

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Meccanica



**STUDIO SPERIMENTALE FINALIZZATO AL
MONITORAGGIO DI DIFETTOSITA' INTERNE IN
LAMINATI CFRP PER UTILIZZO AERONAUTICO
MEDIANTE APPROCCIO ULTRASONORO CON
ONDE DI LAMB**

Relatore : Prof. Michele CARBONI

Tesi di Laurea di:

Riccardo GALEAZZI

Matr. 782645

Anno Accademico 2012 – 2013

Un grazie a tutte le persone che mi hanno sostenuto, aiutato e supportato. Ringrazio la mia famiglia, i miei amici che sono stati importanti per l'ottenimento di questo traguardo. Non da ultimo, un particolare pensiero lo rivolgo a Michele Carboni e Andrea Gianneo, con i quali ho condiviso quest'ultima parte del mio cammino.

Riccardo Galeazzi

Indice

Indice	<i>iv</i>
Elenco figure	<i>ix</i>
Elenco tabelle	<i>xv</i>
Introduzione	<i>xviii</i>
1. Stato dell'arte	1
1.1 Materiali compositi fibro-rinforzati in carbonio	1
1.2 Compositi Carbon Fiber Reinforced Polymer	3
1.2.1 Applicazioni Aeronautiche	3
1.2.2 Applicazioni Automotive	5
1.2.3 Applicazioni in ingegneria civile	8
1.2.4 Applicazioni sportive, competizioni e curiosità	12
1.3 Proprietà del composito CFRP nel presente lavoro di tesi	14
1.4 Processi di monitoraggio strutturale SHM	18
1.5 Onde ultrasonore di Lamb, basi teoriche	21
1.5.1 Teoria delle onde di Lamb per una lastra di materiale omogeneo isotropo	23
1.5.2 Onde di Lamb su materiali compositi a layer multiplo	27
1.5.3 Velocità di propagazione	30
1.6 Trasduttori utilizzati per l'attivazione delle onde di Lamb	34
1.7 Scopi del lavoro svolto	36
1.8 Bibliografia	37

2. Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S -----	41
2.1 Introduzione-----	41
2.2 Prove sperimentali per la visualizzazione delle curve di dispersione A_0 e S_0 sul laminato composito SAATI EH550/T800S-----	45
2.2.1 Preparazione dei sensori PZT e loro incollaggio -----	45
2.2.2 Attuazione e acquisizione dell'onda di Lamb all'interno del laminato, catena di misura -----	52
2.2.3 Analisi del segnale acquisito per la misura della velocità di propagazione del modo A_0 -----	58
2.2.4 Analisi del segnale acquisito per la misura della velocità di propagazione del modo S_0 -----	66
2.3 Risultati sperimentali ottenuti per i modi propagativi di Lamb A_0 e S_0 -----	67
2.3.1 Curve di dispersione modo A_0 -----	67
2.3.2 Curve di dispersione modo S_0 -----	70
2.4 Dimostrazione sperimentale della trascurabilità del modo S_0 di Lamb per frequenze di eccitazione minori di 50 kHz-----	73
2.5 Approccio FEM e simulazione delle curve di dispersione del modo A_0 di Lamb -----	76
2.5.1 Modulo Part -----	77
2.5.2 Modulo Property-----	78
2.5.3 Modulo Step-----	80
2.5.4 Modulo Load-----	82
2.5.5 Modulo Mesh -----	84
2.5.6 Modulo Job-----	85
2.6 Risultati della modellazione FEM della propagazione delle onde di Lamb -----	85
2.6.1 Calcolo delle velocità di propagazione del modo A_0 di Lamb -----	88
2.7 Bibliografia-----	94

3. Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali -----	97
3.1 Introduzione -----	97
3.1.1 Descrizione della strumentazione della piastra difettata artificialmente-----	97
3.2 Controlli NDT tradizionali applicati ai laminati difettati -----	99
3.2.1 Radiografic Testing RT-----	99
3.2.1.1 Emissione dei raggi X e loro interazione con la materia-----	99
3.2.1.2 Sorgente radiogena utilizzata-----	101
3.2.1.3 Le pellicole-----	104
3.3 Preparazione della piastra CFRP SAATI EH550/T800S ed esecuzione della prova RT -----	105
3.3.1 Preparazione della prova radiografica-----	106
3.3.2 Sviluppo fotografico e risultati finali-----	108
3.3.3 Analisi di immagine-----	109
3.4 Approccio Pulse Echo: individuazione della posizione dei difetti artificiali -----	112
3.4.1 Set-Up Sperimentale -----	113
3.4.2 Acquisizione e analisi del segnale Pulse Echo con difetti artificiali -----	113
3.4.3 Conclusioni sui risultati finali Pulse Echo con difetti artificiali -----	122
3.5 Approccio Pitch Catch applicato ai difetti artificiali -----	124
3.5.1 Set-Up Sperimentale Pitch Catch e analisi dei segnali-----	127
3.5.2 Risultati ottenuti dalla tecnica Pitch Catch in relazione ai difetti Artificiali -----	132
3.6 Bibliografia-----	140
4. Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali -----	143
4.1 Caratterizzazione delle delaminazioni naturali ottenute mediante prove di impatto-----	143

4.1.1	Prove di impatto, cenni sui meccanismi e sugli effetti di danno-----	143
4.1.2	Set-Up sperimentale per le prove di impatto -----	147
4.1.3	Svolgimento della prova-----	150
4.1.4	Tecnica C-Scan -----	152
4.1.5	Set-Up del C-Scan utilizzato e risultati ottenuti -----	155
4.2	Approccio Pulse Echo, individuazione della posizione dei difetti naturali -----	158
4.2.1	Analisi di confronto dei segnali Pulse Echo-----	160
4.2.2	Risultati ottenuti e discussione -----	166
4.3	Approccio Pitch Catch per difetti naturali creati con prove di impatto ad energia crescente -----	169
4.3.1	Risultati ottenuti dalla tecnica Pitch-Catch applicata ai difetti naturali -----	171
4.4	Bibliografia -----	176
5.	Analisi del coefficiente di trasmissione e riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti artificiali e naturali -----	177
5.1	Progettazione e analisi degli esperimenti -----	177
5.2	Piani sperimentali DOE -----	179
5.2.1	Piano fattoriale completo 2^k -----	180
5.2.2	Analisi ANOVA -----	182
5.3	Analisi dei risultati statistici ottenuti per difetti artificiali e naturali sul laminato SAATI EH550/T800S con approcci PE e PC-----	185
5.3.1	Significatività dei fattori caratterizzanti i difetti artificiali con tecniche PE e PC -----	187
5.3.2	Significatività dei fattori caratterizzanti i difetti naturali con tecniche PE e PC -----	191
5.4	Bibliografia-----	193
6.	Conclusioni e sviluppi futuri-----	195
6.1	Conclusioni complessive sul lavoro svolto in questa tesi -----	195

Indice

6.2 Sviluppi futuri	196
6.3 Bibliografia.....	197

Elenco figure

1.1 Trend di utilizzo dei materiali compositi nel settore Aeronautico-----	3
1.2 Motore Royce Trent XWB-97 con scocca in materiale CFRP-----	4
1.3 A350 XWB, Structural Design -----	5
1.4 Trend di mercato dei CFRP nel settore automotive -----	6
1.5 Architettura del veicolo BMW i3 City e suo concept -----	7
1.6 Architettura CFRP elettrico strutturale -----	8
1.7 Bonifica e consolidamento edile -----	9
1.8 Ponte pedonale in fibra di vetro, Danimarca-----	9
1.9 Rinforzo CFRP trave portante -----	10
1.10 Tondini per cemento armato costruiti in fibra di vetro o CFRP-----	10
1.11 Tecnica NSM-----	11
1.12 Tecnica Post Tensioning -----	11
1.13 Telaio Dogma Pinarello con cerchi a profilo alto -----	13
1.14 Particolari costruttivi del telaio Dogma Pinarello -----	13
1.15 Schema di riferimento CFRP-----	15
1.16 Configurazione Pitch Catch e Pulse Echo -----	21
1.17 Schema della lamina di materiale omogeneo isotropo-----	23
1.18 Moto ondoso propagativo onde longitudinali -----	24
1.19 Moto ondoso propagativo onde trasversali -----	24
1.20 Moto ondoso propagativo onde di Lamb -----	25
1.21 Modo propagativo simmetrico S e antisimmetrico A -----	27
1.22 Modo propagativo Shear Horizontal -----	29
1.23 Curve di dispersione di un laminato composito -----	33
1.24 Fenomeno di attenuazione -----	34
1.25 Esempio di sonda EMAT prodotta da Olympus -----	34
1.26 Esempio di trasduttore PZT prodotto da Annon Piezo Technologies ----	35
2.1 Discretizzazione dello spessore del laminato -----	42
2.2 Curve di dispersione raffiguranti le velocità di gruppo all'interno del laminato SAATI EH550/T800S-----	43
2.3 Visualizzazione del modo A_0 rispetto alla direzione di propagazione, risultato SAFE per laminato SAATI EH550T800S -----	44

Elenco figure

2.4 Visualizzazione del modo S_0 rispetto alla direzione di propagazione per laminato SAATI EH550/T800S-----	44
2.5 Schema logico di posizionamento e collegamento PZT al fine di realizzare l'eccitazione in fase e contro-fase -----	46
2.6 Componentistica utilizzata -----	47
2.7 Realizzazione circuito fase- controfase-----	47
2.8 Campo di spostamenti generati durante i due tipi di eccitazione -----	48
2.9 Interpretazione dei coefficienti della ceramica PIC255 -----	49
2.10 Trasduttore PZT PIC255 PiCeramic impegati -----	50
2.11 Particolare del PZT collegato e incollato sulla piastra SAATI EH550/T800s -----	51
2.12 Piastra SAATI EH550/T800S strumentata per la misura delle velocità di propagazione A_0 e S_0 di Lamb-----	52
2.13 Forma d'onda diagnostica ad una frequenza di 80 kHz -----	53
2.14 Agilent 33220A -----	54
2.15 Teledyne LeCroy WAVEACE1001 -----	55
2.16 TTI WA301 -----	55
2.17 KRONHITE 3322 -----	56
2.18 Schema di collegamento intuitivo della catena di misura -----	57
2.19 Segnali diagnostico e risposta per una frequenza di eccitazione di 80 kHz sul laminato SAATI EH550/T800S acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0° -----	58
2.20 Esempio di decomposizione discreta wavelet-----	59
2.21 De-Noiseing del segnale ad una frequenza dell'onda diagnostica pari a 80 kHz acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0° -----	60
2.22 Segnali normalizzati, frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 80 kHz, acquisiti dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0° -----	61
2.23 Risultato <i>cwt</i> -----	63
2.24 Risultato delle operazioni di pulitura, normalizzazione ed estrazione energetica alla frequenza di 80 kHz per il laminato SAATI EH550/T800S acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0° -----	63
2.25 Inviluppo di Hilbert dei segnali diagnostico e di risposta alla frequenza di eccitazione di 80 kHz acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0° -----	65
2.26 Inviluppo di Hilbert dei segnali diagnostico e di risposta alla frequenza di eccitazione di 80 kHz acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0° in modalità FASE-----	66

