



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio dei meccanismi di formazione del bonding metallurgico pelle-core  
e predizione delle caratteristiche morfologiche delle schiume mediante  
analisi con reti neurali

*R. Montanari, M. E. Tata, N. Ucciardello*



*Università degli Studi di Roma Tor Vergata*

Report RdS/2012/097

STUDIO DEI MECCANISMI DI FORMAZIONE DEL BONDING METALLURGICO PELLE CORE E PREDIZIONE DELLE CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DELLE SCHIUME MEDIANTE ANALISI CON RETI NEURALI

R. Montanari, M. E. Tata, N. Ucciardello (Università degli Studi di Roma Tor Vergata)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA



## Indice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Sommario</b> .....  | <b>4</b>  |
| <i>Introduzione</i> .....  | 5         |
| <b>CAPITOLO1</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>Ottimizzazione delle miscele e valutazione delle caratteristiche meccaniche e di damping di schiume metalliche di alluminio</b> ..... | <b>6</b>  |
| <b>1.1 - Analisi con reti neurali</b> .....  | 7         |
| <b>1.2 - Modellazione mediante reti neurali</b> .....  | 9         |
| <b>1.3 - Misura del modulo elastico dinamico e del fattore di damping</b> .....  | 15        |
| <b>1.4 - La tecnica S.M. e l'apparato sperimentale</b> .....   | 16        |
| <b>1.5 - Risultati</b> .....   | 23        |
| <b>CAPITOLO2</b> .....   | <b>26</b> |
| <b>Conclusioni</b> .....   | <b>44</b> |
| <b>Riferimenti bibliografici</b> .....   | <b>45</b> |
| <b>Curriculum del gruppo di lavoro</b> .....   | <b>46</b> |

## Sommario

L'attività svolta dal gruppo di Metallurgia dell'Università di Roma-Tor Vergata ha sostanzialmente riguardato 3 punti:

- 1- simulazioni mediante reti neurali delle caratteristiche strutturali di schiume di alluminio,
- 2- misure di spettroscopia meccanica (fattore di damping e modulo elastico dinamico) condotte da temperatura ambiente fino a 500 °C su alcune schiume prodotte durante il primo anno di attività del progetto e per confronto su alluminio policristallino massivo,
- 3- studio del bonding metallurgico tra schiume di alluminio e pelli di altri metalli (rame e acciaio) oppure di alluminio.

I risultati ottenuti ai punti 1 e 2 sono riportati nel capitolo 1, quelli al punto 3 nel capitolo 2 di questa relazione.

Per quanto riguarda il primo punto i dati sperimentali del primo anno di attività del progetto sono stati utilizzati come *training* per due reti neurali multi-layer ANN; i modelli si sono rivelati degli utili strumenti per la predizione delle caratteristiche morfologiche per ogni composizione utilizzata nel processo PM. Questo lavoro ha permesso di trovare densità e caratteristiche morfologiche delle schiume di Al come funzione della composizione delle polveri. Siccome applicazioni differenti delle schiume di Al richiedono caratteristiche specifiche, utilizzando i risultati delle reti neurali la composizione della miscela di polveri può essere opportunamente calibrata al fine di ottenere le caratteristiche desiderate.

Lo studio al punto 2 ha permesso di comprendere meglio le specifiche caratteristiche di smorzamento delle vibrazioni da parte delle schiume di alluminio. In particolare ha evidenziato come il damping dipenda dall'ampiezza di sollecitazione: le oscillazioni presentano caratteristiche di non-linearità e le curve di risonanza sono asimmetriche. Il fondo a bassa temperatura della schiuma cresce fino a  $4-5 \times 10^{-3}$ , diventando confrontabile con quello dell'alluminio massivo quando l'ampiezza di deformazione arriva a  $10^{-4}$ . I risultati dimostrano inoltre che il damping delle schiume di alluminio aumenta aumentando la porosità e diminuendo la dimensione dei pori, decresce con la frequenza della sollecitazione ed aumenta con l'ampiezza di deformazione.

Nel capitolo 2 vengono descritti gli esperimenti eseguiti per realizzare giunzioni metallurgiche tra schiume di alluminio con pelli sia di alluminio che di metalli differenti (rame e ferro). I due casi presentano aspetti e difficoltà pratiche molto diversi.

La saldatura con metalli (sono stati studiati rame e acciaio) aventi punto di fusione maggiore di quello dell'alluminio è stata realizzata con successo facendo formare la schiuma a contatto del metallo della pelle. La superficie del metallo deve essere preventivamente pulita meccanicamente con carte abrasive per rimuovere la strato naturale di ossido, quindi deve essere trattata con un disossidante per evitare che la saldatura sia compromessa dalla formazione di ossido durante l'esposizione in temperatura.

Questa tecnica non può essere utilizzata nel caso di una pelle di alluminio perchè alla temperatura di formazione della schiuma di alluminio essa ovviamente fonde. Si è così tentato di realizzare una pelle di alluminio su una schiuma in lega di alluminio con punto di liquidus inferiore al punto di fusione dell'alluminio puro. Questi esperimenti non hanno dato esito positivo perchè l'intervallo tra la temperatura di fusione dell'alluminio (pelle) e quella di schiumatura della lega (superiore a quella di liquidus) è in genere molto ristretto ed è molto difficile controllare con la dovuta precisione la temperatura durante il processo.

Risultati buoni si sono ottenuti invece all'ENEA utilizzando forni di maggiori dimensioni e quindi con maggiore inerzia termica (report RdS/2012/98).



## Introduzione

L'attività sperimentale condotta nel primo anno del progetto ha riguardato uno dei metodi più diffusi per la produzione di schiume metalliche, il metodo della Metallurgia delle Polveri, sviluppato da Banhart all'Istituto Fraunhofer di Brema.

Una volta definiti i più idonei parametri di processo (condizioni di mescolamento delle polveri, pressione di compattazione, dimensione e forma delle particelle di SiC da utilizzare, velocità di riscaldamento alla temperatura di fusione del metallo, temperatura e tempo di schiumatura, condizioni di raffreddamento) sono state prodotte schiume di alluminio con diverse composizioni del precursore (polveri di Al, SiC come stabilizzante e TiH<sub>2</sub> come agente soffiante).

E' stata considerata una griglia di composizioni ottenuta variando progressivamente il contenuto di SiC (0.8, 2.8, 6 e 9 % in peso) e TiH<sub>2</sub> (0.1, 0.2, 0.4 e 0.6 % in peso). E' stata poi studiata la correlazione tra composizione del precursore e aspetti morfologici della schiume.

1) - Il primo punto di indagine per il secondo anno di progetto ha riguardato l'analisi con le reti neurali (ANN), un sistema che assiste lo studio di fenomeni non ancora riconducibili a modelli analitici. Il maggior vantaggio dell'ANN è che i dati sperimentali vengono utilizzati direttamente, senza assunzioni o approssimazioni. Tutte le modalità di organizzazione e apprendimento sono formate interamente all'intero della rete.

I dati sperimentali ottenuti nell'attività del primo anno sono utilizzati come *training* per due ANN multi-layer. I modelli servono per la predizione delle caratteristiche morfologiche per ogni composizione utilizzata nel processo. Lo scopo è trovare densità e caratteristiche morfologiche delle schiume di Al come funzione della composizione delle polveri. Siccome applicazioni differenti delle schiume di Al richiedono caratteristiche specifiche, la composizione della miscela di polveri può essere scelta per ottenere le caratteristiche desiderate.

2) Per certe classi di materiali le caratteristiche di damping sono tecnologicamente molto importanti, per esempio se viene richiesta una grande capacità di smorzare rumore e vibrazioni. Questo è proprio il caso delle schiume metalliche. Molte delle potenziali applicazioni delle schiume metalliche sono legate alle loro proprietà di assorbire energia, smorzare il suono e attutire le vibrazioni meccaniche. In Giappone sono già state impiegate come materiale per barriere antirumore lungo la linea dello Shinkansen, il treno proiettile.

La Spettroscopia Meccanica (S.M.) fornisce il *modulo elastico dinamico* ed il *fattore di smorzamento*  $Q^{-1}$  (damping) in un esteso intervallo di temperatura. La sperimentazione mira a rispondere ad una questione tuttora aperta, cioè se il damping delle schiume dipende dall'ampiezza di vibrazione.

3) Le schiume metalliche sono in genere utilizzate con una pelle metallica che le riveste e che viene comunemente fatta aderire mediante adesivi acrilici. Lo scopo della nostra attività è quello di realizzare un bonding metallurgico tra pelle, fatta di alluminio o altri metalli, e core. I vantaggi di siffatta giunzione sono legati alla resistenza intrinseca di una saldatura rispetto all'incollaggio, soprattutto per eventuali applicazioni in temperatura della schiuma rivestita dalla pelle.

## CAPITOLO1

Ottimizzazione delle miscele e valutazione delle caratteristiche meccaniche e di damping di schiume metalliche di alluminio



## 1.1 - Analisi con reti neurali

Nel corso dell'attività sperimentale condotta nel primo anno sono stati eseguiti esperimenti per produrre campioni in schiuma di alluminio di piccole dimensioni utilizzando il metodo delle polveri. Per i precursori sono state prese in esame miscele di polveri di alluminio, agente schiumante ( $TiH_2$ ) e stabilizzante (SiC) con diverse proporzioni. In particolare, sono stati preparati due set di campioni di schiume utilizzando polveri di Al (purezza 99.5%) con diametro medio di 45  $\mu m$ , particelle di SiC come stabilizzante e particelle di  $TiH_2$  di 5  $\mu m$  come agente soffiante. Ogni set era costituito da 16 gruppi di campioni (5 campioni per gruppo) combinando le seguenti quantità:

0.1, 0.2, 0.4 e 0.6 (% in peso) di  $TiH_2$

0.8, 2.8, 6 e 9 (% in peso) di SiC.

I due gruppi si differenziavano tra loro per la dimensione media delle particelle di SiC impiegate: 35 e 60  $\mu m$ .

I campioni di schiuma prodotti a partire da precursori preparati con le diverse miscele di polveri sono stati poi esaminati determinandone la densità  $\rho$  e le caratteristiche morfologiche: il diametro equivalente  $D_{eq}$  e il parametro di circolarità  $C$  di ogni bolla presente nelle sezioni.

Il diametro equivalente  $D_{eq}$  è definito come il diametro del cerchio avente un'area equivalente alla sezione della bolla e indica la dimensione della bolla.  $C$  può assumere valori nell'intervallo tra 0 e 1; è uguale a 1 nella condizione ideale che la sezione della bolla sia un cerchio e decresce progressivamente all'aumentare dell'irregolarità del contorno. I valori di  $D_{eq}$  e  $C$  sono stati ottenuti dalle seguenti relazioni:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$C = \frac{4\pi A}{P^2}$$

dove  $A$  e  $P$  sono rispettivamente l'area e il perimetro della bolla. Per ogni campione è stato calcolato il valor medio  $\langle D_{eq} \rangle$  e  $\langle C \rangle$ .

Mediante la microscopia elettronica a scansione (SEM) è stata studiata inoltre la disposizione delle particelle di SiC nei pori. Con analisi chimiche locali condotte tramite EDS è stata esaminata la natura di altri composti presenti sulla superficie delle bolle.

Sulla base dei test condotti sono state individuate le condizioni operative ottimali per produrre schiume di alluminio di buona qualità:

### 1- Dimensione delle polveri

Al diametro medio di 45  $\mu m$ ,  
SiC diametro medio di 35  $\mu m$ ,  
 $TiH_2$  diametro medio di 5  $\mu m$ .

### 2- Composizione della miscela di polveri

Con un contenuto di  $TiH_2$  di 0.1 % in peso si ottiene la miglior morfologia, cioè pori più piccoli e dimensioni omogenee. La densità è 0.35, buona ma non ottimale. Questa scelta va fatta quando si vogliono privilegiare le proprietà meccaniche e la loro isotropia.

Con un contenuto di  $TiH_2$  di 0.4 % in peso si ottiene la densità più bassa (0.20) ma bolle più disomogenee. Questa scelta va fatta quando si vuol privilegiare la riduzione del peso a discapito dell'isotropia e delle proprietà meccaniche.

### 3- Miscelazione

Le polveri sono state miscelate per 30 minuti a 150 giri al minuto

**4- Compattazione**

A temperatura ambiente sotto una pressione uni-assiale di almeno 250 MPa

**5- Temperatura di schiumatura**

700°C, non troppo superiore alla temperatura di fusione di Al (660°C)

**6- Riscaldamento dei precursori**

Da temperatura ambiente fino a 700°C in 120 secondi in modo da prevenire una eccessiva dispersione di gas prima della schiumatura

**7- Tempo di permanenza alla temperatura di schiumatura**

180 secondi a 700 °C

**8- Raffreddamento dalla temperatura di schiumatura**

Raffreddamento in acqua.

In funzione delle possibili applicazioni è utile essere in grado di poter variare le caratteristiche delle schiume, per esempio il diametro medio dei pori. I dati sperimentali si riferiscono ad una matrice di composizioni delle miscele dei precursori per cui si rende necessario poter predire il risultato anche per valori intermedi tra quelli provati sperimentalmente. A tal fine sono state realizzate simulazioni basate sulle reti neurali.



## 1.2 - Modellazione mediante reti neurali

L'analisi con le reti neurali (ANN) è un sistema che assiste lo studio di fenomeni non ancora riconducibili a modelli analitici. Questo è un metodo ampiamente utilizzato in *process control*, *process design*, *alloy design*, e caratterizzazione di materiali. In tempi recenti c'è stata una crescita costante nell'interesse della modellazione attraverso reti neurali in differenti campi della scienza dei materiali. Il maggior vantaggio dell'ANN è che i dati sperimentali vengono utilizzati direttamente, senza assunzioni o approssimazioni. Tutte le modalità di organizzazione e apprendimento sono formate interamente all'intero della rete.

Le reti neurali consistono in semplici elementi di elaborazione sincrona, i quali sono ispirati al sistema nervoso biologico. L'unità base nell'ANN è il neurone. I neuroni sono connessi tra loro da collegamenti chiamati sinapsi; associato ad ogni sinapsi c'è un fattore di peso. Ogni neurone riceve differenti segnali di input; il neurone somma tutti questi segnali (ognuno con il proprio peso) e, se questa somma è maggiore di una certa soglia, produce un segnale di output.

Una rete neurale è generalmente "istruita" fornendogli un certo numero di input con i corrispondenti dati di output. L'architettura delle ANN comprende molti singoli neuroni organizzati in una sequenza di livelli: il livello di input, intermedio (nascosto) e output. Il problema nella simulazione consiste nel trovare una soddisfacente relazione tra un set di neuroni di input associati all'output conosciuto. La selezione dei parametri di input è un aspetto molto importante nella realizzazione della rete. Tutti i parametri di input rilevanti devono essere rappresentati come un dato di input della rete neurale.

Per interpolare i dati sperimentali e trovare le condizioni ottimali di schiumatura, due multi-layer feedforward ANN [1-2] sono state implementate da Neural Network Toolbox di Matlab 7.

La prima rete (ANN-1) è costituita da un livello di input, quattro livelli nascosti, e un livello di output. I neuroni di input sono: (a) quantitativo di  $TiH_2$ , (b) quantitativo di SiC, (c) dimensione media delle particelle di SiC; i neuroni di uscita sono: (a)  $\langle D_{eq} \rangle$ , (b)  $D_{max}$ , il massimo valore del diametro equivalente nella distribuzione.

La seconda rete neurale (ANN-2) è formata da un livello di input, quattro livelli nascosti e un livello di output. I neuroni di input sono: (a) quantitativo di  $TiH_2$ , (b) quantitativo di SiC, (c) dimensione media delle particelle di SiC; il neurone di uscita è  $\langle C \rangle$ . L'architettura di ANN-1 e ANN-2 sono riportate in Fig. 1.

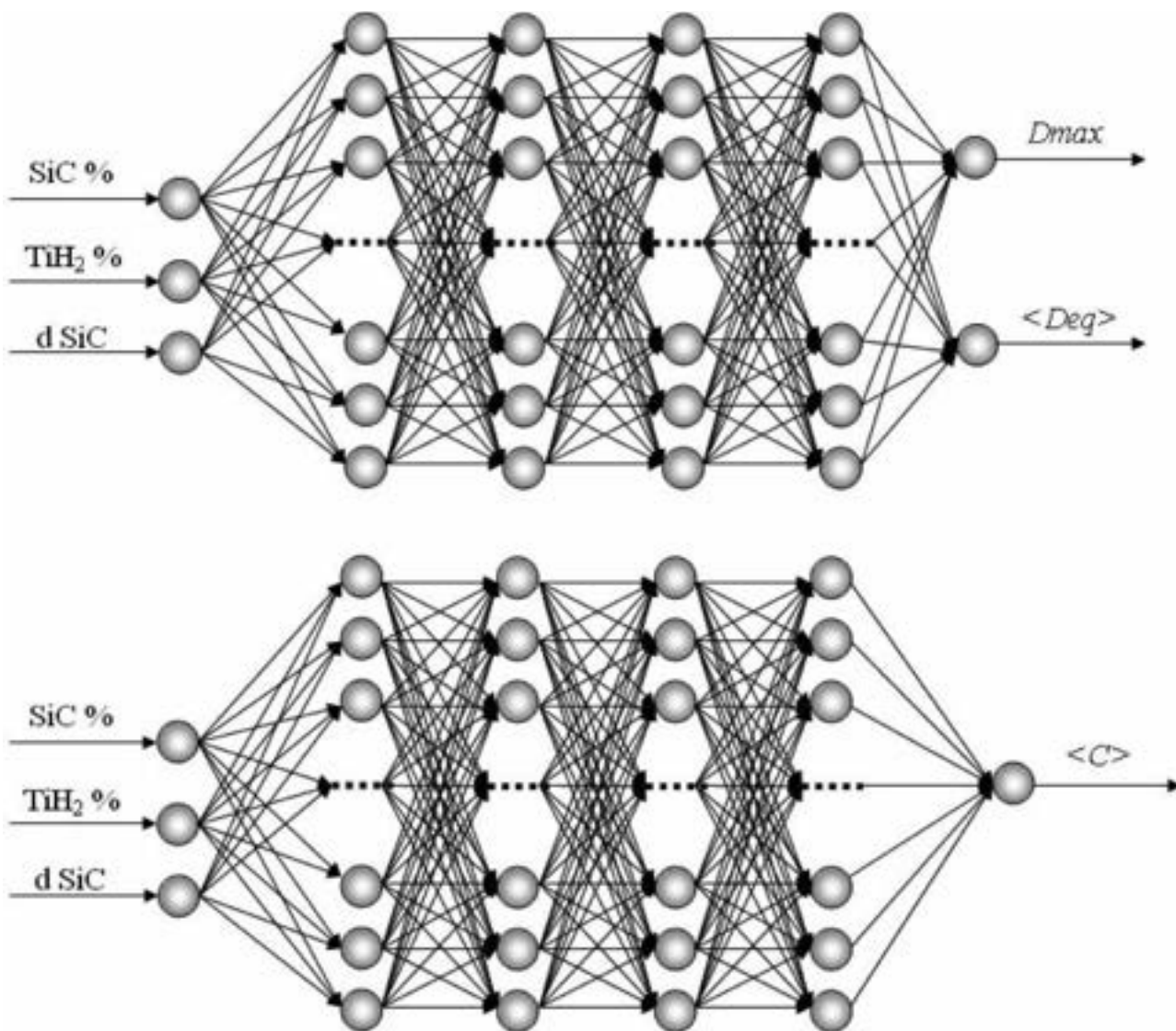
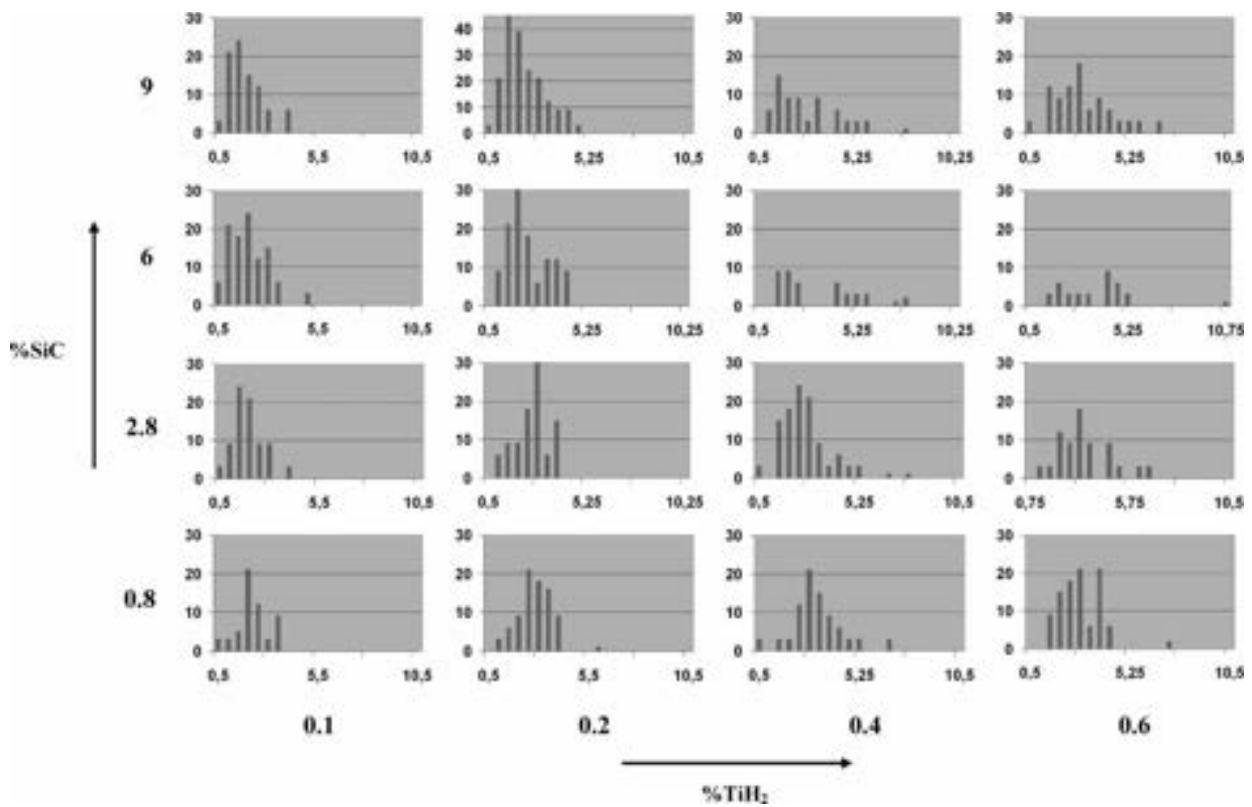


