

## CAPITOLO V

### **Realizzazione e Caratterizzazione di Trasduttori ad Ultrasuoni con Saldature senza Piombo**

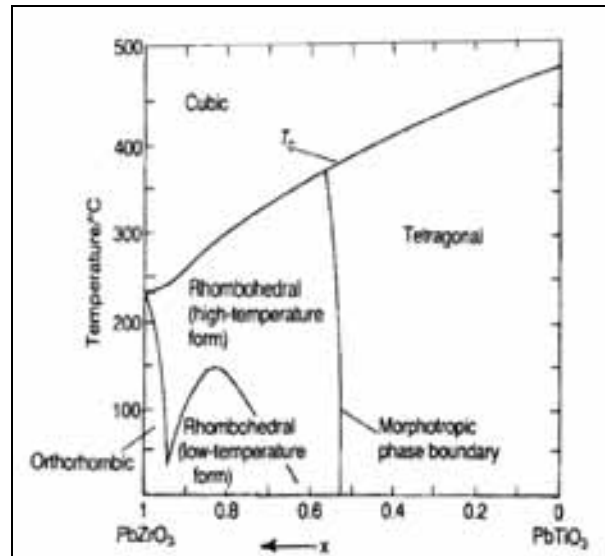
#### **5.1 Array di trasduttori ad ultrasuoni per applicazioni biomediche**

I risultati sulla possibilità di utilizzo di nuove leghe o adesivi elettricamente conduttivi in sostituzione della consolidata tecnologia Sn-Pb sono incoraggianti, infatti anche le misure di resistenza elettrica dopo le prove effettuate sui campioni di saldatura hanno mostrato che non si sono verificati malfunzionamenti. Date queste premesse in questa fase del lavoro di ricerca sarà implementato un processo di saldatura su trasduttori ad ultrasuoni per realizzare il contatto tra una piastrina piezoelettrica ed un pettine di micro contatti. Saranno sperimentate cinque tipologie di leghe senza piombo e due adesivi elettricamente conduttivi.

Il materiale piezoelettrico su cui applicheremo le nostre sperimentazioni è un policristallino, il PZT (Titanato Zirconato di Piombo),

Fra tutte le ceramiche piezoelettriche il PZT è il materiale più utilizzato in quanto, avendo una struttura microcristallina ed essendo ferroelettrico, in particolari condizioni ha proprietà piezoelettriche molto più marcate rispetto a qualunque altro materiale analogo (Figura 5.1) [82].

Numerose sono le elaborazioni della ceramica piezoelettrica, tra cui i drogaggi, che permettono di realizzare PZT con caratteristiche specifiche all'applicazione desiderata, che consentono quindi di variare la temperatura di Curie o la permittività.



**Figura 5.1:** struttura cristallina del PZT in funzione della temperatura e della concentrazione di Zirconio e di Titanio.

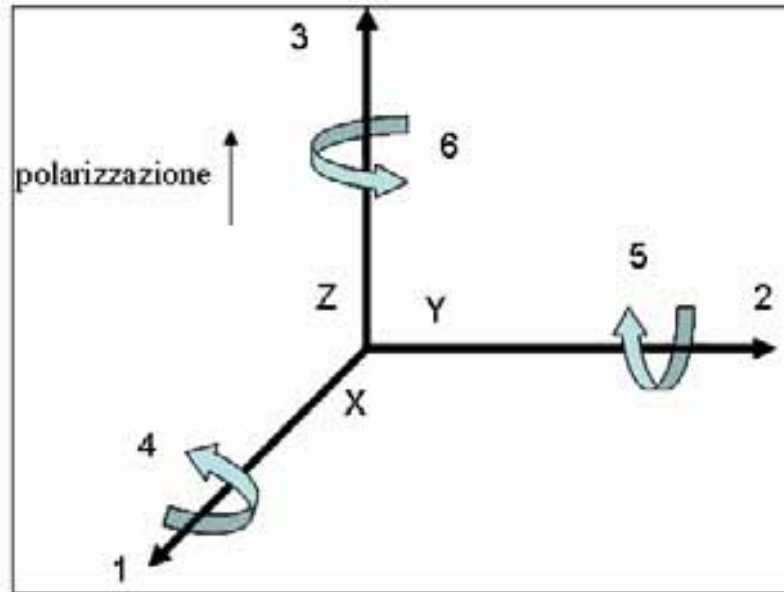
Qualunque materiale ceramico elettrostrittivo, come il PZT, ha una struttura inizialmente isotropa; al fine di renderlo piezoelettrico i domini ferroelettrici, di norma disposti casualmente, devono essere allineati tra loro ricorrendo ad una polarizzazione (poling) del materiale. Questo processo consiste nell'applicare una tensione continua attraverso il materiale, che fa sì che i domini ferromagnetici tendano ad allinearsi al campo indotto, rendendo il materiale piezoelettrico. Selezionando opportunamente la tensione di poling, ad esempio tale da creare un campo elettrico attorno ai 20 kV/cm, la temperatura e il tempo di esposizione, è possibile rendere la quasi totalità dei domini ferromagnetici congruamente orientata. Il PZT, così trattato, assume una struttura anisotropa dovuta alla polarizzazione, che può essere rimossa solo applicando una tensione opposta a quella di poling o esponendo il materiale ad una temperatura sopra a quella del suo punto di Curie.

Un PZT, come spiegato poco sopra, presenta una struttura anisotropa; visto quindi che ogni grandezza tipica del materiale varierà a seconda della direzione prescelta, per convenzione si identificano gli assi x, y e z con i numeri 1, 2 e 3; la polarizzazione è solitamente posta lungo l'asse 3 (Figura 5.2).

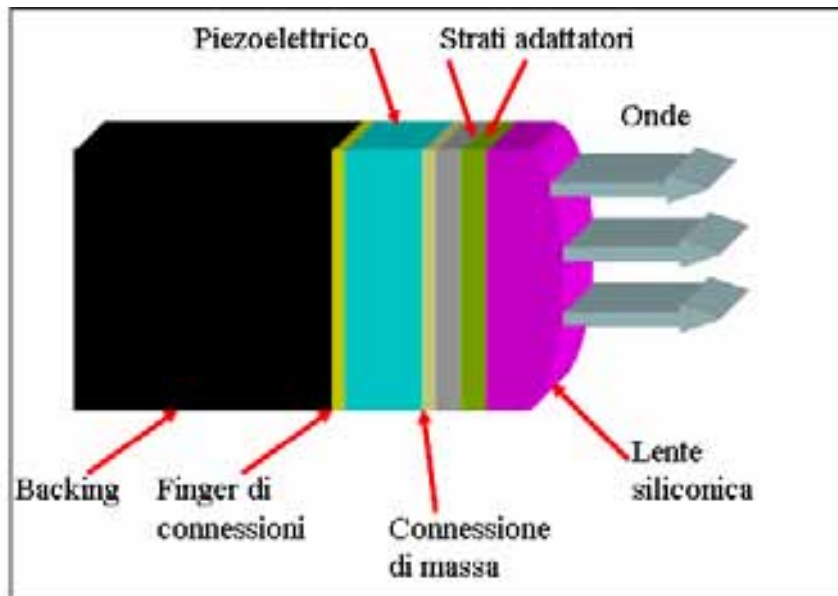
Ogni PZT è definito attraverso un ampio numero di parametri, tra i fondamentali i coefficienti di sforzo o deformazione ( $d_{ij}$ ), il modulo di Young (Y) ed i coefficienti dielettrici relativi ( $\epsilon_{ij}$ ). I doppi pedici collegano quantità elettriche e meccaniche: il pedice i è collegato all'eccitazione e j alla risposta del sistema. In pratica:  $d_{31}$  entra in gioco se il campo elettrico è lungo l'asse 3 (quella di polarizzazione) e lo sforzo lungo l'asse 1.

Il coefficiente di deformazione "d" è il rapporto tra la deformazione ottenuta ed il campo applicato, il parametro duale è il coefficiente di tensione "g" dato dal rapporto del campo misurato ed il carico applicato.

Tra i vantaggi che l'uso del PZT comporta sono da annoverare l'alta efficienza elettromeccanica, una costante dielettrica elevata e la facile lavorabilità. Inoltre questo materiale mantiene le caratteristiche piezoelettriche a temperature superiori ai 100°C, avendo un punto di Curie tipicamente oltre i 200°C, ad esempio per il PZT usato in questa sperimentazione tale valore è attorno ai 230°C.



**Figura 5.2:** convenzioni sui pedici dei parametri di un materiale piezoelettrico

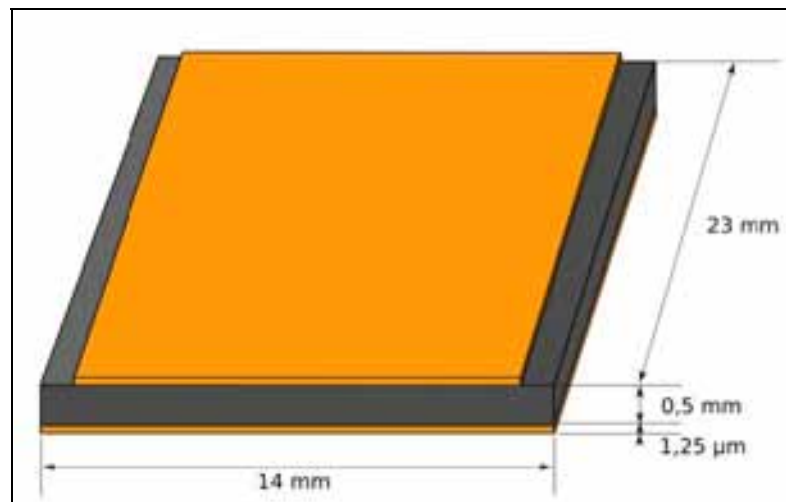


**Figura 5.3:** schema strutturale di un trasduttore piezoelettrico realizzato con PZT

Il piezoelettrico in esame viene utilizzato per la realizzazione di un trasduttore ad ultrasuoni per applicazioni biomediche. In Figura 5.3 si riporta la schematizzazione della struttura del trasduttore, dove si evidenziano una serie di strati di adattamento di impedenza, chiamati matching layer, necessari per compensare la discrepanza tra le impedenze acustiche dei materiali che congiungono, infatti il maggiore svantaggio del PZT è da identificarsi nell'elevata impedenza acustica, indicativamente attorno ai 30 MRayls, che è eccessivamente superiore a quella media dei tessuti organici che si attesta su 1,5 MRayls [59].

I campioni realizzati sono costituiti da uno strato di ceramica (Figura 5.4) e da un pettine (connettori) di microconnessioni, collegati tramite la saldatura oggetto di questa ricerca. Nel caso specifico, la ceramica è una piastrina in PZT rivestita da uno strato di Oro (Figura 5.5). Di seguito si riportano le caratteristiche geometriche del materiale:

- Le dimensioni della ceramica sono 23 x 14 mm;
- Lo spessore della piastrina è  $0,51 \pm 0,0015$  mm;
- Entrambe le superfici sono rivestite da uno strato d'oro di  $1,25 \mu\text{m}$  (Figura 5.4a e b);
- La superficie superiore (Figura 5.4a) ha i due bordi esterni senza alcun rivestimento; la larghezza delle due fasce laterali è di 0,5 mm.



**Figura 5.4:** schematizzazione della piastrina di PZT



**Figura 5.5:** sezione della ceramica PZT (dimensioni non in scala).

Per quantificare la frequenza di risonanza del trasduttore occorre considerarne le caratteristiche geometriche:

$$\lambda = 2 \cdot d \quad (5.1)$$

$$f_r = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot d} \quad (5.2)$$

dove:

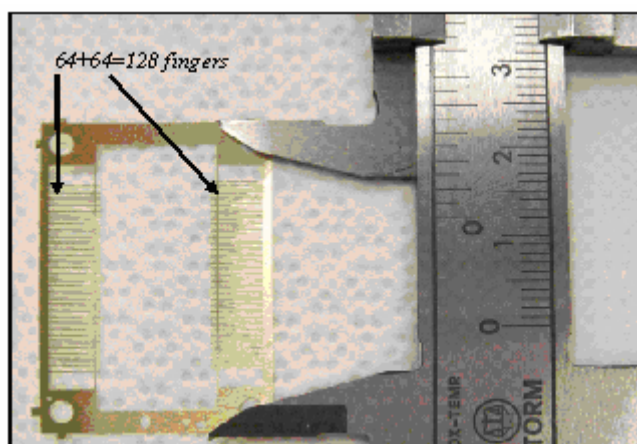
- $\lambda$  = lunghezza d'onda
- $d$  = spessore della piastrina;
- $f_r$  = frequenza di risonanza
- $c$  = velocità del suono nella ceramica;

Perciò la frequenza di risonanza del trasduttore considerato è:

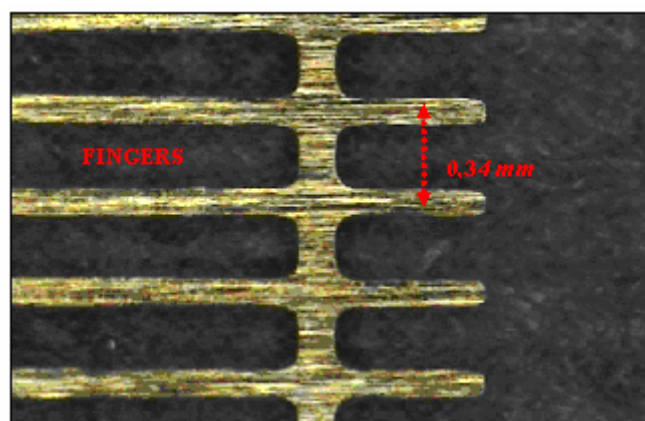
$$f_r = \frac{4 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,51 \cdot 10^{-3}} = 3,92 \text{ MHz} \quad (5.3)$$

Per la realizzazione dell'array il trasduttore subirà una fase di taglio per la realizzazione dei 128 elementi, in tale fase la frequenza di risonanza del materiale potrebbe variare, per cui la velocità di lavorazione viene limitata ai 4 mm/sec d'avanzamento, inoltre varieranno anche il modo di vibrazione in funzione del rapporto spessore/larghezza e di conseguenza variano i valori di velocità, di frequenza di risonanza, di antirisonanza ed il fattore d'accoppiamento.

Il pettine metallico che sarà saldato con la ceramica, per la realizzazione delle microconnessioni elettriche, ha dimensioni  $3,7 \times 2$  cm, spessore 30  $\mu\text{m}$ , anima in ottone ed è costituito da un insieme di "fingers" (Figura 5.6). Il numero totale di fingers è di 128; 64 per ogni lato, per 10 mm di lunghezza ciascuno e posti ad una distanza di 0,34 mm l'uno dall'altro (Figura 5.7).



**Figura 5.6:** pettine di microconnessioni in ottone



**Figura 5.7:** particolare del pettine in cui si notano i singoli finger e la loro distanza

## **5.2 Implementazione di nuovi processi di saldatura per Trasduttori ad Ultrasuoni**

### **5.2.1 Saldatura con leghe senza Piombo**

In questo lavoro sono state realizzate saldature indirette, dove il “metallo fuso” apportato è costituito dalle leghe saldanti senza Piombo, le cui caratteristiche principali sono mostrate in Tabella 5.1.

**Tabella 5.1:** leghe selezionate per le saldature.

<b>Lega</b>	<b>Temp. di Fusione</b>	<b>Spessore Filo</b>	<b>Flussante Interno</b>	<b>Flussante Esterno</b>
<i>Sn62Pb38</i>	183 ÷ 190 °C	Lega già depositata sul pettine	/	Kester 1544 Activated Rosin Liquid Flux
<i>In52-Sn48</i>	118 °C	Lega già depositata sul pettine	/	Kester 1544 Activated Rosin Liquid Flux
<i>Sn95,5Ag3,8Cu0,7 (SAC387)</i> <i>Felder, Löttechnik</i>	217 °C Eutettica	0.75 mm	RA Flux 2,5% standard	Kester 1544 Activated Rosin Liquid Flux
<i>Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC305)</i> <i>Alpha Fry</i>	217 ÷ 218 °C	0.75 mm		Kester 1544 Activated Rosin Liquid Flux
<i>Sn99Ag0,3Cu0,7 (SACX0307)</i> <i>Alpha Fry</i>	217 ÷ 228 °C	0.75 mm	Alpha Fluitin 1532 SACX Flux No Clean 3,3%	Kester 1544 Activated Rosin Liquid Flux
<i>Bi57Sn42Ag1 (Ingot)</i> <i>AIM Products LLC</i>	138 °C	0.5 mm		RA 312 Flux

Per la realizzazione dei campioni è stato necessario depositare sui pettini le 6 leghe selezionate. In particolare per quanto riguarda le leghe Sn62-Pb38, campione di riferimento realizzato con la consolidata tecnologia di saldatura, e In52-Sn48 la deposizione è stata effettuata tramite bagno galvanico. La deposizione delle altre leghe è invece stata realizzata attraverso un processo di deposizione manuale.

I valori degli spessori singoli di In e Sn per i pettini saldati con In52-Sn48 e Sn62-Pb38, con deposizione galvanica, sono indicati in Tabella 5.2; i valori s'intendono sempre come media di misure eseguite con fluorescenza ai raggi-X, tramite strumento Fischerscope.

La pulizia dopo la surfusione, cioè la fase di rimozione dell'olio, è stata eseguita per passaggi successivi in Acetone, Alcol Etilico e Solv-3000 in lavatrice ad ultrasuoni (EIA).

**Tabella 5.2:** caratteristiche di deposizione dei quattro pettini In-Sn

Pettini In52-Sn48	5,47± 0,25 µm
Spessore In	2,43±0,01 µm
Spessore Sn	3,03±0,25 µm
Rapporto In\Sn	0,53/0,47
Surfusione	175 °C a 10 secondi
Pettini Sn62-Pb38	7,219 ± 0,460 µm
Rapporto Sn/Pb	0,62/0,38

Come osservato in precedenza le leghe Sn-Pb e Sn-In sono state predepositate sui pettini tramite bagno galvanico, mentre le altre leghe senza Piombo vengono depositate con tecniche differenti, solitamente viene utilizzata la HASL (Hot Air Solder Leveling), che prevede immersione in un pozzetto di lega fusa e livellamento con getti d'aria calda. Purtroppo date le caratteristiche di sottigliezza e fragilità dei pettini di ottone, dopo diversi tentativi sperimentali, si è dovuto escludere la possibilità di applicare questa tecnica ed è stato necessario sviluppare una tecnica di deposizione manuale, con caratteristiche tali da permettere, per quanto possibile, la ripetibilità dei campioni e quindi la possibilità di confrontare i risultati trovati.

La deposizione della lega viene fatta sia sul pettine che sulla ceramica per aumentare la coesione delle interfacce in fase di rifusione. Al fine di eseguire un processo di saldatura, possibilmente ripetibile, tutte le operazioni sono state eseguite utilizzando un microscopio ottico 10x Nikon.

Di seguito sono analizzate le cinque fasi che caratterizzano il processo di deposizione della lega sul trasduttore e sulle microconnessioni:

#### *1. Realizzazione delle fasce laterali sulla ceramica*

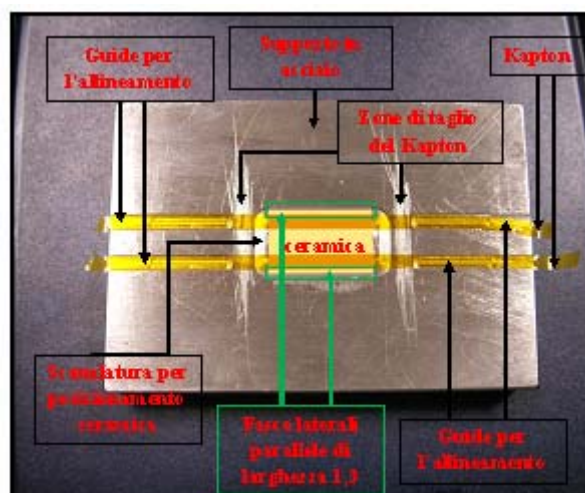
Il processo di deposizione inizia con il posizionamento della ceramica su di un supporto in metallo appositamente realizzato, che presenta una scanalatura della stessa larghezza e profondità della ceramica e quattro guide che permettono di selezionare con precisione le fasce laterali dove verrà successivamente deposta la lega (Figura 5.8). Per garantire una stesura accurata della lega sulla superficie laterale della ceramica, è stato utilizzato il "kapton" per la realizzazione delle maschere e per mantenere pulito il piano interno della piastrina su cui si applica il nastro stesso. La larghezza del nastro è di 3 mm per



uno spessore di 0,07 mm. Il kapton è stato posizionato sulla ceramica seguendo le guide create sul supporto, in modo da creare due fasce laterali parallele di larghezza 1,3 mm, sulle quali sarà successivamente depositato il fluxante e la relativa lega.

La distanza e la posizione delle guide, e di conseguenza lo spessore delle fasce laterali, sono state scelte in base all'affacciamento delle punte dei fingers del pettine, che dovranno essere saldate in seguito sulla ceramica.

Infine viene tagliato il kapton esternamente alla scanalatura del supporto, nelle zone mostrate in Figura 5.8; la parte di kapton rimanente viene usata per fissare la ceramica durante la fase di deposizione.



**Figura 5.8:** supporto in acciaio con scanalatura per ceramica e guide di riferimento per realizzare le fasce laterali parallele dove verrà deposita la lega di saldatura

## 2. Deposizione della lega sulla ceramica

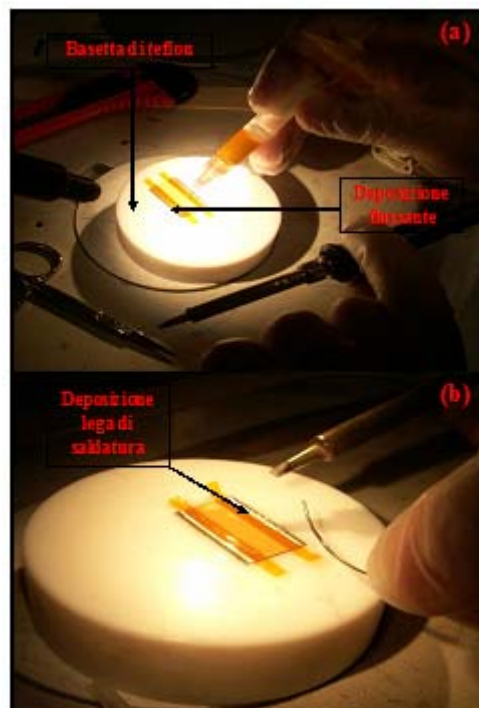
Posizionata la ceramica con le due fasce di kapton su di una basetta di teflon, materiale inerte che impedisce alla ceramica di incollarsi/saldarsi con il supporto stesso; si procede al flussaggio delle due fasce laterali precedentemente create. La deposizione del fluxante, in aggiunta a quello presente all'interno delle leghe, serve per migliorare la bagnabilità della lega e di conseguenza la deposizione o la saldatura stessa.

Successivamente è stata eseguita la deposizione della lega di saldatura lungo le due fasce parallele sulla ceramica, cercando di creare uno strato di lega omogeneo. Per eseguire tale operazione è stato utilizzato un saldatore Walker con regolazione di temperatura, la cui punta, di dimensione opportuna per il lavoro da eseguire, è stata appositamente selezionata per materiale RoHS-compliant. La regolazione della temperatura è stata effettuata in base alla temperatura di fusione delle leghe da depositare, come mostrato in Tabella 5.3.

La fase di deposizione della lega sulla ceramica è mostrata in Figura 5.9.

**Tabella 5.3:** temperatura impostata sul saldatore e fluxante usato per deposizione.

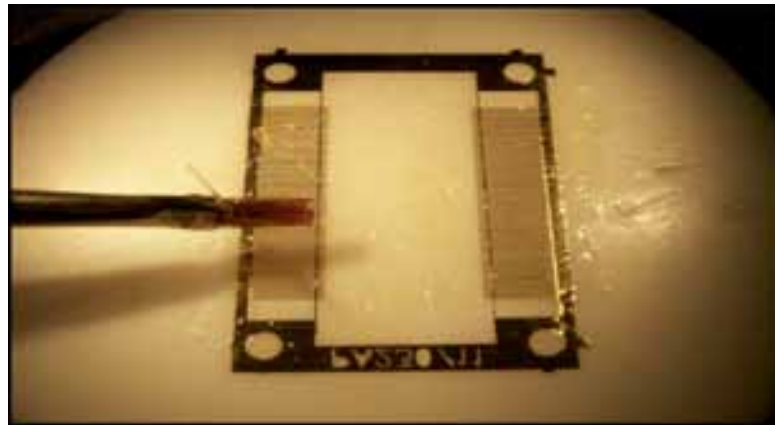
Lega	Temperatura di Fusione	Temperatura Saldatore	Flussante Usato
<b>Sn95,5Ag3,8Cu0,7 (SAC387)</b> Felder, Löttechnik	217 °C	270 °C	Kester 1544 Activated Rosin Liquid
<b>Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC305)</b> Alpha Fry	217 ÷ 218 °C	270 °C	Kester 1544 Activated Rosin Liquid
<b>Sn99Ag0,3Cu0,7 (SACX0307)</b> Alpha Fry	217 ÷ 228 °C	280 °C	Kester 1544 Activated Rosin Liquid
<b>Bi57Sn42Ag1 (Ingot)</b> AIM Products LLC	138 °C	180 °C	RA 312 AIM solder

**Figura 5.9:** deposizione del fluxante (a) e della lega saldante (b).

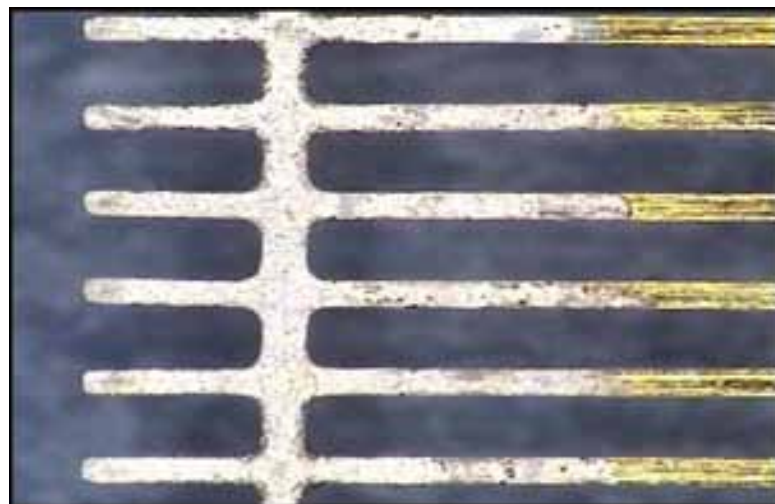
### 3. Deposizione della lega sul pettine

In questa fase il fluxante è molto importante perché oltre ad agevolare la deposizione, permette alla lega di depositarsi solamente sui fingers e quindi di non creare uno strato di lega tra i fingers stessi. Inoltre il fluxante fa sì che il pettine rimanga aderente al

teflon. In Figura 5.10 è mostrata la deposizione del flussante a pasta AIM RA 312, usato sia per la fase di deposizione sia per la fase di saldatura con lega Bi57-Sn42-Ag1. La deposizione inizia con il posizionamento del pettine grezzo sulla basetta di teflon opportunamente pulita dal flussante precedentemente depositato durante la seconda fase. In seguito, con l'aiuto del microscopio, si flussano le punte dei fingers con il flussante specifico per la lega utilizzata e in seguito si deposita la lega di saldatura sulle stesse punte, cercando di ottenere una quantità costante di lega su ogni finger e tra finger e finger, come mostrato in Figura 5.11. Questo processo è ripetuto per entrambi i lati e le facce del pettine. Questa fase permette di avere uno strato di lega sulla ceramica e sul pettine sufficientemente spesso per effettuare una rifusione tale da saldare adeguatamente le due parti.



**Figura 5.10:** deposizione del flussante, nel caso specifico AIM 312 per lega Bi-Sn-Ag



**Figura 5.11:** particolare di un pettine con lega Bi-Sn-Ag depositata “manualmente”.

#### 4. Pulizia dal flussante e verifica ottica

Dopo aver depositato la lega nelle zone d'interesse della ceramica e del pettine, viene eseguita la pulizia dal flussante attraverso un processo ad ultrasuoni e l'utilizzo di appositi solventi.

In seguito viene effettuato il controllo della deposizione della lega al microscopio ottico (10x), per verificare la presenza di uno strato omogeneo sulle fasce laterali della ceramica e una quantità costante sulle punte dei fingers del pettine.

#### 5. Misura dello spessore della deposizione sulla ceramica

Successivamente alla pulizia del pettine e della ceramica viene misurato lo spessore della lega depositata per verificare l'omogeneità. E' stato possibile misurare lo spessore della deposizione solamente sulle due fasce laterali della ceramica e non del pettine, a causa della mancanza di planarità di quest'ultimo in seguito al processo di deposizione.

La misura dello spessore è stata effettuata in più punti della piastrina di ceramica ricoperta di lega attraverso un tastatore Heidenhain. In Tabella 5.4 sono riportati i valori degli spessori di deposizione delle leghe sulle ceramiche per ogni lega e per ogni campione. La media e la deviazione standard sono state calcolate considerando tutti i valori di misura di tutte le ceramiche lavorate con ciascuna lega, mentre le medie e le varianze relative ad ogni ceramica sono state ottenute considerando i sei punti di misura di ogni piastrina.

**Tabella 5.4:** spessore ceramica con deposizione sulle fasce laterali.

LEGA	Spessore [ $\mu\text{m}$ ]					
	Ceramica					Totale
	1	2	3	4	5	
<i>SAC387</i>	61,23 $\pm$ 17,96	31,33 $\pm$ 6,36	24,42 $\pm$ 7,59	30,5 $\pm$ 7,93	21,33 $\pm$ 6,02	33,76 $\pm$ 17,51
<i>SAC305</i>	41,5 $\pm$ 22,26	39,5 $\pm$ 20,51	27,75 $\pm$ 12,80	48,58 $\pm$ 15,47	41,75 $\pm$ 30,82	39,82 $\pm$ 22,35
<i>SACX0307</i>	51,25 $\pm$ 23,83	58,67 $\pm$ 17,17	41,75 $\pm$ 30,82	21,33 $\pm$ 5,02	20,5 $\pm$ 3,05	39,6 $\pm$ 25,85
<i>Bi57Sn42Ag1</i>	22,58 $\pm$ 17,10	16,33 $\pm$ 14,35	17,83 $\pm$ 9,28	14,08 $\pm$ 5,34	16 $\pm$ 4,08	17,36 $\pm$ 11,58

Come possiamo osservare i valori degli spessori delle deposizioni riguardanti le tre leghe SAC sono sufficientemente uniformi; per la lega a base di Bismuto è stato depositato uno strato più sottile per diminuire la lega in eccesso dopo la rifusione. Le variazioni presentate tra le ceramiche relative ad ogni tipo di lega e tra lega e lega non

inducono preoccupazione eccessiva perché in fase di rifusione si otterrà una omogeneizzazione degli spessori relativi alle saldature finali con il pettine.

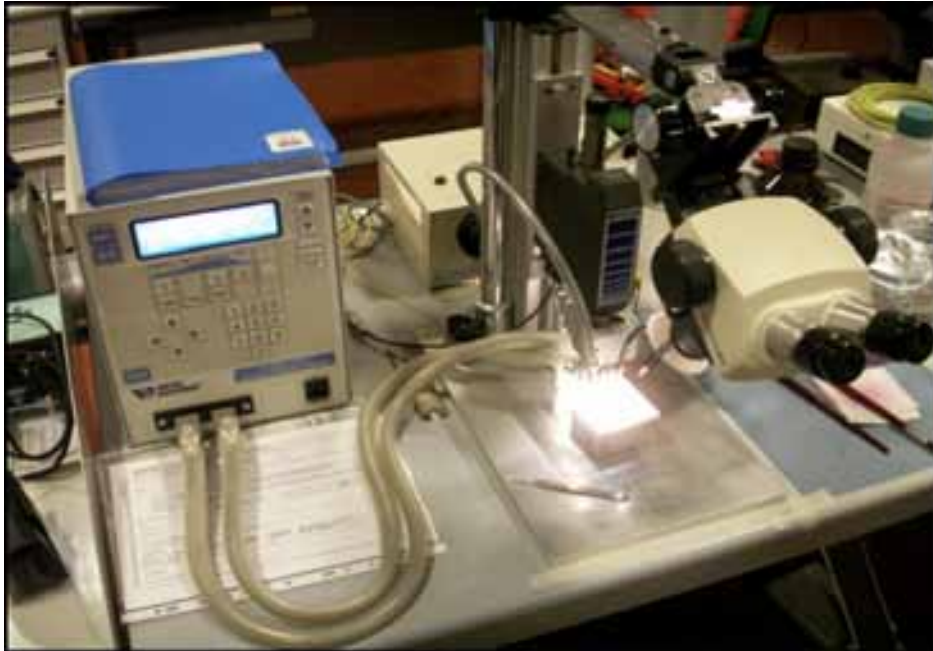
Dopo la deposizione della lega si procede con il vero e proprio processo di saldatura, che può essere descritto in quattro fasi:

- I. Posizionamento del pettine sulla ceramica; questa fase è stata realizzata tramite due tecniche differenti:
  - a. procedura di allineamento manuale per saldature Sn-In e Sn-Pb
  - b. procedura dedicata di allineamento ottimizzato per leghe SAC e SnBiAg
- II. Rifusione (reflow)
- III. Pulizia e ispezione
- IV. Misura dello spessore delle saldature.

#### *I. Posizionamento del pettine sulla ceramica*

E' stata necessario modificare la procedura manuale utilizzata fino ad oggi sia per l'impossibilità di allineare con precisione il pettine sulla ceramica manualmente, a causa della deposizione di lega sulla ceramica stessa, sia per velocizzare le operazioni e rendere il processo di saldatura maggiormente automatizzato.

Anche in questo caso le fasi di deposizione del flussante, di posizionamento del pettine sulla ceramica e la fase di controllo sono state effettuate utilizzando il microscopio ottico Nikon 10x. Il processo di rifusione è stato effettuato con la saldatrice a rifusione Uniflow Pulsed Thermode Control (Unitek Miyachi Corporation (Figura 5.12)). Questa saldatrice utilizza un tradizionale processo di saldatura a rifusione, dove la rifusione è realizzata utilizzando un elemento riscaldante chiamato thermode, che è riscaldato e raffreddato per ogni connessione. La pressione viene applicata durante l'intero ciclo di riscaldamento, compreso reflusso e raffreddamento.



**Figura 5.12:** Uniflow Pulsed Thermode Control, Unitek Miyachi.

*I.a Procedura di allineamento manuale per saldature Sn-In e Sn-Pb;*

La procedura manuale inizia con il posizionamento della ceramica su di una basetta di teflon (incollata su base in acciaio STAVAX ESR), per le caratteristiche già citate. Successivamente viene effettuata la deposizione del flussante sulla superficie laterale della ceramica nelle zone in cui verrà posizionato il pettine, per migliorare la bagnabilità della saldatura durante il processo di rifusione.

Il posizionamento del pettine sulla ceramica è un'operazione delicata, perché è necessario allineare sulla superficie laterale della ceramica i 64 fingers di entrambi i lati del pettine, in modo tale da avere una distanza perfettamente simmetrica dal bordo della ceramica stessa. Per realizzare questa operazione è necessario eseguire l'allineamento al microscopio ottico. In questo caso il flussante facilita l'operazione di adesione tra ceramica e pettine.

*I.b Procedura dedicata di allineamento ottimizzato per leghe SAC e SnBiAg*

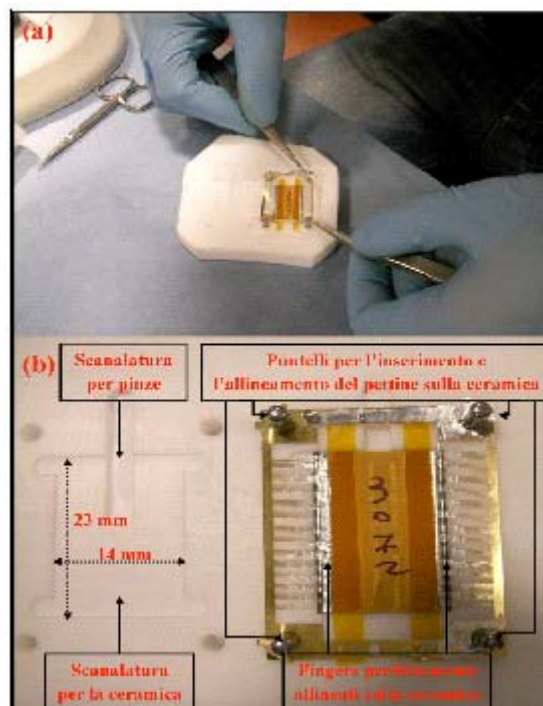
La procedura automatica prevede l'uso di un apposito supporto in teflon, dove è stata realizzata una scanalatura per il posizionamento della ceramica e quattro fori nei quali sono stati collocati dei puntelli di sezione opportuna per il fissaggio del pettine (Figura 5.13). La dimensione della scanalatura nel teflon è la stessa della ceramica (23 x 14 mm) per avere una perfetta adesione, mentre la profondità è minore (0,4 mm < 0,51 mm) per far sì che la ceramica possa sporgere dalla scanalatura stessa e aderire al pettine.

Nel progetto del supporto è stata prestata molta attenzione alla sua altezza: essa è stata realizzata in modo tale che, disponendo il supporto su di una base in acciaio Stavax, la



forza esercitata dalla saldatrice a rifusione sulla ceramica e sul pettine fosse uguale nei due processi usati. In questo modo la forza esercitata sui campioni, e di conseguenza sulle saldature Sn-In e Sn-Pb, è stata la stessa dei campioni senza Piombo, garantendo così la riproducibilità dei campioni stessi e di conseguenza la possibilità di confrontare i risultati conseguiti. L'altezza del supporto (teflon + base in acciaio) con sopra la ceramica e il pettine è di 48,54 mm e per tale valore la forza esercitata dalla saldatrice a rifusione è di 32 N. In base a tale valore e al valore dell'altezza della base in acciaio su cui deve poggiare la bassetta, è stato necessario realizzare un'altezza di  $9,7\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$ , in modo tale che, considerando la ceramica nella scanalatura con sopra il pettine, l'altezza totale fosse proprio 48,54 mm.

La posizione dei fori per i puntelli è stata progettata in modo tale da avere un perfetto allineamento dei fingers del pettine sulla ceramica, mentre la sezione dei puntelli è leggermente minore della sezione dei fori del pettine, per un perfetto scorrimento. Nel progetto della bassetta è stata creata anche un'ulteriore scanalatura per l'inserimento di pinze necessarie a sollevare il campione saldato (ceramica + pettine), senza sollecitare le saldature stesse. Inoltre è stata realizzata sulla stessa bassetta una struttura speculare a quella appena descritta per eseguire due posizionamenti contemporanei (Figura 5.13b). Dopo aver posizionato la ceramica nella scanalatura della bassetta, si inseriscono i quattro fori laterali del pettine nei quattro puntelli del supporto attraverso apposite pinze antimagnetiche (Figura 5.13a). Successivamente si procede al flussaggio delle fasce laterali dove avverrà la saldatura effettiva tra pettine e ceramica tramite rifusione.



**Figura 5.13:** posizionamento del pettine sulla ceramica (a) e risultato finale con perfettamente allineato (b)

## II. Rifusione (Reflow)

Dopo il posizionamento del pettine sulla ceramica, si procede alla saldatura delle due parti, tramite processo di rifusione. Questa operazione si divide in quattro fasi:

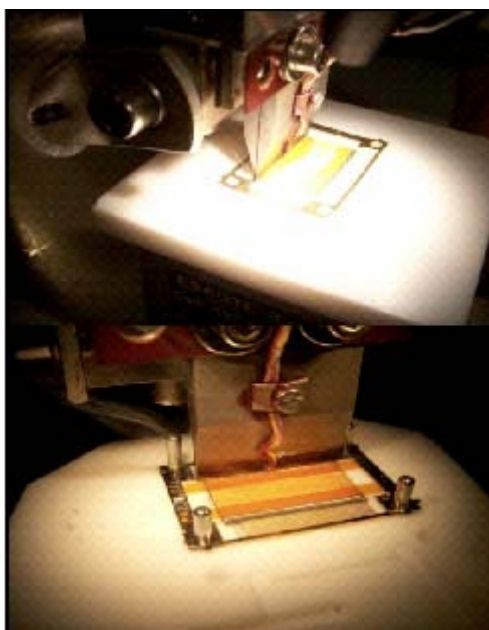
- i. Impostazione del profilo di rifusione in base alle caratteristiche della lega da saldare e alle dimensioni dei dispositivi da saldare.
- ii. Allineamento della termocoppia della saldatrice con i 64 fingers di un lato del pettine, facendo coincidere la parte terminale dei fingers con la base della termocoppia.
- iii. Saldatura effettiva tra fingers e ceramica.
- iv. Ripetizione delle fasi ii e iii per gli altri 127 fingers del pettine.

In Figura 5.14 è mostrato il particolare della saldatura a rifusione tra il pettine e la ceramica nei due processi adottati. La saldatrice a rifusione Uniflow permette di impostare il tempo e la temperatura nelle fasi di preriscaldamento e di rifusione e il tempo di salita, ma è possibile impostare solo la temperatura di raffreddamento e non il tempo con cui effettuarlo. Quindi non è possibile controllare automaticamente il tasso di raffreddamento (ramp-down rate), pur essendo una fase delicata e importante per una corretta saldatura. Questo fattore però è trascurabile nell'applicazione in esame, in quanto il campione (ceramica + pettine) è molto piccolo, quindi il raffreddamento può essere assunto uniforme e di breve durata. Dai dati acquisiti è stato valutato che il tasso di raffreddamento è compreso tra i 10 °C/sec per la lega Sn-In e i 20 °C/sec per la lega Sn-Pb, quindi molto al di sotto dei 6 °C/min consigliati dalla *IPC/JEDEC J-STD-020C* [15].

I parametri imposti per i profili di rifusione delle leghe selezionate sono riportati nella Tabella 5.5. I valori sono stati scelti in base alle considerazioni effettuate nel paragrafo 2.2.4, al tipo di applicazione specifica, considerando le caratteristiche della saldatrice Uniflow, i datasheet delle leghe, la finitura superficiale della ceramica, le sue dimensioni e quelle del pettine.

Per acquisire i dati relativi ai profili di rifusione è stato necessario mettere a punto un sistema di acquisizione controllato dal software Uniflow Remote Data Collection Software. Nelle Figure 5.15 ÷ 5.20 sono riportati i profili di rifusione implementati appositamente per le leghe selezionate per la saldatura del trasduttore.