2.27 Curve di dispersione laminato SAATI EH550/T800S per il modo A_0 di Lamb SAFE e sperimentale per differenti direzioni di propagazione -----	69
2.28 Curve di dispersione sperimentali del laminato SAATI EH550/T800S per il modo A_0 di Lamb per differenti direzioni di propagazione -----	69
2.29 Curve di dispersione laminato SAATI EH550/T800S per il modo S_0 di Lamb SAFE e sperimentale per differenti direzioni di propagazione -----	71
2.30 Curve di dispersione sperimentali del laminato SAATI EH550/T800S per il modo S_0 di Lamb per differenti direzioni di propagazione -----	72
2.31 Acquisizione da attuazione in fase e controfase dei segnali ricevuti dal sensore posizionato sulla direzione di propagazione parallela longitudinale (0°) alla frequenza di 30kHz dal laminato SAATI EH550/T800S -----	74
2.32 Rapporto A_0/S_0 fase, contro-fase in decibel dal laminato SAATI EH550/T800S in funzione della frequenza di eccitazione -----	75
2.33 Creazione della parte geometrica del laminato 300x300 mm -----	77
2.34 Completamento dello sketch Part-1 -----	77
2.35 Inserimento delle proprietà fisiche ed elastiche del laminato SAATI EH550/T800S-----	79
2.36 Inserimento ply, tramite l'applicazione di Abaqus CAE, composite Layup -----	79
2.37 Creazione dei punti di misura dal modulo Step al modulo Part -----	81
2.38 Creazione della History-Output -----	82
2.39 Creazione dell'andamento della forzante in forma tabulare -----	83
2.40 Carico assegnato al laminato tramite l'ampiezza calcolata precedentemente -----	83
2.41 Tipologia di elementi scelti per eseguire la mesh -----	85
2.42 Simulazione della propagazione del modo A_0 (spostamenti $U_3(z)$) all'interno del laminato SAATI EH550/T800S-----	86
2.43 Risultati preliminari di spostamento U_3 ottenuti dalla History-Output forniti da Abaqus per il laminato SAATI EH550/T800S -----	87
2.44 Esportazione risultati -----	88
2.45 Segnali diagnostico e risposta provenienti da Abaqus ed elaborati in Matlab per frequenza di eccitazione di 80 kHz nel laminato composito SAATI EH550/T800S-----	89
2.46 Curve di dispersione laminato SAATI EH550/T800S per il modo A_0 di Lamb SAFE, FEM e sperimentale per differenti direzioni di propagazione --	91
2.47 Curve di dispersione laminato SAATI EH550/T800S per il modo A_0 di Lamb per differenti direzioni di propagazione-----	92

Elenco figure

3.1 Disegno CAD della piastra SAATI EH550/T800S con il posizionamento difetti -----	98
3.2 Piastra SAATI EH550/T800S strumentata con sensori PE e PC -----	99
3.3 Tubo radiogeno -----	100
3.4 Spettro elettromagnetico del visibile-----	101
3.5 Macchina radiogena -----	103
3.6 Schema di posizionamento della pellicola rispetto al pezzo investito dai raggi X -----	107
3.7 Passi logici processo di sviluppo -----	108
3.8 Radiografia laminato SAATI EH550/T800S con difetto da 8 mm -----	109
3.9 Radiografia laminato SAATI EH550/T800S con difetto da 24 mm -----	109
3.10 Schema quote prese dalla radiografia -----	110
3.11 Echi presenti nella parte del laminato SAATI EH550/T800S -----	114
3.12 Segnale acquisito dalla catena di misura PE sul laminato SAATI EH550/T800S ad una frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 45 kHz -----	115
3.13 Scalogramma wavelet -----	116
3.14 Segnale diagnostico e segnale Pulse Echo, estratti alla frequenza di eccitazione di 45 kHz -----	117
3.15 Involuppo del segnale diagnostico e del segnale PE a 45 kHz, proveniente dal sensore posizionato sulla parte inferiore sinistra del laminato SAATI EH550/T800S-----	117
3.16 Caratterizzazione degli echi di fondo e dell'eco del difetto con una frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 45 kHz-----	119
3.17 Coefficienti di riflessione per l'approccio PE su piastra SAATI EH550/T800S difettata artificialmente-----	124
3.18 Schema Pitch Catch, ottenimento segnale riferimento e segnale d'analisi-----	125
3.19 Porzione di laminato SAATI EH550/T800S adeguatamente strumentato per la prova Pitch Catch -----	128
3.20 Operazioni preliminari sui segnali ottenuti per un onda diagnostica a 45 kHz -----	129
3.21 Variazione percentuale della velocità di propagazione del modo A_0 nell'attraversamento delle delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S-----	136
3.22 Variazione percentuale della varianza nell'attraversamento delle delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S -----	137

3.23 Variazione percentuale dell'RMS nell'attraversamento delle delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S -----	138
3.24 Variazione percentuale del CF nell'attraversamento delle delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S -----	139
4.1 Tessuto in fibra di carbonio -----	145
4.2 Danno in un laminato composito a differenti energie di impatto -----	145
4.3 Decadimento della resistenza a fatica di una materiale CFRP composto da 16 ply dello spessore di 0,26 mm-----	147
4.4 Schema della macchina per gli impatti utilizzata -----	148
4.5 Visione di insieme della macchina per gli impatti -----	149
4.6 Laser a triangolazione-----	150
4.7 Impattatore-----	152
4.8 Posizioni delle prove di impatto sul laminato SAATI EH550/T800S -----	152
4.9 Principio alla base della tecnica C-Scan-----	154
4.10 Procedura C-Scan -----	154
4.11 Risultato C-Scan di una scansione di una superficie metallica in avanzato stato di degrado corrosivo-----	155
4.12 Apparecchiatura C-Scan del Dipartimento Aerospaziale del Politecnico di Milano -----	156
4.13 Risultati C-Scan -----	157
4.14 Laminato strumentato, destinato alla prova di impatto, in cui sono indicate le zone e le energie utilizzate per la creazione dei difetti naturali-----	160
4.15 Processazione del segnale con frequenza di eccitazione pari a 45 kHz --	161
4.16 Errore percentuale tra segnale di riferimento e quello contenente la delaminazione dopo un impatto sul laminato SAATI EH550/T800S di 15 J -----	162
4.17 Magnificazione della risposta di delaminazione dopo un impatto sul laminato SAATi EH550/T800S di 15J-----	163
4.18 Prova ultrasonora Phased-Array sul laminato SAATI EH550/T800S impattato con un'energia pari a 20 J-----	165
4.19 Mappatura ottenuta sul laminato SAATI EH550/T800S nella zona di delaminazione a 20 J in cui si confrontano i risultati del Phased-Array con ciò che è stato ottenuto dalla triangolazione con le onde di Lamb -----	167
4.20 Segnali PC resi disponibili dopo le operazioni di pulitura, estrazione del massimo contributo energetico alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica di 45 kHz-----	170

Elenco figure

4.21	Variazione della velocità del modo A_0 nell'attraversamento della delaminazione nel laminato SAATI EH550/T800S-----	173
4.22	Variazione percentuale della varianza della porzione di segnale di prima trasmissione all'interno del laminato SAATI EH550/T800S -----	174
4.23	Variazione percentuale dell'RMS rispetto al riferimento per differenti energie di impatto sul laminato SAATI EH550/T800S-----	175
4.24	Variazione percentuale del Crest Factor durante l'attraversamento dell'onda nella delaminazione all'interno del laminato SAATI EH550/T800S -----	175
5.1	Rappresentazione euclidea dei piani fattoriali 2^k effettuati sulla piastra SAATI EH550/T800S con tecnica PE e PC-----	181
5.2	Risultato DOE per l'approccio PE in relazione ai danni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S-----	188
5.3	Ipotesi di applicabilità del modello ANOVA per i coefficienti di riflessione PE da delaminazioni artificiali -----	189
5.4	Risultato DOE per l'approccio PC in relazione ai danni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S-----	190
5.5	Ipotesi di applicabilità del modello ANOVA per i coefficienti di trasmissione PC da delaminazioni artificiali -----	191
5.6	Risultato DOE per l'approccio PE in relazione ai danni naturali a seguito di impatti ad energia crescente nel laminato SAATI EH550/T800S -----	192
5.7	Risultato del DOE per l'approccio PC in relazione ai danni naturali a seguito di impatti ad energia crescente nel laminato SAATI EH550/T800S -----	193

Elenco tabelle

1.1 Caratteristiche meccaniche della fibra di carbonio prodotta da Toray -----	2
1.2 Caratteristiche meccaniche fibra e matrice del laminato SAATI EH550/T800S-----	17
1.3 Caratteristiche meccaniche lamina SAATI EH550/T800S -----	17
1.4 Caratteristiche meccaniche da analisi analitica laminato SAATI EH550/T800S-----	17
1.5 Caratteristiche meccaniche sperimentali laminato SAATI EH550/T800S -----	18
2.1 Velocità di gruppo modo A_0 per il laminato SAATI EH550/T800S, risultato dell'approccio SAFE per gli angoli di propagazione 0° , 30° , 60° , 90° -----	43
2.2 Velocità di gruppo modo S_0 per il laminato SAATI EH550/T800S, risultato dell'approccio SAFE per gli angoli di propagazione 0° , 30° , 60° , 90° -----	44
2.3 Caratteristiche della ceramica PZT PIC255 -----	49
2.4 Caratteristiche tecniche Oscilloscopio Teledyne LeCroy WAVEACE 1001 -----	54
2.5 Risultati a confronto SAFE e sperimentali modo di propagazione A_0 nel laminato SAATI EH550/T800S-----	67
2.6 Risultati a confronto SAFE e sperimentali modo di propagazione S_0 nel laminato SAATI EH550/T800S-----	70
2.7 Fattore di conversione tra scala decibel e valore assoluto del rapporto $a(A_0)/a(S_0)$ -----	73
2.8 Proprietà elastiche e fisiche del laminato EH550/T800S -----	78
2.9 Lunghezza elementi finiti adottati nel modello -----	84
2.10 Risultati a confronto SAFE, FEM e sperimentale modo di propagazione A_0 nel laminato SAATI EH550/T800S -----	89
2.11 Errore di scostamento tra FEM e SAFE e tra sperimentale e FEM -----	90
3.1 Pellicole AGFA più comuni sul mercato-----	105
3.2 Posizione e dimensione del danno nella piastra uno del laminato composito SAATI EH550/T800S -----	111
3.3 Posizione e dimensione del danno nella piastra due del laminato composito SAATI EH550/T800S -----	112