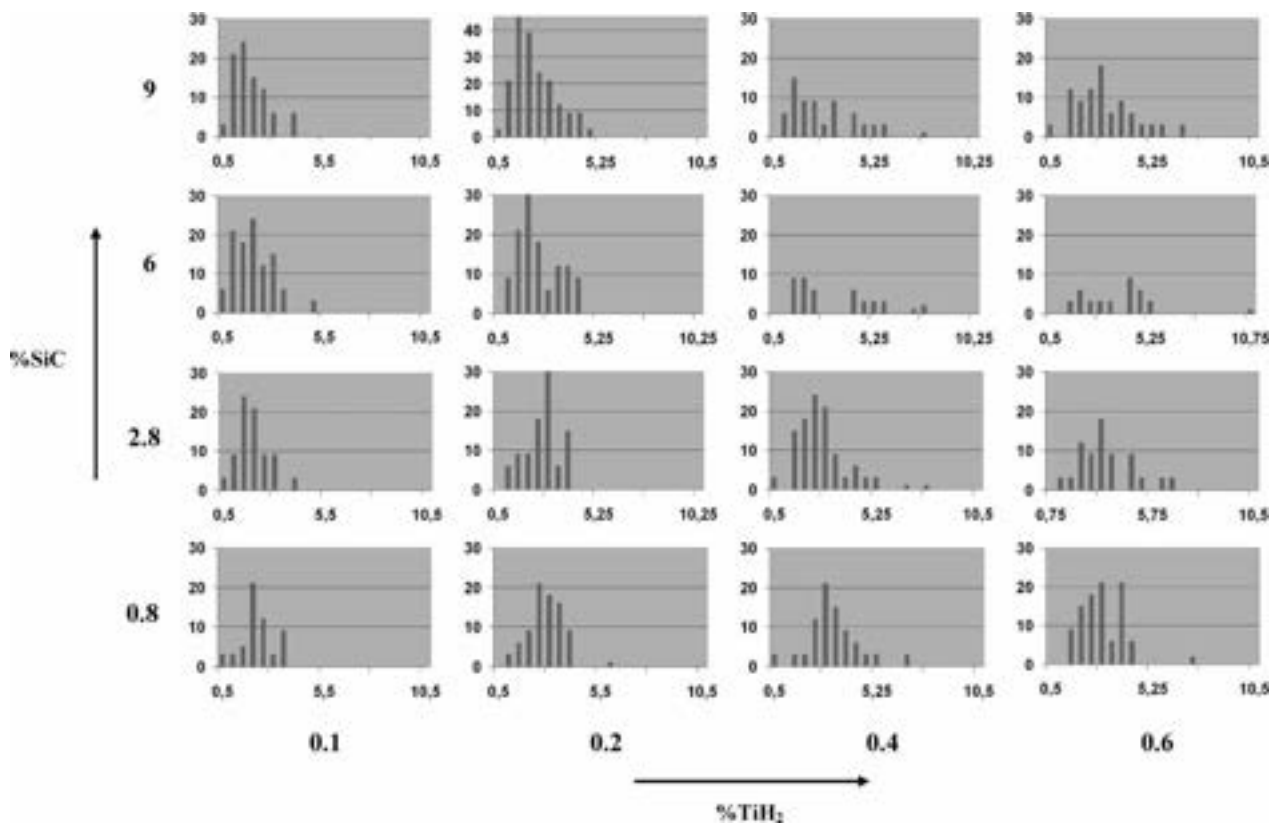
Fig. 1- Architettura delle reti neurali ANN-1 e ANN-2.

Il numero di neuroni dei livelli nascosti delle reti neurali sono stati calibrati durante il *training* e *validation process*. La funzione log-sigmoide è stata utilizzata per entrambe le reti in livelli nascosti e nei livelli di output.

Le Figg. 2 e 3 riportano i dati sperimentali, che sono stati utilizzati per il *training* e la *validazione* di ANN-1, riguardanti le distribuzioni del diametro equivalente delle schiume del set 1 (particelle di SiC di 37  $\mu\text{m}$ ) e del set 2 (particelle di SiC di 60  $\mu\text{m}$ ), rispettivamente.



**Fig.2-** Distribuzioni del diametro equivalente delle schiume del set 1 (particelle di SiC di 37  $\mu\text{m}$ ). I diametri sono espressi in millimetri.



**Fig.3-** Distribuzioni del diametro equivalente delle schiume del set 2 (particelle di SiC di 60  $\mu\text{m}$ ). I diametri sono espressi in millimetri.

I dati sperimentali della Tab.1 sono stati utilizzati per i due *training tests*. Il *training* è stato eseguito introducendo casualmente i gruppi di dati. Per entrambe le reti è stato utilizzato l’algoritmo di Backpropagation con gradiente discendente e learning rate adattativo [3-4]. Prima, le variabili di input ed output sono state normalizzate nel range tra 0-1.

Per testare le reti, 12 gruppi di dati per ogni set sono stati casualmente selezionati dalla Tab.1; i restanti gruppi sono stati utilizzati come controllo. La procedura ha fornito i parametri per ottimizzare le reti (Tab.2).

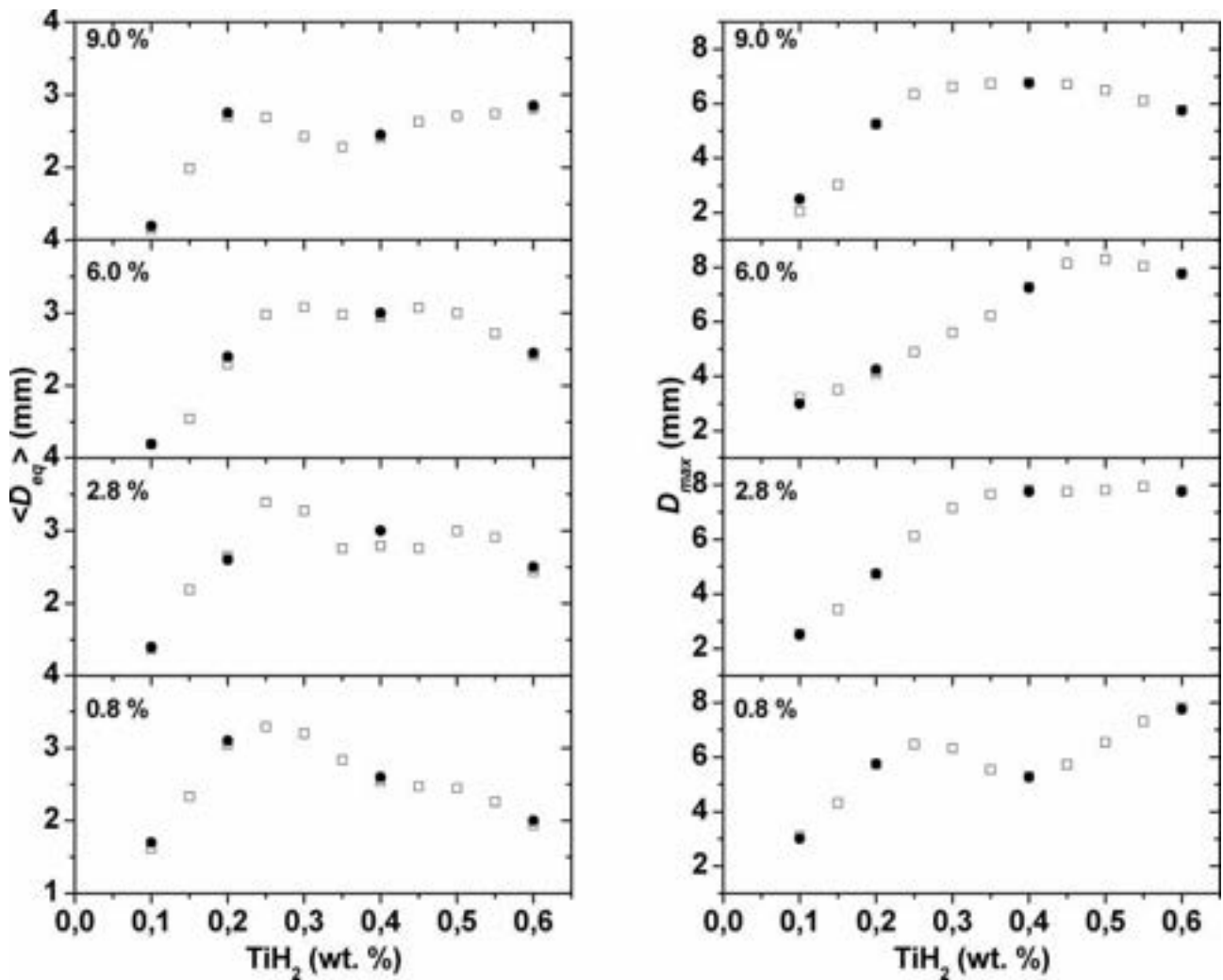
**Tab.1:** Caratteristiche delle schiume prodotte con differenti quantitativi di TiH<sub>2</sub> e SiC. I set 1 e 2 differiscono per la dimensione delle particelle di SiC utilizzate nella miscela.

| SiC particle size |                      | <i>d</i> = 37 μm (set 1)        |                    |              | <i>d</i> = 60 μm (set 2)        |                    |              |
|-------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|--------------|---------------------------------|--------------------|--------------|
| SiC (%)           | TiH <sub>2</sub> (%) | ( <i>D</i> <sub>eq</sub> ) (mm) | Standard deviation | ( <i>C</i> ) | ( <i>D</i> <sub>eq</sub> ) (mm) | Standard deviation | ( <i>C</i> ) |
| 0.8               | 0.1                  | 1.70                            | 0.45               | 0.75         | 2.20                            | 0.46               | 0.62         |
| 2.8               | 0.1                  | 1.40                            | 0.36               | 0.64         | 1.75                            | 0.75               | 0.75         |
| 6                 | 0.1                  | 1.20                            | 0.49               | 0.85         | 1.80                            | 0.96               | 0.74         |
| 9                 | 0.1                  | 1.20                            | 0.49               | 0.66         | 1.40                            | 0.86               | 0.70         |
| 0.8               | 0.2                  | 3.10                            | 1.16               | 0.61         | 2.70                            | 0.78               | 0.67         |
| 2.8               | 0.2                  | 2.60                            | 0.88               | 0.80         | 2.55                            | 0.85               | 0.65         |
| 6                 | 0.2                  | 2.40                            | 0.76               | 0.80         | 2.25                            | 1.03               | 0.58         |
| 9                 | 0.2                  | 2.75                            | 1.12               | 0.66         | 2.00                            | 1.02               | 0.65         |
| 0.8               | 0.4                  | 2.60                            | 1.23               | 0.63         | 3.20                            | 0.84               | 0.76         |
| 2.8               | 0.4                  | 3.00                            | 1.55               | 0.60         | 2.90                            | 1.22               | 0.64         |
| 6                 | 0.4                  | 3.00                            | 1.34               | 0.59         | 3.65                            | 1.96               | 0.58         |
| 9                 | 0.4                  | 2.45                            | 1.07               | 0.61         | 2.90                            | 1.58               | 0.73         |
| 0.8               | 0.6                  | 2.00                            | 1.23               | 0.52         | 2.70                            | 1.09               | 0.76         |
| 2.8               | 0.6                  | 2.50                            | 1.17               | 0.49         | 3.70                            | 1.33               | 0.66         |
| 6                 | 0.6                  | 2.45                            | 1.13               | 0.59         | 4.50                            | 1.77               | 0.65         |
| 9                 | 0.6                  | 2.55                            | 1.18               | 0.59         | 2.70                            | 1.44               | 0.66         |

**Tab.2:** Parametri di *Training* e *Validation* di ANN-1 e ANN-2

| Parameters                                   | ANN-1 | ANN-2 |
|--|-------|-------|
| Number of input neurons                      | 3     | 3     |
| Number of neurons in the first hidden layer  | 32    | 18    |
| Number of neurons in the second hidden layer | 82    | 2     |
| Number of neurons in the third hidden layer  | 102   | 45    |
| Number of neurons in the fourth hidden layer | 22    | 15    |
| Number of output neurons                     | 2     | 1     |
| Learning rate                                | 0.02  | 0.01  |
| Ratio to increase learning rate              | 2     | 1.2   |
| Ratio to decrease learning rate              | 0.9   | 0.9   |
| Maximum validation failures                  | 5     | 5     |
| Maximum number of epochs to train            | 8000  | 8000  |

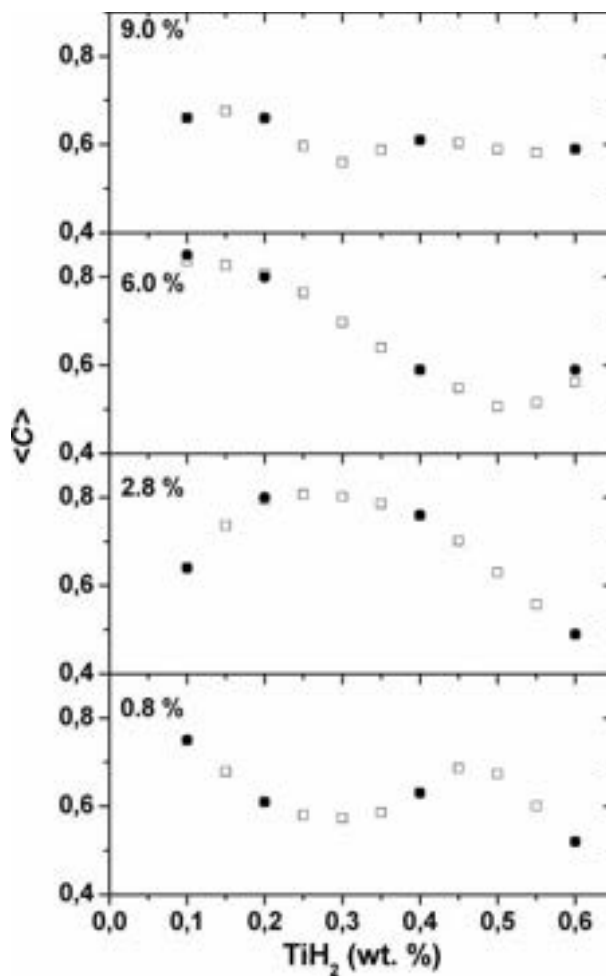
I risultati di ANN-1 per campioni con particelle di SiC di 37 μm (simboli vuoti) sono riportati in Fig. 4 insieme ai risultati sperimentali (simboli pieni). Il confronto mostra che i dati calcolati sono in pieno accordo con i dati sperimentali. Analogo risultato è stato ottenuto dalle simulazioni con particelle di SiC di 60 μm.



**Fig. 4-** Andamento di  $\langle D_{eq} \rangle$  e  $D_{max}$  nei confronti del contenuto di  $TiH_2$  e SiC forniti da ANN-1. I dati forniti dalla rete neurale (simboli aperti) dati sperimentali (simboli pieni).

La Fig. 5 mostra la predizione di ANN-2 per  $\langle C \rangle$ ; anche in questo caso i valori calcolati sono in pieno accordo con quelli sperimentali.

Per entrambe le reti neurali (ANN-1 e ANN-2), la differenza tra le predizioni e i dati sperimentali è confrontabile con lo scattering dei dati sperimentali. Quindi, è stata ottenuta una buona implementazione delle reti neurali che possono diventare potenti strumenti nell'ottimizzazione dei parametri delle schiume metalliche.



**Fig. 5-** Andamento di  $\langle C \rangle$  nei confronti del contenuto di TiH<sub>2</sub> e SiC forniti da ANN-2. Dati forniti dalla rete neurale (simboli aperti) dati sperimentali (simboli pieni).

I dati sperimentali sono stati utilizzati come *training* per due multi-layer ANN. In conclusione si può dire che i modelli si sono rivelati degli utili strumenti per la predizione delle caratteristiche morfologiche per ogni composizione utilizzata nel processo PM.

Questo lavoro ha permesso di trovare densità e caratteristiche morfologiche delle schiume di Al come funzione della composizione delle polveri. Siccome applicazioni differenti delle schiume di Al richiedono caratteristiche specifiche, la composizione della miscela di polveri può essere scelta per ottenere le caratteristiche desiderate.



### **1.3 - Misura del modulo elastico dinamico e del fattore di damping**

Per certe classi di materiali le caratteristiche di damping sono tecnologicamente molto importanti, per esempio se viene richiesta una grande capacità di smorzare rumore e vibrazioni. Questo è proprio il caso delle schiume metalliche.

Molte delle potenziali applicazioni delle schiume metalliche sono legate alle loro proprietà di assorbire energia, smorzare il suono e attutire le vibrazioni meccaniche. In Giappone sono già state impiegate come materiale per barriere antirumore lungo la linea dello Shinkansen, il treno proiettile.

