

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



Dottorato di ricerca
in
Ingegneria Aerospaziale, Navale e della Qualità
XXIV CICLO

TESI DI DOTTORATO

Localizzazione di difetti in materiali compositi
mediante applicazione di tecniche di Emissione
Acustica

COORDINATORE

CH.MO PROF. ANTONIO MOCCIA

TUTOR

CH.MA PROF.^{SSA} ISABELLA DE IORIO

CH.MO PROF. GIANCARLO CAPRINO

CANDIDATO

ILARIA PAPA

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

*A mio Nonno,
il mio fan più grande!*

Indice

Introduzione

I Capitolo – Controlli non distruttivi:l'emissione acustica

I.1 Il ruolo dei controlli non distruttivi	1
I.2. Il metodo dell'emissione acustica: le origini concettuali	4
I.2.1 Lo stato dell'arte	5
I.2.2 Sorgenti AE	7
I.2.3 Propagazione di segnali AE	9
I.2.4. Tipologie di segnali: segnali transitori e segnali continui	12
I.2.5. Determinazione dei tempi di arrivo (Arrival time)	13
I.2.6 Parametri AE	14
I.2.7 Struttura dei segnali AE	16
I.2.8 Parametri esterni	17
I.2.9 La catena di processo AE	18
I.2.10 Glossario	20
I.2.11 Il sensore – conversione dell'onda meccanica in segnale elettrico	21
I.2.12 Cavo sensore-preamplificatore	23
I.2.13 Preamplificatore	23
I.2.14 Cavo preamplificatore-unità AE	24
I.2.15 Filtro di frequenza	24
I.2.16 Il convertitore A/D	24
I.2.17 Il registratore di transitori	26
I.2.18 Il data buffer	27
I.2.19 Personal computer e software	27
I.2.20 Il test di accoppiamento del sensore	28

I.3 Le ipotesi standard sui materiali e sulle misure. Problematiche relative ai materiali compositi	31
---	----

Il Capitolo– Attrezzature sperimentali

II.1 Attrezzature e set-up sperimentale	33
II.1.1 Sistema acquisizione ed analisi EA: Vallen AMSY 4	33
II.1.2 Caratteristiche esterne del sistema AMSY 4	34
II.1.3 Sensore AE	36
II.1.4 Sensore VS150-M	37
II.1.5 AMSY 4: Specifiche hardware	38
II.1.6 Il preamplificatore	38
II.1.7 Processore di segnale acustico (ASIPP)	41
II.1.8 Autocalibrazione	42
II.1.9 DSP- Digital Signal Processor	42
II.2 Autocalibrazione	43
II.2.1 Software di acquisizione dati	43
II.2.2 Acquisition 32	44
II.2.3 TR Recorder	45
II.2.4 Visual AE	46
II.2.5 Visual TR	46
II.2.6 Visual Class	47
II.2.7 Settaggio delle prove sperimentali	49
II.3 Matlab	50
II.3.1 Funzioni principali	51
II.3.2 Linguaggio Matlab	52
II.3.3 Strumenti di sviluppo	53
II.3.4 Analisi e accesso ai dati	53
II.3.5 Visualizzazione dei dati e calcolo numerico	54
II.3.6 Pubblicazioni dei risultati e rilascio di applicazioni	56
II.4 Le reti neurali: Peltarion Synapse	56

II.4.1 Peltarion Synapse	61
II.4.2 Analisi operativa della procedura	63
II.4.3 Data	63
II.4.4 Analisi dei dati	65
II.4.5 Training e validation	67
II.4.6 Design	67
II.4.7 Training	69
II.4.3 Postprocessing	73
II.5 Laminato in carboresina analizzato	74
<u>III Capitolo – Background teorico</u>	
III.1 Il metodo della triangolazione	81
III.1.1 Metodo della triangolazione: materiali isotropi	82
III.1.2 Metodo della triangolazione: materiali anisotropi	86
<u>IV Capitolo – Metodologie e procedure sperimentali</u>	
Introduzione	89
IV.1 Prove sperimentali per il calcolo della velocità	90
IV.2 I Metodologia: ANN	91
IV.3 II Metodologia: Metodo deterministico	95
IV.3.1 Architettura software e sviluppi	96
<u>V Capitolo – Analisi dei risultati</u>	
Introduzione	103
V.1 Individuazione della formula di calcolo della velocità di propagazione in funzione dell'orientazione	104
V.2 Localizzazione degli eventi di EA: architettura ANN ottimale	107
V.2.1 Convalida sperimentale: ANN	109
V.3 Localizzazione degli eventi di EA: Metodo deterministico	111
V.3.1 Effetto delle proprietà del laminato, del passo, e dell'orientazione	113
<u>Conclusioni</u>	
<u>Bibliografia</u>	

INTRODUZIONE

L' Emissione Acustica (EA) è da tempo riconosciuta come una tecnica valida per il monitoraggio in tempo reale di strutture metalliche e in composito, fornendo informazioni utili non solo sulla presenza di difetti, ma anche sulle loro criticità [1-4]. Nel caso dei materiali compositi, caratterizzati da una molteplicità di modi di rottura, è stata concepita la possibilità di discriminare i diversi meccanismi di danno da un'attenta analisi delle caratteristiche delle onde [5,6]. Pertanto, i metodi di EA sono promettenti sistemi di monitoraggio, utili per migliorare la sicurezza e ridurre i costi di manutenzione nelle applicazioni industriali.

Una caratteristica interessante dell'EA è la sua capacità di individuare i difetti. Tobias [7] ha dimostrato che, per lastre isotrope, il problema della posizione della sorgente può essere risolto in forma chiusa con una triangolazione, se è nota la differenza nei tempi di arrivo delle onde acustiche a tre sonde poste sulla superficie della struttura. Anche se questa soluzione sembra essere semplice, nella pratica sorgono molti inconvenienti, essenzialmente correlati con le leggi che governano la propagazione delle onde.

Un'onda acustica generata da una sorgente localizzata in un laminato si propaga nella struttura in due modalità fondamentali: la *simmetrica* (conosciuta anche come "estensionale"), associata alle proprietà del materiale nel piano, e l'*anti-simmetrica* ("flessionale"), dipendente dalle sue caratteristiche di flessione. Entrambe queste modalità sono dispersive, cioè la loro velocità è una funzione della frequenza. Pertanto, l'impulso cambia forma con l'aumentare della distanza dalla sorgente e questo fenomeno influisce notevolmente sulla precisione della localizzazione della sorgente con la tecnica di superamento del threshold (soglia di acquisizione), data la difficoltà nel misurare il tempo di riferimento per l'individuazione del punto d'origine delle forme

d'onda [8,9]. La natura dispersiva delle onde estensionali appare chiaramente solo a frequenze molto alte. Per frequenze sufficientemente basse, le onde simmetriche sono sostanzialmente non dispersive, e la loro velocità può essere calcolata con strumenti di analisi molto semplici [8,10]. Queste caratteristiche sono state sfruttate in strumentazione commerciali di EA per migliorare opportunamente la localizzazione del punto sorgente.

Anche se fortemente dispersive alle basse frequenze, le onde flessionali offrono un vantaggio eccezionale rispetto a quelle estensionali: la loro ampiezza è molto maggiore, in modo che si propagano a distanze maggiori, consentendo il monitoraggio di grandi strutture con l'utilizzo di un numero limitato di sensori. Questa potenzialità spiega la grande mole di lavoro dedicata alla propagazione delle onde acustiche in mezzi dispersivi, nonché ai metodi per una valutazione attendibile del tempo di arrivo (TOA) del segnale di emissione acustica ai sensori in queste condizioni [6-8,10,11].

A causa dell'anisotropia dei laminati compositi, la posizione della sorgente di segnali di EA in questi materiali merita ulteriore attenzione. Infatti, a causa della dipendenza delle proprietà elastiche dalle differenti direzioni, anche la velocità delle onde è una funzione dell'orientazione, rendendo inefficace la formulazione in forma chiusa proposto da Tobias [7]. Di conseguenza, la triangolazione viene eseguita per iterazione [11]. In alternativa, è stata proposta recentemente un'altra tecnica basata sulla minimizzazione di una funzione di errore opportunamente definita [12].

L'obiettivo principale della Tesi di Dottorato è stato quello di sviluppare nuove tecniche e nuove procedure per il monitoraggio e la verifica mediante emissione acustica (EA) di strutture in materiali sia convenzionali che compositi. Le caratteristiche dei segnali di EA non sono influenzate dalla sequenza di laminazione di un laminato, ma dipendono dal meccanismo di rottura o dalla fonte [13,14]. A tal proposito, in questo lavoro di ricerca è stato affrontato il problema relativo alla localizzazione del danno su un

pannello in carboresina (CFRP) unidirezionale, materiale caratterizzato da un elevatissimo rapporto di anisotropia delle proprietà elastiche. La scelta è stata determinata dal fatto che la difficoltà nel localizzare l'origine degli eventi aumenta con l'aumentare del rapporto di anisotropia del materiale [11,15].

Come già detto, la localizzazione (location) dell'attività di EA può essere effettuata utilizzando il metodo della triangolazione: nota la velocità del suono nel materiale, la posizione di almeno tre sonde e il tempo di arrivo del segnale a questi, è possibile risalire alla posizione in cui l'evento è stato generato. Nel caso dei materiali compositi tale metodologia non è applicabile con semplicità: in questo caso la velocità dipende non solo dalla frequenza, ma anche dall'orientazione delle fibre. Pertanto, in questo lavoro di ricerca, a partire dalla teoria della laminazione sono stati sviluppati e verificati sperimentalmente dei modelli per la stima delle velocità del suono nei materiali compositi al variare della stratificazione e della direzione di misura. Una volta ottenuti gli strumenti per la previsione delle velocità, sono state messe a punto diverse procedure, basate sia su metodi di intelligenza artificiale (Artificial Neural Networks, ANN) che su metodi numerici di tipo deterministico, per la localizzazione del punto di emissione acustica in un laminato generico. Le diverse procedure sono state poi validate sperimentalmente.

CONTROLLI NON DISTRUTTIVI: L'EMISSIONE **ACUSTICA**

I.1 IL RUOLO DEI CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

Sotto la denominazione di controlli non distruttivi si raggruppa un insieme di esami che, compiuti su elementi di materiale (metallico e non), su intere strutture o su parti di esse, permettono di riscontrare e misurare difetti eventualmente presenti, di valutare la statica di strutture portanti (un solaio o una trave, ad esempio), di effettuare controlli su impianti, macchinari o mezzi di trasporto al fine di individuare la causa di un malfunzionamento o di prevenire il malfunzionamento stesso.

La finalità di tutti i controlli non distruttivi è in ogni caso la sicurezza, la cui presenza viene verificata in termini di rispondenza a requisiti di affidabilità e di conformità al progetto secondo i quali un determinato prodotto è stato concepito e realizzato.

I controlli non distruttivi rivestono un ruolo fondamentale in tre diversi ambiti:

1. in fase di collaudo, cioè quando il prodotto viene testato prima di venire utilizzato;
2. in fase di controllo, cioè durante la vita utile del prodotto, quando si rende necessario effettuare un monitoraggio della qualità e/o della sicurezza;
3. in fase di diagnostica, cioè quando, rilevata la presenza di un malfunzionamento, si rende necessaria la ricerca della causa, la valutazione dell'entità del problema da cui il malfunzionamento stesso

dipende, nonché la raccolta di informazioni di carattere generale dalle quali dipende l'intervento risolutivo.

In ambito civile, strutture portanti quali travi o solai vengono collaudate mediante l'effettuazione di idonee prove di carico; tutti i mezzi di trasporto pubblico (aerei ,treni, ma anche gli impianti a fune) subiscono periodici controlli che comprendono l'effettuazione di test non distruttivi; il restauro di monumenti, chiese e opere d'arte è sempre basato, in fase preliminare, sugli esiti di controlli non distruttivi; la sicurezza di grandi impianti e di grandi opere infrastrutturali è fondata sul monitoraggio mediante prove non distruttive.

In altre parole, una grandissima parte dei prodotti di più ampio utilizzo subisce il controllo mediante indagini non distruttive al fine di:

- verificare lo stato di servizio;
- prevenire e/o prevedere malfunzionamenti;
- controllare la rispondenza a requisiti imposti, in fase di progetto, in base alle esigenze dell'utenza;
- diagnosticare le cause di un problema;
- fornire le conoscenze necessarie per il progetto e l'esecuzione di interventi di risanamento.

Sempre in ambito civile, non è improbabile imbattersi in strutture abitative vetuste, di cui non si possono avere conoscenze precise; in tali casi, in cui qualunque intervento di restauro non può prescindere dalla conoscenza dello stato di fatto della struttura stessa, l'applicazione di metodi non distruttivi consente la raccolta delle informazioni necessarie. In questo caso, come peraltro nella maggior parte dei casi, è sempre opportuno eseguire un certo numero di prove, meglio se di tipo diverso, per la valutazione di una

determinata caratteristica: soltanto più metodi, che risultino tra loro complementari, possono fornire un quadro attendibile e completo.

Molti metodi non distruttivi presentano infatti campi di applicazione molto ristretti e grandi incertezze di interpretazione legate all'influenza delle condizioni in cui vengono eseguiti (condizioni che in realtà essi dovrebbero chiarire). Per questo motivo, il problema si presenta spesso in termini molto complessi, e solo dal confronto di più risultati è possibile dedurre indicazioni valide.

Di grande importanza è la possibilità di impiegare i metodi non distruttivi per l'effettuazione di un monitoraggio completo e continuativo di parametri significativi in periodi più o meno lunghi, quali l'inflessione di strutture portanti orizzontali, oppure per il controllo dello stato di difetti. È possibile ad esempio mantenere sotto controllo lo stato di avanzamento di un quadro fessurativo ritenuto pericoloso, valutando implicitamente le cause che lo governano e lo determinano, o valutare, nel corso della sua vita utile, l'inflessione di un ponte.

Un prodotto è affidabile se risponde alle caratteristiche che gli sono state imposte in fase di progetto per soddisfare le richieste dell'utenza e, come già sottolineato in precedenza, il fine principale dei controlli non distruttivi è appunto quello di verificare che sussistano, per un determinato prodotto, le condizioni minime di sicurezza che ne consentono l'utilizzo.

Di seguito si andranno a considerare le tecniche CND più diffuse e impiegate a livello industriale, la cui applicazione è regolata da un insieme di standard internazionali che ne garantiscono l'efficacia e la ripetibilità:

- Metodo delle correnti indotte
- Metodo dei liquidi penetranti
- Magnetoscopia

- Metodi ottici e fotografici
- Metodi dinamici
- Radiografia
- Rilevazione di fughe
- Termografia
- Ultrasuoni
- Metodo dell'emissione acustica

1.2 Il metodo dell'emissione acustica: le origini concettuali

Le nozioni di base di questa tecnica risalgono agli Anni 70, allorché si pensò di poter estendere i concetti dell'analisi spettroscopica ai fenomeni acustici originati dalle dinamiche dei materiali.

Lo sviluppo delle tecniche ultrasonore suggerirono la possibilità che la caratteristica di eccitabilità dei materiali (per cui ad un impulso ultrasonoro corrisponde una risposta in frequenza appropriata) potesse giustificare una produzione di segnali acustici nelle alte frequenze (senza dubbio US) come conseguenza del rilascio di energia a livello microscopico.

L'Emissione Acustica (AE) fu però solo una teoria per un certo tempo, almeno finché non si ebbe a disposizione un insieme di strumenti di sufficiente raffinatezza tecnica per impiegare utilmente i segnali raccolti.

Un'ombra ha sempre, e tuttora, accompagnato la trattazione dell'argomento AE: quale può essere il domino di validità della tecnica? E' reale la corrispondenza tra segnale e fenomenologie indicate oppure non esiste una propria biunivocità

tra segnale ed evento? Quanto è possibile ricevere dell'energia rilasciata nella forma acustica, in maniera da avere un segnale completo?

Questi e altri interrogativi tuttora non hanno una risposta compiuta o certa.

Certo è invece il successo conseguito dalla tecnica AE in alcuni campi della diagnostica sui materiali, specie laddove applicata a manufatti in esercizio (impianti in pressione, serbatoi, strutture edili in conglomerato cementizio e carpenteria metallica), ambito che è la naturale applicazione di questa tecnica dinamica. I materiali metallici, inoltre, essendo dotati di buone caratteristiche di isotropia e sufficiente omogeneità, risultano vantaggiosamente esaminabili, al contrario di altri materiali, come i compositi, che presentano una serie di complicati problemi per quanto riguarda la natura del segnale, le fonti di rumore, la vita del segnale e l'analisi dell'onda.

Il calcolo automatico e la capacità di acquisire una mole ingente di dati da più sorgenti contemporaneamente (sistemi multi-canale) ha permesso di affrontare alcune problematiche complesse che riguardano innanzitutto la modellistica del materiale, e successivamente alcune ipotesi di modello per la meccanica della frattura del composito, laddove sia ragionevole ritenere valida una formulazione basata (per via induttiva) sulla letteratura e sulle prove sperimentali già condotte.

I.2.1 Lo stato dell'arte

Quattro sono, nel mondo, i principali gruppi di studio sulla tecnica AE. India, Giappone, Stati Uniti e Inghilterra sono stati sede di esperimenti dall'alba della teorizzazione sull' AE fino ad oggi. Le diverse vie seguite dai team di ricerca

hanno specializzato ciascuna ricerca verso una metodologia specifica: i gruppi indiani (quello di Agarwal) e giapponesi (Ono), ad esempio, confidano nella trattazione globale del segnale tramite i parametri caratteristici qualitativi: ampiezza, durata, tempo di picco, numerosità degli eventi. Negli Stati Uniti invece ci si è concentrati sulle informazioni contenute nello spettro del segnale (si vedano in merito le ricerche del Prof. Prosser), sull'analisi della forma d'onda e sull'ipotesi di una fedele analogia con la spettroscopia, per cui ad un dato fenomeno in un dato materiale si può associare univocamente un segnale dallo spettro ben caratterizzato.

Mentre la ricerca accademica proseguiva, le applicazioni si sono sviluppate principalmente nel mondo dell'industria, rivolte specialmente agli impianti di produzione energetica (centrali nucleari e sistemi di stoccaggio per combustibili) e alle costruzioni a struttura metallica (opere civili ed edili) ma anche al settore dei beni culturali (si ricordi, in Italia, il restauro della statua equestre bronzea dell'Imperatore Marco Aurelio, supervisionata dal Prof. Caneva).

Nel settore aeronautico, benché si sia sempre supposto che tale metodo potesse apportare significativi miglioramenti nelle prestazioni globali dei CND, si è invece preferito continuare a impiegare metodiche standard e comuni, dalla condotta e dall'affidabilità comprovata e certa. Tuttavia la British Aerospace, sul finire degli Anni 70, iniziò ad interessarsi alle potenzialità del metodo AE, e nei primi Anni 80 mise a punto un sistema sperimentale imbarcato per verificare la robustezza strutturale e monitorare l'integrità della cellula dei velivoli Tornado F3. Il tentativo non fu un successo nel senso proprio del termine, giacché le capacità di calcolo dei computer di quel tempo non permettevano alcuna

elaborazione in tempo reale dei dati in se complessi e strutturati che l'analisi fornisce.

L'idea tuttavia è rimasta valida e finalmente realizzabile, come hanno dimostrato i tedeschi di DASA che hanno deciso di impiegare l'AE nelle prove di volo con carico asimmetrico e variabile sul prototipo del velivolo EF2000.

L'utilizzo di sistemi multicanale con capacità di acquisizione veloce, elaborazione e visualizzazione in tempo reale costituisce il salto di qualità necessario per rendere l'applicazione della AE sufficientemente raffinata per un utilizzo ingegneristico. Del resto i software di analisi automatica dello spettro potrebbero consentire di indagare in maniera più efficace sull'ambiguo campo delle forme d'onda, e verificare le potenzialità teorizzate circa questo metodo per il riconoscimento del danno e della sua criticità.

1.2.2 SORGENTI AE

Tutti i solidi hanno una certa elasticità: essi si deformano sotto l'azione di carichi esterni e tornano nella configurazione iniziale quando scaricati. Lo sforzo più elevato sopportabile e la conseguente deformazione elastica dipendono dalla capacità del corpo di immagazzinare energia elastica. Superando il limite elastico, nei materiali fragili, si verifica immediatamente la frattura. Nei materiali dotati di elevata plasticità, invece, la frattura si presenta soltanto successivamente alla deformazione.

Se il materiale sottoposto a trazione presenta un difetto (per esempio nei giunti saldati, una inclusione non metallica, una bolla di gas o simili), l'innescò del danno avverrà più probabilmente intorno a tali difetti nativi in quanto verosimilmente punti più fortemente sollecitati. Un veloce moto di dislocazione

conseguenza dell'azione sul materiale è associato ad un rapido rilascio di energia elastica, ed è quello che identifica un evento AE. Esso si manifesta come un'onda elastica che si propaga e può essere rilevata da sensori appropriati e al tempo stesso analizzata. Lo spettro d'onda è di tipo a banda larga: la frequenza del testing AE di oggetti metallici è nel campo degli ultrasuoni, tipicamente tra 100 e 300 KHz.

Il segnale AE porta con se una certa quantità di informazioni che lo caratterizzano, individuandone l'origine e la provenienza. Durante la deformazione plastica le dislocazioni si muovono attraverso il reticolo del cristallo: questi movimenti producono AE, ma la maggior parte di questi processi (eccetto il twinning) hanno un'ampiezza molto bassa, la quale può essere misurata in maniera attendibile solo con un sensore posto a breve distanza e in una prova di laboratorio. Nella maggior parte dei casi vengono prodotti segnali continui piuttosto che *burst*. I *burst* sono impulsi o pacchetti di onde corte, cioè il tipo di segnale preferenziale su cui si basa la tecnica AE.

L'Emissione Acustica è una tecnica passiva ricettiva che analizza gli impulsi ultrasonici emessi da un difetto proprio nel momento in cui esso si verifica. In contrasto con la tecnica ultrasonora non si deve misurare la risposta ad un'eccitazione acustica artificiale e ripetibile dall'oggetto in prova, poiché vanno valutati i segnali sonori prodotti dai difetti; ogni crescita di un difetto è un evento unico e non può essere riprodotto.

L'Emissione Acustica è una tecnica dinamica. Il segnale si genera quando la cricca cresce oppure quando i bordi della cricca si toccano l'un l'altro, per esempio quando una cricca si chiude dopo il rilassamento dell'oggetto testato. Di solito l'oggetto testato deve essere stressato al di sopra del livello operativo

al fine di ottenere la crescita di difetti locali e fornire emissioni acustiche. Tale tecnica è appropriata specialmente in quei casi dove gli oggetti del test vengono caricati più del normale, ad esempio per i test di impermeabilità e di riqualificazione del recipiente in pressione.

Anche la corrosione sul fondo di recipienti di carburante, o di olio, produce segnali tipo *burst* che si propagano attraverso il liquido fino al punto dove possono essere rilevati. Con le infiltrazioni, l'AE viene prodotta dal flusso turbolento attraverso la fessura stessa. Il *burst* da infiltrazione si manifesta principalmente ad alta pressione. Piccole differenze di pressione causano flusso laminare che emette AE continua con basse ampiezze e piccole distanze di propagazione. Se si sottopongono a carico dinamico compositi delaminati, si produce il distacco di giunzioni incollate, si rompono fibre di rinforzo ecc., si produce AE che può essere analizzata per testare e monitorare le rispettive strutture.

1.2.3 PROPAGAZIONE DI SEGNALI AE

Si è detto che un breve e transitorio evento AE viene prodotto da un rilascio molto veloce di energia elastica dovuto al movimento di una dislocazione. Tale dislocazione locale è la sorgente di un'onda elastica che si propaga in tutte le direzioni (è simile a un terremoto con l'epicentro nel difetto, ma su scala microscopica). Su una superficie piana l'onda si propaga sotto forma di cerchi concentrici attorno alla sua sorgente (Fig. 1). Durante la propagazione l'onda si attenua. La massima distanza alla quale l'evento AE può essere ancora rilevato dipende da vari parametri legati alle proprietà del materiale, alla geometria del corpo, al suo contenuto, all'ambiente ecc. Su superficie metallica piana o

cilindrica, gli eventi possono essere ancora rilevati a distanza di alcuni metri, il che è uno dei grandi vantaggi di questa tecnica e pertanto l'AE testing può effettivamente coprire aree che non sono accessibili con altri metodi di indagine.

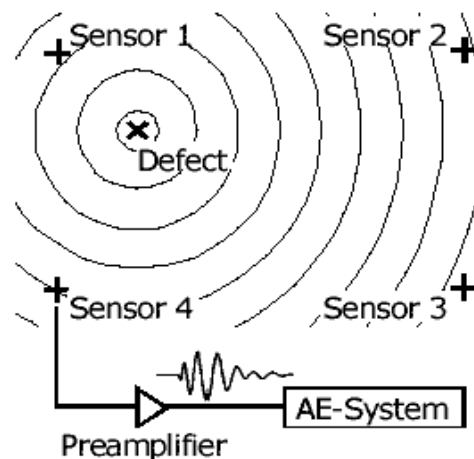


Fig. 1- Propagazione del suono

In funzione della posizione della sorgente, l'onda raggiunge il sensore con un certo ritardo. La posizione della sorgente può essere calcolata usando i differenti tempi di arrivo sulle varie sonde posizionate sul componente. Sfruttando la capacità di calcolo di un normale personal computer, la posizione può essere determinata in tempo reale, contestualmente alla prova, ed i risultati possono essere illustrati con strumenti grafici su un display nella maniera di cui in seguito si tratterà dettagliatamente.

Nella figura 2 si può vedere come, idealmente, si possa localizzare una sorgente AE in una sola dimensione con una semplice misura di tempo di arrivo del segnale, ove siano:

x : distanza della sonda 1 dalla sorgente;

c : velocità del suono nel mezzo;

Δt : ritardo relativo del segnale;

$t \cdot c$: distanza tra le sonde.

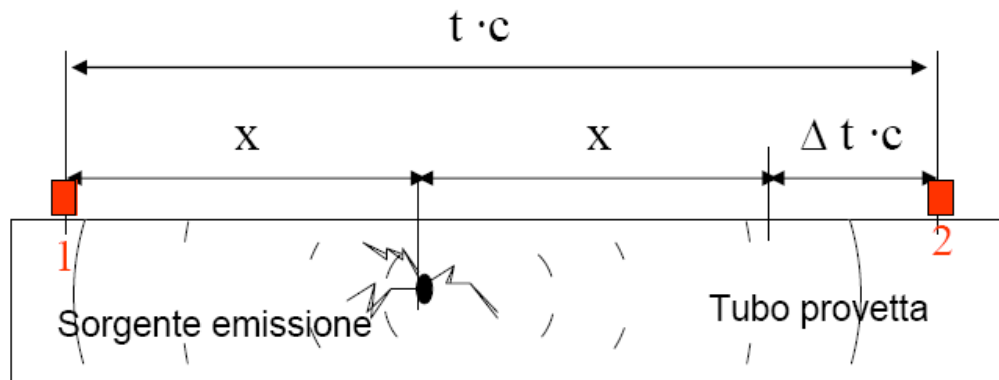


Fig. 2 - Schema di misura e calcolo della posizione delle sorgenti in base ai tempi di arrivo del segnale

La sorgente si localizza (sulla congiungente delle sonde) attraverso la semplice relazione:

$$x = (t \cdot c - \Delta t \cdot c) / 2$$

Se per determinare la posizione della sorgente in una sola dimensione (lungo una retta) due sensori sono sufficienti, per localizzarla in due dimensioni (su una superficie o un piano) ne occorrono almeno tre, in tre dimensioni ne sono richiesti almeno quattro.

La localizzazione della sorgente è uno strumento estremamente potente nell'analisi dell'emissione acustica e può essere utilizzato per monitorare una struttura estremamente larga con un numero minimo di sensori. Ciò rappresenta un notevolissimo vantaggio; ad esempio, nel caso di contenitori specie quando sono isolati dall'ambiente, dal momento che sono richiesti pochi fori di accesso per il posizionamento dei sensori necessari alla verifica dell'integrità strutturale del recipiente stesso. Tutte le altre tecniche di controllo

non distruttivo richiedono che tutto l'isolamento venga rimosso per effettuare un'ispezione completa, rendendole molto più costose della tecnica AE.

1.2.4. TIPOLOGIE DI SEGNALI: SEGNALI TRANSITORI E SEGNALI CONTINUI

Di base ci sono due tipi di segnali AE, distinti come segnali transitori e continui. Nei segnali transitori, anche chiamati *burst*, i punti di inizio e di fine si distinguono chiaramente dal rumore di fondo. Nei segnali AE continui si possono osservare variazioni di ampiezza e frequenza ma il segnale stesso non ha un inizio ed una fine facilmente individuabile. La fig. 3 mostra un esempio di entrambi i tipi di segnale.