3.4	Frequenze di eccitazione e campionamento oscilloscopio-----	119
3.5	Risultati localizzazione difetto tramite approccio PE piastra uno SAATI EH550/T800S-----	121
3.6	Risultati localizzazione difetto tramite approccio PE piastra due SAATI EH550/T800S-----	122
3.7	Difetto da 24,8 mm posto sulla piastra uno in superficie (1° e 2° ply) al laminato SAATI EH550/T800s -----	133
3.8	Difetto da 24 mm posto sulla piastra uno sul fondo (16° e 17° ply) al laminato SAATI EH550/T800s -----	133
3.9	Difetto da 10,31 mm posto sulla piastra uno sul fondo (16° e 17° ply) al laminato SAATI EH550/T800s -----	133
3.10	Difetto da 9 mm posto sulla piastra uno in superficie (1° e 2° ply) al laminato SAATI EH550/T800s -----	134
3.11	Difetto da 24 mm posto sulla piastra due sul fondo (16° e 17° ply) al laminato SAATI EH550/T800s -----	134
3.12	Difetto da 22,9 mm posto sulla piastra due in superficie (1° e 2° ply) al laminato SAATI EH550/T800s -----	134
3.13	Difetto da 7,5 mm posto sulla piastra due sul fondo (16° e 17° ply) al laminato SAATI EH550/T800s -----	135
3.14	Difetto da 9,4 mm posto sulla piastra due in superficie (1° e 2° ply) al laminato SAATI EH550/T800s -----	135
4.1	Forzi di compressione residua dopo l’impatto di differenti CFRP -----	146
4.2	Energie potenziali teoriche e reali utilizzate negli impatti-----	151
4.3	Dimensioni della delaminazione associata all’energia di impatto-----	157
4.4	Risultati di localizzazione del danno e coefficiente K alla frequenza di eccitazione dell’onda diagnostica di 45 kHz -----	168
4.5	Risultati di localizzazione del danno e coefficiente K alla frequenza di eccitazione dell’onda diagnostica di 60 kHz -----	168
4.6	Risultati ottenuti per la delaminazione sul laminato SAATI EH550/T800S prodotta a seguito di un impatto di energia pari a 5 J -----	171
4.7	Risultati ottenuti per la delaminazione sul laminato SAATI EH550/T800S prodotta a seguito di un impatto di energia pari a 10 J -----	171
4.8	Risultati ottenuti per la delaminazione sul laminato SAATI EH550/T800S prodotta a seguito di un impatto di energia pari a 15 J -----	172
4.9	Risultati ottenuti per la delaminazione sul laminato SAATI EH550/T800S prodotta a seguito di un impatto di energia pari a 20 J -----	172

5.1 Piano fattoriale completo 2^k per prove PC e PE difetti naturali-----	181
5.2 Piano fattoriale completo 2^k per prove PC e PE difetti artificiali-----	181
5.3 Coefficienti di riflessione approccio PE per difetti artificiali sul laminato SAATI EH550/T800S -----	185
5.4 Coefficienti di trasmissione approccio PC per difetti artificiali sul laminato SAATI EH550/T800S -----	185
5.5 Coefficienti di riflessione approccio PE per difetti naturali sul laminato SAATI EH550/T800S -----	186
5.6 Coefficienti di trasmissione approccio PC per difetti naturali sul laminato SAATI EH550/T800S -----	186
5.7 Tavola ANOVA per i coefficienti di riflessione PE per delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S -----	189
5.8 Tavola ANOVA per i coefficienti di trasmissione PC per delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S -----	190

Introduzione

La presente tesi di laurea ha sviluppato un processo di monitoraggio strutturale non distruttivo di pannelli compositi fibro-rinforzati in carbonio (CFRP) utilizzando, nello specifico, le onde ultrasonore guidate o onde di Lamb, allo scopo di individuare la posizione dei difetti nella struttura, mediante un algoritmo di calcolo in grado di analizzare il segnale proveniente dai sensori piezoelettrici opportunamente posizionati. Il programma di lavoro ha previsto una fase preliminare rivolta alla comprensione del fenomeno di propagazione del moto ondoso all'interno del materiale in tutto il campo di frequenze di eccitazione fino a quella di cut-off identificata attorno a 300 kHz, fino alla quale sono presenti solo i primi modi fondamentali A_0 , S_0 e SH_0 . Ciò è stato possibile attraverso la validazione dei dati numerici già disponibili, provenienti dal precedente studio svolto nel precedente lavoro di tesi "*Analisi e progettazione sperimentale applicata al monitoraggio strutturale di pannelli fibro rinforzati mediante onde di Lamb*", grazie all'implementazione di una massiccia campagna di prove sperimentali di misura. Il primo punto del programma di lavoro, ha inoltre dimostrato la presenza trascurabile del modo propagativo S_0 al disotto della frequenza critica di 50kHz; per ottenere questo risultato, ci si è serviti di misure accoppiate dei modi propagativi A_0 e S_0 tramite i tempi di volo tra sensore attuatore e sensore ricevitore. Si è quindi implementato un modello FEM per il calcolo della velocità propagativa A_0 , ed S_0 che ha trovato validazione negli esperimenti svolti sui laminati.

Dopo la comprensione del fenomeno di propagazione, si è focalizzata l'attenzione sull'individuazione di difetti provocati artificialmente con patch di teflon inserite all'interno del laminato a simulare una delaminazione, questo per facilitare l'individuazione di un valido metodo di lavoro. La caratterizzazione dell'approccio con la tecnica Pulse-Echo ha trovato un solido riscontro con le tecniche NDT più tradizionali. Il controllo radiografico RT, il controllo C-Scan, e la tecnica Phased Array, hanno potuto così dare prova incontrovertibile della corretta individuazione della posizione dei difetti. Caratterizzato il buon comportamento della tecnica Pulse-Echo, si è passati allo studio del fenomeno di interazione delle onde di Lamb utilizzando l'approccio Pitch Catch unito anch'esso alle delaminazioni artificiali.

Lo studio, ha quindi spostato la sua attenzione dedicando un capitolo all'interazione dell'onda con i difetti naturali, i quali sono stati ottenuti sui

pannelli integri attraverso prove di impatto a differente energia che hanno provocato nella struttura delle delaminazioni negli strati interni di composito. Da sottolineare in questa fase, la fondamentale importanza dei risultati ottenuti con prove NDT tradizionali che hanno permesso la caratterizzazione del danno a seguito dell'impatto e hanno permesso il confronto con i risultati sperimentali Pulse Echo e Pitch Catch, permettendone la validazione.

Vi sono infine dei fattori che caratterizzano distintamente la tipologia di difetti artificiali e naturali. Per i primi troviamo dimensione, posizione nello spessore all'interno del laminato e frequenza dell'onda diagnostica utilizzata; per i secondi invece si aggiunge l'energia utilizzata nell'impatto per ottenere la delaminazione. Il capitolo conclusivo si è occupato di analizzare i parametri sintetici che caratterizzano questi fattori mediante analisi statistica DOE attraverso il corrispondente piano fattoriale 2^k . Ciò ha permesso di individuare per ogni parametro sintetico calcolato in ogni approccio, quale dei fattori soprariportati caratterizzanti le anomalie ha maggior influenza nell'interazione con l'onda diagnostica.

Capitolo 1 -- Stato dell'arte

1.1 Materiali compositi fibro-rinforzati in carbonio

La definizione di materiale composito è tutt'altro che univoca, secondo l'ASM (American Society of Metals, [1.1]) un composito è la combinazione di due o più materiali che differiscono nella forma o nella composizione su una macroscala definita. Tuttavia i costituenti conservano la loro forma e possono essere fisicamente identificati [1.2]. In generale il motivo per cui si produce un composito è quello di ottenere un materiale risultante le cui caratteristiche finali siano superiori a quelle dei materiali che lo compongono presi singolarmente. Va da sé che i due principali componenti del materiale composito detti "matrice" e "rinforzo" vanno accuratamente scelti e ponderati per ottenere il miglior compromesso del materiale risultante.

Alla base dei vantaggi dei materiali compositi sta il concetto di trasferimento di carico, miscelando opportunamente le percentuali di matrice e di rinforzo noto che il rapporto quantitativo può essere variato a piacimento entro certi limiti, è possibile ottenere un composito con le specifiche ottimali per una applicazione mirata. Vastissime sono le applicazioni, specie quelle aeronautiche, in cui le caratteristiche meccaniche finali come resistenza, leggerezza, rigidità torsionale e flessionale, dettano la scelta del rapporto quantitativo e della tipologia dei materiali che costituiscono il materiale risultante. Aumentando o diminuendo le quantità di matrice e rinforzo, disponendo le fibre ed il numero di strati si può promuovere o meno il trasferimento del carico e quindi variare in maniera precisa le caratteristiche finali del prodotto.

Avvicinandosi alla tipologia studiata nel presente lavoro di tesi, i materiali compositi fibro-rinforzati considerati sono quelli detti a fibra lunga. Questi materiali utilizzano rinforzi fibrosi con lunghezza elevata, o addirittura veri e propri tessuti, in entrambi i casi le fibre sono mantenute assieme tramite una matrice polimerica. Per le fibre, si sceglie solitamente un materiale molto prestante, le cui caratteristiche meccaniche sono elevate. Nella Tabella 1.1 sono riportate a titolo di esempio le caratteristiche delle fibre di carbonio Toray [1.3], uno dei maggiori produttori mondiali.

Carbon Fiber

Designation	Fiber Type	Number of Filament	Tensile Strength (MPa)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Tensile Modulus (Gpa)	Tensile Modulus (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Mas per Unit Length (tex/g/1000m)	Density (g/cm ³)
T300									
T300-1000	T300	1000	3530	360	230	23500	1.5	66	1.76
T300-3000	T300	3000	3530	360	230	23500	1.5	198	1.76
T300-6000	T300	6000	3530	360	230	23500	1.5	396	1.76
T300-12000	T300	12000	3530	360	230	23500	1.5	800	1.76
T300-	T300	1000	3530	360	230	23500	1.5	70	1.76
T300B									
T300B-1000	T300B	1000	3530	360	230	23500	1.5	66	1.76
T300B-3000	T300B	3000	3530	360	230	23500	1.5	198	1.76
T300B-3000	T300B	3000	3530	360	230	23500	1.5	198	1.76
T300B-6000	T300B	6000	3530	360	230	23500	1.5	396	1.76
T300B-12000	T300B	12000	3530	360	230	23500	1.5	800	1.76
T400HB									
T400HB-3000	T400HB	3000	4410	450	250	25500	1.8	198	1.8
T400HB-6000	T400HB	6000	4410	450	250	25500	1.8	396	1.8
T700S C									
T700SC-12000	T700SC	12000	4900	500	230	23500	2.1	800	1.8
T700SC-24000	T700SC	24000	4900	500	230	23500	2.1	1650	1.8
T800HB									
T800HB-6000	T800HB	6000	5490	560	294	30000	1.9	223	1.81
T800HB-12000	T800HB	12000	5490	560	294	30000	1.9	445	1.81
T1000GB									
T1000GB-12000	T1000GB	12000	6370	650	294	30000	2.2	485	1.8

Tabella 1.1: Caratteristiche meccaniche della fibra di carbonio prodotta da Toray [1.3]

Per la morfologia dei compositi a fibre lunghe, si trovano i laminati, i tessuti e i pultrusi. Questi ultimi si identificano in quei compositi in cui le fibre lunghe sono disposte unidirezionalmente. In particolare possiamo identificare i tessuti come un intreccio di fibre secondo un particolare disegno a formare la trama, la cui forma è fondamentale per il sostentamento del carico. I tessuti saranno impregnati con resine polimeriche a formare in un caso i laminati, ovvero componenti la cui superficie è preponderante rispetto allo spessore, ottenuti sovrapponendo più ply di tessuto. Oppure rimarranno impiegati come veri e propri tessuti che potranno seguire la forma, anche complessa, di un componente. Una volta che la matrice polimerica usata per impregnare le fibre avrà reticolato, si raggiungerà la solidità della struttura. Diversamente accade per i compositi pultrusi esclusivamente a fibra lunga, in cui numerosi fasci di fibre che si svolgono da una serie di bobine, vengono prima impregnati da una resina termoindurente e poi si vedono attraversare in una sorta di trafila che

conferisce la forma finale al composito. Questo metodo consente l'espulsione della resina in eccesso e il perfetto allineamento delle fibre verso la direzione longitudinale del prodotto, grazie alla fisica del processo di produzione. Si ottengono compositi pultrusi le cui dimensioni caratteristiche si aggirano attorno ai 50 x 50 mm con la percentuale di fibra più alta che in tutte le altre tipologie.