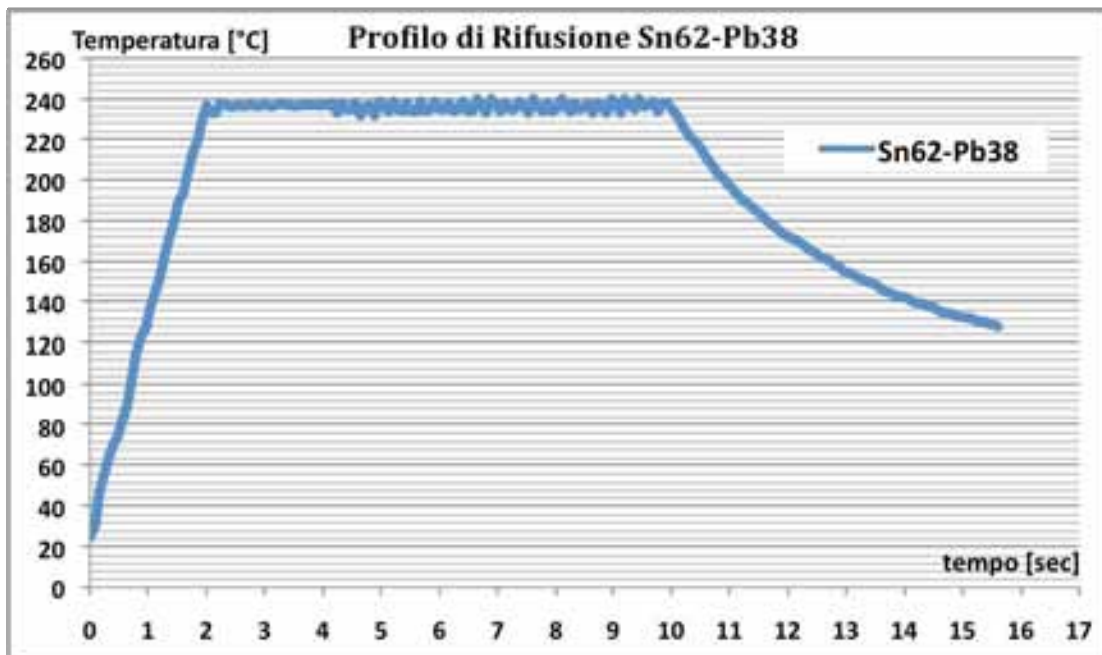




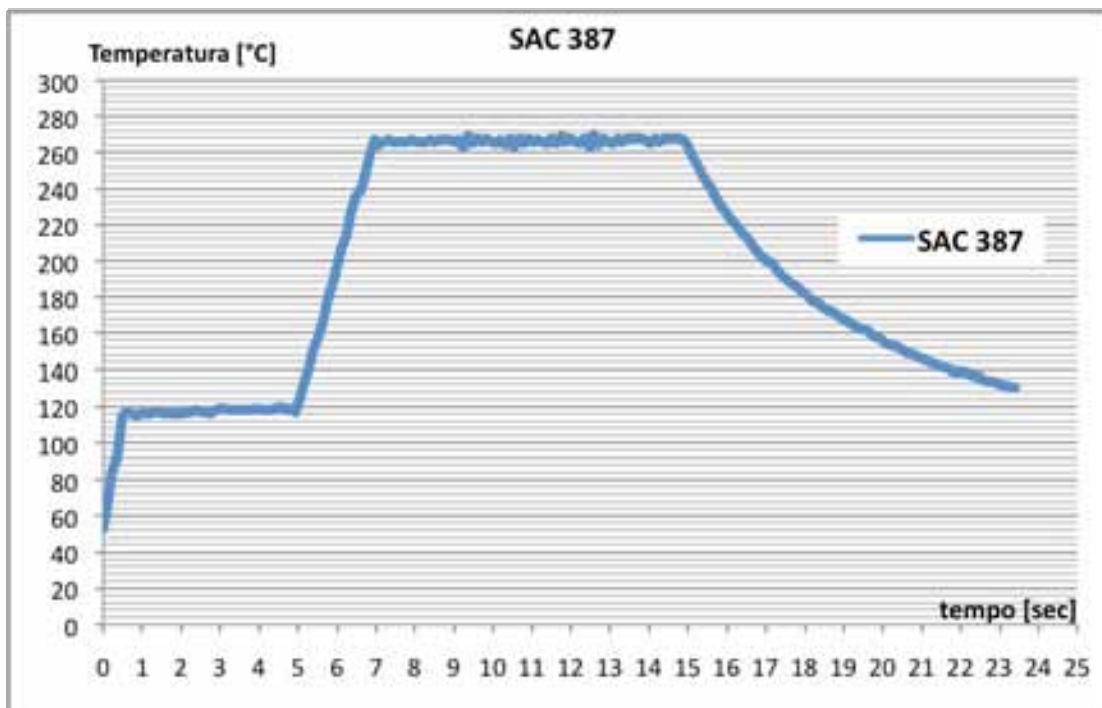
**Figura 5.14:** rifusione tra pettine e ceramica con precedente procedura

**Tabella 5.5:** Parametri dei profili di rifusione per le leghe selezionate.

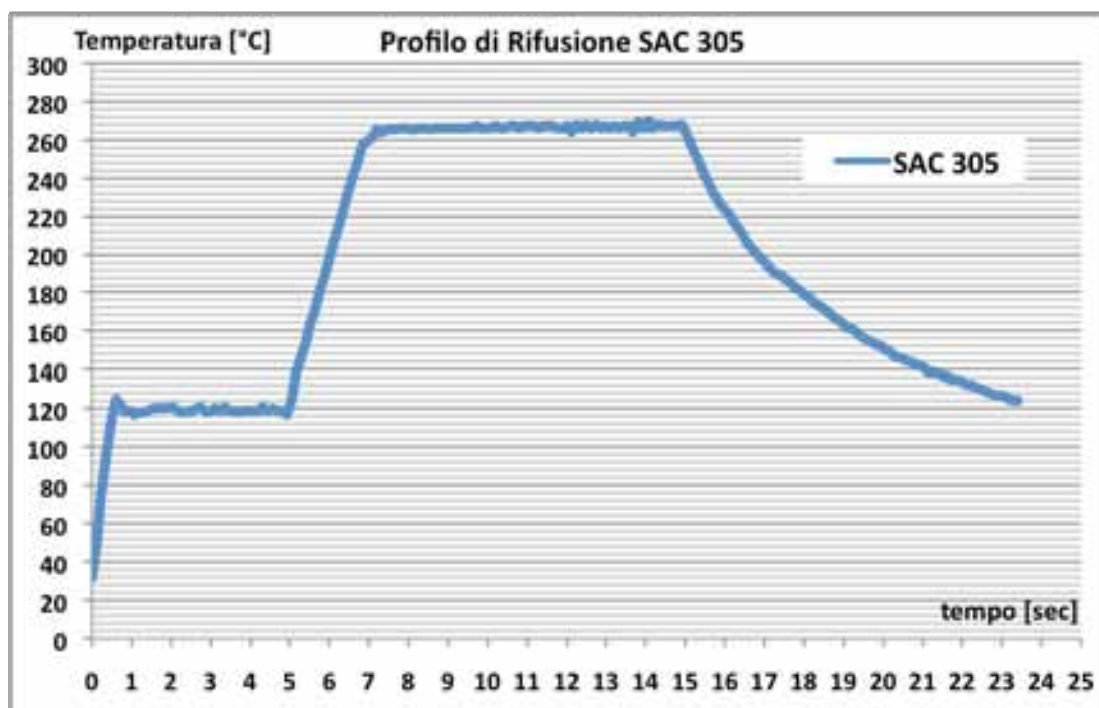
LEGA	PREHEAT		RISE	REFLOW		COOL
	T [°C]	time [s]	time [s]	T [°C]	time [s]	T [°C]
<i>Sn62Pb38</i>	100	0	2	240	8	150
<i>In52-Sn48</i>	60	0	2	160	10	80
<i>Sn95,5Ag3,8Cu0,7</i> <i>(SAC387)</i>	120	5	2	270	8	130
<i>Sn96,5Ag3Cu0,5</i> <i>(SAC305)</i>	120	5	2	270	8	130
<i>Sn99Ag0,3Cu0,7</i> <i>(SACX0307)</i>	120	5	2	280	8	130
<i>Bi57Sn42Ag1</i> <i>(Ingot)</i>	50	0	0	180	1	100



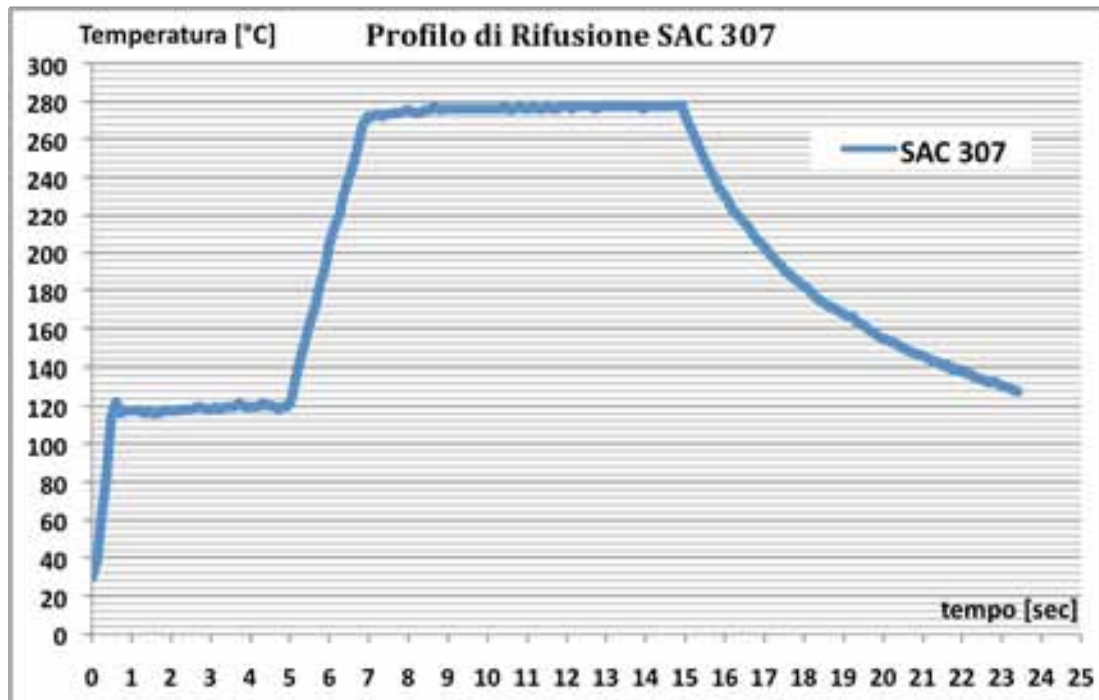
**Figura 5.15:** profilo di rifusione per la lega Sn62-Pb38



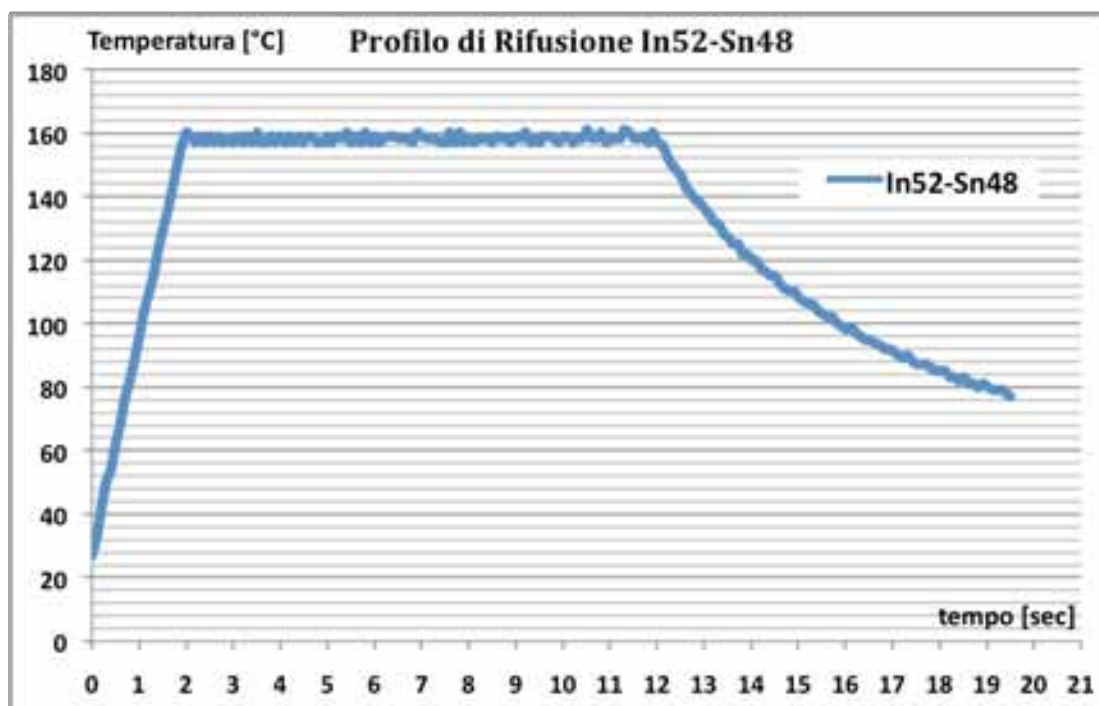
**Figura 5.16:** profilo di rifusione per la lega SAC 387



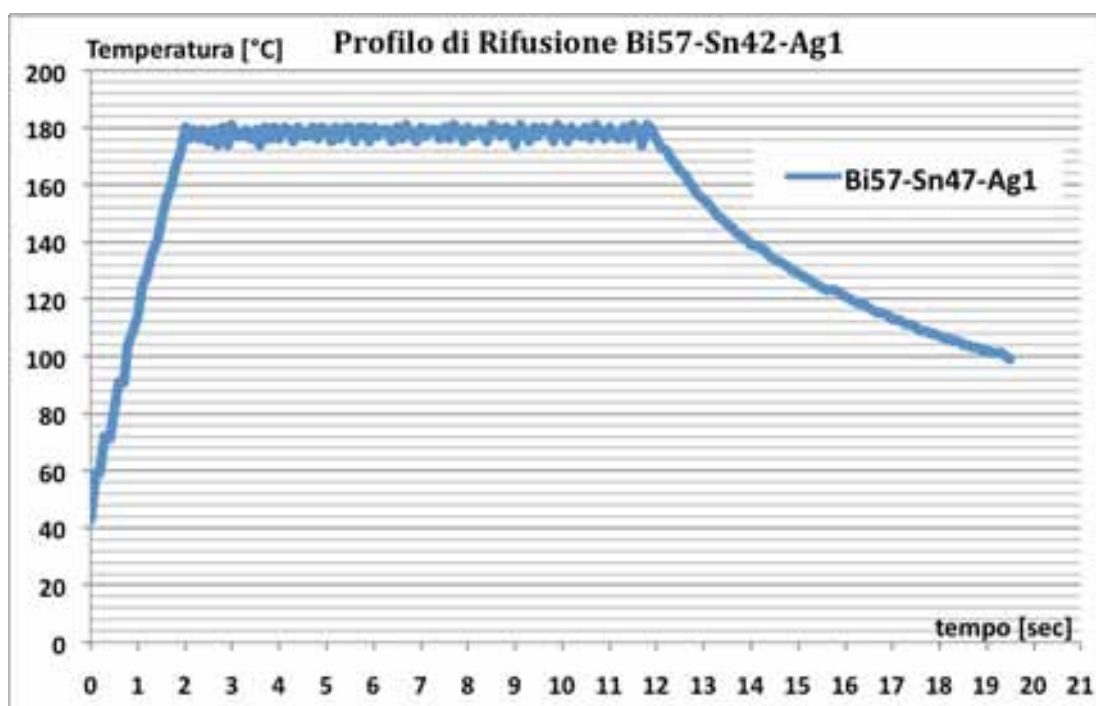
**Figura 5.17:** profilo di rifusione per la lega SAC 305



**Figura 5.18:** profilo di rifusione per la lega SAC 307



**Figura 5.19:** profilo di rifusione per la lega In52-Sn48



**Figura 5.20:** profilo di rifusione per la lega Bi57-Sn42-Ag1

### *III. Pulizia e Ispezione*

La pulizia del campione dai residui di fluxante viene eseguita attraverso un processo ad ultrasuoni, simile a quello effettuato per la pulitura durante le fasi di deposizione della lega.

Successivamente viene effettuato il controllo della saldatura al microscopio ottico, per verificare la presenza del “menisco” di saldatura e la qualità della stessa. L'ispezione deve appurare che i 128 fingers siano effettivamente saldati con la ceramica e abbiano una buona adesione alla stessa. Già in questa fase si possono notare le differenze macroscopiche tra le varie leghe saldanti, che riguardano l'aspetto e la luminosità della saldatura.

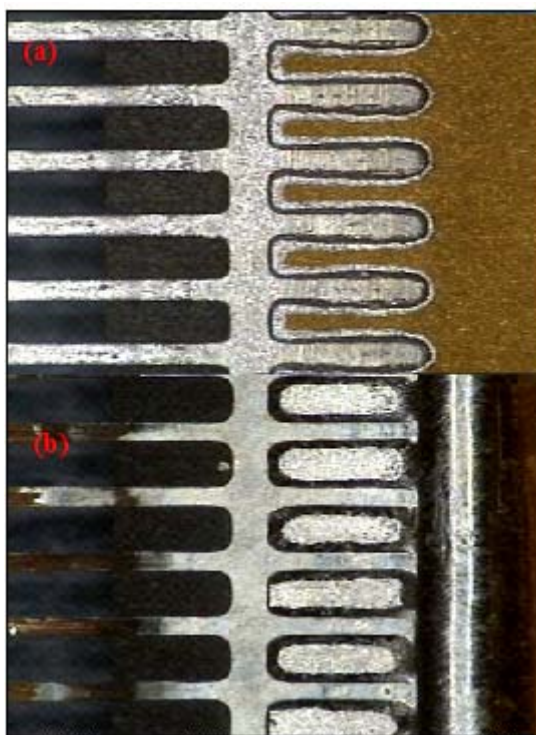
In Figura 5.21 un campione saldato con lega Sn-Pb è messo a confronto con un campione con lega SAC 307; si possono osservare alcune differenze:

- Le saldature con lega Sn-Pb risultano più lucide rispetto alle saldature con lega SAC 307.
- Nel campione con lega SAC 307 le saldature sono in corto circuito a causa della deposizione effettuata sulla ceramica e della presenza di un deposito di lega dovuto all'eccesso della stessa depositata in fase di rifusione. Questo aspetto non risulta importante in quanto successivamente i trasduttori verranno tagliati tra *finger* e *finger* per la realizzazione dell'array.

In ogni caso anche con la deposizione manuale, il risultato della saldatura mostra un'ottima adesione del pettine alla ceramica, evidenziata dalla presenza di zoccoli uniformi e ben sviluppati.

### *IV. Misura dello spessore delle saldature*

Infine si passa all'ultima fase che caratterizza l'intero processo, la verifica dell'omogeneità dei campioni prodotti. In Tabella 5.6 sono evidenziati gli spessori dei campioni, composti da ceramica, pettine e saldatura, per ogni tipologia di lega, dopo il processo di saldatura. Come si può notare gli spessori delle saldature presentano valori confrontabili con deviazioni standard contenute, sia tra campioni con stessa lega sia tra campioni di leghe diverse. Nonostante tecniche diverse di deposizione delle leghe, i valori di resistenza elettrica ottenuti sono anche essi confrontabili. Per l'esecuzione delle prove saranno presi in considerazione i campioni che presentavano valori più omogenei, evidenziati in rosso in Tabella 5.6.



**Figura 5.21:** risultati del processo di rifusione tra pettine e ceramica con lega Sn-Pb (a) e SAC 307 (b)

**Tabella 5.6:** misure dello spessore dei campioni (ceramica + pettine + saldatura)

LEGA	Spessore [µm]					Totale
	Ceramica					
	1	2	3	4	5	
<i>Sn62-Pb38</i>	43,33 ± 3,77	41,25 ± 3,12	43,33 ± 4,61	43,75 ± 3,13	43,5 ± 2,77	43,03 ± 3,51
<i>In52-Sn48</i>	44,33 ± 4,30	38,25 ± 4,30	44,75 ± 3,66	40,42 ± 2,83	/	41,94 ± 4,69
<i>SAC387</i>	45,23 ± 7,56	44,12 ± 3,47	42,18 ± 4,59	43,5 ± 4,63	32,25 ± 5,67	41,46 ± 4,69
<i>SAC305</i>	43,6 ± 5,28	45,4 ± 5,15	38,58 ± 7,43	41,68 ± 3,82	45,65 ± 5,47	42,98 ± 5,21
<i>SACX0307</i>	45,15 ± 3,45	43,54 ± 4,67	44,65 ± 3,52	32,67 ± 7,27	35,56 ± 4,63	40,31 ± 4,81
<i>Bi57Sn42Ag1</i>	40,3 ± 3,54	38,32 ± 43,32	37,56 ± 4,33	37 ± 3,04	38,43 ± 4,18	38,32 ± 3,56



Le ultime due fasi per la realizzazione dell'array sono l'incollaggio del campione su di un supporto adesivo e l'effettivo taglio del trasduttore.

L'incollaggio su di un adesivo è necessario per garantire che il campione stesso e i relativi fingers rimangano fermi durante la successiva fase di taglio dell'array e durante la procedura di misura della resistenza elettrica.

Le misure di resistenza elettrica solo dopo che la piastrina sia stata tagliata longitudinalmente con un passo di 0,34 mm, in modo tale da avere 64 elementi, che inglobano un finger sul lato sinistro ed un finger sul lato destro; tale taglio è stato realizzato attraverso un'apposita macchina automatizzata.

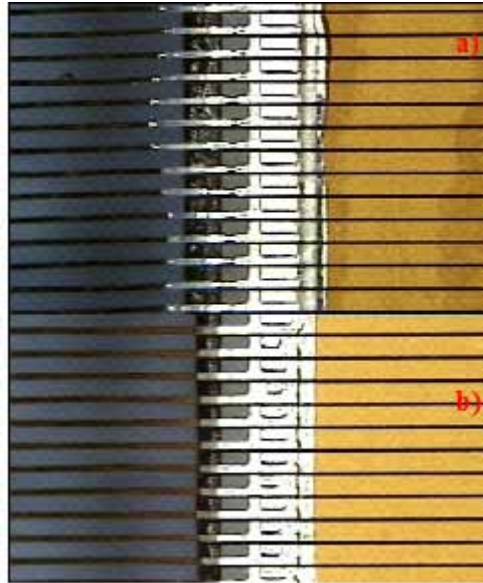
La scelta di prendere come passo di taglio 0,34 mm passo doppio rispetto al taglio di produzione standard, è stata fatta sia per semplicità realizzativa, sia per poter effettuare le misure elettriche tra due fingers su lati opposti; tale soluzione non modifica le proprietà dei campioni in esame.

Dopo il taglio viene eseguita nuovamente un'ispezione al microscopio ottico, per assicurare che non si siano verificate rotture premature delle saldature e che i tagli siano stati realizzati in modo allineato e preciso.

Nelle Figure 5.22 e 5.23 sono mostrati i particolari del taglio dell'array dei campioni Bi-Sn-Ag, In-Sn, SAC 305 e SAC 387. Si possono notare anche le differenze macroscopiche tra le saldature delle due leghe basso fondenti selezionate.

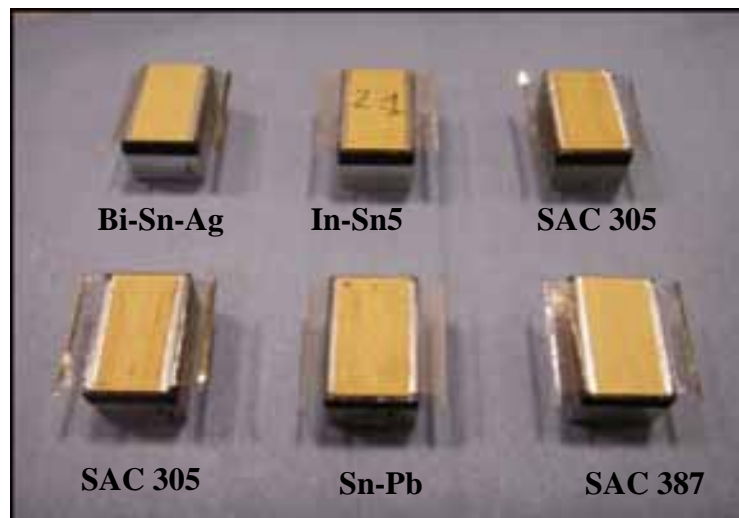


**Figura 5.22:** particolare del taglio dell'array dei campioni: a) Bi-Sn-Ag e b) In-Sn



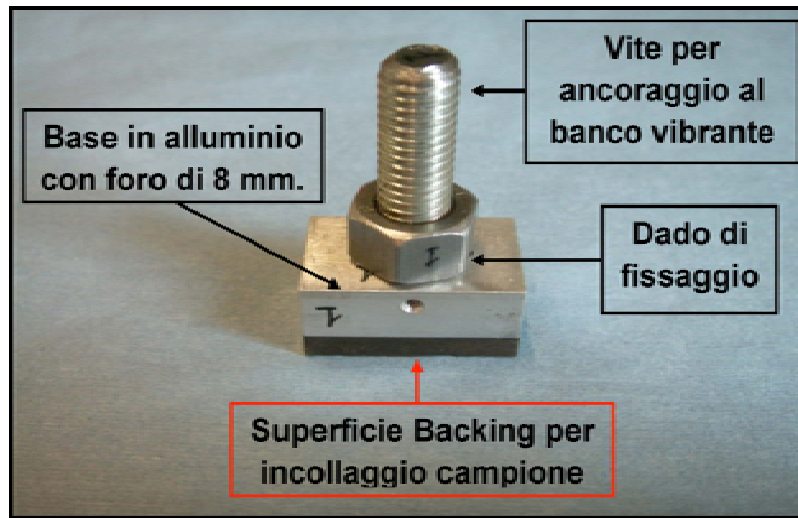
**Figura 5.23:** particolare del taglio dell'array dei campioni: a) SAC 305 e b) SAC 387

I campioni realizzati sono pronti per essere sottoposti a misure e prove termiche, mentre per le prove di vibrazioni è necessario incollare al backing anche un supporto di alluminio (Figura 5.24) e di una vite per l'ancoraggio alla testa del banco vibrante (Figura 5.25). Un campione costituito come in Figura 5.25, senza però l'incollaggio della piastrina di PZT, per evitare il danneggiamento irreversibile del delicatissimo trasduttore, è stato utilizzato come campione di riferimento per il posizionamento dell'accelerometro, per rilevare la risposta del campione alle sollecitazioni imposte durante la prova di vibrazione.



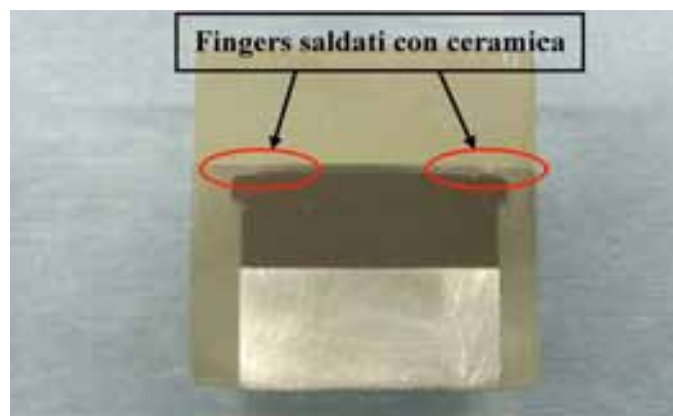
**Figura 5.24:** campioni per prove di vibrazione



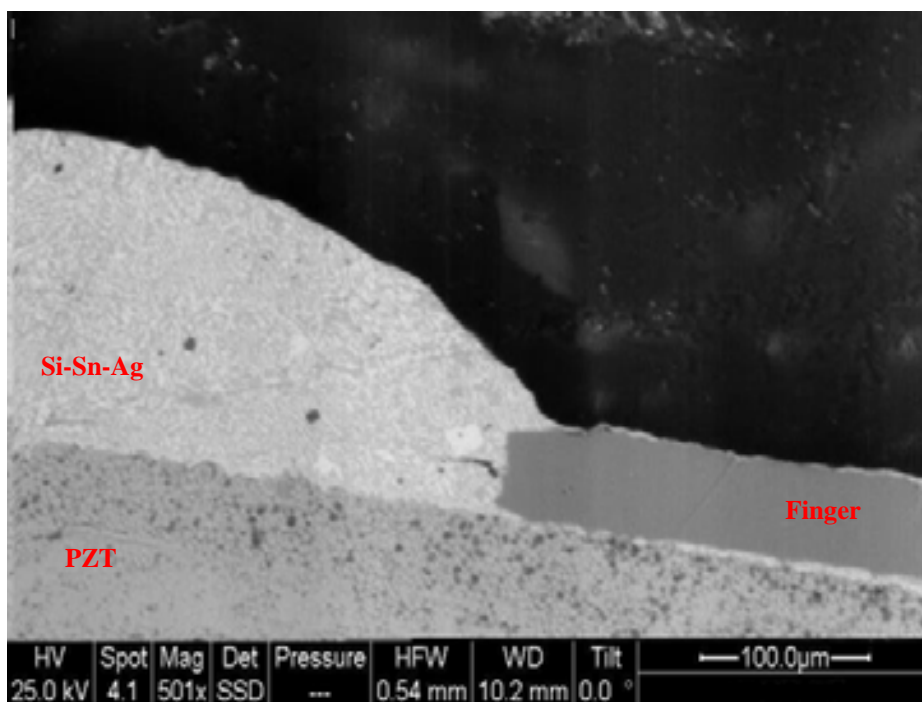


**Figura 5.25:** struttura per ancoraggio del campione al banco vibrante

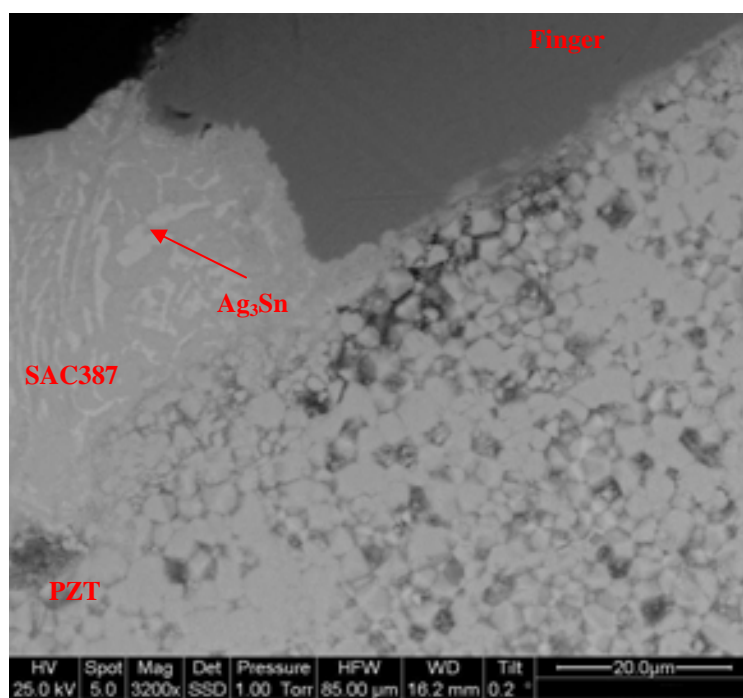
Per poter effettuare anche un'analisi morfologica e microchimica dei campioni realizzati, per avere un opportuno supporto al taglio, essi sono stati incollati al backing, che è un materiale che si pone posteriormente al trasduttore per attenuare gli ultrasuoni che si propagano nella direzione opposta a quella di osservazione, resinati e poi sottoposti alle fasi di fresatura, lucidatura e lappatura (Figura 5.26). Nelle Figure 5.27÷5.30 sono riportate le analisi morfologiche effettuate sulle leghe in esame, si possono notare le formazioni di composti intermetallici come striature grigio chiare all'interno della lega saldante, particolarmente evidente per le leghe SAC come composto  $Ag_3Sn$ , la cui crescita, come molte ricerche hanno dimostrato, può essere dannoso per l'affidabilità della saldatura [83].



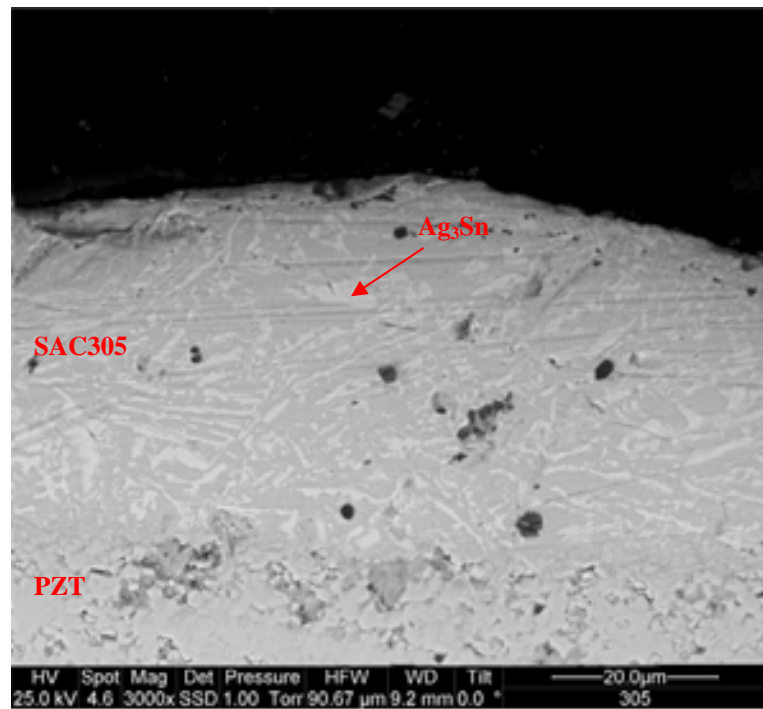
**Figura 5.26:** campione per analisi all'ESEM



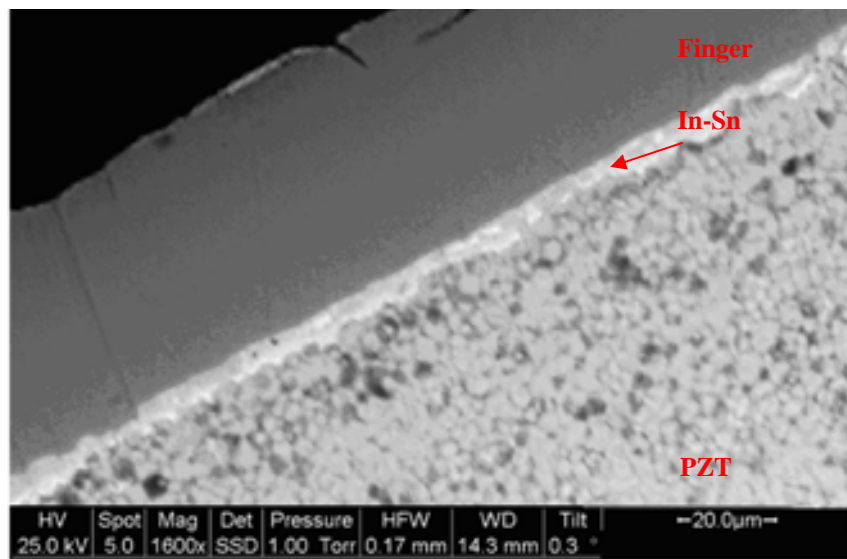
**Figura 5.27:** saldatura tra PZT e Finger con lega Bi-Sn-Ag (501x)



**Figura 5.28:** saldatura tra PZT e Finger con lega SAC387 (zoom 3200x)



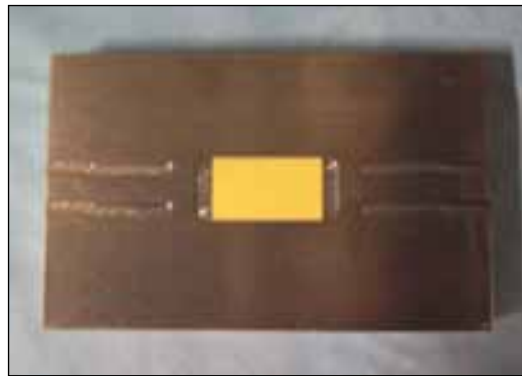
**Figura 5.29:** saldatura tra PZT e Finger con lega SAC305 (zoom 3000x)



**Figura 5.30:** saldatura tra PZT e Finger con lega In-Sn (1600x)

### 5.2.2 Saldatura con adesivi elettricamente conduttivi

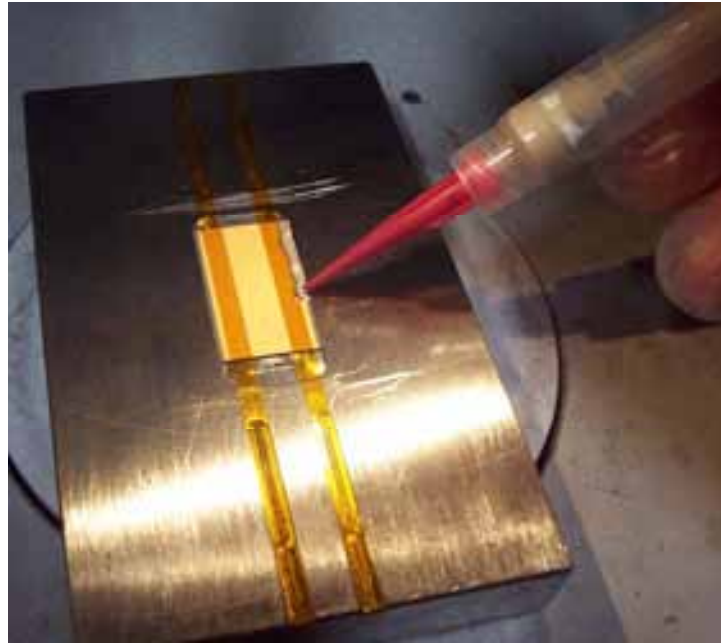
La saldatura realizzata tra trasduttore e microconnessioni è stata realizzata anche con adesivi elettricamente conduttivi, con opportuna riprogettazione delle fasi del processo. Pulita con Acetone la superficie della ceramica, in modo da aumentare il suo potere aderente, si alloggia la piastrina piezoelettrica nella tasca del supporto appositamente realizzato come in figura 5.31.



**Figura 5.31:** ceramica alloggiata nel supporto

Si preparano due strisce di kapton e si fanno aderire nelle rispettive tracce di riferimento, così da realizzare sulla ceramica due bande laterali parallele di larghezza 1,3 mm, sulle quali sarà successivamente diffuso l'adesivo conduttivo. (Figura 5.8)

La fase successiva è stata la preparazione della colla conduttiva secondo la procedura descritta nel paragrafo 4.2., il materiale saldante inserito in una siringa e si è steso tra il bordo esterno del kapton ed il profilo laterale della ceramica (Figura 5.32), da cui si ottengono due strisce di adesivo con distribuzione non uniforme.



**Figura 5.32:** stesura della colla conduttiva

Eseguita la fase di spin coating per ottenere uno strato omogeneo e conforme all'applicazione in funzione dei valori di durata dell'applicazione e di tensione d'alimentazione, nonché il numero di giri al minuto (Figura 5.33).

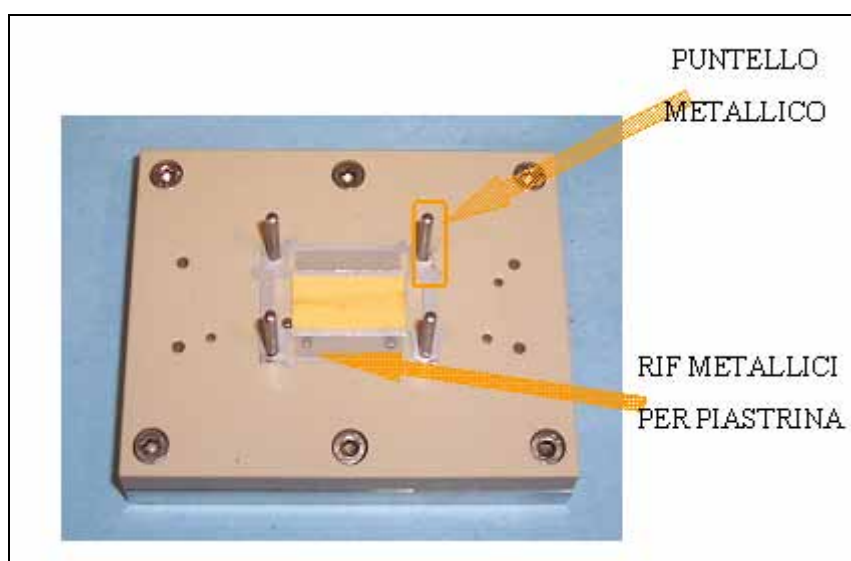
Rimosse le due strisce di kapton, che hanno consentito un ottimo mascheramento, si sistema la piastrina di ceramica su di una base con riferimenti metallici, che servono per un corretto allineamento tra piastrina e fingers lungo i 4 puntelli: i fingers si andranno a posizionare esattamente per 1,3 mm sopra la colla conduttiva ancora allo stato liquido (Figura 5.34). Per garantire che lo spessore della saldatura possa essere controllato e per rendere questo processo ripetibile, si introduce una lastrina metallica sulla superficie interna della ceramica che ci permetterà di determinare l'altezza finale della saldatura, ovvero dello strato colla conduttiva e pettine, fermando l'intero blocco in un morsetto e procedendo con la sovrapposizione di un pressore, che scorre lungo i quattro puntelli.

A questo punto della realizzazione si inserisce il trasduttore in forno, dove viene effettuata la fase di polimerizzazione, che salderà il pettine alla piastrina di materiale piezoelettrico.

Prima di passare alla fase di taglio dell'array, si verifica la qualità della saldatura con un'ispezione ottica al microscopio 10x, stabilendo che i fingers abbiano una buona adesione alla ceramica (Figura 5.35a). Se non si riscontrano anomalie nell'incollaggio, si procede con la realizzazione dei 128 elementi ceramici, tagliando il PZT con un passo di taglio di 0,17 mm (Figura 5.35b).