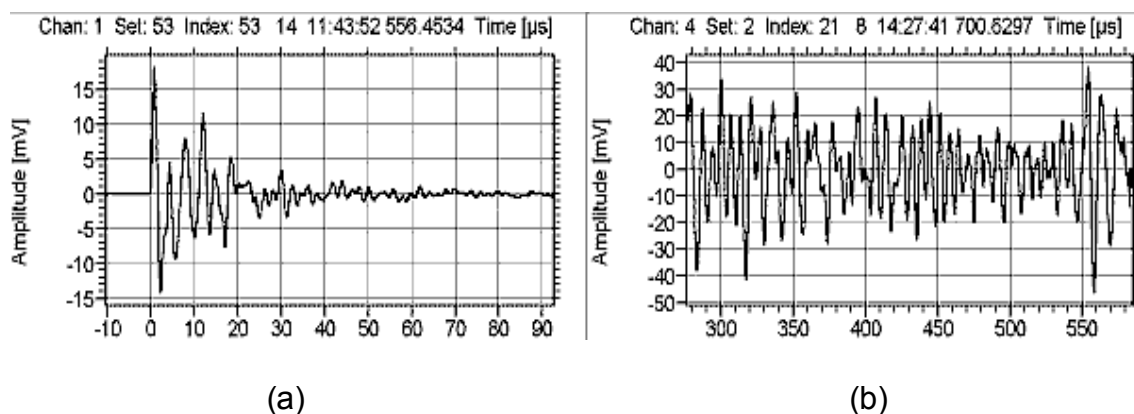


Fig. 3: Segnale AE (a) transitorio e (b) continuo

I segnali utili per i test AE di recipienti in pressione di grosse dimensioni sono segnali di tipo *burst* (ossia transitorio) che si originano dall'innescò di una frattura o dalla crescita di una cricca. I segnali continui sono per la maggior parte segnali indesiderati (rumore, *noise*), come una frizione o un rumore di flusso, ma anche i *burst* possono essere segnali di interferenza: per esempio il rumore di brevi frizioni o scariche elettriche. Spesso il rumore di fondo è proprio il rumore elettrico del preamplificatore e del sensore.

1.2.5. DETERMINAZIONE DEI TEMPI DI ARRIVO (ARRIVAL TIME)

Uno dei compiti principali di un sistema AE è convertire il *burst* in set di dati compatti ed eliminare il rumore di fondo, che è più o meno continuo. Per questo motivo nei sistemi AE si stabilisce una soglia di accettabilità (*threshold*) oltre la quale si ritiene avvengano gli eventi rilevanti.

La soglia deve essere configurata (*set*) dall'utilizzatore al valore più opportuno. Se il segnale AE supera la soglia in entrambe le direzioni delle ordinate (positiva e negativa) significa che si ha l'inizio di un *hit* (identificazione di un *burst*)

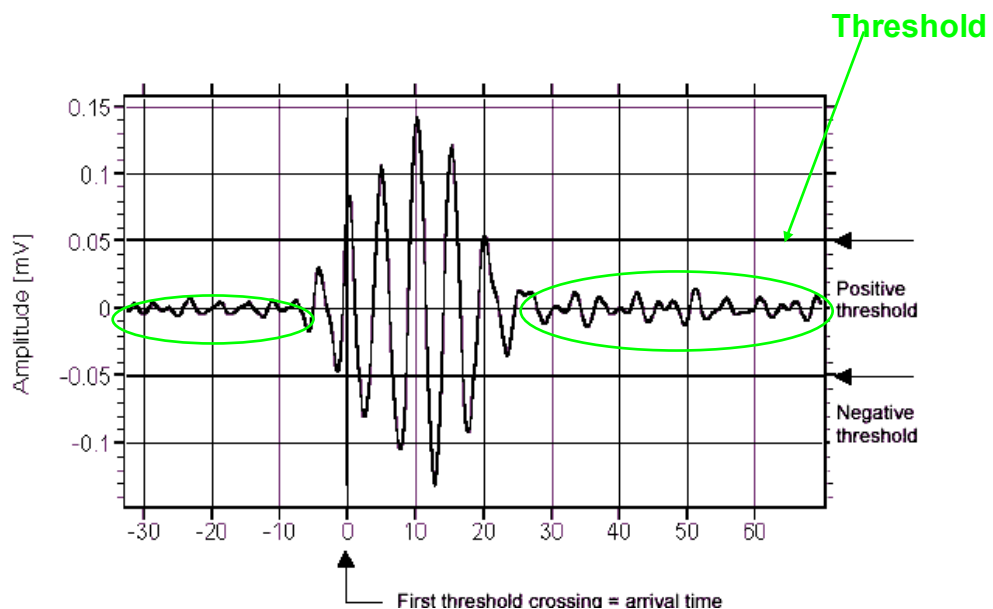


Fig. 4: Determinazione del tempo di arrivo

Il tempo del primo superamento della soglia è chiamato tempo di arrivo (*burst arrival time*) ed è necessario per il calcolo della posizione della sua sorgente.

La forma dell'onda come descritta in fig. 4 si produce unendo i singoli punti, detti campioni (*samples*). Essi corrispondono a singole misure effettuate ad intervallo di tempo costante. I sistemi digitali campionano il segnale AE, ad esempio, ogni 100 ns (dieci milioni di volte al secondo), ovvero con una

frequenza di 10 MHz. Il tempo nei diagrammi di fig. 4 è espresso in μs e ogni intervallo di 10 μs contiene 100 campioni. Un pacchetto d'onda di 100 μs come mostrato sopra è composto dunque da più di mille campioni: ne segue che per l'acquisizione di un singolo *burst* è necessario un sistema ad elevata velocità di acquisizione e una grande quantità di memoria buffer, poiché generalmente gli HD non sono sufficientemente veloci da incamerare il segnale con la stessa velocità con cui si forma.

Il threshold viene generalmente individuato fuori dalla fase di prova, quando si ritiene che non debbano risultare eventi AE significativi. Allora si assume che l'emissione rilevata corrisponda al rumore ambientale. Il valore di soglia si fissa immediatamente al di sopra del valore quadratico medio del rumore campionato.

1.2.6 PARAMETRI AE

In casi molto rari l'AE testing si basa solo su pochi *burst*, ma per una valutazione statistica delle diverse forme d'onda è necessario registrare qualche centinaio di *burst*. Occorre determinare i più importanti parametri di ogni forma d'onda al fine di comparare i risultati di una struttura priva di difetti con una difettosa. Le caratteristiche più comunemente usate sono:

- *Arrival time (T)* - tempo di arrivo (tempo assoluto del primo oltrepasso di soglia)
- *Ampiezza di picco (A)*
- *Rise time (RT)* – tempo di crescita (intervallo di tempo tra il primo superamento di soglia e l'ampiezza di picco)

- Duration (D) – durata del segnale (intervallo di tempo tra il primo e l'ultimo oltrepasso di soglia)
- Counts (CNTS) – numero di oltrepassi di soglia di una polarità
- Energy (E) – energia: integrale del quadrato dell'ampiezza (o del valore assoluto) durante il tempo di durata del segnale
- RMS (root mean square) – radice quadrata media del rumore di fondo continuo (prima del burst)

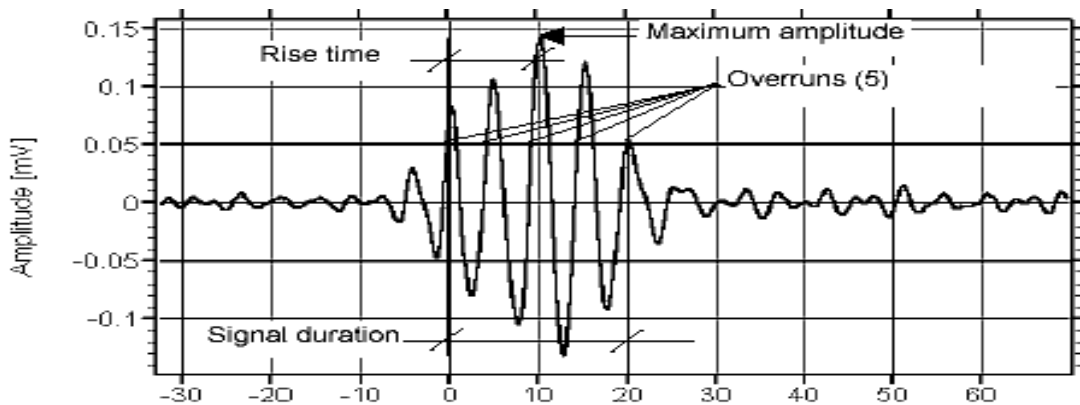


Fig. 5: Caratteristiche dei segnali transitori

I *burst* non sono solo prodotti dai difetti che si vogliono controllare, ma possono essere anche originati da valori di picco del rumore di fondo, il quale qualche volta può superare un *threshold* basso. Inoltre è molto importante determinare quelle caratteristiche capaci di distinguere i *burst* utili da quelli non desiderati. L'*ampiezza di picco* è una delle più importanti caratteristiche del *burst*. Nella maggior parte dei casi *burst* con meno di tre passaggi di soglia e durate minori di 3 μ S possono essere considerati conseguenza di rumore. La maggior parte dei *burst* con ampiezza bassa e lunga durata sono rumori di frizione. Segnali molto brevi potrebbero indicare picchi di rumore elettrico, specialmente se

arrivano a tutti i canali nello stesso istante. Con dei filtri logici possiamo classificare i *burst* sulla base di queste caratteristiche in modo flessibile.

1.2.7 STRUTTURA DEI SEGNALI AE

Il segnale di emissione acustica è costituito da un treno d'onde, nel quale la prima parte è composta dalle onde longitudinali e trasversali, la seconda è data dalla sovrapposizione tra le onde superficiali e quella frazione di onde che sopraggiungono successivamente a causa delle riflessioni multiple, sempre presenti in un mezzo finito. Tali andamenti possono essere facilmente riconosciuti nell'esempio di segnale mostrato in figura 6:

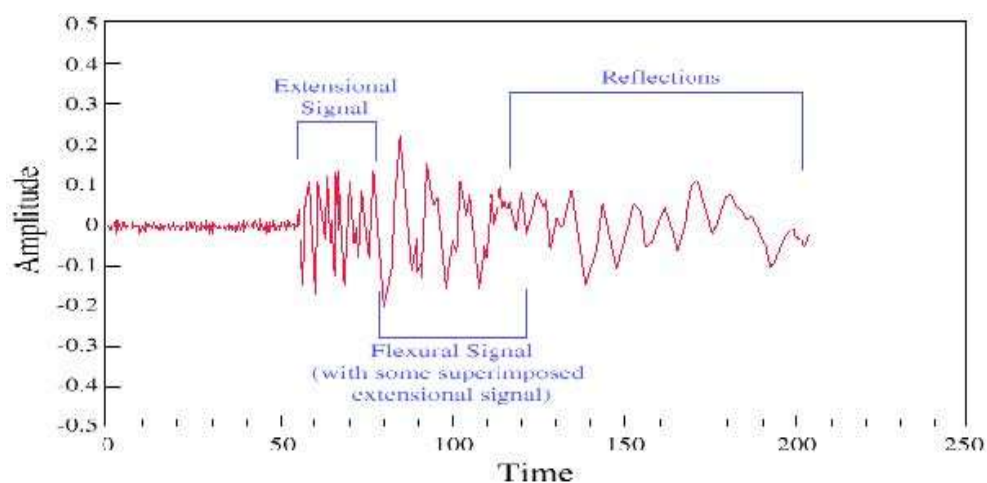


Fig. 6 - Esempio di segnale di AE nel quale sono evidenziate le diverse componenti

In molti casi la determinazione della sorgente, generatrice dell'evento di emissione acustica e del meccanismo che l'ha prodotto, è molto difficile proprio a seguito della sovrapposizione temporale di diversi processi tra cui i prodotti secondari, come le riflessioni. Nel caso, ad esempio, della crescita di fratture in materiali eterogenei, alla sorgente primaria rappresentata dal moto dell'apice della frattura si sovrappongono gli effetti dovuti alla frizione tra le facce formate

dalla frattura stessa o da fratture preesistenti. Inoltre, anche se il segnale proviene da una sorgente primaria, le sue caratteristiche possono essere alterate o rese più rumorose (“colorate” come si dice in gergo) da fattori legati alla propagazione delle onde nel mezzo. In particolar modo, grandi difetti preesistenti agiscono da risonatori e da centri di diffusione, modificando il segnale proveniente dall’apice della frattura. Infine, regioni con minore resistenza alla frattura o differente composizione possono avere un comportamento più fragile con conseguente aumento dell’ampiezza dei segnali. Come si può notare da quanto detto finora, la natura del fenomeno di emissione acustica è estremamente articolata. In generale si può dire che i segnali AE si presentano come impulsi isolati nel tempo, che formano un insieme discreto oppure sovrapposto ad uno spettro continuo, dovuto sia alla dispersione del mezzo, sia ad altre cause interne come viscoplasticità, attrito interno e altro. Ciò è ad esempio evidente nel caso della tornitura dei metalli, dove si ha una serie ravvicinata di impulsi di relativa ampiezza (burst), sovrapposti ad un segnale continuo di ampiezza minore.

1.2.8 PARAMETRI ESTERNI

I parametri esterni, quali la pressione, le sollecitazioni o la temperatura legate alla prova, si usano come riferimento per i dati AE misurati. Un canale parametrico è un segnale elettrico di ingresso DC, il quale rappresenta il valore in corrente del corrispondente parametro esterno. La fig. 7 mostra un esempio di una comune esposizione del numero totale di eventi e della pressione rispetto al tempo.

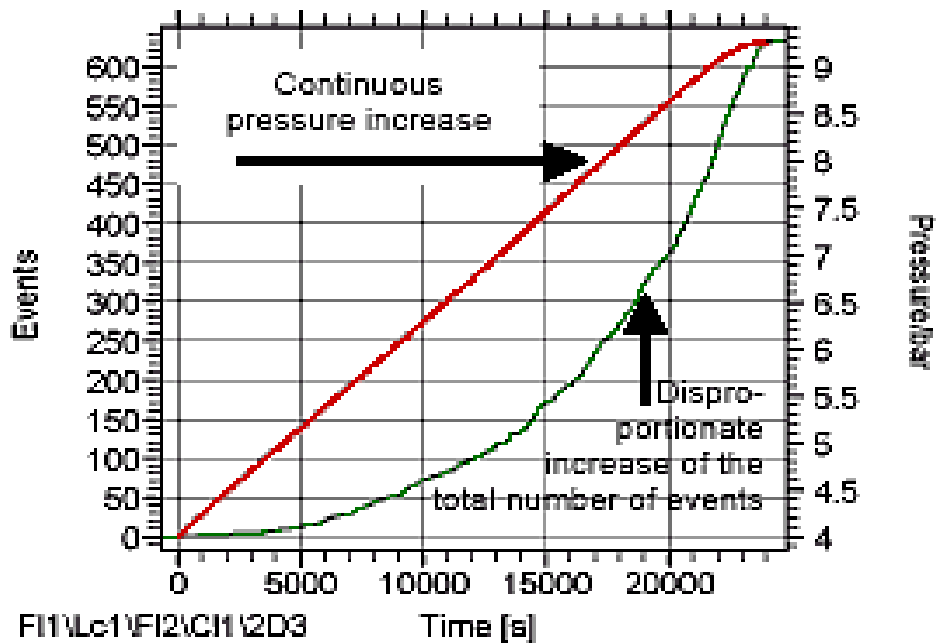


Fig. 7: Eventi (curva a destra) e pressione (curva a sinistra) vs tempo

In tal modo è più possibile individuare una corrispondenza tra eventi AE e fenomeni fisici nel contesto dell'evoluzione temporale.

1.2.9 LA CATENA DI PROCESSO AE

In questa parte si fornisce un'anticipazione logica dei passi da seguire durante la generica sessione di AE testing. Fondamentalmente il processo si articola nei seguenti passaggi come descritto nello schema in fig. 8.

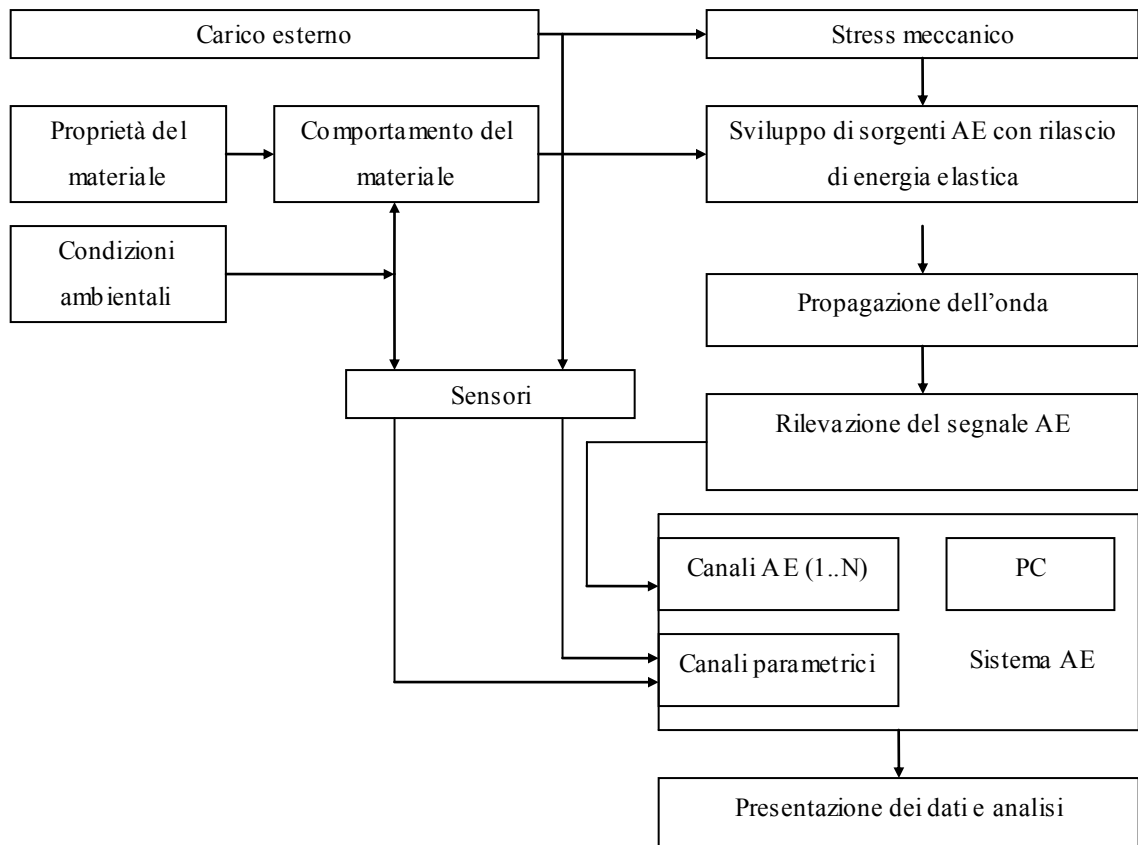


Fig. 8: La catena di processo AE

Come si vede in questa rappresentazione schematica, bisogna produrre uno stress meccanico all'interno del campione. Il comportamento del materiale ed il punto di inizio di rilascio di energia elastica, dovuto per esempio alla formazione di una cricca, sono influenzati principalmente dalle proprietà del materiale e dalle condizioni ambientali. L'onda elastica che si propaga attraverso il materiale viene identificata e convertita in un segnale elettrico dai sensori AE. L'AE System processa il segnale, converte i pacchetti d'onda ricevuti in set di dati, determina le posizioni delle sorgenti, calcola statistiche e fornisce rappresentazioni numeriche e grafiche o simboliche. I cosiddetti canali parametrici forniscono misure delle condizioni ambientali e/o del carico esterno.

1.2.10 GLOSSARIO

Questa sezione fa riferimento ad alcuni termini standard (EN 1330-9) definiti da un gruppo di lavoro del CEN TC 138.

Tabella I: Termini standard (EN 1330-9)

AE:	Un'onda elastica transitoria prodotta dal rilascio di energia elastica durante certi processi
AE-event:	Evento fisico che produce AE, ad esempio una formazione di cricca
AE-source:	Origine fisica di uno o più eventi AE. Questo può essere per esempio una crescita di cricca, passo per passo. Ogni incremento di cricca comporta un incremento di AE.
AE signal:	Il segnale elettrico che risulta al sensore dell'AE
Transient signal, burst:	Un segnale AE di cui è chiaramente identificabile l'inizio e la fine
Hit:	Un innesco (burst) identificato dall'AE system
AE-activity:	Verificarsi del segnale AE come risultato dell'AE
AE-intensity:	La resistenza del segnale AE, ad esempio in unità di energia o ampiezza
AE channel:	Il singolo sensore AE che include gli strumenti associati per l'acquisizione e la misura dei segnali AE = catena di misura

1.2.11 Il sensore: conversione dell'onda meccanica in segnale elettrico

I sensori piezoelettrici sono quelli maggiormente appropriati per la tecnica AE. Essi sono robusti e più sensibili rispetto ad altri tipi di sensori (come i capacitivi, elettrodinamici o laser-ottici).

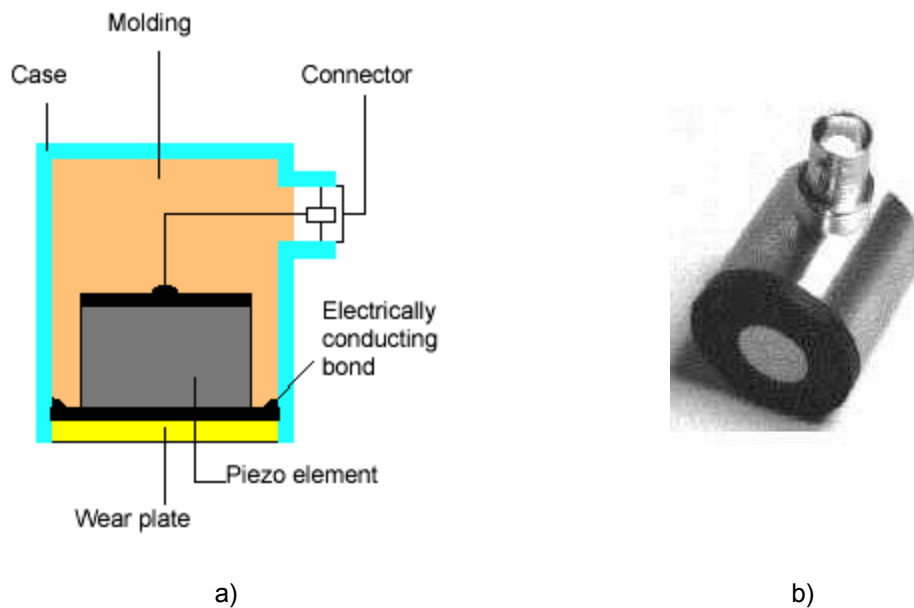


Fig. 10– a) Setup di base per un sensore AE; b) Sensore AE con preamplificatore integrato

La frequenza di risonanza del sensore determina indirettamente il campo spaziale del sensore: si vede infatti dalla curva di sensibilità della fig.11 come le alte frequenze si attenuino più velocemente e abbiano, quindi, una distanza di rilevamento più piccola. In altre parole, maggiore è la frequenza di risonanza del sensore, minore è la distanza dalla sorgente di AE cui il sensore deve essere posto per percepire il segnale, ossia, ridotto è il campo spaziale del sensore.

Nel caso in cui siano richiesti sensori con alta sensibilità (es. nel campo intorno ai 25 KHz), è molto importante limitare le sorgenti di rumore. Spesso i sensori

già contengono un preamplificatore e vengono posizionati sul corpo utilizzando agganci magnetici, se possibile. Il segnale AE pre-amplificato viene trasmesso al sistema di acquisizione per mezzo di un cavo di segnale. Tale cavo può avere una lunghezza fino ad alcune centinaia di metri.

La sensibilità del sensore piezoelettrico può raggiungere valori al di sopra dei 1000 V/ μm . Uno spostamento di 0,1 pm genera 100 μV e può essere chiaramente distinto da un rumore elettrico.

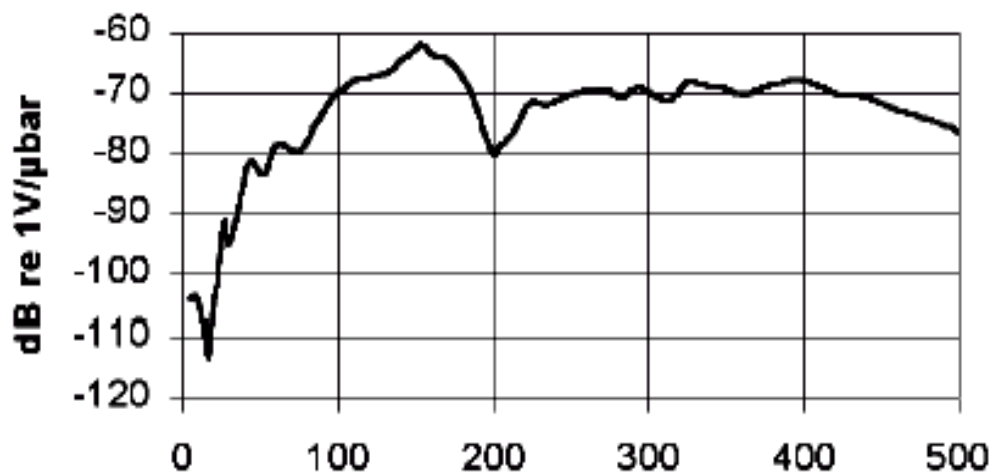


Fig. I.11 - Risposta in frequenza di un sensore risonante a 150 KHz

La sensibilità dei sensori viene mostrata sotto forma di diagramma di risposta in frequenza (vtaggio di uscita vs frequenza).

In fig.12 la sensibilità è data in dB (riferiti a V/ μbar). Quindi -60 dB vorrebbero significare un vtaggio di uscita di 1 mV, se il sensore fosse eccitato da una pressione sinusoidale di 1 μbar (ampiezza di picco) alla frequenza dell'asse orizzontale (per esempio in una vasca di acqua).

Si tenga presente che -60dB significa un fattore di 10^{-2} .

1.2.12 Cavo sensore-preamplificatore

- Non è richiesto con sensori con preamplificatore integrato.

- Connette il sensore al preamplificatore.
- Non dovrebbe essere più lungo di 1.2 mt (a causa del carico capacitivo sul sensore).
- E' solitamente molto sottile e sensibile poiché i connettori dei sensori sono miniaturizzati.
- Non deve essere piegato con angoli ristretti.
- Non bisogna mai applicare un carico di tensione, specialmente ai connettori.
- Potrebbe condurre rumore acustico indesiderato attraverso i connettori dell'elemento piezoelettrico.

1.2.13 Preamplificatore

Il preamplificatore può essere un'unità separata o integrata nel sensore.

Requisiti fondamentali:

- Basso rumore di ingresso per distinguere segnali di minor ampiezza del sensore dal rumore elettronico.
- Ampio range dinamico per processare elevate ampiezze senza fenomeni di saturazione.
- Ampio campo di temperatura operativa per applicazioni in corrispondenza di contenitori a bassa temperatura o a temperature di transizione da comportamento fragile a utile.
- Voltaggio di alimentazione usuale: 28 v D.C. attraverso cavo di segnale.

1.2.14 Cavo preamplificatore-unità AE

- Cavo coassiale, solitamente RG58 C/V.

- Impedenza 50 Ohm, con connettori BNC a entrambi i terminali.
- Lunghezza fino ad alcune centinaia di metri.
- Trasmette segnale AE, alimentazione D.C. e impulso di calibrazione per il test di accoppiamento del sensore.

1.2.15 Filtro di frequenza

Il filtro di frequenza si utilizza per eliminare campi di frequenza indesiderati (e le sorgenti di rumore) e adatta il processo di misura ai requisiti dell'applicazione.

- 20 – 100 KHz per i test di fondi di recipienti in pressione (per il rilevamento di fessure o corrosione);
- 100 – 300 KHz per i test di integrità di componenti metallici;
- fino a 500 KHz per i materiali compositi;
- Al di sopra dei 300 KHz i campi spaziali sono notevolmente ridotti dall'assorbimento delle frequenze da parte del materiale (occorrono distanze più piccole tra i sensori).

I moduli di filtro sono facili da cambiare. In opzione, il range di frequenza desiderato può essere selezionato tramite il software al fine di adattare il sistema ai requisiti necessari senza modificare le elettroniche di misura (ad esempio per passare dai test di fondi di recipiente a test di integrità).

1.2.16 Il convertitore A/D

Il convertitore A/D si utilizza per digitalizzare il segnale AE che ha oltrepassato la frequenza di soglia. E' necessario un ampio spettro dinamico dal momento che *burst* intensi nelle vicinanze producono ampiezze molto più alte di deboli a grande distanza. La richiesta di fedeltà sulla catena di misura completa e

specialmente sul convertitore A/D nel rispetto del campo dinamico e nel rapporto di campionamento è enorme: i segnali delle sorgenti deboli a grossa distanza devono essere discriminati dai rumori elettronici così come i segnali provenienti da sorgenti forti a breve distanza non devono saturare il campo di misura. Grazie ai progressi nella microelettronica, tale requisito è stato soddisfatto soltanto negli ultimi anni. La fig. 12 mostra un segnale di ampiezza alta e bassa, come è stato digitalizzato dall'AE system (AMSY4, VALLEN-SYSTEM) nel campo di misura di ± 100 mV.