La Spettroscopia Meccanica (S.M.) è una tecnica sperimentale che può dare a riguardo preziose informazioni. Le prove di S.M. forniscono il *modulo elastico dinamico* ed il *fattore di smorzamento*  $Q^{-1}$  (damping) in un esteso intervallo di temperatura. La sperimentazione può inoltre essere condotta ad ampiezza di vibrazione costante o variabile. Una questione tuttora aperta è la dipendenza del damping dall'ampiezza di vibrazione delle schiume e, più in generale, dei materiali porosi [5].

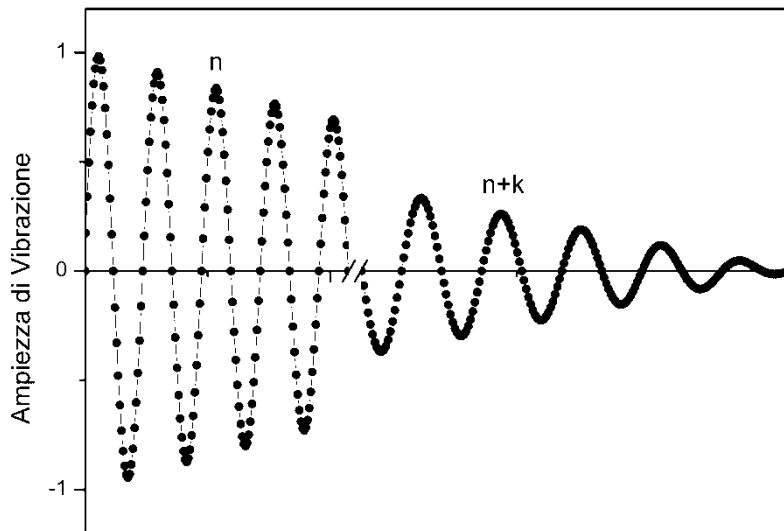
Di seguito viene sommariamente descritta la tecnica S.M. e l'apparato sperimentale impiegato nelle misure. Maggiori dettagli si possono trovare nella monografia [6].

Si riportano poi i risultati di test condotti da temperatura ambiente fino a 500 °C su alcune schiume prodotte durante il primo anno di attività del progetto. Per confronto prove nelle stesse condizioni sono state eseguite su alluminio policristallino massivo.

### 1.4 - La tecnica S.M. e l'apparato sperimentale

#### Fattore di smorzamento $Q^{-1}$

L'entità della frizione interna, cioè dell'energia dissipata dal materiale per sole cause interne al materiale stesso, è indicata dal fattore di smorzamento  $Q^{-1}$ . Se un provino è posto in vibrazione da uno sforzo esterno sinusoidale e poi si toglie questa sollecitazione, allora l'oscillazione si smorza progressivamente come mostrato schematicamente in fig. 6. Tanto maggiori saranno le cause di attrito interno quanto più rapidamente l'oscillazione diminuirà la sua ampiezza.



**Fig. 6-** Smorzamento dell'oscillazione del provino dovuta a fenomeni di attrito interno.

Il fattore di smorzamento  $Q^{-1}$  si determina misurando il decremento logaritmico  $d$ , che è definito dall'espressione:

$$d = \frac{1}{k} \ln \frac{A_n}{A_{n+k}}$$

dove  $A_n$  e  $A_{n+k}$  sono rispettivamente l'ampiezza della  $n$ -sima e  $n+k$ -sima oscillazione. Il fattore di smorzamento  $Q^{-1}$  vale

$$Q^{-1} = \frac{d}{\pi}$$

#### Modulo elastico dinamico

Il modulo di Young  $E$ , oltre che con la prova di trazione, può essere misurato con le tecniche dinamiche usate nella SM. Queste sono fondamentalmente di due tipi.

1- Si utilizzano ultrasuoni e si misura la loro velocità  $v$  di propagazione nel materiale. Siccome

$$v = \sqrt{E/\rho}$$

conoscendo la densità  $\rho$  si può determinare  $E$ .

2- Si misura la frequenza di risonanza  $f$  di provini di geometria nota. Essendo  $f$  funzione del modulo elastico  $E$  e della densità  $\rho$ , misurando la frequenza di risonanza si può determinare il modulo.

Gli esperimenti di SM possono essere realizzati mediante diversi dispositivi sperimentali con frequenze di lavoro che variano in un ampio intervallo, dalla frazione di Hz fino a svariati GHz.

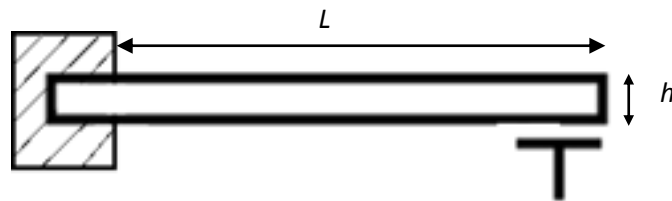


Di fatto si possono dividere in quattro categorie che comportano frequenze via via crescenti:

- 1- prove quasi statiche,
- 2- prove in condizioni di sub-risonanza
- 3- prove in risonanza
- 4- prove con propagazione delle onde.

I nostri test sono stati condotti in condizioni di risonanza impiegando la tecnica della lamina vibrante. La lamina è montata a sbalzo (cantilever) nell'apparato di misura.

Il provino consiste di una barretta a sezione rettangolare che viene bloccata ad una estremità e viene sollecitata all'altra estremità da un elettrodo. Lo schema è mostrato in fig. 7.



**Fig. 7-** Configurazione della barretta a sbalzo.

La frequenza di risonanza  $f$  è legata al modulo elastico  $E$  dalla relazione:

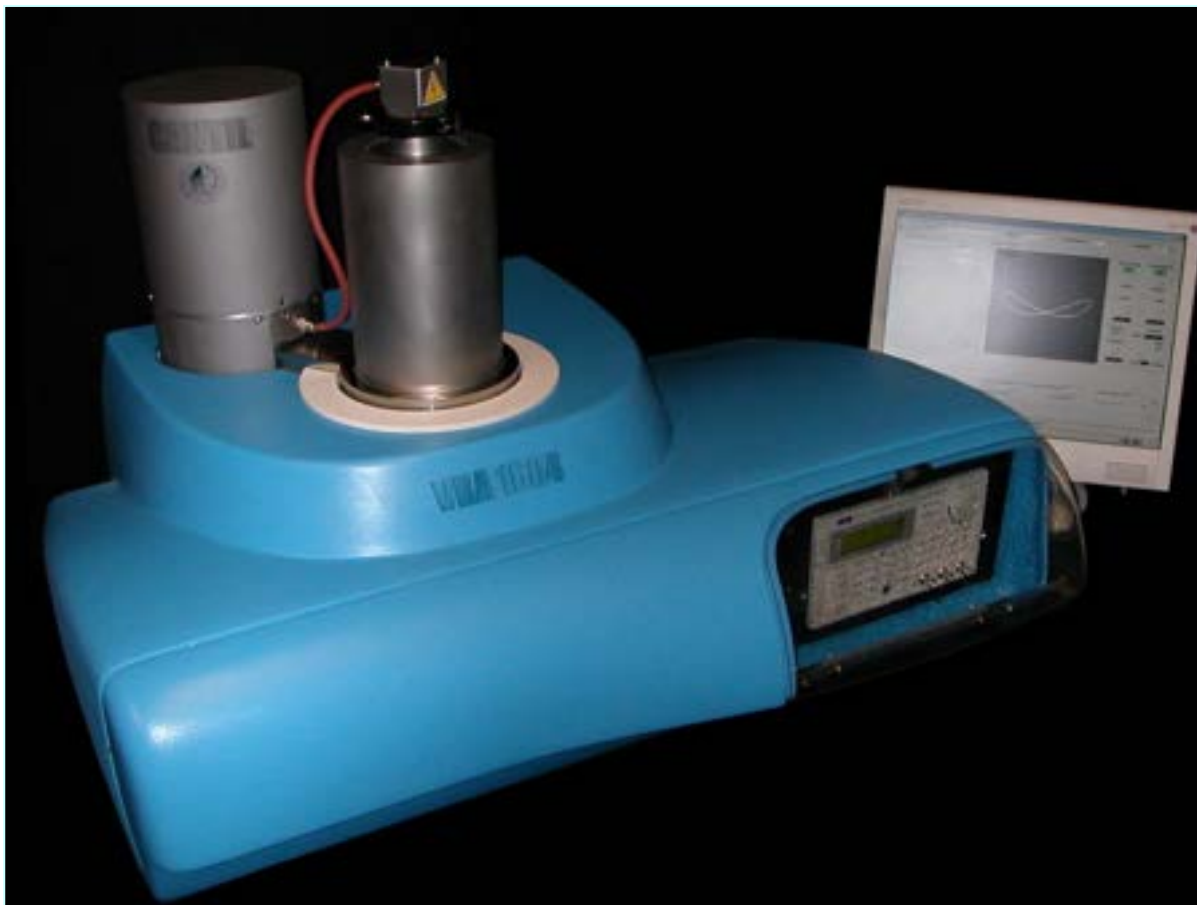
$$f = \frac{m^2 h}{2\pi\sqrt{12}L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

dove  $L$  e  $h$  sono rispettivamente la lunghezza e lo spessore della lamina,  $\rho$  la densità del materiale,  $m$  una costante legata al modo di vibrazione. I valori di  $m$  e le posizioni delle linee nodali sono riportate in tabella 3.

**Tab. 3-** Modi di vibrazione, valori della costante  $m$  e posizione delle linee nodali (date come frazione della lunghezza  $L$  misurate da un estremo).

| Modi             | 1     | 2     | 3              | 4                        |
|------------------|-------|-------|----------------|--------------------------|
|                  | $m_1$ | $m_2$ | $m_3$          | $m_4$                    |
|                  | 1.875 | 4.694 | 7.854          | 10.995                   |
| Posizioni nodali |       | 0.217 | 0.132<br>0.496 | 0.0944<br>0.356<br>0.642 |

Lo strumento utilizzato per le prove è il VRA-1604 (Fig. 8), un apparato completamente automatizzato che consente di effettuare misure, in regime dinamico, dei moduli di elasticità e del  $Q^{-1}$  dei materiali. L'acquisizione dei dati è controllata da PC ed il software di gestione e controllo consente di effettuare le misure automaticamente effettuando un'analisi in tempo reale dei dati.



**Fig. 8-** Analizzatore meccanico a lamina vibrante VRA-1604.

La misura del  $Q^{-1}$  e del modulo elastico dinamico sono determinati con estrema precisione. Le prestazioni sono significativamente migliori rispetto a quelle degli strumenti che lavorano in condizioni di vibrazioni libere forzate (DMA e pendoli torsionali) e può essere impiegato anche con materiali che possiedono valori di  $Q^{-1}$  molto bassi, compresi nell'intervallo  $10^{-4} - 10^{-6}$ .

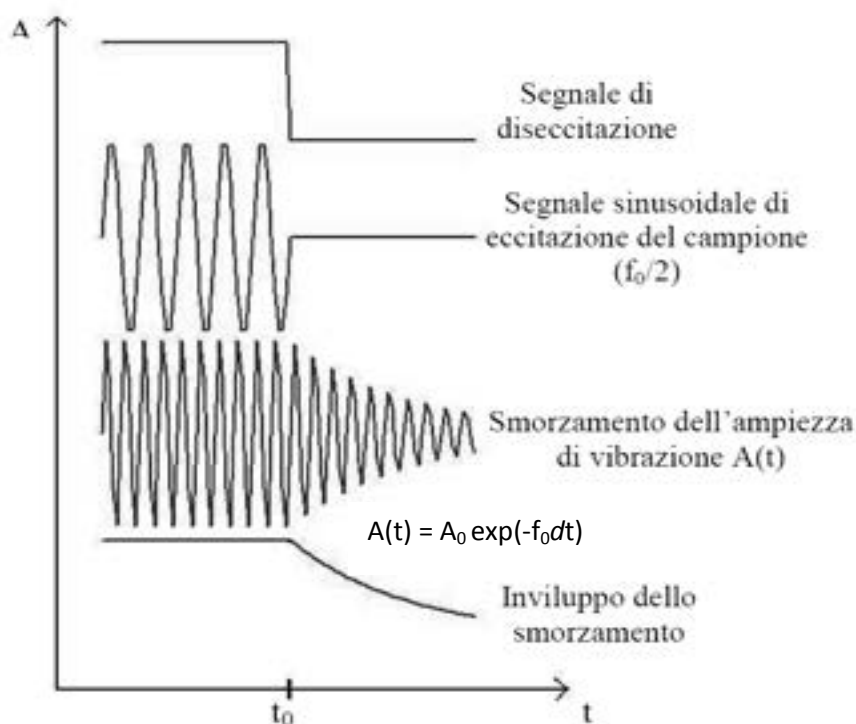
L'analizzatore VRA opera in condizioni di risonanza e l'attrito interno è fornito semplicemente da una misura del decremento logaritmico  $d$  delle oscillazioni libere in risonanza smorzate, come mostrato in fig. 6. Lo strumento è dotato di un sistema per inseguire automaticamente la frequenza di risonanza allorché questa varia al variare durante l'esperienza della temperatura. Si possono utilizzare i modi naturali flessurali di vibrazione di campioni sagomati in forma di laminette. Il campione viene fissato rigidamente ad un'estremità mediante un morsetto che può essere collegato al portale della camera di misura (fig. 4.3), l'estremità libera del campione è affacciata a un elettrodo piano che consente di eccitare i modi di oscillazione flessurale e allo stesso tempo rivelare l'ampiezza di oscillazione. Il portacampioni nella geometria a trave incastrata montato nel portale della camera di misura è mostrato in fig. 9



**Fig. 9-** Particolare del portacampioni. Il provino di alluminio è montato nella geometria a trave incastrata nel portale della camera di misura dell'analizzatore VRA-1604.

Per eccitare e rivelare le vibrazioni del campione viene impiegato un solo elettrodo; l'estremità libera del campione è affacciata all'estremità libera dell'elettrodo. Il campione è posto in vibrazione applicando un potenziale periodico  $V(t)$  fra campione elettrodo. La forza sul campione è proporzionale a  $V^2$ .

Per la rivelazione si sfrutta il metodo capacitivo poiché la vibrazione del campione determina una variazione della capacità elettrodo-campione  $\Delta C$  che a sua volta modula in frequenza un circuito oscillante a radiofrequenza. Il circuito nel suo complesso è simile a quello di un radio-ricevitore in cui il segnale d'ingresso è generato dal campione vibrante. La modulazione rivelata da un circuito accordato viene trasformata in un segnale modulato in ampiezza  $A(t)$ . Una schematizzazione è mostrata in fig. 10.



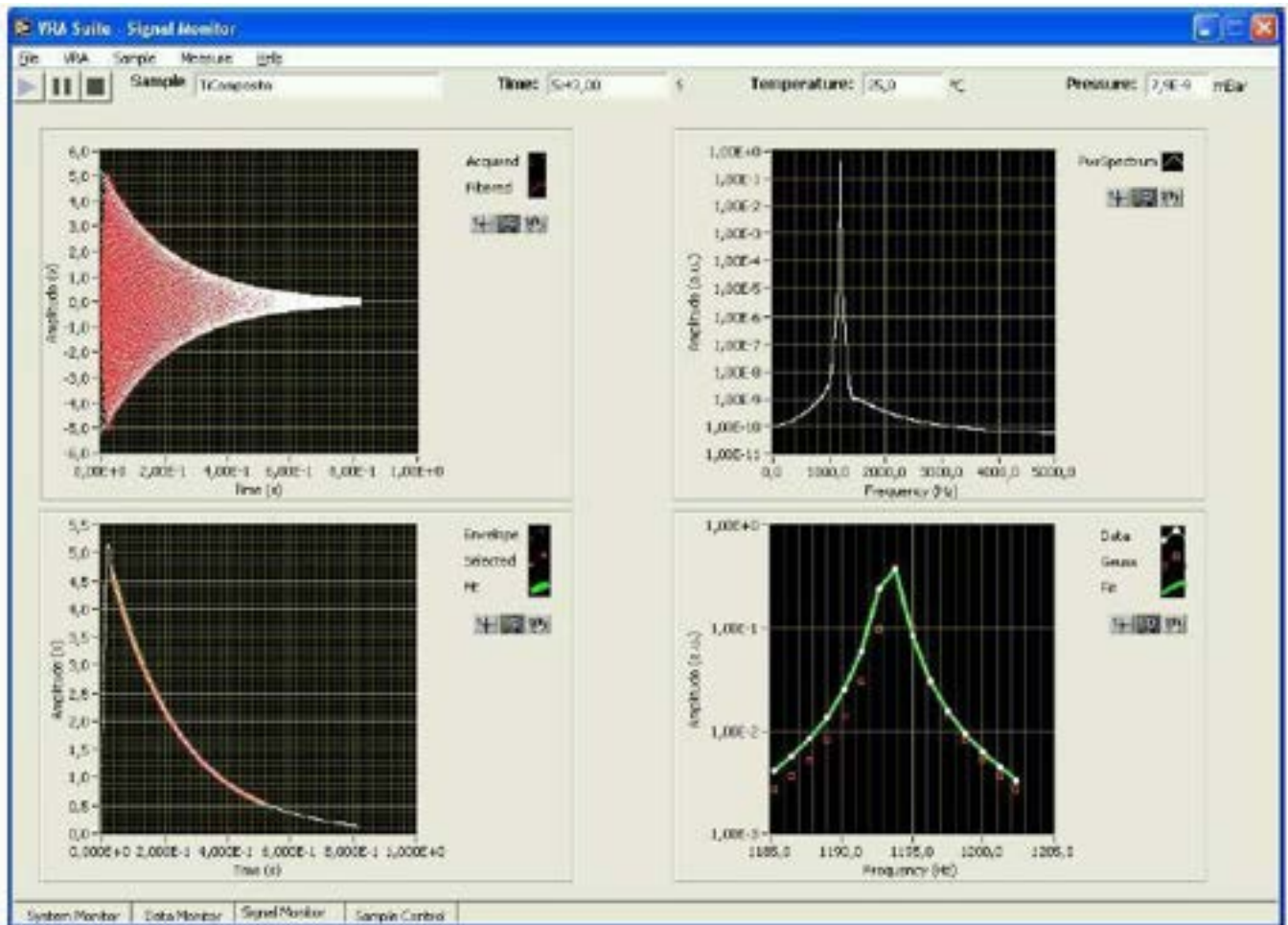
**Fig. 10-** Variazione dell'ampiezza di vibrazione del campione in funzione del tempo quando all'istante  $t_0$  viene azzerata la tensione di eccitazione del modo risonante di frequenza  $f_0$ .

Lo strumento misura le variazioni di capacità elettrodo-campione e determina così la deformazione massima del campione in ogni momento della misura e fornisce automaticamente questo dato all'operatore. Le ampiezze di deformazione sui provini coprono un intervallo da  $10^{-7}$  a  $5 \times 10^{-4}$  e possono essere variate di fatto con continuità. Nei nostri esperimenti l'ampiezza di vibrazione è stata mantenuta costante e si è variata solo la temperatura.

Il VRA lavora in alto vuoto per ottenere la massima sensibilità di misura ed evitare qualsiasi contaminazione del campione.