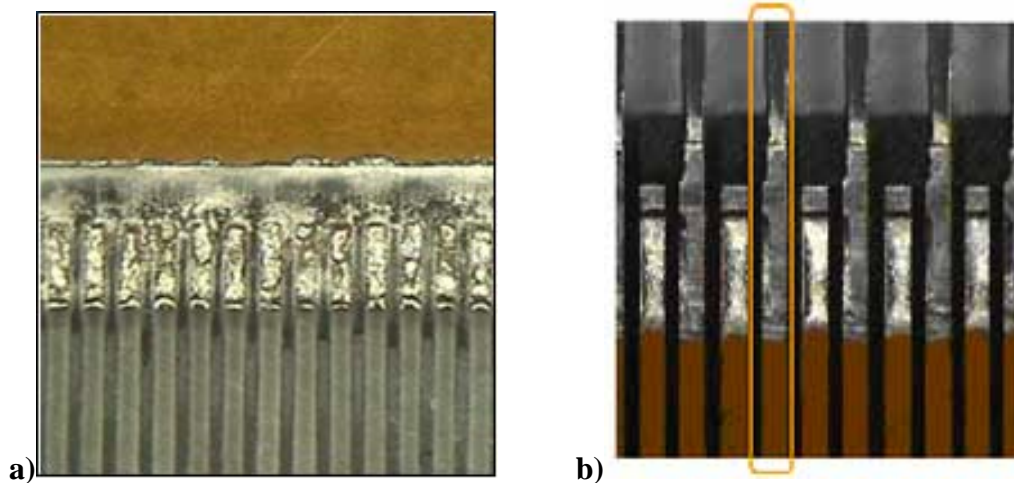


**Figura 5.33:** fase di spin coating



**Figura 5.34:** sistema di allineamento tra ceramica, colla conduttiva e pettine





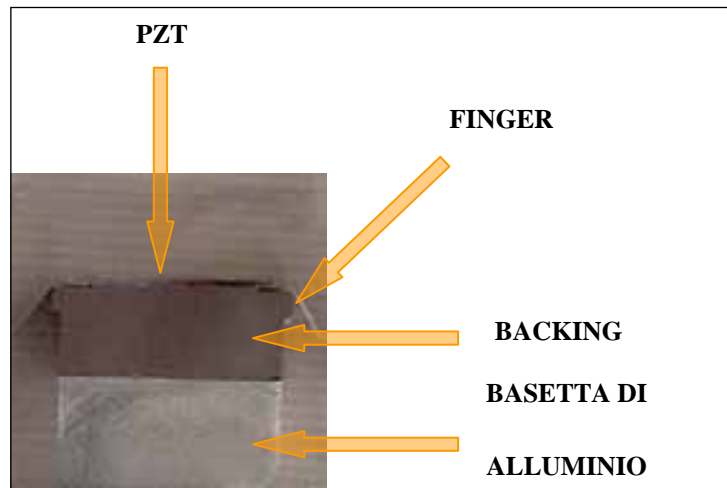
**Figura 5.35:** a) saldatura con EpoTek @80°C; b) particolare dei 128 elementi ceramici

Ogni elemento ceramico misura 0,17 x 14 mm: ad uno dei due estremi è saldato un finger, tramite il quale si ecciterà il singolo componente. A seguito del taglio si eseguirà nuovamente un'ispezione al microscopio ottico, per assicurare che non si siano avute rotture premature delle saldature e che i tagli siano stati realizzati in modo allineato e preciso. Seguirà l'incollaggio dell'array sul backing ed il riempimento della zona backing-finger con una resina non conduttiva: si è così ottenuto il trasduttore, che potrà essere poi assemblato con il PCB per la realizzazione di una sonda ad ultrasuoni. Al fine di verificare la resistenza meccanica delle saldature tra i finger e la ceramica piezoelettrica realizzate con adesivi elettricamente conduttivi, si procede all'incollaggio della ceramica con il pettina saldato allo strato di backing e al supporto in alluminio per essere poi ancorato alla testa del banco vibrante (Figura 5.36).

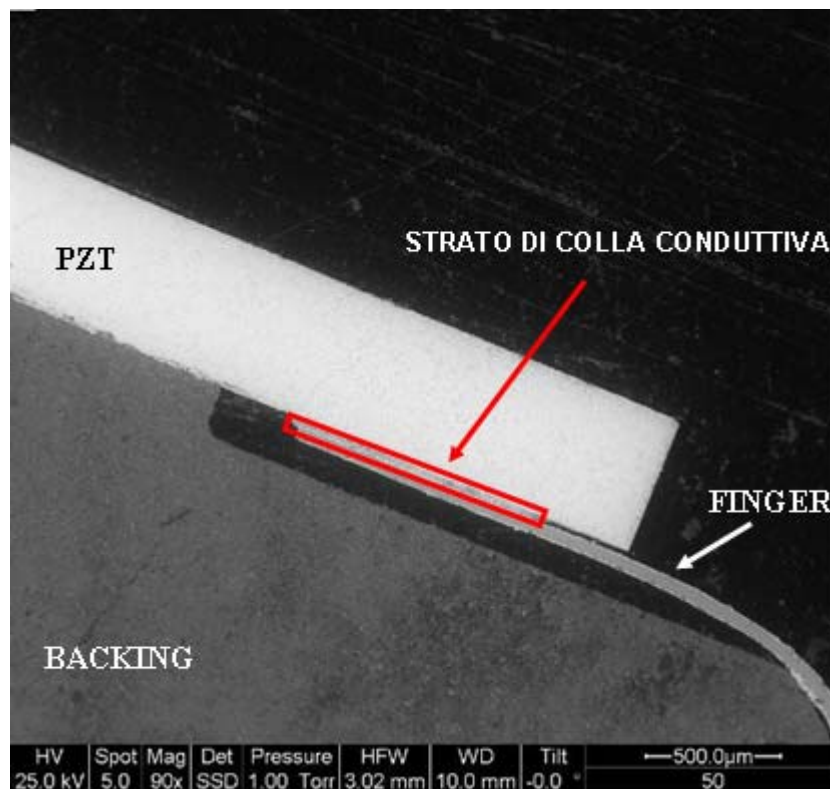
Per avere delle informazioni morfologiche e strutturali del campione realizzato, è stata eseguita un'analisi di microscopia a scansione all'ESEM. L'intento è stato quello di indagare sulle eventuali non conformità del processo di saldatura e di valutare lo spessore finale ottenuto nella saldatura (Figura 5.37).

A titolo esemplificativo si mostra un trasduttore realizzato con saldature a base di adesivo di tipo Heraeus PC3000 ad una temperatura di polimerizzazione di 80°C. Dall'immagine in Figura 5.37 si riscontra che la colla conduttiva tra il finger e la ceramica ha uno spessore di 25  $\mu\text{m}$ , che corrisponde al valore teorico, che ci si prefiggeva di ottenere, impostando 5.600 giri/minuto con un tempo d'applicazione di 30 secondi. Considerando l'incertezza dello spessore del pettine stesso e della planarità della superficie del pressore, con l'analisi morfologica si è ottenuto un riscontro soddisfacente per quanto concerne la possibilità di realizzazione e la precisione della saldatura attraverso il processo implementato. In figura 5.38 a) e b) è possibile vedere l'analisi morfologica di una sezione del trasduttore in cui la saldatura tra il PZT ricoperto dallo strato d'oro ed il finger è realizzata con entrambi i tipi di adesivo elettricamente conduttivo. Le visibili differenze morfologiche della struttura del filler

nei due adesivi in esame confermano quanto riscontrato in precedenti analisi, come descritto in paragrafo 4.2 (Figura 4.24).

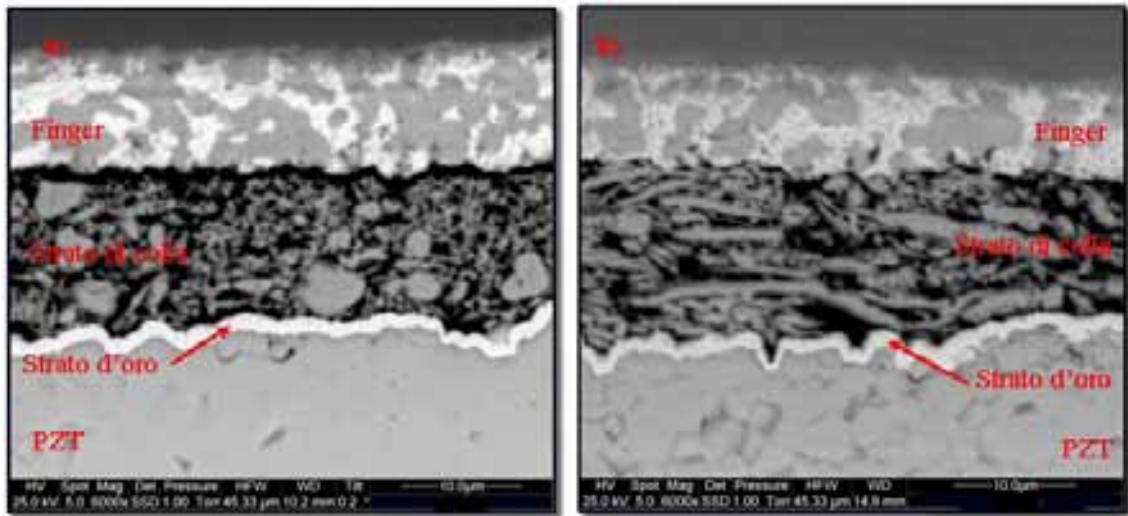


**Figura 5.36:** saldatura con HERAEUS PC3000 @80°C



**Figura 5.37:** immagine ESEM della sezione trasversale del campione





**Figura 5.38:** analisi morfologica della sezione trasversale del campione: a) Heraeus e b) Epotek

### **5.3 Implementazione di prove ambientali sui campioni**

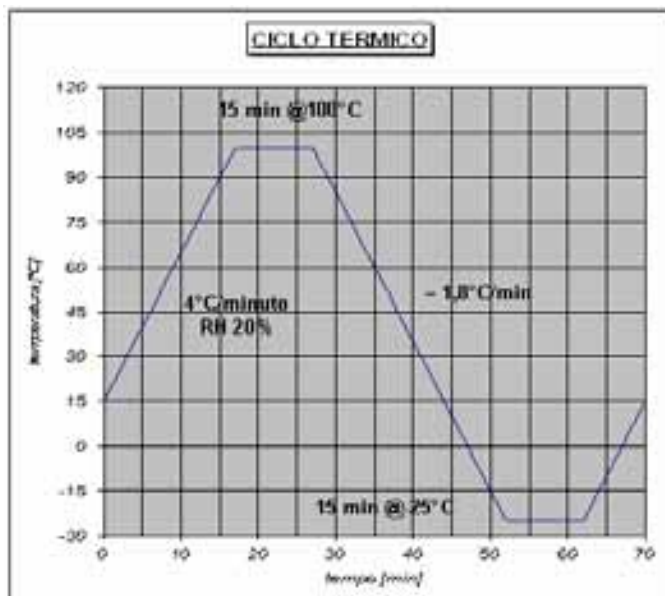
#### ***5.3.1 Pianificazione ed esecuzione di prove termiche***

La prova di ciclo termico è il metodo che permette di rendere manifesti il maggior numero di guasti e valutare la durata della vita prevista o l'incidenza di guasto prevista dei giunti saldanti, che avvengono in un determinato ambiente. In una prova di ciclo termico il campione è sottoposto a un profilo di temperatura-tempo solitamente con due estremi di temperatura, dove a ogni estremo il campione è mantenuto per un certo tempo di stazionamento (dwell time) e il trasferimento di temperatura è compiuto da un gradiente termico controllato.

E' importante che la prova ciclica termica scelta produca lo stesso meccanismo di guasto nel giunto di saldatura che si verificherebbe nelle normali condizioni operative. Gli array di trasduttori realizzati sia con saldature con leghe senza Piombo che con adesivi elettricamente conduttivi sono stati sottoposti a sollecitazioni termiche; in Figura 5.39 è riportato il ciclo teorico di prova implementato. Il ciclo di temperatura varia tra  $-25^{\circ}\text{C}$  e  $+100^{\circ}\text{C}$  con 15 minuti di stazionamento agli estremi di temperatura, il controllo dell'umidità relativa pari al 20% avviene solo nella fase di salita della temperatura.

In Figura 5.40 è riportata la rilevazione della camera climatica di una serie di cicli di sollecitazione effettivamente eseguiti (profilo rosso), mentre in verde i profili teorici impostati. Come si può notare la camera climatica riesce a seguire fedelmente il ciclo teorico nella fase di salita con gradiente termico di  $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , mentre in fase di discesa si discosta leggermente al diminuire della temperatura, con tasso di discesa di  $-1,8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . La durata complessiva di un ciclo risulta pari a 70 minuti, è stata prevista una

interruzione della prova dopo ogni 100 cicli per procedere alle misure di resistenza elettrica per rilevare eventuali guasti.



**Figura 5.39:** profilo termico teorico

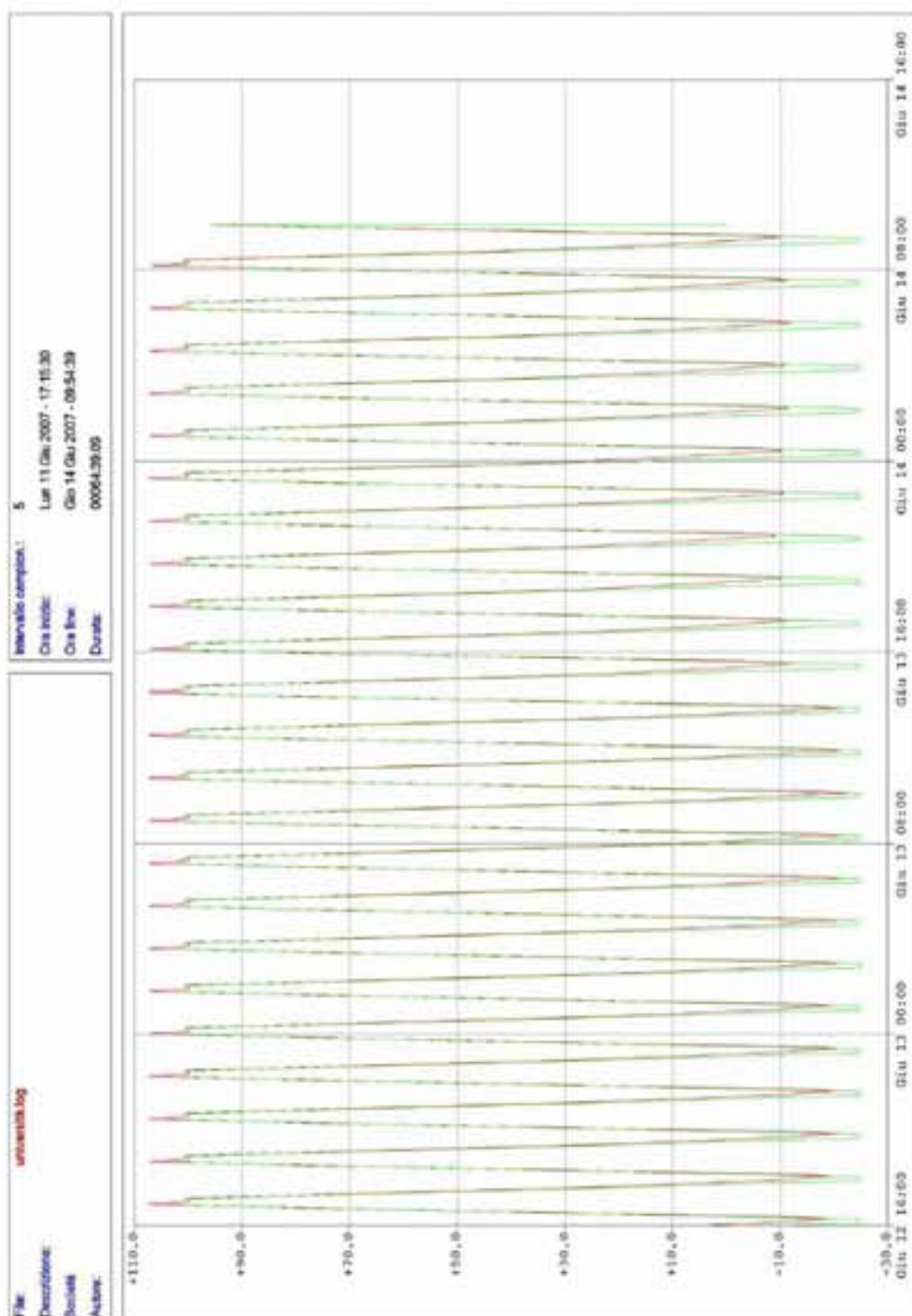


Figura 5.40: risposta della camera climatica (linea rossa) al profilo termico impostato (linea verde)

### 5.3.2 Pianificazione ed esecuzione di prove di vibrazioni sinusoidali e random

Lo scopo di questa prova è quello di verificare il comportamento meccanico di robustezza o debolezza e qualsiasi eventuale degradazione nelle prestazioni dei campioni saldati con le diverse leghe o adesivi conduttivi selezionati, in modo da verificare il loro comportamento dinamico [84, 85], [86 ÷ 93].

I campioni in esame sono stati sottoposti a vibrazione sinusoidale e vibrazioni random.

*Vibrazioni sinusoidali:* sono importanti, ai fini di un piano prove, perché permettono di ricavare le frequenze critiche dei campioni in esame. L'individuazione di tali frequenze è fondamentale, perché nei dispositivi esse possono generare malfunzionamenti o variazioni delle caratteristiche del campione e risonanze meccaniche o altri effetti di una risposta. Un'eccitazione sinusoidale può essere caratterizzata dalla sua frequenza e dalla sua ampiezza di accelerazione.

Per essere testato, il dispositivo deve essere fissato come nell'applicazione reale, il punto di misurazione dell'accelerazione deve essere il più vicino possibile al campione da testare, le risonanze della strumentazione di montaggio devono essere determinate prima della prova e potrebbe essere necessario escluderle dalla prova stessa. Per ricavare tali risonanze, spesso non è sufficiente monitorare la risposta del sistema dall'accelerometro fissato al banco di vibrazione come controllo, quindi è consigliabile un secondo punto di misurazione sul campione che abbiamo realizzato appositamente.

La strumentazione utilizzata per la realizzazione delle prove di vibrazione sinusoidale e random è la seguente:

- Banco vibrante V730 DPA10K (Dactron Dual DSP Shaker Control System)
- Due accelerometri, le cui sensibilità sono CH1 = 1,10 mV/ms<sup>-2</sup> e CH2 = 10,5 mV/ms<sup>-2</sup>.

Il primo sensore della macchina (CH1) è stato posto sul supporto appositamente realizzato, precedentemente ancorato al banco vibrante, per ricavare la risposta del *backing* e di conseguenza quella del campione alle sollecitazioni. Il secondo sensore (CH2) è invece stato posizionato sul banco vibrante in prossimità del primo sensore, con l'obiettivo di rilevare le accelerazioni del banco stesso.

I risultati della prova, acquisiti dal software del banco vibrante, sono mostrati nelle Figure 5.41, 5.42 e 5.43, dove sono rappresentati, rispettivamente, la schermata della piattaforma software del banco vibrante, la risposta su tutto l'intervallo di frequenze scansionato, e l'ingrandimento della zona in cui è stata evidenziata la presenza di una risonanza. Il banco è stato quindi programmato per vibrare in modo sinusoidale a partire dalla frequenza di 20 Hz fino a 2 kHz, passando gradualmente, ad un ottava al minuto, dal primo valore al secondo, il tutto ad una sollecitazione di 0,002 g<sup>2</sup>/Hz.

Nelle Figure 5.41, 5.42 e 5.43 è rappresentata la risposta del *backing*/campione di riferimento (linea di colore blu), la risposta del banco vibrante (linea di colore verde), e i limiti di controllo del banco vibrante (linee rosse e gialle).

Come possiamo notare, durante la prova di vibrazione sinusoidale è stata evidenziata la presenza di una risonanza ad una frequenza pari a  $f_{ris} = 1.63 \text{ kHz}$ . Tale frequenza è stata di fondamentale importanza per la pianificazione delle prove di vibrazioni random sui campioni, in quanto in corrispondenza di tale frequenza il livello di  $g_{rms}$  della sollecitazione dovrà essere opportunamente smorzato per evitare che il campione, entrando in risonanza, subisca dei livelli di sforzo meccanici troppo elevati.

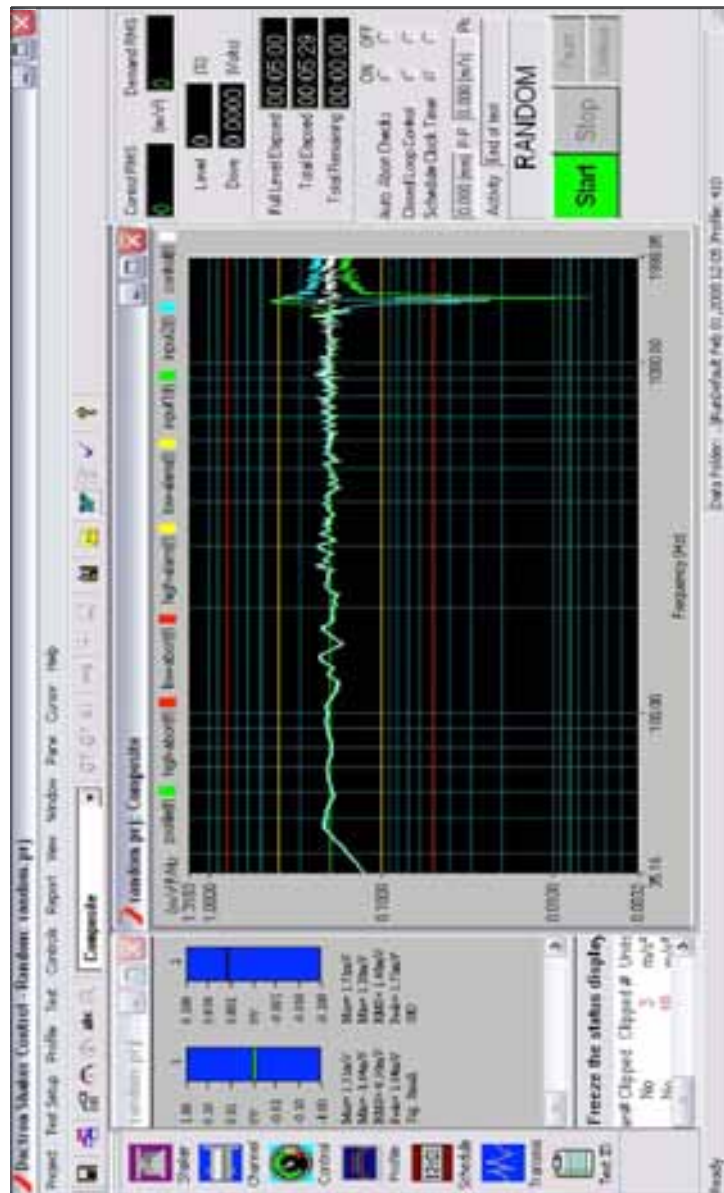


Figura 5.41: schermata piattaforma software del banco vibrante.

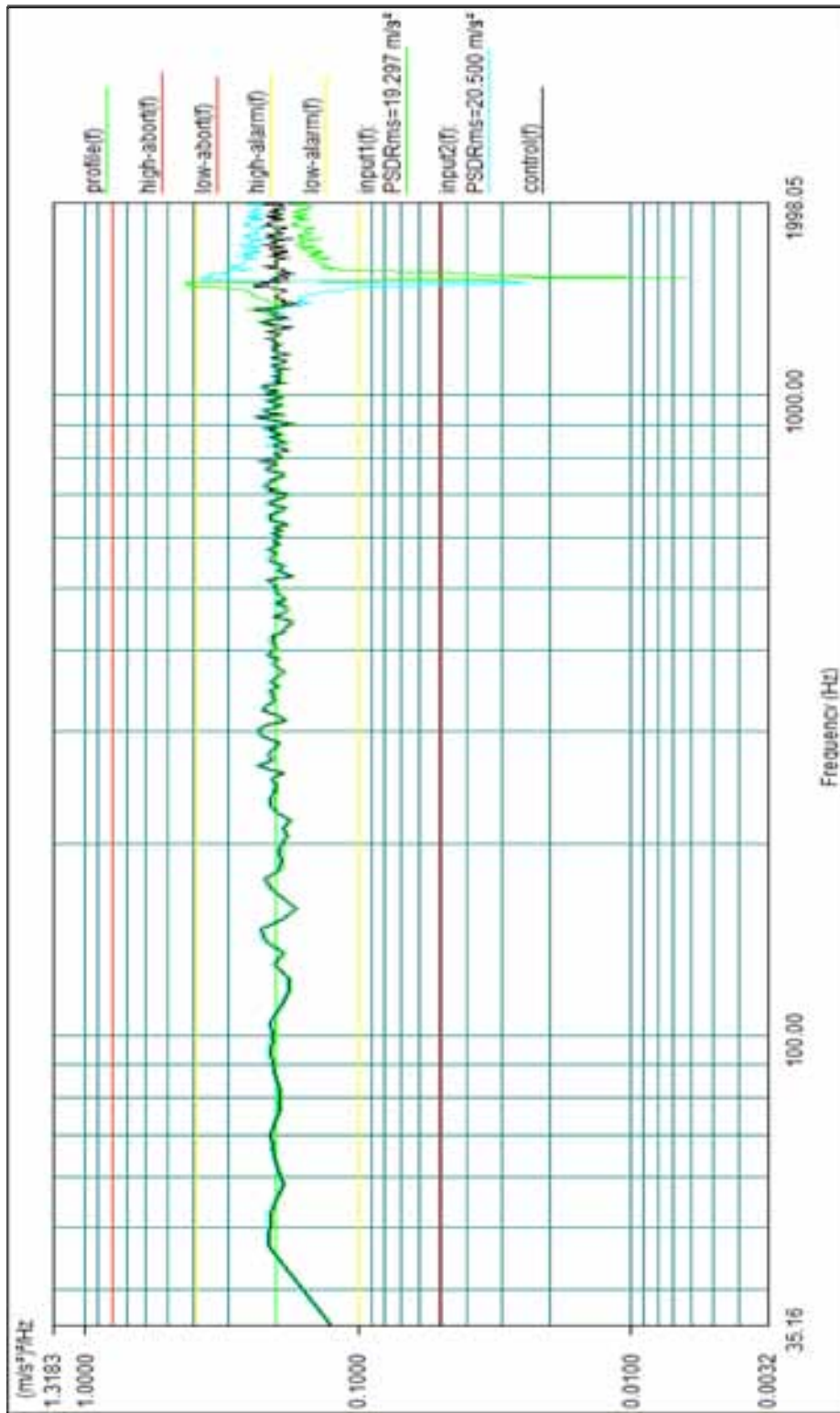
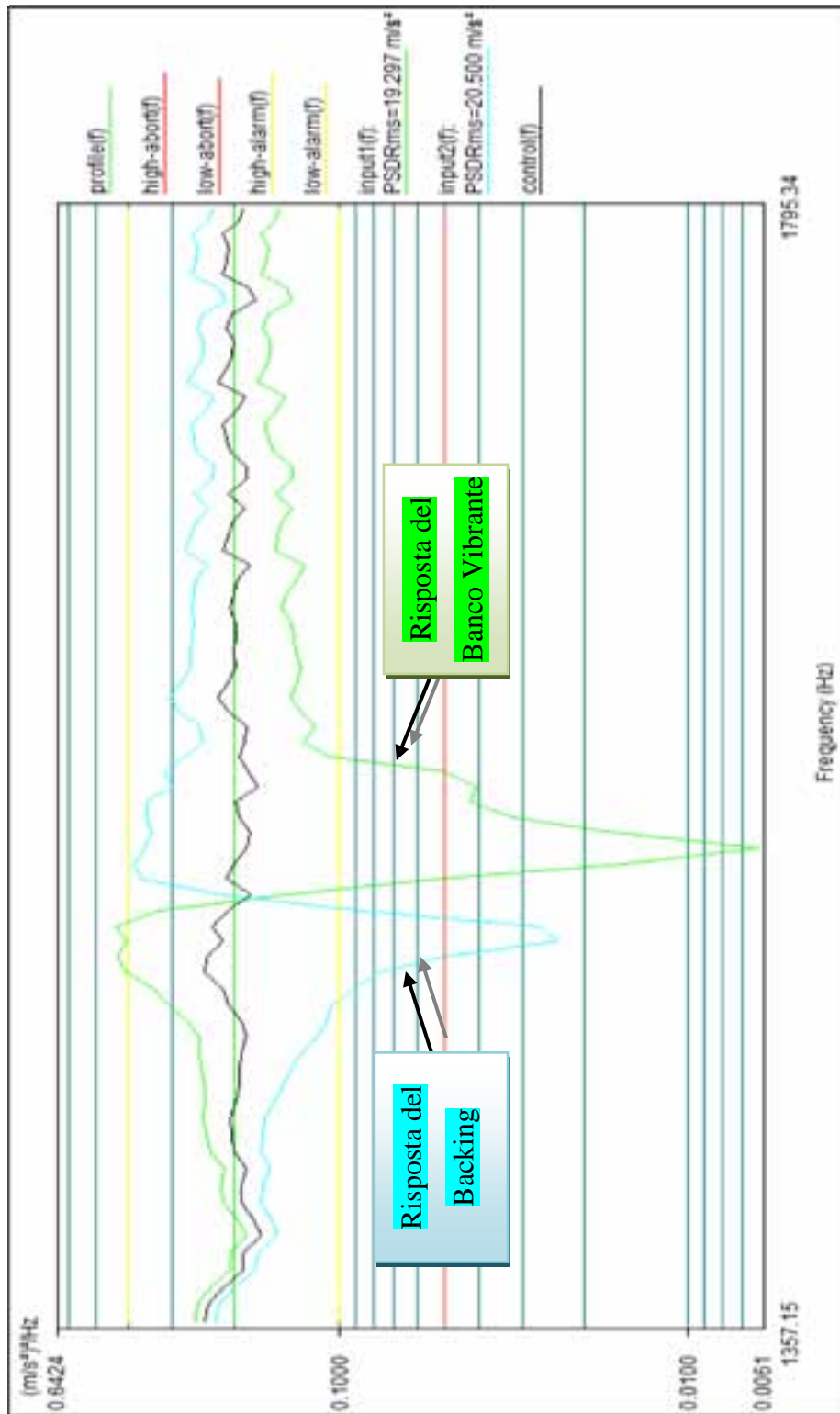


Figura 5.42: risposta del supporto



**Figura 5.43:** ingrandimento della zona di risonanza.



*Vibrazioni random:* Il loro utilizzo è ampiamente diffuso in molti ambiti, soprattutto per test e screening, e in diversi settori (industriale, militare e commerciale) perché la vibrazione random, vista la sua casualità, è sicuramente quella che riproduce più fedelmente le condizioni reali di lavoro in cui le apparecchiature elettroniche sono costrette ad operare. Inoltre, la vibrazione random rappresenta una delle più efficienti tecniche di setacciatura, in grado di far precipitare una considerevole quantità di difetti latenti [21]. La maggior parte delle vibrazioni a cui i dispositivi elettronici possono essere soggetti sono a banda larga nel contenuto spettrale ed è stato dimostrato sperimentalmente che le vibrazioni casuali simulano effettivamente la banda larga in una prova, dove tutte le frequenze sono presenti all'interno di una determinata banda di frequenza con varie combinazioni d'intensità. [92]

Uno spettro casuale può essere impostato da una sintesi di molte vibrazioni sinusoidali, quindi proprio per questo motivo l'analisi mediante vibrazioni random è usualmente estesa su un intervallo abbastanza ampio di frequenze, in genere compreso tra 20 e 2000 Hz, in modo da valutare il comportamento globale di qualsiasi elemento che viene sottoposto a questa forma di sollecitazione.

In termini di frequenza, la vibrazione random è l'unica in cui tutte le frequenze all'interno di una certa banda sono presenti contemporaneamente ad ogni istante di tempo. Ciò significa che quando un sistema elettronico è sottoposto a questo tipo di sollecitazione lungo una banda che va da 20 a 2000 Hz, tutte le frequenze di risonanza del sistema elettronico che si trovano all'interno di questa banda saranno eccitate allo stesso istante di tempo e questo vale per ciascun elemento che fa parte del sistema.

Quando viene pianificata la prova di vibrazioni random è ovviamente necessario specificare il profilo della sollecitazione d'ingresso. Esso fornisce, infatti, sia l'intervallo di frequenze, sia il livello di Densità Spettrale di Potenza (PSD – Power Spectral Density -  $g^2/Hz$ ), cioè l'intensità della sollecitazione applicata, che collega i livelli di densità di energia alle bande di frequenza specifiche e la vibrazione è definita sopra una gamma di frequenza relativa. La radice quadrata dell'area sottesa dalla curva fornisce il valore quadratico medio dell'accelerazione applicata, meglio noto come  $g_{rms}$ . Usando il livello rms dello spettro (Root Mean Square - Radice della Media dei Quadrati – Valore Efficace),  $g_{rms}$ , come misura per il caricamento applicato dalla prova, si ottengono livelli variabili di  $g_{rms}$  secondo la larghezza della banda di frequenza usata per determinare i  $g_{rms}$ . Se i  $g_{rms}$  sono elevati al quadrato e divisi per la larghezza di banda, si trova la PSD. Quindi per caratterizzare l'intensità di una vibrazione random può essere usata l'area sottostante il tracciato di frequenza della PSD, avendo unità di misura  $g^2$ :

$$\sqrt{\text{Area del profilo}} = \text{livello di accelerazione rms} = g_{rms} \quad (5.4)$$

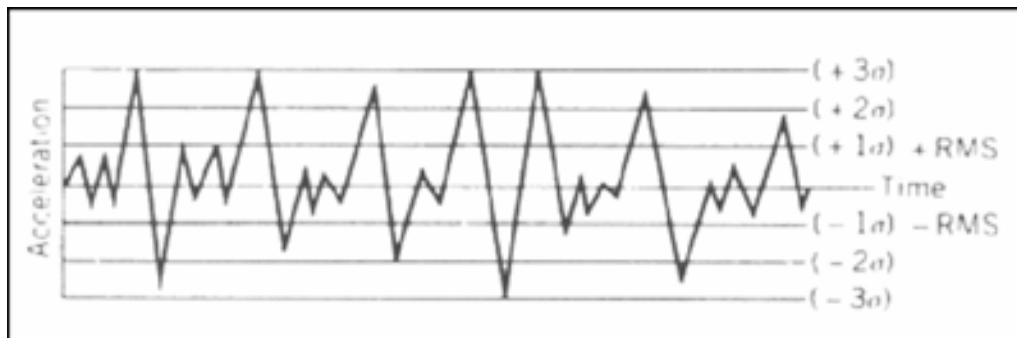
Questo vale sia per i livelli di accelerazione in ingresso, che per quelli in uscita.

In realtà, non è molto corretto utilizzare la notazione PSD, in quanto la grandezza rilevata è un'accelerazione e non una potenza, perciò il termine esatto dovrebbe essere



Densità Spettrale di Accelerazione (ASD – Accelerate Spectral Density), anche se quasi sempre si parla in termini di PSD e l'unità di misura utilizzata è  $g^2/Hz$ .

Vista la non periodicità delle vibrazioni random, allo scopo di predire i livelli di accelerazione probabili è necessario utilizzare le funzioni di distribuzione di probabilità: la distribuzione più usata per questo scopo è quella Gaussiana (o Normale). La curva della distribuzione Gaussiana rappresenta il valore dei livelli istantanei di accelerazione, quindi si riferisce all'ampiezza dei livelli di accelerazione attesi per le vibrazioni random. Il livello massimo di accelerazione considerato per le vibrazioni random, utilizzando tale distribuzione, è il livello  $3\sigma$ , in quanto copre quasi il 100% di probabilità. Livelli più elevati, che possono comunque presentarsi nella realtà, vengono perciò ignorati. La maggior parte del degrado sarà così generata in corrispondenza dei livelli  $3\sigma$  poiché essi sono i massimi attesi in condizioni di vibrazioni random, come dimostra la Figura 5.44.



**Figura 5.44:** andamento reale dei livelli di accelerazione di vibrazioni random rispetto al tempo

Il degrado generato in ogni sistema dinamico non è determinato dall'ingresso del sistema, bensì dalla sua risposta visto che in condizioni di risonanza si avrà una notevole amplificazione dei livelli di accelerazione e quindi degli stress che agiscono sul dispositivo. Tale risposta può essere ricavata dall'Equazione 5.5, in termini di valore efficace:

$$g_{rms} = \sqrt{\frac{\pi}{2} PSD f_n Q} \quad (5.5)$$

dove:

- PSD è la Densità Spettrale di Potenza d'ingresso in corrispondenza della frequenza naturale ed è espressa in  $g^2/Hz$ .
- Q è la trasmissibilità alla frequenza naturale ed è adimensionale.
- $f_n$  è la frequenza naturale in Hz.

L'equazione 5.5 viene usata per ottenere risultati validi nella maggior parte dei casi, è molto accurata per  $Q > 10$  e quando la PSD in ingresso è piatta in corrispondenza dell'area di risonanza; commette un errore piccolo anche quando la pendenza della

curva d'ingresso della vibrazione random è 6 dB/Ottava nell'area della frequenza di risonanza.

L'accelerazione di guasto causata dalla vibrazione è difficile da valutare: molto spesso non è lo sforzo causato dall'accelerazione della massa del componente che determina il degrado dei giunti saldanti, piuttosto è la deformazione del PCB, il piegamento e l'accumulo locale di sforzo alle frequenze di risonanza che distrugge i giunti saldanti.

Nelle vibrazioni casuali viene spesso usata una relazione di fatica per collegare i livelli di vibrazione, il tempo della prova e la trasformata di deriva di accelerazione:

$$\frac{PSD_1}{PSD_2} = \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^M \quad (5.6)$$

dove:

- $PSD_1$  è il livello funzionale;
- $PSD_2$  è il livello di resistenza;
- $t_1$  è il tempo al livello funzionale;
- $t_2$  è il tempo al livello di resistenza;
- $M$  è la costante materiale, che rappresenta la pendenza della linea nel tracciato bi-logaritmico PSD/tempo e che può essere determinata empiricamente.

Questa relazione conduce ad una linea retta se le Densità Spettrali di Potenza sono messe in relazione con il tempo a guasto in un grafico bi-logaritmico. Tuttavia la prova-spettro deve avere una relazione con le vibrazioni che accadono nella realtà. L'estrapolazione dai dati empirici è sempre una pratica discutibile se è estesa molto oltre l'intervallo di prova. Poiché  $M$  determina la pendenza nel grafico log-log PSD/tempo, tutta l'estrapolazione è molto sensibile alle sue variazioni, infatti piccole variazioni possono causare drammatiche variazioni nelle previsioni di vita dell'assemblaggio, quando le equazioni sono usate per passare da uno stato all'altro.

Il profilo di prova pianificato per i campioni in esame deriva da un'attenta analisi relativa alle caratteristiche dei campioni da testare; caratteristiche dell'apparecchiatura a disposizione per effettuare la prova di vibrazione: banco vibrante e relative tolleranze; risposta della prova di vibrazione sinusoidale effettuata per l'individuazione delle frequenze critiche.

Inizialmente il profilo di vibrazione pianificato era caratterizzato da due fasi:

- Una fase iniziale, in bassa frequenza, derivante dalla norma JESD22-B103B [90], per la simulazione del comportamento di vibrazione previsto durante la manipolazione e il trasporto.
- Una fase centrale e finale, in "alta frequenza", derivante da un profilo utilizzato da un progetto Boeing Phantom Works per Joint Council on Aging Aircraft/Joint

Group on Pollution Prevention (JCAA/JG-PP), relativo a prove su saldature senza-piombo, per applicazioni aerospaziali/militari [93].

Questa scelta è stata fatta per avere un profilo di sollecitazione caratterizzato da un elevato contenuto spettrale anche in bassa frequenza, in modo da applicare ai campioni un livello di severità più elevato, rispetto ad un classico profilo NAVMAT, compatibilmente con gli aspetti mostrati in precedenza.

Durante le fasi di verifica del profilo di vibrazione però, è stato constatato che il banco vibrante, ai livelli di sollecitazioni impostati, non riusciva a seguire la fase in bassa frequenza del profilo stesso; questo perché i valori di PSD impostati tra 2 Hz e 40 Hz causavano uno spostamento del piatto vibrante al di fuori dei limiti meccanici della macchina. Di conseguenza, consultando i nomogrammi della norma CEI EN 60068-2-59 [88] e verificando le prestazioni effettive del banco vibrante, è stato necessario modificare il profilo attenuando i livelli di sollecitazione in bassa frequenza, in modo da rientrare nei limiti reali della macchina. Si è comunque cercato di massimizzare l'accelerazione in bassa frequenza (Figura 5.45). Per ogni frequenza i limiti sono imposti, come da JESD22-B103B [91], a  $\pm 6$  dB con una tolleranza complessiva su tutto l'intervallo di frequenze dell'accelerazione efficace ( $g_{rms}$ ) di  $\pm 10\%$  (quindi  $\pm 3.4 g_{rms}$ ).

Dai risultati ricavati da modelli studiati in precedenti ricerche di laboratorio, abbiamo riscontrato la compatibilità tra i valori da noi ottenuti e quanto riportato nel documento Boeing Phantom Works (JCAA/JG-PP) [93] su leghe Sn-Pb. Data la validità, abbiamo supposto validi i tempi di prova impostati nel documento [93] per le nuove leghe senza Piombo. Si è optato per una banda di frequenze di sollecitazione che andasse da 20 Hz fino a 2 kHz, in linea con quanto sostenuto dalle norme CEI 60068-2-6 [86] e IPC-9701 [84], ma anche da quanto previsto nello standard NASA PT-TE-1413 [94]. Il livello di accelerazione è stato fissato in  $0,536 g^2/Hz$ . Il tempo di prova fissato è di 20 minuti per ogni asse del banco vibrante.

Al termine della prova verrà controllato per ogni saldatura il valore della resistenza elettrica come indicatore di guasti.

Come nel caso delle vibrazioni sinusoidali, il primo accelerometro (CH1) è stato posizionato sul supporto appositamente realizzato, per ricavare la risposta in frequenza dei campioni, mentre il secondo sensore (CH2) è stato fissato al banco, per rilevare la sollecitazione di ingresso utile al sistema di controllo a retroazione del banco vibrante (Figura 5.46).

In Figura 5.47 è mostrata la risposta del banco vibrante, ovvero :

- Il profilo di vibrazione teorico (linea verde);
- Il controllo della macchina (linea nera);
- Il segnale proveniente dall'accelerometro posizionato sul supporto (CH1), cioè la risposta in frequenza dei campioni alle sollecitazioni di vibrazione random (linea arancio);
- L'accelerometro posizionato sul banco vibrante (CH2), cioè la risposta del banco al profilo (linea azzurra);
- I limiti di controllo e aborto della macchina (linee gialle e rosse rispettivamente).

Si nota che il banco vibrante è fuori controllo in bassa frequenza. In realtà ciò è dovuto alla mancanza di filtri in continua della macchina e comunque il profilo di vibrazione teorico non ha subito variazioni.