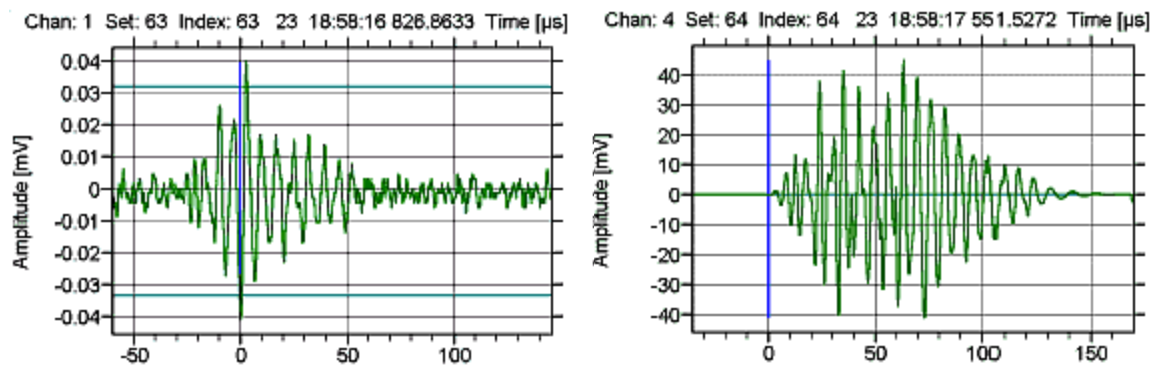


Fig. I.12 - Dinamiche del segnale AE: bursts con ampiezza di 40μV (a sinistra) e 40mV (a destra)

La tecnica AE comporta grandi richieste non solo nel campo dinamico, ma anche nella velocità di acquisizione al fine di ottenere, per esempio, la massima ampiezza direttamente dai campioni tramite convertitore A/D (ADC) velocemente e senza processi di calcolo estesi; anche le frequenze di segnale che interessano richiedono un grado di campionamento di 5-10 MHz. La figura che segue mostra il tratto del *burst* con la massima ampiezza a 63.2 μs. Ogni campione è mostrato come un pallino. Si possono contare 5 punti ogni μs e dunque dedurre che la curva è stata costruita con una frequenza di

campionamento di 5 MHz. Con una frequenza dimezzata, il punto di misura a 63.2 μs andrebbe perso, producendo un errore di misura addizionale di qualche percento. Se il campione a 59.6 μs andasse perso, il numero di superamenti di soglia sarebbe troppo basso rispetto a quell'unico campione che supera la soglia positiva a 32 μV .

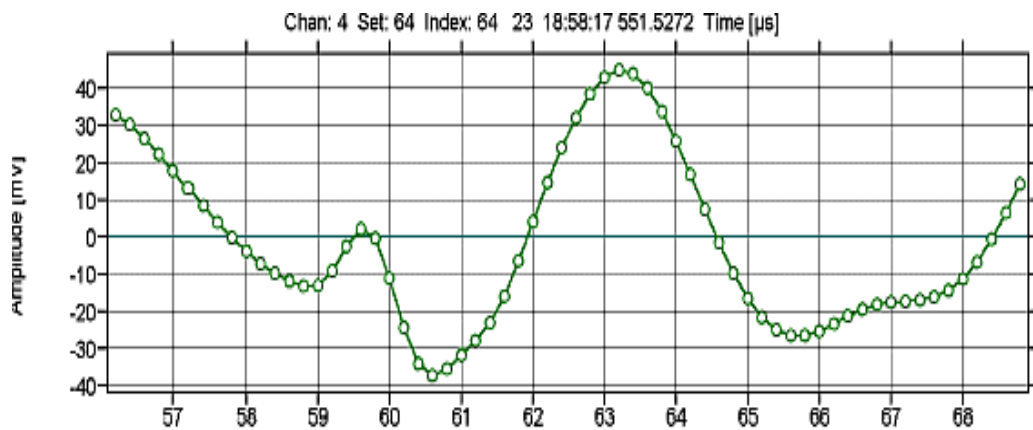


Fig. 13 - Selezione della massima ampiezza a 63 μs

1.2.17 Il registratore di transitori

Per ottenere una migliore comprensione dei segnali AE e disegnare le curve come nelle figure di sopra, talvolta si registra la forma d'onda completa, anche se questo richiede una maggior quantità di memoria. La propagazione dell'onda può essere estremamente complessa. La più avanzata ricerca per ottenere miglioramenti per l'applicazione delle tecniche di test AE sta tentando di utilizzare tali forme d'onda complete, ottenibili tramite registratori di transitori. Pertanto, un enorme potenziale di miglioramento è prevedibile sin da oggi. Il registratore di transitori è attivabile sul singolo canale.

1.2.18 Il data buffer

Il data buffer previene la perdita di dati in caso la CPU sia già occupata in altre operazioni e non sia temporaneamente pronta ad accettare altri dati. I Windows PC di oggi sono estremamente potenti ma non sono fatti per processare in

tempo reale. I buffer esterni sono molto importanti per questi sistemi che utilizzano i vantaggi dei sistemi operativi windows standard (memoria dell' AMSY5: circa 100 KHITS AE; 8 MB /CANALE TR). A questo punto il numero di canali che lavorano in parallelo sui bus di un sistema AE è limitato solo dalle dimensioni del case del sistema. La VALLEN SYSTEM GMBH ha realizzato i sistemi AMSY4 capaci fino a 144 canali, che sono richiesti se un artefatto di grosse dimensioni deve essere monitorato sotto carico.

1.2.19 Personal computer e software

Gli attuali sistemi AE utilizzano computer che forniscono un menù guida per i parametri in ingresso ed un sistema di controllo. Un sistema di aiuto on-line fornisce un accesso veloce per facilitare i test e l'utilizzo del software. Il primo risultato di un'acquisizione di dati è proprio un file che contiene le caratteristiche di tutti i *burst* di tutti i sensori ed i parametri esterni.

Se la forma d'onda completa deve essere immagazzinata viene creato un altro file. Durante il test i dati sono analizzati in linea e mostrati cosicché l'operatore può immediatamente riconoscere il possibile sviluppo del difetto all'interno dell'oggetto testato. Egli potrebbe, allora, fermare la crescita del carico con lo scopo di minimizzare possibili pericoli per l'uomo, l'ambiente circostante e l'oggetto stesso del test. I compiti del PC sono:

- acquisizione dati ed immagazzinamento (tutti i dati vengono salvati);
- analisi dati;
- applicazione del filtro logico;
- calcolo locazione e raggruppamenti (*clustering*);
- statistiche;

- mostrare su display i risultati graficamente e numericamente;
- *self-test* del sistema hardware;
- test di accoppiamento sensore, registrazione della risposta in frequenza del sensore;

1.2.20 Il test di accoppiamento del sensore (autocalibrazione)

Utilizzando questa funzione l'accoppiamento del sensore può essere verificato automaticamente. Un canale trasmette un impulso elettrico di prova al rispettivo sensore. Questo sensore emette un'onda meccanica, che viene rilevata in prossimità del sensore dal medesimo e dagli altri eventualmente presenti a distanza utile. Dopo 4 impulsi di prova, il successivo sensore diviene emettitore. Il valore in ampiezza dei segnali così ricevuti permette di dedurre conclusioni sulla qualità dell'accoppiamento. La tavola sotto riportata mostra un test di accoppiamento di sensori su 6 canali.

	1	2	3	4	5	6
1	83	84	80	85	69	77
2	86	88	94	94	94	94
3	80	94	88	94	86	94
4	82	94	93	88	92	92
5	69	93	86	91	88	84
6	73	94	94	90	85	88

File: 7839n826.pri Done Amplitude Average [dB]

Fig. 14 - Tavola di calibrazione

Lettura campione: Riga 6 colonna 1, valore 73 dB. Ciò significa che l'onda emessa dal canale 6 ha un'ampiezza di 73 dB, quando perviene al canale 1. Il test automatico di accoppiamento viene eseguito prima e alle volte dopo la prova, allo scopo di verificare una costante qualità dell'accoppiamento.

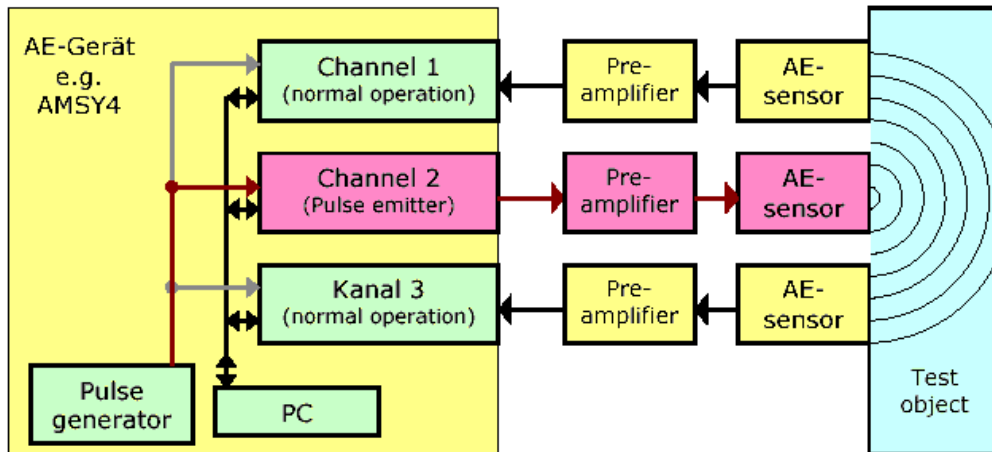


Fig. 15 . Diagramma del test automatico di accoppiamento del sensore

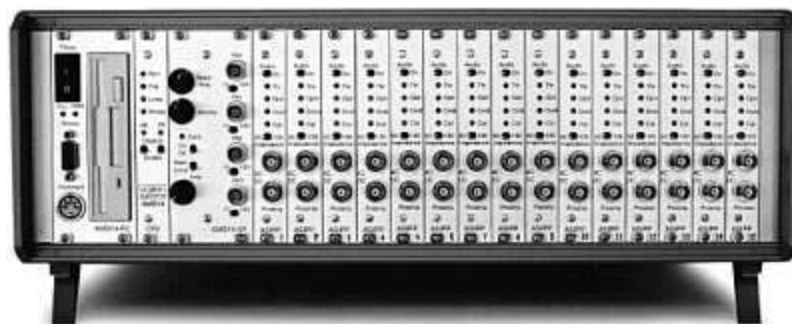


Fig. 16 - AMSY4 Sistema con 15 canali AE, moduli plug-in (ASIPPs)

La figura 16 mostra la vista frontale di un sistema AE standard, modulare, a 15 canali (modello AMSY4 della VALLEN SYSTEM GRUBH), utilizzato per l'AE testing dai noti istituti di prova (per esempio TÜV Austria, TÜV Rheinland, TÜV Suddenschland, Delta-test e altri) ed anche nel presente lavoro.

1.3 LE IPOTESI STANDARD SUI MATERIALI E SULLE MISURE. PROBLEMATICHE RELATIVE AI MATERIALI COMPOSITI.

Le ipotesi su cui più frequentemente si basano i modelli, in ingegneria, come nella fisica o nella chimica, contengono per lo più richiami a condizioni ideali di omogeneità, isotropia e stazionarietà. Ciò significa che il materiale manifesta le medesime proprietà meccaniche e chimico-fisiche indipendentemente dalla geometria del manufatto, dalla collocazione specifica e dal tempo di acquisizione. Dunque le misure sono sempre ripetibili con condizioni identiche (nell'ipotesi di ambiente controllato) nel tempo e nello spazio (dominio spaziale del manufatto).

Questo significherebbe, ovviamente, l'assenza di ogni difetto interno o superficiale derivante dalla fattura o dalla lavorazione, e l'assunzione di un modello microstrutturale standard del quale si possa conoscere con esattezza ogni proprietà.

Si assume, per di più, che l'azione della misura non alteri alcuna proprietà del materiale stesso e che non ci siano interazioni con gli strumenti.

Ciò detto, si ha un'idea di quella che è una misura ideale, il cui errore medio è determinabile statisticamente con una certa precisione, e che in molti casi approssima bene le misure eseguite sui materiali metallici o ceramici, dotati di una elevata omogeneità e isotropia meccanica.

Eliminando le ipotesi di isotropia e omogeneità si deve gioco forza rinunciare alla pretesa di poter anche determinare gli errori di misura in un intervallo statistico noto, giacché la geometria e la collocazione spaziale non sono più ininfluenti, e dunque affliggono egualmente la misura e il calcolo della deviazione: la conseguenza diretta di ciò è la perdita dell'accuratezza che è

normalmente richiesta dalle maggior parte delle misure ingegneristiche e dunque, di fatto, l'impossibilità di eseguire la misura. Ciò è assolutamente vero se non sono note a priori le leggi che governano le fenomenologie del materiale, sia in base alla sua struttura che al tipo di eventi che vi si possono manifestare.

I materiali compositi si collocano, per loro stessa definizione, nella categoria dei materiali anisotropi e disomogenei; il concetto stesso di materiale rinforzato implica la presenza di fasi e componenti diverse sotto l'aspetto geometrico, chimico-fisico e del comportamento meccanico. La maggior complessità della macrostruttura penalizza la sua ispezionabilità ma anche la sua conoscibilità, nonché le fenomenologie occorrenti in termini di danneggiamento. Infatti è noto che le migliori conoscenze sui compositi, fino ad ora, si limitano alle caratteristiche di insieme, mentre per il calcolo dei coefficienti di influenza delle fasi si ricorre ad approssimazioni empiriche derivanti da induzioni statistiche.

La mancata conoscenza della realtà microstrutturale comporta una relativa ignoranza delle interazioni materiali ed energetiche che un'azione di misura può comportare tra materiale e strumentazione. Manca, dunque, una buona conoscenza delle fonti di rumore, dei meccanismi di attenuazione o dei fattori che limitano l'impiego di talune tecniche.

In assoluto questo non significa che non è possibile utilizzare le tecniche di controllo non distruttivo sui materiali compositi ottenendo un'adeguata precisione: tuttavia è necessario verificare i risultati con più misure effettuate con diverse tecniche finché non si ha la ragionevole sicurezza della bontà dei risultati. La pratica soltanto, caso per caso, indica il gruppo di controlli più idonei per ogni materiale e geometria, onde massimizzare la leggibilità della risposta.

In generale è possibile produrre specifici protocolli di caratterizzazione statistica per ogni materiale e fenomeno riconoscibile da applicarsi alle procedure di misura e analisi.

L'esperienza, come dettagliatamente si illustrerà più avanti, ha dimostrato come la geometria, la natura del materiale, le eventuali cure ricevute e lo stato stesso di impiego siano caratteristiche di rilievo nello studio di applicabilità di una tecnica di indagine non distruttiva.

In generale una misura si ottiene per via differenziale confrontando un segnale non disturbato con uno (proveniente dalla stessa sorgente) modificato dall'interazione con il manufatto o più generalmente il campione in esame: un esempio è costituito dalle tecniche spettroscopiche di assorbimento, le tecniche interferometriche, ultrasonore, radiografiche e diffrattometriche. In tutti questi casi al segnale campione si sottrae a quello che ha interagito col materiale, e la traccia risultante fornisce indicazioni sia qualitative che quantitative sul materiale, comprese immagini che derivano dalla proiezione del segnale stesso (ad esempio se il segnale è una radiazione X o γ si ha l'impressione su una lastra) o immagini sintetiche che derivano dall'elaborazione dei dati della misura (A/B/C-Scan con le varie tecniche ultrasonore e impedenziometriche, termografie, ecc.).

Ciascun materiale presenta controindicazioni per una certa tecnica di misura, dovute principalmente alla geometrie d'impiego o alla sensibilità del metodo adottato. Per esempio, le tecniche ultrasonore sono inefficaci su talune vetroresine perché queste presentano carattere di trasparenza su bande molto ampie.

CAPITOLO II

ATTREZZATURE SPERIMENTALI E MATERIALI UTILIZZATI

II.1 Attrezzature di AE e set-up sperimentale

Le apparecchiature e i materiali utilizzati per le campagne sperimentali sono quelle in dotazione presso la sede di Napoli del Centro Interuniversitario per le Tecnologie Innovative dei Beni Strumentali (C.I.R.T.I.B.S.) sito nella facoltà di Ingegneria Federico II di Napoli.

II.1.1 Sistema Vallen

Produttore del sistema è l'azienda tedesca Vallen Systeme GmbH, "The Acoustic Emission Company", che attualmente rappresenta una delle principali e più avanzate aziende nel settore dei CND mediante emissione acustica.

Il cuore del sistema di rilevazione è in sostanza un PC dotato di diverse schede di acquisizione, alle quali pervengono i segnali prelevati dai sensori e preamplificati esternamente, preposto a gestire i software di elaborazione e di analisi.

Il sistema AMSY4 è una macchina compatta, con buone prestazioni di calcolo e completamente digitale. La caratteristica di trasportabilità facilita le operazioni di misura in varie sedi e in contesti diversi.



**Fig. 1: La stazione AE montata su un carrello può essere trasportata sul campo di
impiego**

II.1.2 Caratteristiche esterne del sistema AMSY 4

Questa macchina è dotata di :

- connettori BNC per preamplificatore ed input parametrici;
- LED posizionati sul pannello frontale che forniscono informazioni sullo Status System, quali:
 - threshold crossing (passaggio della soglia di rilevamento);
 - collegamento del preamplificatore;
 - calibration mode;
 - indicatore buffer vuoto/pieno;
 - indicatore attivato/disattivato;
 - accesso HDD;
- un generatore di impulsi per l'autocalibrazione, con ampiezza fino a 400V;

- un dispositivo audio a soglia e volume regolabile che renda udibile il segnale in fase di acquisizione, mediante una conversione di frequenza via software.



Fig. 2: Vista frontale dell'unità centrale dello strumento (versione a 15 canali)

Più sistemi AMSY 4 possono essere collegati e sincronizzati tramite un sistema di connessione di tipo “Master – Slave”.

L'AMSY si alimenta con un'unica alimentazione (Unique Power Supply) da 100 a 240 V_{AC} , 50/60 Hz.

La versione a 36 canali è attualmente il sistema più compatto nel suo genere disponibile in commercio: 47x50x28 (WxDxH in cm), con un peso di 34 Kg.

La serie AMSY 4 fornisce alte prestazioni sui canali AE, disponendo delle seguenti caratteristiche :

- 8 campionatori (canali) a 16 bit (con convertitore A/D) per canale AE;
- basso rumore, grazie a sofisticate precauzioni di schematura interna;
- possibilità di selezione tra due software indipendenti con moduli di filtro passa alto, 54 Db/ottava, in modo da tagliare il rumore derivante da basse frequenze;
- elevate capacità di elaborazione (420 milioni di operazioni al secondo) tali da permettere l'estrazione delle caratteristiche AE in “REAL TIME”;

- integrazione hardware del valore di tensione in tempo reale per il calcolo della True Energy, e della cumulata del True RMS (rumore di fondo);
- buffer di grandi dimensioni per la registrazione dei dati di transitori (fino a 16 M campioni per canale).

La stessa unità centrale possiede alte prestazioni ovvero buffer di grandi dimensioni, dedicato ai dati temporanei di Hits (100000 Hits standard, opzionale fino a 400000 Hits), input parametrici analogici (2, 4 o 8), indipendenti (16 bit, ADC range ± 10 V o ± 1 V) per il rilevamento di informazioni esterne riguardo il carico, la temperatura, conteggio di cicli di carico (nel nostro caso 4), separazione di eventi dall'incremento/decremento del carico, input digitali per conteggio up/down, indicazione di registrazione dati attivata/disattivata, trigger esterno.

II.1.3 Sensore AE

I sensori AE vengono normalmente distribuiti con un certificato di calibrazione. Tale notifica non fornisce un'immagine completa della risposta in frequenza del sensore che può essere utilizzata per verificare la natura della risposta del piezoelettrico.

Per le prove sono state utilizzate sonde piezoelettriche modello VS150-M, collegate al preamplificatore AEP 3 (di cui più avanti si descriveranno le specifiche).

Questi sensori sono di tipo *multipurpose*, e dunque le loro prestazioni sono adattabili al materiale in esame attraverso la regolazione dei parametri di controllo e di acquisizione dello strumento.

II.1.4 Sensore VS150-M

Il sensore VS150-M possiede le seguenti caratteristiche tecniche :

- frequenza di risonanza: 150Khz;
- range di frequenza: da 100 KHz a 450 KHz;
- range di temperatura di esercizio: da – 50°C a + 100°C;
- dimensioni: diametro 20,5 mm, altezza 14 mm;
- peso: 12g;
- messa a terra: involucro isolato, con rivestimento ceramico integrale per isolamento elettrico;
- materiale del case: Alluminio.



Fig. 3: Sensore Vallen VS150-M

II.1.5 AMSY 4: Specifiche hardware

La catena di misura analogica di ogni canale consiste in un sensore AE, un preamplificatore ed un ASIPP board (Acoustic Signal Pre-Processor), contenuti in un System Case.

Il pick-up estrae il segnale dell'onda meccanica che si propaga fino alla superficie del corpo e genera un segnale elettrico, il quale viene amplificato da un preamplificatore che ne eleva l'intensità e migliora il rapporto segnale/rumore.

Nell'ASIPP il segnale ricevuto dal preamplificatore viene digitalizzato e convertito in una stringa di dati.

Le caratteristiche AE, quali *Arrival Time*, *Rise time*, *Duration*, *Peak Amplitude*, *Energy* e *Counts*, vengono estratti da un *gate array* programmabile (FPGA, è uno stadio ordinatore) all'interno dell' ASIPP.

I dati AE, così come i dati parametrici quali il carico, la temperatura ecc, vengono trasferiti tramite un *bus* (porta di trasferimento dati) dall'ASIPP al DSP (Digital Signal Processor), dove tutti i dati vengono assemblati in *data sets* (pacchetti di informazioni).

La visualizzazione dei dati in varie forme è possibile sia in tempo reale che successivamente utilizzando appositi software di gestione.

II.1.6 Il preamplificatore

Il segnale acustico ricevuto da un sensore AE viene convertito dal piezoelettrico in un impulso elettrico ed inviato ad un apposito preamplificatore.

Da quest'ultimo esce un segnale di tensione amplificato che viene trasmesso lungo un cavo elettrico coassiale all'ASIPP.

Il cavo può raggiungere lunghezze di oltre 150 m (dal momento che possono verificarsi condizioni operative e operazioni remote).

La VALLEN-SYSTEM fornisce due modelli di base di preamplificatori:

- AEP 3
- AEP 4

Le applicazioni AE sono talmente diversificate che un fissato guadagno nel primo stadio della catena di misura potrebbe non essere ottimale per tutti gli impieghi.

Il preamplificatore AEP 3 offre la più flessibile e migliore possibile soluzione per tali richieste, permettendo la regolazione del *gain* tramite software (direttamente dalla consolle del PC), regolandolo da un minimo di 34 dB ad un massimo di 49 dB.

Il *bypass di calibrazione* è un'altra proprietà specifica delle due famiglie di amplificatori: gli impulsi di calibrazione possono essere bypassati al sensore attraverso il preamplificatore.

La maggior parte dei preamplificatori che si possono trovare in commercio non prevedono un sistema a guadagno programmabile, il *bypass di calibrazione* ed il filtro per le alte frequenze, di cui sono invece dotati i preamplificatori VALLEN.

Come è facile immaginare, sistemi sprovvisti di questi strumenti di regolazione avranno prestazioni complessivamente inferiori dal momento che risulteranno più difficilmente adattabili alla specificità dell'analisi da compiere e forniranno in generale segnali più rumorosi o mal amplificati (segnali saturi o troppo deboli e prossimi alla soglia del rumore).

L'AEP 3 dispone inoltre di input *single ended* e *differential*, il che permette di collegare al sistema di acquisizione fino a due sensori in parallelo.

Il preamplificatore AEP 3 possiede le seguenti caratteristiche:

- alimentazione: $\pm 28\text{Vdc}$ attraverso il cavo BNC;
- consumo di corrente: 22mA senza segnale, 60mA a 5V;
- guadagno: programmabile tramite PC da 34,37,40,43,46, o 49 dB;
- range di input: 100mV con 34dB di guadagno; 17.7mV con 49 dB di guadagno;
- connettori di ingresso: BNC coassiale per sensore *single ended*, BNC per sensore differenziale. Il connettore viene selezionato manualmente tramite *switch*;
- impedenza di ingresso: 10K Ω in parallelo a 15pF;
- impedenza di uscita: 50 Ω ;
- tensione di uscita: fino a 5V su 50 Ω ;
- connettore di uscita: BNC,

- alimentazione DC,
- controllo del preamplificatore in *calibration mode*,
- ingresso dell'impulso di calibrazione per il sensore,
- controllo della funzione *programmable gain*;
- modulo *high pass*: plug-in, rimovibile, 54dB/ottava;
- modulo *low pass* : plug-in, rimovibile, 30dB/ottava;
- rumore: minore di 2 μ V RMS, 10 μ V con guadagno di 49 dB;
- calibration bypass;
- dimensioni: 174*79*58 mm;
- temperatura di esercizio: da 5 a 65°C;
- peso: 800 gr;



Fig..4 : Amplificatore AEP3

II.1.7 Processore di segnale acustico (ASIPP)

Collegando al preamplificatore una coppia di connettori BNC si possono mettere in parallelo due canali, con un unico preamplificatore.

Collegando entrambi occorre regolare l'impedenza dell'ASIPP a 100 Ohm, di modo che il preamplificatore veda una impedenza effettiva di 50 Ohm su ciascun canale, valore necessario per effettuare la calibrazione.

Il modulo ASIPP assicura che le componenti di frequenze al di sotto della metà della frequenza di campionamento non possano giungere al convertitore analogico-digitale (ADC).

L'ADC opera ad una frequenza di campionamento di 10 MHz, con una risoluzione di 16 bit (risoluzione di 52 μ V fino a 5V), ed ha un rumore di funzionamento estremamente basso (è fondamentale, evidentemente, che ciascuno dei componenti della catena di misura emetta un rumore di fondo quanto più basso possibile, in modo da non caratterizzare esso stesso l'acquisizione conseguita, falsando il segnale finale e le successive conclusioni). L'ADC converte il segnale AE in una sequenza digitale.

La stringa numerica viene infine inviata all'unità di estrazione FPGA (Field Programmable Gate Array).

L'ASIPP viene utilizzato infine come analizzatore per l'estrazione delle caratteristiche AE dal segnale digitalizzato.

II.1.8 Autocalibrazione

Il processo di autocalibrazione segue il seguente iter:

il sensore, collegato al sistema, emette una serie di impulsi acustici generati dall'apposito dispositivo del sistema. L'onda meccanica si propaga attraverso il materiale, mentre gli altri canali AE ricevono tali impulsi e li convertono in dati AE.

Dopo una sequenza di 4 impulsi, il software preposto seleziona automaticamente il canale successivo, che si comporterà da emettitore.

Il software dell'AMSY 4 può calcolare e visualizzare una tabella della velocità del suono. Il calcolo si basa sulla conoscenza della posizione dei sensori e la differenza temporale tra il primo *threshold crossing* di due canali differenti.

II.1.9 DSP- Digital Signal Processor

Dal momento che il PC lavora sotto il Sistema Operativo WINDOWS, bisogna tenere presente che tale ambiente non compie operazioni in *real time*; per questo motivo è necessario che l'AMSY 4 abbia un buffer di generose dimensioni riservato all'acquisizione, allo scopo di coprire i periodi temporali durante i quali la CPU non è disponibile per l'acquisizione dei dati a causa delle necessità di gestione imposte dal sistema operativo.

Il DSP standard dell'AMSY 4 dispone di un buffer di 4 MB (100000 *Data Sets*), il quale può essere espanso fino a 16 MB.

Negli intervalli in cui non si manifestano arrivi di segnale il DSP calcola la soglia flottante, moltiplicando il valore dell'RMS (rumore di fondo) con un valore eventualmente definito dall'operatore.

L'utente può definire una soglia minima di intensità del segnale rilevato, al di sotto della quale la stessa soglia flottante non può scendere.

II.2 Autocalibrazione

Il software di controllo della strumentazione è prodotto e fornito in licenza d'uso dalla stessa VALLEN-SYSTEME GmbH, e consta di una suite base di programmi per

l'acquisizione ed il trattamento dei dati più un'integrazione opzionale di moduli dedicati all'analisi e alla rappresentazione. Le potenzialità dell'intero pacchetto software sono solo in parte sfruttabili, in quanto il suo impiego è generalizzato, grazie alle estensioni, alle più diverse applicazioni, con sostanziali diversificazioni secondo materiali e geometrie dei manufatti in esame.

II.2.1 Software di acquisizione dati

Il *Vallen Control Panel* è la shell primaria della suite di programmi.