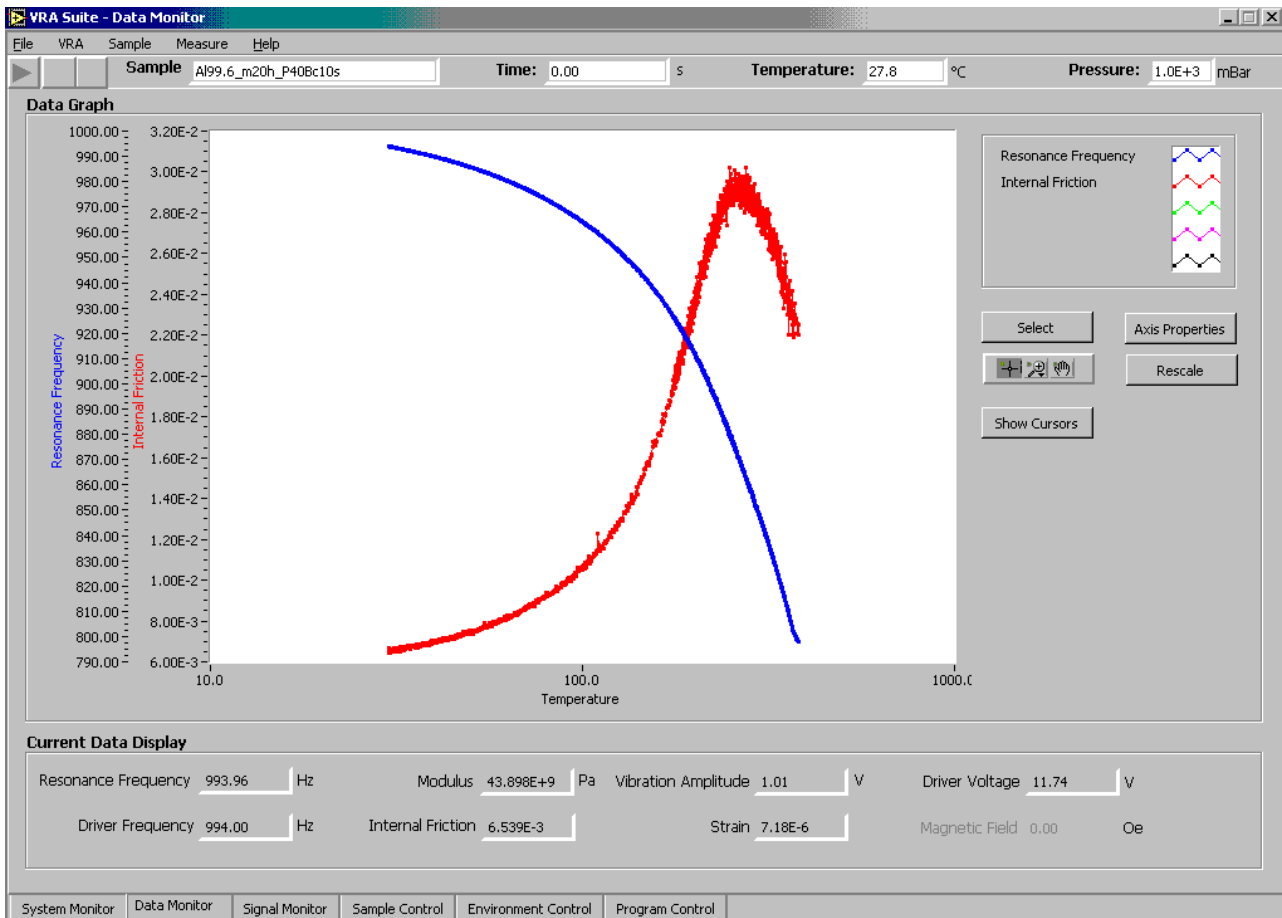
Il sistema di riscaldamento è costituito da una struttura cilindrica in quarzo che sostiene il filamento riscaldato per effetto Joule. La potenza dell'alimentatore in c.c è controllata dal software di gestione che permette di programmare sia rampe in temperatura a velocità di riscaldamento costante sia isoterme.

Tutte le operazioni sono completamente automatizzate; un programma controlla l'insieme di tutte le funzioni operative, l'acquisizione dei dati sperimentali e la loro elaborazione in tempo reale. Finestre grafiche consentono di seguire lo svolgimento delle misure (figg. 11 e 12).



**Fig. 11-** Finestre dei segnali monitorati in tempo reale. In alto a sinistra il segnale misurato del decadimento delle oscillazioni libere, in basso a sinistra il profilo del segnale con la porzione di curva selezionata per l'analisi (determinazione del decremento logaritmico  $d$  e  $Q^{-1}$ ). In alto e in basso a destra rispettivamente lo spettro di potenza in frequenza e i particolari del picco con il profilo, approssimazione e fit.

Una finestra in particolare mostra l'andamento di  $Q^{-1}$  e modulo (o frequenza di risonanza) in tempo reale durante una misura. Fig. 12 illustra i dati ricavati da un campione di Al mentre viene riscaldato a velocità costante. E' ben evidente lo sviluppo di un picco di frizione interna e in corrispondenza la variazione del modulo elastico dinamico.



**Fig. 12-** Finestra dei dati che mostra l'andamento di  $Q^{-1}$  e frequenza di risonanza in funzione della temperatura. Il campione è Al policristallino ed è ben evidente la formazione di un picco di rilassamento anelastico a cui corrisponde la tipica variazione del modulo dinamico.



### 1.5 – Risultati

Sono state eseguite delle misure di spettroscopia meccanica su alcuni campioni preparati durante l'attività del primo anno utilizzando il metodo delle polveri sviluppato al Fraunhofer Institut di Brema [7-8]. I campioni avevano una densità relativa  $\rho/\rho_0 = 0.2$ .

I valori di  $Q^{-1}$  e di modulo elastico dinamico  $E$  sono stati registrati ogni 10 s durante un riscaldamento dei campioni da temperatura ambiente fino a 500 °C con velocità di 1 °C al minuto.

Le prove sono state ripetute più volte variando l'ampiezza di deformazione, cioè applicando sollecitazioni crescenti ai provini che determinavano crescenti ampiezze di vibrazione.

Per confronto gli stessi test sono stati fatti anche su alluminio policristallino 4N in forma massiva.

Fig. 13 (a) mostra le curve di  $Q^{-1}$  della schiuma di alluminio (cerchi neri) e dell'alluminio massivo (cerchi grigi). Ciascuna curva è la sovrapposizione di un fondo con andamento esponenziale e di un picco dovuto ad un fenomeno di rilassamento che interessa i bordi di grano (picco di Ke). Il picco di rilassamento, che non è di interesse per lo studio attuale, è stato ampiamente studiato [9-10] e può essere descritto dall'equazione:

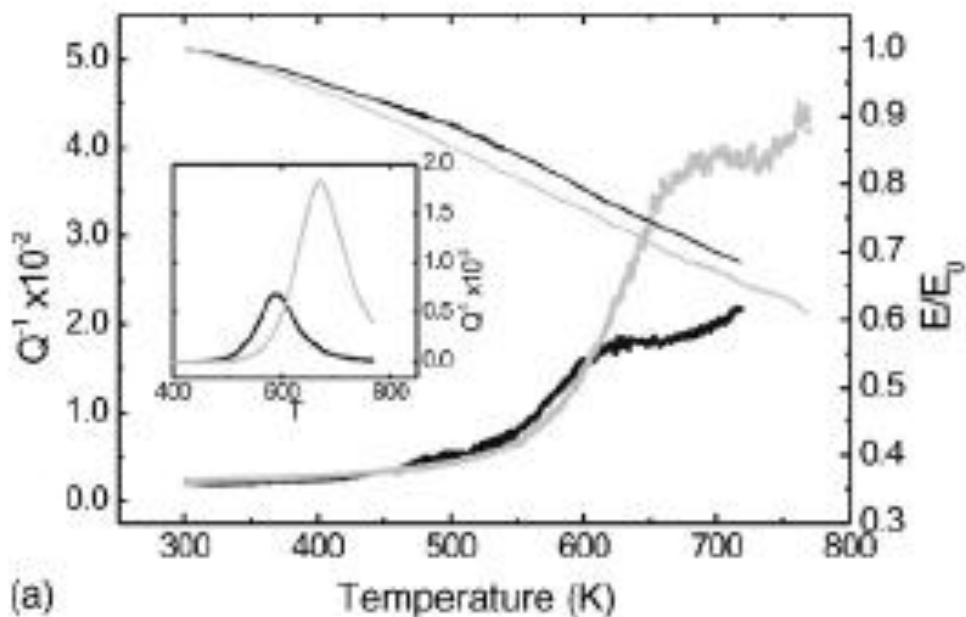
$$Q^{-1}(T) = \frac{\Delta}{2} \operatorname{sech} \frac{H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_p} \right)$$

dove  $\Delta/2$  è l'intensità massima del picco,  $T_p$  la temperatura centrale del picco e  $H$  la sua energia di attivazione. Conoscendo l'energia di attivazione dalla letteratura, questa equazione permette di separare i due contributi al damping (picco e fondo) che formano le curve di Fig. 13 (a). Dopo la separazione i picchi di schiuma e alluminio massivo sono mostrati nella cornice.

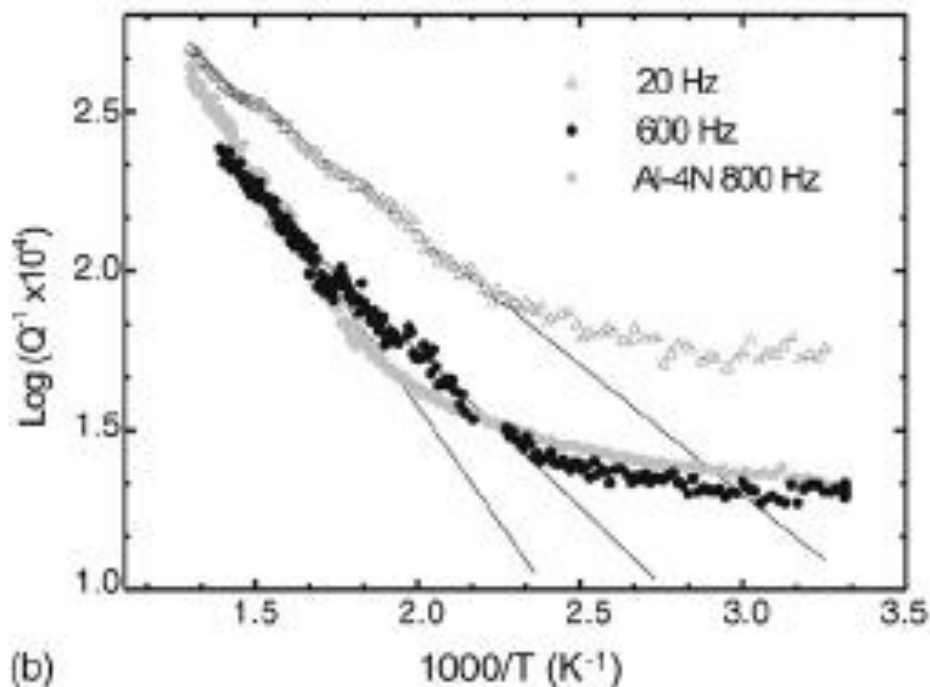
Lo studio attuale focalizza l'attenzione sul fondo. Come mostrato in Fig. 13 (a), la schiuma di alluminio misurata con una ampiezza di deformazione molto bassa,  $<10^{-5}$ , mostra un damping di fondo di  $1-2 \times 10^{-3}$  fino a circa 150 °C (423 K), valore che è addirittura un po' più basso di quello dell'alluminio policristallino in forma massiva.

Il fondo a bassa temperatura della schiuma cresce fino a  $4-5 \times 10^{-3}$ , diventando confrontabile con quello dell'alluminio massivo quando l'ampiezza di deformazione arriva a  $10^{-4}$ .

Questo risultato è in accordo con quanto visto da Liu et al.[11]. Questi ricercatori hanno messo in evidenza che il damping delle schiume di alluminio aumenta aumentando la porosità e diminuendo la dimensione dei pori, decresce con la frequenza della sollecitazione ed aumenta con l'ampiezza di deformazione. Per meglio definire la dipendenza del damping dall'ampiezza si è osservato che le oscillazioni presentano caratteristiche di non-linearità, che le curve di risonanza sono asimmetriche e le frequenze di risonanza sono proporzionali al quadrato dell'ampiezza.



(a)



(b)

**Fig. 13-** (a)  $Q^{-1}$  e modulo elastico dinamico  $E$  per la schiuma di alluminio (cerchi neri) e per alluminio policristallino 4N in forma massiva (cerchi grigi); nella cornice riportata all'interno della figura sono mostrati i picchi di  $Q^{-1}$  dopo la sottrazione del fondo.

(b) Fitting del damping di fondo alle alte temperature per la schiuma misurato con diverse frequenze di sollecitazione (triangoli vuoti e cerchi neri) e per l'alluminio massivo (cerchi grigi).

Il damping di fondo alle alte temperature, Fig. 13 (b), mostra un semplice andamento esponenziale,  $Q^{-1} = A \exp(-B/kT)$ , nell'intervallo di temperatura ( $T$ ) 450–700 K. Il fitting dei dati sperimentali fornisce un'energia di attivazione media apparente,  $B = 0.20$  eV, mentre per l'alluminio massivo si ottiene un valore leggermente più alto,  $B = 0.30$  eV.



In Fig. 13 (a) sono riportati anche i valori del modulo elastico dinamico  $E$  normalizzati al valore iniziale  $E_0$ . Si può osservare che le variazioni relative al crescere della temperatura sono un po' inferiori nel caso della schiuma rispetto al materiale in forma bulk. Questo aspetto merita di essere oggetto di un futuro studio sistematico perché potrebbe fornire indicazioni circa l'evoluzione delle strutture difettive, in particolare di dislocazioni, nelle condizioni di sconfinamento come quelle delle pareti sottili dei pori.

## CAPITOLO2

### Studio dei meccanismi di formazione del bonding metallurgico pelle-core



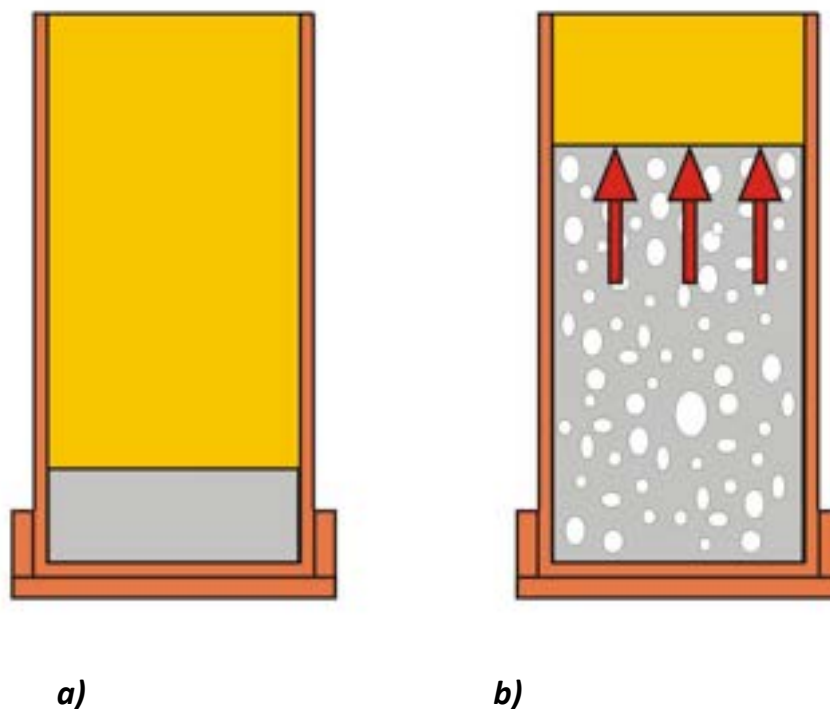
## 2.1 - Pelli di metalli diversi da Al su schiume di Al

Sono stati fatti esperimenti per realizzare giunzioni metallurgiche tra schiume di alluminio con pelli sia di alluminio che di metalli differenti (rame e ferro). I due casi presentano aspetti e difficoltà pratiche molto diversi.

La saldatura con metalli (sono stati studiati rame e acciaio) aventi punto di fusione maggiore di quello dell'alluminio è stata realizzata con successo facendo formare la schiuma a contatto del metallo della pelle. La superficie del metallo deve essere preventivamente pulita meccanicamente con carte abrasive per rimuovere la strato naturale di ossido, quindi deve essere trattata con un disossidante per evitare che la saldatura sia compromessa dalla formazione di ossido durante l'esposizione in temperatura.

Nello specifico, il precursore della schiuma viene sistemato in un tubo col fondo chiuso, fatto del metallo che costituirà la pelle. Poi si pone tutto nel forno riscaldando alla temperatura prevista per la schiumatura dell'alluminio, cioè a 700 °C. In temperatura la schiuma cresce assumendo la forma del tubo e realizzando, una volta terminata la crescita, la saldatura col metallo del tubo nei punti di contatto.

Di seguito vengono mostrate immagini di microscopia elettronica in scansione (SEM), spettri e mappe EDS delle zone di giunzione Cu-schiuma di Al e acciaio-schiuma di Al. Queste analisi mostrano la buona qualità delle saldature con interdiffusione dei metalli.



**Fig. 14-** Rappresentazione schematica del processo per realizzare la saldatura metallurgica tra la schiuma di alluminio e la pelle di un metallo differente. a) Il precursore della schiuma è posto in un tubo chiuso sul fondo, fatto del metallo che costituisce la pelle. b) In temperatura la schiuma cresce assumendo la forma del tubo e realizzando, una volta terminata la crescita, la saldatura col metallo del tubo nei punti di contatto.

