destructive Testing, Montreal, August 30- September 3, 2004, http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/radiography/559_goebbels.pdf
- [21] Helfen L., Baumbach T., Banhart J., Stanzick H., Cloetens P., Ludwig W. and Baruchel J., *High resolution radioscopy and tomography for light materials and devices*, Proc. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, AIPnD (Ed.), October 2000, Rome.
- [22] Hu C.W., Shih J.K.C., Delpak R. and Tann D.B., *Detection of Air Blisters and Crack Propagation in FRP Strengthened Concrete Elements Using Infrared Thermography*, Inframation 2002 Applications Conference, September 29 – October 2, 2002, Orlando, Florida
- [23] <http://www.flirthermography.com/media/21%20Hu%202002s.pdf>
- [24] Huang Y.D., Froyen L. and Wevers M., *Volume 5: Quality control and nondestructive tests in metal matrix composites*, MMC-Assess Thematic Network, MMC-Assess Consortium, Institute of Materials Science and Testing, Vienna Univ. of Techn., 2000.
- [25] Hung Y.Y., Luo W.D., Lin L. and Shang H.M., *Evaluating the soundness of bonding using shearography*, Composite Structures, 50, 2000, 353-362.
- [26] Jasiūniene E., Illerhaus B. and Goebbels J., *“3D investigations of metallic foams by micro tomography”*, Proc. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, AIPnD (Ed.), Rom 15 - 21 October, 2000, Rome, ID-Nr. 170; CD-ROM.
- [27] Kim A., Hasan M.A. and Nahm S.H., *A non destructive electrical method for evaluating mechanical properties of Al-foam*, 16th World Conference on Non-destructive Testing, Montreal, August 30- September 3, 2004, http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/materials_characterization/504_nahm.pdf

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

- [28] Krishnamurthy S., Matikas T.E. and Karpur P., *Ultrasonic evaluation of the processing of fiber-reinforced metal matrix composites*, Composites Science and Technology, 54, 1995, 161-168.
- [29] Lee J.H. and Park Y.C., *Nondestructive characterization of Metal Matrix Composite by ultrasonic measurement*, Composites Engineering, Vol. 5 (12), 1995, 1423-1431.
- [30] Louis L., Wong T.F. and Baud, P. *Imaging strain localization by X-ray radiography and digital image correlation: Deformation bands in Rothbach sandstone*, Journal of Structural Geology, 29, 2007, 129-140.
- [31] Ma X. and Peyton A.J., *Eddy Measurements of the Electrical Conductivity and Porosity of Metal Foams*, IMTC 2004-Instrumentation and Measurements Technology Conference, 18- 20 May, 2004, Como (Italy).
- [32] Maire E., Babout L., Buffiere J.Y. and Fougères R., *Recent results on 3D characterisation of microstructure and damage of metal matrix composites and a metallic foam using X-ray tomography*, Materials Science and Engineering, A319-321, 2001, 216-219.
- [33] Maierhofer Ch., Arndt R. and Rölling M., *Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography*, Infrared Physics and Technology, 49, 2007, 213-217.
- [34] Maldague X., *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, 2001, John Wiley, New York.
- [35] Mazumdar S.K., *Composites Manufacturing, Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press, 2002.
- [36] Meola C., Carlomagno G.M. and Giorleo G., *Using infrared thermography to analyze substrate and adhesive effects in bonded structures*, Journal of Adhesion Science and Technology, 18 (6), 2004, 617-634.
- [37] Meola C., Carlomagno G.M., Squillace A. and Vitello A., *Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography*, Engineering Failure Analysis, 13, 2006, 380-388.
- [38] Mortensen A., SanMarchi C. and Degischer H.P., *Volume 1: Glossary of terms specific to Metal Matrix Composites*, MMC-Assess Thematic Network, MMC-Assess Consortium, Institute of Materials Science and Testing, Vienna Univ. of Techn., 2000.
- [39] Müller B.R, Lange A., Harwardt M., Hentschel M.P., Illerhaus B., Goebbels J., Bamberg J. and Heutling F., *X-Ray Refraction Topography for NDE of Lightweight Materials*, ECNDT 9th European NDT Conference, 25-29 September, 2006 , Berlin, Germany.
- [40] Queheillalt D.T., Sypeck D.J. and Wadley H.N.G., *Ultrasonic characterization of cellular metals structures*, Materials Science and Engineering, A(323), 2002, 138-147.
- [41] Quin Y.W. and Bao N.K., *Infrared Thermography and its Application in the NDT of Sandwich Structures*, Optics and Lasers in Engineering, 25, 1996, 205-211.
- [42] Olurin O.B., Arnold M., Körner C. and Singer R.F., *The investigation of morphometric parameters of aluminium foams using micro-computed tomography*, Materials Science and Engineering, A328, 2002, 334-343.