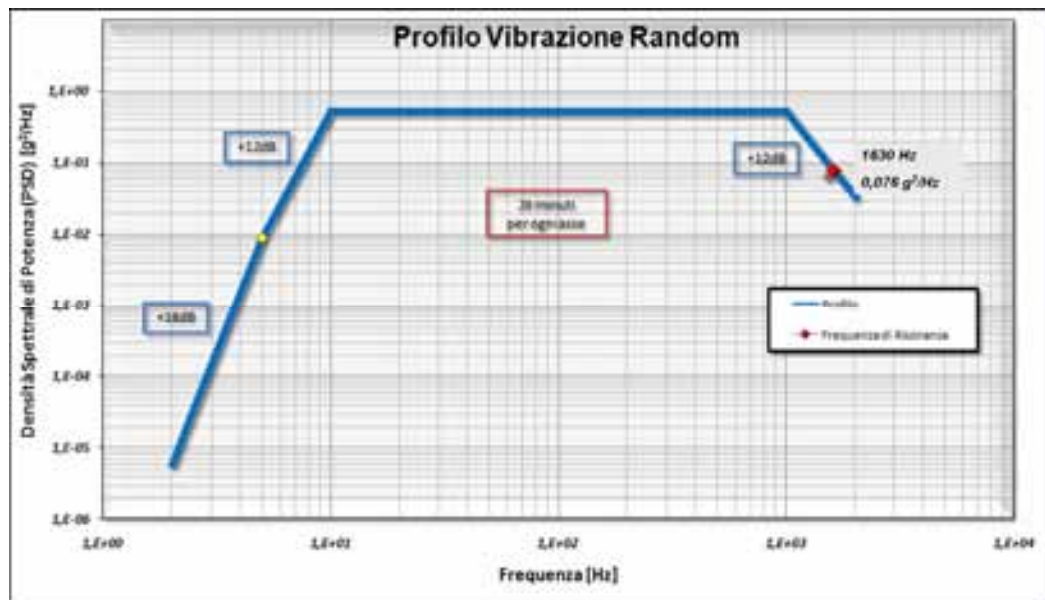


Figura 5.45: profilo teorico di vibrazione random

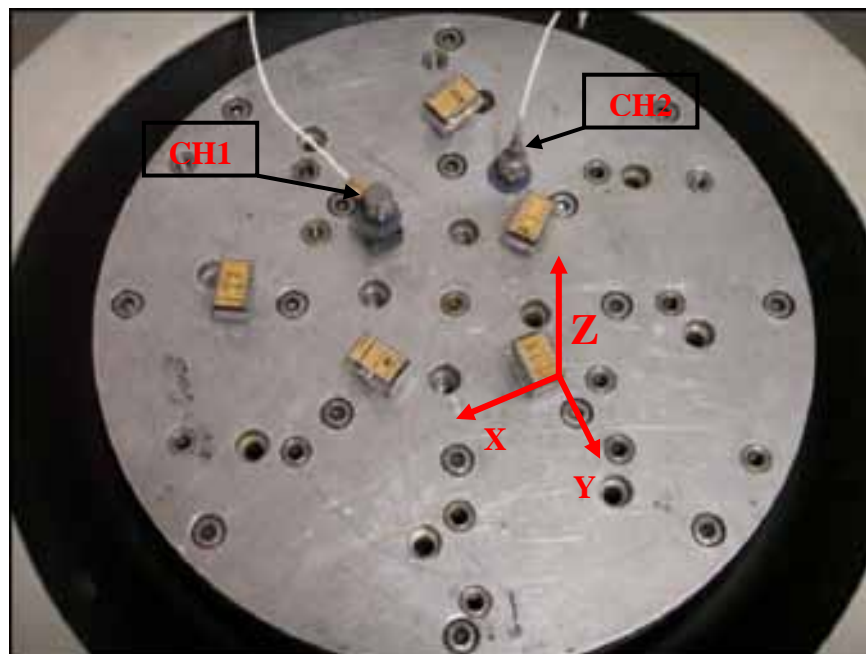
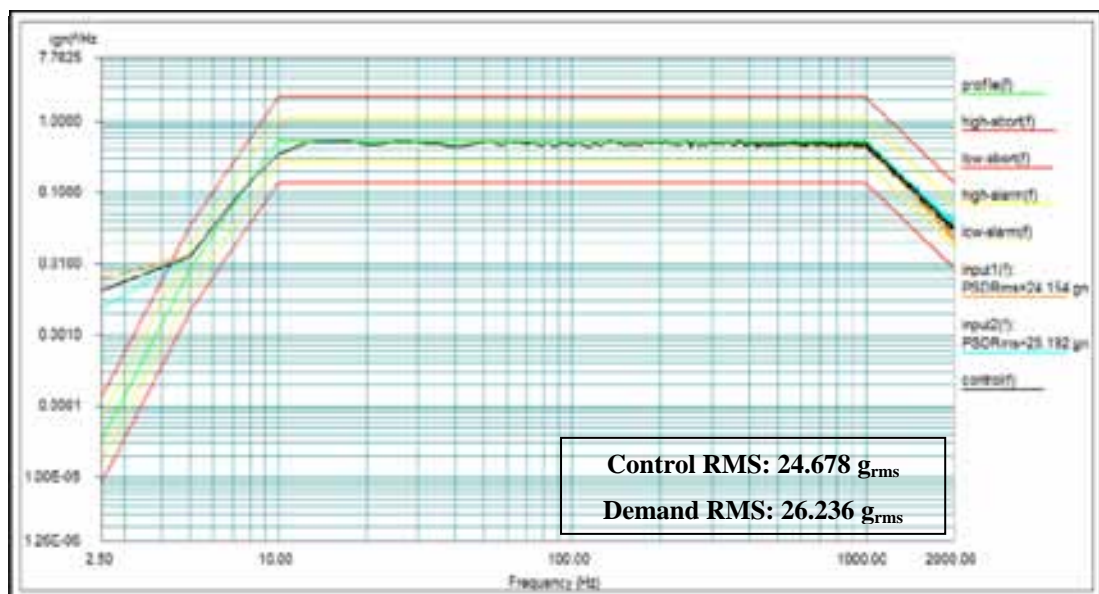
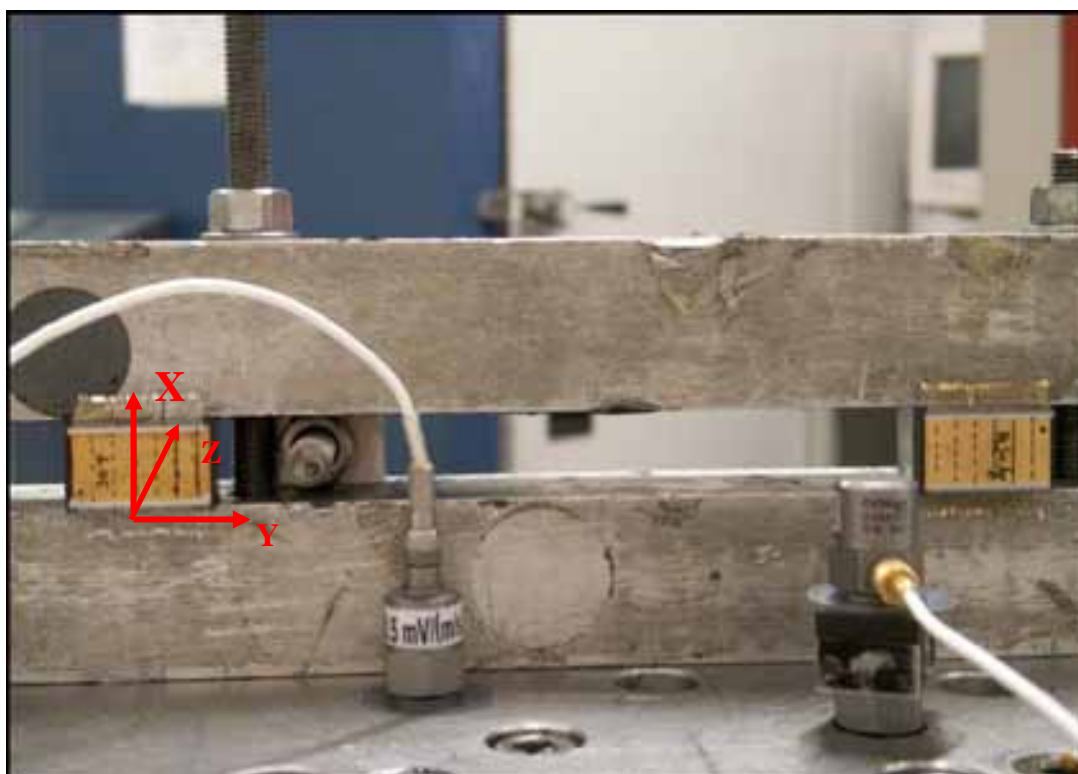


Figura 5.46: prova di vibrazione random lungo l'asse Z

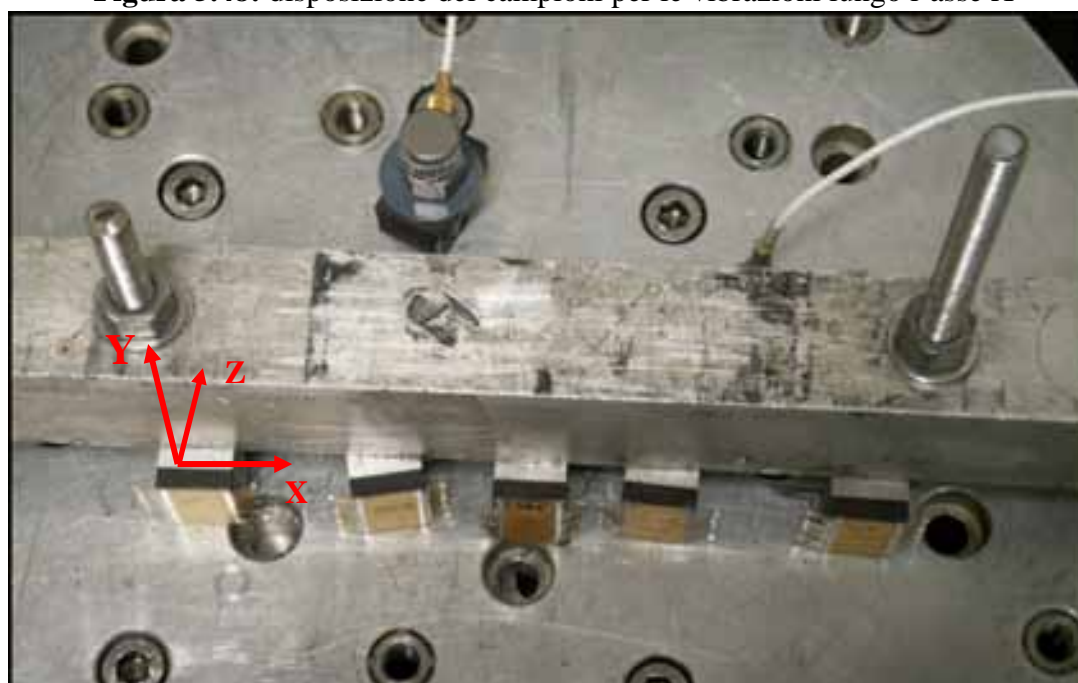
Per sollecitare i campioni con il profilo di vibrazione random lungo l'asse X e Y è stato necessario usare appositi supporti (fixture) costituiti da due barre in acciaio, con viti per l'ancoraggio al banco vibrante e il fissaggio dei campioni, come mostrato in Figura 5.48 e 5.49. Nelle Figure 5.50 e 5.51 sono riportate le risposte del banco vibrante al profilo di vibrazione lungo l'asse X e Y rispettivamente. Il contenuto spettrale di ogni risposta effettivamente ottenuto lungo i tre assi, si discosta da quello richiesto, ma in ogni caso il livello rimane sufficientemente adeguato.



**Figura 5.47:** risposta del banco vibrante relativa all'asse Z



**Figura 5.48:** disposizione dei campioni per le vibrazioni lungo l'asse X



**Figura 5.49:** disposizione dei campioni per le vibrazioni lungo l'asse Y



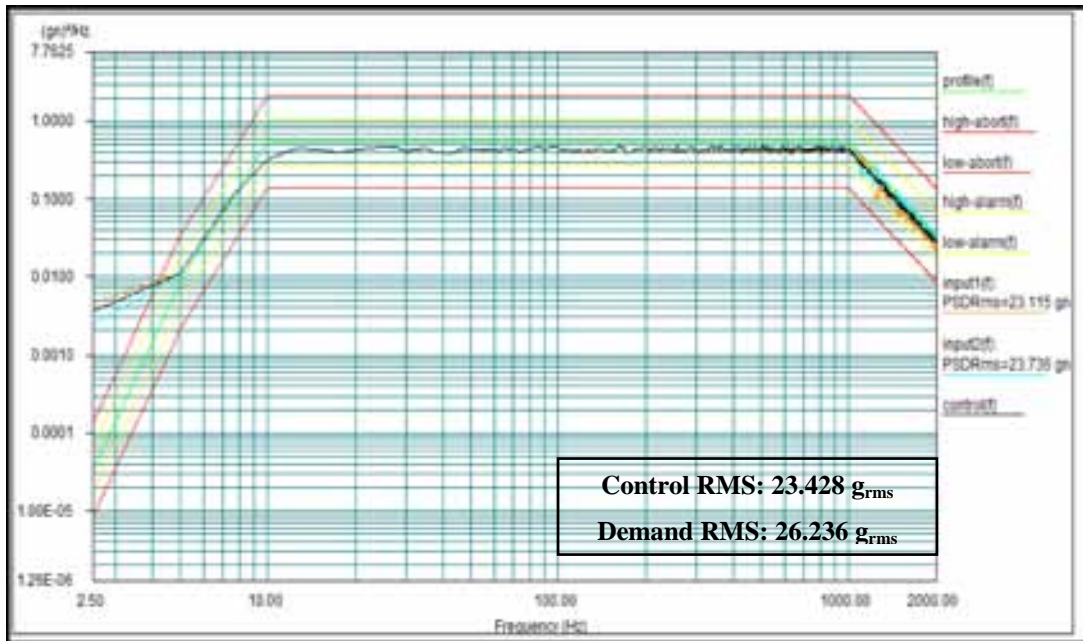


Figura 5.50: risposta del banco vibrante relativa all'asse X

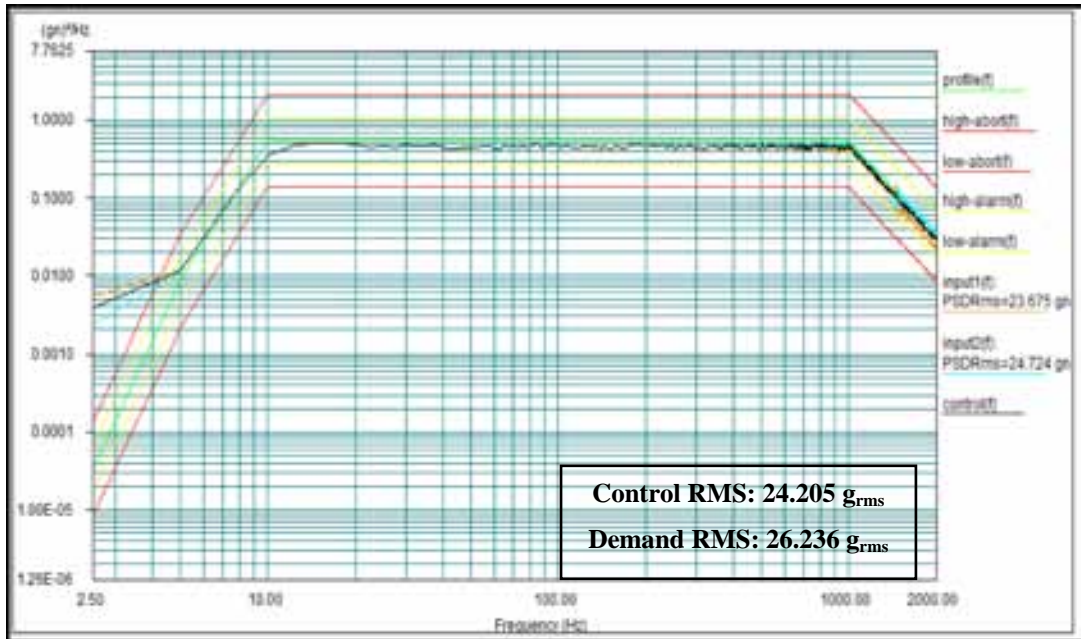


Figura 5.51: risposta del banco vibrante relativa all'asse Y



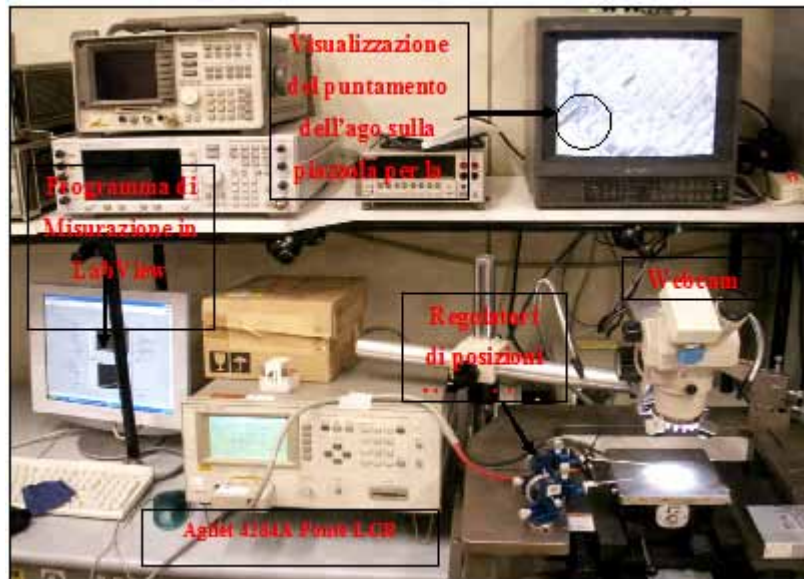
#### **5.4 Analisi dei risultati dopo le sollecitazioni ambientali: misure di resistenza elettrica e analisi morfologiche**

Il parametro che è stato scelto per verificare l'integrità delle saldature prima e dopo le prove effettuate è la resistenza elettrica degli elementi dell'array. La procedura di misura adottata per ogni campione è contraddistinta dalle seguenti fasi:

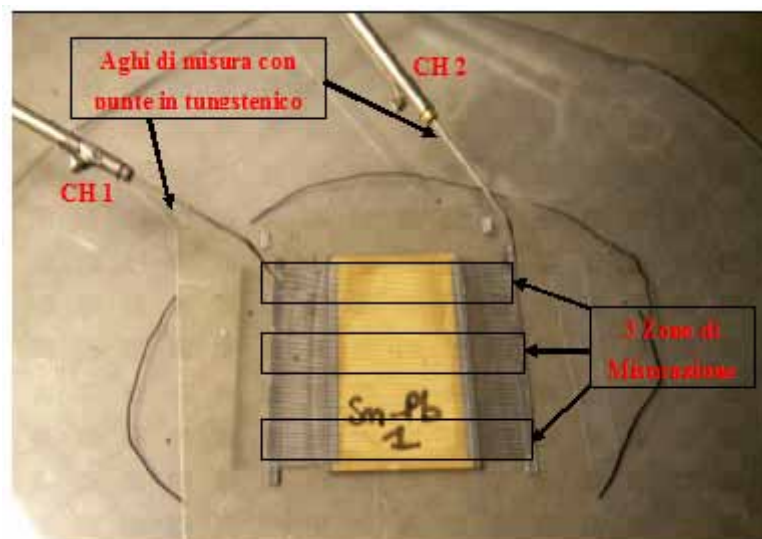
- Misura della resistenza elettrica degli elementi dell'array relativi a tre zone del campione, prima e dopo le prove; per ogni zona è stata misurata la resistenza elettrica di almeno due elementi e dopo le prove è stata verificata la resistenza elettrica degli stessi elementi.
- Misure a campione sull'intero array;
- Ripetizione della misura.

E' stato implementato un sistema automatico di misura (Figura 4.29) costituito da un ponte LCR "Agilent 4284A", da un sistema di puntamento costituito da due regolatori di posizione di precisione con due sottili aghi in tungsteno (Figura 5.52), da una webcam "Q-TEC" da 300K, da un microscopio ottico 10x e da un computer per l'esecuzione del programma di acquisizioni in LabVIEW, per l'acquisizione automatica dei valori di resistenza alle frequenze comprese tra 1 ÷ 100 kHz (50 misure). Questo range di frequenze è sufficiente a rilevare un possibile mal funzionamento o guasto della saldatura: oltre i 100 kHz si iniziano ad evidenziare anche effetti induttivi. I regolatori per il posizionamento di precisione sono fissati al banco di misura tramite calamite. La base sulla quale poggia il campione ha tre gradi di libertà: assi X,Y e angolo di inclinazione rispetto all'asse X. Inoltre il campione è fissato alla base attraverso dei fori che con l'aiuto di una pompa aspirante, riescono a tenere fermo l'oggetto in esame. compensata la strumentazione, è stata effettuata la misurazione delle resistenze elettriche, come mostrato in Figura 5.53, mentre in Figura 5.54 è mostrato il particolare del posizionamento dell'ago per la misura stessa.

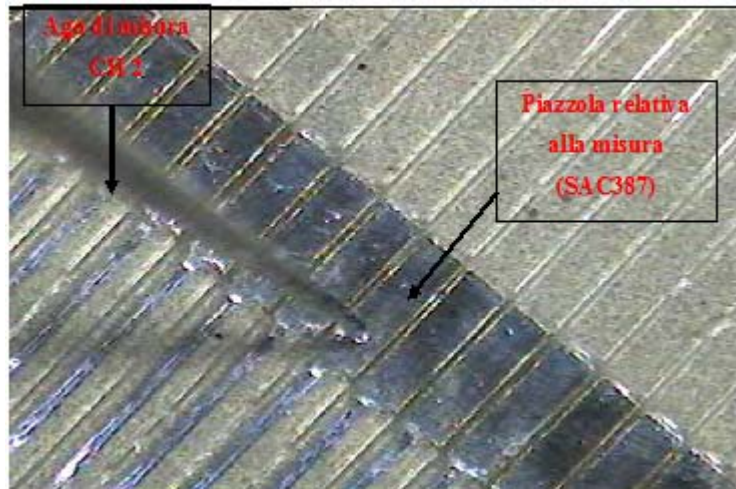
In Figura 5.55 è mostrato il pannello di controllo del software LabVIEW usato per l'acquisizione delle misure di resistenza elettrica. Si nota la presenza di due display, che riportano l'andamento della resistenza e della capacità al variare della frequenza (1 kHz ÷ 100 kHz), rispettivamente.



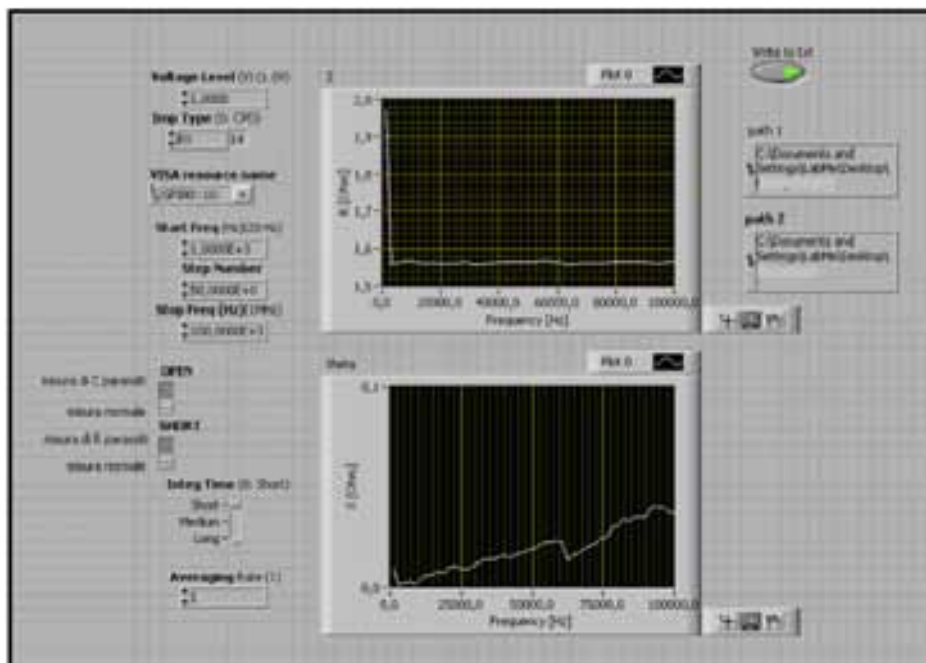
**Figura 5.52:** sistema di misurazione



**Figura 5.53:** posizionamento degli aghi per la misura di resistenza elettrica



**Figura 5.54:** particolare del posizionamento dell’ago per la misura della resistenza.



**Figura 5.55:** LabVIEW Front Panel per l’acquisizione di misura

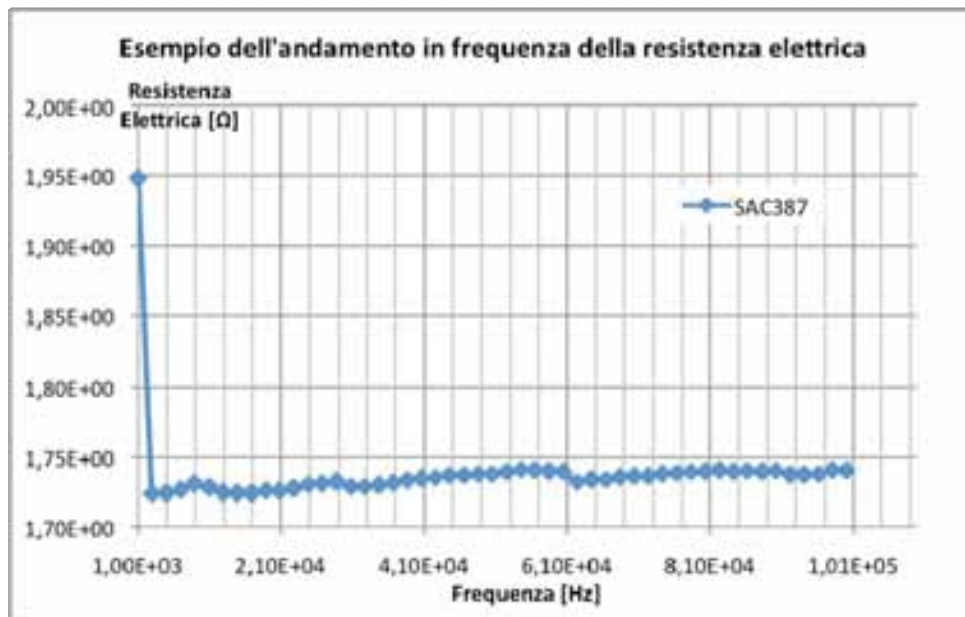
In Tabella 5.7 e 5.8 sono riportati i valori medi e la deviazione standard della resistenza elettrica per ogni campione, misurati a 3 kHz e a 100 kHz, prima e dopo le prove di temperatura e vibrazione, secondo la procedura appena descritta. L’incertezza strumentale sulle misure è del 3%. A titolo esemplificativo, in Figura 5.56 si riporta l’andamento della resistenza elettrica di un elemento dell’array di un trasduttore saldato con lega SAC 387 al variare della frequenza.

**Tabella 5.7:** misure della resistenza elettrica prima e dopo i cicli termici

Lega	Resistenza Elettrica Campioni sottoposti a Cicli Termici			
	R [ $\Omega$ ] iniziale		R [ $\Omega$ ] dopo 200 cicli	
	3 kHz	100 kHz	3 kHz	100 kHz
Sn62Pb38	$3,01 \pm 0,28$	$2,96 \pm 0,34$	$2,36 \pm 0,21$	$2,32 \pm 0,21$
In52Sn48	$1,54 \pm 0,03$	$1,54 \pm 0,03$	$1,32 \pm 0,01$	$1,33 \pm 0,01$
Sn95,5Ag3,8Cu0,7	$1,71 \pm 0,08$	$1,72 \pm 0,07$	$1,67 \pm 0,2$	$1,75 \pm 0,23$
Sn96,5Ag3Cu0,5	$1,69 \pm 0,13$	$1,67 \pm 0,11$	$1,596 \pm 0,08$	$1,521 \pm 0,08$
Sn99Ag0,3Cu0,7	$2,18 \pm 0,14$	$2,18 \pm 0,13$	$1,81 \pm 0,04$	$1,81 \pm 0,04$
Bi57Sn42Ag1	$2,32 \pm 0,43$	$2,33 \pm 0,43$	$1,93 \pm 0,28$	$1,88 \pm 0,21$

**Tabella 5.8:** misura della resistenza elettrica prima e dopo le prove di vibrazioni random

Lega	Resistenza Elettrica [ $\Omega$ ] Campioni sottoposti a Prova di Vibrazioni random			
	R [ $\Omega$ ] iniziale		R [ $\Omega$ ] dopo prova	
	3 kHz	100 kHz	3 kHz	100 kHz
Sn62Pb38	$2,68 \pm 0,21$	$2,72 \pm 0,22$	$2,42 \pm 0,30$	$2,43 \pm 0,29$
In52Sn48	$1,85 \pm 0,09$	$1,85 \pm 0,09$	$1,62 \pm 0,02$	$1,62 \pm 0,02$
Sn95,5Ag3,8Cu0,7	$2,25 \pm 0,04$	$2,25 \pm 0,04$	$2,09 \pm 0,27$	$2,1 \pm 0,27$
Sn96,5Ag3Cu0,5	$1,75 \pm 0,32$	$1,80 \pm 0,031$	$2,30 \pm 0,15$	$2,20 \pm 0,12$
Sn99Ag0,3Cu0,7	$1,54 \pm 0,03$	$1,54 \pm 0,03$	$2,53 \pm 0,25$	$2,53 \pm 0,24$
Bi57Sn42Ag1	$2,88 \pm 0,25$	$2,89 \pm 0,25$	$2,32 \pm 0,39$	$2,51 \pm 0,16$



**Figura 5.56:** andamento in frequenza di un elemento dell'array relativo al campione SAC387 per prove termiche.

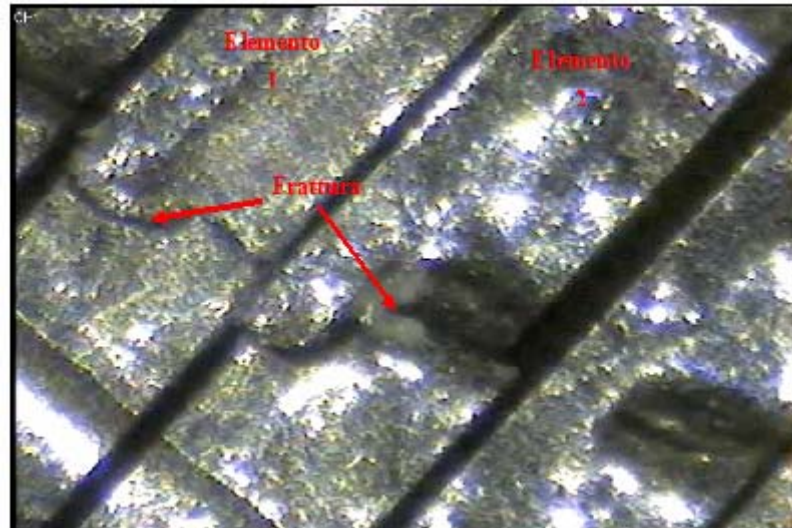
Dai dati sperimentali relativi alle prove termiche si nota che tutti i campioni presentano valori di resistenza inferiori dopo l'esecuzione della prova. L'unica eccezione è il valore della resistenza elettrica a 100 kHz del campione SAC387, ma il valore rientra nei limiti di incertezza.

In ogni caso i valori indicano che lo stress termico non ha modificato la struttura dei campioni. Le leghe senza Piombo mostrano perciò un comportamento termico paragonabile a quello della lega Sn-Pb.

I dati relativi alle prove di vibrazione indicano un comportamento della resistenza elettrica simile a quello delle prove termiche, ad eccezione delle leghe senza Piombo SAC307 e SAC305. In questi casi la resistenza aumenta al di là dell'incertezza, anche in riferimento ai valori ottenuti nelle prove termiche. Ciò può indicare un rilassamento delle saldature relative a queste leghe. Di conseguenza si può affermare che il comportamento meccanico delle leghe SAC 307 e SAC 305 non è in linea con le altre leghe, che invece presentano caratteristiche simili alla lega Sn-Pb. Comunque le prove di vibrazione random sono risultate molto più pesanti rispetto a quelle termiche per le microconnessioni dei campioni in esame.

Dai valori di resistenza elettrica misurati sugli elementi dell'array relativi alla prima zona del campione SAC 305 dopo le prove termiche, è stata rilevato un aumento notevole della stessa resistenza rispetto ai valori pre-prova. In seguito è stata eseguita un'analisi al microscopio ottico che ha confermato la frattura delle saldature, come mostrato in Figura 5.57. I dati della resistenza elettrica relativi a queste saldature non sono stati considerati nel computo della media presente in Tabella 5.1. Si ipotizza che la rottura sia stata causata dalle sollecitazioni termiche, dato la differenza del coefficiente

di espansione termica dei materiali saldati. Si nota inoltre che la rottura della ceramica interessa anche il terzo elemento dell'array, senza però causare la rottura della relativa saldatura.



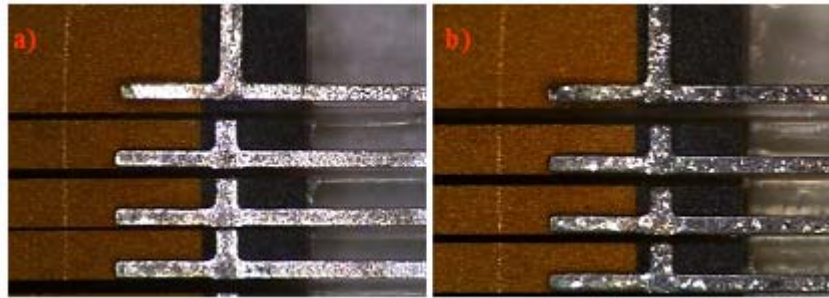
**Figura 5.57:** crack della ceramica e della saldatura sugli elementi 1 e 2 della zona a destra dell'array del campione SAC305 dopo le prove termiche.

Dai dati sperimentali si osserva un ottimo comportamento in termini di conducibilità elettrica delle leghe In-Sn e SAC387, quest'ultima presenta anche il più alto contenuto di Argento tra tutte le leghe selezionate. Questo aspetto conferma la bontà dei dati ottenuti considerando che l'Argento ha la maggior conducibilità elettrica tra tutti i metalli ( $63 \times 10^6$  S/m).

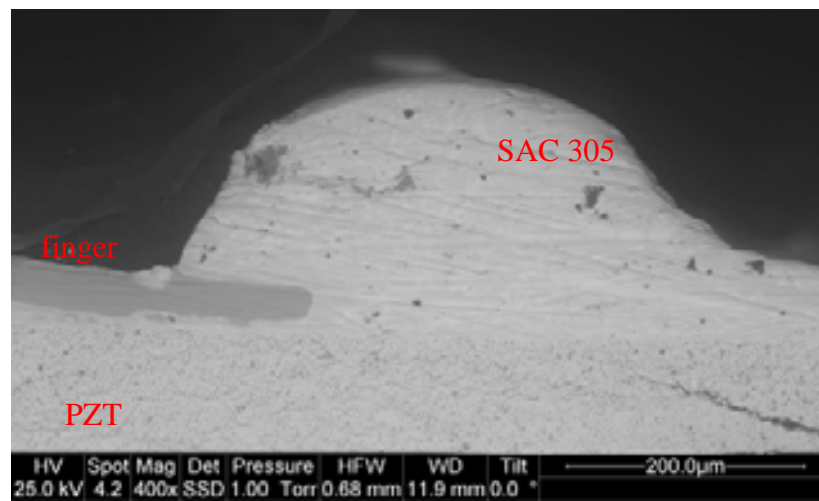
Si riporta in Figura 5.58 l'osservazione al microscopio del campione realizzato con la lega Stagno-Indio, si può osservare che il metallo che ricopre il pettine, dopo la prova ha assunto un colore più scuro di quello che aveva in precedenza. Molto probabilmente tale fenomeno è dovuto al fatto che l'Indio tende ad ossidarsi con facilità; nonostante ciò non si rilevano variazioni significative della resistenza.

Nelle Figure 5.59 e 5.60 viene riportata l'analisi all'ESEM rispettivamente di un campione di saldatura realizzato con lega SAC305 sottoposto a cicli termici e l'altro realizzato con lega Bi-Sn-Ag sottoposto a prove di vibrazioni. Il campione di lega SAC 305 evidenzia voids e piccole crepe che potrebbero portare a guasti futuri, mentre il campione realizzato con lega Bi-Sn-Ag non evidenzia particolari irregolarità a differenza della piastrina di ceramica che ha mostrato notevoli crepe dopo la prova.

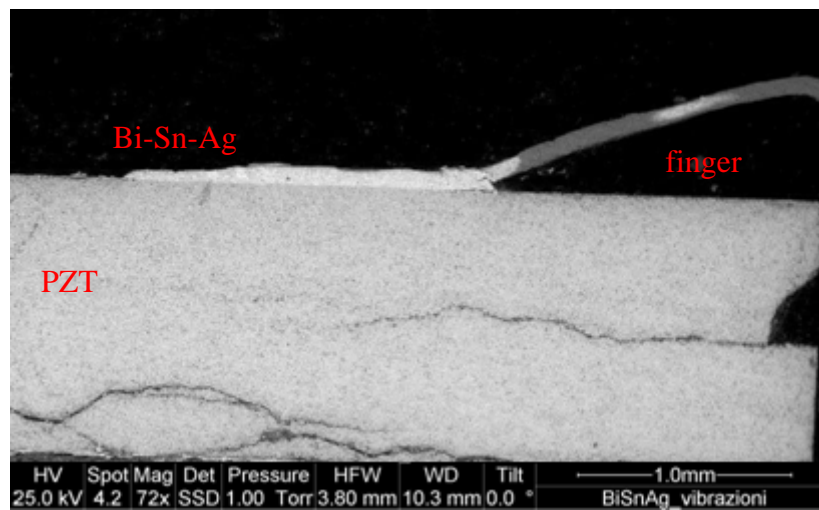




**Figura 5.58:** campione InSn, a) prima della prova, b) dopo la prova



**Figura 5.59:** campione saldato con lega SAC305 sottoposto a prove termiche

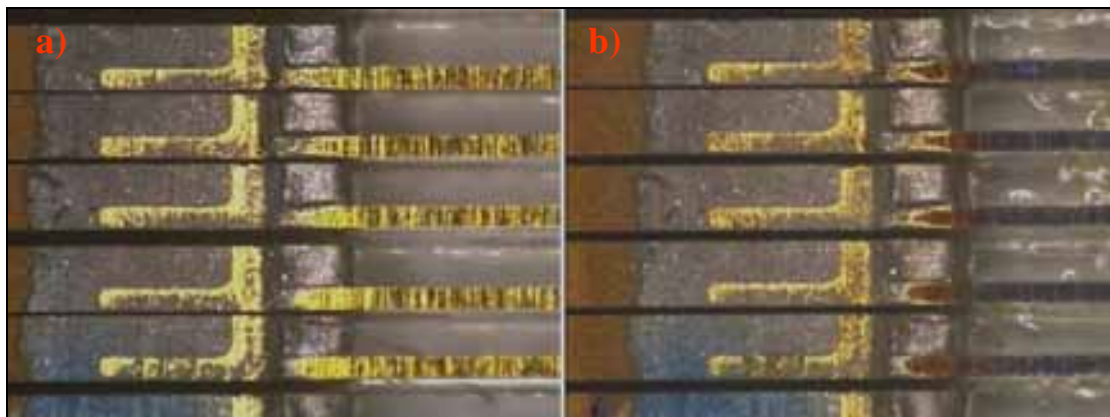


**Figura 5.60:** campione saldato con lega Bi-Sn-Ag sottoposto a prove di vibrazioni

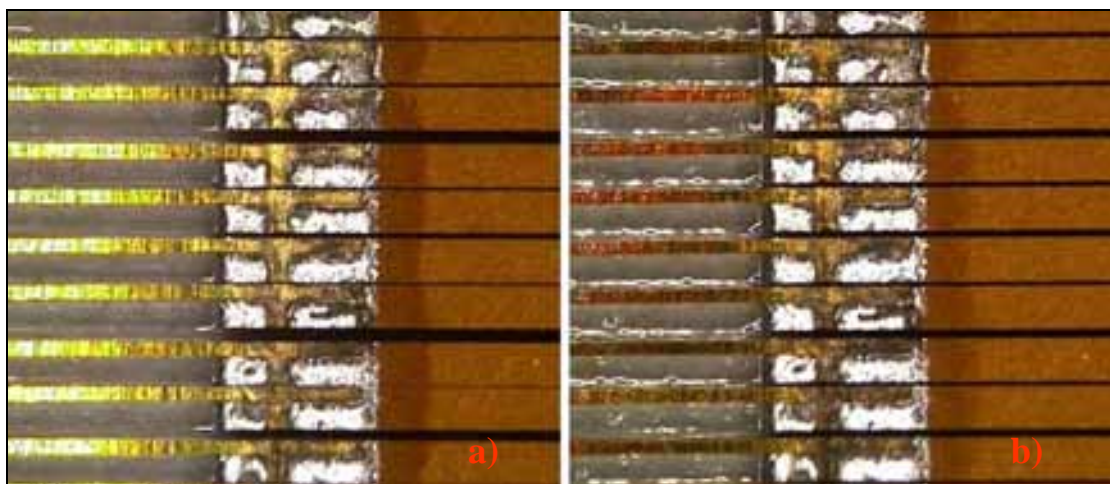


Anche le misure di resistenza effettuate al termine delle prove sui campioni di trasduttori realizzati con saldature a base di adesivo elettricamente conduttivo non hanno evidenziato l'insorgere di nessun meccanismo di guasto.

Similmente all'ossidazione delle piazzole nei campioni realizzati su vetronite, come visto ne Capitolo 4, si osserva un deterioramento dell'ottone dei finger nei campioni consistenti nell'incollaggio del pettine sul PZT, che sono stati sottoposti al caldo umido. In Figura 5.61 viene mostrato il deterioramento dell'ottone del finger, che è evidenziato dalla variazione di colore dello stesso (da dorato a brunito). Si nota che tale processo fisico-chimico ha interessato principalmente la parte più lontana dalla saldatura. Probabilmente il fatto che nella zona dell'incollaggio l'ottone sia parzialmente immerso nel polimero epossidico comporta una minore esposizione di quella parte del finger. Quanto descritto è avvenuto sia per i campioni realizzati con la colla Heraeus (Figura 5.61) che con la colla Epo-Tek (Figura 5.62).