1.2 Compositi Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Dopo un'attenta ricerca sulle applicazioni che si trovano sul mercato, la scelta di sviluppare il lavoro sui compositi CFRP è stata dettata da due fattori:

- Questo tipo di materiale è quello di più largo consumo sul mercato, specie in campo aeronautico [1.1];
- La caratterizzazione del particolare composito CFRP considerato è già disponibile [1.4], quindi è stato proseguito il lavoro su questo materiale.

Vediamo di seguito i principali campi di applicazione dei compositi CFRP

1.2.1 Applicazioni Aeronautiche

Grazie alla leggerezza e alle caratteristiche meccaniche elevate, il composito CFRP risulta molto adatto nelle applicazioni aeronautiche. Nel grafico riportato di seguito nella Figura 1.1, vediamo il progressivo aumento dell'utilizzo di materiali compositi sui velivoli [1.5].

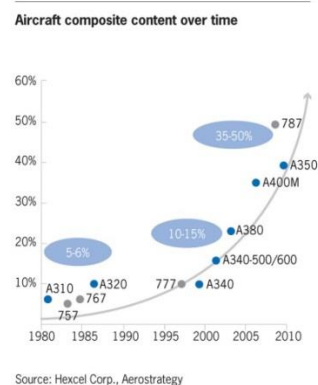


Figura 1.1: Trend di utilizzo dei materiali compositi nel settore aeronautico

Un primo classico esempio lo possiamo trovare nelle pale di elicottero, le quali risultano costituite da differenti materiali, ognuno dei quali è responsabile di una singola caratteristica meccanica. Il CFRP, in questa applicazione, conferisce rigidità torsionale grazie all'inclinazione delle fibre a 45° [1.6].

L'utilizzo dei materiali compositi CFRP in questo settore è sempre in crescita, come abbiamo potuto notare dalla Figura 1.1 soprariportata. Un esempio che conferma questa affermazione, sta nell'espansione di Boeing Winnipeg in Canada, uno dei principali produttori mondiali di materiali compositi. Lo stabilimento passerà entro la fine del 2014 da una superficie di 62000 m^2 a 76000 m^2 per poter accogliere e ampliare massicciamente la produzione di composito CFRP e non, per le parti interne dei velivoli 737, 747, 767, 777 e 787 [1.7]. Ulteriori applicazioni si trovano nella produzione dei rivestimenti esterni dei motori Royce Trent XWB-97 (Figura 1.2) per Air-Bus A350 e A1000, a seguito della chiusura di un contratto da 50 milioni di dollari tra ATK e RollsRoyce [1.8].



Figura 1.2: Motore RoyceTrent XWB-97 con scocca in materiale CFRP

Un ulteriore applicazione di questi materiali in campo aeronautico, la troviamo nelle pale di turbina e nelle carenature dei motori LEAP 1, il composito CFRP viene utilizzato inoltre per la produzione delle gondole per il velivolo NEO A-320 [1.9]. Interessante applicazione è sviluppata da Airbus, la quale produce il velivolo A350XWB con parti strutturali principalmente in CFRP, questo conferisce, oltre a resistenza e leggerezza, un notevole aumento della resistenza elettrica poiché i materiali compositi hanno una conducibilità molto bassa.

Questo fatto genera un conseguente aumento del rischio dovuto ai fulmini. Per tale motivo Airbus ha sviluppato una soluzione in cui lamine di metallo sottili sono inserite nei pannelli compositi degli aeromobili, aumentando la conducibilità elettrica e proteggendo così cablaggi del velivolo. Questi strati metallici sono già stati utilizzati nella sezione posteriore della fusoliera dell'A380, ma sull' A350 XWB il test ha una importanza ancora maggiore vista la più alta percentuale di materiali compositi presente nel velivolo [1.10]. Qui di seguito, nella Figura 1.3, notiamo le percentuali di materiali che compongono l'A350 XWB.

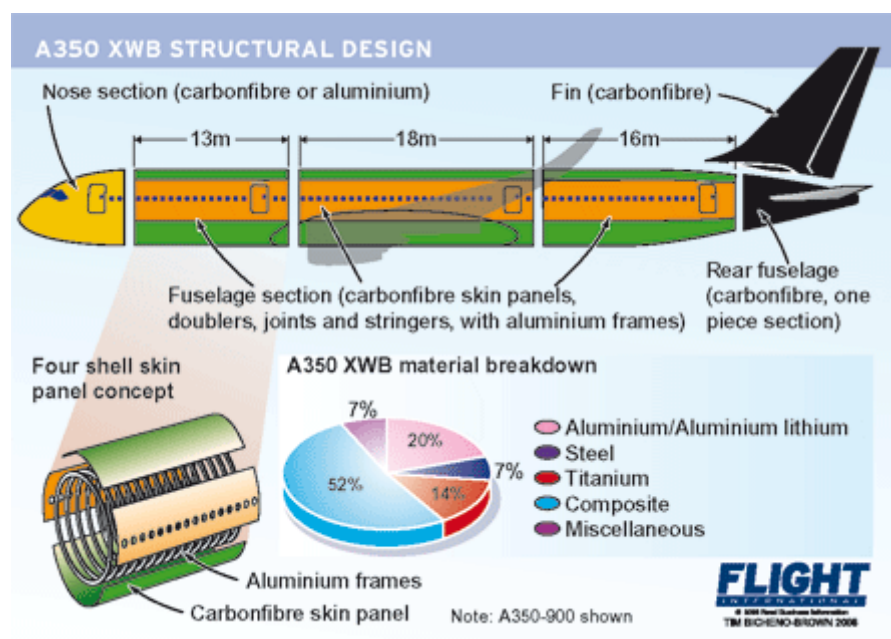


Figura 1.3: A350 XWB, Structural Design

Questi sono solo alcuni esempi delle applicazioni che si possono trovare sul mercato aeronautico, ma certamente sono indice dell'espansione e dell'utilizzo sempre più ampio di questo tipo di materiali.

1.2.2 Applicazioni Automotive

In questo settore, l'alto costo del composito fibro-rinforzato è mitigato dall'elevato rapporto resistenza/peso che possiede il materiale, inoltre il basso peso si ripercuote positivamente sui consumi e sulle performance raggiungibili dalle vetture. Questi fattori positivi conferiti alle vetture dal CFRP sono

facilmente verificabili consultando il grafico di Figura 1.4, nel quale si evince la previsione di crescita nell'utilizzo di questi materiali innovativi dal 2010 fino al 2020 addirittura anche nelle applicazioni di "potenza"[1.11].

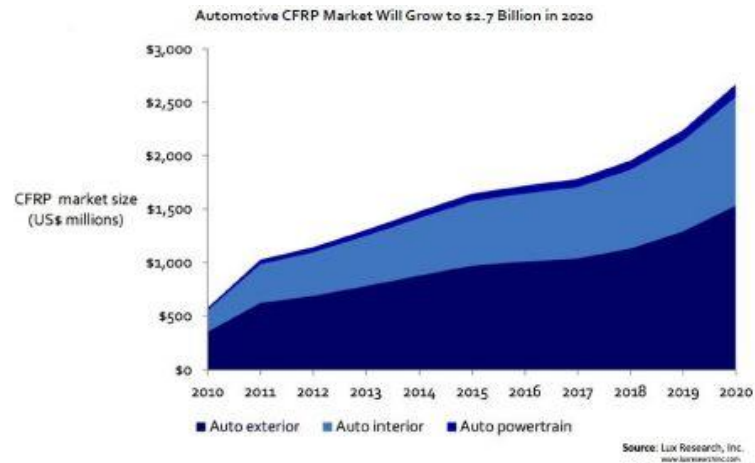


Figura 1.4: Trend di mercato dei CFRP nel settore automotive

È d'obbligo citare come esempio di applicazione, l'innovativo utilizzo dei CFRP da parte della casa automobilistica BMW. Entro la fine del 2013 la casa immetterà sul mercato la prima vettura prodotta in serie (circa 40000 veicoli/anno) la cui carrozzeria e abitacolo sarà costituita interamente in CFRP. La seguente immagine (Figura 1.5) esplica come sarà l'architettura della BMW i3 City. La mossa vincente è stata quella di abbattere i costi nella produzione CFRP in serie [1.12].

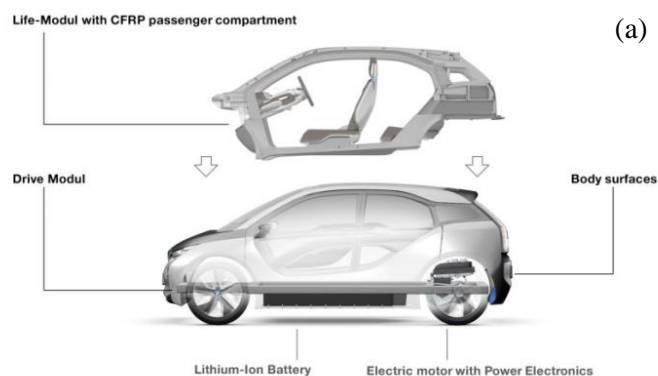




Figura 1.5: a) Architettura del veicolo BMW i3 City; b) Concept del veicolo

Anticipando ciò che vedremo nelle applicazioni sportive e racing, il composito CFRP risulta inoltre adatto anche per la sicurezza in caso di incidente. È stato simulato agli elementi finiti e provato sperimentalmente sulla vettura racing Nissan GT-500 che in caso incidente, l'energia generata viene assorbita in maniera più efficiente rispetto ai convenzionali materiali che compongono una vettura. L'utilizzo del composito fibro-rinforzato offre una maggior sicurezza per l'incolumità dei passeggeri e del conducente [1.13]. Le applicazioni nell'industria automobilistica dei laminati CFRP, stanno sfociando anche nel mondo delle auto eco-friendly, ovvero le auto elettriche. Noto a tutti è il problema dell'immagazzinamento dell'energia elettrica per la propulsione, risorsa critica per questo tipo di auto quando si guarda all'autonomia. In questo contesto, gli ingegneri Chung e Wang della compagnia svedese Swerea SICOMP AB e i professori Lou and Chang dell'università tecnologica svedese Lulea, hanno suggerito di sfruttare il CFRP come materiale multifunzionale sfruttando le sue caratteristiche di resistenza meccanica in applicazioni strutturali a formare scocca e componenti dell'abitacolo, ma allo stesso tempo trarre vantaggio dalle funzioni elettriche. Infatti, nota la natura semiconduttiva del materiale, è stato possibile realizzare condensatori di energia direttamente sulle parti strutturali della vettura, dando origine al materiale CFRP elettrico strutturale. Il risultato è stato quello di aumentare la capacità delle batterie tradizionali utilizzando direttamente le parti strutturali della vettura diminuendo nel contempo il peso totale del veicolo sfruttando le caratteristiche meccaniche del CFRP [1.14]. Nella Figura 1.6 notiamo la morfologia proposta per realizzare il condensatore per immagazzinare energia elettrica unita all'applicazione strutturale nelle vetture elettriche.