Per l'acquisizione dei dati si può scegliere :

- *Acquisition 32*, per la modalità di acquisizione AE convenzionale e/o quella TR, dotata di analisi di spettro di frequenza (relativa ad un Hit per volta);
- *TR recorder*, per lavorare nella configurazione TR Mode;
- *Visual AE*, per visualizzare diagrammi 2D, 3D con diverse combinazioni di parametri; fornisce anche un listato dei dati acquisiti;
- *Multiplot*, su modello *Visual AE* (compatibile con i software più recenti);
- *Visual TR*, le cui icone di attivazione sono disposte all'interno della sezione TR del Pannello di Controllo;
- *Visual Class* .

II.2.2 Acquisition 32

Acquisition 32 è il programma di acquisizione a 32 bit per l' AMSY 4.

Esso è unicamente preposto all'acquisizione di dati AE, oppure dati AE e TR simultaneamente (in questo caso è necessario disporre di un modulo TR opzionale), e li registra su memoria di massa.

In parallelo, anche durante l'acquisizione, i dati possono essere analizzati e visualizzati in real time, qualora si decida di aprire contemporaneamente il software di visualizzazione *Visual AE*.

Il menù di acquisizione dell'*Acquisition 32* consente all'operatore le seguenti operazioni sui files di dati:

- specificare e rinominare il file da salvare;
- specificare tutti i parametri di acquisizione (acquisition set up);
- attivare e disattivare in ogni istante l'acquisizione;
- avvio della calibrazione (*Calibration Mode*), ed inserimento di commenti (in pratica ad ogni nuova sessione di acquisizione, il software stesso attiva in modo automatico una sequenza di calibrazione per verificare il corretto accoppiamento dei sensori in opera).

Acquisition 32 dispone di una serie di file che registra al termine di ogni acquisizione:

- File primari di dati (sono quelli che vengono indicati con estensione .PRI);
- TR data files (con estensione .TRA);
- File di caratteristiche transitorie (estensione .TRF);
- File di set up per il VISUAL AE (estensione .VAE);
- File di set up per il VISUAL TR (estensione .VTR).

II.2.3 TR Recorder

Qualora non sia installato un modulo TR, questo programma permette di utilizzare l'ASIPP come un registratore di rumori di basso livello (ma non è possibile una simultanea acquisizione di dati AE). Di base è impiegato come registratore di segnali transitori.

Con i menù è possibile regolare i parametri di controllo del dispositivo:

- *TR Setting*: parametri da definire per l'acquisizione delle forme d'onda digitali (ad esempio il rateo di campionamento, la dimensione della pagina ,ecc.);
- *AE Channels*: per il setting di base (ad esempio del *threshold* ,del *gain*, *Hit timing* ecc.), e per il set della forma del segnale (*pre-trigger*, *trigger mode*);
- *Parametric*: consente il setting degli ingressi parametrici; ad esempio vanno impostati il clock di acquisizione, gli intervalli di salvataggio, il contatore di cicli, ecc.;
- *Fronted Filter*: consente di limitare la registrazione di segnali sotto talune condizioni logiche;
- *Pulse*: per la regolazione dell'impulso di autocalibrazione; se ne può stabilire l'ampiezza, il numero ecc;
- *Special*: ulteriori settings, come l'impostazione dell'*Energy Mode*, *True Energy*, o altri parametri di uso specifico;
- *Comments*: per inserire note di testo da salvare insieme ai dati AE acquisiti.

II.2.4 Visual AE

Il *Visual AE* è un software per sistemi operativi a 32 bit funzionante in ambiente WINDOWS finalizzato all'analisi dei dati AE. Supporta un numero illimitato di grafici (2D,3D) su pagine multiple, permettendo ogni tipo di combinazione dei risultati, filtraggio in linea, molti algoritmi di locazione, clustering (raggruppamenti di eventi, oppure di livelli energetici, o di qualsiasi altro parametro di controllo selezionabile), ecc.

II.2.5 Visual TR

Il Visual TR è uno strumento ideale per una visualizzazione accurata della forma d'onda, dotato di un filtro digitale, una sezione per la correlazione tra parametri mediante curve gaussiane; inoltre include un set di strumenti per la classificazione dei dati. Questo applicativo è dotato di un proprio tutorial e di esempi di impiego.

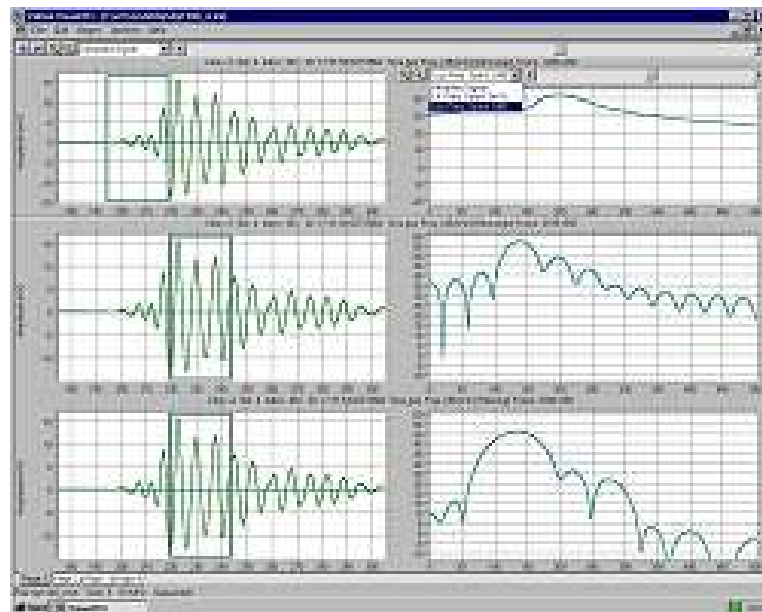


Fig. 5: Schermata di Visual TR in un impiego tipico quale l'analisi in frequenza

II.2.6 Visual Class

Questo programma è una utility che permette di sviluppare un classificatore di forme d'onda, con la finalità di un riconoscimento (ad esempio a fini diagnostici) veloce e con ridotti margini di errore.

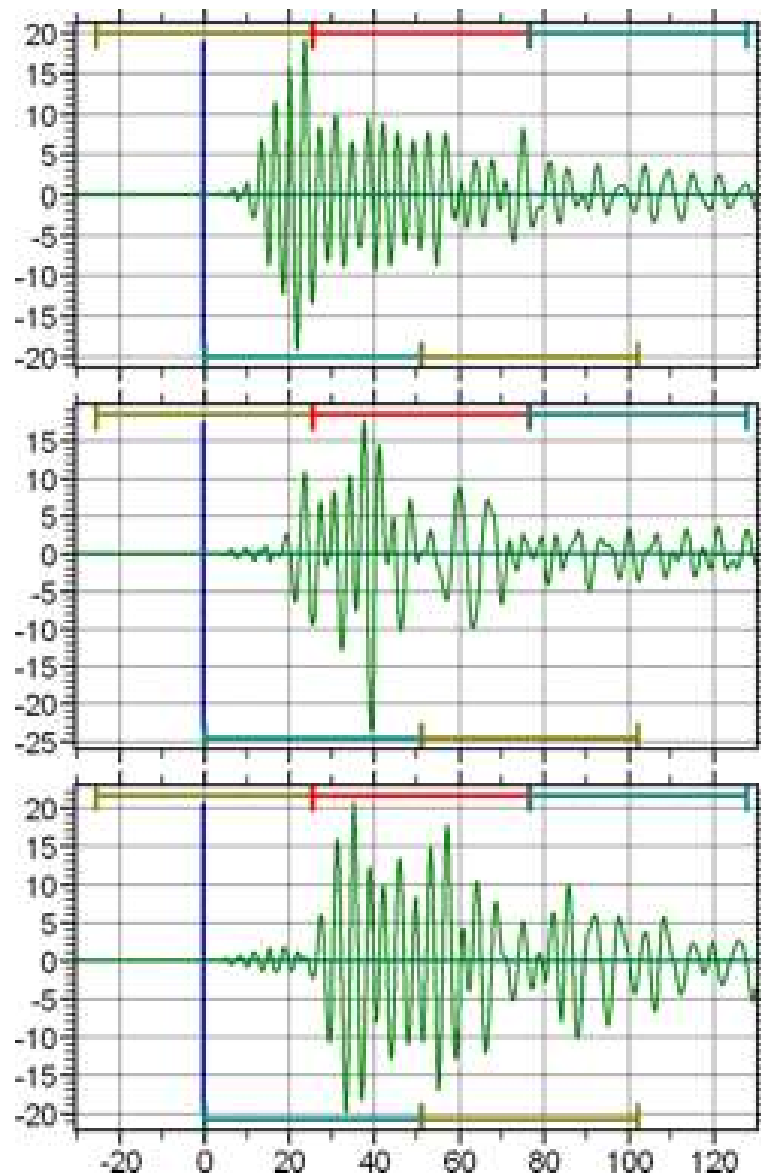


Fig. .6: Diagrammi di classificazione delle forme d'onda

In definitiva, la catena di rilevamento ed analisi dell'ASMY 4 segue questo procedimento :

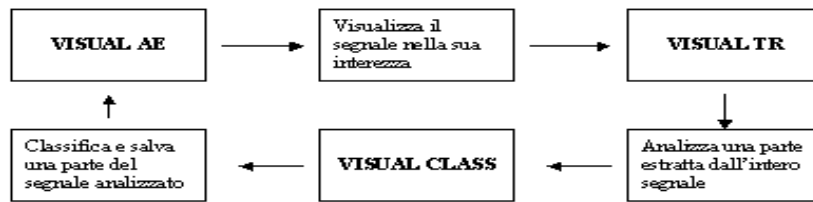


Fig.7: Ciclo applicativo degli strumenti analitici per la gestione dei segnali AE

III.2.7 *Settaggio usato per le prove sperimentali*

Dopo una serie di prove di calibrazione il sistema di acquisizione è stato settato nella seguente maniera:

- Threshold: 28.8 dB (selezionato dopo prova di acquisizione a vuoto).
- Filtro passa alto 95 KHz.
- Guadagno amplificatore 34 dB, a cui vanno sottratti 20 dB per la presenza di una resistenza in parallelo al sensore.
- Tempo di riarmo 0.4 ms.
- Numero di campioni acquisiti per un singolo Hit 1024.
- Frequenza di acquisizione singolo segnale 5 MHz, corrispondente a 0.2µs.
- Pretrigger sample a 200 punti.

Nelle figure III.8 e III.9 si riportano le schermate di impostazione parametri di acquisizione del software. In particolare si tenga presente che il pretrigger ci dice che una volta preso il segnale, questo da una parte ci fornisce l'ampiezza, la durata, il rise time, l'energia e nello store presenta la forma dell'onda; di quest'onda non vengono acquisiti i primi 200 punti dal momento in cui è stato superato il threshold.

Infine bisogna ricordare che è stata utilizzata una resistenza; per cui è vero che c'è un threshold impostato su 28.8 dB, però la resistenza ci da una riduzione di 20 dB del segnale.

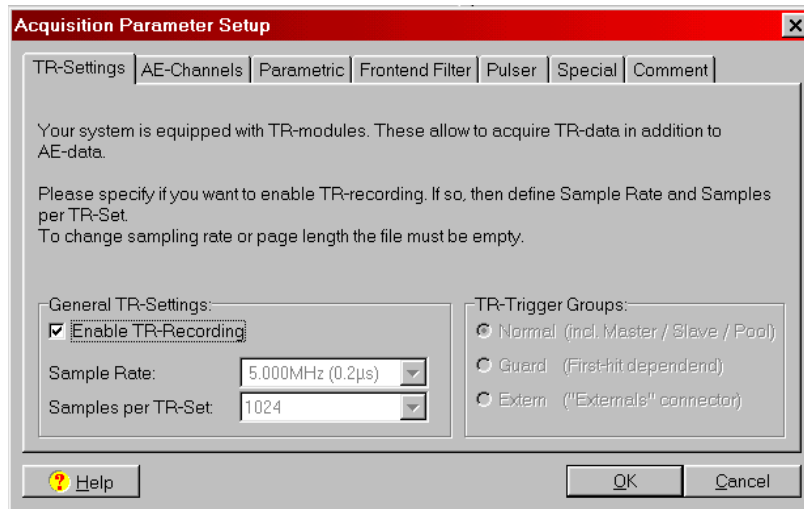


Fig. 8: General TR-settings

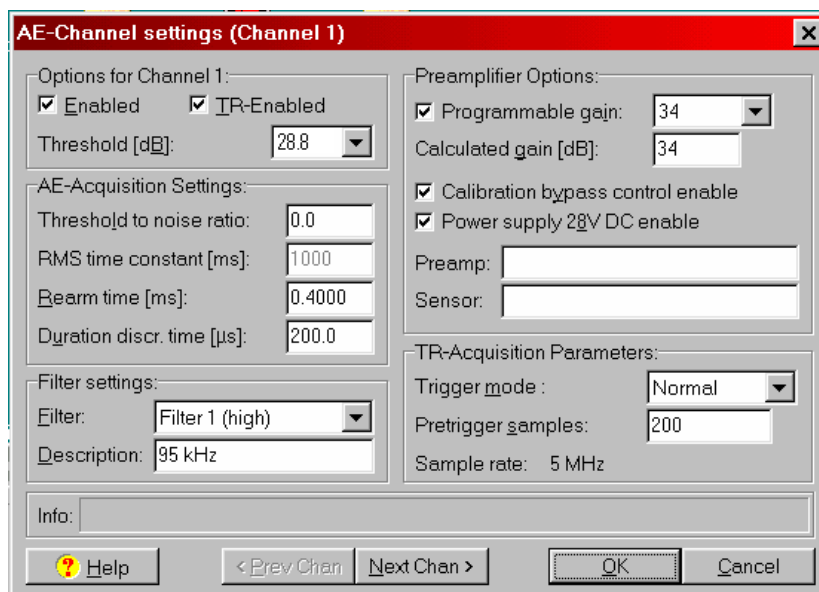


Fig. 9: AE-Channel settings

II.3 Matlab

Matlab è un ambiente interattivo e un linguaggio di calcolo tecnico di alto livello per lo sviluppo di algoritmi, la rappresentazione grafica e l'analisi dei dati e il calcolo

numerico. Utilizzando Matlab è possibile risolvere problemi di calcolo tecnico più rapidamente rispetto ai linguaggi di programmazione tradizionali come C, C++ e Fortran; può essere utilizzato in una vasta gamma di applicazioni, incluse l'elaborazione di immagini e segnali, le comunicazioni, la progettazione di sistemi di controllo, test e misurazioni, l'analisi e la creazione di modelli finanziari e la biologia computazionale. I toolbox (raccolte di specifiche funzioni Matlab, disponibili separatamente) ampliano l'ambiente Matlab per risolvere particolari classi di problemi in queste aree applicative. Questo programma offre agli utenti una serie di funzioni per documentare e condividere il proprio lavoro ed il suo codice può essere integrato con altri linguaggi e applicazioni, dando così la possibilità di distribuire le applicazioni e gli algoritmi Matlab. [17]

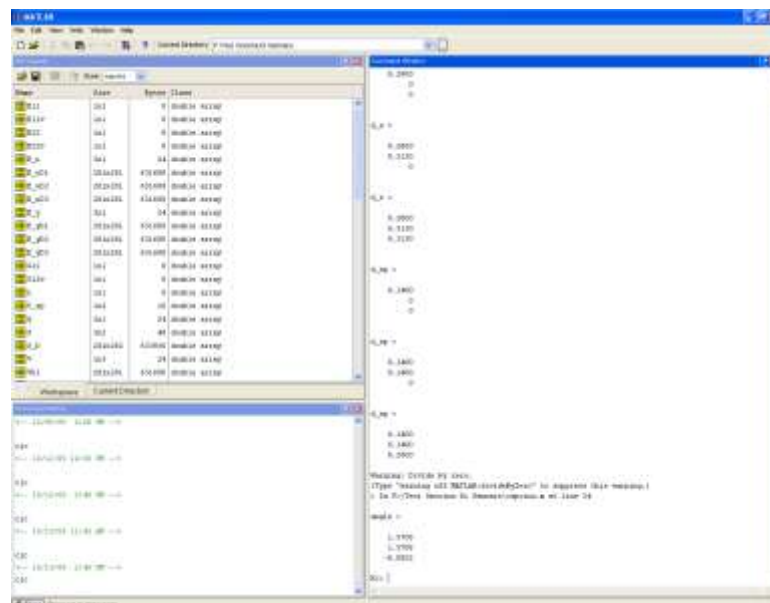


Fig. 10: Schermata di lavoro Matlab

II.3.1 Funzioni principali

- Linguaggio di alto livello per il calcolo tecnico.
- Ambiente di sviluppo per la gestione di codice, file e dati.

- Strumenti interattivi per la risoluzione dei problemi, la progettazione e l'esplorazione iterative.
- Funzioni matematiche per l'algebra lineare, la statistica, l'analisi di Fourier, il filtraggio, l'ottimizzazione e l'integrazione numerica.
- Funzioni grafiche in 2D e 3D per la rappresentazione grafica dei dati.
- Strumenti per la creazione di interfacce grafiche personalizzate.
- Funzioni per integrare gli algoritmi basati su MATLAB con linguaggi e applicazioni esterni come C/C++, Fortran, Java, COM e Microsoft Excel .

11.3.2 Il linguaggio Matlab

Il linguaggio Matlab supporta operazioni su vettori e matrici, fondamentali per i problemi di natura scientifica e tecnica; consente sviluppi ed esecuzioni particolarmente rapidi; con il linguaggio Matlab, è possibile programmare e sviluppare algoritmi più rapidamente rispetto ai linguaggi tradizionali, in quanto non è necessario eseguire attività di gestione codice a basso livello come la dichiarazione di variabili, la specificazione dei tipi di dati e l'assegnazione della memoria; ma allo stesso tempo fornisce tutte le funzioni di un linguaggio di programmazione tradizionale, ad esempio gli operatori aritmetici, il controllo di flusso, le strutture di dati, i tipi di dati, la programmazione ad oggetti (OOP) e le funzioni di debug.

Con Matlab è possibile eseguire contemporaneamente comandi o gruppi di comandi senza la necessità di compilare e linkare, consentendo così di ripetere rapidamente l'esecuzione fino a ottenere la soluzione ottimale.

Per eseguire velocemente calcoli matriciali e vettoriali complessi, Matlab utilizza librerie ottimizzate per il processore. Per i calcoli scalari più generici, genera istruzioni in linguaggio macchina utilizzando la propria tecnologia di compilazione JIT (Just-In-

Time). Questa tecnologia, disponibile su quasi tutte le piattaforme, compete in termini di velocità di esecuzione con i linguaggi di programmazione tradizionali.

II.3.3 Strumenti di sviluppo

Matlab include strumenti di sviluppo che aiutano ad implementare efficacemente gli algoritmi. Tali strumenti comprendono:

- **MATLAB Editor** : offre funzioni standard per l'editing e il debug, ad esempio l'impostazione dei punti di interruzione e dei breakpoint e dell'avanzamento passo passo .
- **M-Lint Code Checker** : analizza il codice e suggerisce le modifiche da apportare per migliorarne prestazioni e manutenzione.
- **MATLAB Profiler** : registra il tempo necessario a eseguire ogni riga di codice
- **Directory Reports**: esamina tutti i file di una directory e genera report sull'efficacia del codice, le differenze tra i file, le dipendenze dei file e la copertura del codice.

II.3.4 Analisi e accesso ai dati

Matlab supporta l'intero processo di analisi dei dati, dall'acquisizione da database e periferiche esterni fino alla pre-elaborazione, visualizzazione, analisi numerica e produzione dei risultati in un formato adatto a presentazioni.

Offre strumenti interattivi e funzioni da riga di comando per le operazioni di analisi dei dati, inclusi:

- Interpolazione e decimazione.
- Estrazione di sezioni di dati, scalatura e calcolo della media.

- Thresholding e regolarizzazione.
- Correlazione, analisi di Fourier e filtraggio.
- Individuazione di picchi, valli e zeri su dati monodimensionali.
- Funzioni statistiche di base e curve fitting.
- Analisi matriciale.

Matlab è un'efficace piattaforma per accedere ai dati da file, altre applicazioni, database e periferiche esterne. È possibile leggere i dati dai formati di file più diffusi, ad esempio Microsoft Excel, testi in formato ASCII o file binari, file video, audio e immagini e file in formati scientifici come HDF ed HDF5. Le funzioni di accesso di basso livello a file binari consentono di gestire file di qualsiasi formato. Alcune funzioni supplementari consentono di leggere i dati da pagine Web e XML.

Si possono richiamare altre applicazioni e altri linguaggi come C, C++, oggetti COM, DLL, Java, Fortran e Microsoft Excel e accedere a siti FTP e servizi Web. Con il Database Toolbox è possibile accedere anche ai dati di database compatibili ODBC/JDBC.

II.3.5 Visualizzazione dei dati e calcolo numerico

In Matlab sono disponibili tutte le funzioni grafiche necessarie per visualizzare i dati tecnico-scientifici. Sono inclusi: funzioni grafiche in 2-D e 3-D, funzioni per la rappresentazione volumetrica 3-D, strumenti per la creazione interattiva dei diagrammi e la possibilità di esportare i risultati in tutti i formati grafici più diffusi. I grafici possono essere personalizzati aggiungendo più assi, modificando i colori delle linee e dei marker, aggiungendo annotazioni, equazioni LaTeX e legende, e disegnando forme.

Comprende le funzioni matematiche, statistiche e tecniche per supportare tutte le operazioni più comuni di natura scientifica e tecnica. Tali funzioni, sviluppate da esperti di matematica, costituiscono la base del linguaggio Matlab. Le funzioni matematiche

principali utilizzano le librerie di algebra lineare LAPACK e BLAS e la libreria della Trasformata Discreta di Fourier FFTW. Queste librerie, dipendenti dal processore, sono ottimizzate per le diverse piattaforme supportate da Matlab e, pertanto, garantiscono velocità di esecuzione maggiore rispetto al codice C o C++ equivalente.

Per l'esecuzione delle operazioni matematiche e l'analisi dei dati, Matlab include i seguenti tipi di funzioni:

- Manipolazione delle matrici e algebra lineare.
- Polinomi e interpolazioni.
- Analisi di Fourier e filtraggio.
- Analisi dei dati e funzioni statistiche.
- Ottimizzazione e integrazione numerica.
- Equazioni differenziali ordinarie (ODE).
- Equazioni differenziali parziali (PDE).
- Operazioni su matrici di dispersione sparse .

Matlab è in grado di eseguire calcoli aritmetici su una vasta gamma di tipi di dati, inclusi dati doppi, singoli e interi.

I toolbox (disponibili separatamente) offrono funzioni di calcolo matematico specifiche per aree che includono elaborazione di segnali, ottimizzazione, statistica, matematica simbolica, risoluzione di equazioni differenziali parziali e curve fitting.

II.3.6 Pubblicazione dei risultati e rilascio di applicazioni

Matlab offre agli utenti una serie di funzioni per documentare e condividere il proprio lavoro; il suo codice può essere integrato con altri linguaggi e altre applicazioni, consentendo così di utilizzare le applicazioni e gli algoritmi Matlab come programmi standalone o come moduli software.

Inoltre consente di esportare i risultati in forma grafica o come report completi. I grafici sono esportabili in tutti i formati più diffusi e successivamente è possibile importarli in altri pacchetti, ad esempio Microsoft Word o Microsoft PowerPoint. Con il Matlab Editor è possibile pubblicare automaticamente il codice Matlab in HTML, Word, LaTeX e in altri formati.

Per creare report più complessi, ad esempio simulazioni e test con parametri multipli, è possibile utilizzare il Matlab Report Generator (disponibile separatamente).

È possibile creare un algoritmo in Matlab e distribuirlo ad altri utenti Matlab sotto forma di codice M. Con il Matlab Compiler (disponibile separatamente), l'algoritmo creato dall'utente può essere rilasciato come applicazione standalone oppure come modulo software da inserire nel progetto destinato agli utenti che non dispongono di Matlab.

Alcuni prodotti supplementari consentono di convertire l'algoritmo in un modulo software richiamabile da COM o Microsoft Excel.[16]

II.4 Le reti neurali: Peltarion Synapse

Una *Rete Neurale Artificiale* può essere considerata come un modello semplificato del cervello umano.

All'interno del cervello umano possiamo identificare un elevatissimo numero di elementi di elaborazione, i *neuroni*, ai quali sono connessi i *dendriti*, che ne sono gli ingressi. Al corpo dei neuroni sono inoltre connesse le *sinapsi*, che consentono di trasmettere le informazioni alle cellule limitrofe: tra i neuroni circolano infatti segnali elettrochimici che hanno il potere di innalzare o meno il potenziale del neurone destinatario. Se tale potenziale supera una determinata soglia, il neurone si attiverà ed

ecciterà a sua volta le cellule a cui è collegato, altrimenti le inibirà. In effetti, a seconda delle resistenze delle sinapsi, l'ingresso di ogni neurone influirà in maniera variabile.

Si può dunque vedere il cervello umano come una fitta rete di elementi di processazione piuttosto semplici, ma presenti in numero elevatissimo, la cui "programmazione" consiste nella variazione delle resistenze delle sinapsi, in modo da consentire al cervello di apprendere informazioni e di ricordarle.

Un'altra caratteristica fondamentale del cervello umano è la capacità di "generalizzare", ossia di dedurre associazioni tra concetti mai osservati come la ricostruzione di un'immagine confusa o la deduzione di nuove conoscenze a partire da quelle possedute.

Le caratteristiche salienti delle reti neurali naturali, cioè il cervello, sono state dunque "prese in prestito" dalle reti neurali artificiali. Queste ultime sono caratterizzate, quindi, dalla presenza di un numero elevato di elementi di elaborazione semplici che effettuano calcolo "locale", prendendo cioè decisioni solo in base al loro stato e non allo stato globale del sistema, hanno la capacità di apprendere per esempi e di generalizzare, ovvero riconoscere elementi diversi da quelli appresi, fornendo un indice di bontà del riconoscimento effettuato.

Una definizione generale di **rete neurale** potrebbe essere la seguente:

"Una **rete neurale** è un insieme di semplici unità di elaborazione (neuroni) altamente interconnesse tra di loro, che interagiscono tra loro e con gli oggetti del mondo esterno mediante lo scambio di segnali in modo simile alle strutture neurali biologiche".

In termini pratici le reti neurali sono strutture non-lineari di dati statistici organizzate come strumenti di modellazione. Esse possono essere utilizzate per simulare relazioni complesse tra ingressi e uscite che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare.

Una rete neurale artificiale riceve segnali esterni su uno strato di nodi (unità di elaborazione) d'ingresso, ciascuno dei quali è collegato con numerosi nodi interni, organizzati in più livelli. Ogni nodo elabora i segnali ricevuti e trasmette il risultato a nodi successivi.

L'architettura di una generica rete è definibile tramite 7 parametri caratteristici:

- 1- L'insieme delle unità fondamentali (neuroni artificiali) ;
- 2- Pesi sinaptici o semplicemente pesi di connessione che nella letteratura vengono generalmente indicati con w_{ij} e rappresentano dei veri e propri filtri;
- 3- Funzione di uscita y_i che formalmente è l'equazione che ci restituisce la risposta del neurone tenendo conto del valore di ingresso, dei pesi di connessione e del valore di soglia;
- 4- Il modello di interconnessione neurale cioè la topologia di collegamenti unidirezionali tra i vari neuroni ai quali vengono associati i coefficienti sinaptici w_{ij} .
- 5- La regola di attivazione delle unità elementari cioè il calcolo dello stato di attivazione modificato considerando i valori attuali di input (funzione di attivazione).
- 6- La regola di apprendimento della rete cioè gli algoritmi che possono modificare in maniera autonoma o controllata dall'esterno i parametri

principali della rete come i valori dei coefficienti di interconnessione e i valori di soglia dei dati in entrata.

7- L'ambiente esterno alla rete e cioè l'insieme di tutti i possibili input provenienti dall'esterno.

Ma quali potrebbero essere i vantaggi delle reti neurali rispetto ad un tradizionale computer?

Le differenze tra una rete neurale e un computer digitale convenzionale sono state adeguatamente sintetizzate dal fisico Kohonen[1]¹ :

- I principi della logica digitale non sono applicabili a un sistema neurale. I neuroni non possono essere circuiti logici a soglia, perché ogni neurone ha migliaia di input variabili e la stessa soglia è dipendente dal tempo. L'accuratezza e la stabilità di un circuito normale non è sufficiente a definire una variabile booleana. Inoltre i processi collettivi, che sono di fondamentale importanza nel calcolo neurale, non sono implementabili mediante semplici circuiti logici.
 - I neuroni e le sinapsi non sono elementi di memoria bistabili come dei flip-flop.
 - I neuroni sembrano comportarsi come dei sistemi integratori analogici di natura non lineare, le sinapsi sono delle connessioni la cui efficacia varia gradualmente.
 - Una rete neurale non ha istruzioni o codici di controllo che regolano lo stato funzionale del sistema.
 - Lo schema di interconnessione di un sistema neurale non permette il
-

calcolo ricorsivo, per cui è impossibile implementare algoritmi di calcolo.