## 2.2 - Pelli di Cu su schiume di Al



Fig. 15- Sezione trasversale di un campione di schiuma di Al in una pelle di Cu

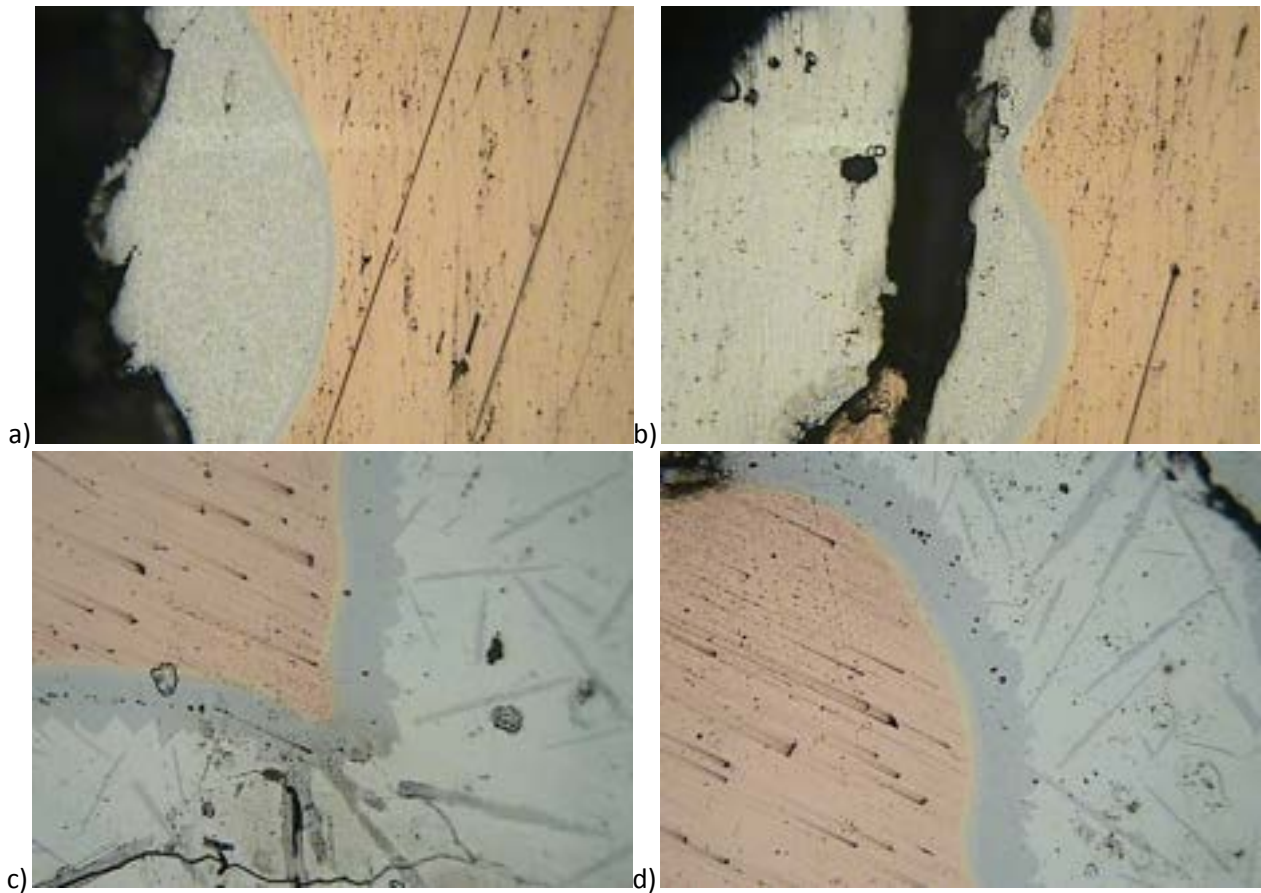
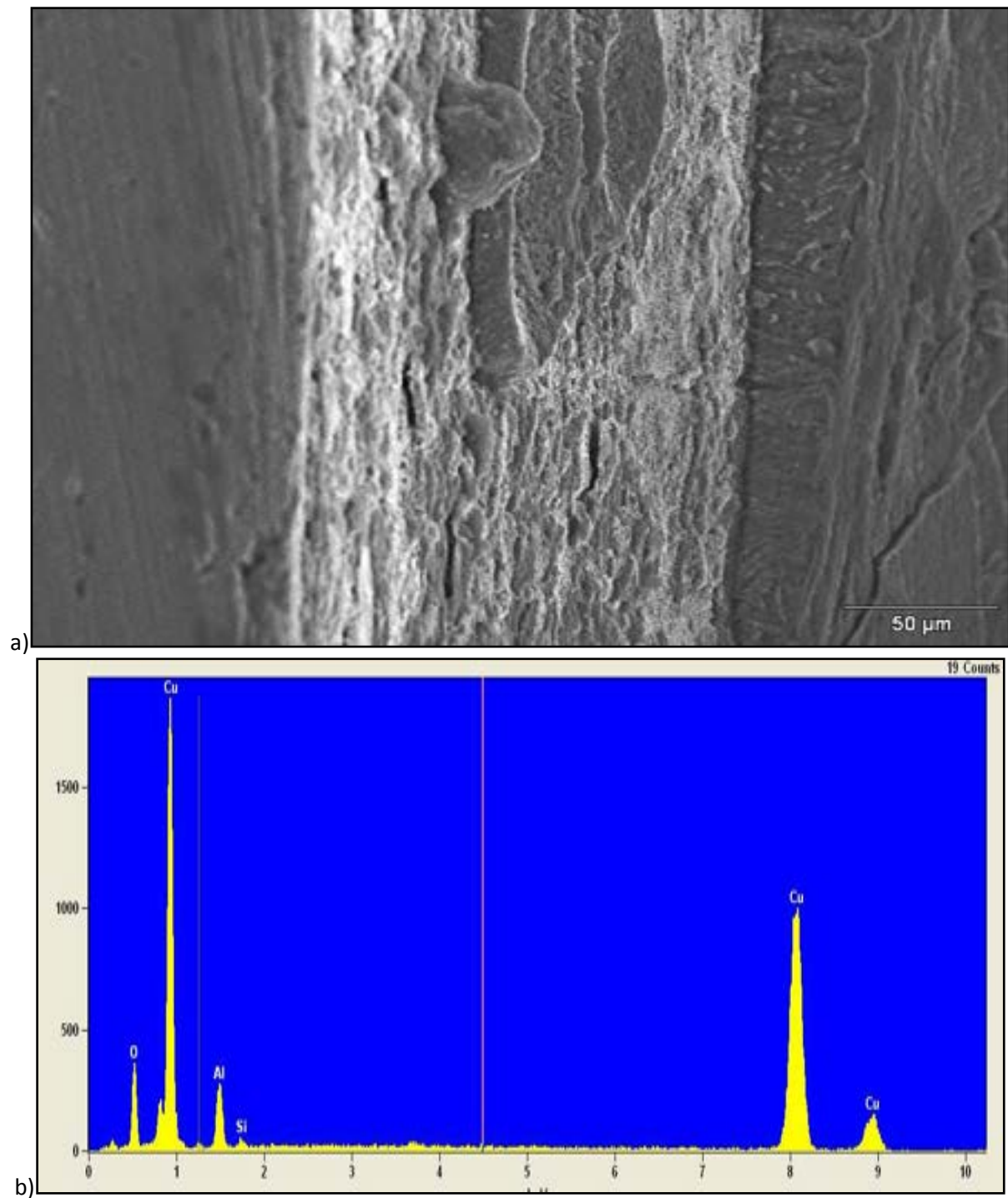
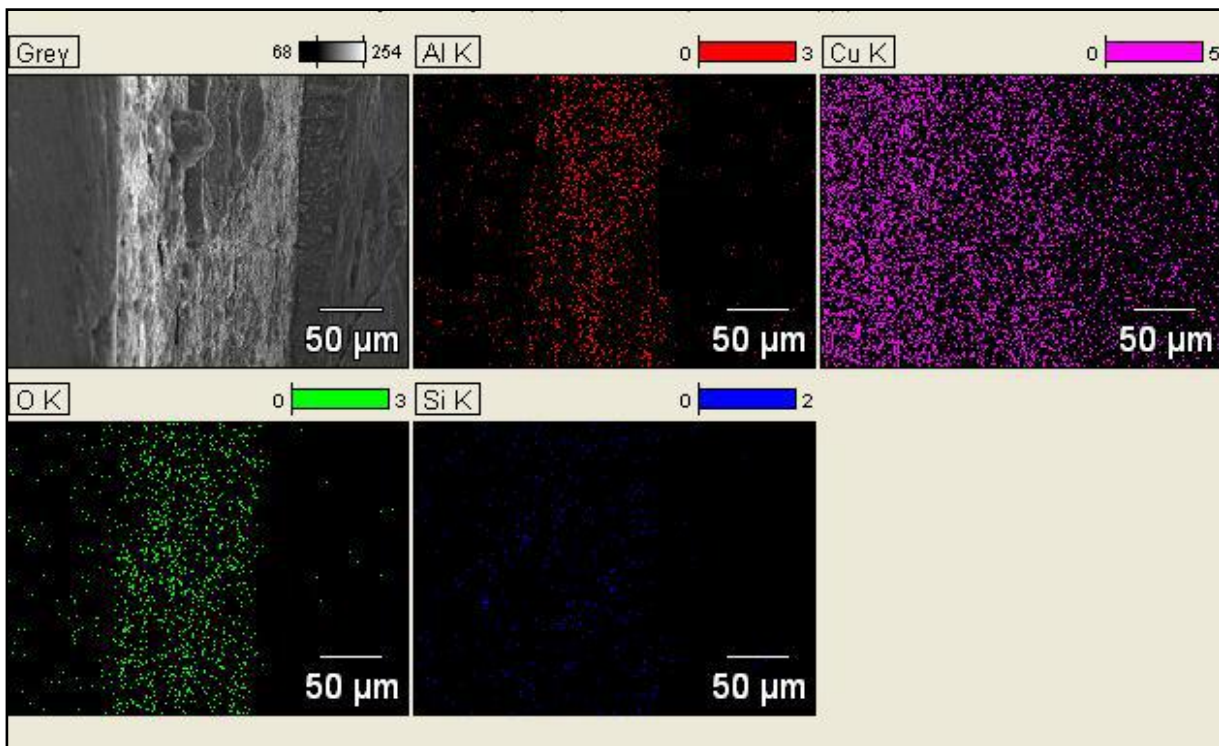


Fig. 16- Microscopia ottica delle zone dove è avvenuta la saldatura tra schiuma di Al e pelle di Cu.



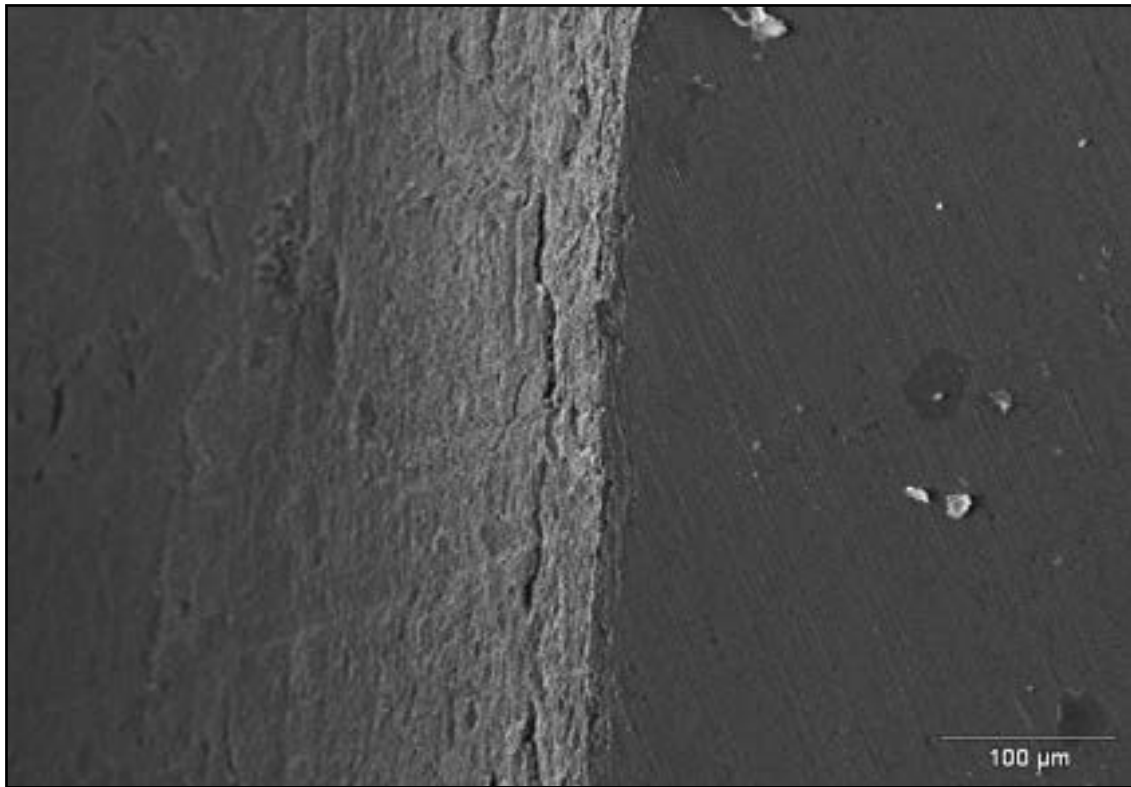
**Fig. 17-** a) Immagine SEM della zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu. b) Spettro EDS in cui si distinguono i picchi del Cu, Al, O, Si.



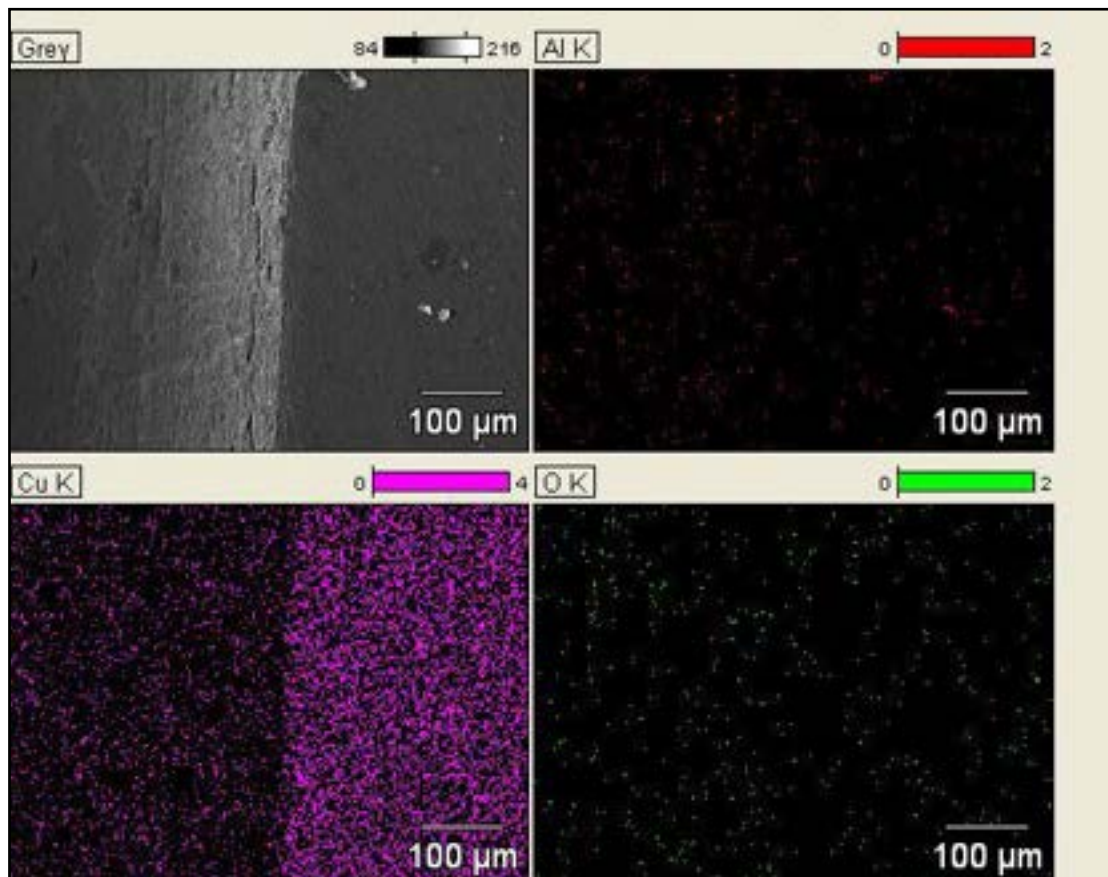
**Fig. 18-** Distribuzione degli elementi nella zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.

Nello spettro EDS della zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu ( Figura 17b) sono presenti i picchi relativi ai costituenti della schiuma: Al, Si; il picco del Cu di cui è costituita la pelle e la presenza di ossigeno, dovuta all'ossidazione dell'alluminio.

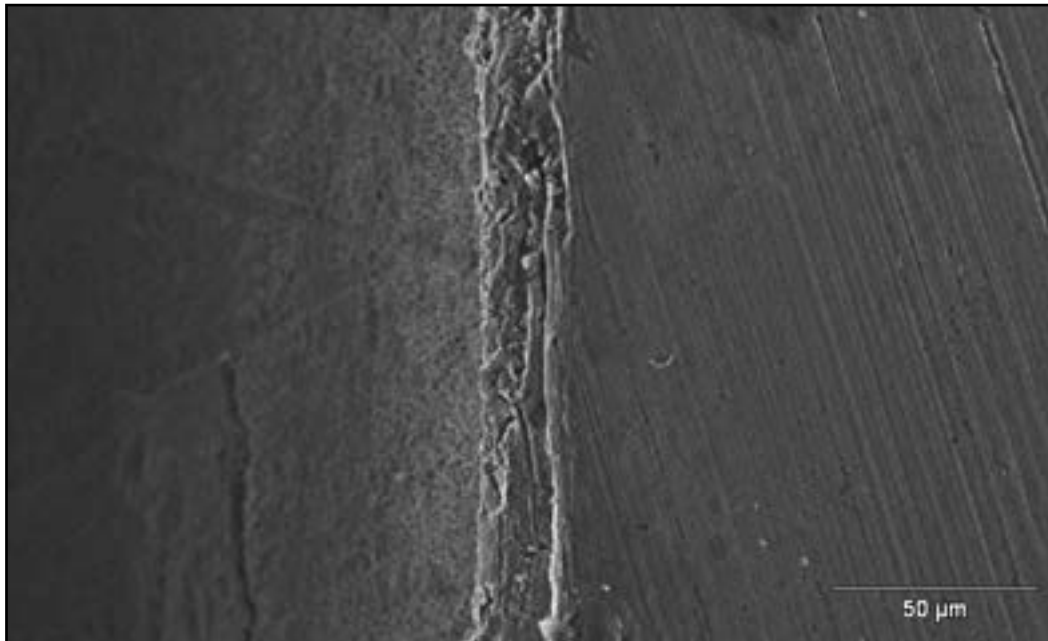
Sia le immagini al microscopio ottico che la distribuzione degli elementi nella zona di giunzione mostrano la formazione di una saldatura metallica tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



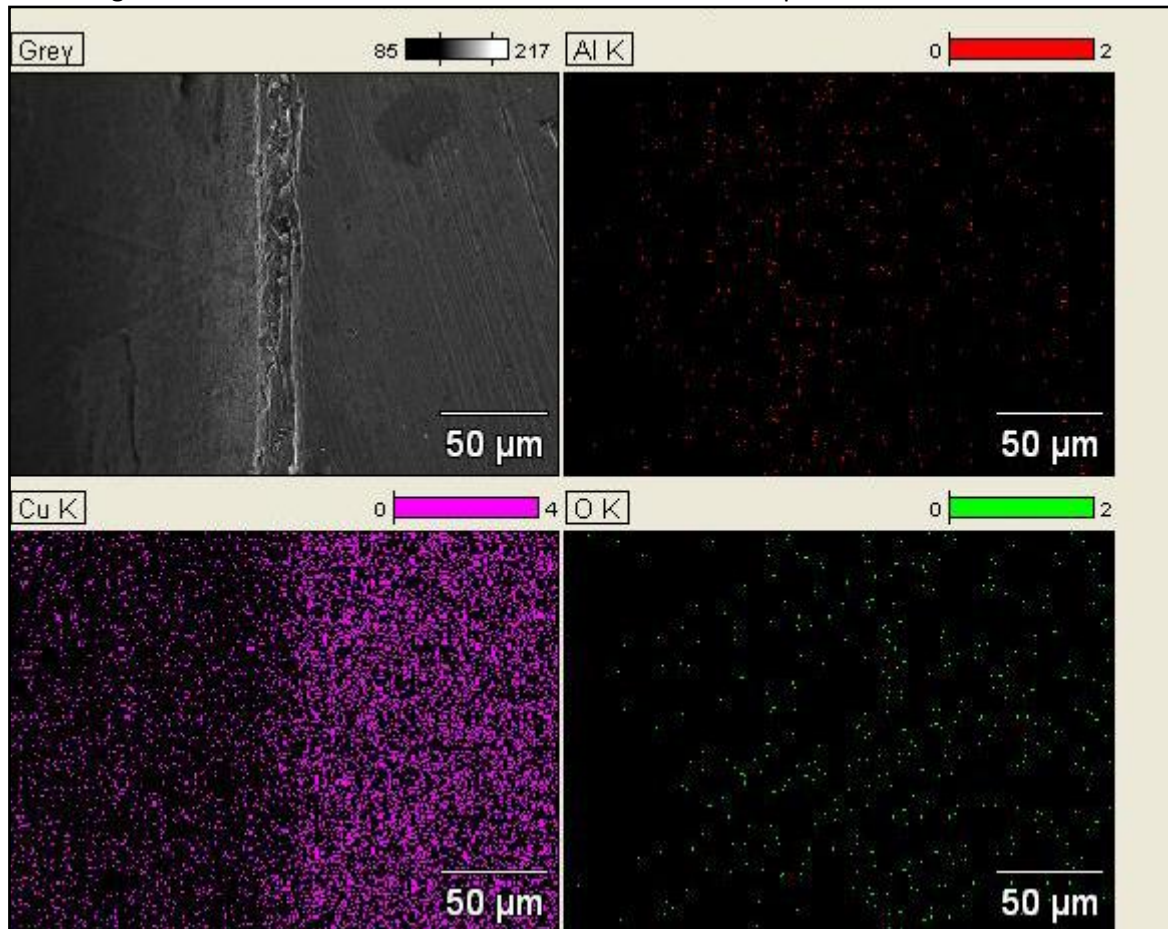
**Fig. 19-** Immagine SEM della zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