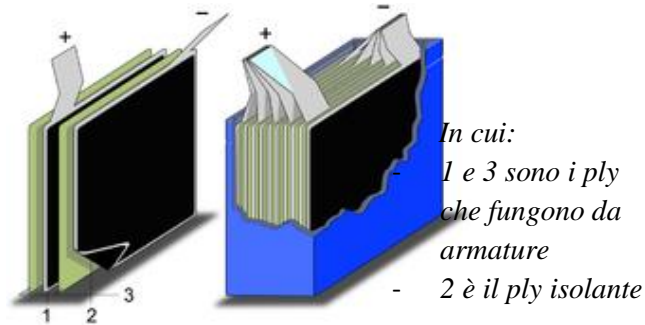
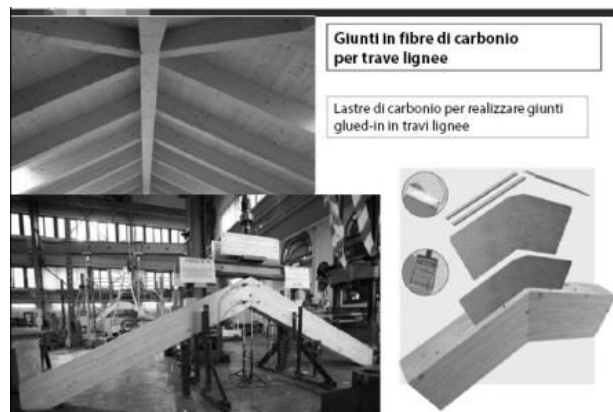


Figura 1.6: Architettura CFRP elettrico strutturale

In generale l'applicazione del CFRP riduce il peso complessivo del veicolo, ne aumenta l'efficienza e la sicurezza rispetto ad un veicolo tradizionale riducendo i consumi. Questi punti sono fortemente legati alla riduzione dell'impatto ambientale, ad una riduzione dell'inquinamento sia in fase di produzione della vettura che nella vita utile del veicolo [1.15].

1.2.3 Applicazioni in ingegneria civile

Il polimero rinforzato da fibra di carbonio, è diventato d'uso comune anche in applicazioni strutturali nell'edilizia. È utilizzato per il rinforzo del calcestruzzo, del legno, del metallo ed è un ottimo sostituto dell'acciaio. L'utilizzo del CFRP in edilizia deve essere previsto nella fase preliminare di studio e progettazione. Attualmente vi sono esempi d'impiego anche in opere di bonifica e riqualificazione di strutture già esistenti. Nella Figura 1.7 e 1.8 possiamo vedere alcuni esempi di applicazioni dei CFRP in edilizia.



(a)

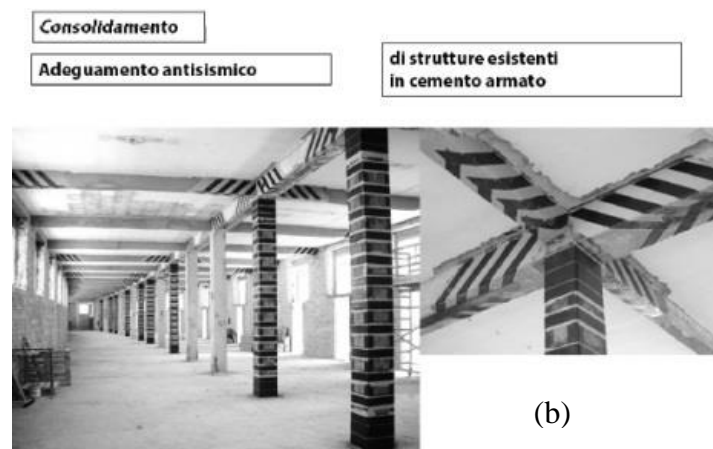


Figura 1.7: Bonifica e consolidamento edile: a) giunti in fibra di carbonio; b) intervento anti sismico



Figura 1.8: Ponte pedonale in fibra di vetro, Danimarca

L'utilizzo di questo tipo di compositi è volto all'aumentare le caratteristiche di portata, ad esempio di ponti, i quali vengono progettati e costruiti in forme architettoniche più complesse ed armoniose, sfruttando le doti di leggerezza, formabilità e resistenza [1.16].

Ulteriore applicazione di questi materiali in edilizia sta nell'adeguamento sismico e nella riparazione di strutture danneggiate. In Figura 1.9 possiamo vedere come è stata rinforzata la trave portante del tetto di questa opera edilizia



Figura 1.9: Rinforzo CFRP trave portante (olimpus-frp.com)

Nelle nuove costruzioni edili le barre in materiale composito fibro-rinforzato (CFRP) vengono impiegate per la realizzazione di elementi strutturali in calcestruzzo armato andando a sostituire il tradizionale tondino trafilato in ferro. La Figura 10 ne fornisce un esempio.



Figura 1.10: Tondini per cemento armato costruiti in fibra di vetro o CFRP

Il vantaggio principale di questa soluzione, rispetto alle armature in ferro è legato all'elevata resistenza alla corrosione per tutte quelle applicazioni in ambiente aggressivo (impalcati da ponte, solette, impianti industriali, costruzioni marine) e di elementi esposti a correnti vaganti o a campi elettromagnetici. Inoltre i CFRP sono caratterizzati da trasparenza elettromagnetica risolvendo così i problemi di corrosione galvanica, inoltre sono scongiurate le interferenze con attrezzature in cui sono impiegati.

Tecnologie per il consolidamento delle strutture in calcestruzzo possono essere [1.17]:

- NSM (Near Sourface Mounted Bars) in Figura 1.11

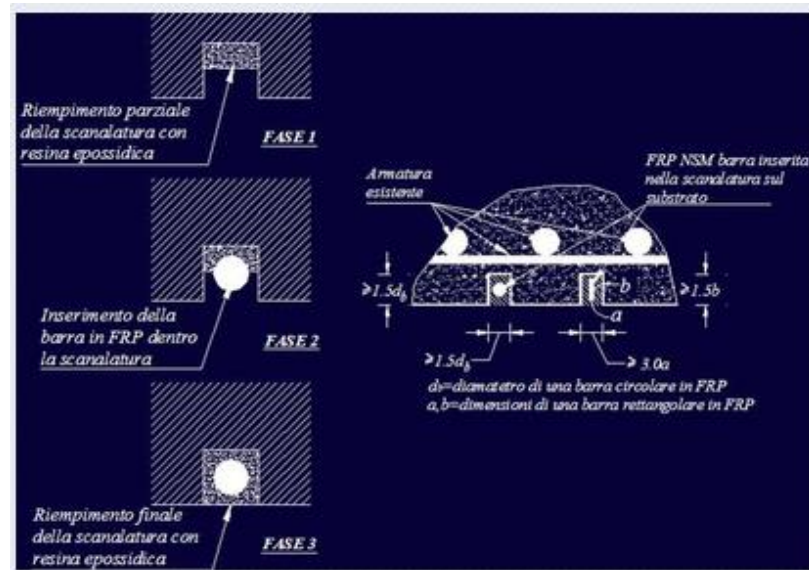


Figura 1.11: Tecnica NSM

- Post Tensioning (Figura 1.12)

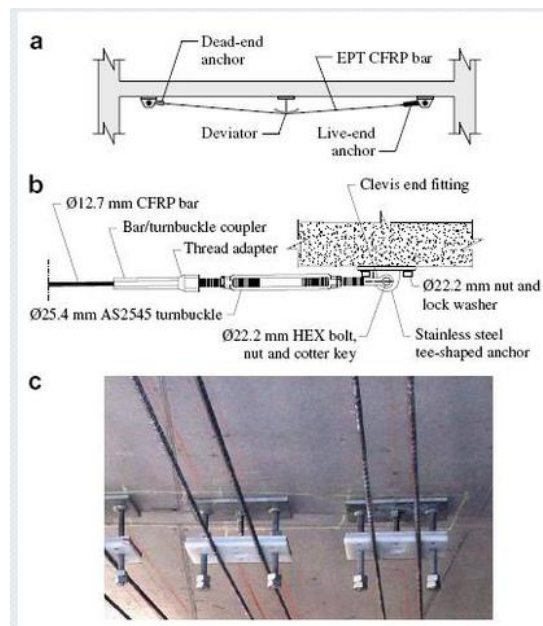


Figura 1.12: Tecnica Post Tensioning

Le qualità principali richieste al materiale CFRP in applicazioni per edilizia sono essenzialmente:

- Resistenza alla corrosione da ioni di cloro
- Trasparenza ai campi magnetici e radiofrequenza
- Isolanti termici ed elettrici
- Resistenza agli urti
- Resistenza ai carichi ciclici
- Resistenza agli acidi e agli alcali
- Stabilità dimensionale sotto sforzo
- Leggerezza

1.2.4 Applicazioni sportive, competizioni e curiosità

I materiali compositi fibro-rinforzati a matrice polimerica, hanno trovato grande impiego nelle applicazioni sportive, come per esempio nel ciclismo agonistico. I telai in CFRP da competizione, per bici da strada, risultano più leggeri e performanti rispetto ai telai costruiti con leghe di acciaio, alluminio o titanio, tanto da obbligare l'U.C.I. (Unione Ciclistica Internazionale) a limitare per ragioni di sicurezza, il peso minimo per bici utilizzate nelle corse professionistiche a 6,8 Kg [1.18]. Vi sono telai completi in CFRP ampiamente sotto il chilogrammo di peso ed alcuni costruttori offrono particolari modelli con peso intorno ai 5 Kg. La possibilità di comporre le forme, la scelta del numero di strati di composito da inserire nelle varie parti del telaio a seconda del grado di sforzo a cui la zona è sottoposta, la multidirezionalità delle fibre delle “pelli” utilizzate per formare i vari settori del telaio hanno permesso di ottenere biciclette molto rigide nelle zone dove non vi deve essere dispersione di energia, come la scatola del movimento centrale o la zona sterzo, pur permettendo al telaio di flettere sull'asse verticale per smorzare vibrazioni e asperità del terreno, garantendo un ottimo grado di comfort al ciclista. Analogo sviluppo esponenziale del CFRP nel ciclismo è avvenuto nel settore della componentistica quali selle, reggi-selle, manubri, leve oltre alle ruote prodotte interamente in CFRP, compresi i raggi. Un costruttore tedesco, la “Leightweight”, è in grado di offrire un paio di ruote costruite interamente in composito con un peso per la coppia di 800 grammi. Nella Figura 1.13, possiamo osservare un esempio costruttivo con CFRP di una delle case leader in questo settore, la Pinarello. La foto mostra il modello di punta della casa di Treviso, il modello Dogma che utilizza una speciale fibra CFRP con 65 ton di carico di rottura per centimetro quadrato, dotata internamente di tecnologia Nanoalloy, nanoparticelle di tecnopolimero in grado di aumentare

considerevolmente la resistenza del telaio agli impatti. Il telaio è costruito con forme asimmetriche, perché a causa delle elevatissime forze in gioco, che possono arrivare al doppio del peso del ciclista, è una struttura con flessione non simmetrica, questo perché la spinta sui pedali è la stessa sia sul pedale destro che su quello sinistro mentre il tiro della catena si esercita sempre sul lato destro e quindi, in un caso si oppone alla spinta sul pedale e nell'altro si somma. Per un costruttore di Telai in fibra di carbonio, è facile modulare la rigidità cambiando tipo, orientamento degli strati e numero sui due lati del telaio ma è noto che le caratteristiche di una sezione resistente sono molto più influenzate dalle forme che allo spessore delle pareti. Pinarello per la sua Dogma ha scelto di intervenire sulla asimmetria delle forme, lasciando costanti gli spessori [1.19].