**Figura 5.61:** campione 0530-01, a) prima della prova e b) dopo la prova

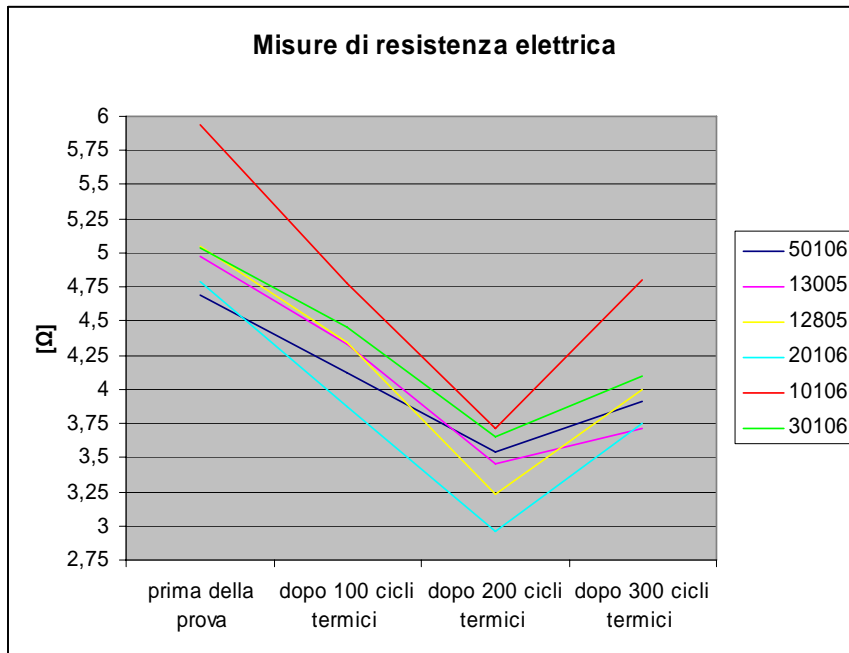


**Figura 5.62:** campione 0530-02: a) prima della prova e b) dopo la prova

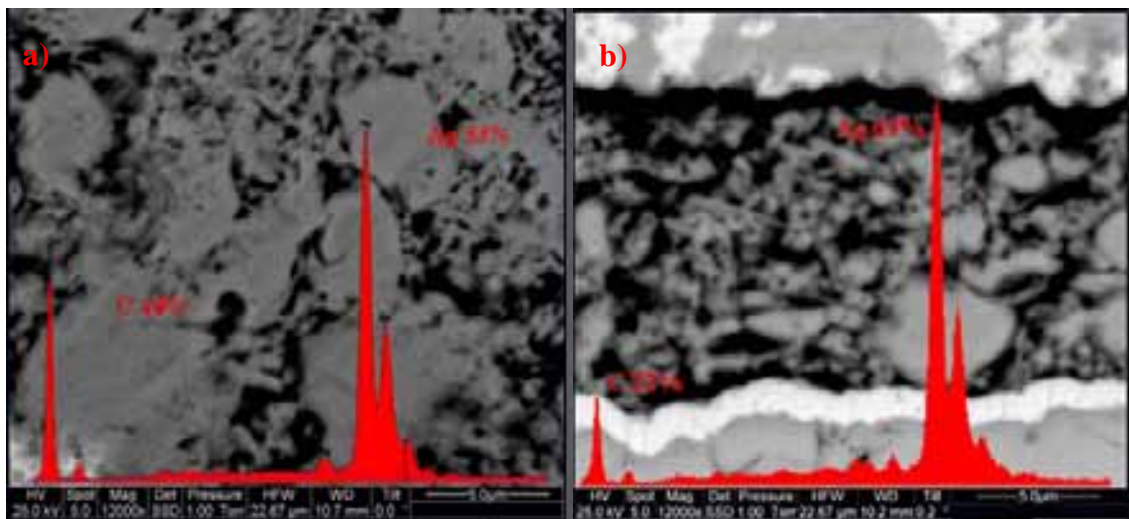
In Tabella 5.9 sono riportati i valori di resistenza relativi ai campioni sottoposti a cicli termici in cui rispettivamente sono stati variati i parametri “tipo di colla conduttiva”, “spessore colla conduttiva” e “temperatura di polimerizzazione”; i valori di resistenza riportati sono stati rilevati alla frequenza di 3 kHz prima e dopo le sessioni di prova. L’andamento dei valori misurati in funzione delle prove termiche viene riportato in Figura 5.63, si può osservare che in tutti i campioni realizzati si è verificato un calo del valore di resistenza nelle misure dopo 100 e 200 cicli termici, mentre tale valore torna a salire nelle misure effettuate dopo 300 cicli. L’esposizione ad elevate temperature ha portato ad una prosecuzione del curing del polimero che forma la colla, con conseguente miglioramento della conducibilità. La prosecuzione del curing della colla sottoposta ad alta temperatura, dopo i primi 200 cicli, è confermata anche dal confronto dei risultati dell’analisi morfologica e microchimica sui campioni di adesivo Hereaus, polimerizzato a 80°C, sottoposti a cicli termici tra -25 °C e 100 °C, dove si è riscontrato l’aumento della percentuale relativa di Argento all’interno della matrice epossidica (Figura 5.64).

**Tabella 5.9:** caratteristiche dei campioni stressati termicamente

Item	Tipo di colla	Tempo di Curing	Temperatura di Curing [°C]	Spessore [μm]	Resistenza iniziale elemento [Ω]	Resistenza elemento dopo 100 cicli termici [Ω]	Resistenza elemento dopo 200 cicli termici [Ω]	Resistenza elemento dopo 300 cicli termici [Ω]
050106	PC 3000	30 min	120 ± 1,5°C	8 ± 3 μm	4,69	4,12	3,54	3,91
013005	H20E	15 min	120 ± 1,5°C	7 ± 3 μm	4,97	4,33	3,45	3,72
012805	PC 3000	4 ore	80 ± 1,5°C	7 ± 3 μm	5,05	4,35	3,23	4,00
020106	H20E	3 ore	80 ± 1,5°C	5 ± 3 μm	4,79	3,88	2,96	3,75
010106	PC 3000	30 min	120 ± 1,5°C	37 ± 3 μm	5,94	4,78	3,72	4,80
030106	PC 3000	30 min	120 ± 1,5°C	94 ± 3 μm	5,04	4,45	3,65	4,10



**Figura 5.63:** misure di resistenza elettrica per campioni realizzati con adesivi conduttivi dopo le prove termiche



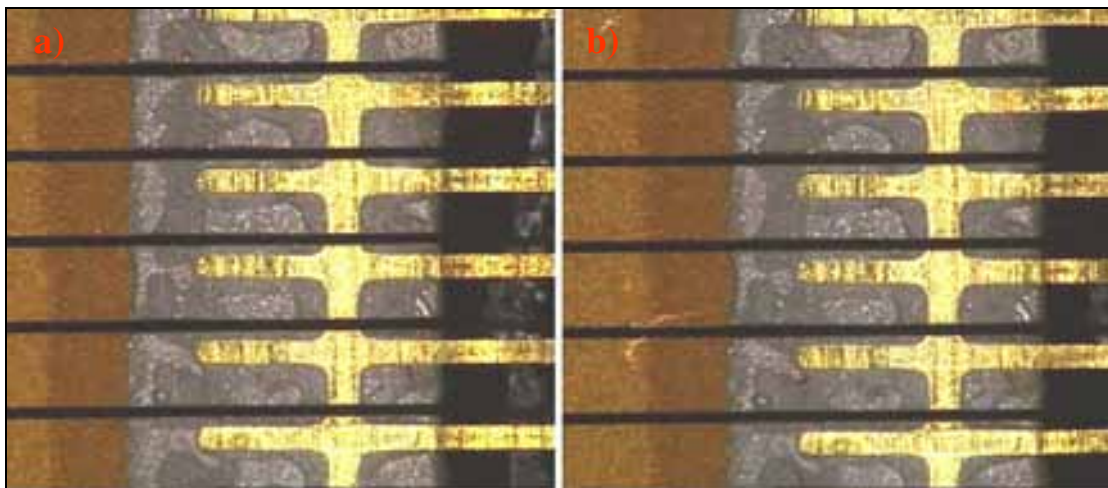
**Figura 5.64:** analisi morfologica (12000x) e microchimica prima (a) e dopo i 200 cicli termici (b)

Le misure (Tabella 5.10), prima e dopo la prova, sono effettuate ponendo i terminali di misura su due finger, saldati con colla agli estremi opposti di un parallelepipedo di ceramica del PZT. Il PZT consiste in due elementi dell'array che non sono stati divisi tra loro; di conseguenza l'elettrodo dorato dei due elementi rimane in collegamento elettrico.

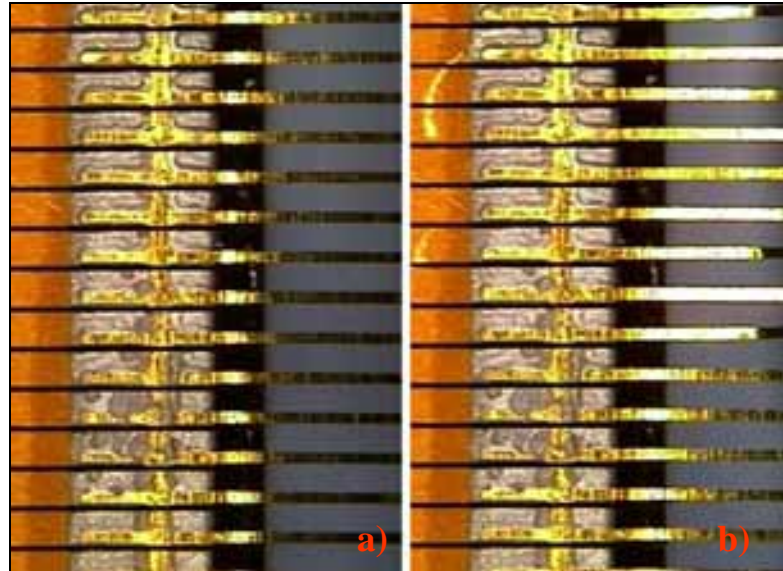
**Tabella 5.10:** risultati delle misure sui campioni prima e dopo la prova di vibrazioni

Item	Tipo di colla	Tempo di Curing [h]	Temperatura di Curing [°C]	Spessore [ $\mu\text{m}$ ]	Resistenza elemento [ $\Omega$ ]	Resistenza elemento dopo prova [ $\Omega$ ]
0603-01	PC3000	1	120	30	$3,5 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,5$
0603-02	PC3000	1	120	50	$3,6 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,4$
0604-01	H20E	1	120	30	$2,0 \pm 0,4$	$1,8 \pm 0,2$
0604-02	H20E	1	120	50	$3,3 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,4$
0604-03	H20E	4	80	30	$2,1 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$
0604-04	H20E	4	80	50	$4,0 \pm 0,8$	$4,0 \pm 0,6$
0604-05	PC3000	5	80	30	$2,3 \pm 0,5$	$2,4 \pm 0,4$
0604-06	PC3000	5	80	50	$2,9 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,2$

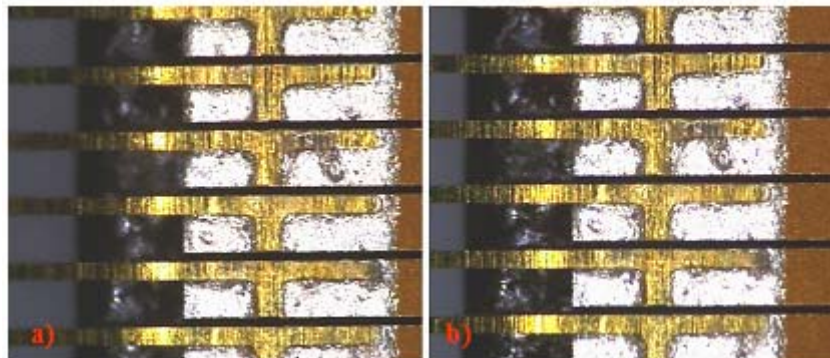
I campioni sottoposti a vibrazioni random non hanno subito alterazioni nel corso della prova. Questo si nota sia dalle osservazioni delle saldature al microscopio, che dal confronto delle foto fatte prima della prova con quelle fatte al termine della stessa. In figura 5.65 viene riportato un campione realizzato con adesivo Heraeus PC3000, fotografato prima e dopo la prova di vibrazione random; in cui si può osservare chiaramente che le saldature sono identiche e nessun finger si è scollato. La medesima considerazione può essere estesa a tutti i campioni di saldature effettuati con adesivi conduttivi Heraeus. Dopo la prova, l'unico cambiamento rilevabile nei campioni consiste nella differenza che si può notare confrontando le due immagini della Figura 5.66, e riguarda la parte 'libera' del finger. Infatti l'estremità non saldata del pettine, sotto le sollecitazioni meccaniche, si è piegata in maniera non uniforme: ogni singolo finger in Figura 5.66 a destra riflette la luce in modo diverso a seconda dell'inclinazione che ha assunto durante la prova.

**Figura 5.65:** campione 0603-01, a) prima della prova e b) dopo la prova.





**Figura 5.66:** campione 0603-02: a) prima della prova e b) dopo la prova.



**Figura 5.67:** campione 0604-01, a) prima della prova e b) dopo la prova.

Analogamente per la colla Epo-Tek non si osservano differenze nelle saldature: anche in questo caso nessun finger si è scollato. Un esempio di ciò è riportato in figura 5.67 a) e b) in cui sono riportate rispettivamente le immagini prima e dopo la prova.

Le misure e le analisi delle immagini effettuate, permettono di concludere che le saldature con le colle conduttive sperimentate (sia la Heraeus che la Epo-Tek<sup>®</sup>) presentano una buona resistenza meccanica. La forza di coesione dell'incollaggio appare essere in linea con quanto mostrato dalle saldature metalliche effettuate con leghe lead-free, sottoposte alle stesse prove.

La misura effettuata con l'impedenziometro mostra la resistenza complessiva che è ottenuta dalla serie di cinque contributi:

- la resistenza del finger in ottone,  $R_{fI}$ ;

- la resistenza della prima saldatura tra finger ed elettrodo effettuata mediante la colla conduttiva,  $R_{c1}$ ;
- la resistenza della striscia d'oro che normalmente funge da elettrodo,  $R_{Au}$ ;
- la resistenza della seconda saldatura tra finger ed elettrodo,  $R_{c2}$ ;
- la resistenza del secondo finger,  $R_{f2}$ .

La resistenza elettrica di contatto tra i vari materiali che compongono il campione vengono trascurate in quanto si ipotizza che assumano valori molto minori.

Quindi la resistenza osservata con lo strumento è pari a:

$$R = R_{f1} + R_{c1} + R_{Au} + R_{c2} + R_{f2} \quad (5.7)$$

Alcune misure, fatte per verificare le entità delle singole resistenze, mostrano che lo strato d'oro è caratterizzato da valori di resistenza pari a  $1,41 \pm 0,06 \Omega$ . Tale risultato a livello teorico è giustificato dal fatto che l'elettrodo dorato ha uno spessore ridottissimo (circa  $1,25 \mu\text{m}$ ) ed inoltre si compone, in parte, anche di cromo. Il finger in ottone ha invece una resistenza di  $0,20 \pm 0,05 \Omega$ .

Nella misura della resistenza elettrica si è tenuto conto del fatto che gli elementi costituenti la striscia su cui viene realizzata la misurazione potessero influire sulla variazione del valore di resistenza, a seguito dello stress termico e delle ossidazioni. Da risultati di misura ricavati sperimentalmente è emerso che la resistenza elettrica misurata sulla superficie dorata di  $4,42 \text{ mm}^2$  ( $0,34 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ ) dell'elemento della ceramica e la resistenza della connessione non si sono modificate dopo le sollecitazioni ambientali; di conseguenza le eventuali variazioni sul valore di resistenza elettrica sono da imputare alla connessione lega e piazzola del finger.

L'analisi delle misure effettuate sui campioni prima e dopo le prove mostrano che, né le sollecitazioni meccaniche, né la prova climatica hanno generato guasti.

## CAPITOLO VI

### Misure per la Caratterizzazione di una Sonda Phased Array ad Ultrasuoni con Saldature a base di Adesivo Elettricamente Conduttivo

#### 6.1 Adesivo elettricamente conduttivo: l'alternativa alle leghe saldanti

Come già ampiamente discusso nel Capitolo I, le indicazioni date dalla Unione Europea sono volte ad una completa rimozione delle saldature Stagno-Piombo anche dalle apparecchiature per applicazioni biomedicali, che sono ad oggi ancora esentate da tale obbligo.

Il lavoro di ricerca si è incentrato quindi sull'analisi di fattibilità e sullo studio di affidabilità di saldature realizzate mediante nuove leghe saldanti e adesivi elettricamente conduttivi; in particolare le nuove tecnologie saldanti sono state applicate su un trasduttore ad ultrasuoni, che costituisce il cuore di una sonda ad ultrasuoni phased array, in cui anche se una sola connessione tra finger e PZT risultasse difettosa, sarebbe compromesso il corretto funzionamento di tutta la sonda ecografica.

L'utilizzo delle leghe metalliche lead-free, come ad esempio le SAC (stagno, argento, rame), ha l'inconveniente di richiedere una maggiore temperatura di processo, fatto che comporta il rischio di una depolarizzazione, anche solo superficiale, del PZT, con conseguente perdita di rendimento elettromeccanico della sonda stessa. Tale fenomeno nefasto si manifesta nel caso in cui la temperatura della piastrina nel corso della saldatura raggiunga il punto di Curie del materiale; essendo questo fissato a 235 °C per il PZT in uso, e avendo le SAC un punto di fusione attorno ai 220 °C, e una temperatura tipica di saldatura sui 270 °C, si comprende chiaramente la criticità di questo processo. Con queste premesse è facile intuire che, nonostante le risposte positive delle leghe saldati senza Piombo, per la realizzazione del prototipo della sonda phased array l'utilizzo di colle conduttive, caratterizzate da temperature di lavorazione mediamente



molto inferiori a quelle di qualunque lega metallica (comprese quelle basso-fondenti a base di indio e bismuto), è una prospettiva molto interessante.

Dopo aver approfondito gli studi sperimentali su diverse leghe saldanti senza Piombo ed adesivi conduttivi, cercando di quantificare le differenze, che intercorrono tra la saldatura con le colle conduttive e quella in Sn-Pb o in generale con le leghe saldanti, evidenziando i vantaggi e gli svantaggi del nuovo materiale proposto si è deciso di implementare e caratterizzare un'intera sonda phased array ad ultrasuoni per applicazioni biomedicali con trasduttore saldato con adesivo conduttivo.

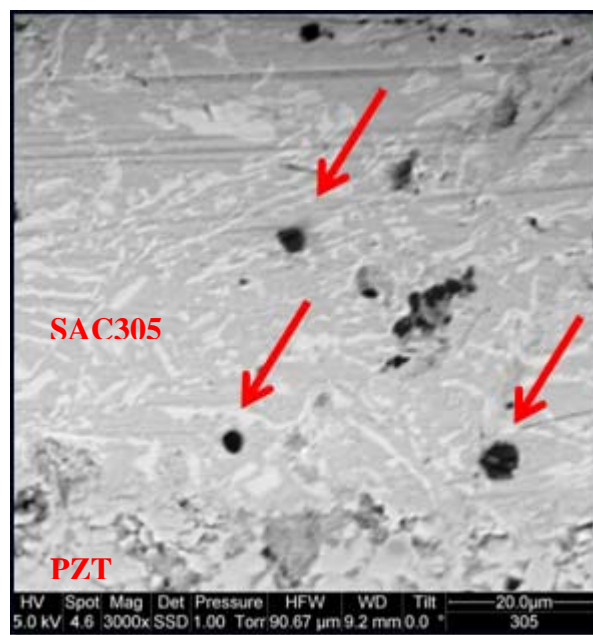
Di seguito sono riepilogate le caratteristiche riscontrate che differenziano la resina epossidica conduttiva dalle leghe saldanti e si evidenziano i vantaggi degli adesivi che ci hanno indotto ad un suo impiego in ambito industriale:

- **Temperatura e tempi di realizzazione della saldatura:** la polimerizzazione dell'adesivo conduttivo può avvenire a temperatura ambiente 24°C fino ad un massimo di 120°C; tuttavia per ridurre la durata del processo di produzione si potrebbero raggiungere anche i 150°C, ma si rimane comunque al di sotto delle temperature necessarie per la realizzazione delle saldature in In-Sn pari a 160°C, in Bi-Sn-Ag di 180° ed è molto inferiore rispetto ai 240°C per lo Sn-Pb ed ai 260°C - 280°C per le leghe SAC. Quindi in tutti quei casi in cui i substrati, possono variare le proprie caratteristiche a temperature superiori a 200°C, come per alcuni tipi di materiali piezoelettrici, l'uso degli adesivi può costituire una valida alternativa pur tuttavia allungano la durata del processo di produzione, che per le leghe risulta piuttosto veloce, cioè circa 60 secondi considerando la fase di preriscaldamento. L'uso di colle conduttive è assolutamente compatibile con le temperature massime, tollerate, senza introdurre sollecitazioni gravose, da generici substrati o package dei dispositivi microelettronici, caratterizzati da una temperatura di transizione vetrosa della plastica compresa tra i 140°C ed i 160°C, a seconda del materiale plastico.
- **Preparazione della saldatura e bagnabilità:** il processo di saldatura Sn-Pb, come quello delle altre leghe saldanti studiate, realizza connessioni tenaci, ma è necessario "preparare" le superfici dei giunti, che devono essere lisce e lucide, ed utilizzare una lega brasante con adeguata bagnabilità; mentre con gli adesivi conduttivi occorre solo sgrassare le superfici, nel caso in esame finger e bordi laterali della ceramica, per poi effettuare l'applicazione che risulta avere un'elevatissima capacità di diffusione, in quanto la viscosità delle resine lo consente. La lega eutettica 63Sn-37Pb, fino ad oggi usata per la realizzazione del trasduttore ad ultrasuoni, mostra una minor tensione superficiale con la conseguente miglior bagnabilità del giunto da saldare rispetto alle altre leghe saldanti RoHS-compliant.
- **Riparabilità:** per la saldatura mediante adesivo conduttivo la possibilità di riparazione è alquanto difficile, se non impossibile da realizzare. Avendo

caratteristiche di materiale termoplastico, la resina, una volta polimerizzata, non può più tornare allo stato liquido primitivo. Viene indicata una temperatura “Degradation Temperature”, solitamente maggiore di 380°C, alla quale si riesce ad eliminare la parte saldante; tuttavia, questo processo porterebbe alla modifica o alla rottura del substrato o dei dispositivi a montaggio superficiale per l’elevata temperatura. La riparazione delle saldature con leghe è senza dubbio meno traumatica e più semplice; infatti è sufficiente eseguire la rifusione della connessione ed aggiungere materiale saldante dove necessario.

- Residuo di fluxante: è un effetto non desiderabile, che si presenta con le saldature in lega e che porta allo “spattering”, cioè la disseminazione di piccole particelle di lega sull’intera superficie del dispositivo, causato da un’evaporazione esplosiva dei solventi, incapsulati all’interno della pasta saldante. L’uso del forno a convezione aumenta tale problema, in quanto ostacola un’evaporazione lenta dei solventi; può essere evitato, applicando un gradiente termico contenuto nella fase di preriscaldamento (0,7-1°C/sec). Con le colle conduttive questa problematica non si presenta per l’assenza di fluxante.
- Corrosione ed ossidazione dei reofori: eventuali residui di fluxante di saldatura possono essere attivati durante la vita operativa del dispositivo e indurre fenomeni corrosivi degli elementi metallici, come reofori e piste. E’ quindi conveniente, quando si usano flussi fortemente attivati, eseguire una rimozione accurata dei residui. Questo fenomeno può essere evitato usando fluxanti “no-clean”, i quali non danno problemi di corrosione. Viceversa nelle saldature con colle conduttive non ci sarà il problema di pulizia della parte dopo la saldatura, in quanto non viene utilizzato alcun fluxante. Il processo d’ossidazione delle resine conduttive non riscontrato nelle sperimentazione, se dovesse verificarsi, sarebbe comunque molto lento, in quanto i grani d’argento sono “affogati” in una resina, che crea una sorta di guscio ermetico protettivo dagli agenti ossidanti.
- Espansione termica: la lega Sn-Pb (63%-37%) ha un coefficiente d’espansione termica di 25 ppm/°C [94] per temperature inferiori a 100°C. La colla conduttiva Heraeus PC 3000 per  $T > T_g$  ha un CTE pari a 140 ppm/°C, mentre per  $T < T_g$  ha un CTE pari a 65 ppm/°C. Essendo la temperatura operativa del trasduttore di 55°C ÷ 60°C per avere una dilatazione termica contenuta, occorre eseguire una polimerizzazione a T alte (per esempio 120°C) e con tempi d’applicazione maggiori: si otterrà proporzionalmente un aumento della  $T_g$ . Visto che la “Thermal Expansion” del PZT in uso è di 3,5 ppm/°C, per una maggiore affidabilità della saldatura dovremo avere una dilatazione termica il più vicina possibile a quella della ceramica.

- **Generazione di voids:** è un fenomeno causato dall'evaporazione gassosa del flussante incapsulato all'interno della pasta saldante. All'interno della struttura vengono imprigionate bolle di gas, che riducono l'integrità della saldatura. Il fenomeno può essere minimizzato diminuendo il tempo di "reflow" o il gradiente termico durante il preriscaldamento. Spesso viene introdotto Azoto, che ha un'azione benefica rispetto a tale problema. A titolo esemplificativo viene mostrato in Figura 6.1, il problema della formazione di voids riscontrato durante la realizzazione di una saldatura tra finger e piastrina di ceramica con lega SAC 305. Con gli adesivi conduttivi non si verificano voids, né risulta necessario aggiungere solventi o Azoto.



**Figura 6.1:** voids individuati in una saldatura con lega SAC305

- **Tomb stoning:** si verifica quando due reofori di un componente vengono bagnati in modo diverso dalla pasta saldante. La tensione superficiale della lega metallica richiama verso di sé il terminale, che viene bagnato per primo o in quantità maggiore, causando il rialzamento del componente nel lato opposto e, quindi, ostacolando la saldatura dell'altro terminale. La bagnatura differente può essere causata da vari motivi: una saldabilità minore dovuta a una piazzola ossidata o progettata in maniera errata, una minore quantità di pasta o una diversa temperatura delle piazzole. Per ridurre la probabilità del verificarsi di tale inconveniente conviene utilizzare tempi di saldatura più lunghi, in modo da ottenere un riscaldamento omogeneo. L'uso di Azoto all'interno del forno può favorire il verificarsi del fenomeno. Con gli adesivi conduttivi non si ha il verificarsi del fenomeno di "tomb stoning", in quanto, nella realizzazione della

saldatura sul trasduttore, sia il finger sia la ceramica vengono bagnati allo stesso modo quando l'adesivo conduttivo è ancora allo stato liquido.

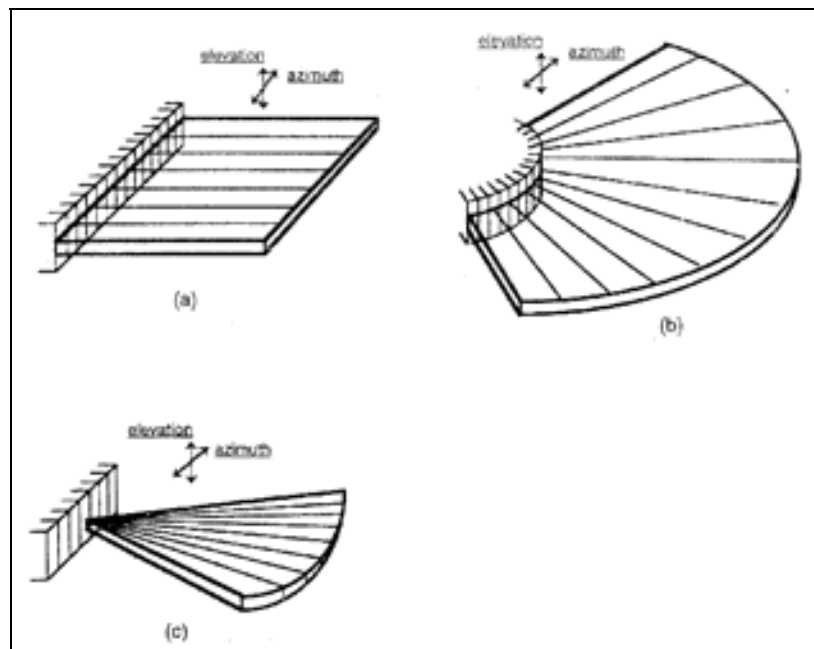
- De-wetting: difetto che si innesca quando non c'è stata un'adeguata bagnatura delle piazzole. I giunti della saldatura vengono puliti con l'agente saldante, ma l'esposizione prolungata ad alta temperatura ( $210 \div 250$ )°C può portare ad una successiva ri-ossidazione durante la fase di "reflow"; la pasta saldante troverà difficoltà a realizzare il legame fisico, generando saldature povere. La saldatura Sn-Pb realizzata in un forno a convezione aumenta la probabilità del verificarsi di questa tipologia di difetti, poiché l'elevata circolazione d'aria permette un'ossidazione maggiore. Questo difetto non si manifesta nelle saldature con colla conduttiva.
- Resistività elettrica: in letteratura la resistività della lega saldante 63Sn-37Pb risulta essere inferiore a  $20 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ; d'altra parte il risultato dedotto dopo l'analisi sperimentale mostra che i campioni realizzati con la colla Heraeus PC3000 hanno una resistività media di  $0,31 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ , mentre quelli con colla Epo-Tek H20E di  $0,20 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ ; questi valore pur essendo affetti da elevata incertezza (18%), sono sufficiente a garantire buone prestazioni elettriche degli adesivi conduttivi. Dalla prova accelerata non risultano segni di degrado e di ossidazione sui campioni a base di colla conduttiva, anzi, è stato evidenziato un miglioramento della conduzione dopo i primi  $100 \div 200$  cicli. Questo significa che le sollecitazioni termiche hanno portato la colla conduttiva ad un'ulteriore fase di polimerizzazione con il miglioramento della conduzione e con l'aumento della  $T_g$ ; quindi è possibile ipotizzare che durante i primi mesi di funzionamento del trasduttore alle temperature operative d'esercizio ( $55 \div 60$ )°C la conducibilità elettrica possa aumentare con tutti i vantaggi correlati a questo incremento.

## **6.2 La sonda linear phased array ad ultrasuoni**

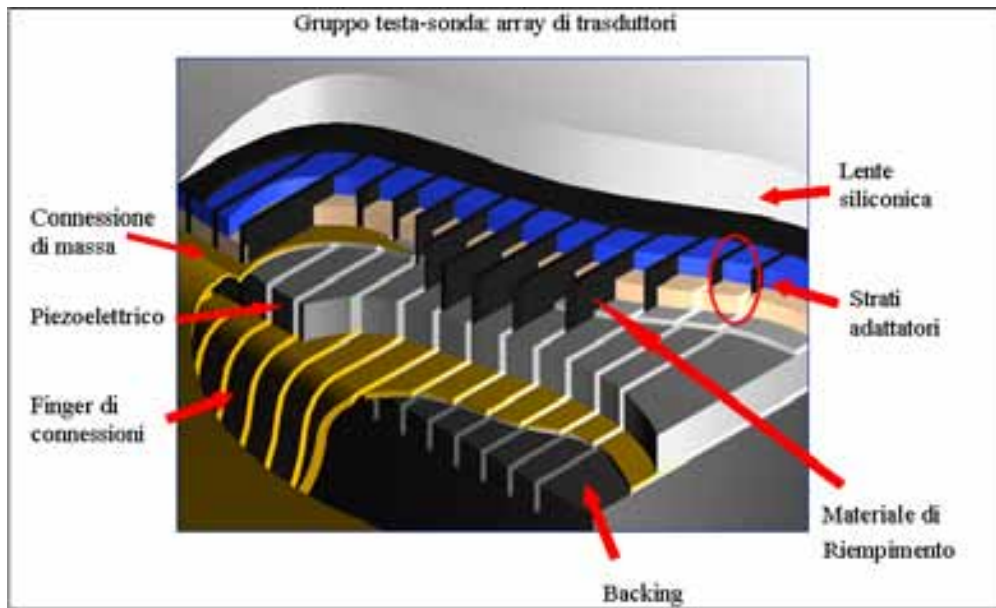
Esistono varie tipologie di sonde ad ultrasuoni a seconda dell'uso cui sono destinate, tra cui (Figura 6.2) [82]:

- array a scansione lineare (linear sequential array), generalmente formato da più di 512 elementi, dei quali vengono eccitati gruppi di 128 per volta. Il fascio ultrasonico è diretto perpendicolarmente al trasduttore, può essere focalizzato, ma non piegato (steered). Il vantaggio di questa configurazione dell'array è che ogni singolo elemento ha un'alta sensibilità rispetto all'onda sonora che è diretta perpendicolarmente ad esso. La principale controindicazione è da individuare nel fatto che ogni elemento dell'array è in grado di analizzare solo la zona che ha direttamente di fronte, quindi per ottenere un campo visivo ampio si deve ricorrere ad array molto estesi.

- array curvilineo (convex/curvilinear array), ha gli elementi posti su una superficie convessa, ma lavora secondo la stessa filosofia dell'array lineare con l'unica differenza che la forma curvilinea permette di analizzare un'area maggiore a parità di numero di elementi.
- array lineare fasato (linear phased array), ha 128 elementi, ogni singolo elemento è pilotato singolarmente, in modo tale da piegare il fascio ultrasonico sul piano azimutale. Questa caratteristica permette di avere un campo visivo molto più ampio rispetto alla grandezza dell'array stesso e di analizzare zone estese anche se poste dietro a finestre acustiche limitate, proprietà che lo rende ideale nelle applicazioni di analisi del muscolo cardiaco, dove le coste della gabbia toracica e l'aria nei polmoni fungono da schermature acustiche.



**Figura 6.2:** sonde ad ultrasuoni: (a) sequential linear array; (b) convex array; (c) linear phased array



**Figura 6.3:** struttura del gruppo testa-sonda



**Figura 6.4:** immagine dell'intera sonda realizzata, con e senza guscio protettivo

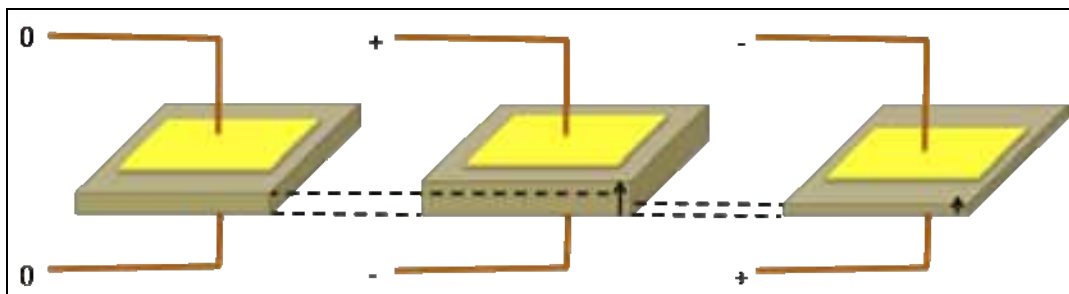
La testa della sonda linear phased array è schematizzata in Figura 6.3, dove è possibile osservare tutti gli elementi che la compongono; in Figura 6.4 viene riportata l'intera sonda che si vuole caratterizzare, essa ha frequenza di centro banda pari a circa 2,5 MHz e viene utilizzata in ambito biomedicale opportunamente compensata, in particolare è destinata all'analisi del muscolo cardiaco. Proprio per essere capace di focalizzare il fascio ultrasonico sul cuore, e quindi passare attraverso le coste della

gabbia toracica, è contraddistinta da un array di lunghezza limitata; di conseguenza la 'testa' della sonda è abbastanza piccola.

La piastrina di zirconato-titanato di piombo (PZT) sinterizzato, che è il centro nevralgico della sonda, come abbiamo visto nel Capitolo V, è caratterizzata da una dimensione di 23 mm di lunghezza per 14 mm di larghezza e 0,5 mm di spessore (Figura 5.4) ed in Figura 6.5 se ne può vedere un confronto con le dimensioni di un centesimo di Euro.



**Figura 6.5:** piastrina di PZT a confronto con un centesimo di Euro.



**Figura 6.6:** tre configurazioni tipiche di deformazione in thicknessmode di un piezoelettrico

Come già descritto la ceramica piezoelettrica vibra e produce ultrasuoni se opportunamente stimolata da un segnale elettrico. In particolare, il modo vibratorio impiegato nel caso in esame è il modo di 'spessore' (thickness mode), nel quale il segnale elettrico è applicato alle due facce del parallelepipedo di ceramica, che sono disposte normalmente alla direzione di propagazione del fascio ultrasonico (Figura 6.6). I due elettrodi, preposti a portare il segnale elettrico sul materiale piezoelettrico, sono ottenuti ricoprendo il PZT con un sottilissimo strato d'oro e nichel deposto per sputtering ( $1,25 \mu\text{m}$ ). I contatti d'oro così realizzati sono messi in connessione con l'elettronica dell'ecografo attraverso 128 microfilari, che sono saldati alla piastrina, mediante un apposito pettine di ottone con 128 finger (Figura 6.7).



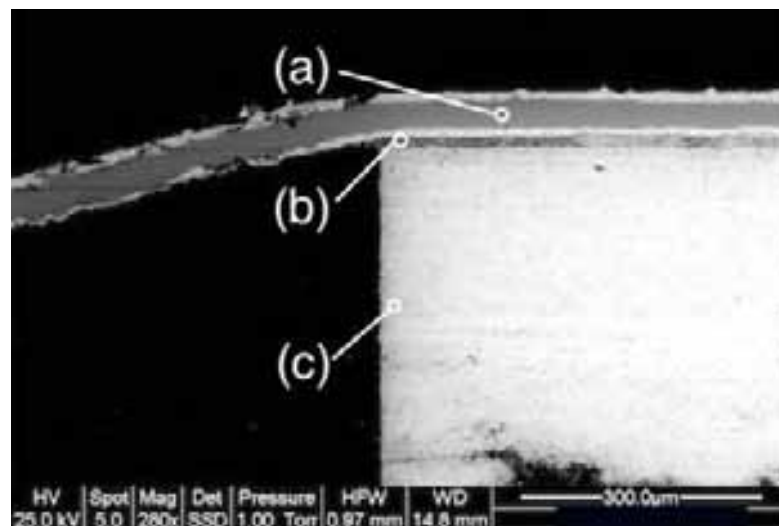


**Figura 6.7:** pettine di finger in ottone della sonda

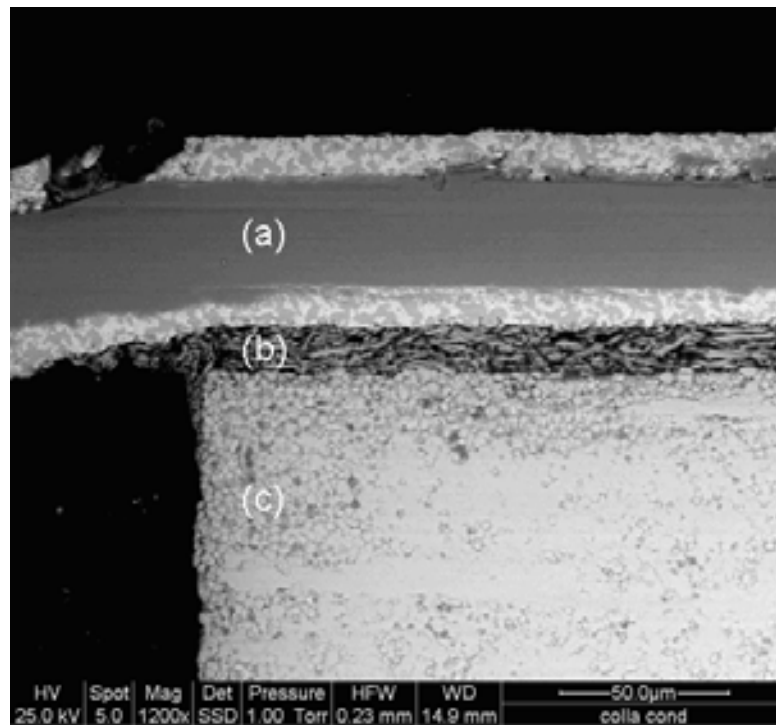
La piastrina piezoelettrica così assemblata, viene in seguito incollata sul backing e poi tagliata meccanicamente in 128 parti, che costituiscono l'array, con una tecnica nota come "dice and fill". Il risultato di questa operazione sono 128 elementi lunghi 10 mm, larghi 0,17mm, spessi 30  $\mu\text{m}$  e distanziati l'uno dall'altro di 0,34 mm.

I passi successivi della costruzione della sonda consistono nell'inserire il collegamento elettrico di massa sulla faccia rimasta visibile degli elementi piezoelettrici e nel porre sempre sullo stesso lato gli strati di adattamento dell'impedenza acustica. Il trasduttore viene poi inglobato nel proprio contenitore e vengono saldati i 128 fili che portano il segnale da e verso l'elettronica di controllo della sonda.

Nelle Figure 6.8 e 6.9 è mostrata una sezione dei trasduttori appositamente realizzati per la caratterizzazione della sonda con un in gradimento di 280x e 1200x rispettivamente; è possibile osservare il finger ricoperto di ottone (a), lo spessore di adesivo conduttivo (b) e la piastrina di ceramica piezoelettrica (c).



**Figura 6.8:** sezione del trasduttore di una sonda in una immagine ESEM (280x): saldatura tra pettine (a) e PZT (c) effettuata mediante adesivo conduttivo (b)



**Figura 6.9:** sezione del trasduttore di una sonda in una immagine ESEM (1200x) dettaglio saldatura tra pettine (a) e PZT (c) effettuata mediante colla conduttiva (b)

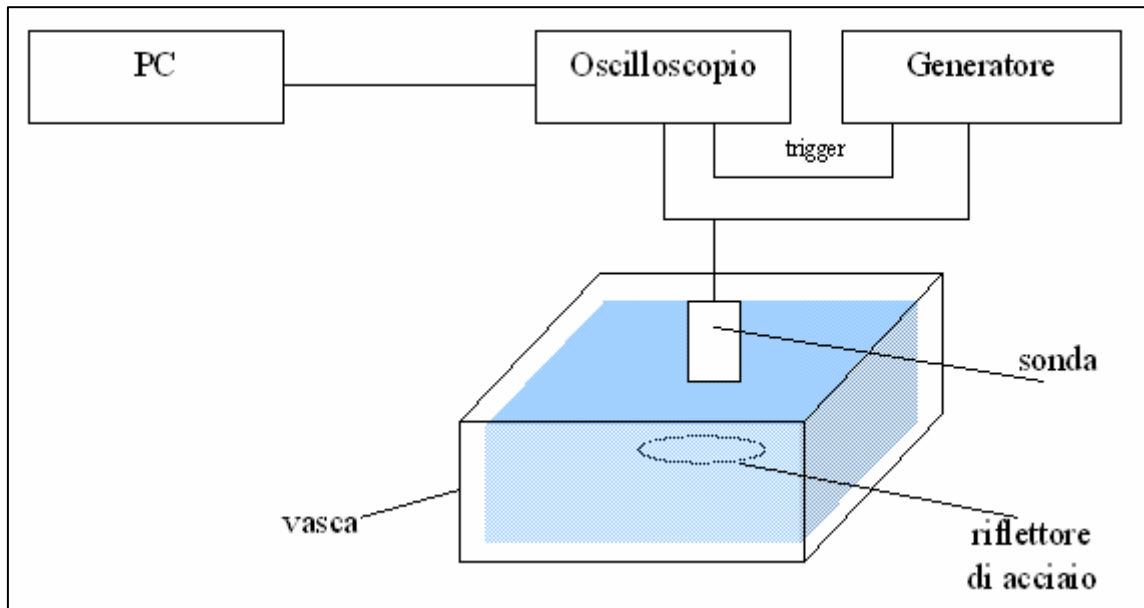
### 6.3 Caratterizzazione dei prototipi

#### *6.3.1 Misura dell'ampiezza dell'eco*

La principale misura da eseguire per caratterizzare un trasduttore piezoelettrico consiste nella rilevazione dell'ampiezza del picco di tensione corrispondente alla ricezione dell'eco da un opportuno riflettore, conseguente all'incidenza su quest'ultimo dell'impulso ultrasonico inviato dal trasduttore. Tale misura dovrà essere ripetuta sia per impulso di eccitazione a  $\delta$  di Dirac che per un burst sinusoidale a frequenza nota. Nel caso di una sonda con trasduttore ad array, la misura permetterà la caratterizzazione di ogni singolo elemento attraverso l'utilizzo dell'apparato sperimentale di misura mostrato in Figura 6.10.