Le reti neurali si propongono come modelli induttivi in grado di superare alcuni dei limiti tipici del tradizionale approccio deduttivo. Tale approccio si basa sulla formulazione di ipotesi a priori sui sistemi oggetto d'indagine, che spesso risultano riduttive della realtà perché definiscono relazioni semplici tra le variabili in esame. L'approccio induttivo, invece, non è vincolato da ipotesi ed apriorismi e perciò non preclude la scoperta di dipendenze più complesse e nascoste. Questo approccio, però, limita le possibilità di indagine sui meccanismi dei processi.

Le reti neurali si dimostrano particolarmente adatte nella risoluzione di problemi che hanno le seguenti caratteristiche :

- ampia disponibilità di dati da utilizzare nella fase di addestramento;
- difficoltà nell'individuare a priori un modello adeguato;
- necessità di elaborare nuovi dati in tempi brevi, o per il loro cospicuo volume o a causa di qualche particolare esigenza che richiede risposte in tempo reale;
- necessità di un metodo di elaborazione 'robusto' anche con dati di input 'rumorosi'.

Il principale svantaggio di una rete neurale consiste, invece, nella necessità di possedere un insieme di esempi per l'addestramento. Altri problemi possono derivare nel caso in cui si cerchi di estrapolare dei risultati in regioni dello spazio degli input che sono significativamente differenti da quelle utilizzate nella fase di addestramento.

II.4.1 PELTARION SYNAPSE

La piattaforma software utilizzata per elaborare i dati acquisiti e costruire un sistema di rete neurale artificiale è una versione dimostrativa del *Peltarion Synapse*, un adaptive system.

Un adaptive system è un sistema in grado di adattare il suo comportamento in concomitanza con i cambiamenti del proprio ambiente o di parti del sistema stesso. Tale sistema modifica modelli matematici che operano come agenti intelligenti capaci di trovare automaticamente complesse correlazioni tra i dati di input e output, fare previsioni accurate ed imparare dagli errori.

Gli Adaptive systems sono una rivoluzione nel modo di trattare e comprendere informazioni sempre più complesse e quantitativamente rilevanti.

Peltarion offre strumenti di sviluppo e soluzioni di sistema che permettono applicazioni pratiche nel mondo reale in molteplici settori dell'industria che spaziano tra produzione, distribuzione e progettazione.

Il ciclo di sviluppo è basato su un modello di processo ben stabilito in un ambiente unicamente integrato che supporta l'intero ciclo come un'unica consistente applicazione. Questo aspetto, unito agli sviluppi dell' hardware, consente al synapse di snellire il processo, rendendolo più interattivo, semplice nell'utilizzo e significativamente più potente.

Synapse presenta quattro differenti modalità di operare che realizzano lo sviluppo del ciclo. Questi modi supportano un approccio interattivo che permette di passare facilmente tra le diverse sezioni.

Le quattro modalità [Fig 9] sono:

1. Preprocessing: i dati che vengono estratti dalle fonti opportune e preparati, possono essere importati, visualizzati, esplorati e modificati in differenti modi attraverso numerosi filtri.
2. Design: in questa modalità si procede alla costruzione della ANN (*Artificial Neural Network*) scegliendo quella più opportuna.
3. Training: è la modalità che addestra la rete cercando di ottimizzare il sistema attraverso diversi parametri.
4. Postprocessing: vengono applicati diversi modelli di valutazione, dell'errore, della sensibilità ed altri.

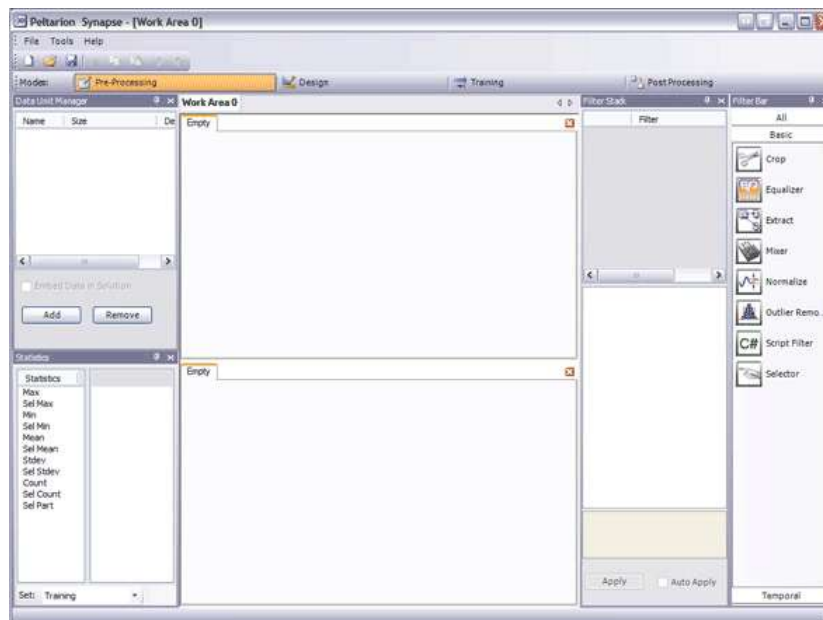


Fig. 9: Interfaccia Work area

II.4.3 ANALISI OPERATIVA DELLA PROCEDURA

L'interfaccia del software è caratterizzata in primo luogo da elementi base di dialogo. Ogni modalità presenta una finestra principale denominata Work Area centrale, con differenti barre e pannelli di applicazione. Questi elementi contengono strumenti, informazioni e componenti. Molti dei componenti a disposizione possono essere utilizzati semplicemente trascinandoli nell'aria di lavoro con la possibilità di visualizzare

finestre operative con le quali interagire per l'editing oppure connettere più componenti tra di loro.

Prima di iniziare la costruzione di qualsiasi tipo di sistema di rete neurale artificiale è importante conoscere bene il problema da risolvere o ottimizzare, decidere quali sono i requisiti delle specifiche per la soluzione, conoscere la precisione auspicata dai dati, i limiti teorici del problema e l'importanza globale e locale della campionatura dei dati.

II.4.4 DATA

Il programma per inizializzare una procedura ha bisogno di dati da elaborare.

Per guidare il sistema è necessario, come primo step, importare dati.

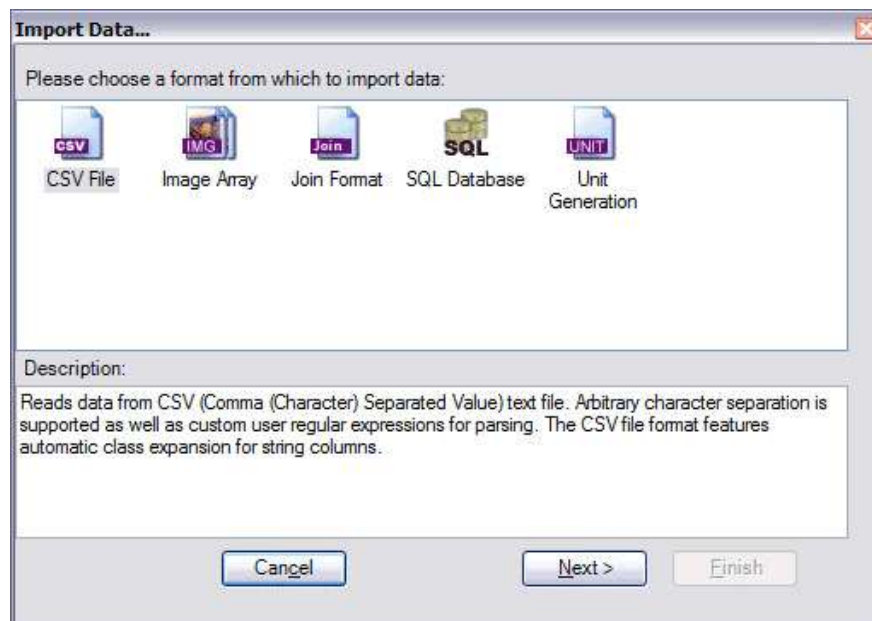


Fig.10: interfaccia import data

I dati vengono gestiti da un'unità dedicata al loro trattamento "The Data unit manager". Con un opportuno comando (Add) viene avviato il processo di importazione, viene scelto il formato di ingresso con le relative impostazioni specifiche e viene caricato il pacchetto di dati subito visualizzabile e gestibile dall' unità preposta.

Una comprensione approfondita e chiara dei dati conferisce all'utente il vantaggio di poter scegliere nel modo migliore le modalità di elaborazione, filtraggio e manipolazione degli input in modo da ottimizzare il lavoro del sistema.

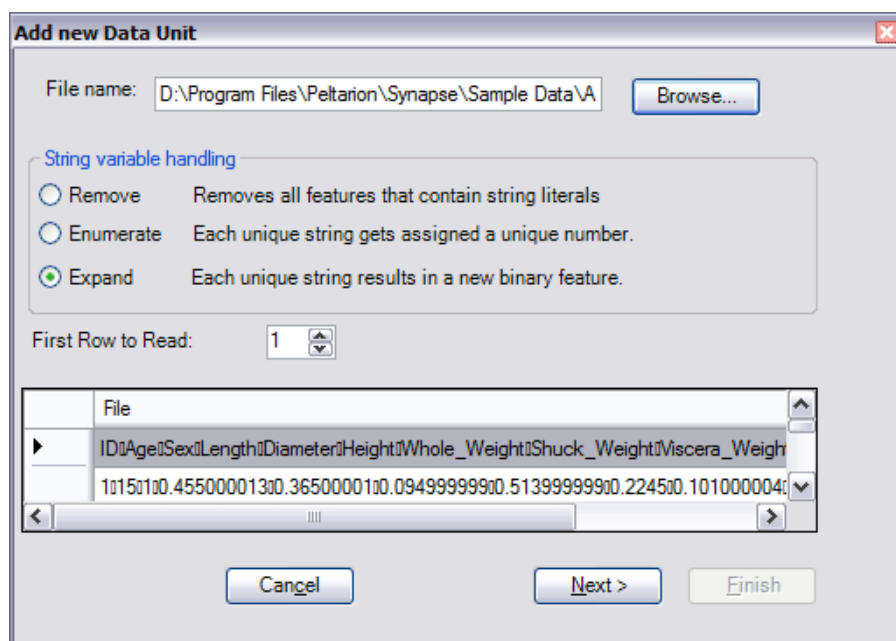


Fig.11: Unit data

II.4.5 ANALISI DEI DATI

In base alle caratteristiche del tipo di dati si possono selezionare diverse modalità di visualizzazioni quali:

- Correlazione: mostra graficamente la correlazione tra una caratteristica del pacchetto dati input rispetto alle rimanenti, dando la possibilità di eliminare quelle poco o per nulla influenti.

- Griglia di dati: dispone i dati in una griglia righe-colonne per le quali si possono aggiungere, eliminare o cambiare le righe, le colonne e i singoli dati.
- Scatter: plotta un valore in funzione di un altro.

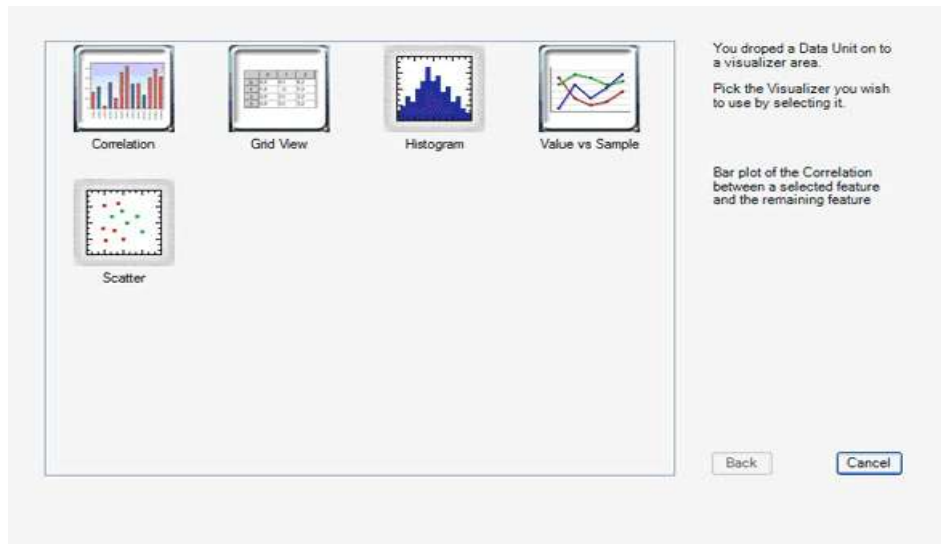


Fig. 12: Modalità visualizzazione dati

Scegliere in modo appropriato l'espressione visiva dei dati, comporta in modo progressivo la ricerca e l'avvicendamento alle parti di dati a cui si è interessati.

Quasi sempre i dati devono essere manipolati in qualche modo prima di essere utilizzati.

A questa funzione sono destinati i filtri rappresentati da icone disposte in lista nella barra dei filtri. Per selezionare un filtro basta trascinarlo nel quadrante "gruppo filtri" ed esso verrà applicato alla corrente unità di dati. Ogni filtro presenta un interfaccia di setup per impostarne i parametri.

Più filtri possono essere utilizzati contemporaneamente e, nel caso in cui non fossero più necessari, possono essere temporaneamente disattivati o rimossi permanentemente.

Infine, per eliminare i dati che non hanno correlazione (remove), oppure per suddividere in più set l'unità di dati (split) è possibile utilizzare il comando *Extract*. Allo stesso modo per eliminare valori singoli che giacciono fuori dalla normale distribuzione di dati esiste il comando *Outlier*.

II.4.6 TRAINING AND VALIDATION

Le unità di dati presentano due data sets: uno per l'addestramento ed un altro per la validazione. Questo è dovuto alla natura statistica del sistema ed alla necessità di testare così un sistema su dati che non sono stati utilizzati nel processo di creazione dello stesso. Una porzione dei dati disponibili viene collocata in un canale separato per scopi di validazione e non verranno usati per addestrare il sistema. Dunque i due sets o canali sono identici nella forma e nelle caratteristiche ma non hanno la stessa estensione. Generalmente molti formati di input conservano l'ultima parte dei dati caricati nel canale di validazione, in ogni caso si può scegliere la percentuale di dati da destinare all'uso e la modalità di prelievo. A volte, per lavorare sulle soluzioni separatamente dalla rete, senza accedere alla sorgente originaria dei dati, può essere utile incastrare i dati nella soluzione stessa selezionando la funzione "*Embed Data in Solution*".

II.4.7 DESIGN

La modalità design è basata sul concetto di collegamento di più blocchi per costruire una topologia. I blocchi connessi permettono al segnale di fluire come aspirato da una macchina dotata di filtri.

Il segnale attraversando ogni singolo blocco , che esercita la sua funzione alterandolo , giunge nel blocco successivo tramite i canali di connessione . Naturalmente il flusso di dati deve partire da qualche punto e quindi è necessario introdurre un blocco di partenza, una sorgente dalla quale il flusso di dati possa iniziare il percorso prestabilito.

La topologia di rete desiderata può essere costruita manualmente aggiungendo i diversi blocchi e connettendoli tra di loro oppure utilizzando direttamente delle snippets, ovvero topologie precostruite o parti di esse.

Le snippets sono disponibili in collezioni e raccolte per diverse categorie. Il vantaggio è quello di non dover costruire un sistema partendo in molti casi da una bozza.

Gli elementi tipici di una static snippet MLP (multiplayer perceptron), modello base di ANN, sono i seguenti:

- Weight layer : rappresenta la memoria a lungo termine del sistema, un set di pesi che moltiplicano il segnale che attraversa il blocco. Dato un segnale in ingresso, questi pesi vengono modificati dall'algoritmo di apprendimento per produrre il segnale di output desiderato.
- The function layer : può essere considerato come una soglia non lineare per il segnale conferendo al sistema capacità computazionali non lineari.
- Delta terminator : è un criterio di errore con interfaccia grafica. Esso confronta due segnali seguendo un'opportuna metrica. I segnali che va a comparare sono l'output reale del sistema e l'output desiderato. I risultati del confronto vengono mandati indietro attraverso il sistema lì dove l'informazione è utilizzata per aggiornare i pesi.

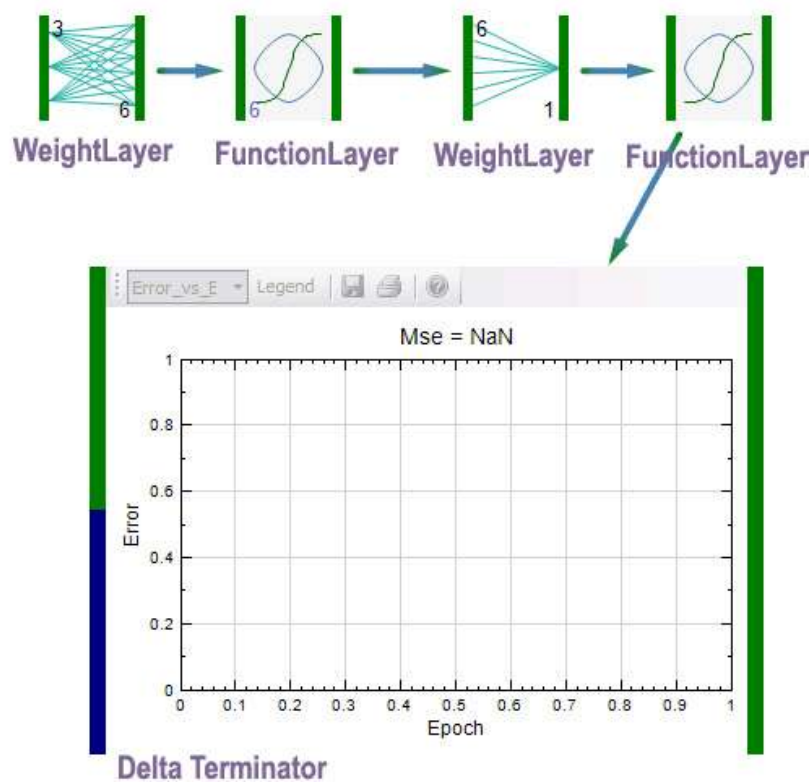


Fig. 13: Static snippet MLP

II.4.6 TRAINING

La modalità di addestramento è utilizzata per adattare il sistema ai dati. Graficamente è simile a quella di progettazione e molti comandi applicativi e zone di interazione rimangono le stesse.

Di seguito sono riportate alcune definizioni che ci faciliteranno la comprensione della fase di training che verrà trattata successivamente:

- Sample: è un campione di dati che possono essere rappresentati sotto forma di matrici e/o righe. Se ci sono sorgenti multiple un campione è formato dalla stessa riga da tutte le sorgenti.

- Epoch: è l'insieme di tutti i campioni disponibili ed è anche il termine usato per indicare un ciclo di addestramento del sistema. Quando un'epoca è trascorsa il sistema adattivo è stato esposto ai dati disponibili una sola volta. Generalmente sono richiesti molti cicli per addestrare completamente un sistema dato che i sistemi, per la maggior parte, vengono addestrati in maniera iterativa.
- Batch: è il numero di campioni sul quale è basato il calcolo dell'aggiornamento dei parametri del sistema.
- Batch Processor: è il training macro e spesso è utilizzato per differenti tipologie di schemi di ottimizzazione globale.

Adesso andiamo ad analizzare come avviene la fase di addestramento.

Innanzitutto prima di iniziare tale fase bisogna scegliere quanti campioni si vuole impiegare per ogni ciclo. Un gran numero di campioni migliora l'attendibilità della statistica utilizzata nei calcoli e spesso comporta una convergenza più regolare. Un numero più esiguo di campioni comporta più aggiornamenti per epoch e a volte può compensare di più la mancanza di precisione. La scelta ottima dipende fortemente dalle regole di aggiornamento e dalla complessità del problema. Una conseguenza positiva dell'utilizzo di campioni multipli è l'effetto stabilizzante sull'addestramento: il sistema infatti cambia meno frequentemente.

Quindi se nei dati c'è un alto grado di disturbo, usando una lunghezza di batch più grande, da un lato si può migliorare la stabilità del training, dall'altro però si può ottenere una perdita di risoluzione troppo spinta tale che le variazioni rilevanti di campioni singoli vadano perse.

Una seconda conseguenza della lunghezza di batch riguarda le prestazioni del sistema. Un batch più largo richiede meno tempo al CPU, ma più memoria. Un batch più piccolo richiede considerevolmente meno memoria, ma molto più tempo per

l'esecuzione del processo. Si può procedere per tentativi nella ricerca di una larghezza di batch ottimale modificandola anche durante il training.

La lunghezza di batch dovrebbe preferibilmente essere scelta in modo da risultare un sottomultiplo della lunghezza max che si può utilizzare. Un dimensionamento errato di un batch, che si adatti precisamente, può concludersi in una esclusione di campioni. Questo problema ha conseguenze poco rilevanti per un sistema statico, mentre potrebbe risolversi nella separazione tra training e validation sets trattati con sistemi dinamici.

Il training viene inizializzato cliccando il comando *"Play"* presente tra i comandi di controllo. Per interrompere il training esiste il comando *"Pause"*. Il sistema verrà fermato anche nel mezzo di un epoch.

Il comando *"Stop"* interrompe ugualmente il processo in esecuzione ma il sistema viene resettato, ritorna al suo stato iniziale e tutti i pesi vengono riassegnati in modo casuale. Ne deriva un'importante indicazione: Stop e Reset comportano la perdita di tutto ciò che il sistema ha imparato, dunque è preferibile utilizzare esclusivamente il comando pause per interrompere momentaneamente il processo.

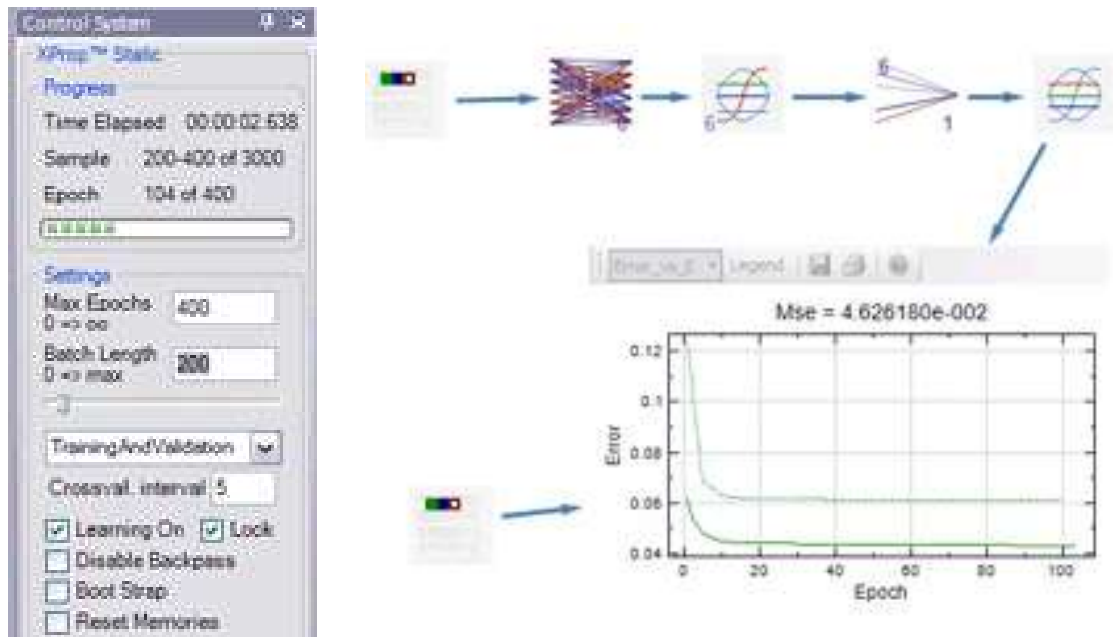


Fig. 14: Control GUI

Nel sistema di controllo GUI viene visualizzato lo stato di avanzamento della corrente epoca. I due grafici illustrati all'interno del blocco Delta terminator mostrano rispettivamente l'errore nel training data e nel validation data. I Validation data sono i dati che sono stati messi da parte per il testing e non sono stati inclusi nel training. Vengono utilizzati per analizzare il comportamento del sistema con dati mai trattati.

Quando la barra di avanzamento dell'epoch raggiunge il livello prestabilito, il training è terminato. Eventualmente è possibile impostare il numero di epoch su -1, il che induce il sistema ad avanzare per un tempo indefinito fino a quando non viene volutamente interrotto. Lo step successivo consente di analizzare come il sistema realmente funziona.

II.4.7 Postprocessing

Postprocessing mode è dedicato all'analisi di un sistema già addestrato ed alla preparazione dello stesso per l'uso finale. Il sistema può essere testato e possono essere effettuate delle misurazioni per aver un'idea delle prestazioni effettive del sistema e per verificare il rispetto dei requisiti richiesti.

Error analyzer è uno strumento che permette di inserire la performance del sistema in un contesto di tipo statistico. La distribuzione degli errori riguardanti il validation data viene visualizzata graficamente.

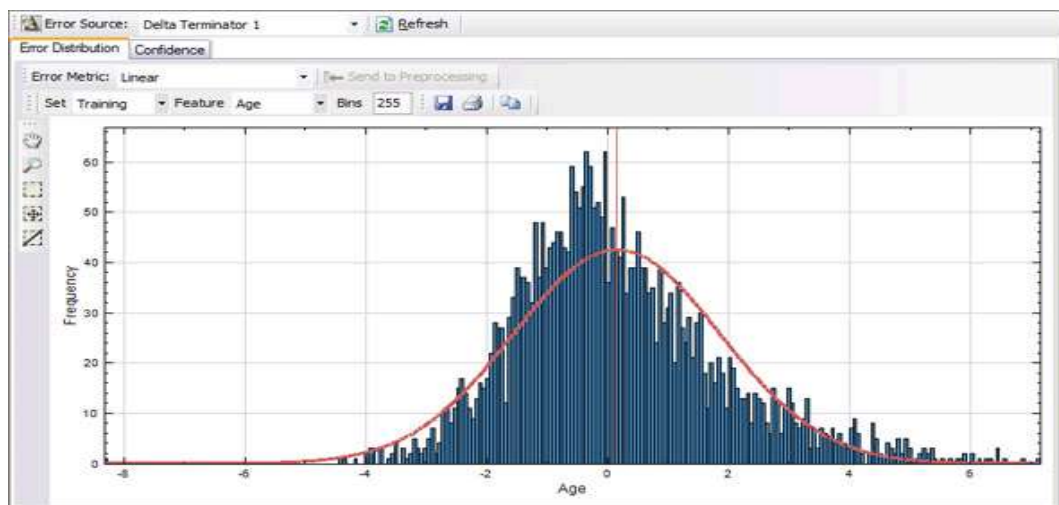


Fig.15: Error analyzer

Probe è uno strumento che permette di fornire al sistema dati completamente estranei sia al training che al validation. Lo scopo è valutare lo scostamento tra i risultati previsti dal sistema e quelli realmente misurati.

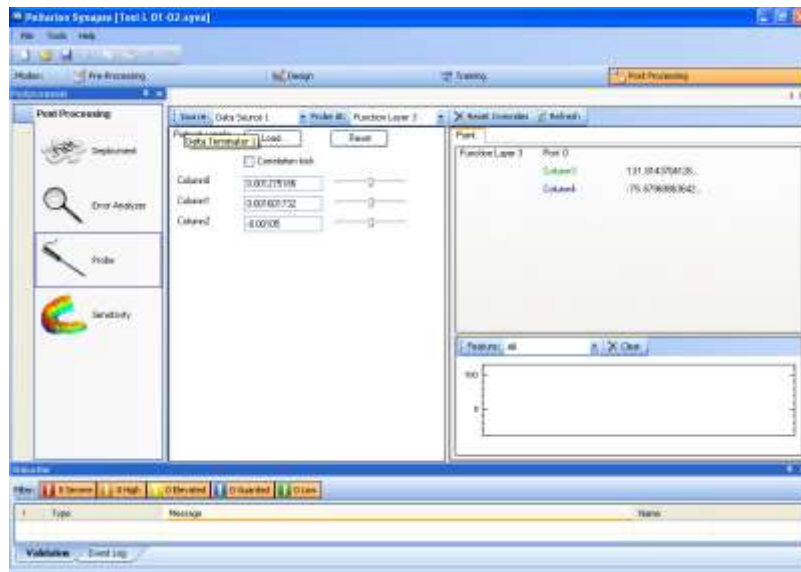


Fig. 16: Probe

II.5 Laminato in carboresina analizzato

L'oggetto di analisi su cui si è basato il mio lavoro di tesi è un laminato unidirezionale (ad otto lamine) in carboresina prodotto mediante la tecnologia di Hand Lay-up, o di deposizione manuale.

Le fibre di carbonio utilizzate sono fibre in grafite, cioè presentano una struttura formata dalla sovrapposizione di strati esagonali (detti grafene), caratterizzati da un forte legame atomico che consente di ottenere alto modulo elastico ed elevata resistenza.