Figura 1.13: Telaio Dogma Pinarello con cerchi a profilo alto

Nella Figura 1.14 notiamo le parti costruttive del telaio

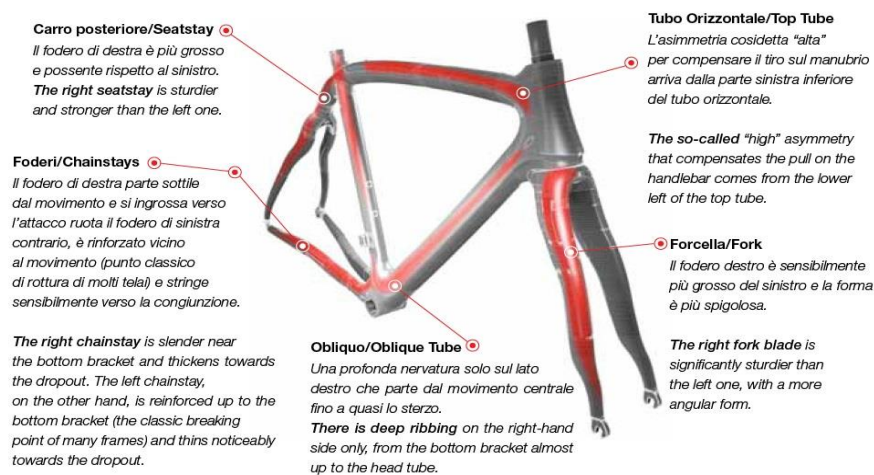


Figura 1.14: Particolari costruttivi del telaio Dogma Pinarello

Le doti di leggerezza unite alle elevatissime caratteristiche meccaniche dei CFRP hanno permesso a molte attrezzature sportive di aumentare le prestazioni e di conseguenza il livello di molti sport praticati. Solo per citarne alcuni come esempio:

Nel tennis, la fibra di carbonio aumenta sensibilmente la rigidità ed il rendimento della racchetta diminuendone il peso. Il giocatore ha a disposizione un attrezzo più maneggevole e con una superficie di impatto più ampia. Troppa percentuale di carbonio nella struttura rende la racchetta troppo rigida e di conseguenza diminuisce il controllo sulla palla, per questo motivo vengono aggiunte percentuali di altri elementi quali il boro, la ceramica o il kevlar con capacità di assorbimento di urti e vibrazioni.

Nel golf, le nuove mazze in fibra di carbonio permettono una miglior risposta sul colpo e d allungano la traiettoria della palla.

Nel tiro con l'arco, i flettenti in legno sono stati sostituiti da flettenti in CFRP che garantiscono una maggior progressività nella potenza accumulata durante la fase di trazione e mantengono una costanza di rendimento nel tempo, essi inoltre sono meno soggetti ad alterazioni nella resa a causa di umidità ambientale e sbalzi di temperatura.

Altri sport hanno subito percepito l'incremento di prestazioni offerto dal CFRP e quindi diventano innumerevoli gli esempi di impiego. Canoe, windsurf, sci, vele e scafi per finire con le canne da pesca con prestazioni a misura di pescatore.

Per quanto riguarda applicazioni più curiose, possiamo trovare ad esempio le membrane degli altoparlanti, le ricoperture dei computer, addirittura si trovano giradischi costruiti in fibra di carbonio CFRP.

In conclusione, possiamo senz'altro dire che le prove qui effettuate sul composito CFRP sono di sicuro interesse in quanto eseguite su un materiale di largo consumo che nel tempo amplierà sempre di più il suo utilizzo.

1.3 Proprietà del composito CFRP nel presente lavoro di tesi

Il materiale composito utilizzato nelle seguenti prove per la caratterizzazione della propagazione ultrasonora di Lamb è il CFRP in configurazione

aeronautica. Esso si compone di 17 ply, ognuno di spessore pari a 0,125 mm a formare uno spessore complessivo di 2,125 mm. Il nostro sistema CFRP epossidico grafítico si identifica nel SAATI-EH550/T800S, la cui orientazione di ogni ply è così configurata:

$$[0/45/0/-45/90/-45/0/45/90]_s$$

L'analisi Micromeccanica del composito, già disponibile e validata poi sperimentalmente con opportune prove di trazione [1.4], ha portato all'ottenimento delle proprietà meccaniche di questo materiale. Tali proprietà sono di fondamentale importanza per approcciarsi allo studio del monitoraggio strutturale SHM e comprendere come i fenomeni ultrasonori interagiscono con questo materiale, senza dimenticare l'effetto anisotropo presente.

In particolare, le lamine componenti il laminato sono schematizzabili come ortotrope, ossia dispongono di tre assi di simmetria che riducono le costanti elastiche a nove. Gli assi di simmetria sono identificati come le direzioni principali di comportamento meccanico, i quali, per convenzione, assumono la definizione 1; 2; 3. Nella Figura 1.15, troviamo lo schema di riferimento del laminato.

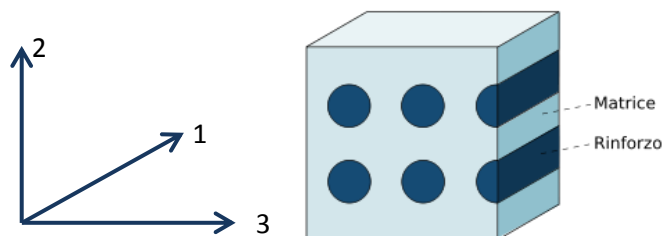


Figura 1.15: Schema di riferimento CFRP

La caratterizzazione eseguita in [1.4], non oggetto di questa tesi, si è avvalsa di:

- la regola delle miscele [1.6] per la valutazione della rigidità in direzione 1

$$E_{11} = E_f * v_f + E_m * v_m = E_f * v_f + E_m * (1 - v_f), \quad (1.1)$$

In cui troviamo le rigidità di fibra e matrice e il volume occupato nel composito rispettivamente da fibra e matrice.

Capitolo 1

- Il metodo di Voight [1.20] per la determinazione dei coefficienti di Poisson del composito rinforzato unito alla regola delle miscele.

Noto che:

- o Per la fibra in direzione 2:

$$\varepsilon_{2f} = -\nu_{12f}\varepsilon_{1f} = -\nu_{12f}\frac{\sigma_{11f}}{E_{11f}} \quad (1.2)$$

- o Per la matrice in direzione 2:

$$\varepsilon_{2m} = -\nu_m\varepsilon_{1m} = -\nu_m\frac{\sigma_{11m}}{E_{11m}} \quad (1.3)$$

È possibile ottenere la contrazione complessiva con la regola delle miscele;

$$\varepsilon_2 = -[\nu_{12f}\varepsilon_{1f}\nu_f + \nu_m\varepsilon_{1m}(1 - \nu_f)] \quad (1.4)$$

Ed infine ottenere il coefficiente di Poisson come:

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = \nu_{12f}\varepsilon_{1f}\nu_f + \nu_m\varepsilon_{1m}(1 - \nu_f) \quad (1.5)$$

Che per simmetria della matrice elastica risulta immediatamente uguale a ν_{21} , seguendo la relazione (1.6):

$$\nu_{21} = \nu_{12}\frac{E_{22}}{E_{11}} \quad (1.6)$$

- Modello di Reuss [1.21] per la determinazione del modulo elastico nella direzione 2 e il modulo di taglio G_{12} :

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{\nu_f}{E_{f2}} + \frac{\nu_m}{E_m} \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\nu_f}{G_{f12}} + \frac{\nu_m}{G_m} \quad (1.8)$$

- Infine, con le relazioni di simmetria del materiale e utilizzando la relazione di Christensen [1.22] si sono ottenute le grandezze mancanti:

$$\nu_{23} = \nu_{32} = \nu_{12} * \frac{(1-\nu_{21})}{(1-\nu_{12})} \quad (1.9)$$

$$G_{12} = G_{13} \quad (1.10)$$

$$E_{22} = E_{33} \quad (1.11)$$

$$G_{23} = \frac{E_{22}}{2(1+\nu_{23})} \quad (1.12)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} \quad (1.13)$$

I risultati dell'analisi micromeccanica analitica per il laminato SAATI-EH550/T800S sono quindi risultati essere i valori riportati nelle Tabelle 1.2, 1.3 e 1.4:

Matrice EH-550	Fibra T800S
$E_m = 3$ [GPa]	$E_{lf} = 294$ [GPa]
$\nu_m = 0,37$	$E_{tf} = 91$ [GPa]
	$G_{lt,f} = 55.2$ [GPa]
	$\nu_{lt,f} = 0,23$

Tabella 1.2: Caratteristiche meccaniche Fibra e Matrice del laminato SAATI-EH550/T800S

Lamina prepreg UD SAATI	
Densità Lamina	1520 [Kg/m ³]
% rinforzo volumetrico nominale	53% (+3%)
Spessore nominale lamina	0.125mm

Tabella 1.3: Caratteristiche meccaniche lamina SAATI-EH550/T800S

Caratteristiche meccaniche Laminato UD SAATI	
E_{11}	157.23 [GPa]
$E_{22} = E_{33}$	11.5 [GPa]
$G_{12} = G_{13}$	3.44 [GPa]
G_{23}	4.07 [GPa]
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.295
ν_{23}	0.411

Tabella 1.4: Caratteristiche meccaniche da analisi analitica laminato SAATI-EH550/T800S

Inoltre, insieme a questa prima caratterizzazione [1.4] si è passati allo studio e alla validazione della macro-meccanica del laminato quasi isotropo. Il tutto è governato dalla teoria classica del laminato [1.23] la quale si basa su ipotesi ben precise che si identificano in:

Capitolo 1

- Spessore del laminato molto minore delle dimensioni della superficie
- Lamine adese una con l'altra in maniera perfetta
- Legame costitutivo elastico lineare
- Stato di sforzo piano applicato
- Le sezioni considerate ruotano mantenendosi piane e ortogonali al piano medio del laminato
- Campo dei piccoli spostamenti.

Grazie a queste ipotesi e alla scrittura delle equazioni del laminato è stato possibile ricavare le costanti elastiche dopo una campagna di opportune prove di trazione, come riportato in Tabella 1.5 [1.4].