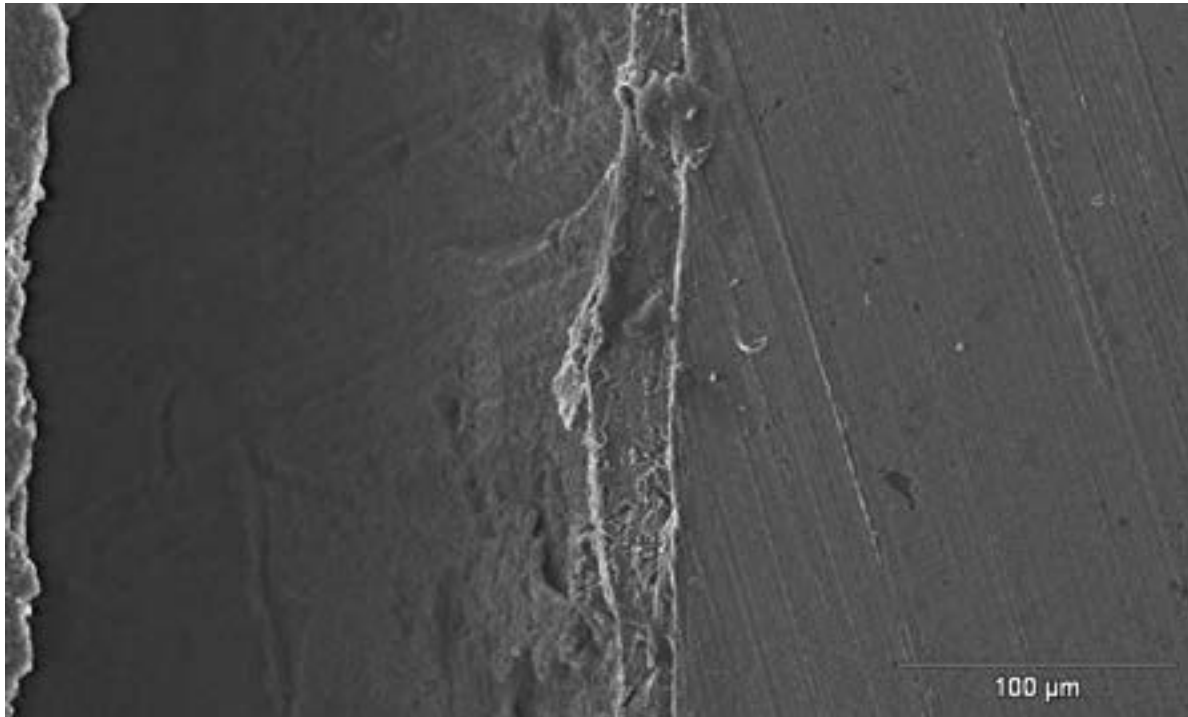
**Fig. 20-** Distribuzione degli elementi nella zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



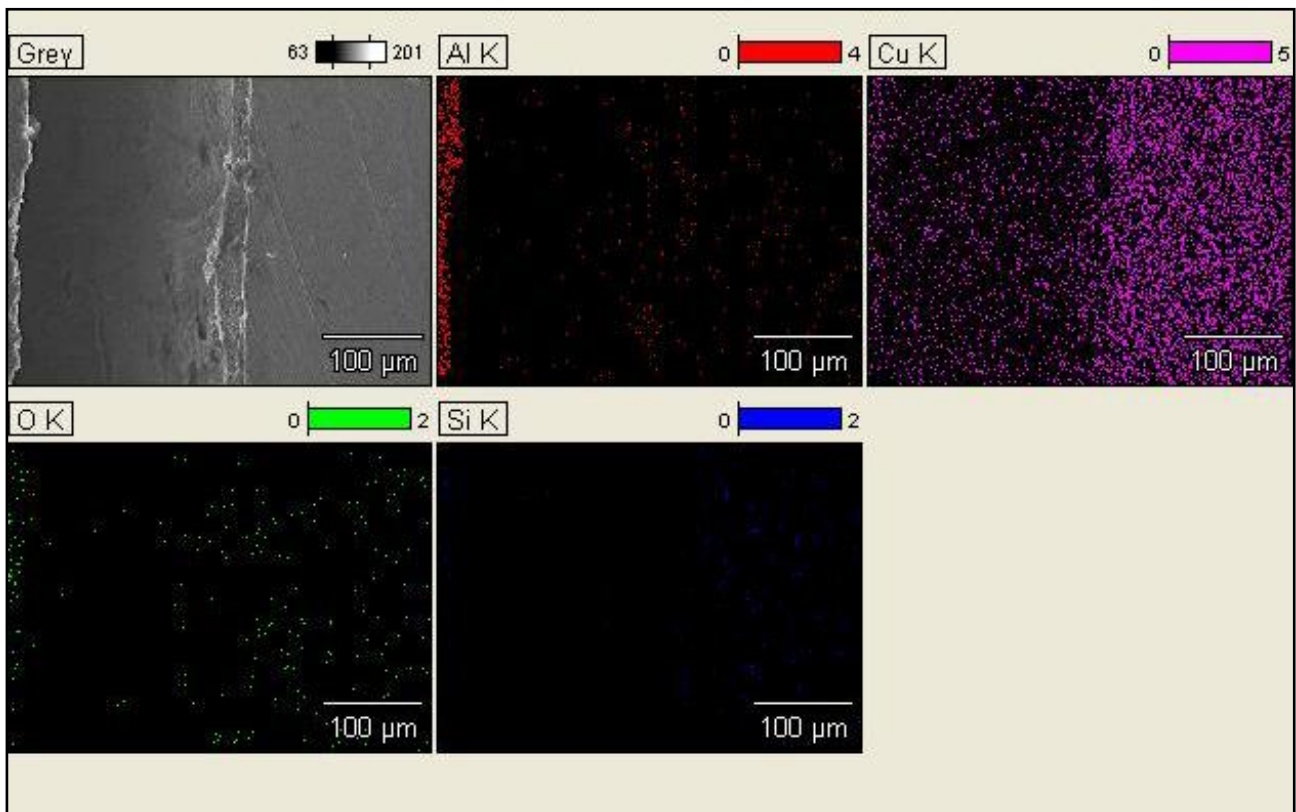
**Fig. 21-** Immagine SEM della zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



**Fig. 22-** Distribuzione degli elementi nella zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



**Fig. 23-** Immagine SEM della zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



**Fig. 24-** Distribuzione degli elementi nella zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.

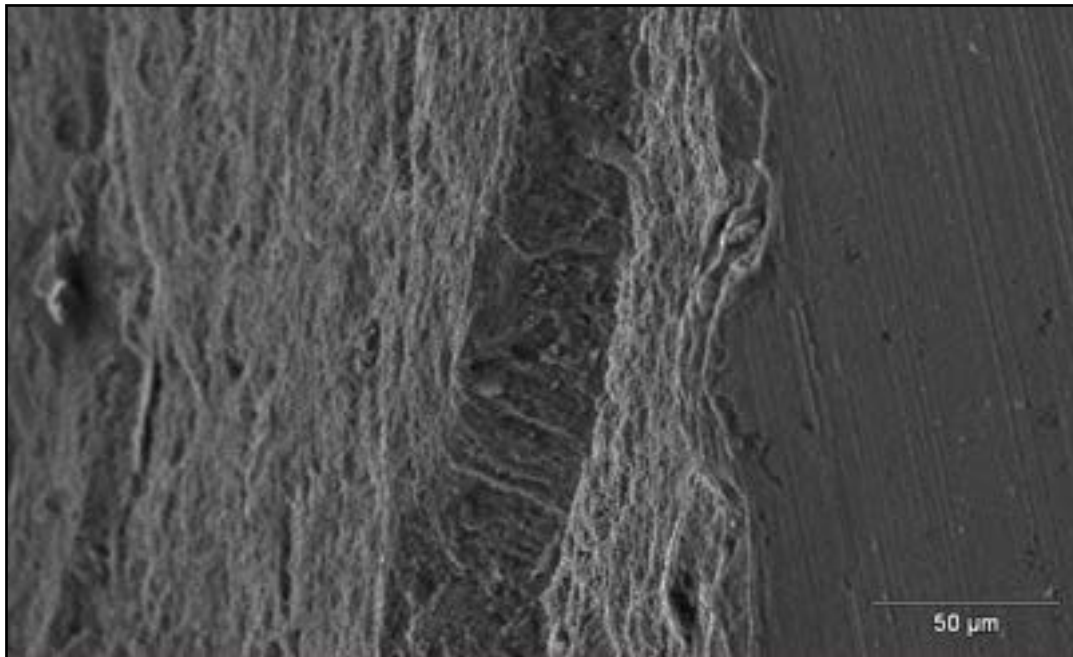


Fig. 25- Immagine SEM della zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.

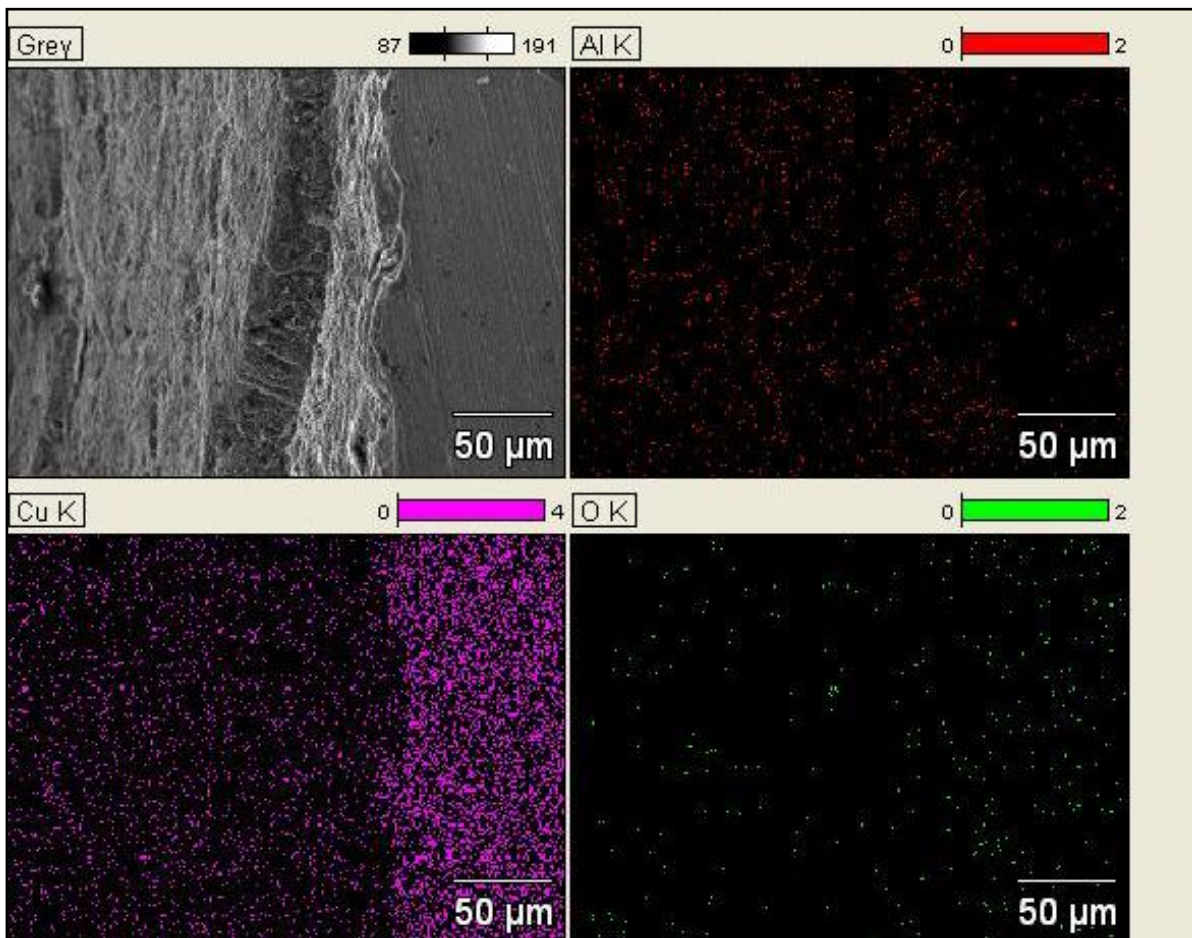
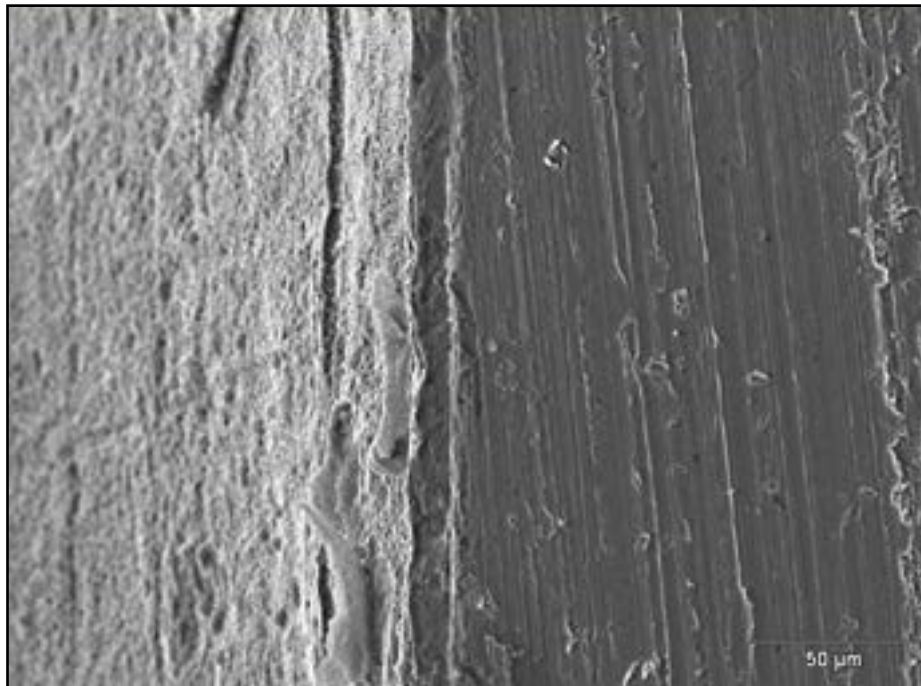
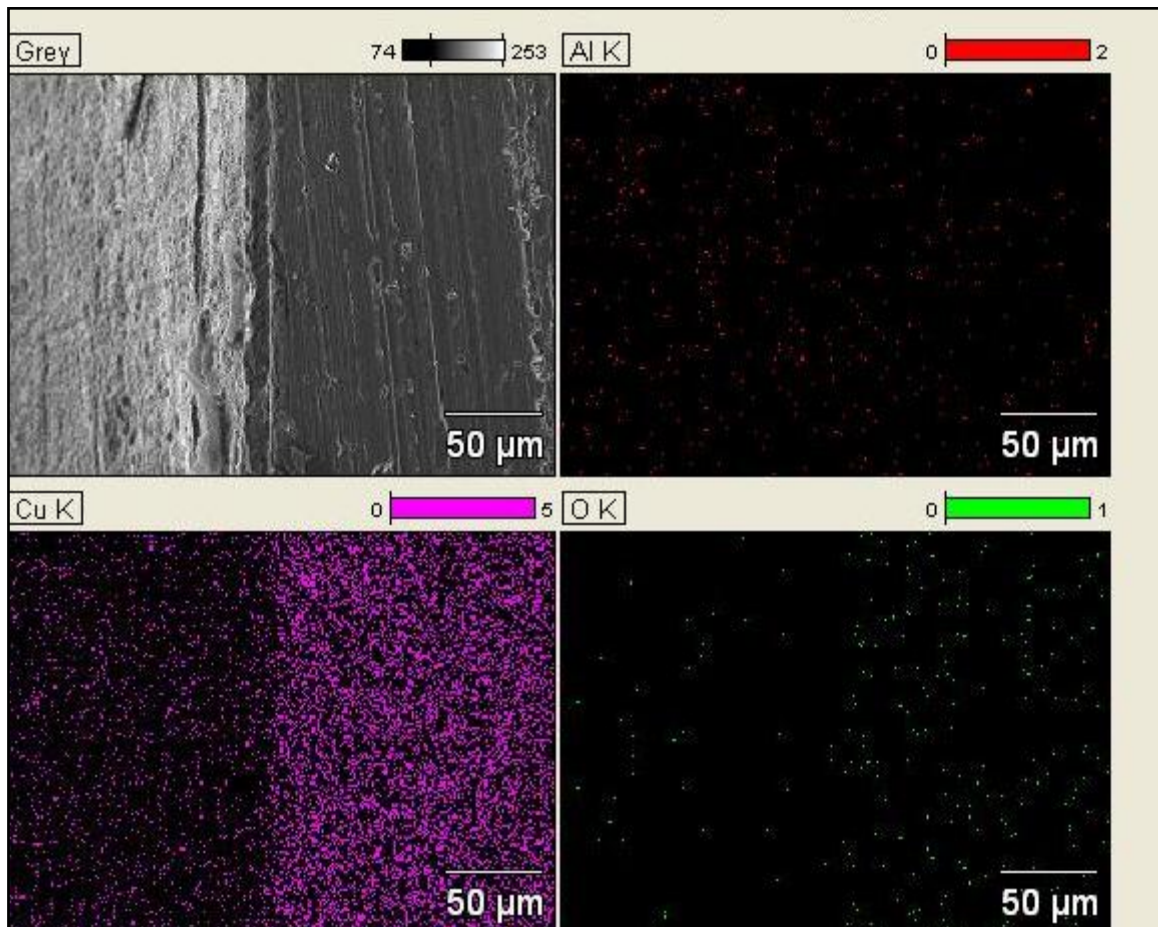


Fig. 26- Distribuzione degli elementi nella zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



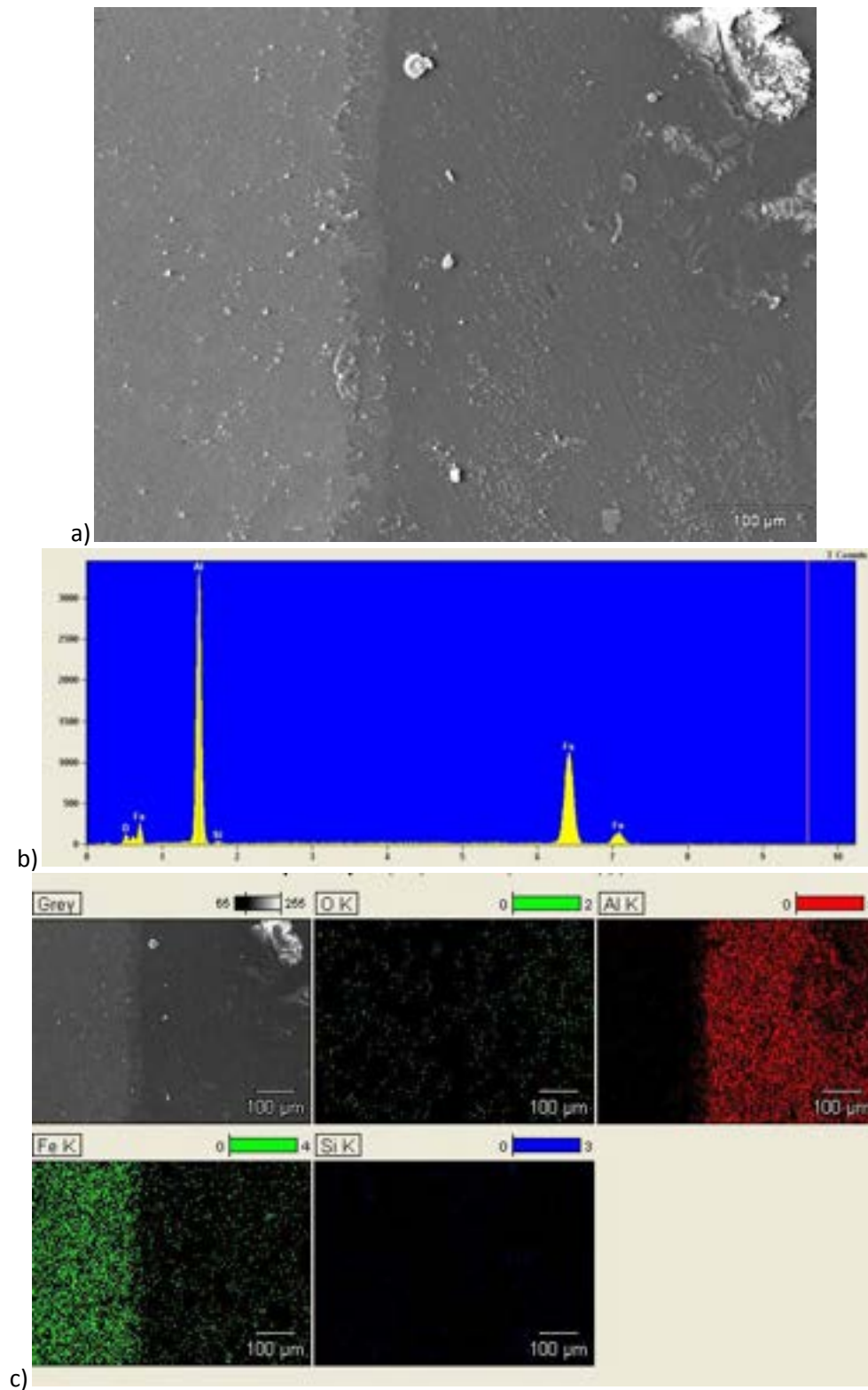
**Fig. 27-** Immagine SEM della zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