I principali parametri che caratterizzano ciascun elemento dell'array sono :

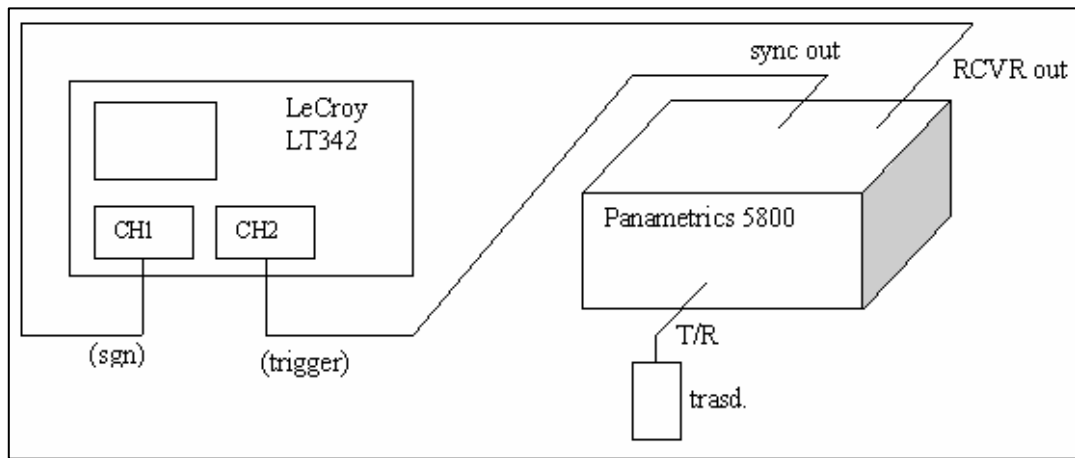
- Ampiezza del picco di tensione corrispondente a ricezione dell'eco dell'impulso ultrasonico inviato,
- Frequenza centrale e Larghezza di banda di funzionamento, calcolabili grazie ad algoritmo FFT della risposta temporale rilevata.



**Figura 6.10:** set up per la misura dell'ampiezza dell'eco per la caratterizzazione di un trasduttore

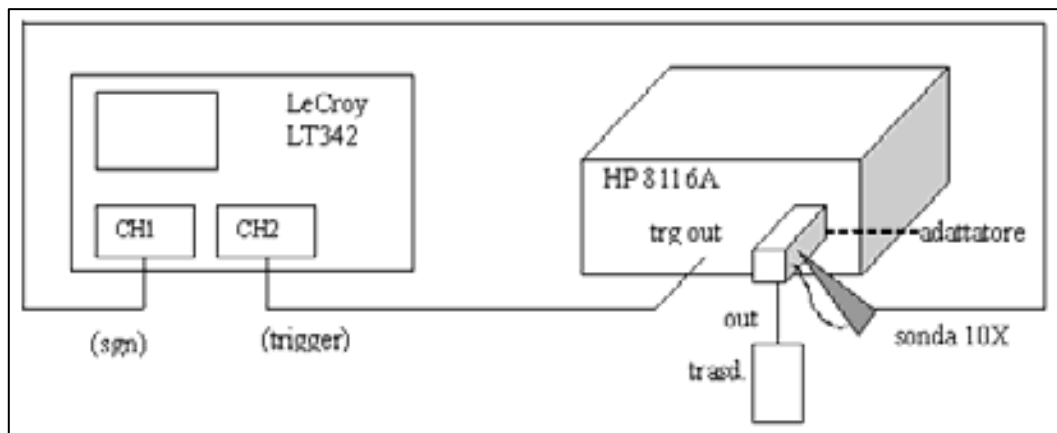
La procedura di misura consiste inizialmente nel collegare l'elemento dell'array che si vuole attivare al generatore di segnale: se si vuol verificare il funzionamento dell'elemento dell'array senza effetti del filtro sul connettore della sonda, è necessario collegare i contatti del cavo del generatore direttamente ai reofori di massa ed a quello corrispondente all'elemento sul PCB della sonda, se invece si vuole includere nella risposta dell'elemento anche il filtro presente sul connettore della sonda, i contatti del cavo del generatore vanno collegati ai pin corrispondenti alla massa ed all'elemento, secondo la mappa del connettore. Oltre al segnale di alimentazione e ricezione del trasduttore è necessario collegare all'oscilloscopio anche il segnale di trigger del generatore, secondo gli schemi riportati nelle Figure 6.11 e 6.12.

I parametri di riferimento per eccitazione a  $\delta$  di Dirac con un Generatore Panametrics 5800 sono: modalità Pulse-Echo, pulse repetition rate 500Hz, energy 12.5 $\mu$ J, damping 100 $\Omega$ , high pass filter 100kHz, low pass filter 20MHz, attenuazione in ingresso pari a 20dB, attenuazione in uscita pari 0dB, guadagno 20dB, coupling 50 $\Omega$ , entrambi i segnali adattati a 50 $\Omega$ ; i collegamenti sono riportati in Figura 6.11.



**Figura 6.11:** collegamenti per l'eccitazione di un elemento con  $\delta$  di Dirac

I parametri di riferimento per eccitazione a burst sinusoidale con un HP8116A sono: impulso sinusoidale di ampiezza massima pari a 16V, 1 burst, duty 50%, frequenza 1÷5 MHz con step di 100Hz; l'adattamento di entrambi i segnali è a 1M $\Omega$ , i collegamenti sono riportati in Figura 6.12. L'adattatore in figura 6.11 serve per evitare l'eco di ritorno in ingresso al generatore.



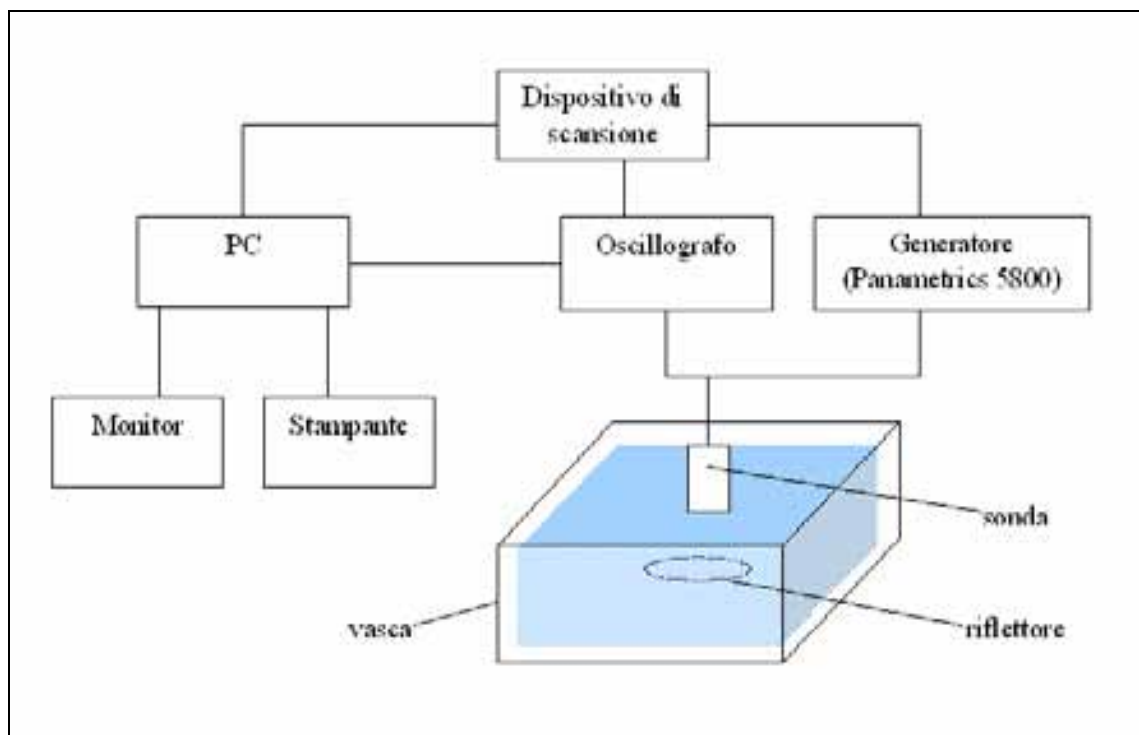
**Figura 6.12:** collegamenti per l'eccitazione di un elemento con burst sinusoidale

Successivamente è necessario posizionare la sonda da caratterizzare al di sopra del piattello riflettore mediante i motori di movimentazione del supporto su cui la sonda è montata; regolare la sua distanza dal piattello pari ad un opportuno valore di riferimento per un confronto con misure successive, tale distanza è prossima a quella in cui la sonda dovrà operare e per alcuni tipi di sonda corrisponde a circa quella del fuoco. Deve essere fissato l'intervallo di tempo tra segnale di sparo e segnale di eco visibili sull'oscilloscopio. Fissando un valore della distanza pari a 4 cm., il corrispondente tempo di arrivo dell'eco sarà dunque pari a circa 25 $\mu$ sec.

Per ridurre il rumore sui segnali acquisiti è consigliabile spegnere i motori di movimentazione della sonda e nel caso delle misure di eco da burst sinusoidale impostare, anche una media temporale del canale 1 ('average - summed'). Prima di acquisire su PC è necessario impostare sull'oscilloscopio la FFT del segnale sul canale 1. Il programma misura automaticamente i valori del picco di tensione, la sua frequenza centrale e la sua larghezza di banda percentuale a  $-6\text{dB}$  ed a  $-12\text{dB}$ .

### 6.3.2 Misura della omogeneità di funzionamento dell'array

Un importante requisito dell'array di una sonda consiste nella omogeneità di funzionamento degli elementi dell'array, per la misura di tale importante proprietà è necessario aggiungere all'apparato sperimentale riportato in Figura 6.9 un opportuno dispositivo di scansione, che consenta la successiva attivazione ed eco-ricezione di ciascun elemento, in maniera del tutto automatica come riportato in Figura 6.13. Il risultato della misura sarà pertanto un grafico a forma di 'pettine' in cui viene riportata la risposta in dB, rispetto alla media, di ciascun elemento dell'array.



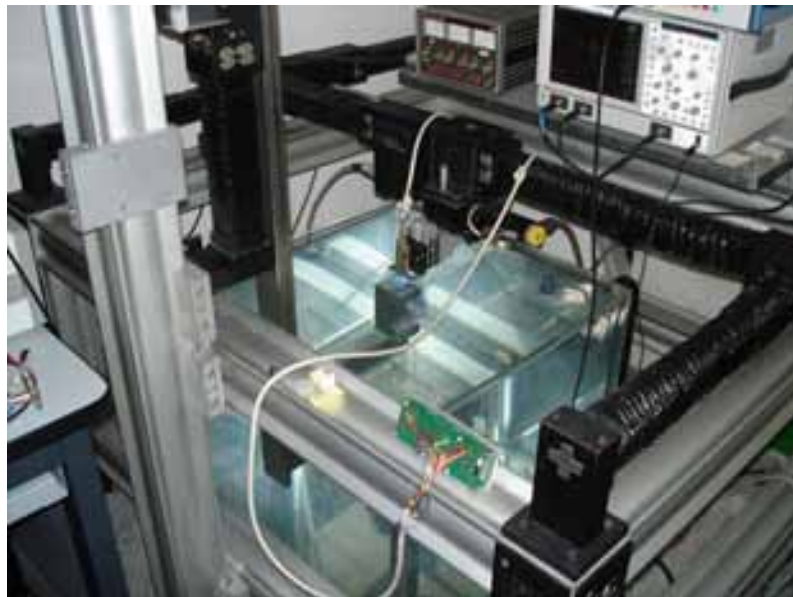
**Figura 6.13:** set up per la misura dell'omogeneità di funzionamento dell'array

La procedura di misura consiste inizialmente nell'allineamento su 3 elementi diversi, dei quali due ai bordi opposti ed uno nel centro dell'array, in modo da rendere tutti gli elementi in condizioni di massima ricezione dell'eco riflesso. Successivamente può

esser fatto partire il test di scansione della sonda, il risultato è un diagramma a pettine corrispondente alla dispersione di risposta dei singoli elementi rispetto alla media (in dB). Per verificarne singolarmente il funzionamento di un elemento è possibile selezionarlo con un cursore mobile sul diagramma, inoltre è possibile osservare il segnale di eco di ciascun elemento sull'oscilloscopio. Nel caso che un elemento abbia una risposta molto bassa, è possibile capire se il problema è dovuto all'elemento o all'induttanza in serie, nella scheda del connettore. Infatti, nel primo caso il segnale di eco ricevuto è quasi assente, mentre nel secondo si ha una forma d'onda non solo depressa, ma anche distorta.

### ***6.3.3 Analisi dei risultati sperimentali dopo prove ambientali ed elettriche sui prototipi***

Collegati i 128 elementi dell'array del trasduttore all'impulsatore, attraverso un'interfaccia appositamente realizzato, l'elemento viene eccitato per mezzo di un impulso a  $\delta$  di Dirac o un burst sinusoidale, l'eco di ritorno viene visualizzato sullo schermo dall'oscilloscopio e inviato al PC (Figura 6.14).



**Figura 6.14:** implementazione delle misure

Ottenuta l'immagine a PC, si analizza la forma dell'impulso con particolare attenzione all'ampiezza picco-picco e alla durata dei ripples; quindi si controlla che l'impulso abbia sufficiente potenza e breve durata, i ripples rappresentano infatti le componenti che seguono l'impulso principale. La loro presenza è un parametro di qualificazione del trasduttore in quanto più breve sarà l'impulso tanto più larga risulterà la banda. L'interesse generale è infatti quello di ottenere sonde con bande sempre più larghe aumentando, quindi, la capacità di indagine, senza però sacrificarne la sensibilità.

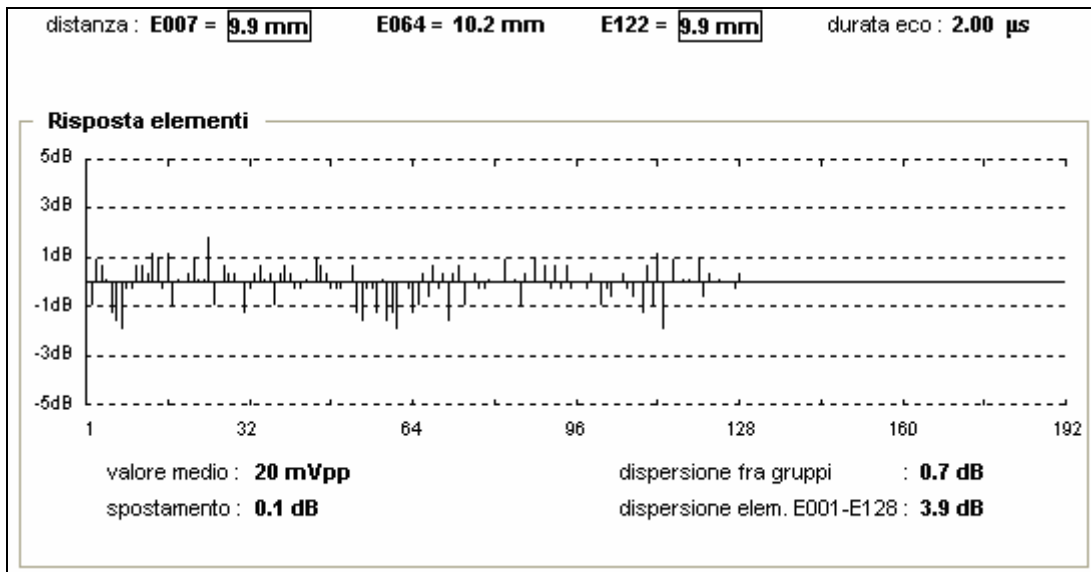
La rappresentazione dello spettro delle frequenze mette in risalto la larghezza e la forma della banda; in particolare è importante il taglio -6 dB dove convenzionalmente viene calcolata l'ampiezza di banda.

È stato realizzato un prototipo di sonda phased array, caratterizzato da un trasduttore saldato al pettine per gli elementi dispari dei 128 con colla conduttiva, per gli elementi pari con Sn-Pb ad oggi usato nel processo produttivo. Successivamente sono state effettuate le misure di caratterizzazione dell'array; è stata valutata la risposta di tutti gli elementi, il cosiddetto "pettine", che riporta la spazzolata effettuata su tutto l'array per mezzo dello scanner (Figura 6.13). Infatti, i 128 elementi vengono eccitati singolarmente con 2 cicli sinusoidali a 2,5 MHz con ampiezza 10V e si analizza la potenza restituita da ognuno. Nel grafico è riportato lo scostamento dal valore medio standardizzato rappresentato dallo zero. Il limite stabilito per la difettosità della sonda è pari a 4 dB di dispersione su tutti gli elementi. Inoltre è possibile valutare la banda per un solo elemento dell'array o per gruppi di elementi, valutando la risposta a 24 impulsi sinusoidali di ampiezza 10V nella banda da 1MHz a 6MHz. Infine viene misurata (Figura 6.10; 6.11) l'ampiezza ed il tempo di risposta ad una  $\delta$  di Dirac per un elemento campione dell'array.

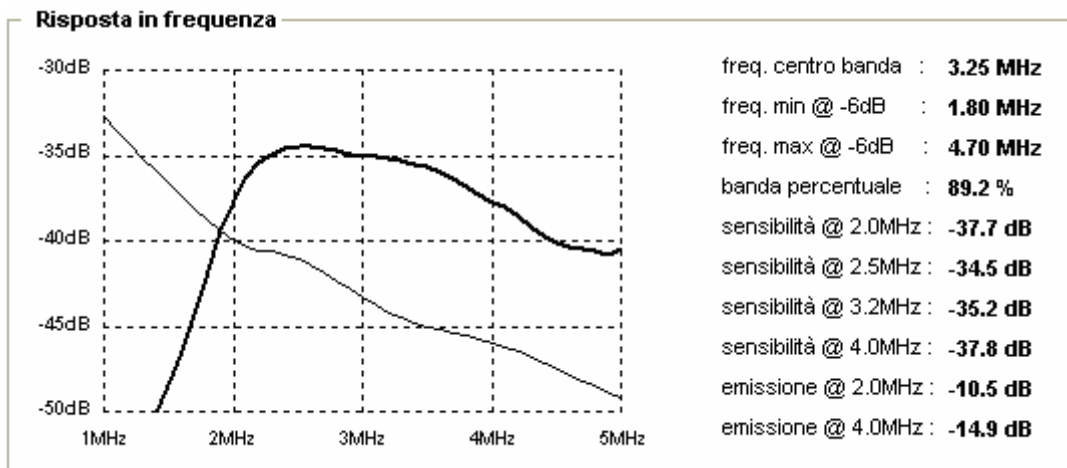
Sono state analizzate prima le misure relative alla sonda realizzata con elementi dispari saldati con adesivo conduttivo ed elementi pari con Sn-Pb. Nelle Figure 6.15, 6.16, 6.17, 6.18 e 6.19 sono riportate rispettivamente le misure relative alla risposta all'eco dell'array su tutti i 128 elementi, sia pari che dispari, alla banda valutata tra 1MHz e 5 MHz sugli elementi dispari dal 33 al 63 saldati con adesivo conduttivo, alla banda valutata tra 1MHz e 5 MHz su elementi pari dal 34 al 64 saldati con Sn-Pb, alla banda rilevata tra 1MHz e 6 MHz solo per l'elemento 55 saldato con adesivo conduttivo ed alla banda rilevata tra 1MHz e 6 MHz solo per l'elemento 56 saldato con Sn-Pb.

Nelle Figure 6.20 e 6.21 sono rappresentate le risposte degli elementi 55 e 56 rispettivamente alla  $\delta$  di Dirac. I valori rilevati per gli elementi pari e dispari dell'array sono confrontabili, quindi l'uso dell'adesivo elettricamente conduttivo come alternativa allo Sn-Pb non ha variato le caratteristiche elettro-acustiche della sonda. Dopo un anno di storage è stata effettuata nuovamente la caratterizzazione della stessa sonda e non si sono riscontrati variazioni, indici di possibili malfunzionamenti, nelle misure di caratterizzazione, come si può osservare nelle Figure 6.22, 6.23, 6.24, 6.25, 6.26, 6.27 e 6.28.

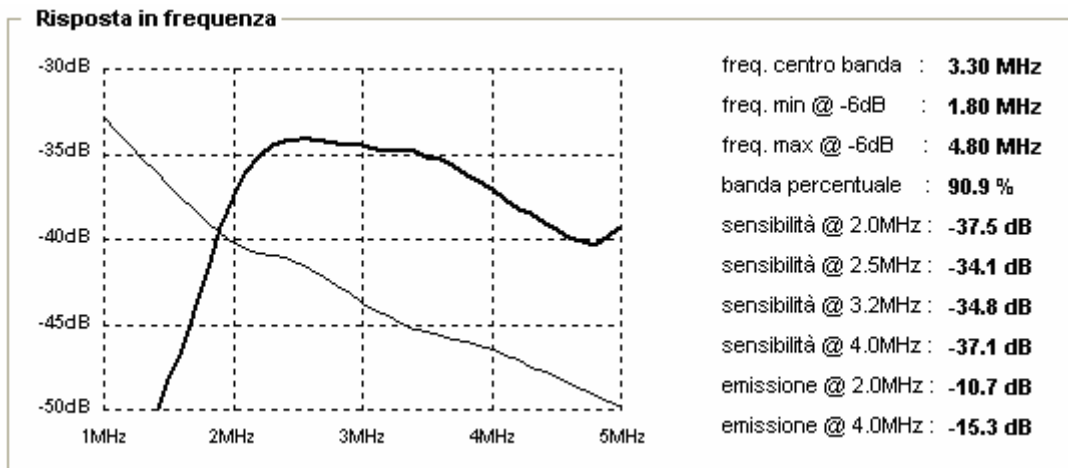




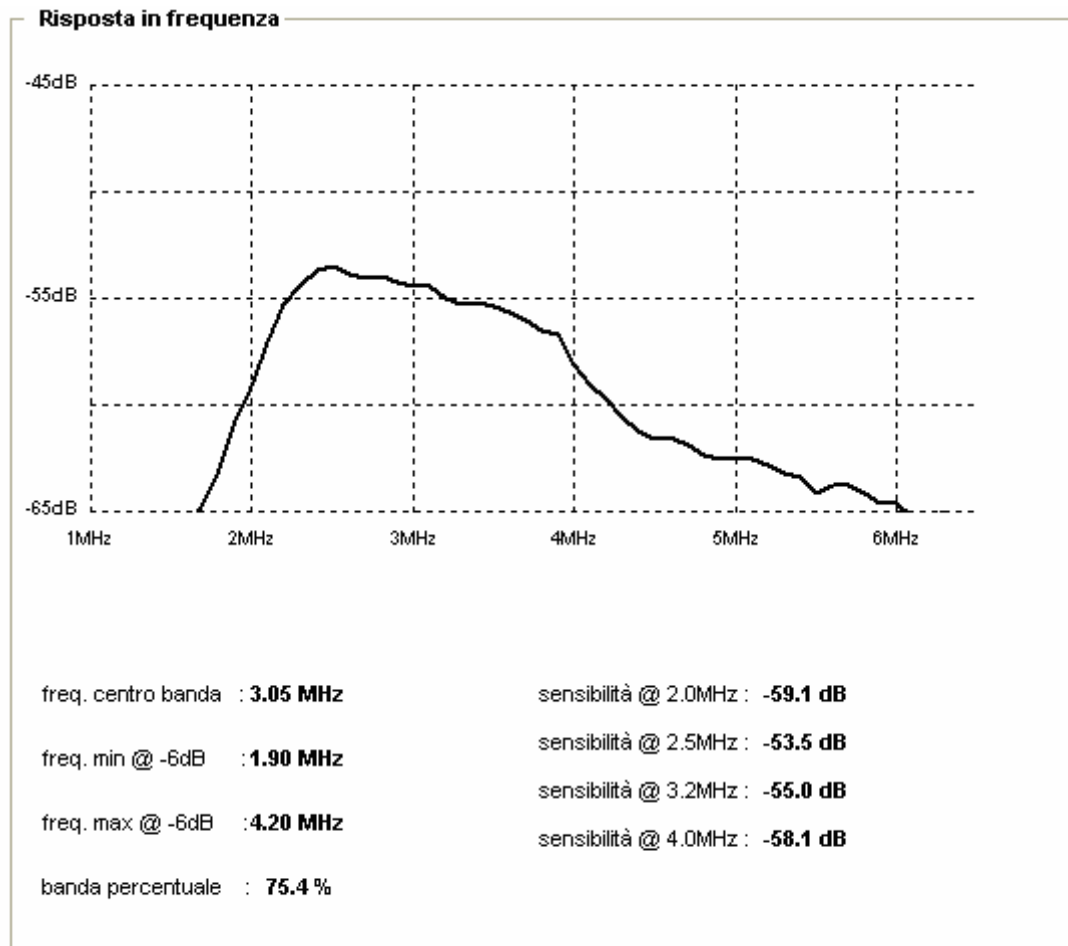
**Figura 6.15:** pettine totale su 128 elementi, dispari saldati con adesivo conduttivo e pari con Sn-Pb



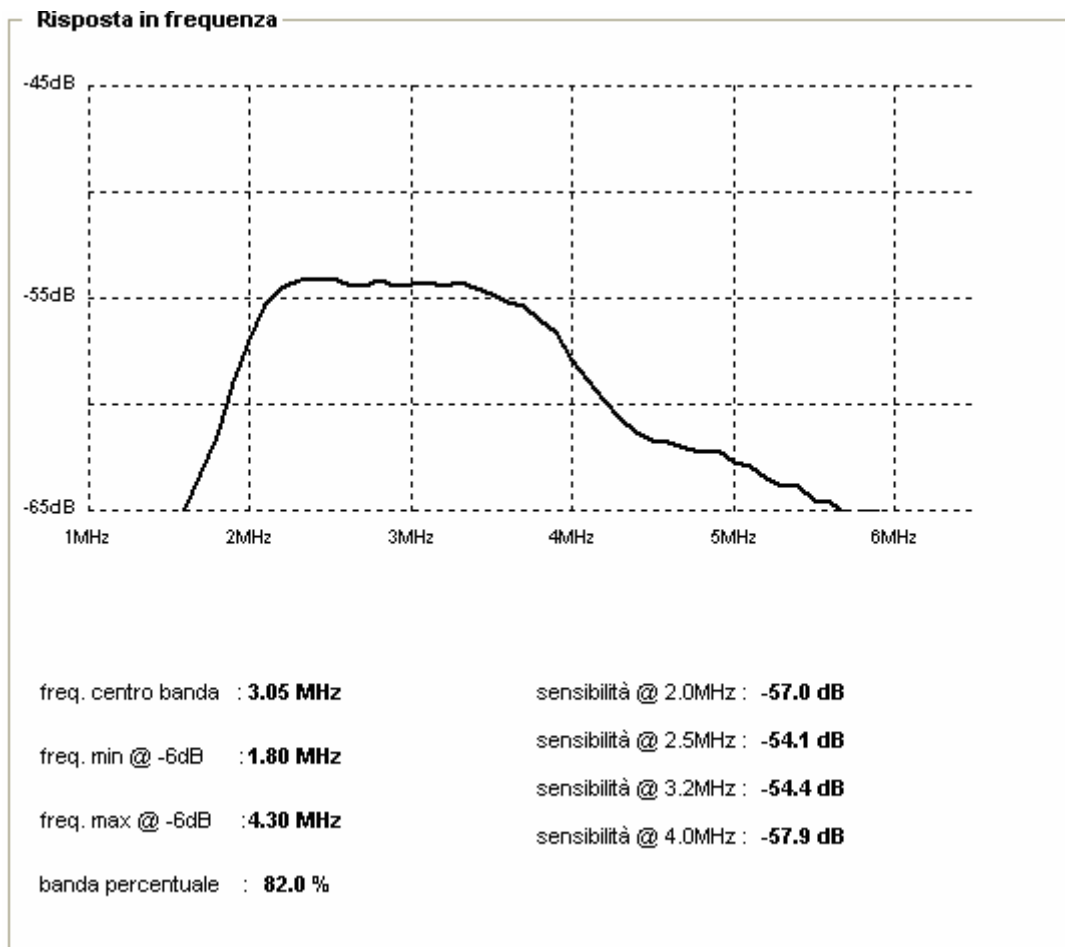
**Figura 6.16:** banda su elementi dispari dal 33 al 63 saldati con adesivo conduttivo



**Figura 6.17:** banda su elementi pari dal 34 al 64 saldati con Sn-Pb



**Figura 6.18:** banda dell'elemento 55 saldato con adesivo conduttivo



**Figura 6.19:** banda dell'elemento 56 saldato con Sn-Pb

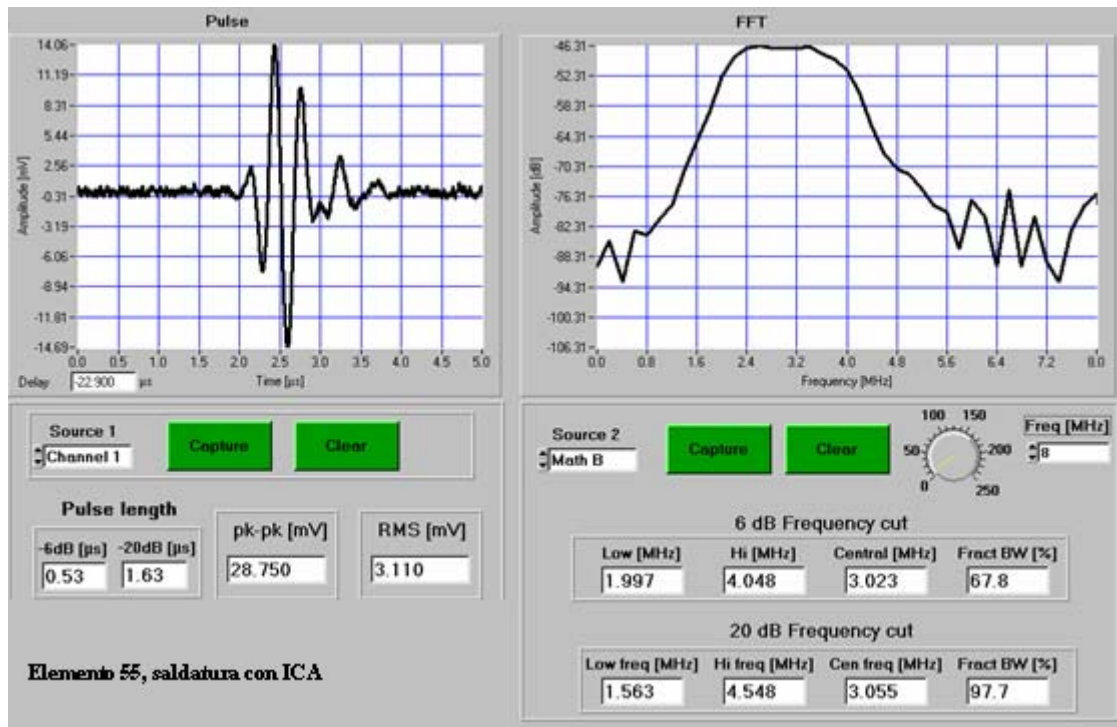


Figura 6.20: risposta alla  $\delta$  di Dirac dell'Elemento 55 saldato con adesivo conduttivo

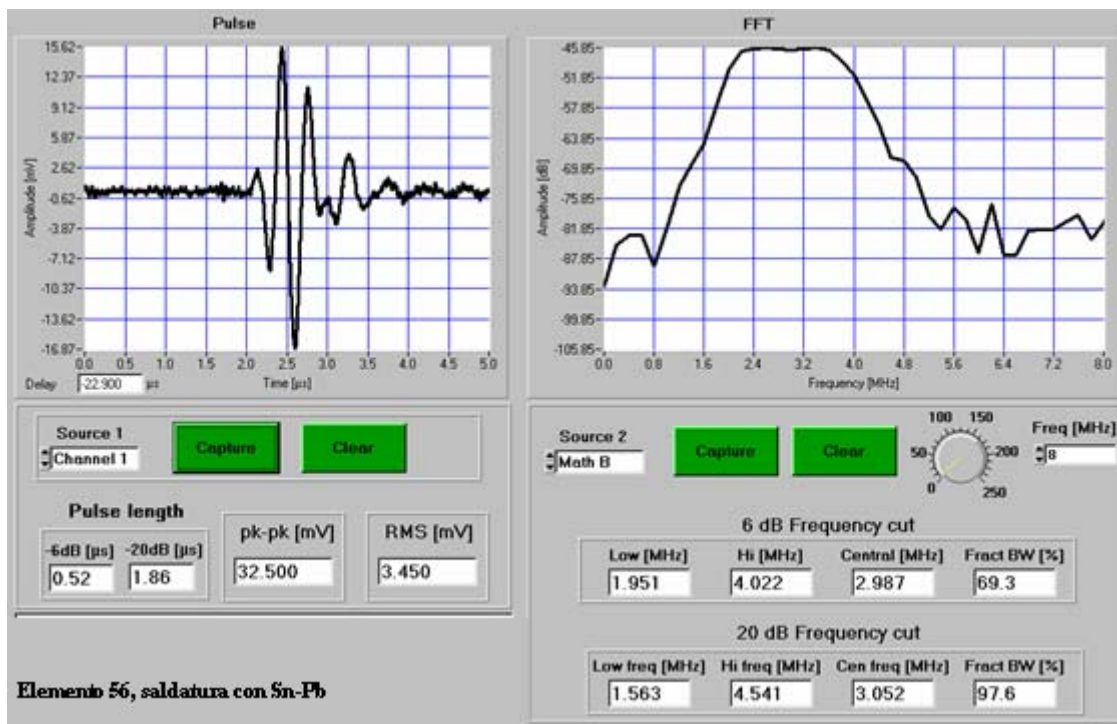
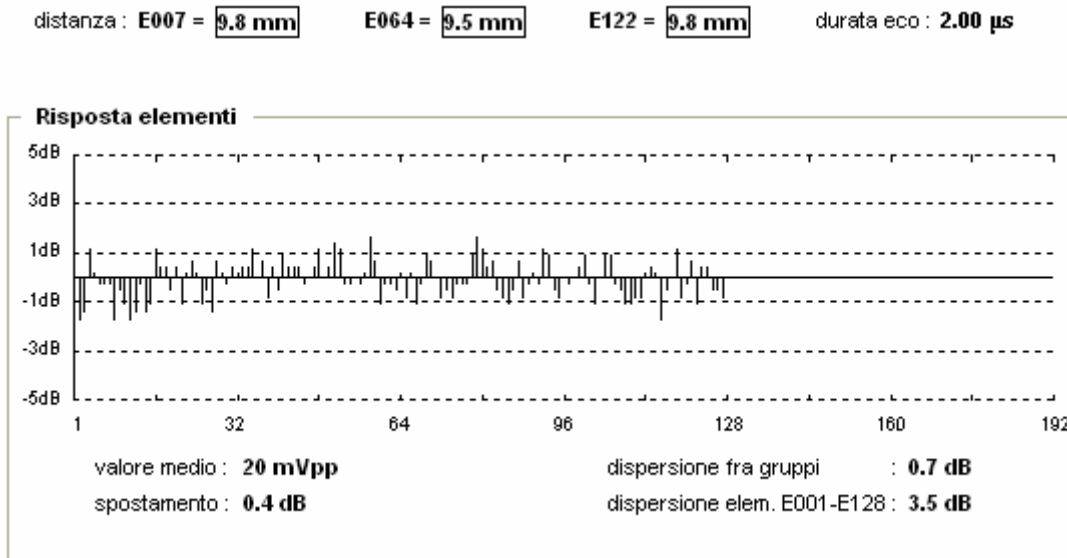
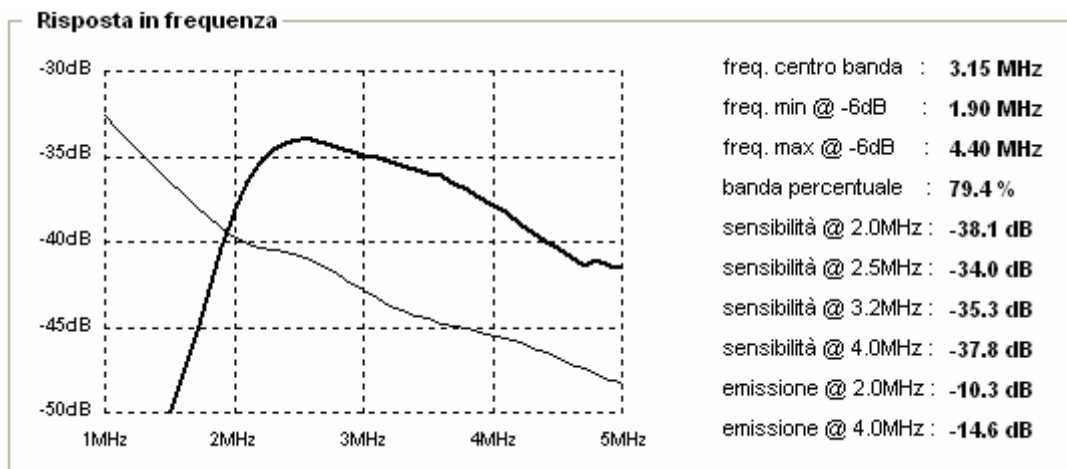


Figura 6.21: risposta alla  $\delta$  di Dirac dell'Elemento 56 saldato con Sn-Pb



**Figura 6.22:** pettine totale su 128 elementi, dispari saldati con adesivo conduttivo e pari con Sn-Pb dopo un anno di storage



**Figura 6.23:** banda su elementi dispari dal 33 al 63 saldati con adesivo conduttivo dopo un anno di storage

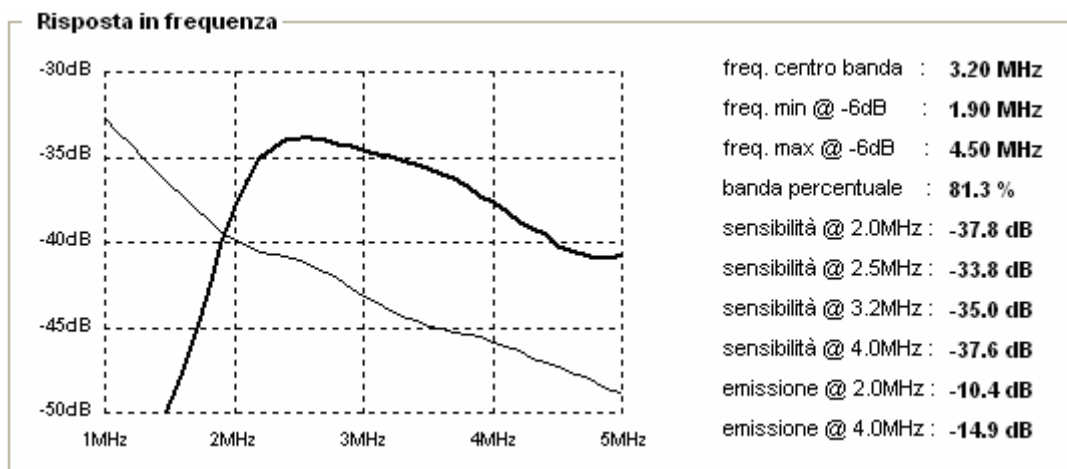


Figura 6.24: banda su elementi dispari dal 34 al 64 dopo un anno di storage

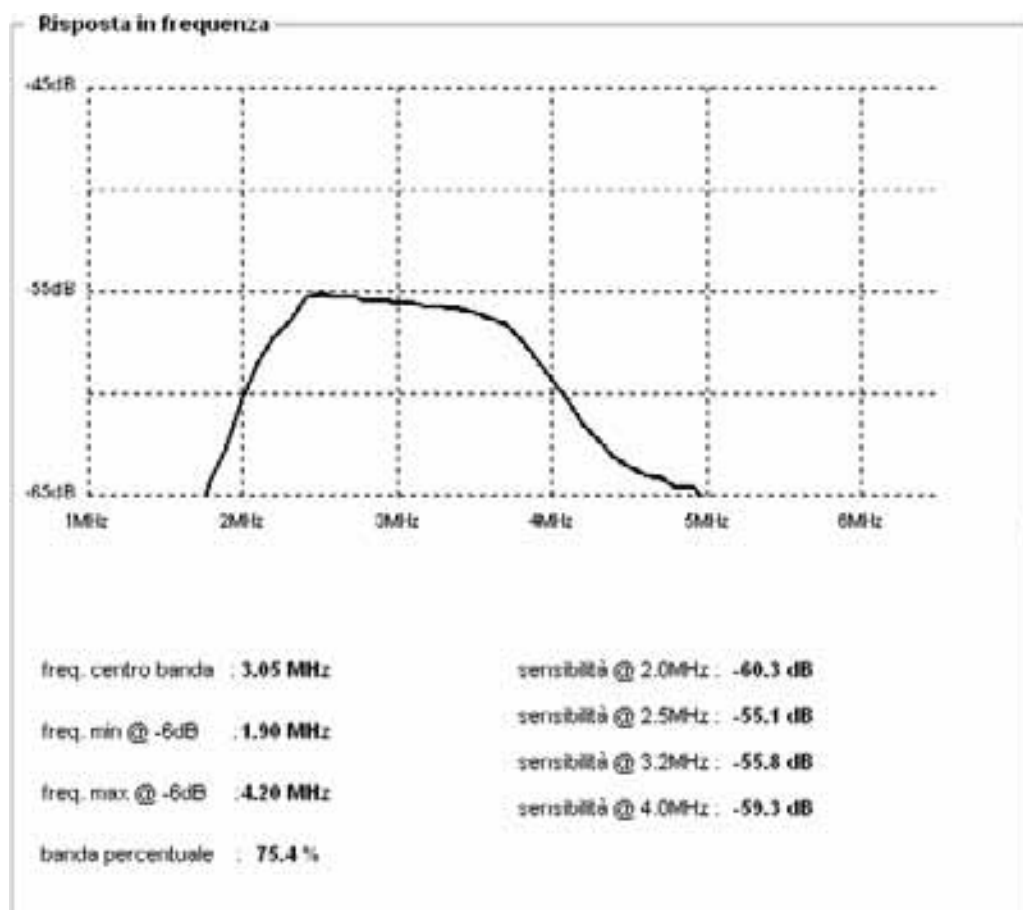
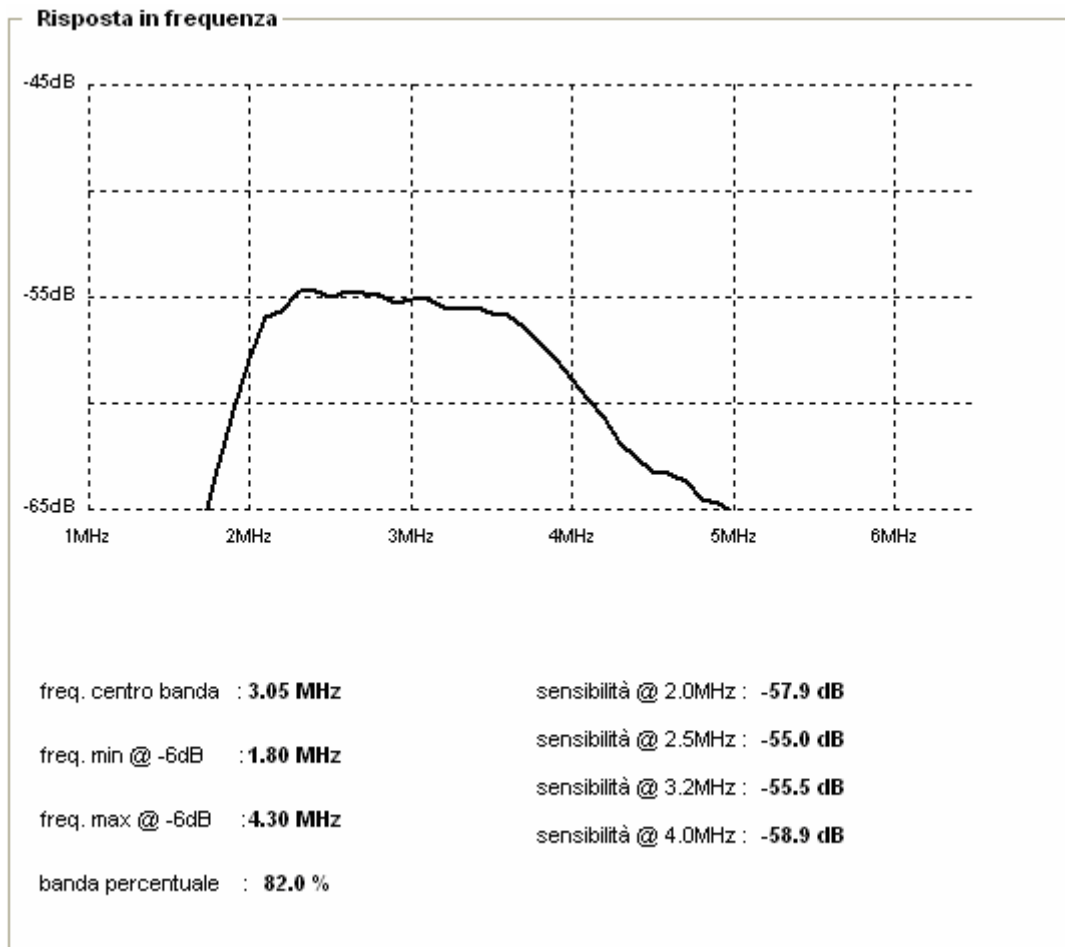