Risultati sperimentali UD SAATI		
		Variazione rispetto analisi analitica
E_{11}	159.42 [GPa]	+1.37%
E_{22}	7.95 [GPa]	-14.5%
G_{12}	4.7 [GPa]	+15.74%
ν_{12}	0.323	+8.36%
ν_{21}	0.0181	+5.52%
Livello anisotropia	36%	

Tabella 1.5: Caratteristiche meccaniche Sperimentali laminato SAATI-EH550/T800S

1.4 Processi di monitoraggio strutturale SHM

Si definisce SHM (Structural Health Monitoring) il monitoraggio continuo e non distruttivo di una qualsiasi struttura ingegneristica per la rilevazione di una qualsiasi anomalia. Esso si rileva di fondamentale importanza per il controllo della sicurezza durante l'esercizio e per lo studio della manutenibilità della struttura stessa. In questo tipo di approccio si combinano una vasta gamma di tecnologie, sensoristica, software, ma in tutte le applicazioni si possono riconoscere dei capisaldi sempre presenti. Il primo si riconosce nella struttura da controllare che definisce univocamente il tipo di hardware utilizzato nel sistema SHM. Il secondo si identifica in un array di sensori progettati specificatamente per la struttura in esame e infine per il terzo troviamo il sistema che si occupa di acquisire e di analizzare i dati provenienti dall'array. Le strutture normalmente interessate da questo tipo di controllo "on-line" sono le più svariate. Possono essere ponti, dighe, palazzi, grattacieli, stadi, piattaforme, parti di aeroplano,

generatori eolici e in generale macchinari di grandi dimensioni. Alcuni esempi di applicazioni SHM degne di nota sono:

- Il monitoraggio strutturale del ponte strallato Rion-Antirion nella Grecia Continentale costruito tra il 1999 e il 2004. In questa applicazione SHM si voleva monitorare il normale comportamento del ponte durante il consueto utilizzo dall'utenza giornaliera, ma anche in caso di forzanti provenienti dal vento, oppure in circostanze più pericolose come i terremoti. In Questo caso sono stati usati un array di sensori che comprendeva: Celle di carico, Accelerometri 3D, Estensimetri per la deformazione termica del ponte, LVDT per lo spostamento lineare e degli anemometri. Tutto confluito in un sistema di acquisizione, comprendente il condizionamento segnale, processazione e memorizzazione dati [1.24]. Le più importanti caratteristiche di questo ponte sono:
 - o Lunghezza: 2883 m
 - o Luce massima: 560m
 - o Altezza: 163,7 m

- Un'altra applicazione interessante trovata è il controllo on line di una pala meccanica di portata pari a 100 tonnellate con una potenza applicata di 3 MW. In questo caso l'obiettivo era quello di stabilire, secondo le anomalie riscontrate dal sistema di misura, quando attivare la manutenzione del macchinario. In questa applicazione la sensoristica prevedeva kit di misura per allungamenti statici, vibrazioni, dilatazioni termiche. Il sistema di acquisizione era fornito di kit wireless, amplificazione segnale, condizionamento, filtraggio e memorizzazione dati [1.25].

In generale questi pochi esempi stanno a significare la generalità del metodo SHM, il quale, come detto precedentemente si riconfigura utilizzando sempre gli stessi macro-componenti. In generale, il controllo SHM dovrà durare per tutta la vita utile della struttura oggetto di studio. Chiaramente si parla di archi temporali dell'ordine degli anni, è infatti impossibile pensare di acquisire dati continuamente, con frequenze di campionamento che possono arrivare intorno ai kHz, si genererebbe una quantità di dati ingestibile. Per questo motivo in una tecnica di monitoraggio SHM le acquisizioni sono programmate in base a segnali di interesse provenienti dalla struttura. In pratica il sistema è sempre in

Capitolo 1

“ascolto”, ma l’acquisizione sarà avviata ogni qual volta sarà riscontrata qualche anomalia.

Affinché un sistema di monitoraggio SHM sia ben funzionante e possa dare un controllo affidabile, è necessario affrontare sempre una progettazione articolata in alcuni passi:

- È necessario compiere una valutazione operativa preliminare, che possa identificare che cosa si vuole misurare dalla struttura in esame e cosa si pensa di dover cercare nella struttura stessa. Queste considerazioni potrebbero sembrare banali, ma sono il cuore di una buona progettazione SHM, che porterà il ragionamento e le scelte finali ad essere ad hoc per il caso in esame.
- Perché si possano avere dei dati da analizzare periodicamente, è necessario disporre di un sistema di acquisizione. Questo potrà essere a bordo struttura o situato in remoto. In ogni caso i segnali provenienti dai sensori, confluiranno in un sistema che permetterà di renderli disponibili in un formato manipolabile.
- Si dovrà poi possedere un caso base, cioè un riferimento. Questo potrà essere preso a struttura nuova prima che inizi a svolgere il suo servizio, oppure se la struttura in questione è già impiegata da tempo, il riferimento sarà ottenuto nel momento in cui il sistema SHM inizierà a funzionare ottenendo così una “fotografia” sui cui basarsi.
- Infine, sarà necessario estrarre le informazioni dai segnali acquisiti condensandole in un unico o pochi parametri significativi, che possano dire, una volta stabilita una soglia, lo stato di salute della struttura in relazione al danno presente.

Si otterranno perciò delle informazioni periodiche che indicano l’andamento dello stato di salute della struttura in relazione alle specifiche di progetto stabilite all’origine. Tuttavia, se ciò non è richiesto, la tecnica SHM può essere usata per fornire una mappatura immediata delle condizioni in cui la struttura verte, dopo essere stata interessata da eventi più o meno catastrofici come incidenti o terremoti.

1.5 Onde ultrasonore di Lamb, basi teoriche

Essendo le onde ultrasonore molto sensibili ad anomalie e disomogeneità nel materiale ogni qual volta risultano essere sul percorso di propagazione, ed avendo un'ottima capacità di propagazione, esse vengono utilizzate per diffondere energia ultrasonora nella struttura al fine di evidenziare il cambiamento dell'omogeneità del materiale analizzando il segnale dell'onda ultrasonora ricevuto. Come accennato nelle tecniche SHM, anche per le onde ultrasonore è necessario domandarsi dov'è il danno e che dimensioni ha. Per rispondere a queste difficili domande le onde ultrasonore vengono attuate con sensori posizionati in due configurazioni differenti, configurazioni utilizzate in questa tesi per la comprensione del fenomeno di interazione con i difetti presenti. Tali configurazioni si identificano in Pitch-Catch e Pulse-Echo. Nella configurazione Pitch-Catch si ha l'attivazione dell'onda sonora dal sensore attuatore, quest'ultima procede attraverso il materiale andando ad interagire con eventuali anomalie generando la trasmissione dell'onda. L'onda trasmessa viene quindi registrata dal sensore ricevitore posto ad una certa distanza oltre il probabile difetto. Nella configurazione Pulse-Echo l'approccio è completamente diverso, in questo caso si va a registrare la riflessione dell'onda da parte dell'anomalia posizionando sensore attuatore e sensore ricevente dalla stessa parte del probabile difetto. Nella Figura 1.16, possiamo osservare uno schema esemplificativo delle due tecniche d'esame [1.26].

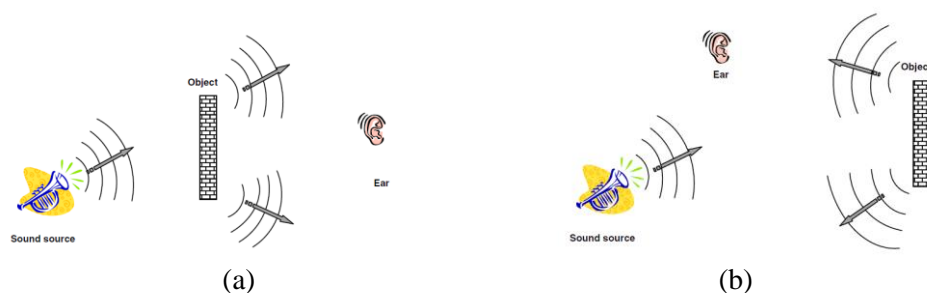


Figura 1.16: a) Configurazione Pitch-Catch; b) Configurazione Pulse-Echo

Le onde ultrasonore di Lamb, che nascono in componenti in parete sottile quando lo spessore è confrontabile con la lunghezza d'onda della vibrazione di attuazione, sono principalmente rivolte allo studio del comportamento di queste ultime in materiali in parete sottile come laminati, il cui spessore risulta molto minore rispetto alle dimensioni della superficie. Esse possono propagare per distanze relativamente lunghe e in materiali il cui coefficiente di attenuazione

risulta essere elevato come polimeri e compositi. In ottica costi-benefici, questo fa sì che sia possibile coprire un'area di dimensioni considerevoli con pochi sensori. Inoltre possiamo visualizzare diversi tipi di difetti in relazione alla diversa e univoca interazione con l'onda propagativa. In generale, per l'individuazione di anomalie o difetti all'interno del materiale, ma anche per la comprensione del fenomeno di propagazione è necessario seguire i seguenti passi logici per attuare un set-up di misura consono allo scopo.

- 1) Attivazione dell'onda diagnostica di Lamb attraverso un sensore attuatore posizionato sulla lamina da controllare
- 2) Ricezione dell'onda trasmessa o riflessa all'interno del laminato con il sensore ricevente con la configurazione rispettivamente Pitch-Catch o Pulse-Echo.
- 3) Pulitura del segnale e sua analisi per l'interpretazione di quanto ricevuto in relazione alla configurazione della struttura.
- 4) Eliminazione di tutte le indicazioni riconducibili ad un fenomeno noto, ad esempio echi di fondo della struttura
- 5) Attribuzione a ciò che rimasto del segnale di un parametro sintetico rappresentante in maniera quantitativa il danno.

In particolare le onde di Lamb sono particolarmente sensibili a difettologie come:

- Vuoti, Porosità
- Danneggiamento superficiale per azione corrosiva
- Cricche
- Fori, Delaminazioni
- Rottura di fibre
- Inclusioni di materiale eterogeneo.

Anche se con un primo approccio le onde di Lamb sembrano una valida soluzione e per certi versi lo sono, bisogna tenere presente la difficoltà nella comprensione del significato contenuto nel segnale registrato. Infatti questo tipo di onde ultrasonore, sono sensibili a diversi fattori esterni che ne offuscano la comprensibilità, rendendo necessaria e indispensabile una preliminare elaborazione del segnale prima di poterlo analizzare in ottica di ricerca del danno. Tali onde risultano essere sensibili a:

- Rumore ad alta frequenza presente nell'ambiente circostante

- Vibrazioni strutturali a bassa frequenza
- Variazioni di temperatura che cambiano le condizioni del materiale
- Anisotropia e disomogeneità del materiale.