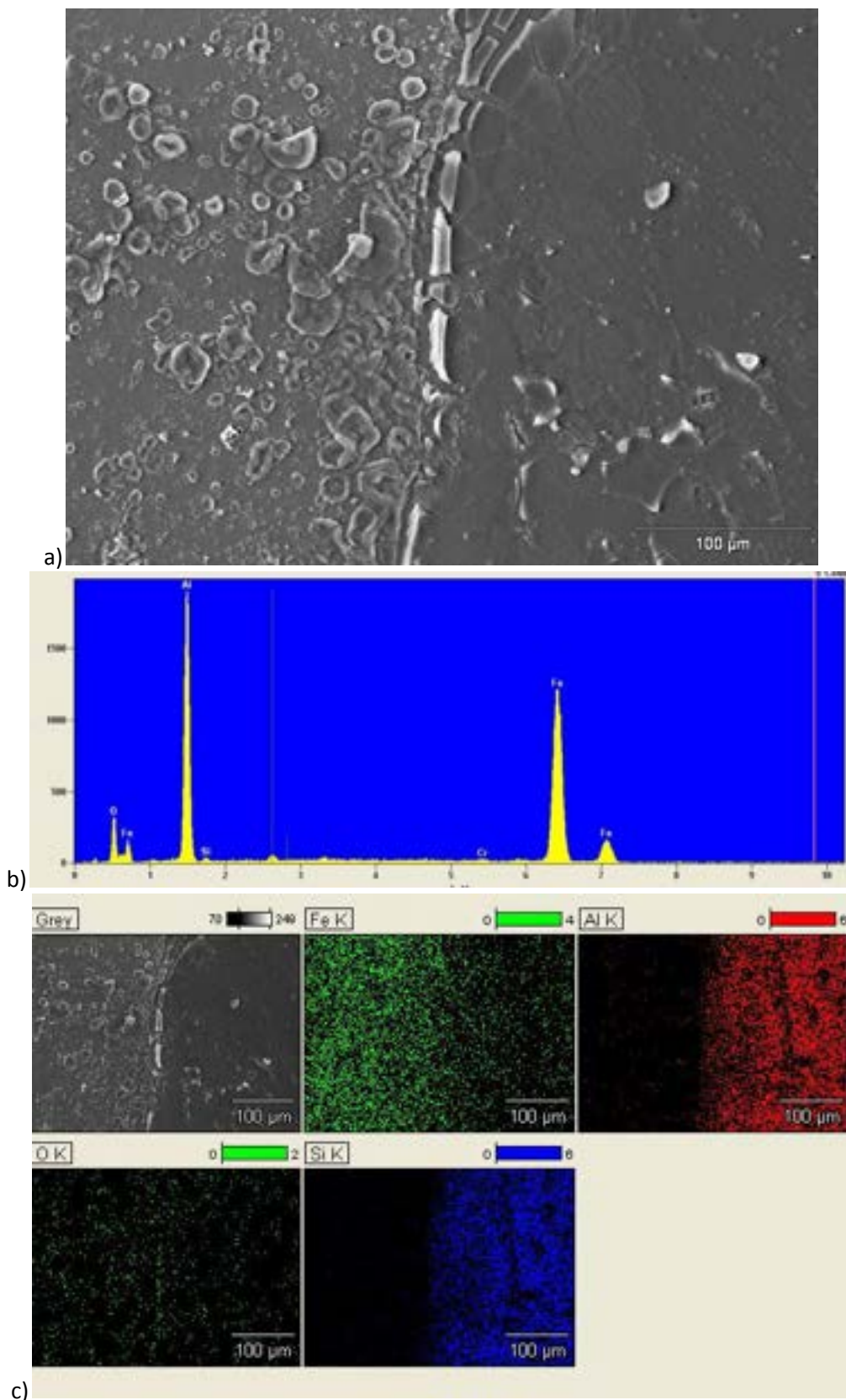
**Fig. 28-** Distribuzione degli elementi nella zona di saldatura tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.



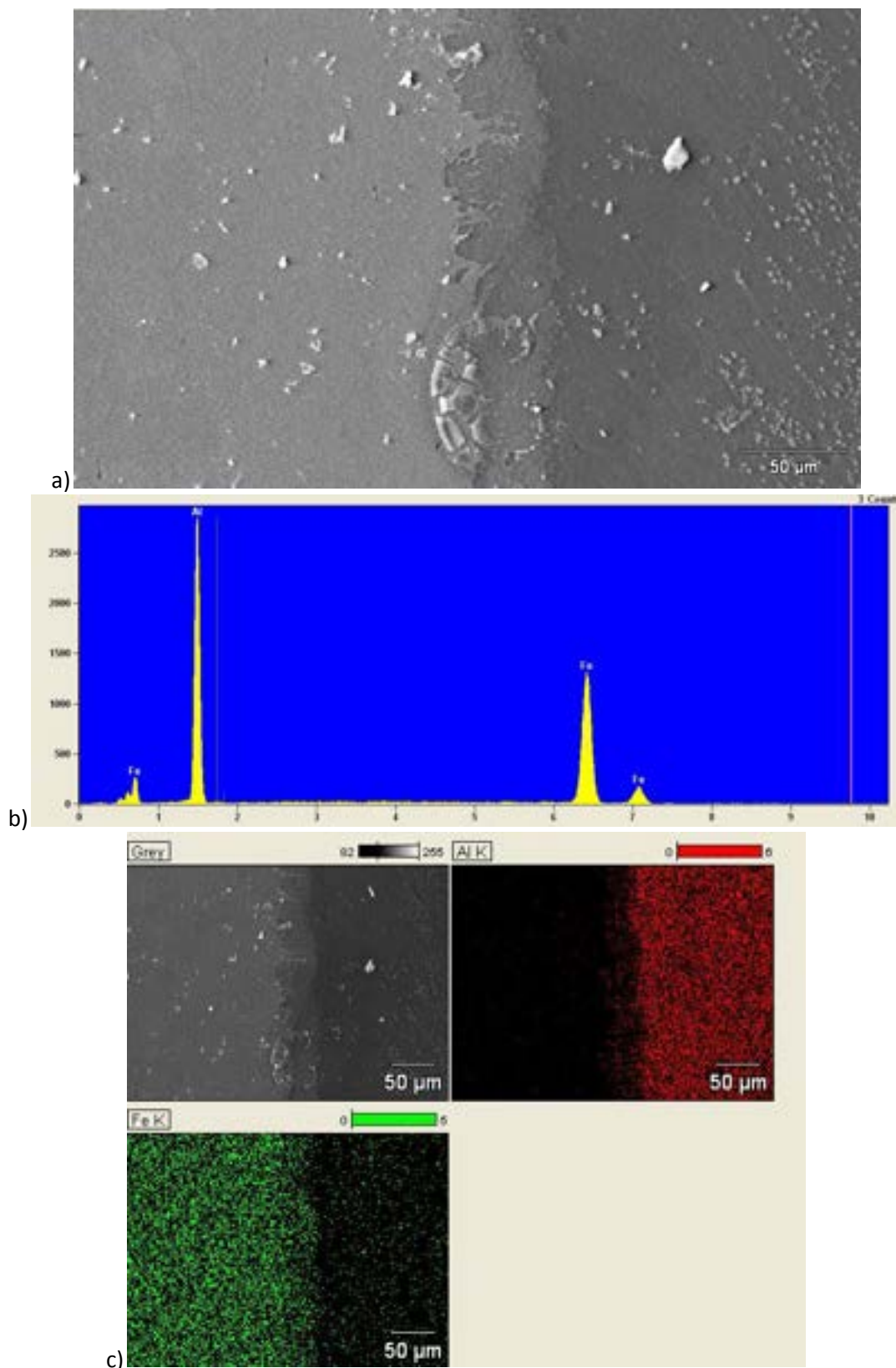
### 2.3 - Pelli di acciaio su schiume di Al



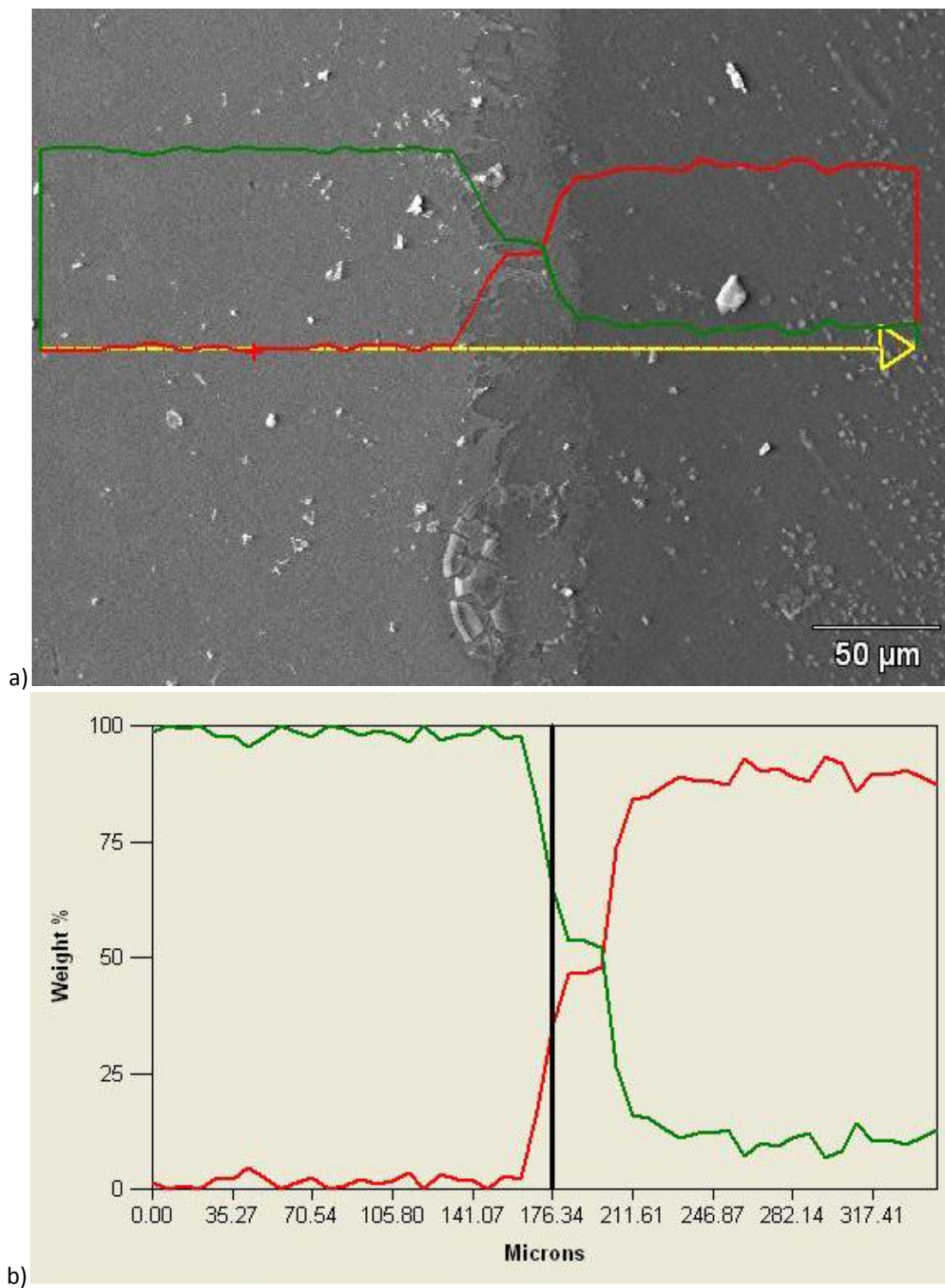
**Fig. 29-** a) Immagine SEM della zona di giunzione tra la schiuma di Al e la pelle in acciaio. b) Spettro EDS in cui si distinguono i picchi di Al, Fe, O, Si. c) Distribuzione degli elementi.



**Fig. 30-** a) Immagine SEM della zona di giunzione tra la schiuma di Al e la pelle di acciaio. b) EDS in cui si distinguono i picchi di Al, Fe, O, Si, Cr. c) Distribuzione degli elementi nella giunzione



**Fig. 31-** a) Immagine SEM della zona di giunzione tra la schiuma di Al e la pelle di acciaio. b) EDS in cui si distinguono i picchi di Al, Fe. c) Distribuzione degli elementi nella giunzione.



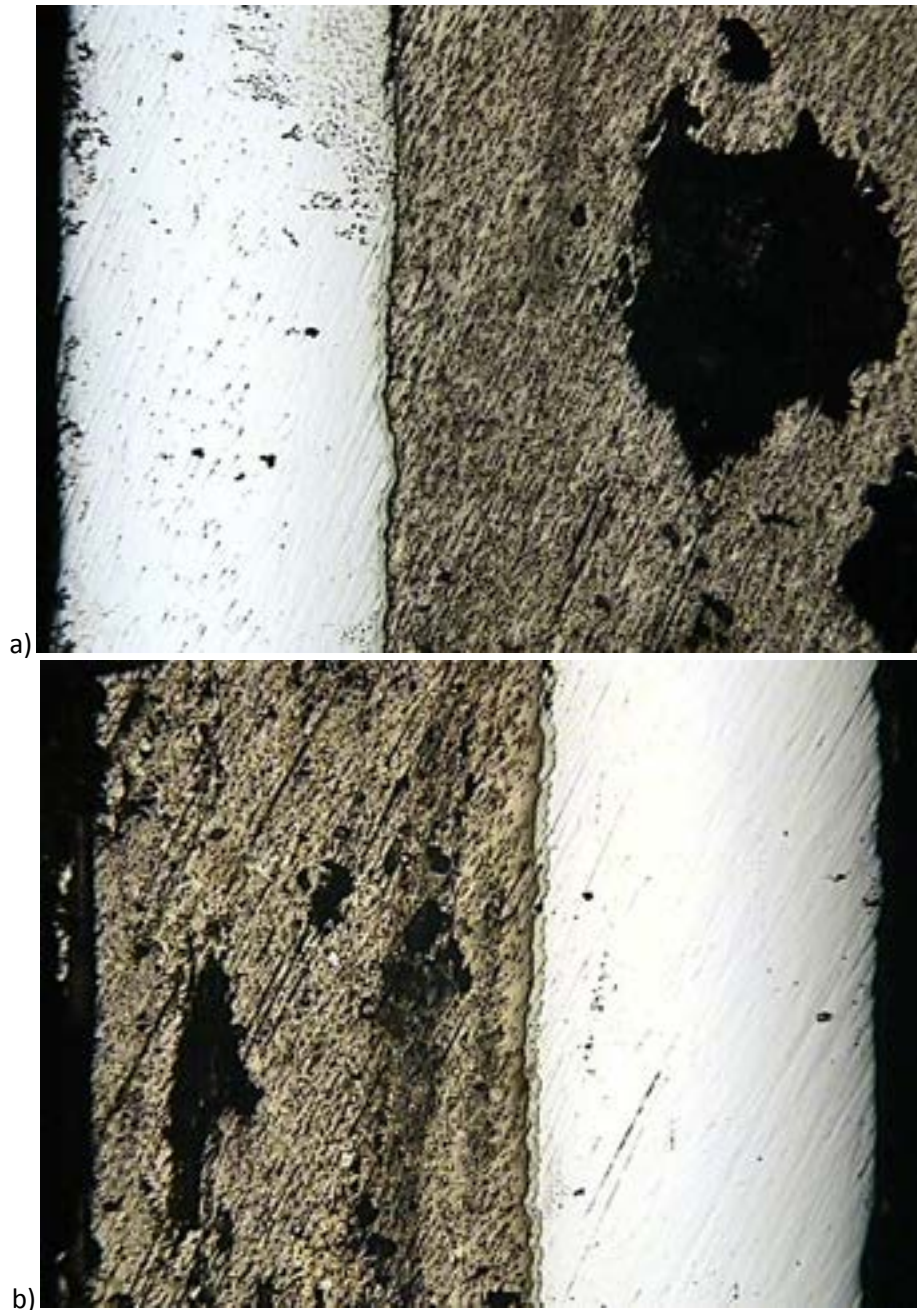
**Fig. 32-** a) Andamento della percentuale in peso dell’Al (linea rossa) e del Fe (linea verde) nella zona di giunzione tra la schiuma di Al e la pelle in acciaio. b) Percentuale in peso del Fe (verde) e Al (rosso) nella zona di giunzione tra la schiuma di Al e la pelle in Fe.