Figura 6.25: banda dell'elemento 55 saldato con adesivo conduttivo dopo un anno di storage



**Figura 6.26:** banda dell'elemento 56 saldato con Sn-Pb dopo un anno di storage



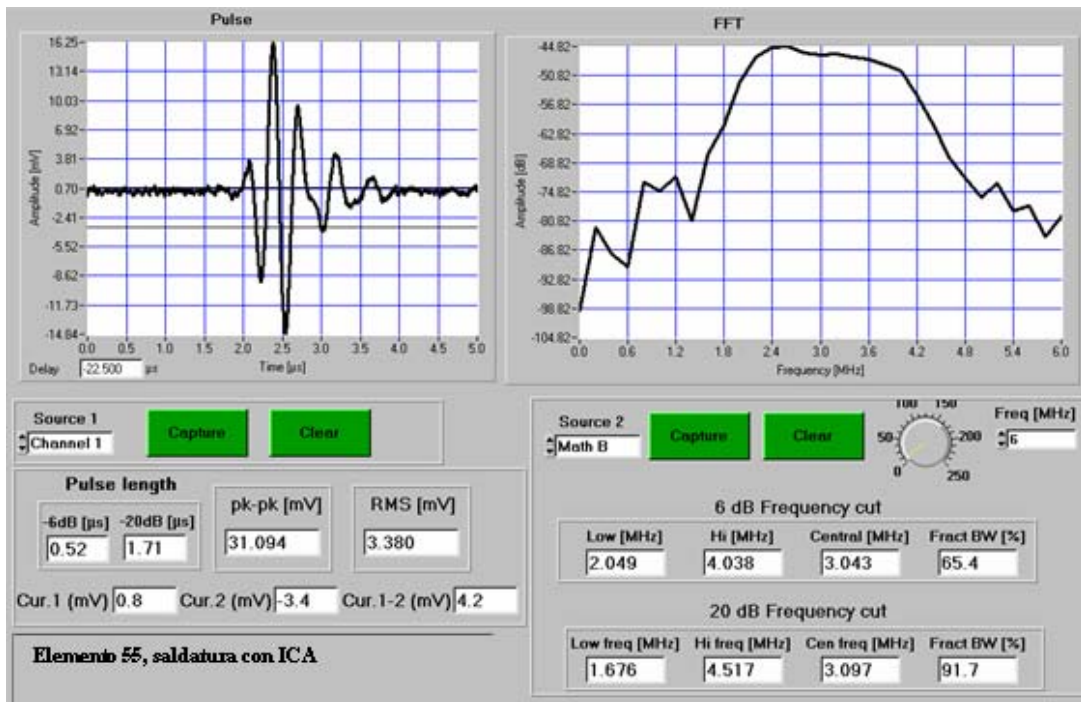


Figura 6.27: risposta alla  $\delta$  di Dirac dell'Elemento 55 saldato con adesivo conduttivo dopo un anno di storage

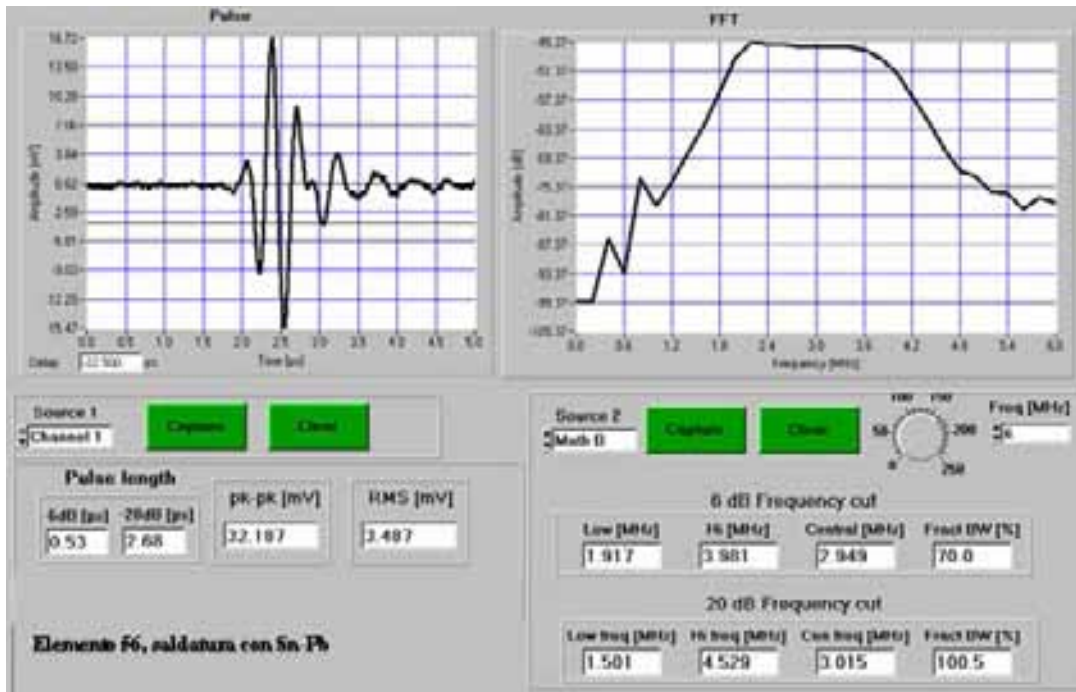
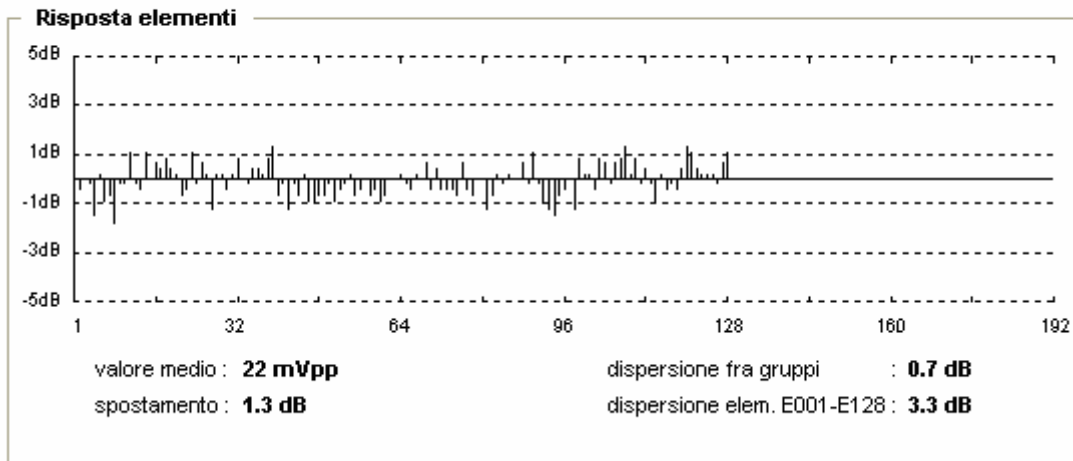


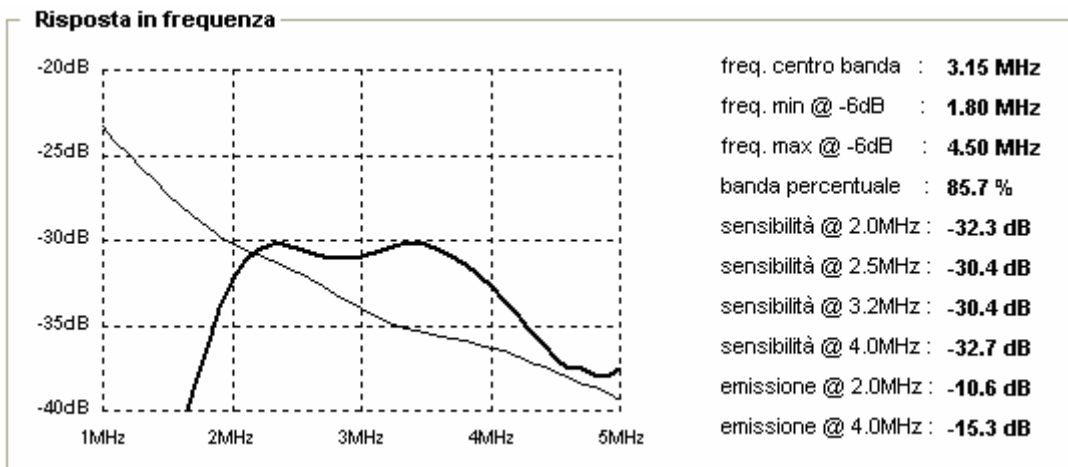
Figura 6.28: risposta alla  $\delta$  di Dirac dell'Elemento 56 saldato con Sn-Pb dopo un anno di storage

Dalle misure di caratterizzazione dell'array si è potuto osservare un comportamento elettro-acustico corretto degli elementi saldati con adesivo conduttivo rispetto a quelli saldati con la tecnologia tradizionale, perciò è stato realizzato un prototipo di sonda i cui elementi, sia pari che dispari, fossero saldati esclusivamente con adesivo conduttivo. Effettuate successivamente le misure si riporta nelle Figure 6.29, 6.30, 6.31 e 6.32 rispettivamente le misure relative alla risposta all'eco dell'array su tutti i 128 elementi, sia pari che dispari, alla banda valutata tra 1MHz e 5 MHz sugli elementi dal 42 al 56, alla banda rilevata tra 1MHz e 6 MHz solo per l'elemento 54 e la misura della risposta dell'elemento 54 alla  $\delta$  di Dirac. I valori misurati per questa sonda sono compatibili con quelli misurati sulla sonda precedentemente realizzata garantendo quindi una ripetibile validità del processo di produzione del trasduttore.

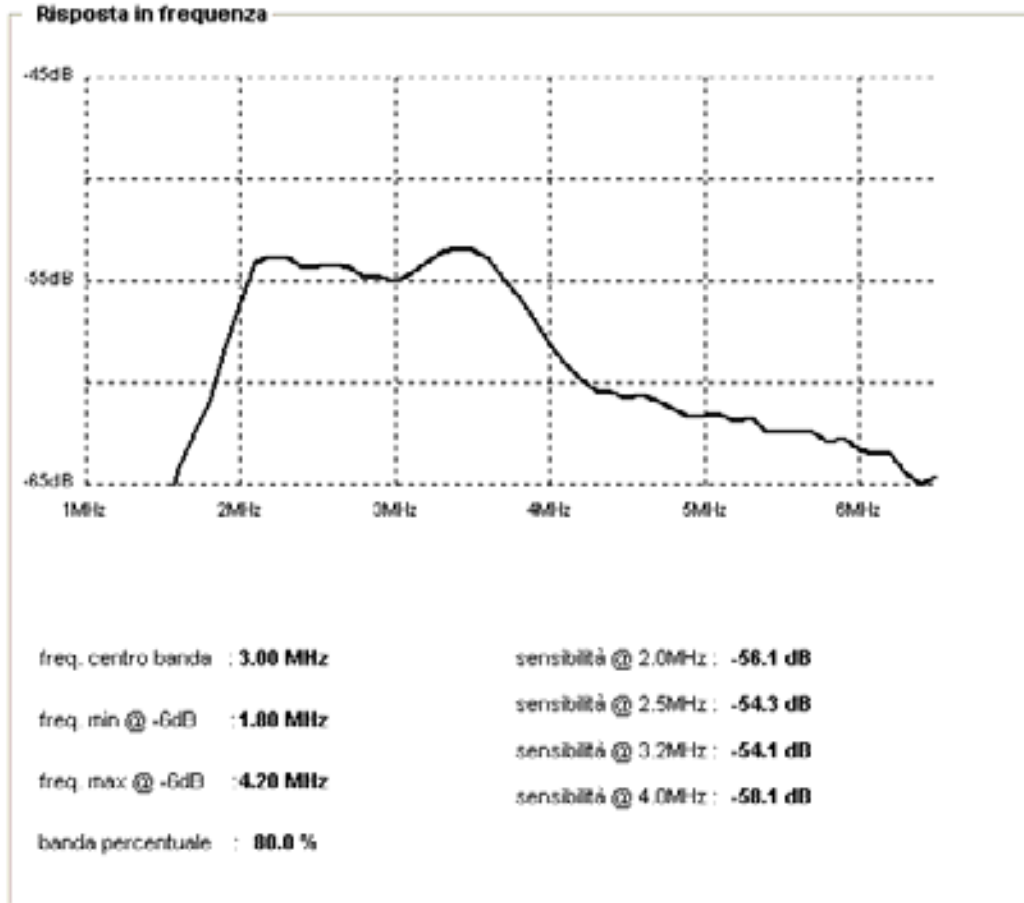
distanza : E007 = **9.8 mm**      E064 = **10.0 mm**      E122 = **10.2 mm**      durata eco : **1.92  $\mu$ s**



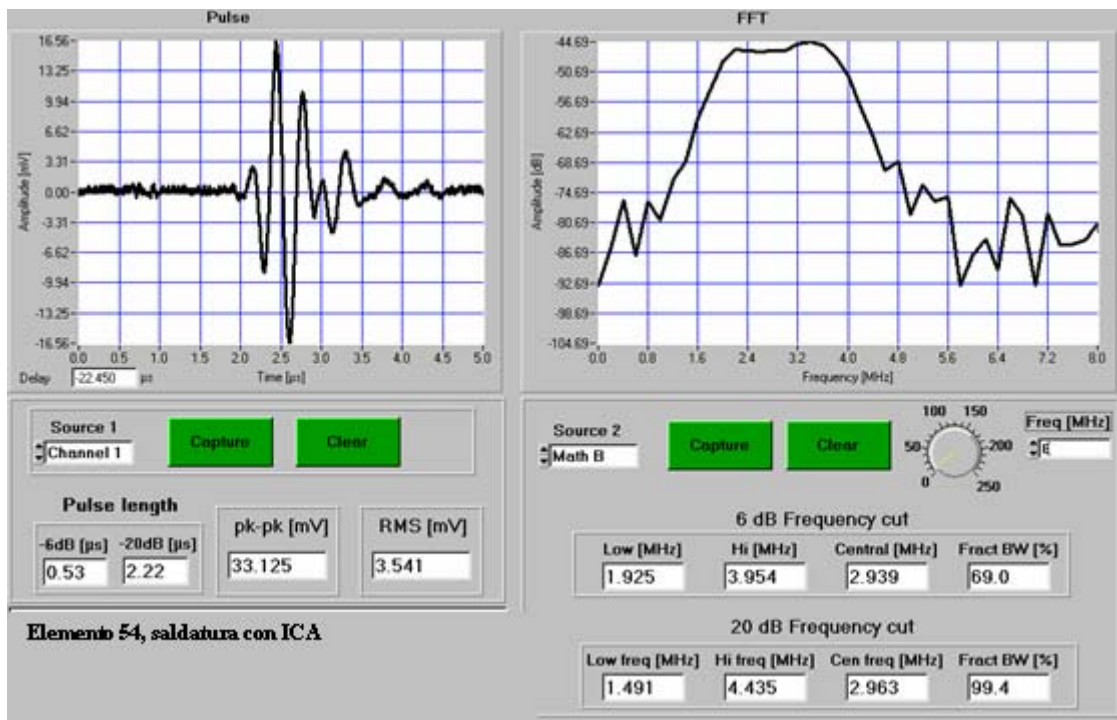
**Figura 6.29:** pettine su 128 elementi saldati con adesivo conduttivo



**Figura 6.30:** banda su elementi dal 41 al 56 saldati con adesivo conduttivo

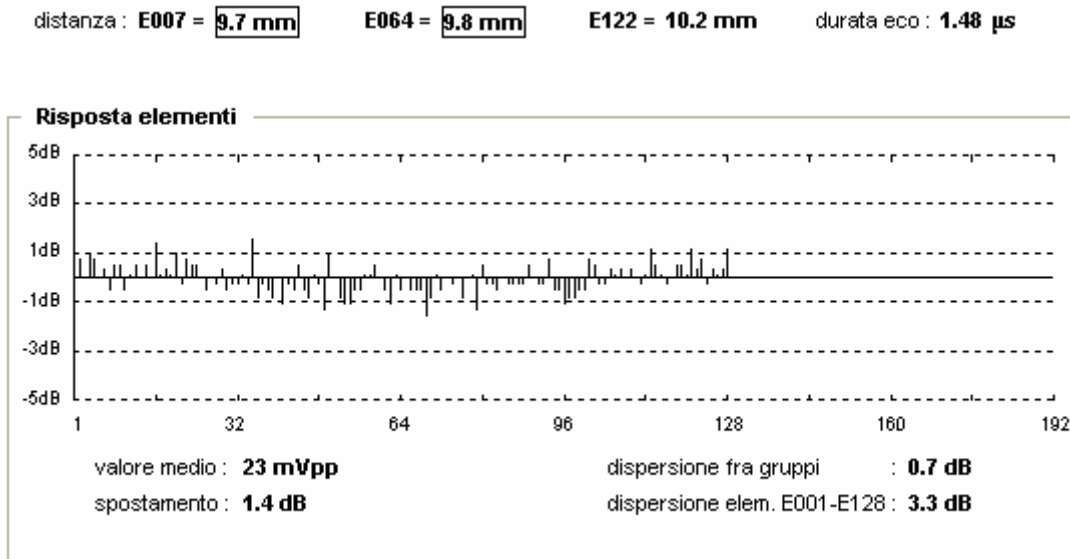


**Figura 6.31:** banda dell'elemento 54 saldato con adesivo conduttivo

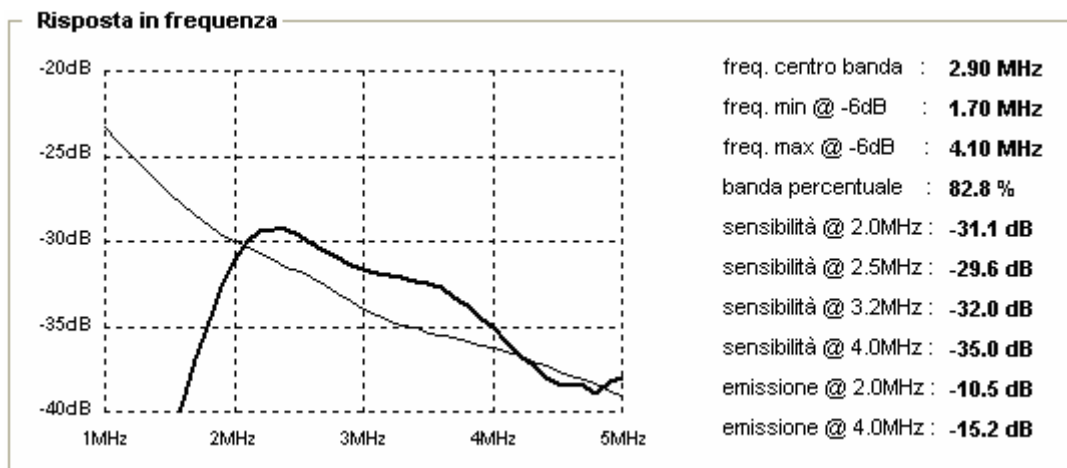


**Figura 6.32:** risposta iniziale alla  $\delta$  di Dirac dell'elemento 54 saldato con adesivo conduttivo

Sulla sonda realizzata con trasduttore saldato esclusivamente con adesivo conduttivo, si è deciso di eseguire delle prove termiche per valutarne il comportamento in funzione di tale sollecitazione; si è optato per una sequenza di prove costituita dalla prova al freddo e poi al caldo secco caratterizzata rispettivamente da 2h a  $-10^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  e da 2h a  $+55^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , secondo quanto suggerito in [95] e [96] rispettivamente; tale sequenza è stata ripetuta per quattro volte. Dopo tali sollecitazioni sono state eseguite nuovamente tutte le misure di caratterizzazione della sonda per verificare l'eventuale variazione dei parametri di interesse. Nelle Figure 6.33 e 6.34 sono riportate rispettivamente le misure relative alla risposta all'eco dell'array su tutti i 128 elementi, sia pari che dispari e alla misure della banda valutata tra 1MHz e 5 MHz sugli elementi dal 42 al 56, pur evidenziando nell'intervallo tra 3MHz e 4MHz un leggero calo della risposta in frequenza, esso non ha un'entità tale da poter essere indice di malfunzionamenti.

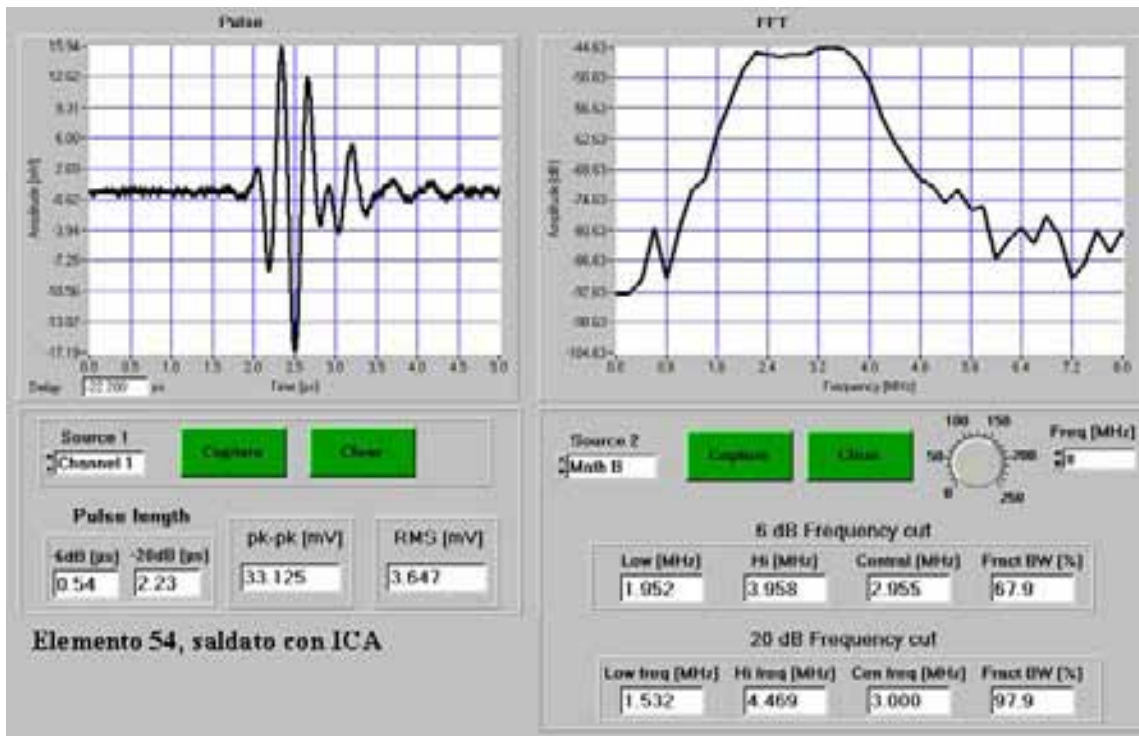


**Figura 6.33:** pettine su 128 elementi saldati con adesivo conduttivo dopo sollecitazioni termiche



**Figura 6.34:** banda su elementi dal 41 al 56 saldati con adesivo conduttivo dopo le sollecitazioni termiche

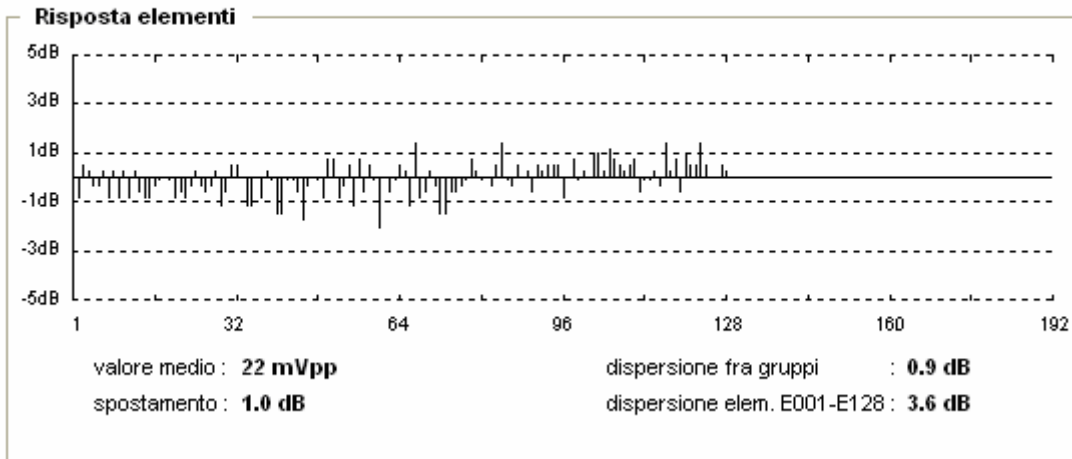
Dopo le sollecitazioni ambientali, alla sonda in esame è stata applicato uno stress elettrico; infatti è stata sottoposta ad impulsi di ampiezza in tensione pari a 200V ripetuti ogni 100 nsec, per un totale di 8 ore con energia pari a 50 $\mu$ J e 36 ore pari a 100 $\mu$ J. Successivamente sono state rieseguite le misure per la verifica del comportamento della sonda. In Figura 6.35 è mostrata la risposta dell'elemento 54 alla  $\delta$  di Dirac, confrontando i valori di ampiezza con i risultati riportati in Figura 6.32 si riscontra un sostanziale mantenimento delle prestazioni.



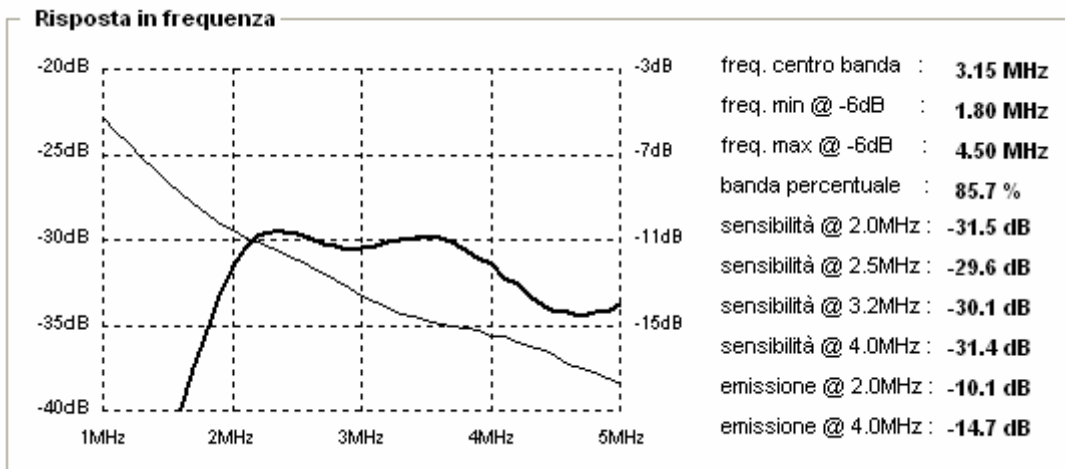
**Figura 6.35:** risposta alla  $\delta$  di Dirac dopo che della sonda è stata sottoposta oltre a sollecitazioni termiche anche a sollecitazioni elettriche

Dopo un anno di storage sono state eseguite nuovamente le misure per la caratterizzazione della sonda e per la verifica del comportamento delle saldature; nelle Figure 6.36, 6.37, 6.38 e 6.39 sono riportate rispettivamente le misure relative alla risposta all'eco dell'array, alla banda valutata tra 1MHz e 5 MHz sugli elementi dal 41 al 56, alla banda rilevata tra 1MHz e 6 MHz solo per l'elemento 54 ed alla risposta alla  $\delta$  di Dirac dell'elemento 54 dell'array. Dagli ottimi valori riscontrati dopo un anno di storage si può osservare che non si è verificato un deterioramento delle prestazioni né delle saldature né dell'elemento piezoelettrico che costituisce il trasduttore ad ultrasuoni.

distanza : **E007 = 10.0 mm    E064 = 9.8 mm    E122 = 9.7 mm**      durata eco : **2.00 µs**

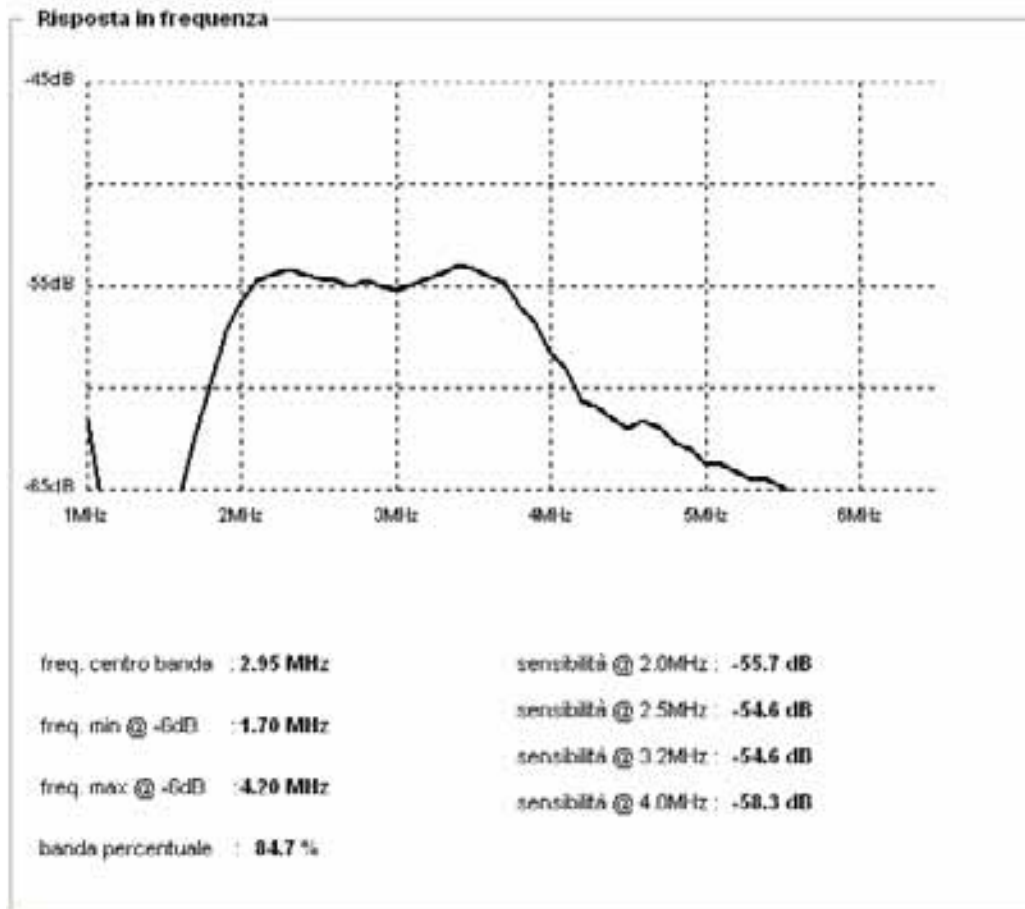


**Figura 6.36:** pettine su 128 elementi saldati con adesivo conduttivo dopo sollecitazioni termiche, elettriche ed un anno di storage

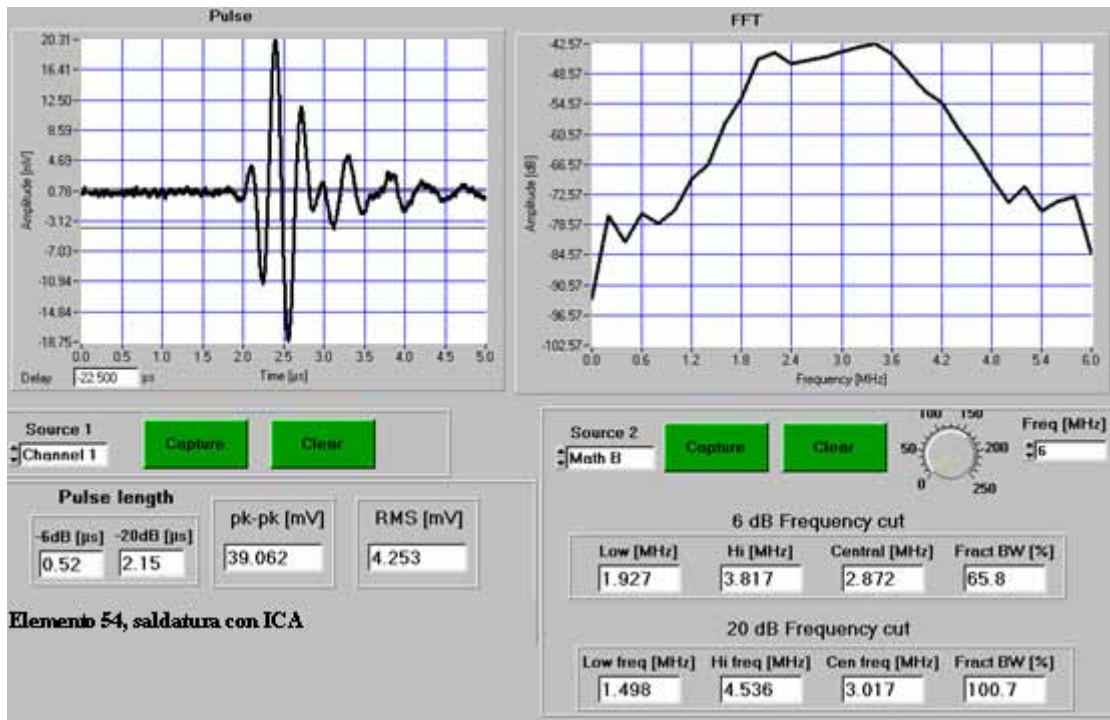


**Figura 6.37:** banda su elementi dal 41 al 56 saldati con adesivo conduttivo dopo le sollecitazioni termiche, elettriche ed un anno di storage

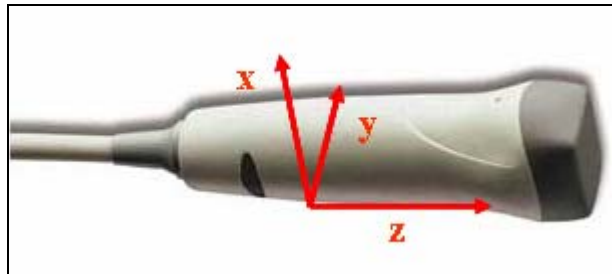




**Figura 6.38:** banda su elemento 54 saldato con adesivo conduttivo dopo le sollecitazioni termiche, elettriche ed un anno di storage



**Figura 6.39:** risposta alla  $\delta$  di Dirac dopo sollecitazioni termiche, elettriche ed un anno di storage



**Figura 6.40:** sonda sottoposta a sollecitazioni meccaniche con relativi riferimenti assiali

Sulla sonda realizzata con trasduttore saldato esclusivamente con adesivo conduttivo (Figura 6.40), si è deciso di eseguire ulteriori prove, in questo caso caratterizzate da sollecitazioni meccaniche, in particolare da vibrazioni random per valutare la tenuta delle saldature, si è optato per un profilo trapezoidale in un intervallo di frequenze tra 2,5Hz e 3kHz, caratterizzato da rapporti di salita pari a + 18dB/ottava da 2,5Hz a 5Hz e pari a + 12dB/ottava da 5 Hz a 10 Hz, una ASD massima pari a  $0,01g^2/Hz$  da 10Hz a 2kHz e una discesa caratterizzata da - 12dB/ottava tra 2kHz e 3kHz. In Figura 6.41 viene riportata un'immagine della prova di vibrazioni random lungo l'asse Z con relativa fixture appositamente realizzata per la prova. Tale prova è stata eseguita per una durata di 30 minuti lungo ognuno dei tre assi [97-98]. In Figura 6.42 è riportato il profilo di prova applicato lungo l'asse Z della sonda; in verde viene rappresentato il

profilo ideale in ingresso con relativi limiti di accettazione per la riproducibilità della prova, dove il profilo giallo a  $\pm 3$ dB indica alta riproducibilità e quello rosso a  $\pm 6$ dB indica media riproducibilità. E' possibile osservare anche la risposta degli accelerometri: di controllo del banco (profilo nero), di controllo posto sulla fixture (profilo arancione) e quello posto sulla testa della sonda in esame (profilo celeste). Analizzando le risposte degli accelerometri si deduce che la prova di vibrazioni random effettuata può considerarsi a media riproducibilità perché nell'intervallo 20-3000 Hz, con 800 linee spettrali, non si eccede il profilo rosso per più di 80 linee spettrali, cioè per più di 299,8 Hz consecutivamente. Questi parametri sono controllati dal Sistema di controllo Puma 2400-2032, che nell'eventualità di oltrepassare i limiti imposti blocca (abort) il banco vibrante. Il livello di accelerazione  $g_{rms}$  rilevato dall'accelerometro di controllo del banco è stato pari a 4,725  $g_{rms}$ , mentre l'accelerometro posto sulla testa della sonda ha rilevato 4,927  $g_{rms}$ . Per entrambe le prove lungo gli assi Y e X risulta invece che l'accelerometro di controllo del banco e quello relativo alla sonda in esame hanno rilevato lo stesso valore pari a 4,526  $g_{rms}$ , come si può osservare nelle Figure 6.43 e 6.44.

Dopo l'applicazione delle sollecitazioni meccaniche sono state eseguite nuovamente tutte le misure di caratterizzazione della sonda per verificarne il comportamento. Nelle Figure 6.45, 6.46, 6.47 e 6.48 si possono rilevare valori in ampiezza, banda e tempo di risposta assolutamente confrontabili con quelli ottenuti prima delle sollecitazioni, senza l'individuazione di guasti per nessuna delle 128 saldature. E' stato raggiunto, quindi, l'obiettivo di dimostrare l'assoluta possibilità di sostituzione della consolidata tecnologia di saldatura Sn-Pb, tra trasduttore piezoelettrico e finger di micro contatti, con quella a base di adesivo elettricamente conduttivo con filler in Argento, grazie sia all'implementazione di un valido processo produttivo dedicato che alla verifica delle ottime caratteristiche prestazionali e di affidabilità.