Il debole legame tra i diversi strati esagonali, comunque, in cui è organizzata la struttura, è la causa del basso modulo di taglio e del modulo di Young trasversale.

Le fibre di carbonio, a seconda dell'organizzazione spaziale degli strati di grafene, si distinguono in:

- *fibre di grafite* : in cui gli strati di grafene sono disposti con ordine tridimensionale nelle fibre.
- *fibre di carbonio* : in esse gli strati di grafene sono disposti con ordine bidimensionale nelle fibre.

Le fibre di carbonio vengono prodotte mediante carbonizzazione di un precursore organico come *Rayon* o *PoliAcridoNitrile (PAN)*.

Le caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio variano con il variare della tensione applicata e con il variare della durata e della temperatura durante la fabbricazione.



Fig. 17: Rotoli di fibra di carbonio

Il sistema resina in un composito ottenuto per deposizione manuale ha le stesse funzioni che ha nelle strutture composite fabbricate con altri metodi ossia assicurare la forma al manufatto, trasmettere il carico alle fibre, proteggere le fibre dall'abrasione, controllare le proprietà elettriche e chimiche, stabilire gli sforzi di taglio interlaminare.

Tra le proprietà più importanti della matrice ricordiamo la capacità di adesione alla fibra e, là dove richiesto, resistenza termica, resistenza alla fatica, resistenza chimica, resistenza all'umidità.

La resina utilizzata per il processo è una termoindurente epossidica il cui nome commerciale è **SX 10**.

La resina epossidica è la più impiegata per le matrici dei compositi. Ha un costo ragionevole, una larga scelta di forme da liquido a bassa viscosità a solido, una varietà di sistemi di preparazione e lavorazione, bassa contrazione, buone proprietà meccaniche, buona resistenza chimica, buona adesione alle fibre, stabilità per largo spettro di temperature, buona resistenza all'umidità.

Le prove eseguite su resina pura hanno portato ai seguenti risultati:

- la resina pura polimerizza a temperatura ambiente in più di 24 ore.
- la resina pura polimerizza ad una temperatura di 150°C, in 6 ore.

Le prove effettate con accelerante e catalizzatore, con percentuali rispettivamente di 0.25% in peso di sali di cobalto e 1.25% in volume, hanno portato al seguente risultato:

- la resina polimerizza a temperatura ambiente in circa 1 ora. Per la realizzazione del laminato unidirezionale di 8 lamine in carboresina sono state tagliate, da un rotolo di rinforzo sotto forma di tessuto, lamine della

grandezza necessaria alla fabbricazione del provino voluto [25 cm x 25 cm] lasciando aderire le lamine l'una sull'altra e impregnandole della resina SX 10 sopra citata.

Per la polimerizzazione del laminato è stata utilizzata una pressa [Fig. 18] in cui i parametri di processo, quali temperatura e pressione, vengono costantemente controllati tramite un software. La pressa è dotata di due piastre, che vengono riscaldate attraverso opportune resistenze elettriche provvista di un circuito oleodinamico che permette di raggiungere elevate pressioni. La macchina è gestita da un personal computer dotato del software Movicon, ma, in ogni caso può essere gestita anche manualmente senza PC.

I parametri caratteristici del ciclo di cura vengono impostati nel software; in particolare si impostano:

- Temperatura set-point piastra superiore;
- Temperatura set-point piastra inferiore;
- Tempo di raggiungimento temperatura set-point piastra superiore;
- Tempo di raggiungimento temperatura set-point piastra inferiore;
- Tempo di permanenza della piastra superiore alla temperatura di set-point;
- Tempo di permanenza della piastra inferiore alla temperatura di set-point;
- Pressione set-point ;
- Tempo di raggiungimento della pressione di set-point;
- Tempo di permanenza alla pressione di set point.

La macchina è corredata anche di una pompa per la circolazione di un fluido di raffreddamento; tale fluido può circolare all'interno delle due piastre sottraendo calore e, all'uscita, passare in un apposito scambiatore di calore nel quale il fluido freddo risulta essere acqua. Per la produzione del nostro laminato non è stato sfruttato tale circuito di raffreddamento in quanto non ancora perfettamente funzionante al momento in cui lo stesso è stato realizzato. Il raffreddamento è quindi avvenuto a temperatura ambiente.



Fig. 18: Pressa utilizzata per l'ottenimento dei laminati

Il software di gestione della pressa, tra l'altro, ci fornisce in tempo reale, l'andamento nel tempo della temperatura e della pressione. Il sistema, inoltre, memorizza continuamente i valori delle variabili in un database; il campionamento avviene ogni 2 secondi e, una volta pieno, il database continua a riempirsi seguendo una logica di tipo F.I.F.O. ovvero la prima operazione che viene assegnata alla macchina è anche la prima che viene eseguita dalla macchina stessa.

III CAPITOLO

BACKGROUND TEORICO

III.1 METODO DELLA TRIANGOLAZIONE

Un difetto strutturale può generare all'interno del materiale delle onde acustiche. In generale, ogni emissione sarà ricevuta in tempi differenti dai sensori disposti sulla struttura da monitorare. L'analisi dei tempi di arrivo del segnale ai differenti sensori dà la possibilità di localizzare la sorgente di emissione acustica mediante la tecnica di triangolazione. Una coppia di differenze nei tempi di arrivo registrata da un array di tre sensori definisce due iperboli nel cui punto di intersezione è localizzata la sorgente di emissione. Una serie di tecniche di triangolazione sono impiegati in diversi sistemi, attualmente in funzione, di monitoraggio mediante emissione acustica

Una tecnica di triangolazione che rende una soluzione analitica esatta è stata descritta per un array di quattro sensori. Il metodo di soluzione per questa particolare disposizione è semplice ma per sensori localizzati arbitrariamente diviene più difficile a causa dell'introduzione delle trasformazioni delle coordinate.

Tobias [7] presenta un metodo semplice ma generale per determinare la localizzazione, in due dimensioni, di una sorgente di emissione acustica dalla differenza osservata nei tempi di arrivo del segnale ad un array di tre sensori disposti sulla struttura. Questo è un metodo diretto che fornisce una soluzione esatta per una particolare configurazione di sensori.

III.1.1 METODO DELLA TRIANGOLAZIONE: MATERIALI ISOTROPI

La differenza nel tempo di arrivo del segnale di emissione acustica ad una coppia di sensori definisce la differenza, in termini di distanza, della sorgente di emissione dalla coppia di sensori stessa. Può essere dimostrato semplicemente che il punto di emissione acustica giace su un'iperbole, definita dalla differenza dei tempi di arrivo, avente come foci i due sensori. In altre parole, la differenza nel tempo di arrivo del segnale registrata da due coppie di un array di tre sonde definisce due iperboli nel cui punto d'intersezione è posizionata la sorgente di emissione acustica. Le equazioni di una coppia di iperboli, in termini di differenza osservata nei tempi di arrivo, coinvolge radici quadrate che rendono difficile una soluzione analitica. Questa può comunque essere semplificata adottando un approccio alternativo come dimostrato da Tobias [7].

Consideriamo un array arbitrario di tre sensori posizionati nei punti $S_0(0,0)$, $S_1(x_1,y_1)$ e $S_2(x_2,y_2)$ (Fig.1). Una sorgente di emissione acustica nel punto $P(x,y)$, disposta ad una distanza r da S_0 , darà origine a due differenti distanze δ_1 e δ_2 definite come

$$\delta_1 = PS_1 - PS_0 = t_1 * V \quad (1)$$

$$\delta_2 = PS_2 - PS_0 = t_2 * V \quad (2)$$

dove V è la velocità di propagazione nel materiale e t_1 e t_2 sono le differenze nei tempi di arrivo misurate per la coppia di sensori S_1-S_0 e S_2-S_0 rispettivamente.

La sorgente di emissione acustica $P(x,y)$ è localizzata nel punto di intersezione delle circonferenze avente centri S_0 , S_1 , S_2 e come raggio r , $r + \delta_1$ e $r + \delta_2$ rispettivamente.

Le equazioni delle tre circonferenze sono:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (3)$$

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (r + \delta_1)^2 \quad (4)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = (r + \delta_2)^2 \quad (5)$$

Prendendo la prima equazione dalle altre due :

$$2xx_1 + 2yy_1 = (x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2) - 2r \delta_1 \quad (6)$$

$$2xx_2 + 2yy_2 = (x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2) - 2r \delta_2 \quad (7)$$

Cambiando le coordinate in coordinate polari si ha:

$$2r (x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1) = A_1 \quad (8)$$

$$2r (x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2) = A_2 \quad (9)$$

Dove

$$A_1 = x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2$$

$$A_2 = x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2$$

Quindi per $(x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1) \neq 0 \neq (x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2)$ le equazioni in coordinate polari forniscono

$$r = \frac{A_1}{2(x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1)} = \frac{A_2}{2(x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2)} \quad (10)$$

da cui segue $(A_1 x_2 - A_2 x_1) \cos \theta + (A_1 y_2 - A_2 y_1) \sin \theta = (A_2 \delta_1 - A_1 \delta_2)$. Dividendo con questa equazione il termine $[(A_1 x_2 - A_2 x_1)^2 + (A_1 y_2 - A_2 y_1)^2]^{1/2}$ si ottiene

$$\frac{(A_1x_2 - A_2x_1)\cos\theta}{[(A_1x_2 - A_2x_1)^2 + (A_1y_2 - A_2y_1)^2]} + \frac{(A_1y_2 - A_2y_1)\sin\theta}{[(A_1x_2 - A_2x_1)^2 + (A_1y_2 - A_2y_1)^2]}$$

$$= \frac{(A_2\delta - A_1\delta)}{[(A_1x_2 - A_2x_1)^2 + (A_1y_2 - A_2y_1)^2]} \quad (11)$$

Poichè, in questa forma, i coefficienti di $\cos\theta$ e $\sin\theta$ sono minori di uno, l'equazione prende la forma $\cos(\theta - \varphi) = K$. Dove

$$K = \frac{(A_2\delta - A_1\delta)}{B}$$

$$B = [(A_1x_2 - A_2x_1)^2 + (A_1y_2 - A_2y_1)^2]^{1/2}$$

e

$$\tan\varphi = \frac{(A_1y_2 - A_2y_1)}{(A_1x_2 - A_2x_1)} \quad (12)$$

Dato che entrambi numeratore e denominatore della (12) possono essere determinati esattamente note le posizioni delle sonde (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , i tempi di arrivo del segnale t_1 e t_2 e la velocità di propagazione V , l'angolo φ è definito univocamente nel range $\pm\pi$.

Assumiamo $\varphi = \alpha + 2m\pi$, per $m=0, \pm 1, \pm 2$.

Dalla definizione il termine B è positivo. Quindi, nell'equazione $\cos(\theta - \varphi) = K$, ci saranno due soluzioni per $(\theta - \varphi)$ nel range $\pm\pi$:

- Se il termine $(A_2\delta_1 - A_1\delta_2)$ è positivo l'equazione ha una soluzione in entrambi primo e quarto quadrante;
- Se il termine $(A_2\delta_1 - A_1\delta_2)$ è negativo l'equazione ha una soluzione in entrambi secondo e terzo quadrante.

Ovvero se $\beta = \cos^{-1} |K|$ allora

$$(\theta - \varphi) = \beta + 2n\pi \quad \text{oppure} \quad \beta + 2n\pi \quad \text{per} \quad n=0, \pm 1, \pm 2.$$

Di qui ne segue che

$$\theta = (\alpha + \beta) + 2m\pi \quad \text{o} \quad (\alpha - \beta) + 2m\pi \quad \text{per} \quad m=0, \pm 1, \pm 2$$

ovvero θ ha due soluzioni nel range $\pm \pi$. Il valore di θ deve dare un r positivo, nella formulazione mostrata prima, per essere una soluzione valida. Quindi, le coordinate cartesiane del punto di emissione possono essere così derivate.

Nella maggior parte dei casi, quando un solo valore di θ è valido per una data coppia di (t_1, t_2) la soluzione per la localizzazione della sorgente è unica. Quando esistono due soluzioni di θ per una data coppia di (t_1, t_2) la corrispondente localizzazione della sorgente è ambigua

Con due risultati per la localizzazione corrispondenti a due punti di intersezione delle iperboli definite dalle differenze dei tempi di arrivo del segnale t_1 e t_2 registrate dai sensori S_0, S_1 e S_2 . Tali ambiguità sono ignorate da metodi di localizzazione coinvolgenti procedure iterative.

Per risolvere tale ambiguità è necessario utilizzare un quarto sensore S_3 , localizzato nel punto (x_3, y_3) e confrontare la differenza nel tempo di arrivo del segnale t_3 misurata tra le coppie di sensori S_0 - S_3 con quella calcolata per la localizzazione della sorgente. Questo controllo convalida anche i punti individuati da tre sonde.

I risultati di tale lavoro hanno suggerito che, in generale, esistono due soluzioni per la localizzazione della sorgente di emissione. Nella maggior parte dei casi solo una delle due soluzioni rende una localizzazione valida. Comunque, ci sono un numero di combinazioni delle differenze dei tempi di arrivo osservate per uno specifico array di sonde per le quali entrambe le soluzioni giacciono in posizioni valide. Tali punti di solito

corrispondono ai due punti di intersezione delle corrispondenti iperboli. L'esame delle forme delle iperboli, individuate da alcune particolari configurazioni di array dei sensori, suggerisce che queste posizioni ambigue sono individuate di solito in regioni localizzate intorno alle sonde utilizzate nella triangolazione stessa. In alcuni casi, tale ambiguità, può essere risolta dall'uso di una quarta sonda.

III.1.2 METODO DELLA TRIANGOLAZIONE: MATERIALI ANISOTROPI

Negli ultimi dieci anni sono stati impiegati sistemi di monitoraggio strutturale (SHM) basati su un approccio di propagazione delle onde di emissione acustica per la localizzazione e valutazione dei danni [31-39]. In effetti, uno stimolo esterno, come un impatto, un cambiamento nella pressione o tensione può indurre emissioni acustiche (EA), che possono essere registrate da una rete di trasduttori piezoelettrici (PZT). In questo modo, può essere fornito un allarme del dispositivo di simulazione del danno/evento, dando luogo a strutture più sicure e risparmio dei costi. Tuttavia, quando il campione test è un mezzo finito (plate-like), più di una modalità d'onda può propagare nello stesso tempo, anche se generata dalla stessa fonte. Poiché la velocità dei modi è diversa, l'energia totale delle onde si diffonde nel tempo con l'aumentare della distanza. Questo fenomeno, conosciuto come dispersione, è tipico delle onde Lamb.

A seconda del prodotto frequenza spessore, possono essere generate onde di tipo estensionale/simmetrica (S_n) o flessionale / antisimmetrica (A_n).

In letteratura, sono presenti diversi studi incentrati sulla identificazione in situ della fonte di emissione acustica sia su alluminio [40-45] che su piastre in composito . Per i materiali isotropi o quasi-isotropo, come detto nel paragrafo precedente, per la determinazione del punto d'impatto è stata utilizzata ampiamente l'algoritmo basato sulla tecnica di triangolazione sviluppato da Tobias [7].

Tuttavia, questo metodo è fortemente limitato dal presupposto che la velocità dell'onda è costante in tutte le direzioni, il che non è vero in materiali anisotropi e non omogenei. Paget et al.[46] e Kurokawa et al. [47] hanno sviluppato un algoritmo per la localizzazione dell'impatto sulla base del modello ellittico della velocità di gruppo. Questo metodo richiede la conoscenza della velocità di gruppo a 0° e 90° con rispetto alla cornice di riferimento planare, e può essere utilizzato per piastre in composito unidirezionali e quasi-isotropi. Seydel e Chang [48] hanno proposto un metodo per la ricostruzione della storia e forza l'identificazione del punto d'impatto, basata sulla minimizzazione della differenza tra la risposta reale e prevista dai sensori PZT. Kundu et al. [49] ha presentato un algoritmo di ottimizzazione per la determinazione del punto di impatto su alluminio e strutture in composito, basata sulla minimizzazione di una funzione di errore che utilizza la differenza dei tempi di arrivo dei segnali di AE. Tuttavia, la localizzazione delle sorgenti di emissione acustica in strutture composite, con complessi modelli di velocità angolare di gruppo, rimane un compito impegnativo, che deve ancora essere risolto.

E' stato sviluppato [50] un nuovo sistema SHM di monitoraggio in situ in grado di valutare la velocità del modo flessionale A_0 delle onde Lamb in complesse strutture in composito. Questo articolo presenta un nuovo in situ monitoraggio strutturale con lay-up e spessore. La proposta di metodologia, basata sulle differenze dei pacchetti di onde misurata da sei sensori di emissioni acustiche di superficie PZT disposti sulla struttura è stata divisa in due steps. Nella prima fase, sono stati determinati il tempo di arrivo (TOA) delle onde da una analisi in frequenza nel tempo basata sulla grandezza del quadrato del modulo della Continuous Wavelet Transform (CWT). Poi, le coordinate della posizione dell' impatto e la velocità di gruppo sono stati ottenuti risolvendo una serie di equazioni non lineari attraverso una combinazione del metodo locale iterativo di Newton associato ad una ottimizzazione globale senza vincoli. Pertanto, la proposta metodo supera gli svantaggi di un algoritmo di triangolazione e

esso non richiede una conoscenza a priori del gruppo di velocità dei segnali AE anisotropia , come in materiali anisotropi e disomogenei.

IV CAPITOLO

METODOLOGIE E PROCEDURE SPERIMENTALI

Introduzione

Di seguito saranno indicate le metodologie utilizzate per lo sviluppo di due procedure alternative alla usuale tecnica di triangolazione (valida per materiali isotropi), sviluppate per la localizzazione del danno nei materiali compositi. La prima procedura, basata sul metodo della triangolazione, provvede alla progettazione ed applicazione di una rete neurale (ANN) addestrata virtualmente. Tale approccio, già utilizzato in altri lavori scientifici [21,22], è potenzialmente utile per superare le difficoltà connesse all'accuratezza nella valutazione delle proprietà elastiche del laminato [23]. La seconda procedura, invece, provvede allo sviluppo di un metodo deterministico basato sulla teoria della laminazione e di propagazione delle onde, ed è potenzialmente utile per svincolarsi dalla necessità di prove sperimentali. Lo sviluppo di entrambe le metodologie sarà possibile solo nota la velocità di propagazione delle onde nei materiali compositi come funzione dell'orientazione delle fibre. Di seguito, sarà indicata anche la procedura sperimentale utilizzata nel corso del lavoro, al fine di individuare una formulazione teorica che ci permettesse di valutare la suddetta velocità. Sarà la consapevolezza di tale possibilità che ci permetterà di sviluppare le due procedure suddette.

IV.1 Prove sperimentali per il calcolo della velocità

In molti lavori di ricerca, nei materiali compositi, sono stati distinti i modi di propagazione flessionali delle onde da quelli estensionali [24-28] e le velocità relative all'estensionale sono state calcolate sperimentalmente come rapporto spazio/tempo.

In questo ambito è stata individuata una formulazione analitica, basata sulla teoria della laminazione, per cercare di valutare la velocità di propagazione del segnale di EA in funzione dell'orientazione delle fibre. A tale scopo sono state effettuate delle prove sperimentali su un monodirezionale in carboresina (CFRP) di caratteristiche indicate nel Capitolo II.

Sono state disposte sul laminato tre sonde in linea ad una distanza di 100 mm l'una dall'altra (fig.1).

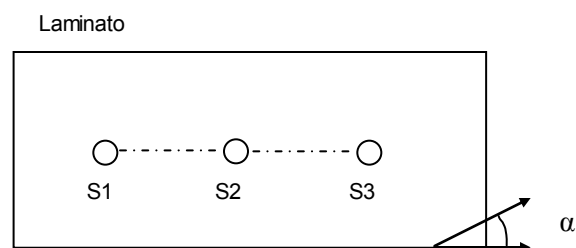


Fig. 1: Configurazione per valutazione delle velocità

Misurato il tempo di arrivo del segnale alle singole sonde, mediante la macchina di emissione acustica, l'intervallo di tempo, Δt (*Arrival time*) si ottiene come differenza del tempo di arrivo del segnale tra due sonde consecutive. Ciò è stato fatto per diverse angolazioni α ($0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 75^\circ, 90^\circ$), rispetto alla direzione delle fibre, e l'evento sonoro è stato generato all'esterno della prima sonda mediante il *lead break*

test (rottura della punta di una matita normata). Facendo il rapporto tra tale distanza x e la variazione del tempo di arrivo, si ricava la velocità di propagazione:

$$C_e = x/\Delta t \quad (1)$$

I tempi di arrivo registrati durante queste prove sono poi stati utilizzati (Capitolo IV) per confrontarli con quelli valutati mediante la formulazione analitica da noi individuata per il calcolo della velocità in funzione dell'orientazione.

IV.2 I Metodologia: ANN

In una rete neurale (ANN), dei semplici elementi di processo (i neuroni), sono connessi per formare una complessa rete di nodi. Alcuni dei nodi sono destinati a ricevere i dati in input e formano lo “strato di input”; altri forniscono i valori numerici desiderati, e sono collocati nello “strato di output”. Fra gli strati di input e di output sono contenuti uno o più “strati nascosti”, ognuno dei quali contiene un numero assegnato di neuroni. Nel fluire lungo una connessione, il segnale è moltiplicato per uno specifico valore (peso), che ne determina l'effetto sull'output.

Quando un'ANN è stata progettata, la sua capacità di risolvere un problema ingegneristico deve essere sviluppata attraverso una fase di addestramento: un insieme di casistiche note (training set), comprendente i valori di input e i corrispondenti valori di output desiderati, viene presentata alla rete, che lo analizza. Il meccanismo di apprendimento consiste in un processo iterativo, durante il quale viene operata una progressiva variazione dei pesi attribuiti alle connessioni, secondo una legge predefinita (funzione di trasferimento), finché non si ottiene una ragionevole correlazione (convergenza) fra gli output desiderati e quelli calcolati dalla rete.

Uno dei compiti più difficili, nel progettare una ANN, è la sua ottimizzazione, per la quale non esistono regole precise. Il problema è complicato dall'ampio numero di opzioni disponibili, che coinvolgono l'architettura della rete (numero di strati nascosti, nodi in ognuno di essi, numero di connessioni fra i nodi), la tipologia delle funzioni di trasferimento, il numero di cicli concesso per l'apprendimento (epochs), ecc.

Comunque, in letteratura molti ricercatori [21] hanno dimostrato la consistenza nei parametri di EA per differenti tipologie di laminati dimostrando l'efficienza delle ANN nel caratterizzarli. In particolare Bar e al. [21,22,23,28] hanno individuato, con successo, che le caratteristiche dei segnali AE non sono interessate dalla sequenza di sovrapposizione di un laminato, ma dipendono dal meccanismo di rottura o di sorgente ed inoltre le ANN possono classificare tali segnali. In particolare Bar, ha individuato che segnali di EA generati dallo stesso tipo di danno possono subire variazioni tipiche nei loro parametri. Tuttavia, questo non sembra avere alcun effetto sulla identificazione di tali segnali attraverso l'approccio ANN .

In questo studio, per limitare il lavoro di progettazione dell'ANN, sono stati assunti vincoli preliminari. Le differenze nei TOA registrate dalle tre sonde Pi in Fig.2 sono stati adottati come parametri di input (il livello di ingresso è composto da tre neuroni) e lo strato di output è caratterizzato da due nodi, fornendo le ascisse e le ordinate della fonte S.

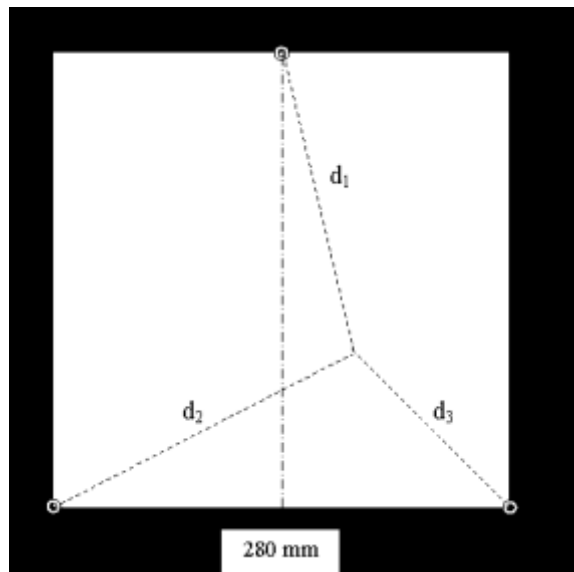


Fig.2 Laminato CFRP monitorato da tre sensori AE

Dalla teoria possiamo verificare che non vi è alcun motivo di utilizzare le reti neurali con più di due strati nascosti, con le quali una qualsiasi funzione può essere rappresentata con una buona precisione. Pertanto, nella ricerca di una architettura ANN soddisfacente, il numero di strati nascosti Nhl è stato mantenuto costante ($Nhl = 2$) ed è stato variato il numero dei loro nodi. In tutto, sono state analizzate quindici architetture ANN differenti. In ciascuno di essa, il numero di nodi negli strati nascosti è stata determinata in modo casuale soddisfacendo la condizione di un numero totale di nodi compresi nell'intervallo 6-30.

La struttura generale delle ANNs esaminate si riferivano al Multilayer Perceptron, ed è stata addestrata secondo l'algoritmo di backpropagation. I valori di altri parametri pertinenti, raccolti nella Tabella I, sono stati fissati di default e non sono stati modificati durante tutte le prove.

Nella Tabella I sono raccolti altri parametri di design delle ANN fissati in sede di analisi.

Tabella I – Parametri rilevanti adottati nello sviluppo delle ANN.

Step	Caratteristiche	Valore
Progettazione	Forward rule	No rule
	Back rule	Step rule
	Funzione di trasferimento	Tanh sigmoid
	Passo	0.1
	Momento	0.7
Addestramento	Batch length	1
	Intervallo di validazione	5

Come indicato in precedenza, è necessario un set di dati di addestramento al fine di procedere alla fase di apprendimento di una ANN.

Di solito si prova a costruire il set di formazione delle reti eseguendo un numero sufficiente di prove sperimentali variando, opportunamente, la posizione della sorgente S (Fig. 2), e la misurazione dei TOA associati. Questo itinerario è molto lungo, in quanto sono necessari centinaia di dati per avere fiducia in una soddisfacente precisione della rete. Tuttavia, se è fornita la dipendenza della velocità dell'onda dall'orientamento, il TOA può essere semplicemente calcolato a partire da questo conoscendo la posizione della sorgente.

Questo metodo è stato applicato in questo lavoro: sono stati selezionati da un generatore di numeri casuali 2500 punti in posizioni diverse e, per ciascuno di essi, è stato valutato teoricamente il TOA a tre sensori come il rapporto di d_i/C_e (Fig. 2).

Il 15% della posizione dei punti valutati teoricamente sono stati utilizzati per la convalida incrociata durante la fase di formazione. La formazione è stata interrotta dopo un massimo di 5×10^4 iterazioni, o quando l'errore segnalato dalla curva di apprendimento scendeva al di sotto dello 0,005%, a seconda di quale di queste condizioni venisse rispettata prima. Dopo l'allenamento, le ANNs esaminate sono state sottoposte a un test di convalida, per valutare la loro efficacia. Seguendo la stessa procedura descritta in precedenza per il set di formazione, è stato costruito e presentato alla rete un insieme di prova, costituito da 14 punti di posizione sconosciuta; è stata calcolata la distanza D tra ogni input e il punto predetto associato ed è stata definita arbitrariamente la distanza caratteristica D_c , come:

$$D_c = D_m + SD \quad (2)$$

dove D_m è la media aritmetica di D , e SD la deviazione standard. D_c è stata assunta come parametro di errore sulla base del quale sono state graduate le diverse architetture ANN.

IV.3 II Metodologia: Metodo deterministico

Come già detto in precedenza, le caratteristiche del segnale di EA dipendono dalla diversa modalità di frattura (frattura delle fibre, matrici frattura, delaminazione, fibra-matrice o matrice-matrice attrito) mentre la modalità di propagazione può dipendere da una serie di parametri quali la stratificazione, l'orientamento delle, i materiali utilizzati e il loro accoppiamento. Questo ha reso inutile la formulazione in forma chiusa

proposta da Tobias [7]. A causa di tale problema, in questa sezione del lavoro si propone un metodo alternativo per individuare il punto di un evento su piastre CFRP analizzando il tempo di arrivo dei segnali ad ultrasuoni ricevuti da tre sensori attaccati alla superficie della piastra in una configurazione nota triangolare.