Le figure 29a, 30a e 31a mostrano le immagini SEM della zona di giunzione tra la schiuma di alluminio e la pelle in ferro. Gli spettri EDS mostrano i picchi di Al e Fe di cui sono costituite la schiuma e la pelle

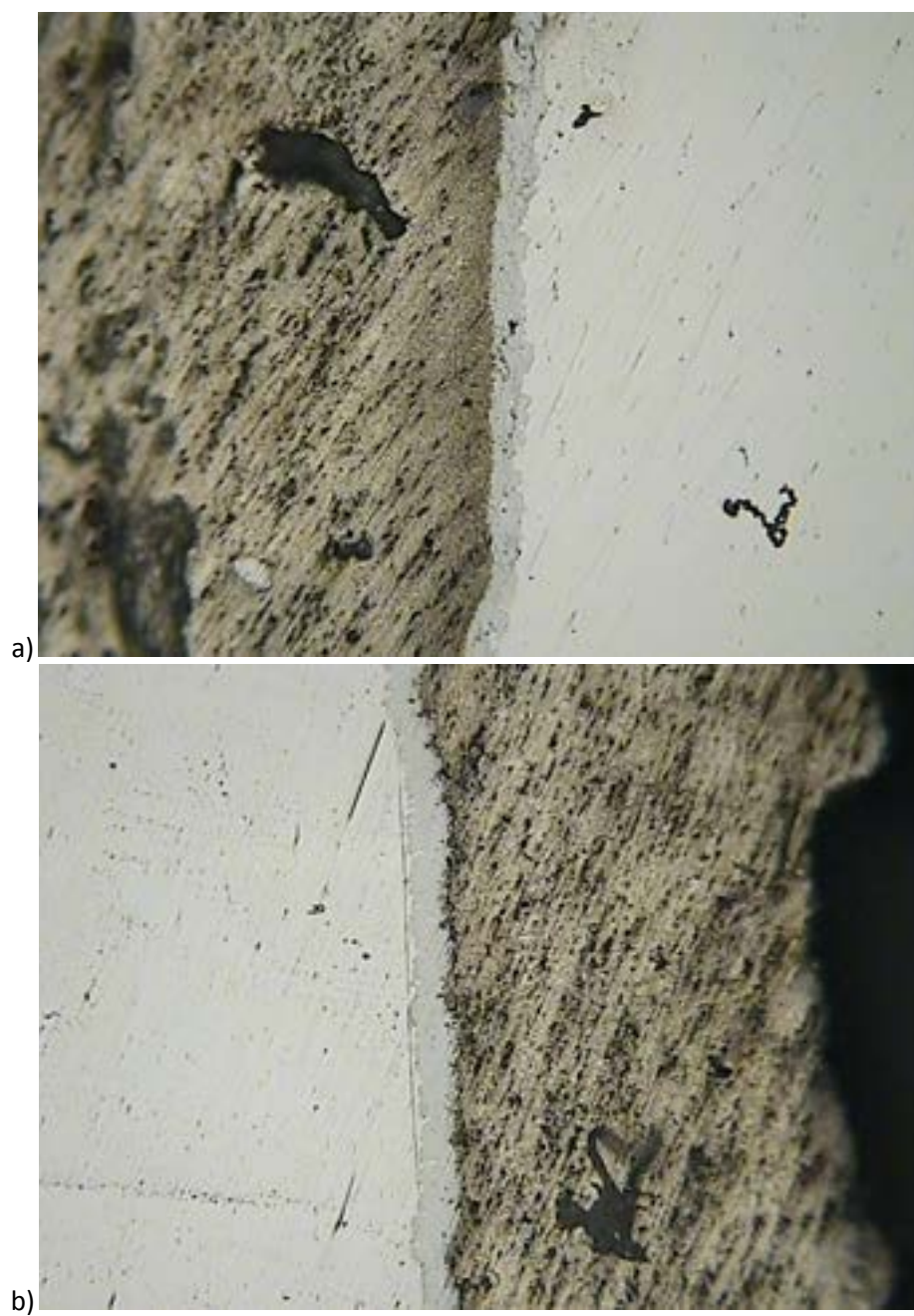


rispettivamente. Inoltre sono presenti (Fig. 29b e 30b) i picchi di Si e Cr, il silicio è lo stabilizzante utilizzato nella schiuma, il cromo è presente nella pelle di acciaio.

L'analisi della percentuale in peso di Al e Fe presente nella zona di giunzione (Figura 32) mostra la formazione di una regione di saldatura intermedia spessa circa 30 micron composta dal 50% in peso di Al e 50% in peso di Fe.



**Fig. 33-** Immagine al microscopio ottico (5X) della zona di giunzione tra la pelle in acciaio e la schiuma di Al



**Fig. 34-** Immagine al microscopio ottico (20X) della zona di giunzione tra la pelle di acciaio e la schiuma di Al



#### **2.4 - Pelli di Al su schiume di Al**

La tecnica descritta nei paragrafi precedenti non può essere utilizzata nel caso di una pelle di alluminio perchè alla temperatura di formazione della schiuma di alluminio essa ovviamente fonde. Si è così tentato di realizzare una pelle di alluminio su una schiuma in lega di alluminio con punto di liquidus inferiore al punto di fusione dell'alluminio puro. Questi esperimenti non hanno dato esito positivo perchè l'intervallo tra la temperatura di fusione dell'alluminio (pelle) e quella di schiumatura della lega (superiore a quella di liquidus) è in genere molto ristretto ed è molto difficile controllare con la dovuta precisione la temperatura durante il processo operando con un forno di piccole dimensioni come quello presente nei nostri laboratori. Risultati buoni si sono ottenuti invece all'ENEA utilizzando forni di maggiori dimensioni e quindi con maggiore inerzia termica e migliore controllo della temperatura. Soluzioni per migliorare i risultati ottenuti potrebbero riguardare l'impiego di disossidanti o elementi che permettano una riduzione locale della temperatura di fusione in corrispondenza della superficie di contatto pelle schiume per ampliare il range dei materiali accoppiabili.

## Conclusioni

La ricerca ha riguardato tre punti.

### 1- Reti Neurali

I dati sperimentali del primo anno di attività del progetto sono stati utilizzati come *training* per due reti neurali multi-layer ANN; i modelli si sono rivelati degli utili strumenti per la predizione delle caratteristiche morfologiche per ogni composizione utilizzata nel processo PM. Questo lavoro ha permesso di trovare densità e caratteristiche morfologiche delle schiume di Al come funzione della composizione delle polveri. Siccome applicazioni differenti delle schiume di Al richiedono caratteristiche specifiche, utilizzando i risultati delle reti neurali la composizione della miscela di polveri può essere opportunamente calibrata al fine di ottenere le caratteristiche desiderate.

### 2-Damping delle schiume di Al

La ricerca portata avanti ha permesso di comprendere meglio le specifiche caratteristiche di smorzamento delle vibrazioni da parte delle schiume di alluminio. In particolare ha evidenziato come il damping dipenda dall'ampiezza di sollecitazione: le oscillazioni presentano caratteristiche di non-linearità e le curve di risonanza sono asimmetriche. Il fondo a bassa temperatura della schiuma cresce fino a  $4-5 \times 10^{-3}$ , diventando confrontabile con quello dell'alluminio massivo quando l'ampiezza di deformazione arriva a  $10^{-4}$ . I risultati dimostrano inoltre che il damping delle schiume di alluminio aumenta aumentando la porosità e diminuendo la dimensione dei pori, decresce con la frequenza della sollecitazione ed aumenta con l'ampiezza di deformazione.

Questi aspetti dovrebbero essere approfonditi nell'attività futura del progetto per l'utilità pratica dei risultati in quanto lo smorzamento delle vibrazioni e del rumore rappresenta una delle caratteristiche più interessanti per l'applicazione delle schiume di alluminio nel settore dei mezzi di trasporto.

### 3-Bonding metallurgico pelle-core

Sono state realizzate giunzioni metallurgiche tra schiume di alluminio con pelli sia di alluminio che di metalli differenti (rame e acciaio). I due casi presentano aspetti e difficoltà pratiche molto diversi.

La saldatura con rame e acciaio, metalli con punto di fusione maggiore di quello dell'alluminio, è stata realizzata con successo facendo formare la schiuma a contatto del metallo della pelle. La superficie del metallo è stata preventivamente pulita meccanicamente con carte abrasive per rimuovere la strato naturale di ossido, quindi è stata trattata con un disossidante per evitare che la corretta saldatura fosse ostacolata dalla formazione di ossido durante l'esposizione in temperatura.

Questa tecnica non può essere utilizzata nel caso di una pelle di alluminio perchè alla temperatura di formazione della schiuma di alluminio essa ovviamente fonde.

Si è tentato di realizzare una pelle di alluminio su una schiuma in lega di alluminio con punto di liquidus inferiore al punto di fusione dell'alluminio puro. Questi esperimenti non hanno dato esito positivo utilizzando forni di piccole dimensioni presso il laboratorio dell'università perchè l'intervallo tra la temperatura di fusione dell'alluminio (pelle) e quella di schiumatura della lega (superiore a quella di liquidus) è in genere molto ristretto ed è molto difficile controllare con la dovuta precisione la temperatura durante il processo.

Risultati buoni si sono ottenuti invece all'ENEA utilizzando forni di maggiori dimensioni e quindi con maggiore inerzia termica. L'impiego di un coating a minor temperatura di fusione sulla pelle potrebbe permettere l'accoppiamento con leghe di alluminio a temperature inferiori garantendo una migliore stabilità del processo.

## Riferimenti bibliografici

1. A. J. SKINNER, J. Q. BROUGHTON, Neural Networks in Computational Materials Science: Training Algorithms. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 1995, 3, 371-390.
2. S. PERNOT, C. H. LAMARQUE, Applications of Neural Networks to the Modelling of Some Constitutive Laws. *Neural Netw.*, 1999, 12, 371-392.
3. K. LEVENBERG, A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *Q. Appl. Math.*, 1944, 2, 164-168.
4. D. MARQUARDT, An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 1963, 11, 431-441.
5. I.S. GOLOVIN, H.R. SINNING, *Mater. Sci. Eng. A* 370 (2004) 504–511.
6. R. MONTANARI e E. BONETTI, “Spettroscopia Meccanica- Teoria, Tecnica e Applicazioni Metallurgiche”, Edizioni AIM, 2010.
7. J. BAUMEISTER, J. BANHART, M. WEBER, in: F. Adlinger (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Materials by Powder Technology*, 1993, pp. 501–505.
8. J. BANHART, J. BAUMEISTER, M. WEBER, *Mater. Sci. Eng. A* 205 (1996) 221–228.
9. A.S. NOWICK and B.S. BERRY, *Anelastic relaxation in crystalline solids*, Academic Press New York and London 1972.
10. R. DE BAPTIST, *Internal friction of structural defects in crystalline solids*, North Holland, Amsterdam 1972.
11. C. S. LIU, Z. G. ZHU, F. S. HAN, J. BANHART, *Journal of Materials Science*, Vol. 33, N. 7 (1998), 1769-1775.

## Curriculum del gruppo di lavoro

### Curriculum di Roberto Montanari

Roberto Montanari, nato a Bologna il 31.12.1953 e laureato in Fisica all'Università di Bologna nel 1981, attualmente è Professore Ordinario di Metallurgia presso l'Università di Roma-Tor Vergata.

L'attività di ricerca svolta è fondamentalmente di tipo sperimentale mediante tecniche di diffrazione dei raggi X, misure di dissipazione interna e modulo elastico dinamico, microscopia ottica ed elettronica in scansione e trasmissione, microscopia ad effetto tunnel e prove meccaniche.

I principali temi di cui si è occupato sono:

1. deformazione con esplosivo dei metalli,
2. fusione e solidificazione di leghe metalliche in microgravità,
3. ricristallizzazione e crescita di grano nei metalli,
4. trasformazione martensitica in acciai martensitici al cromo,
5. materiali per applicazioni strutturali nei futuri reattori a fusione nucleare,
6. fatica nei compositi a matrice metallica,
7. test meccanici su scala miniaturizzata,
8. struttura dei metalli liquidi ed effetti precursori di fusione e solidificazione,
9. difetti nella produzione di monete e medaglie di metalli preziosi,
10. studio di manufatti metallici di interesse artistico ed archeologico,
11. produzione e caratterizzazione di schiume metalliche,
12. caratterizzazione microstrutturale e meccanica di compositi in lega di titanio rinforzati con fibre lunghe di SiC,
13. realizzazione e caratterizzazione di rivestimenti superficiali spessi di tungsteno su leghe di rame per applicazioni nei futuri reattori a fusione nucleare,
14. studio di rivestimenti multistrato CrN/Cr/CrN depositati mediante PVD su acciaio.

Ha coordinato numerosi progetti di ricerca di base e industriale con finanziamenti sia pubblici che privati.

E' autore di circa 240 pubblicazioni scientifiche su riviste nazionali ed internazionali.

E' autore dei seguenti brevetti:

- 1- apparato portatile di indentatore cilindrico a testa piana FIMEC;
- 2- procedimento per la produzione di monete con un elevato standard di sicurezza mediante l'impiego di materiali a permeabilità magnetica predefinita.

E' coordinatore del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale dell'Università di Roma-Tor Vergata.

E' stato presidente dal 2004 al 2008 del Centro di Studio "Metallurgia Fisica e Scienza dei Materiali" dell'Associazione Italiana di Metallurgia.

E' referee di riviste scientifiche internazionali.

E' membro della redazione scientifica de "La Metallurgia Italiana".

E' coordinatore della conferenza internazionale THERMEC.

E' stato membro del comitato organizzatore della conferenza internazionale ICIFMS-15 (15th International Conference on Internal Friction and Mechanical Spectroscopy), Perugia 2008.

E' valutatore di progetti di ricerca scientifica di base ed industriale.

### Curriculum di Maria Elisa Tata

Maria Elisa Tata, laureata in Ingegneria meccanica presso l'Università di Roma-Tor Vergata nel 1992, dottorato in Ingegneria della Metallurgia Meccanica, è Ricercatore Confermato del settore ING-IND 21 (Metallurgia) presso l'Università di Roma-Tor Vergata dove insegna Materiali per Applicazioni Speciali. Svolge attività di ricerca di tipo sperimentale mediante microscopia ottica, SEM, TEM e STM, prove meccaniche, diffrazione dei raggi X, misure di frizione interna. I suoi principali temi di ricerca vertono sulle seguenti tematiche:

- 1) Acciai inossidabili ferritici-martensitici candidati come materiali per applicazioni strutturali nei futuri reattori a fusione nucleare: caratterizzazione microstrutturale e meccanica; studio della precipitazione di



- carburi di Cr; studio delle proprietà meccaniche dei giunti saldati (TIG e laser); analisi dell'influenza del Cr sull'infragilimento da idrogeno;
- 2) Produzione e caratterizzazione microstrutturale e meccanica di schiume metalliche di diversi materiali (Al, Fe, Pb);
  - 3) Effetto di esplosioni di piccole cariche su metalli cfc;
  - 4) Deformazione plastica ad alta temperatura di leghe di titanio (Ti6Al4V) e caratterizzazione meccanica e microstrutturale di compositi di Ti rinforzati con fibre di SiC;
  - 5) Studio di leghe a memoria di forma per applicazioni in attuatori/sensori.

E' autore di 97 articoli scientifici pubblicati su riviste internazionali e nazionali e presentati a congressi. Come ricercatrice ha preso parte a molte ricerche di base e applicate, sostenute da fondi pubblici e privati. E' membro del collegio di dottorato; tiene delle lezioni sui Materiali Porosi per gli studenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Materiali.

### **Curriculum di Nadia Ucciardello**

Si è laureata in Ingegneria Meccanica presso l'Università di Cassino.

Nel novembre 2000 è risultata vincitrice del concorso di Dottorato del XVI ciclo in Ingegneria Civile e Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cassino (FR).

E' iscritta all'Albo degli Ingegneri di Caserta n.2609

Nel marzo 2004 ha ottenuto l'incarico per una collaborazione scientifica nel progetto di ricerca "Failure, Performance and processing prediction for enhanced design with non-crimp-fabric Composites" dall'Università degli Studi di Napoli "Federico II", Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione.

Nel Marzo 2005 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Civile e Meccanica XVI ciclo, presso l'Università degli Studi di Cassino. Tesi di dottorato: "Caratterizzazione numerico - sperimentale della lega superplastica PbSn60 e valutazione dell'influenza dei parametri di processo sull'evoluzione della cavitazione".

Nel novembre 2006 è risultata vincitrice del concorso per un posto di ricercatore nel raggruppamento ING/IND 21 "Metallurgia", presso l'Università di Roma "Tor Vergata".

Dall'novembre 2006 afferisce al Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Roma "Tor Vergata" ed è impegnata in numerose ricerche scientifiche e in progetti di ricerca industriali.

Dall'anno accademico 2010 afferisce al Consiglio di Corso di Studi in Ingegneria Energetica.

L'attività scientifica svolta dall'ing. Nadia Ucciardello, tuttora in corso di svolgimento, si è sviluppata su temi inerenti la metallurgia e le tecnologie di processi industriali.

Il lavoro svolto è stato prevalentemente di carattere sperimentale, utilizzando le seguenti tecniche:

- diffrazione dei raggi X a temperatura ambiente;
- microscopia elettronica in trasmissione;
- prove meccaniche.
- Frizione interna

Al lavoro sperimentale è stato affiancato lo sviluppo di sistemi di intelligenza artificiale per la caratterizzazione di alcuni materiali metallici e per la previsione dei parametri di processo

Ha partecipato a numerosi progetti, di seguito elencati:

2004-2006. "Production of coins with high security standards". Finanziato da TRAFIME.

2005-2006. "Study of the micro-chemical structure of the fibre-matrix interface in Ti6Al4V-SiCf composite". Finanziato da Centro Sviluppo Materiali (CSM).

2005-2006. "Production of nanostructured metallic materials by Spark Plasma Sintering". Finanziato da PRIN-MIUR.

2006-2007. "Mechanical stability of Ni base superalloys". Finanziato da Centro Sviluppo Materiali (CSM).

2006-2008. "Descaling of hot-rolled stainless steels". Finanziato da MATRIS.

2008. "Optimisation of the hot-working parameters of the alloy Ti6Al4V" Finanziato da SICAMB.
- 2008-2009. "Microstructural and mechanical characterization of tungsten armours". Finanziato da EURATOM-ENEA.
2009. "High-temperature rolling: physical metallurgy and modelling of thermo-mechanical treatments of low- and high-alloyed steels". Finanziato da SIEMENS-VAI.
2009. "Study of the process parameters in thermo-mechanical rolling of steels". Finanziato da SIEMENS-VAI.
2009. "Analyses and tests on alloys for high-temperature applications". Finanziato da Centro Sviluppo Materiali (CSM).
- Le suddette attività si sono concretizzate in 50 pubblicazioni scientifiche.

#### **PUBBLICAZIONI INERENTI LE SCHIUME E LE TECNICHE SPERIMENTALI USATE PER LO STUDIO**

1. G. Costanza, G. Gusmano, R. Montanari, M.E. Tata, "Metodi di produzione e applicazioni delle schiume metalliche", *La Metallurgia Italiana*, 2 (2003) 31.
2. R. Montanari, "Real-time XRD investigations on metallic melts", *International Journal of Materials and Product Technology*, 20 (2004) 452.
3. S. Amadori, E.G. Campari, A.L. Fiorini, R. Montanari, L. Pasquini, L. Savini, E. Bonetti, "Automated resonant vibrating reed analyzer apparatus for a non destructive characterization of materials for industrial applications", *Materials Science & Engineering A* 442 (2006) 543-546.
4. M. Barletta, S. Guarino, R. Montanari, V. Tagliaferri, "Metal foams for structural applications: design and manufacturing", *Computer Integrated Manufacturing* 20-5 (2007) 497-504.
5. G. Costanza, R. Montanari, M.E. Tata, N. Ucciardello, "Densità ed assorbimento di energia delle schiume di alluminio", *Atti del 4° Simposio Tecnologie Avanzate Nuovi Orizzonti Teorici e Applicativi*, Rome June 2007.
6. G. Costanza, R. Montanari, M.E. Tata, N. Ucciardello, "Schiume di alluminio: composizione, morfologia e caratteristiche", *Lamiera* (2007) 68-73.
7. G. Costanza, G. Gusmano, R. Montanari, M.E. Tata, N. Ucciardello "Effect of powder mix composition on Al foam morphology", *Journal of Materials: Design and Applications*, 222 (2008) 131-140.
8. R. Montanari, F. Gauzzi, "XRD investigation of binary alloys solidification", , Ed. S.S. Sadhal, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1161 (2009) 407-415.
9. G. Costanza, R. Montanari, M.E. Tata, "A new method for the recycling of Al chip into foam", *Proc. of SEEP 2010 Conference*, Bari June 2010.
10. R. Montanari, E. Bonetti, "Mechanical spectroscopy applications for investigating metallurgical processes", *Materials Science Forum* 706-709 (2012) 113-120.

#### **LIBRI**

1. R. Montanari, "Tecniche sperimentali per la caratterizzazione dei materiali: dal laboratorio alla produzione", Edizioni AIM, 2005.
2. R. Montanari e E. Bonetti, "Spettroscopia Meccanica- Teoria, Tecnica e Applicazioni Metallurgiche", Edizioni AIM, 2010.
3. M. Baricco and R. Montanari, *Solidificazione*, Edizioni AIM, 2012.