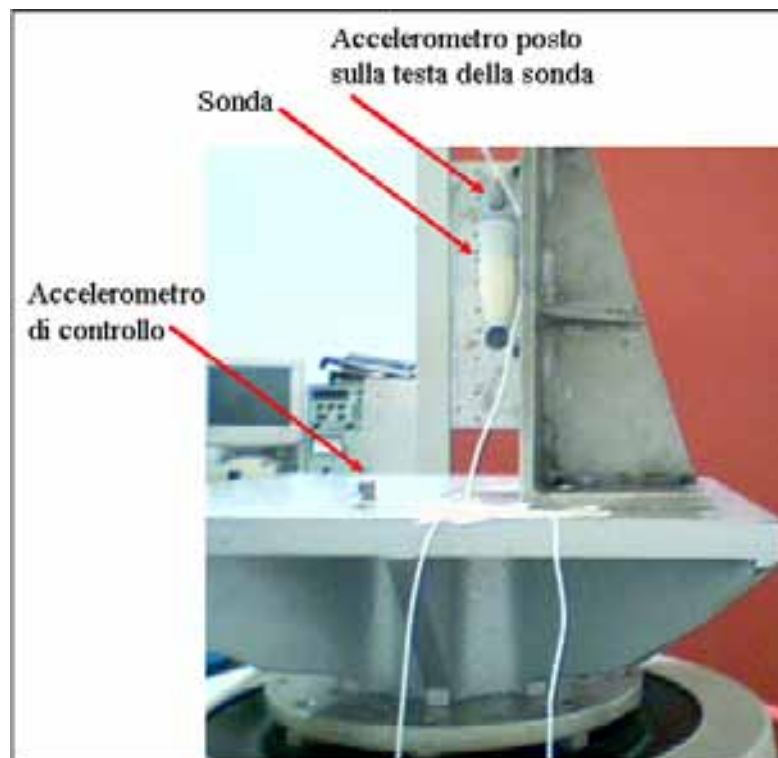


Figura 6.41: prova di vibrazioni random lungo l'asse z della sonda

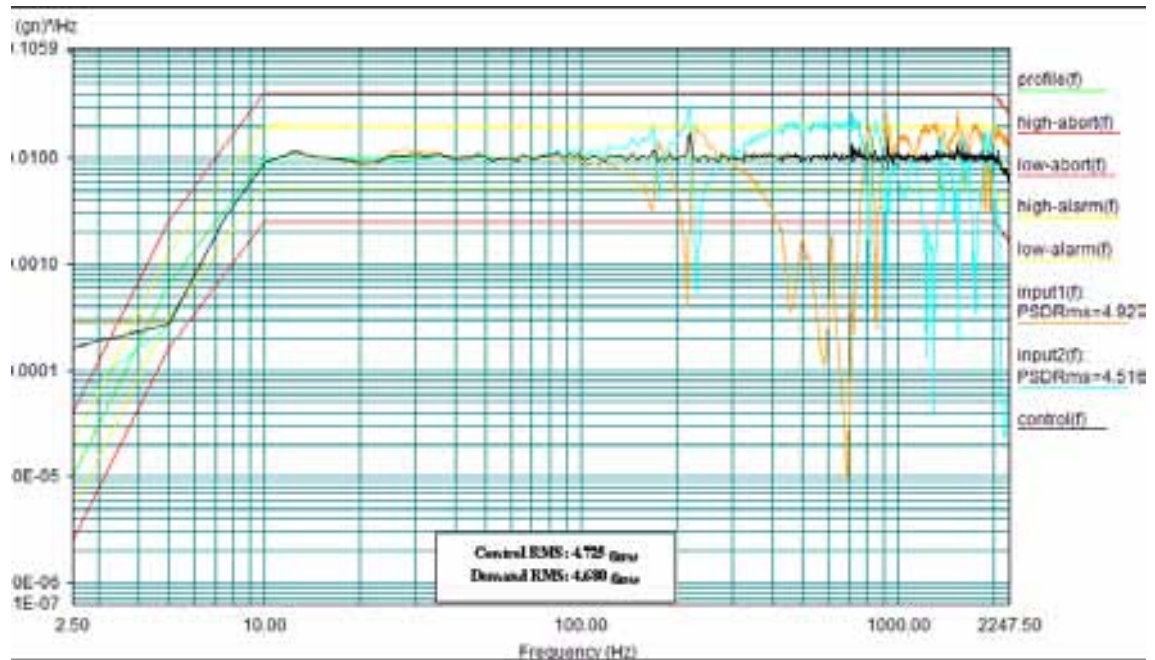
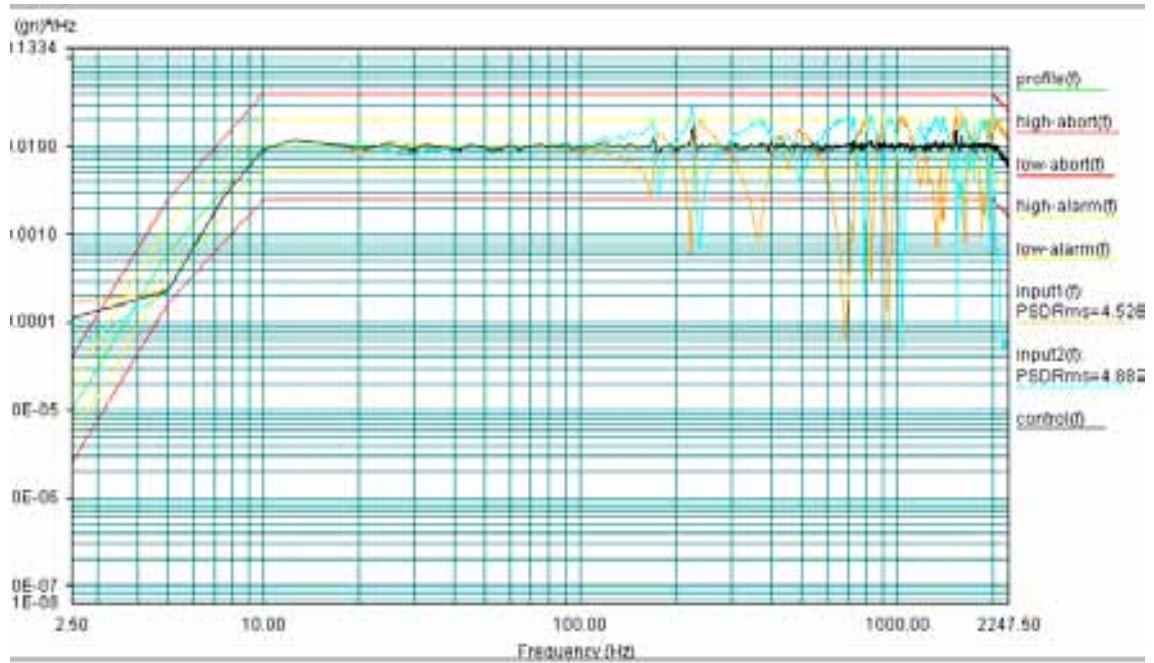
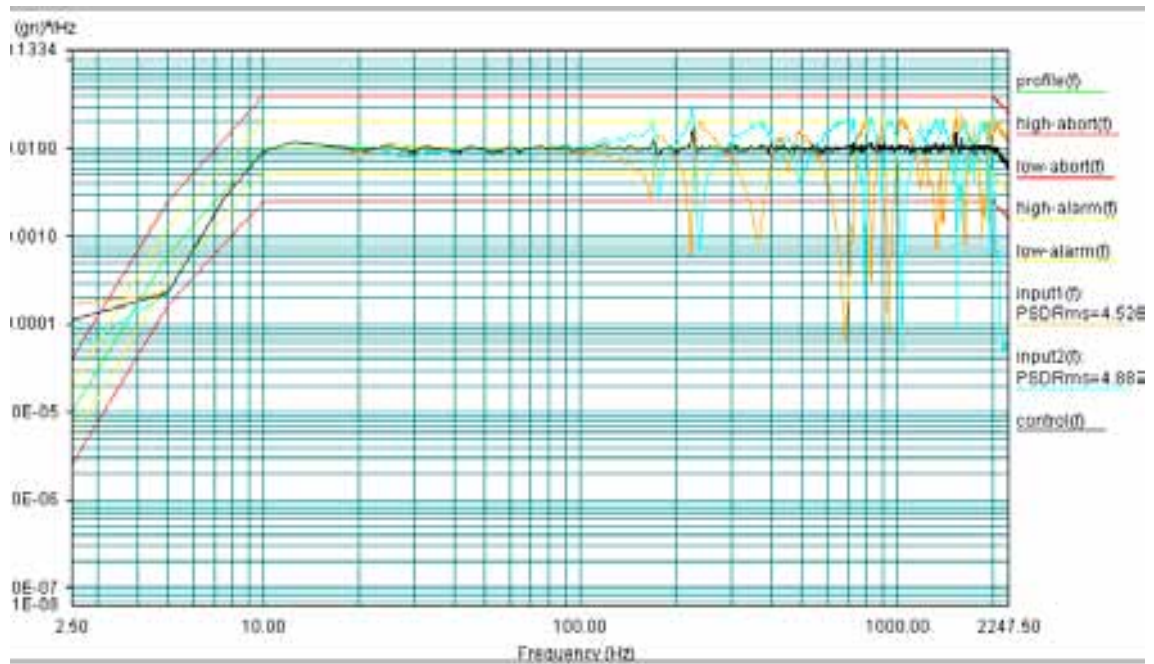


Figura 6.42: profilo di prova implementato lungo l'asse Z e risposte degli accelerometri

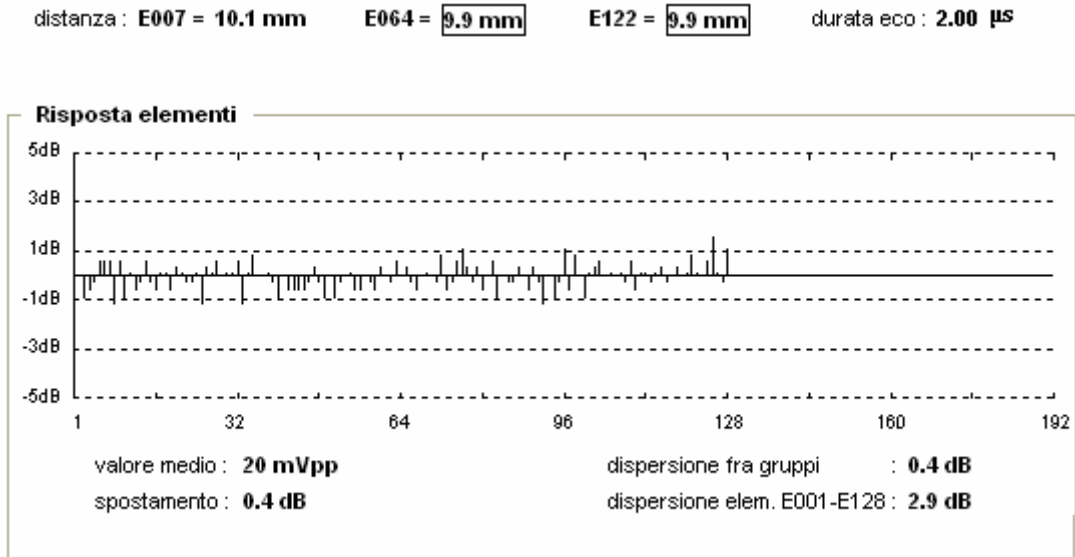


**Figura 6.43:** profilo di prova implementato lungo l'asse X e risposte degli accelerometri

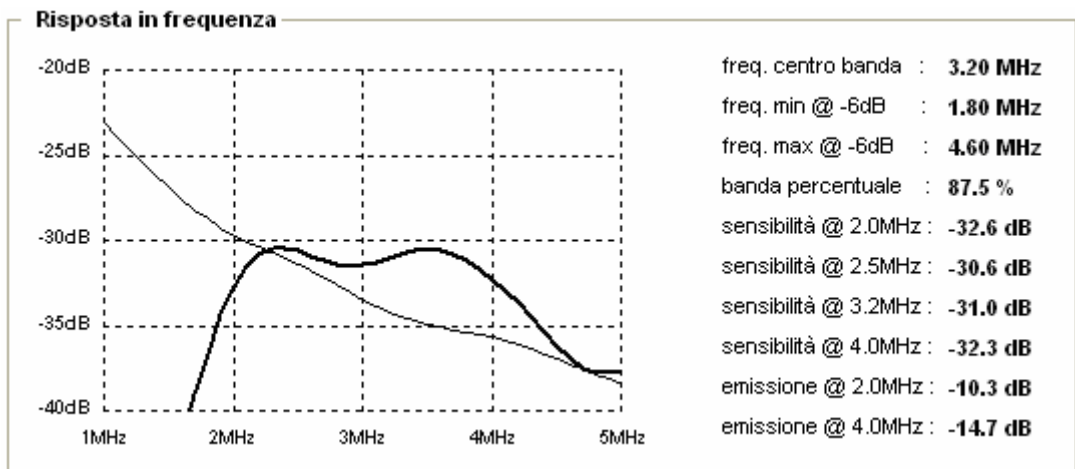


**Figura 6.44:** profilo di prova implementato lungo l'asse Y e risposte degli accelerometri

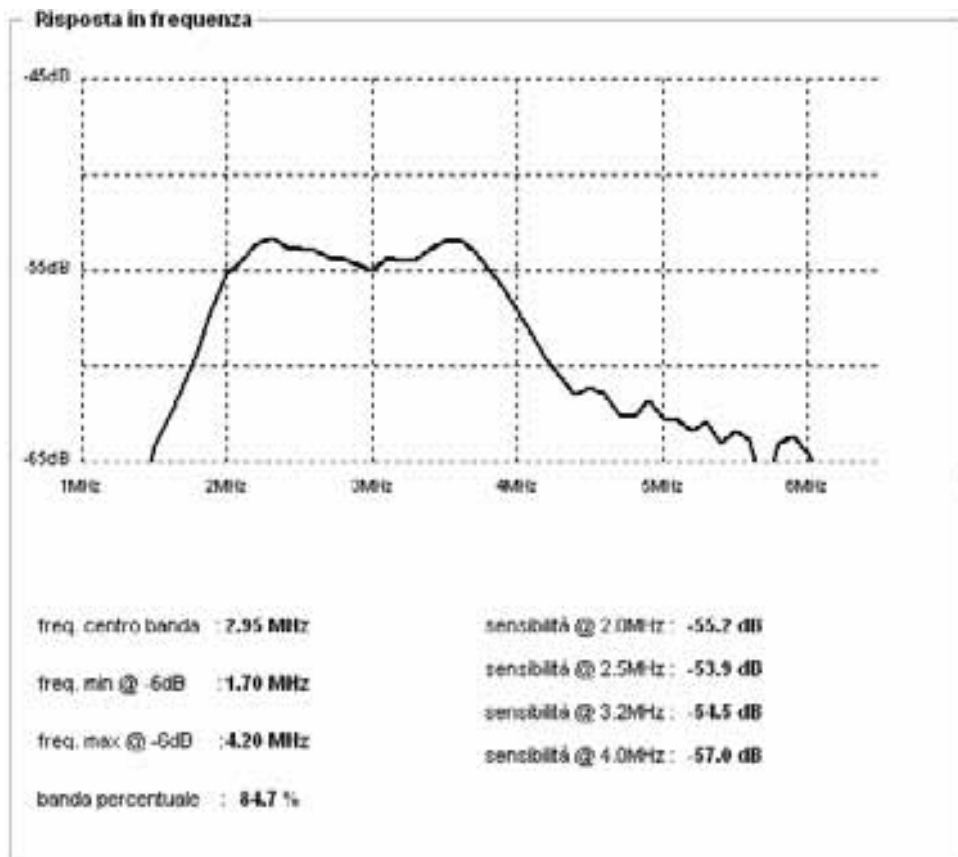




**Figura 6.45:** pettine su 128 elementi saldati con adesivo conduttivo dopo sollecitazioni termiche, elettriche, un anno di storage e prove di vibrazioni random

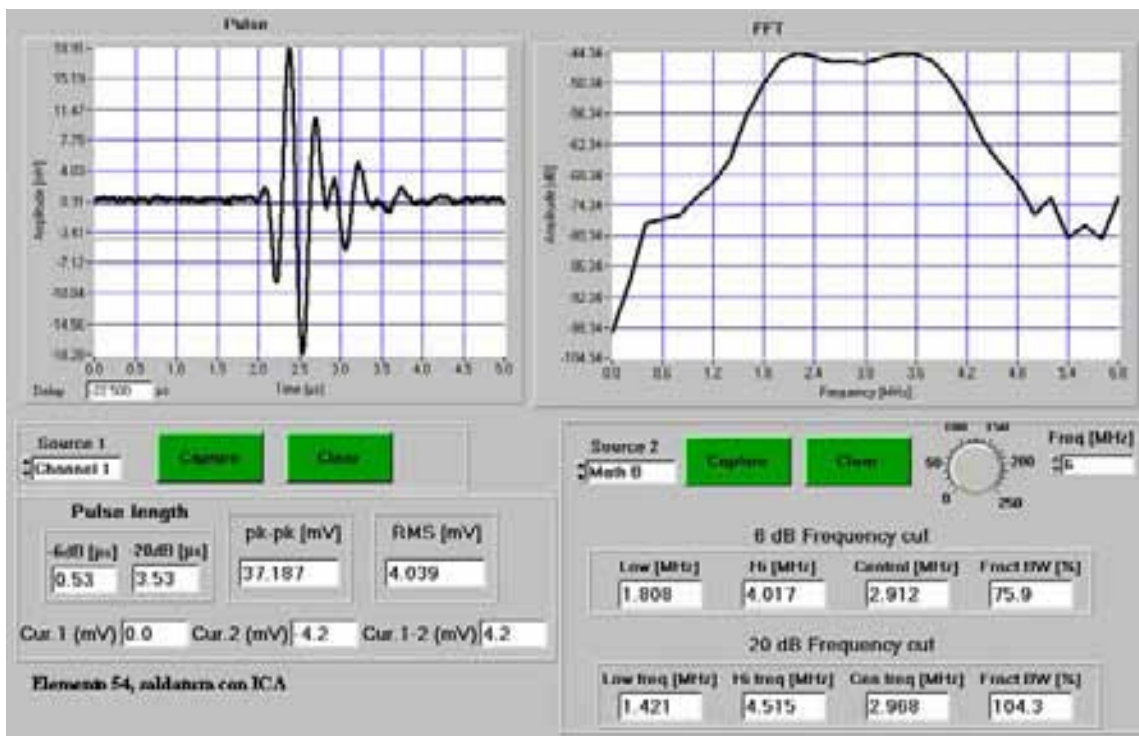


**Figura 6.46:** banda su elementi dal 41 al 56 saldati con adesivo conduttivo dopo le sollecitazioni termiche, elettriche, un anno di storage e prove di vibrazioni random



**Figura 6.47:** banda su elemento 54 saldato con adesivo conduttivo dopo le sollecitazioni termiche, elettriche, un anno di storage e prove d vibrazioni random





**Figura 6.48:** risposta alla  $\delta$  di Dirac dopo sollecitazioni termiche, elettriche, un anno di storage e prova di vibrazioni random

## CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo studio sperimentale è stato quello di dimostrare la reale possibilità di utilizzare nuovi Adesivi Elettricamente Conduttivi con filler d'Argento, (ECA, *electrically conductive adhesives*), o leghe saldanti senza Piombo, quali Sn<sub>95,5</sub>Ag<sub>3,8</sub>Cu<sub>0,7</sub> (SAC387), Sn<sub>96,5</sub>Ag<sub>3</sub>Cu<sub>0,5</sub> (SAC305), Sn<sub>99</sub>Ag<sub>0,3</sub>Cu<sub>0,7</sub> (SACX0307), Bi<sub>57</sub>Sn<sub>42</sub>Ag<sub>1</sub> e In<sub>52</sub>-Sn<sub>48</sub>, come alternativa alla lega tradizionale Sn<sub>62</sub>-Pb<sub>38</sub>; misurandone le caratteristiche prestazionali e di affidabilità.

E' stato superato l'aspetto produttivo maggiormente critico, come la fase di deposizione dei nuovi materiali saldanti, con l'implementazione di un processo di saldatura dedicato per ottenere campioni omogenei e confrontabili. Al fine del raggiungimento delle migliori prestazioni di conducibilità, nel caso degli adesivi conduttivi è emersa la fondamentale importanza dell'ottimizzazione della fase di spin coating e dei parametri che regolano la polimerizzazione, come la temperatura ed il tempo di curing; per le leghe, si è dovuto realizzare un nuovo processo di saldatura caratterizzato da profili di rifusione specifici per ogni lega in esame.

Per la misura delle caratteristiche elettriche dei nuovi materiali saldanti è stato implementato un sistema automatico di micro-misurazioni, utilizzabile anche durante l'esecuzione di prove termiche, in modo da poter valutare la resistenza elettrica dei campioni realizzati durante tali sollecitazioni.

Dopo la caratterizzazione dei nuovi materiali saldanti, essi sono stati utilizzati, con processi di produzione dedicati, per la realizzazione di trasduttori ad ultrasuoni, in particolare per la saldatura di una piastrina di ceramica piezoelettrica con un pettine di micro-conessioni, processo critico per le dimensioni ridotte dei componenti e per la sensibilità alle alte temperature della piastrina piezoelettrica. Tuttavia si è riscontrato un comportamento in termini di conducibilità elettrica delle nuove saldature confrontabile nel tempo con le saldature in Sn-Pb, anche dopo sollecitazioni termiche e meccaniche.

Dalle misure dei valori di resistenza elettrica, parametro scelto per la valutazione del superamento delle prove, e dalle analisi morfologiche e microchimiche, solo in alcuni casi sono stati rilevati lievi fenomeni di degrado imputabili ad un processo di produzione non ancora ottimizzato; è tuttavia importante sottolineare un ottimo comportamento in termini di conducibilità elettrica sia delle leghe In-Sn, SAC305 e SAC387 che degli adesivi conduttivi esaminati. Ciò nonostante, per i numerosi vantaggi legati alle basse temperature di lavorazione, da 25°C-120°C, ed alla mancanza di flussanti nel processo di saldatura è stato scelto un adesivo elettricamente conduttivo per la realizzazione prototipale di una sonda phased array ad ultrasuoni per applicazioni biomediche.

Le misure di caratterizzazione della sonda per garantire l'uniformità dell'array realizzato e verificarne il rendimento elettro-acustico ci hanno permesso di riscontrare

un ottimo comportamento degli adesivi conduttivi, anche dopo aver sottoposto l'intero dispositivo a sollecitazioni termiche, elettriche impulsive e meccaniche, senza rilevare guasti, quali fenomeni di migrazione del filler all'interno della matrice polimerica della colla che avrebbero potuto portare all'interruzione del contatto elettrico, per nessuna delle 128 saldature che caratterizzano l'array di trasduttori in esame.

E' stata dimostrata quindi, l'assoluta possibilità di sostituire la consolidata tecnologia di saldatura tra trasduttore piezoelettrico e finger di microcontatti realizzata con Sn-Pb con quella a base di adesivo elettricamente conduttivo con filler in Argento, grazie sia alla validità del nuovo processo produttivo implementato che alle verificate caratteristiche prestazionali e di affidabilità.

Riscontrato un notevole interesse per la ricerca sui nuovi materiali saldanti, leghe o adesivi, questo lavoro sta proseguendo con l'analisi agli elementi finiti (FEM) del trasduttore ad ultrasuoni realizzato con i nuovi giunti saldanti per la simulazione del comportamento termo-meccanico; ciò consentirà di affiancare alle prove di affidabilità un nuovo approccio nello studio dei problemi relativi alle prestazioni delle saldature, come l'individuazione di sollecitazioni in componenti complessi e in situazioni di non linearità dei materiali; saranno portate avanti prove ambientali in modo da poterne valutare la vita a fatica e continuerà lo studio dell'automazione dei processi di deposizione e saldatura.

In seguito sarà interessante verificare l'affidabilità degli adesivi elettricamente conduttivi nella realizzazione di nuovi dispositivi quali sensori o trasduttori, particolarmente sensibili alle alte temperature o realizzati con materiale su cui le leghe metalliche non sono efficaci, e delle leghe senza-piombo in applicazioni diffuse come la tecnologia a montaggio superficiale, variando la tipologia di saldatura, ad esempio BGA (Ball Grid Array) o TSOP (Thin Small-Outline Package).

Pur dimostrando sperimentalmente la concreta possibilità di utilizzare nuove leghe o resine conduttive per le saldature in dispositivi elettrici ed elettronici, è tuttavia necessario concludere sottolineando che i metalli, tra cui Argento e Antimonio, attualmente disponibili in sostituzione del Piombo nelle leghe saldanti, non sono una soluzione definitiva al problema degli effetti tossici sull'ambiente e sull'uomo [99]. Dati sperimentali dimostrano che anche tali metalli dovrebbero essere considerati rifiuti pericolosi, in quanto, pur non apparendo cancerogeni o non causando difetti congeniti, la U.S. Environmental Protection Agency e la U.S. Occupational Safety and Health Administration impongono rispettivamente dei limiti di presenza di queste sostanze nell'acqua potabile e nei livelli di esposizione per evitare riscontrati effetti acuti o cronici; inoltre ci sono sostanze, quali Indio e Bismuto, il cui uso non è stato ancora regolato a livello mondiale e non sono ancora stati condotti studi approfonditi sulla loro tossicità. Ulteriore problematica caratterizzante tali metalli è legata al non ancora valutato processo di estrazione che comporta un notevole aumento del consumo di energia (ad esempio per l'estrazione di Argento sono necessari 3024 MJ/kg contro i 73MJ/kg per il Piombo), l'impiego di acidi maggiormente tossici rispetto a quanto necessario precedentemente ed il notevole aumento dei costi a causa della minore disponibilità di tali metalli a livello mondiale [100].

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Direttiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio – “Restrizione dell'Uso di Determinate Sostanze Pericolose nelle Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche” - Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 27 Gennaio 2003.
- [2] Decisione della Commissione, notificata con il numero C (2005) 3143 (2005/618/CE) – “Modifica la Direttiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio ai Fini della Fissazione dei Valori Massimi di Concentrazione di Alcune Sostanze Pericolose nelle Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche” – Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, 18 Agosto 2005.
- [3] Decisione della Commissione, notificata con il numero C (2005) 3754 (2005/717/CE) – “Recante Modifica, ai Fini dell'Adeguamento al Progresso Tecnico, dell'Allegato della Direttiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla Restrizione dell'Uso di Determinate Sostanze Pericolose nelle Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche” - Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, 13 Ottobre 2005.
- [4] Decisione della Commissione, notificata con il numero C (2005) 4054 (2005/747/CE) – “Modifica, ai Fini dell'Adeguamento al Progresso Tecnico, l'Allegato della Direttiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla Restrizione dell'Uso di Determinate Sostanze Pericolose nelle Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche” - Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, 21 Ottobre 2005.
- [5] Decisione della Commissione, notificata con il numero C(2006) 1622 (2006/310/CE) – “Modifica, per adeguarlo al progresso tecnico, l'allegato della direttiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio per quanto riguarda le esenzioni relative alle applicazioni del piombo” Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, 28 Aprile 2006.
- [6] Decreto Legislativo 25 luglio 2005, n. 151, "Attuazione delle direttive 2002/95/CE, 2002/96/CE e 2003/108/CE, relative alla riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche, nonché allo smaltimento dei rifiuti", pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 175 del 29 luglio 2005 - Supplemento Ordinario n. 135
- [7] Legge n. 228, 12 luglio 2006: “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 12 maggio 2006, n. 173, recante proroga di termini per l'emanazione di atti di natura regolamentare. Ulteriori proroghe per l'esercizio di deleghe legislative e in materia di istruzione.” (Pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 160 del 12 luglio 2006) – In vigore dal 13 luglio 2006
- [8] Jedec Standard, JESD97 – “Marking, Symbols, and Labels for Identification of Lead (Pb) Free Assemblies, Components, and Devices” – May 2004.
- [9] Direttiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio – “Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE)” - Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 27 Gennaio 2003.

- [10] Direttiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 6 luglio 2005, “Istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia e recante modifica della direttiva 92/42/CEE del Consiglio e delle direttive 96/57/CE e 2000/55/CE del Parlamento europeo e del Consiglio”, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 22 Luglio 2005.
- [11] CEI 111-51 – “Guida tecnica all'applicazione della Direttiva RoHS, Aspetti tecnico-organizzativi e supporto alla implementazione” – 1/6/2006.
- [12] Roberto Pelosi – “Definizione dei Componenti Critici e Identificazione di Potenziali Soluzioni Alternative” – IMQ S.p.A. seminario 29 novembre 2005.
- [13] C.Parameswariah. RoHS - What is it?. IEEE Potential, 2006, pagg. 29-30.
- [14] J.C.Jagt. Reliability of Electrically Conductive Adhesive Joints for Surface Mount Applications: a Summary of the State of the Art. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A Vol.21 No.2, June 1998, pagg. 215-225.
- [15] IPC/JEDEC J-STD-020C – “Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Non-hermetic Solid State Surface Mount Devices” - January 2004.
- [16] E.Bradley, C.A.Handwerker, J.Bath, R.D.Parker, R.W.Gedney, “Lead-Free electronics: iNEMI Projects Lead to successful Manufacturing”, IEEE Press, Wiley-Interscience, 2007
- [17] <http://www.jeita.or.jp/english/>
- [18] Antonello Vincenzo – “Finiture saldabili alternative alla lega Sn-Pb: situazione e prospettive” - Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “Giulio Natta”, Politecnico di Milano, 2005.
- [19] Zbigniew Moser, Władysław Gašior, Adam Dębski, Janusz Pstruś – “Data Base of Lead-Free Soldering Materials” – Institute of Metallurgy and Materials Science Polish Academy of Sciences, Kraków 2007.
- [20] IPC-SPVC-WP-006 – “Round Robin Testing and Analysis Lead-Free Alloys Tin, Silver and Copper” – July 2003.
- [21] Dongkai Shangguan – “Lead-Free Solder Interconnect Reliability” – ASM International, Materials Park, Ohio, July 2006, ISBN 978-0-87170-816-8.
- [22] AIM Manufacturing and Distribution Worldwide – “Lead Free Soldering Guide – Alloys, Chemistries, Data, Training, Consultation” – 2007 -[www.aimsolder.com](http://www.aimsolder.com).
- [23] [http://www.ing.unitn.it/~colombo/brasature\\_senza\\_piombo/proprieta.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/brasature_senza_piombo/proprieta.htm)
- [24] ELFNET e COST 531 Action – “Data Base for Properties of Lead-Free Solder Alloys” – Version 1.0.
- [25] Engelmaier Associates, L.C., A. WHITE PAPER REPORT: "Recommendations for PCB FAB Notes and Specifications in Printed Circuit Board Drawings for SnPb and Lead-Free Soldering Assemblies, the Qualification of PCB Shops and Activities to Assure Continued Quality", <http://www.engelmaier.com/white.html>
- [26] IPC-D-279 – “Design Guidelines for Reliable Surface Mount Technology Printed Board Assemblies” – JULY 1996.
- [27] OK International – “Saldatura Manuale con leghe senza-piombo” - Dover Italy s.r.l. Divisione Operativa OK International.

- [28] EFD, A Nordson Company – “Soluzioni Complete per la Saldatura” - 2007.
- [29] IEC 61190-1-1 – “Attachment Materials for Electronic Assembly - Requirements for Soldering Fluxes for High-Quality Interconnections in Electronics Assembly ” – 2002.
- [30] AIM, Tech-Sheet – “Reducing BGA Voiding Through Process Optimization” – 2007.
- [31] IPC-A-610D – “Acceptability of Electronic Assemblies” – February 2005.
- [32] Ephraim Suhir, Y.C. Lee, C.P. Wong – “Micro- and Opto- Electronic Materials and Structures: Physics, Mechanics, Design, Reliability Packaging” – Volume 1 – Springer 2007.
- [33] ELFNET e COST 531 Action – “Data Base for Properties of Lead-Free Solder Alloys” – Version 1.0.
- [34] Andrew Eugene Perkins – “Investigation and Prediction of Solder Joint Reliability for Ceramic Area Array Packages Under Thermal Cycling, Power Cycling, and Vibration Environments” - Georgia Institute of Technology, May 2007.
- [35] <http://www.shodor.org/~jingersoll/weave/tutorial/node4.html>.
- [36] K.S. Kim, S.H. Huh, K. Sukanuma – “Effects of cooling speed on microstructure and tensile properties of Sn-Ag-Cu allows” - Materials Science and Engineering, Vol. 333, 2002 p.106–114.
- [37] ASM Handbook Committee – “Mechanical Testing and Evaluation” – Volume 8, ASM Handbook, 2000, ASM International.
- [38] Mike Meier – “The Hall-Petch Relationship” - University of California, Davis, September 13, 2004.
- [39] Y. Kariya, C. Gagg and W. J. Plumbridge – “Tin Pest in Lead-Free Solder” – Soldering and Surface Mount Technology, Vol. 13/1, 2000, p. 39-40.
- [40] Rui Huang – “Dept of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics” – Aerospace Materials Laboratory, The University of Texas, Austin, 2003.
- [41] M. Amagai, M. Watanabe, M. Omiya, K. Kishimoto, T. Shibuya – “Mechanical Characterization of Sn–Ag-Based Lead-Free Solders” - Microelectronics Reliability 42, January 2002, p. 951–966.
- [42] [2.12] R. W. Neu, D. T. Scott, M. W. Woodmansee – “Thermomechanical Behavior of 96Sn-4Ag and Castin Alloy” – ASME Transactions, J. Electron, Packaging, Vol. 123 (No.3), The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Sept 2001, p. 238-246.
- [43] [2.13] X. Q. Shi, Z. P. Wang, W. Zhou, H. L. J. Pang, Q. J. Yang – “A New Creep Constitutive Model for Eutectic Solder Alloy” - ASME Transactions, J. Electron, Packaging, Vol. 124, June 2002, p. 85-90.
- [44] [2.14] C.H. Raeder, LE. Felton, R.W. Messler, Jrt, and L.F. Coffin, Jr – “Thermomechanical Deformation Behavior of Eutectic Sn-Bi Solder” – Weld. J., American Welding Society, 1995.
- [45] [2.15] Ahmer Syed – “Accumulated Creep Strain and Energy Density Based Thermal Fatigue Life Prediction Models for SnAgCu Solder Joints” - Amkor Technology, Inc., ECTC 2004 conference proceedings pp 737 – 746.
- [46] ShiNan Wang and Lihua Liang, Zhejiang University of Technology, China, Yong Liu, Scott Irving and Timwah Luk, Fairchild Semiconductor, South Portland, USA – “Solder

- Joint Reliability under Electromigration and Thermal-Mechanical Load” - 2007 Electronic Components and Technology Conference.
- [47] Ahmer Syed – “Accumulated Creep Strain and Energy Density Based Thermal Fatigue Life Prediction Models for SnAgCu Solder Joints” - Amkor Technology, Inc., ECTC 2004 conference proceedings pp 737 – 746.
- [48] Hun Shen Ng, Tong Yan Tee, Kim Yong Goh, Jing-en Luan, Tommi Reinikainen, Esa Husa, Arni Kujala – “Absolute and Relative Fatigue Life Prediction Methodology for Virtual Qualification and Design Enhancement of Lead-free BGA” - STMicroelectronics, Singapore and Nokia, Finland, 2005 Electronic Components and Technology Conference.
- [49] YAN De-jin, ZHOU De-jian, HUANG Chun-yue, WU Zhao-hua, ZHOU Xiang – “The Reliability Research of Lead-Free Solder Joint of Flip-Chip” - Department of Electronic Machinery and Traffic Engineering, GuiLin University of Electronic Technology, China, 2006 7th International Conference on Electronics Packaging Technology.
- [50] E. Suhir University of California, Santa Cruz University of Maryland, Y.C. Lee University of Colorado, C.P. Wong Georgia Institute of Technology – “Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures: Physics, Mechanics, Design, Reliability, Packaging” – Volume I, Springer Science and Business Media, 2007.
- [51] Qian Zhang, Abhijit Dasgupta, Peter Haswell – “Viscoplastic Constitutive Properties and Energy-Partitioning Model of Lead-Free Sn<sub>3.9</sub>Ag<sub>0.6</sub>Cu Solder Alloy” - CALCE Electronic Products and Systems Center, Mechanical Engineering Department, University of Maryland, 2003 Electronic Components and Technology Conference.
- [52] Jiang Ting-biao, Du Chao, Xu Long-hui – “Finite Element Analysis and Fatigue Life Prediction of BGA Mixed Solder Joints” - Computer and Control College, School of Mechanical Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, China, 2007.
- [53] J.J.Licari, D.W.Swanson. Adhesives Technology for Electronic Applications – Materials, Processes, Reliability. William Andrew Publishing, New York, 2005, ISBN 0-8155-1513-8.
- [54] N.Collings, R.Beverton. Electrically Conducting Adhesive. U.S. Patent Office, 1945, US Pat. 2444034.
- [55] P.Corradini. Chimica generale. Manfredi Editore, Milano, 1971.
- [56] MIL-STD-883F. Test Method Standard – Microcircuits. U.S. Department of Defense, 2004.
- [57] K.Matz. Electrically Conductive Cement. U.S. Patent Office, 1958, US Pat. 2849631.
- [58] J.J.Licari, L.R.Enlow. Hybrid Microcircuit Technology Handbook. Noyes Publications, 1998, ISBN 0815514239.
- [59] H.F.Mark. Encyclopedia of Polymer Science and Technology – Conductive Polymer Composites. John Wiley & Sons, 2004, vol.5 (pag. 652-697), ISBN 978-0-471-27507-7.
- [60] D.Lu, Q.K.Tong & C.P.Wong. Conductivity Mechanisms of Isotropic Conductive Adhesives (ICA's). IEEE Transactions on Electronics Packaging.
- [61] J.C.Jagt. Reliability of Electrically Conductive Adhesive Joints for Surface Mount Applications: a Summary of the State of the Art. IEEE Transactions on Components,



- Packaging, and Manufacturing Technology, Part A Vol.21 No.2, June 1998, pagg. 215-225.
- [62] D.D.Chang, P.A.Crawford, J.A.Fulton, R.McBride, M.B.Schmidt, R.E.Sinitski & C.P.Wong. An Overview and Evaluation of Anisotropically Conductive Adhesive Films for Fine Pitch Electronic Assembly. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol.16 No.8, December 1993, pagg. 828-835.
- [63] M.G. Périchaud, J.Y. Delétage, H. Frémont, Y. Danto, C. Faure. Reliability evaluation of adhesive bonded SMT components in industrial applications. Microelectronics Reliability. 2000. 40. pagg. 1227-1234.
- [64] D.Klosterman, L.Li & J.E.Morris. Materials Characterization, Conduction Development, and Curing Effects on Reliability of Isotropically Conductive Adhesives. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A Vol.21 No.1, march 1998, pagg. 23-31.
- [65] MIL-HDBK-754(AR). Plastic Matrix Composites with Continuous Fiber Reinforcement. U.S. Department of Defense, 1991.
- [66] D.W.Callister. Scienza e Ingegneria dei Materiali – Una Introduzione. EDISES, 2007, EAN 9788879594219.
- [67] K.Jansen, C.Qian, L.J.Ernst, C.Bohm, A.Kessler, H.Preu, M.Stecher. Kinetic Characterisation of Molding Compounds. Delft University of Technology.
- [68] H.P.Wua, J.F.Liua, X.J.Wua, M.Y.Gea, Y.W.Wangb, G.Q.Zhanga & J.Z.Jinga. High Conductivity of Isotropic Conductive Adhesives Filled with Silver Nanowires. International Journal of Adhesion & Adhesives 26, 2006, pagg. 617-621.
- [69] Y.C.Chan, D.Y.Luk. Effects of bonding parameters on the reliability performance of anisotropic conductive adhesive interconnects for flip-chip-on-flex packages assembly - I. Different bonding temperature. Microelectronics Reliability, Vol.42, 2002, pagg. 1185-1194.
- [70] T.Kawaguchi, H.Suzuki, T.Usuda. Anisotropically Electroconductive Adhesives. U.S. Patent Office, 1987, US Pat. 4701279.
- [71] A.Berghorst, C.J.vonKlempere, N.K.Sookay. Conductive Secondary Bonding of Conductive Composite for the Aerospace Industry, Proceedings of the Composites Africa 2006 Conference, Durban (South Africa), 2006, ISBN 1-900-01707-D
- [72] M.L.Clingerman. Development and Modelling of Electrically Conductive Composite Materials. Michigan Technological University, 2001.
- [73] L.Li, I.E.Moms. Reliability and Failure Mechanism of Isotropically Conductive Adhesives Joints. IEEE. 1995.
- [74] JESD22-A104-B – “Temperature Cycling” – Jedec Standard – Jedec Solid State Technology Association - July 2000.
- [75] J.P.F.Charpin, M.Lombe, T.G.Myers. Spin Coating of non-Newtonian Fluids with a Moving Front. Physical Review E 76, 2007.
- [76] B.D.Washo. Rheology and Modeling of the Spin Coating Process. IBM J. Res. Develop, pagg. 190-198.
- [77] N.F.Nissen, L.Stobbe, K.Schichke, J.Muller & H.Reichl. European Environmental Legislation – Insights into the EuP Process. IEEE International Electronics

- Manufacturing Technology Symposium, 2007, pagg. 325-331, ISBN 978-1-4244-1336-2.
- [78] NASA-RP-1124. Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials. NASA, Goddard Space Flight Center, Jun. 1997.
- [79] M.Catelani, V.L.Scarano, R.Singularoli, F.Bertocci, P.Palchetti, “Rohs requirements for electronic applications: measurements of characteristics of silver epoxy adhesives solder joints”, Proceedings of 16th IMEKO TC4 Symposium Conference, Firenze (Italy), September 22-24, 2008.
- [80] M.Catelani, V.L.Scarano, R.Singularoli, P.Palchetti, F.Bertocci, “Experimental Performance Analysis Of New Ag Conductive Glues For Electronic Applications”, Proceedings of Ieee International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vancouver (Canada), May12-15. 2008
- [81] CEI EN 60068-2-78. Prove ambientali – Caldo umido, regime stazionario. 2002.
- [82] J.D.Bronzino, “The Biomedical Engineering Handbook – Ultrasound”, CRC Press.
- [83] Zhiheng Huangl, Paul P. Conway, Changqing Liult, Rachel C. Thomson, “Inter-Dependence of Processing and AUoy Composition on the Reliability of Sn-Based Lead Free Solders in Fine Pitch FCOB Interconnection” 2003 IEEE/CPMT/SEMI International Electronics manufacturing Technology Symposium.
- [84] IPC-9701A, “Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments”, IPC, January 2002.
- [85] IPC-S-785 – “Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments” - November 1992.
- [86] CEI EN 60068-2-6 – “Prove Ambientali: Prove – Prova Fc: Vibrazioni Sinusoidali” – 1996-05.
- [87] CEI EN 60068-2-47 – “Prove Ambientali: Prove - Montaggio di Campioni per Prove Dinamiche di Vibrazione, Urto e Similari” – 2006-07.
- [88] CEI EN 60068-2-59 – “Prove Climatiche e Meccaniche Fondamentali: Prove – Prova Fe: Vibrazioni – Metodo con Sinusoidi Modulate” – 1998-05.
- [89] CEI EN 60068-2-64 – “Prove Climatiche – Metodi di Prova – Prova Fh: Vibrazione Aleatorie a Larga Banda (Controllo Numerico) e Guida” – 1997-06.
- [90] MIL-STD-810F - “Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Consideration and Laboratory Tests” - 1 January 2000.
- [91] JESD22-B103B – “Vibration, Variable Frequency” - Jedec Standard – Jedec Solid State Technology Association - JUNE 2002, Reaffirmed: June 2006.
- [92] Dave S. Steinberg – “Vibration Analysis for Electronic Equipment” - Steinberg & Associates and University of California, Los Angeles, A Wiley-Interscience Publication, 2000.
- [93] Boeing Phantom Works – “JCAA/JG-PP Lead-Free Solder Project: Vibration Test” - Boeing Electronics Materials and Processes Report 582, Revision A, Seattle, January 9, 2006.
- [94] NASA PT-TE-1413. Preferred Reliability Practices – Random Vibration Testing. NASA Jet Propulsion Laboratory.
- [95] CEI EN 60068-2-1 – “Prove Ambientali: Prove – Prova A: Freddo” – 1996-05

- [96] CEI EN 60068-2-2 – “Prove Ambientali: Prove – Prova B: Calore secco” – 1998-12
- [97] IEC 60068-2-64, Environmental testing - Part 2-64: Tests - Test Fh: Vibration, broadband random and guidance, 2008/04.
- [98] ETSI EN 300 019-2-2-v2.1.2-1999-09, Equipment Engineering (EE) - Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment; - Part 2-2: Specification of environmental tests; Transportation.
- [99] J. Müller, H. Griese, H. Reichl, “Reduced Environmental Impacts by Lead Free Electronic Assemblies?”, IPCWorks’99, IPC. SyedA., 2001.
- [100] A. Kua, O. Ogunseitanb, J.D. Saphoresc, A. Shapirod, J.M. Schoenunge, “Lead-Free Solders: Issues of Toxicity, Availability and Extraction”, 53<sup>rd</sup> Electronic Components and Technology Conference proceedings, New Orleans, May 28, 2003.