METODOLOGIE DI CONTROLLO DELL'INTEGRITÀ DI COMPONENTI REALIZZATI CON MATERIALI NON CONVENZIONALI

- [43] Rack A., Haibel A., Bütow A., Matijasevic B. and Banhart J., *Characterization of metal foams with synchrotron-tomography and 3D image analysis*, 16th World Conference on Non-destructive Testing, Montreal, August 30- September 3, 2004, http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/materials_characterization/370_rack.pdf
- [44] Raj B., Rajendran V. and Palanichamy P., *Science and Technology of Ultrasonics*, Alpha Science Int., 2004.
- [45] Riegert G., Plefeiderer H., Gerhard H., Solodov I. and Busse G., *Modern Methods for Inspection of Aerospace Structures*, ECNDT 9th European NDT Conference, 25-29 September, 2006, Berlin, Germany.
- [46] Rodriguez-Perez M.A., Reglero J.A., Lehmkus D., Wichmann M., de Saja J.A. and Fernandez A., *The transient plane source technique (TPS) to measure thermal conductivity and its potential as a tool to detect in-homogeneities in metal foams*, Internat. Conf. Advanced Metallic Materials, 5-7 November, 2003, Smolenice, Slovakia.
- [47] Rosset W.S., *Nondestructive Evaluation of a Metal Matrix Composite*, Report N. ARL-TR-3118, 2003, US Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5069, USA.
- [48] Roth D.J., Bodis J.R. and Bishop C., *Thermographic Imaging for High-Temperature Composite Materials—A Defect Detection Study*, Research Nondestructive Evaluation, 1997 (9), 147-169.
- [49] Simancik F., *Introduction: The Strange World of Cellular Metals*, in Handbook of Cellular Metals, Hans-Peter Degischer H.P. and Kriszt B. ed., Wiley-VCH, 2002.
- [50] Spencer F.W., *Detection Reliability for Small Cracks Beneath Rivet Heads Using Eddy-Current Nondestructive Inspection Techniques*, DOT/FAA/AR-97/73, 1998, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration- Office of Aviation Research, Washington, DC 20591, USA.
- [51] Wevers M., de Meester P. and Swennen R., *Microfocus X-ray Computer Tomography in Materials Research*, Proc. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, AIPnD (Ed.), October 2000, Rome.
- [52] Wu D., Zweschper Th., Salerno A. and Busse G., *Lock-in Thermography for Nondestructive Evaluation of Aerospace Structures*, ENCDT'98 7th Europ. Conf. on Non-destructive Testing, Copenhagen, 26-29 May 1998, <http://www.ndt.net/abstract/ecndt98/aero.htm>.
- [53] Whitehead S., McDonald M. and Bartholomeusz R.A., *Loading, Degradation and Repair of F-111 Bonded Honeycomb Sandwich Panels- Preliminary Study*, DSTO-TR-1041, 2000, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne, Victoria 3001, Australia.
- [54] Yang S., Gu L. and Gibson R.F., *Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composites structures*, Composites Structures, 51, 2001, 63-71.