Per sviluppare questo metodo è stato sviluppato un software personalizzato in ambiente MATLAB. Il software si basa su un semplice concetto: il confronto tra i tre tempi di arrivo misurati e quelli teorici calcolati e registrati su una matrice di dati che coprono tutta la superficie del componente. Il software opera in questo modo: prima di tutto esso crea una griglia computazionale con un passo variabile che copre tutta la superficie indagata. Per ogni punto della griglia vengono calcolati i tempi di arrivo del segnale alle singole sonde e la differenza reciproca di questi alle diverse sonde (tra ciascuno delle coppie di sensori). Questi ultimi vengono poi confrontati con i ΔT valutati sperimentalmente. Alla fine, il punto di emissione è quello in cui l'errore tra i tempi di arrivo misurati e calcolati ha valore minimo. Ovviamente, al fine di calcolare il tempo di arrivo ad ogni sensore, deve essere conosciuta l'influenza del lay up della piastra e la velocità in direzione dell'orientazione rispetto alle fibre. Questo ultimo tema è stato studiato e valutato nel paragrafo III.1 dove abbiamo individuato la possibilità di utilizzare la teoria della laminazione per valutare la velocità in funzione dell'orientazione (formula 1) ed i risultati ottenuti sono stati qui utilizzati.

IV.3. 1 Architettura software e sviluppi

In figura 3 è indicata la struttura del software. Esso è diviso in quattro blocchi da B1 a B4.

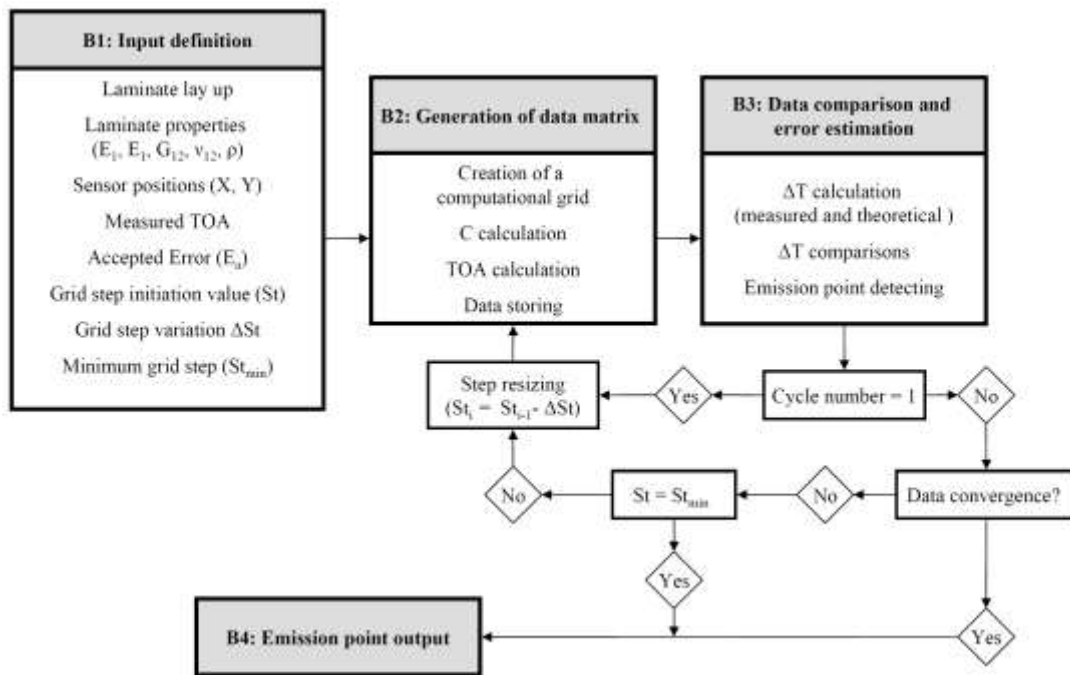


Fig. 3: Vista schematica dell'architettura del software.

- Nel blocco B1 di definizione d'input sono inseriti tutti i dati d'ingresso, quali le proprietà laminato, necessarie per calcolare la velocità del suono; la posizione delle sonde; la differenza misurata dei tempi di arrivo (ΔT s); l'errore accettato (E_a) e il valore d'iniziazione del passo griglia .
- Nel blocco B2 di Generazione della matrice dati per ogni combinazione nodi-coppia sensori è calcolata la velocità del suono (C_e) in direzione nodo-sensore, in modo che i TOA teorici sono calcolati e memorizzati.
- Nel blocco B3: di Confronto dei dati e stima degli errori è incentrato il cuore del software. In questo blocco vengono calcolati per ogni nodo della rete la differenza reciproca dei tempi di arrivo (ΔT_{xy}) calcolati rispetto a quelli di ingresso sperimentali (ΔT_S). Il punto di emissione viene determinato e il processo viene ripetuto fino ad ottenere la convergenza tra i punti reali e quelli localizzati dal software.
- Nel blocco B4 vengono memorizzati i punti di emissione ottenuti.

Nella prima fase del programma, nella definizione dei dati d'ingresso, sono stati inseriti tutti i dati detti sopra. Queste quantità sono necessarie per l'individuazione dei moduli teorici, la posizione del nodo, l'errore, etc. Nella seconda fase viene creata una matrice quadrata di n righe e n colonne impostando il valore di iniziazione del passo di meshatura (St , nel nostro caso 5 mm). Quindi è possibile procedere con il calcolo delle quantità utili, quali le distanze relative tra le sonde e il nodo della griglia, le distanze tra due sonde consecutive, l'angolo relativo tra ciascuna sonda e il punto di origine, la velocità di propagazione del segnale e i loro tempi di arrivo (TOA) da cui sono state calcolate le differenze reciproche (ΔT).

La fase successiva provvede al calcolo dei TOA per ogni nodo della griglia. Per spiegare tale valutazione in figura 4 è mostrato uno schema semplificato della configurazione piastra-sensore .

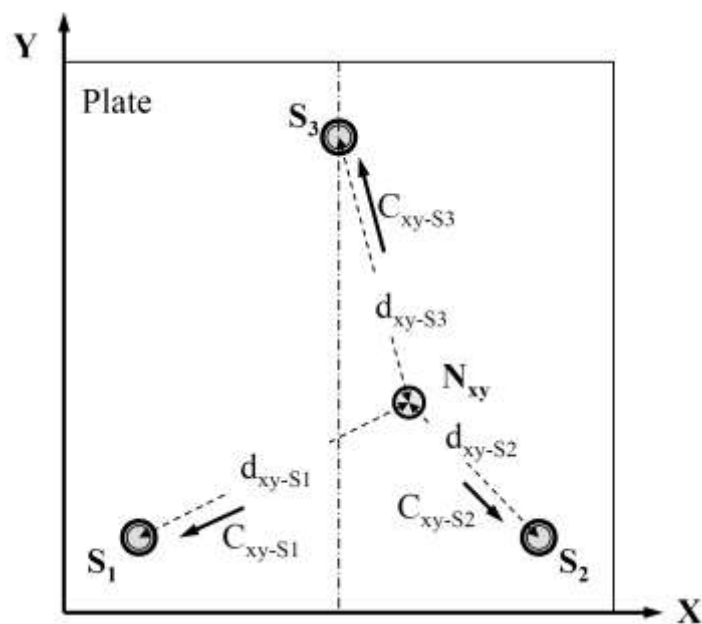


Fig. 4: Schema della configurazione in piano dei sensori.

In questo caso il laminato è monitorato da tre sensori EA, (S_n) disposti in configurazione triangolare come indicato in figura 4. Quando un segnale acustico viene

generato nel punto N_{xy} (nodo della griglia avente coordinate x, y), l'onda si sposta all'interno del materiale, raggiungendo le sonde, dopo i tempi (T_{xy-S_n}) in funzione della velocità del suono valutata nella direzione punto-sensore (C_{xy-S_n}) e la loro distanza (D_{xy-S_n}) . Questo tempo è calcolato per mezzo dell'equazione:

$$T_{xy-S_n} = \frac{d_{xy-S_n}}{C_{xy-S_n}} \quad (2)$$

Dove l'indice n indica il sensore considerato, e gli indici xy indicano il nodo della griglia con coordinate xy . Dalla valutazione del tempo di arrivo è stato possibile calcolare la differenza reciproca dei tempi di arrivo (ΔT) del segnale da ogni nodo della griglia:

$$\Delta T_{xy-nm} = (T_{xy-S_n} - T_{xy-S_m}) \quad (3)$$

dove l'indice xy indica il nodo posizionato nella riga x e colonna y e l'indice nm indica la n -mo e il m -mo coppia di sensori. Quindi è possibile procedere per la localizzazione del punto di emissione nel blocco B3.

In primo luogo le tre differenze reciproche dei tempi di arrivo tra i tre sensori sono stati calcolati per i dati reali (ΔT_{S-12} , ΔT_{S-23} , ΔT_{S-31}), poi è stato selezionato il valore minimo delle tre ΔT_{S-nm} . Sulla base di questo valore, è stato calcolato la percentuale di errore (ERR) accettato per le determinazioni delle posizioni del nodo nella griglia come il prodotto tra il minimo ΔT_{S-nm} e l'errore accettato (E_a) inserito nel blocco di input:

$$err = \min(\Delta T_{S-12}, \Delta T_{S-23}, \Delta T_{S-31}) \cdot E_a \quad (4)$$

I potenziali punti di emissione acustica sono stati definiti tutti quelli che soddisfano l'equazione:

$$\Delta T_{range} = [\Delta T_{S-xy} - err, \Delta T_{S-xy} + err] \quad (5)$$

Questi corrisponderanno a tre fasce di punti di possibile localizzazione, ognuna corrispondente ad una coppia di sensori. In figura 5 vi è mostrato un esempio di determinazione delle tre bande individuate per un dato nodo.

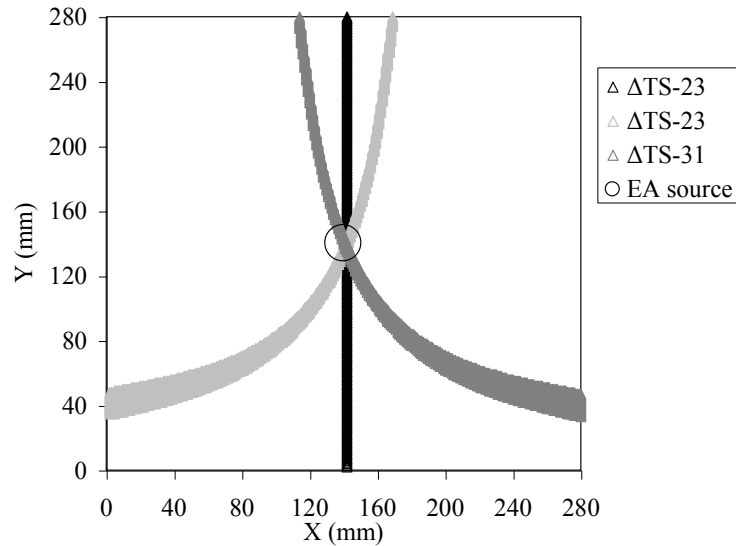


Fig.5: La figura rappresenta le tre fasce di nodi griglia che sono possibili punti di localizzazione nel caso di una sorgente di EA posizionata in $x=y=140$

Ovviamente il nodo della griglia cercato si ottiene con l'intersezione delle tre fasce : ricordiamo che nel caso dei materiali isotropi queste si riducevano a tre singole curve la cui intersezione determinava univocamente il punto da localizzare. L'area di intersezione tra le tre fasce viene individuata creando tre matrici (Mat_err12, Mat_err23, Mat_err31) con n righe e n colonne, uno per ognuna la coppia di sensori. Queste conterranno tutti i valori uguali a zero eccetto per le posizioni corrispondenti ai nodi della griglia che soddisfano la condizione riportata in (7) dove ci sarà un valore pari al rapporto:

$$(\Delta T_{xy-nm} - \Delta T_{s-nm}) / \Delta T_{s-nm} \quad (6)$$

ΔT_{xy-nm} è la differenza reciproca tra il tempo di arrivo calcolato per la coppia sensore nm dal nodo della griglia con coordinate xy e ΔT_{s-nm} è quello reale calcolato per la coppia di sensori nm.

Quindi, moltiplicando gli elementi omologhi delle tre matrici Mat_err e sottraendo, a tale prodotto, il valore massimo tra questi, si ottiene la matrice dell' errore relativo totale. Quest'ultima è definita come :

$$RTE(xy) = \text{Mat_err12} \cdot \text{Mat_err23} \cdot \text{Mat_err31} - \max[\text{Mat_err12}, \text{Mat_err23}, \text{Mat_err31}] \quad (7)$$

Dato che la matrice RTE corrisponde ad una rappresentazione speculare della meshatura del pannello, in definitiva essa contiene molti valori zero indicativi di posizioni xy in cui sicuramente l'evento non è stato generato, e valori diversi da zero nelle posizioni corrispondenti ai nodo della griglia dove è possibile che l'evento di emissione sia stato prodotto. Il valore minimo di tale matrice sarà proprio il reale punto sorgente. Poichè la matrice corrisponde alla griglia mesh del laminato, trovando il valore minimo della (7) e moltiplicando i relativi indici (xy) per il passo della griglia (St) è possibile valutare le coordinate del punto di EA. Quindi la fonte di emissione acustica è localizzata. Al fine di ridurre l'errore, il passo è ridotto fino ad 1 mm e la posizione del punto di emissione è calcolato fino alla convergenza dei dati. La convergenza dei dati si ottiene quando si raggiunge una differenza del 5% tra i valori della posizione calcolata in due fasi successive o quando si raggiunge il passo minimo (St_{min}).

L'uso di equazione (7), invece dell'intersezione diretta delle tre Mat_err, ci dà la possibilità di stimare, in termini assoluti, gli errori commessi nella ricerca del punto di emissione tenendo conto del peso di tutti gli errori di valutazione ΔT invece dell'errore nella valutazione di quello relativo al singolo punto.

Ovviamente è possibile che con questa procedura non siano rilevati punti. Questo dipende dai valori adottati per E_a (errore ammesso) ,nel blocco di definizione di ingresso, che potrebbero essere troppo bassi.

V CAPITOLO

ANALISI DEI RISULTATI

Introduzione

Per valutare le metodologie sviluppate sono state effettuate prove sperimentali in una configurazione ben nota.

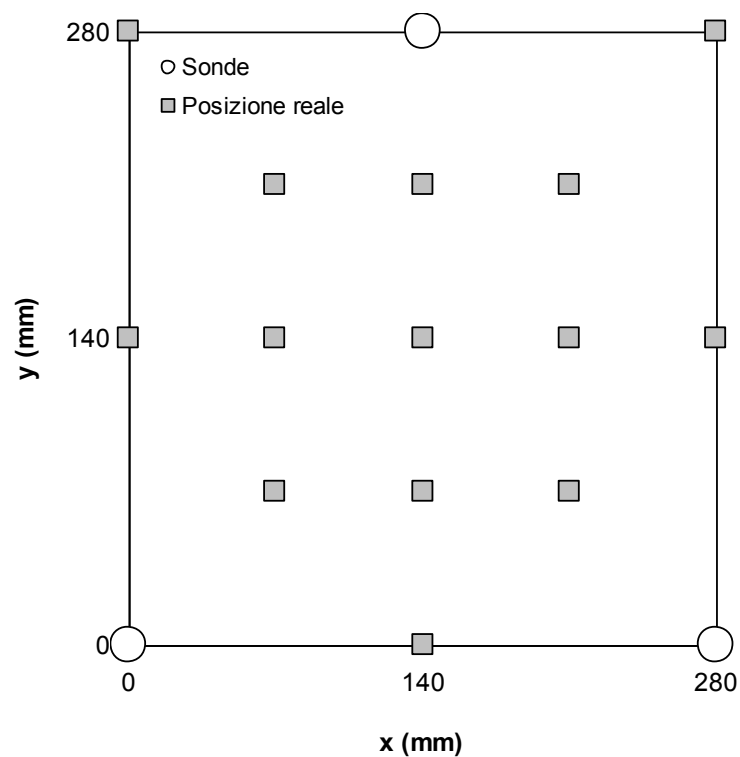


Fig.1: Schema del set up sperimentale usato per la validazione delle metodologie sviluppate.

In figura 1 è indicato uno schema del set up sperimentale utilizzato per le validazioni delle metodologie. I punti quadrati indicano i quattordici punti in cui il segnale di EA è stato generato e i punti circolari indicano la posizione delle sonde. Per generare l'onda di EA è stato utilizzato il test di rottura della punta della matita normata (pencil lead break test), come spiegato nel Capitolo 3, secondo il test ASTM E976 standard (Hsu-Nielsen-Source 0,5). Gli eventi sono stati rilevati, come indicato nel Capitolo II, dal sistema Vallen AMSY4 con tre trasduttori VS150-M risonanti a 150 kHz, di diametro 20,5 mm. I segnali sono stati filtrati da filtri passa-alto a 95 kHz, amplificati da 34 dB con amplificatori AEP3, e poi trasferiti ad un organo ASIPP per la digitalizzazione e l'estrazione dei parametri rilevanti di EA. Il tempo di acquisizione è stato pari a 0,2 μ s, mentre la soglia per l'acquisizione dell' evento è stata fissata a 28,8 dB.

Tutti i dati sono stati memorizzati in un computer per la visualizzazione e la successiva analisi. Per ognuno delle quattordici posizioni sono stati creati non meno di cinque eventi (segnali). Sono state calcolate le differenze reciproche dei TOA (Tempo di Arrivo del segnale alle sonde) per ogni singolo test ed i valori medi di questi sono stati utilizzati nel blocco di definizione di ingresso.

Nelle sezioni successive saranno presentati e discussi i risultati ottenuti.

V.1 Individuazione della formula di calcolo della velocità di propagazione in funzione dell'orientazione

Come detto in precedenza, step fondamentale per lo sviluppo del lavoro di ricerca è stato l'individuare una formulazione analitica che ci permettesse di valutare la velocità di propagazione dei segnali di EA in funzione dell'orientazione. In seguito ad un attento lavoro di ricerca, sfruttando la *teoria della laminazione*, opportunamente adattata ai

materiali ortotropi, è stato possibile risalire alla velocità di propagazione del suono nel materiale, C_e come:

$$C_e = \sqrt{\frac{E_x}{\rho (1 - \nu_{xy} \nu_{yx})}} \quad (1)$$

dove ρ è la densità del materiale, E_x il modulo di Young nella direzione di propagazione del segnale (x) , e ν_{xy} , ν_{yx} i moduli di Poisson nella direzione x e quella ad essa perpendicolare (y) valutati grazie alla teoria della laminazione, come indicato di seguito

$$E_x = 1/[(\cos^4 \theta / E_1 + (1/G_{12} - 2\nu_{12}/E_1)\sin^2 \theta \cos^2 \theta + (\sin^4 \theta / E_2)] \quad (2)$$

$$E_y = 1/[(\sin^4 \theta / E_1 + (1/G_{12} - 2\nu_{12}/E_1)\sin^2 \theta \cos^2 \theta + (\cos^4 \theta / E_2)] \quad (3)$$

$$\nu_{xy} = E_x [\nu_{12}/E_1(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) - (1/E_1 + 1/E_2 - 1/G_{12}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta] \quad (4)$$

Poiché il materiale delle facce non era stato caratterizzato per la misura dei moduli, si è proceduto assegnando ai moduli appena specificati dei valori di tentativo, fino a ottenere una curva che seguisse in modo sufficientemente fedele l'andamento dei dati sperimentali di Fig. 2. I migliori risultati (curva in Fig. 2) sono stati ottenuti ponendo $E_1=142$ GPa, $E_2=9.2$ GPa.

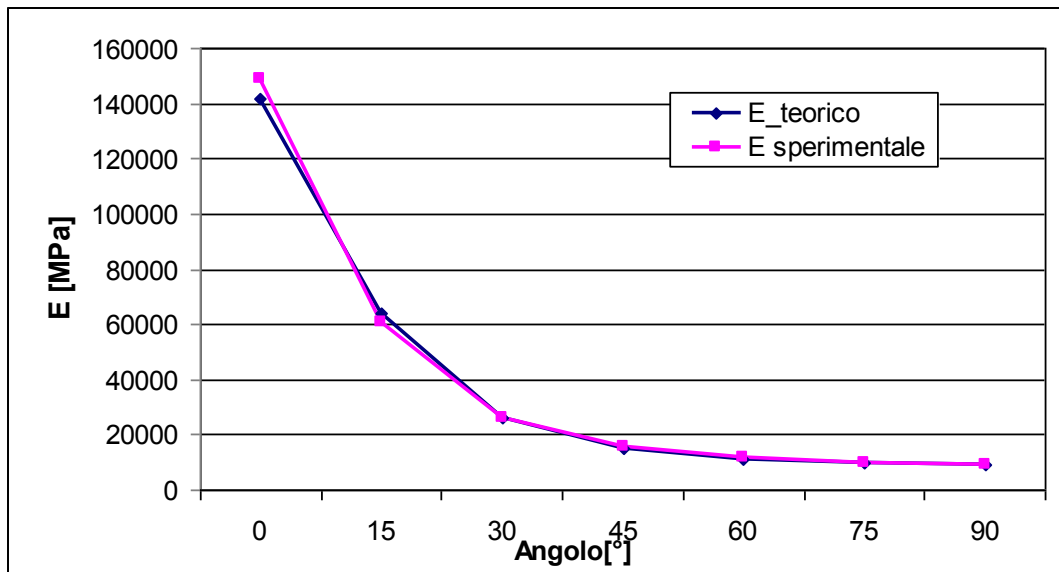


Fig. 2: Confronto modulo di Young (E) teorico e sperimentale

Di seguito sono riportati alcuni confronti degli andamenti delle velocità di propagazione valutati con i due metodi per il laminato suddetto.

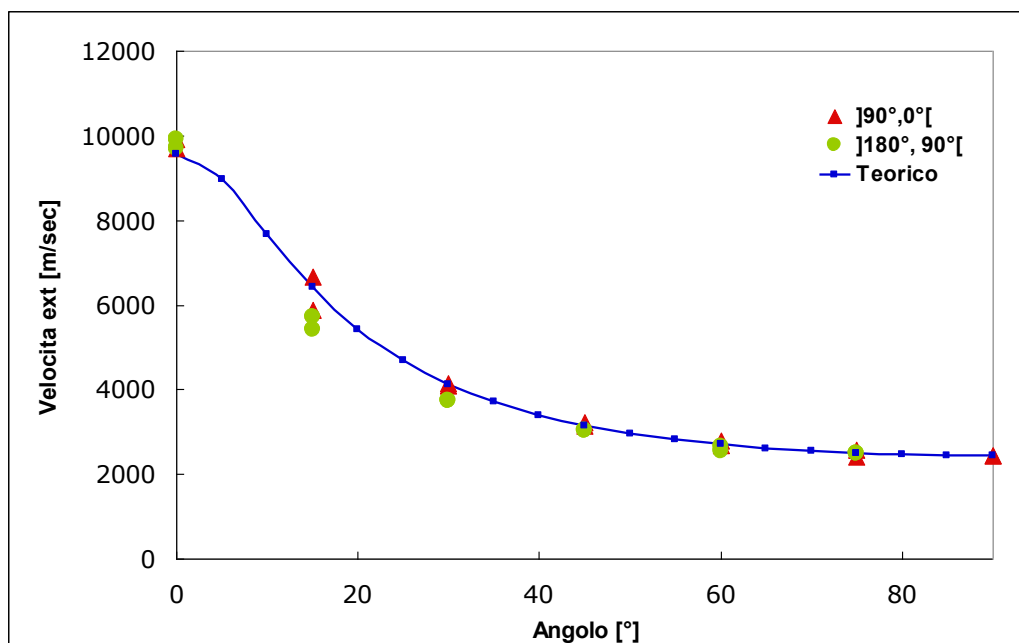


Fig. 3: Confronto velocità teorica e sperimentale per le diverse orientazioni

Come è possibile osservare dalla Fig. 3, l'andamento della velocità estensionale valutata sperimentalmente (evidenziata in rosso e verde per due diversi range di angolazione) è in buon accordo con l'andamento della velocità valutata teoricamente come indicato in (1) (evidenziata in blue). Pertanto, anche per il calcolo delle velocità, è possibile utilizzare direttamente quanto previsto dalla teoria della laminazione [18][19].

V.2 Localizzazione degli eventi di EA: architettura ANN ottimale

La migliore rete ANN, selezionata in base alla procedura descritta nel Capitolo III, consisteva in una struttura 3/10/8/2 costituita da 10 e 8 nodi rispettivamente nel primo e secondo strato nascosto, oltre ad avere tre nodi del livello di input e due nodi in quello di output. Per questa soluzione è stata calcolata (Tabella I), una distanza caratteristica (parametro d'errore da noi scelto – Capitolo III)

$$D_c = D_m + SD$$

dove D_m è la media aritmetica di D , e SD la deviazione standard.

In particolare, per l'architettura scelta, è stata valutata $D_c = 2.0$ mm, con $D_m = 1.24$ mm e $SD = 0,76$ mm, dopo circa 4×10^4 epoche, che richiedono un periodo di formazione di circa 16'.

Tabella I – Accuratezza dei parametri caratterizzanti le ANN considerate in questo lavoro.

Dati sorgente	Architetture ANN	D_m (mm)	SD (mm)	D_c (mm)	D_{max} (mm)
Testing set	3/10/8/2	1.24	0.76	2.00	2.62
	2/10/8/2	0.94	0.37	1.30	1.58
Sperimentali	3/10/8/2	2.18	1.99	4.17	6.95
	2/10/8/2	1.85	2.04	3.89	7.03

In Fig. 4 è mostrato un confronto dei punti inclusi nel set di prove e le loro posizioni, come previsto dal ANN 3/10/8/2 : in essa la rete viene individuata con l'etichetta "3IN" (tre nodi di ingresso). La freccia nera nella figura indica il punto in corrispondenza del quale è stata trovata la distanza massima ($D_{max} = 2.62 \text{ mm}$) tra la sorgente prevista e quella reale. Infatti , solo due delle tre differenze dei TOA utilizzati come dati di input per la ANN sono indipendenti, dal momento che può essere stabilita facilmente un semplice rapporto di correlazione tra loro.

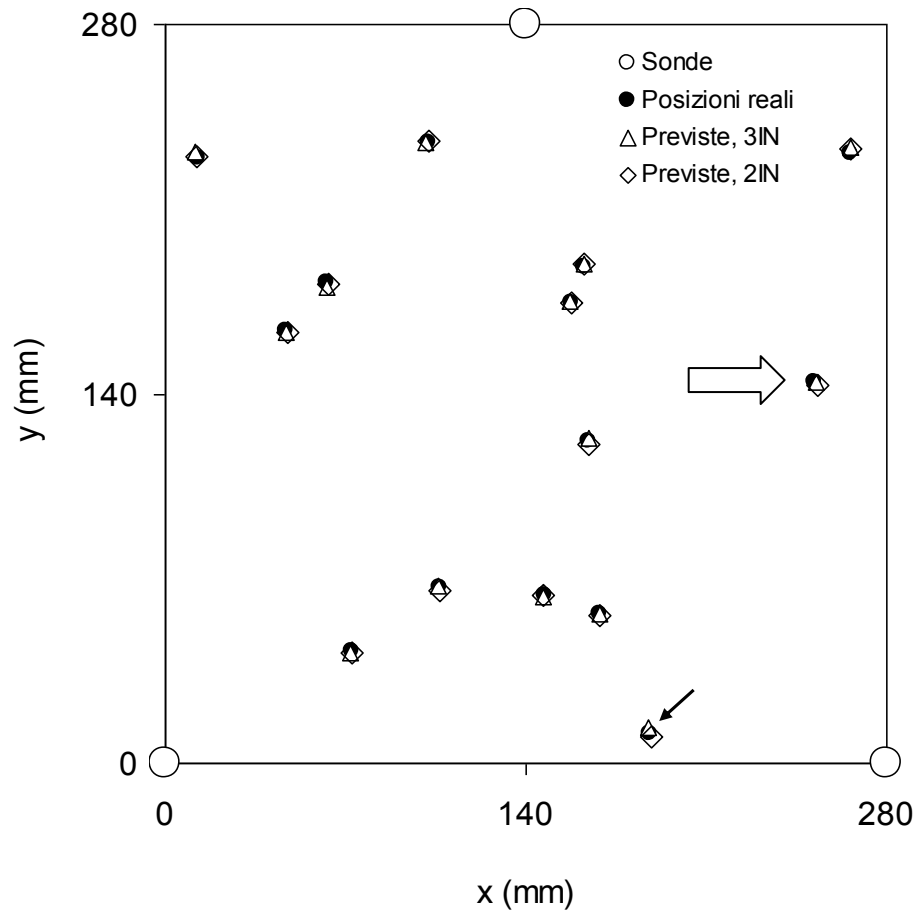


Fig.4 Confronto tra i punti usati nel training set e quelli forniti dalla ANN

Al fine di verificare l'effetto del parametro di input ridondante sulle prestazioni ANN, è stata progettata e preparata una rete 2/10/8/2 identica al 3/10/8/2 ad eccezione del numero di nodi di ingresso. Per ottenere la precisione assegnata sono stati necessari circa 4.5×10^4 iterazioni di formazione, completati in 19 '. I diamanti bianchi in Fig. 4 sono le previsioni di questa ANN (etichettato come "2IN"), alimentata con le differenze dei TOA appropriati inclusi nel set di prova. La freccia bianca indica il punto di posizione in cui è stato verificato l'errore massimo ($D_{max} = 1,58$ millimetri). Nella tabella II sono riportati i principali parametri di precisione. A partire da questi, la rete 2/10/8/2 prevede un rendimento migliore rispetto al suo omologo 3/10/8/2. Pertanto, sembra che il parametro di input ridondante non si traduca in una risposta più efficace

di ANN. Inoltre, questa scoperta suggerisce che una soluzione ancora più efficace potrebbe essere individuata da una precisa procedura di ottimizzazione.

V.2.1 Convalida sperimentale: ANN

Dopo l'allenamento, le ANNs esaminate sono state sottoposte a un test di convalida, per valutare la loro efficacia. Seguendo la stessa procedura descritta in precedenza per il set di formazione, è stato costruito e presentato alla rete un insieme di prova, costituito da 14 punti di posizione sconosciuta; è stata calcolata la distanza caratteristica D_c .

Le due architetture ANN selezionate (3/10/8/2 - 2/10/8/2) sono quindi state addestrate utilizzando come dati di input i TOA registrati durante le prove sperimentali generando l'evento in corrispondenza dei punti quadrati in fig.1 come descritto in precedenza. Esse hanno fornito le posizioni previste (simboli aperti nella figura) indicate in fig 5.

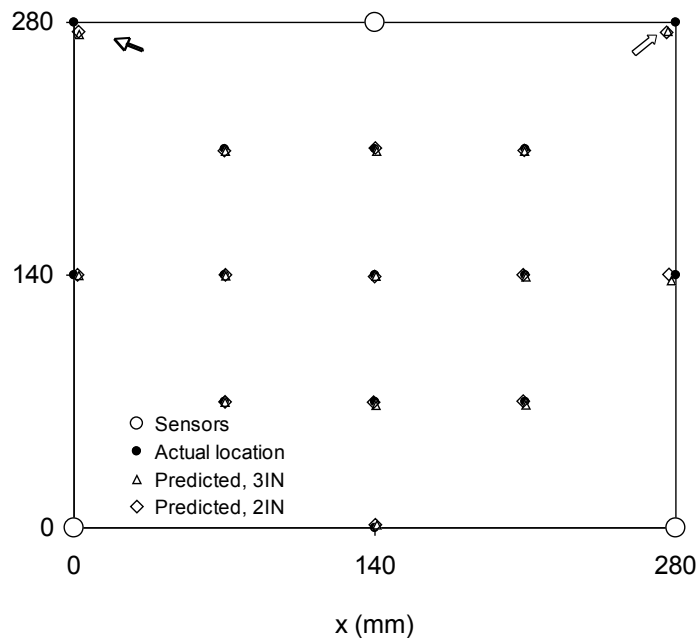


Fig.5 Confronto tra i punti sorgenti reali e quelli sperimentali

La correlazione tra la posizione reale e quella prevista è molto soddisfacente. Inoltre, come si evince dai test virtuali, la configurazione 2/10/8/2 sembra essere leggermente più efficace rispetto al 3/10/8/2 (Tabella II), anche se la sua superiorità è meno evidente di quanto previsto dai risultati delle prove virtuali.

Tutti i valori D_m , SD , D_c , D_{max} derivanti dalle prove sperimentali sono più alti rispetto ai loro omologhi ottenuti nella fase di test. In particolare il massimo valore dell'errore, valutato come distanza tra il punto localizzato dall'ANN e quello reale, è di 7 mm circa ed è stato registrato nei punti indicati dalle frecce in bianco di Fig.5.

Utilizzando la teoria, sono state calcolate le differenze dei TOA tra i sensori P_i in Fig. 5, e confrontati con quelli sperimentali. I risultati sono mostrati in Fig. 6, dove l'etichetta t_{i-j} indica la differenza tra il TOA sonda i e j .

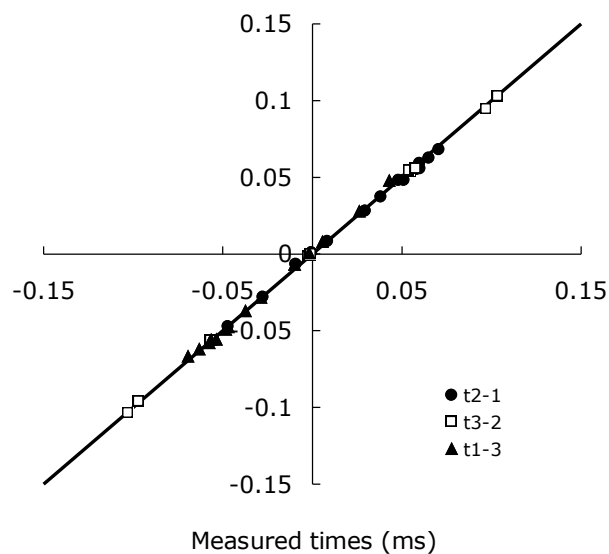


Fig.6 Confronto teorico sperimentale delle differenze dei TOA dell'onda sorgente a ciascuna sonda

Dalla Fig. 6 è possibile osservare l'eccellente accordo teorico-sperimentale.

Questo spiega perché la formazione ANN virtuale è riuscita a produrre un'architettura efficace direttamente utilizzabile per interpretare i risultati sperimentali.

V.3 Localizzazione degli eventi di EA: Metodo deterministico

Per valutare il metodo deterministico sviluppato, il software personalizzato sviluppato in ambiente Matlab 6,5 è stato fatto girare su un PC dotato di 2,16 GHz Intel Core2 Duo in ambiente Windows.

Nella tabella II sono riportati i dati di input adottati nel blocco B1:

Tabella II: Dati di input utilizzati per la validazione dell'algoritmo.

Dati d'ingresso	Valori
Lay up del laminato	monodirezionale
Proprietà del laminato*	$E_{11}=142$ (GPa) $E_{22} = 9.2$ (GPa) $G_{12} = 6.7$ (GPa) $\nu_{12} = 0.34$
Densità del laminato (ρ)	1.55 gr/cm ³
X-Y coordinate sonde	$S_1=0,0$; $S_2=280,0$; $S_3=140,280$
Differenze sperimentali dei TOA per le coppie di sonde mn (ΔT_{S-mn})**	ΔT_{S-12} , ΔT_{S-21} , ΔT_{S-31} ,
Errore Ammesso (Ea)	0.02 (2%)
Valore iniziale del passo griglia (St)	5 mm
Variazione del passo griglia (ΔSt)	1 mm
Valore minimo del passo griglia (St_{min})	1 mm

*riferito alla direzione delle fibre

**per tutti i 14 punti della figura 1

La figura 6 rappresentativa del buon accordo dei tempi teorici e sperimentali è nuovamente confermata anche qui dalla buona corrispondenza tra i punti localizzati e quelli reali come è possibile osservare in figura 7.

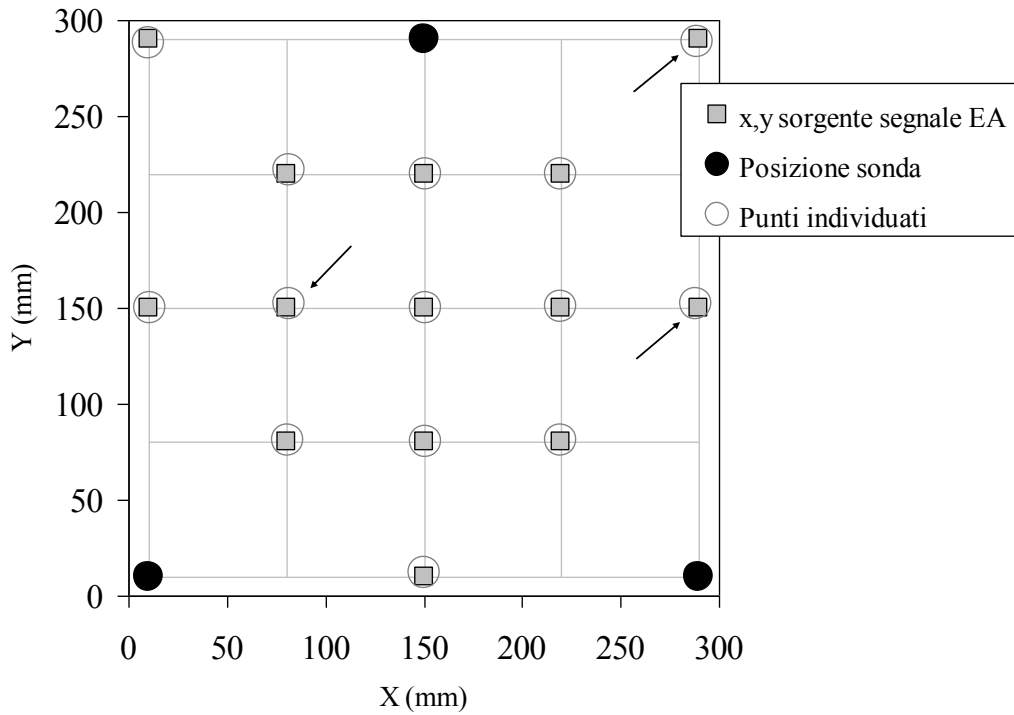


Fig.7 Confronto tra i punti sorgenti reali e quelli sperimentali

L'errore massimo assoluto ottenuto nella valutazione distanza tra il punto reale e quello previsto è di 6,08 millimetri registrato nei punti indicati dalle frecce (Fig.7).

V.3.1 Effetto delle proprietà del laminato, del passo, e dell'orientazione

In questa sezione sono segnalati l'effetto del passo, e l'influenza degli errori commessi nel valutare le proprietà meccaniche del laminato e nel determinare la giusta direzione delle fibre

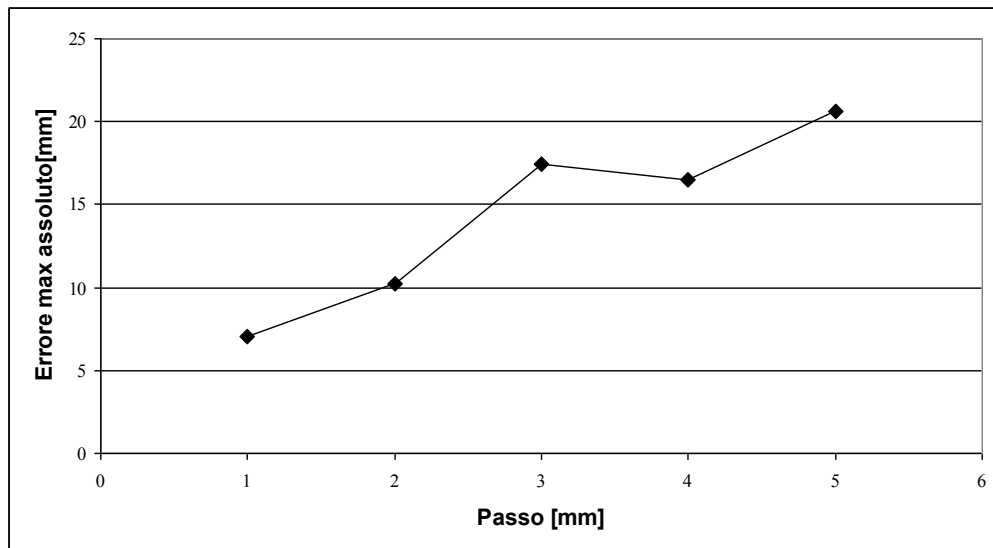


Fig.8: Differenza assoluta tra le xy reali e individuate in funzione del passo della griglia computazionale.

In figura 8, sono riportati il valore massimo della differenza assoluta tra la posizione reale e quella localizzata in funzione del passo della griglia.

Come previsto, la differenza assoluta diminuisce con la diminuzione passo. Tuttavia anche nelle peggiori condizioni (5 mm) l'errore rimane paragonabile al diametro sonda (20,6 mm rispetto al diametro del sensore che è 20,5 millimetri).

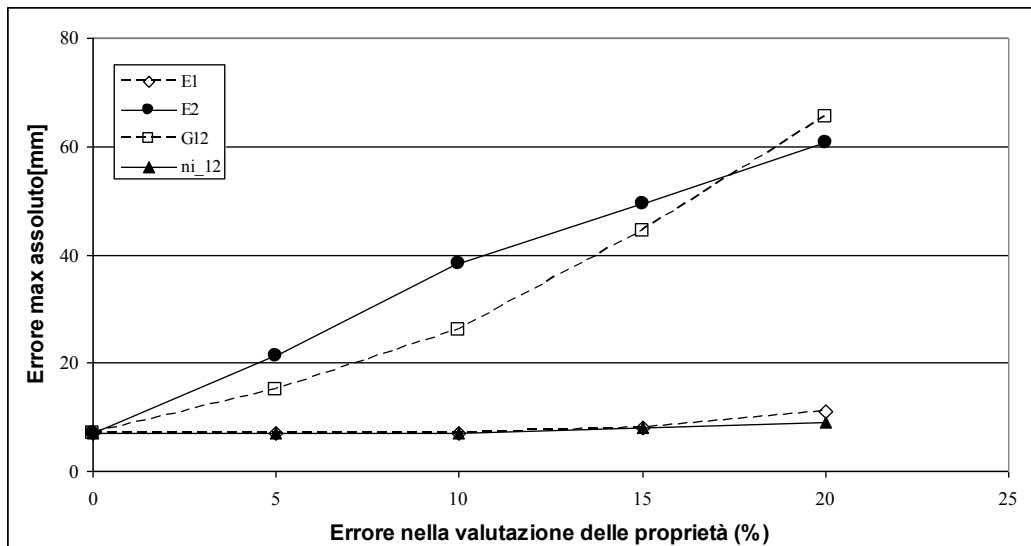


Fig.9: Errore max assoluto in funzione dell'errore commesso nel valutare le proprietà del laminato.

In figura 9 è riportata la dipendenza dell'errore (distanza punto reale-punto individuato) in funzione dell' errore commesso nel valutare le proprietà del laminato. La figura riporta il valore massimo della differenza assoluta tra la posizione reale e quella valutata quando le proprietà della lamina sono state variate in una gamma di $5 \div 20\%$ e il passo è fissato a 1 mm. Da quanto è possibile osservare l'errore massimo assoluto sembra essere costante con i moduli E11 e ν_{12} . Al contrario, l'errore assoluto è fortemente dipendente dalla variazione sia del modulo E22 che G12. Questo comportamento indica una forte sensibilità della localizzazione del punto di emissione acustica rispetto all' omogeneità del laminato. In altre parole, la presenza di zone ricche di resina potrebbero provocare un grave errore nel processo di localizzazione.

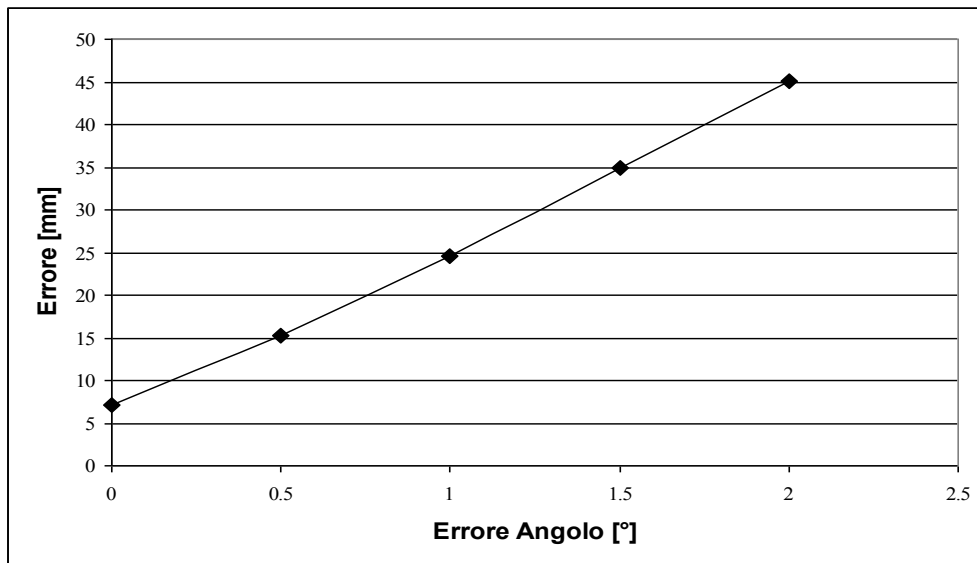


Fig.10: Errore max assoluto in funzione dell'errore nella determinazione della direzione delle fibre.

In figura 10 la differenza assoluta tra la posizione reale e la valutazione viene riportata come una funzione dell'errore nella misura in direzione delle fibre (θ). Come si può osservare l'errore assoluto aumenta linearmente con l'angolo.

Conclusioni

L' Emissione Acustica (EA) è da tempo riconosciuta come una tecnica valida per il monitoraggio in tempo reale di strutture metalliche e composito, fornendo informazioni utili non solo sulla presenza di difetti, ma anche sulle loro criticità [1-4]. Tuttavia, a causa della anisotropia dei laminati compositi, e quindi, a causa della dipendenza delle proprietà elastiche di questi materiali dalle differenti direzioni, anche la velocità delle onde è una funzione dell' orientamento, rendendo inutile la formulazione in forma chiusa proposto da Tobias [7] per la localizzazione di sorgenti di EA (danni, difetti, etc.). In questo lavoro, è stata studiata la localizzazione degli eventi di EA in una piastra monodirezionale CFRP utilizzando una interpretazione innovativa del processo di triangolazione classica. Sulla base della conoscenza dei tempi di arrivo dei segnali di EA alle sonde, le nuove procedure sono state implementate nella progettazione e realizzazione di una rete neurale addestrata virtualmente ed a un software personalizzato che non necessita di prove sperimentali. Tali metodologie sono state validate sperimentalmente. Dai risultati ottenuti e discussi, le principali conclusioni sono le seguenti:

- La teoria della laminazione è un valido strumento per la stima delle velocità (trasversale e longitudinale) delle onde in funzione dell'orientamento;
- Noto il metodo di correlare i TOA all'orientazione, è possibile sviluppare una procedura teorica che non necessita di tests sperimentali;
- E' possibile utilizzare un ANN addestrata virtualmente per studiare l'effetto della disposizione delle sonde sull' accuratezza delle misurazioni;
- Il software sviluppato, basato su un approccio innovativo rispetto al metodo di triangolazione fornisce buoni risultati nel localizzare il punto sorgente di EA in materiali ortotropi.

Sviluppi futuri

Dai risultati precedenti è possibile constatare che un ANN addestrata virtualmente ed il metodo deterministico sviluppato sono in grado di individuare correttamente le sorgenti di EA in laminati ortotropi. Per realizzare questo compito, sono necessari due strumenti: a) una tecnica sperimentale, che fornisce una misura precisa dei TOA in condizioni di esercizio; b) un metodo affidabile, valutato empiricamente o sviluppato teoricamente, attraverso il quale può essere stimato il TOA associato ad un generico punto nell'area monitorata.

L'accuratezza del metodo predittivo determina la correttezza della formazione ANN e della risposta dell'algoritmo sviluppato. È importante rendersi conto che, mentre l'eq. (5) (paragrafo III.1) è stata utilizzata in questo lavoro per esprimere $v_e = v_e(\theta)$, qualunque funzione in grado di seguire la tendenza sperimentale in fig. 3 (Paragrafo III.1) sarebbe stata ugualmente utile allo scopo, nel caso esaminato. Si deduce che le possibili differenze tra $v_e(\theta)$ e $v_e(-\theta)$, frutto di imperfezioni nella struttura del materiale, può essere stimato selezionando il rapporto più appropriato.

La precisione nella misurazione dei TOA influenza direttamente la bontà dei dati di input dell'ANN. Nel caso esaminato, analogamente ai risultati di altri ricercatori [7,12], il superamento della soglia tecnica è stata sufficiente per produrre valori coerenti di TOA. Tuttavia, i metodi alternativi, tra i quali il più popolare è la trasformata di wavelet di Gabor, hanno dimostrato di essere in grado di fornire stime affidabili dei TOA quando la natura dispersiva delle onde rende più difficile il compito [5,10,11].

È importante notare anche che la capacità di un ANN addestrata per risolvere i problemi di localizzazione è strettamente dipendente dalla posizione delle sonde. Una modifica della disposizione di queste ultime richiederà una nuova fase di formazione, e forse una diversa architettura della rete per ottenere una risposta soddisfacente. Da un lato, questa è una limitazione intrinseca nel metodo, d'altra parte, i risultati ottenuti in

questo lavoro suggeriscono un mezzo virtuale per studiare l'effetto di diversi parametri (posizione delle sonde, il numero di sensori impiegati nel monitoraggio, ecc) sulla precisione attesa dalle previsioni.

Nel caso specifico, dove un pannello piatto di superficie 780 cm^2 è stato monitorato con tre sonde di AE, l'errore massimo nel localizzare l'origine è stato di circa 7 mm (tabella II- Cap.3). Non è semplice un confronto di questo risultato con le previsioni equivalenti basate su un altro algoritmo, al fine di valutare l'efficacia del metodo proposto,. Infatti molti fattori, tra i quali il numero del sensore e la posizione, l'estensione della zona monitorata, e l' anisotropia del materiale svolgono un ruolo importante nell' influenzare la precisione. Tuttavia, una situazione simile a quella affrontata qui è stata vissuta da Jeong Jang [11], che ha usato una piastra quadrata di lato 600 mm di grafite monodirezionale e resina epossidica. L'area è stata monitorata da tre sensori disposti secondo una configurazione triangolare. La distanza tra le sonde non è stata specificata dagli autori ma, dai dati disponibili, l'area sotto il controllo sembra essere paragonabile a quella considerata qui. In questo caso, l'errore massimo nella localizzazione eseguita dalla triangolazione classica, era di 6,3 mm. Una precisione leggermente migliore è stata raggiunta quando è stato monitorato il laminato quasi-isotropo. L'errore massimo di 12,4 millimetri è stato citato da Banerjee e al. [30], che ha utilizzato nove sensori piezoelettrici uniformemente distribuiti su un pannello irrigidito CFRP di superficie 400 cm^2 , insieme ad una sofisticata analisi sulla base dei dati ad alta frequenza d'onda e di propagazione delle vibrazioni a bassa frequenza. Stime di gran lunga meno accurate sono state documentate da Coverley e Staszewski [15], che hanno incorporato dodici sensori SMART di un millimetro su un pannello composito quasi-isotropo (608 x 304 mm), cercando di prevedere la posizione dell'impatto mediante una tecnica di triangolazione accoppiata con una procedura di ottimizzazione dell'algoritmo. Quando sono stati utilizzati solo tre sensori per predire il

punto d'impatto, sono stati scoperti errori nell'ordine di molti centimetri per entrambe le coordinate del punto.

Comunque, l'applicazione delle ANN, nella localizzazione dei punti di origine dei segnali di EA, sembra essere promettente non solo per strutture piane, ma anche per componenti in composito curvi. Infatti, Prevoroski e al. [31] hanno monitorato tubi in fibra di vetro e resina epossidica, con avvolgimento [+55 / -55], con sei trasduttori distribuiti su una superficie 500 cm². I dati dei TOA sono stati inviati ad una ANN per la localizzazione dell'origine, determinando un errore inferiore a 8 mm.

Per quanto riguarda il software, su cui si è basato lo sviluppo del metodo deterministico, la sua validazione è stata fatta in condizioni controllate. In condizioni reali i segnali di EA in arrivo sulle varie sonde non sono isolati e arrivano in configurazione a cascata. In questo caso è difficile distinguere quali sono i segnali sulle differenti sonde generate dallo stesso evento di Emissione Acustica . Poi un compito importante, per sviluppare le attività future, è la costruzione di un nuovo blocco all'interno del software al fine di discriminare il segnale in arrivo su vari sensori come generato dallo stesso evento di EA .

BIBLIOGRAFIA

- [1] TF Drouillard, "A history of acoustic emission", *J. Acoust. Emiss.* 14 (1996) 1-34.
- [2] Nondestructive Testing Handbook, 3rd Ed., Vol 6, Acoustic Emission Testing, ASNT, Columbus OH, USA, 2005.
- [3] G Caprino, R Teti, I De Iorio, "Predicting residual strength of pre-fatigued glass fibre-reinforced plastic laminates through acoustic emission monitoring", *Composites Part B* 36 (2005) 365-71.
- [4] TP Philippidis, TT Assimakopoulou, "Using acoustic emission to assess shear strength degradation in FRP composites due to constant and variable amplitude fatigue loading", *Compos. Sci. Technol.* 68 (2008) 840-47.
- [5] A Mal, "Elastic waves from localized sources in composite laminates", *Int. J. Solids Struct.* 39 (2002) 5481-94.
- [6] A Marec, J-H Tomas, R. El Guerjouna, "Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data", *Mech. Syst. Sign. Pr.* 22 (2008) 1441-64.
- [7] A Tobias, "Acoustic-Emission source location in two dimensions by an array of three sensors", *Non-Destruct. Test.* 9 (1976) 9-12.
- [8] SM Ziola, MR Gorman, "Source location in thin plates using cross-correlation", *J. Acoust. Soc. Am.* 90 (1991) 2551-8.
- [9] LE Kinsler, AR Frey, AB Coppens, JV Sanders, Fundamentals of Acoustics, J. Wiley and Sons Publ., New York, 2000.
- [10] L Wang, FG Yuan, "Group velocity and characteristic wave curves of Lamb waves in composites: modelling and experiments", *Compos. Sci. Technol.* 67 (2007) 1370-84.

- [11] H Jeong, Y-S Jang, "Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates", *Compos. Struct.* 49 (2000) 443-50.
- [12] T Kundu, S Das, SA Martin, KV Jata, "Locating point of impact in anisotropic fiber reinforced composite plates", *Ultrasonics* 48 (2008) 193-201.
- [13] H.N. Bar, M.R. Bhat, C.R.L. Murthy, Identification fo failure modes in GFRP using PVDF sensors: ANN approach, *Compos. Struct.* 65 (2004) 231-237
- [14] M. Giordano, A. Calabro, C. Esposito, A. D'Amore and L. Nicolais, An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials , *Composites Science and Technology*. Volume 58, Issue 12, December 1998, Pages 1923-1928
- [15] PT Coverley, WJ Staszewski, "Impact damage location in composite structures using optimized sensor triangulation procedures", *Smart Mater. Struct.* 12 (2003) 795-803.
- [16] Gregory N. Morscher, Andrew L. Gyekenyesi,"The velocity and attenuation of acoustic emission waves in SiC/SiC composites loaded in tension"
- [17] Gregory N. Morscher," Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composit"e
- [18] Qing-Quing Ni, Masaharu Iwamoto, "Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites"
- [19] M. Wevers, "Listening to the sound of materials: acoustic emission for the analysis of material behaviour"
- [20] <http://www.mathworks.it/products/matlab/description6.html>
- [21] BD Ripley, *Pattern Recognition and Neural Networks*, Cambridge University Press, 1996.

- [22] HKDH Bhadeshia, "Neural networks in materials science", *ISIJ Int.* 39 (1999) 966-79.
- [23] JN Reddy, CM Wang, "An overview of the relationships between solutions of the classical and shear deformation plate theories", *Compos. Sci. Technol.* 60 (2000) 2327-35.
- [24] Morscher G.N., "Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite", *Composite Science and Technology*, 59 (1999), 687-697.
- [25] Gorman M.R., "Plate wave acoustic emission", *Journal of Acoustic Society of America*, V. 90 (1), (1991), 358-364.
- [26] Prosser W.H., Jackson K.E., Kellas S., Smith B.T., McKeon J., Friedman A., "Advanced waveform-based acoustic emission detection of matrix cracking in composites", *Materials Evaluation*, 1995, 1052-1058.
- [27] Surgeon M., Wevers M., "Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates", *NDT&E International*, 32, 1999, 311-322.
- [28] N. Toyama and J. Takatsubo, "An investigation of non-linear elastic behaviour of CFRP laminates and strain measurement using Lamb waves", *Composite Science and Technology*, V. 64 (2004), p. 1293.
- [29] Zhongqing Su, Lin Ye, Lamb wave-based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using artificial neural algorithm, *Compos. Struct.* 66 (2004) 627-637
- [30] S Banerjee, F Ricci, E Monaco, A Mal, "A wave propagation and vibration-based approach for damage identification in structural componente", *J. Sound Vibrat.* 322 (2009) 167-83.

[31] Z Prevoroski, M Landa, M Blahacek, D Varchon, J Rousseau, L Ferry, D Perreux, "Ultrasonic scanning and acoustic emission of composite tubes subjected to multiaxial loading", *Ultrasonics* 36 (1998) 531-7.

Ringrazio la Prof.ssa Isabella De Iorio e il Prof. Giancarlo Caprino per aver contribuito alla mia crescita professionale sostenendomi con la loro esperienza nello sviluppo di questo lavoro. Ringrazio ancora il Prof. Claudio Leone e la Prof.ssa Valentina Lopresto, nonché tutta l'equipe del C.I.R.T.I.B.S., per avermi seguito con pazienza e per il sostegno, gratuitamente offerto, per lo sviluppo di questo lavoro di ricerca.