1.5.1 Teoria delle onde di Lamb per una lastra di materiale omogeneo isotropo

Prima di passare alla teoria delle onde di Lamb per un laminato composito come quello usato in questa tesi, è opportuno considerare qualche fondamento riferendosi a materiali omogenei e isotropi. Consideriamo per iniziare una lastra omogenea isotropa di piccolo spessore come quella riportata in Figura 1.17, in cui possiamo vedere la nomenclatura degli assi e lo spessore pari a $2h$

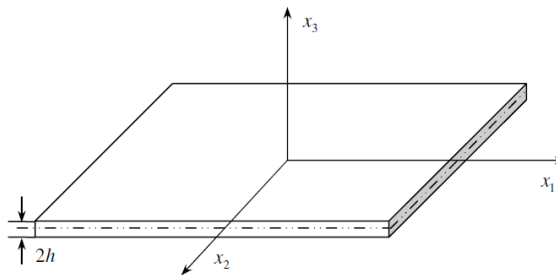


Figura 1.17: Schema della lamina di materiale omogeneo isotropo

L'equazione dell'onda nel riferimento cartesiano è:

$$\mu * u_{i,jj} + (\lambda + \mu) * u_{j,ji} + \rho * f_i = \rho * \ddot{u}_i \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.14)$$

In cui troviamo u_i e f_i gli spostamenti e le forzanti nella direzione i -esima rispettivamente, ρ la densità del materiale, μ il modulo di elasticità tangenziale e λ il coefficiente di Lamè. Sfruttando la decomposizione di Helmholtz [1.27] è possibile decomporre l'equazione (1.14) nella componente trasversale e in quella longitudinale dell'onda propagativa in maniera del tutto indipendente. Così facendo otteniamo:

$$\text{- Modo longitudinale:} \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_L^2} * \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (1.15)$$

$$\text{- Modo trasversale} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} * \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (1.16)$$

In cui Φ e ψ sono funzioni rispettivamente longitudinali e trasversali dipendenti dalle coordinate spaziali x_i e dalle proprietà dell'onda propagante nel materiale; C_T e C_L sono rispettivamente la velocità trasversale e longitudinale nel mezzo.

Per comprendere come queste onde si propagano all'interno del materiale, è utile riportare nella Figura 1.18 e 1.19 lo schema propagativo [1.26].

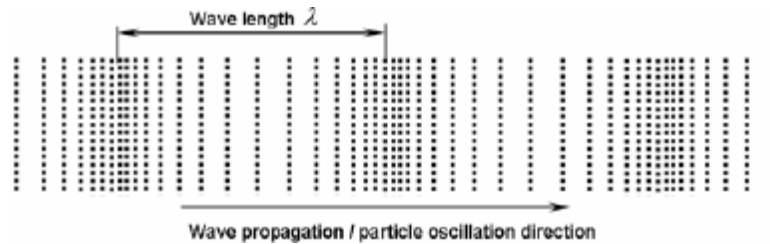


Figura 1.18: Moto ondoso propagativo onde Longitudinali

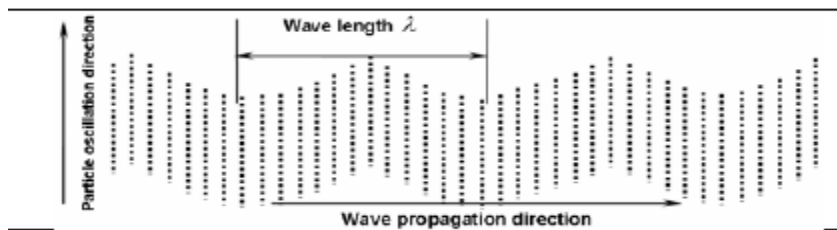


Figura 1.19: Moto ondoso propagativo onde Trasversali

Come possiamo notare dalle due figure, le onde longitudinali possono vedersi come una serie di treni compressivi e trattivi che avanzano nel mezzo mantenendosi nel piano in cui procedono; mentre per le onde trasversali, il modo di avanzare è oscillatorio fuori piano.

Le onde di Lamb possono definirsi invece come la sovrapposizione dei due modi precedentemente esposti nelle Figure 1.18 e 1.19, descritti dalle equazioni (1.15) e (1.16) che propagano in maniera guidata dalle superfici libere superiori e inferiori della lamina. Esse sono molto sensibili al tipo di materiale, all'angolo di ingresso, alla geometria del pezzo in esame e alla frequenza a cui sono attivate.

La Figura 1.20 mette in luce il moto propagativo delle onde di Lamb, anche dette per i motivi riportati prima, onde guidate.

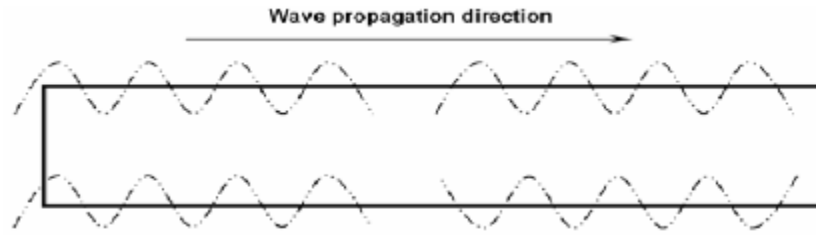


Figura 1.20: Moto ondoso propagativo onde di Lamb

Ritornando alla definizione di moto ondoso longitudinale e trasversale, possiamo ulteriormente definire, grazie alla decomposizione di Helmholtz, le funzioni Φ e ψ presenti nelle (1.15) e (1.16). Di conseguenza otteniamo:

$$\varphi = (A_1 \sin(p * x_3) + A_2 \cos(p * x_3)) * e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (1.17)$$

$$\psi = (B_1 \sin(q * x_3) + B_2 \cos(q * x_3)) * e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (1.18)$$

In cui abbiamo:

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2; \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda_{wave}} \quad (1.19)$$

Dove k è il numero d'onda, ω la frequenza circolare, λ la lunghezza d'onda, A e B costanti dipendenti dalle condizioni al contorno a cui è soggetto il laminato.

Infine, possiamo ulteriormente definire le velocità propagative del moto ondoso longitudinale e trasversale utilizzate nelle equazioni precedenti:

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}}; \quad C_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.20)$$

Forti della definizione di onda di Lamb, vista come sovrapposizione simultanea del modo longitudinale e trasversale, possiamo facilmente ottenere un'espressione matematica che governi il fenomeno ed esprimere gli spostamenti nella direzione di propagazione (x_1) e nella direzione normale alla superficie (x_3) (si faccia riferimento alla Figura 17). Ovviamente nella direzione propagativa (x_2) non avremo alcun spostamento dato che stiamo guardando la lastra nello spessore (si faccia riferimento alla Figura 1.20). Componendo le equazioni possiamo esprimere:

$$u_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \quad (1.21)$$

Capitolo 1

$$u_2 = 0 \quad (1.22)$$

$$u_3 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} + \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \quad (1.23)$$

Note queste relazioni, utilizzando il legame elastico lineare sono noti anche gli sforzi generati nel materiale.

Noto infine che per un laminato scarico su entrambe le superfici sono valide le seguenti condizioni al contorno:

$$u(x, t) = u_0(x, t) \quad (\text{displacement}),$$

$$t_i = \sigma_{ji}n_j \quad (\text{traction}),$$

$$\sigma_{31} = \sigma_{33} = 0 \text{ at } x_3 = \pm \frac{d}{2} = \pm h$$

Sostituendo all'interno delle equazioni (1.21), (1.22), (1.23) e ricordando le (1.17) e (1.18) si arriva ad ottenere la descrizione del moto propagativo per le onde di Lamb in una lamina di materiale omogeneo e isotropo

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{4k^2qp\mu}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)(k^2 - q^2)} \quad (1.24)$$

In cui le grandezze q , p , λ , e k sono definite nell'equazione (1.19), mentre h è lo spessore del laminato. Infine, con qualche passaggio matematico trigonometrico e tenendo presente delle condizioni al bordo, è possibile esprimere in maniera indipendente i modi propagativi radiale nel piano S_i (modo compressivo simmetrico) e quello fuori piano A_i (modo di flessionale anti-simmetrico)

$$S_i = \frac{\tan(q^*h)}{\tan(p^*h)} = \frac{-4k^2qp}{(k^2 - q^2)^2} \quad (1.25)$$

$$A_i = \frac{\tan(q^*h)}{\tan(p^*h)} = \frac{-(k^2 - q^2)^2}{4k^2qp} \quad (1.26)$$

Le equazioni (1.25) e (1.26) sono conosciute come equazioni di Rayleigh-Lamb [1.26], queste ultime possono essere risolte analiticamente in pochi semplici casi. Il pedice i che compare nelle equazioni (1.25) e (1.26) sta a significare il numero del modo propagativo in relazione alla frequenza a cui viene attivato.

Per comprendere ancora meglio come propaga l'onda mediante le due componenti, possiamo osservare la Figura 1.21, che riporta i modi propagatori A_i e S_i , così brevemente identificati in questa tesi a significare rispettivamente il modo anti-simmetrico e simmetrico rispettivamente.

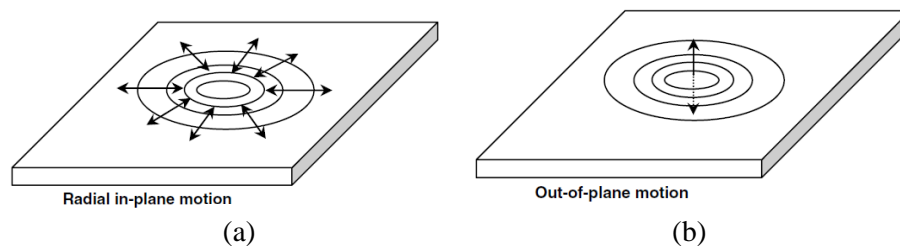


Figura 1.21: a) Modo propagativo simmetrico S_i ; b) Modo propagativo anti-simmetrico A_i

Questa trattazione per un materiale isotropo, è valida per pezzi le cui superfici sono scariche, il tutto però può essere esteso a condizioni di carico superficiale diverso da zero. Il risultato sarà una dispersione di energia differente rispetto al modo vibratorio propagativo considerato. Ad esempio, se la lamina isotropa è immersa in acqua il modo S_i essendo contenuto nel piano conserverà la sua energia rispetto al caso scarico, questo perché è più difficile che il moto nel piano, possa trasferirsi al liquido, inoltre anche se così fosse ricordiamo che movimenti tangenziali non possono trasmettersi in un fluido, quindi è del tutto ragionevole dire che l'energia contenuta in S_i si mantenga invariata. Diversamente accade per il modo A_i essendo un moto propagativo fuori piano. Infatti quest'ultimo possiede un'energia che può essere trasmessa al liquido facendo sì che la quota parte energetica originaria sia dispersa nel fluido come treni compressivi. Questo fenomeno è definito come Leaky Lamb Waves. Analogamente accade se il liquido viene sostituito da un solido a contatto; rimandiamo però ad un approfondimento su letture specifiche [1.26] non oggetto di questa tesi.

1.5.2 Onde di Lamb su materiali compositi a layer multiplo

Quanto detto nella sezione 1.3.2 rimane del tutto vero anche per materiali non isotropi e nel nostro caso a layer multiplo, tuttavia è da esporre immediatamente che il materiale non isotropo produce ulteriori effetti unici sulla propagazione dell'onda. Infatti vediamo che:

Capitolo 1

- Si ha diretta dipendenza della velocità propagativa dell'onda in relazione alla direzione delle fibre,
- La velocità propagativa non è più considerabile come un valore unico, ma è composto da due contributi detti velocità di fase e velocità di gruppo.
- Abbiamo un rallentamento della velocità dell'onda in relazione all'orientazione del singolo layer.

La velocità di fase è definita come lo spazio percorso nell'unità di tempo dalla cresta dell'onda che propaga nel materiale non omogeneo, mentre la velocità di gruppo è la velocità di propagazione del pacchetto energetico. Le due velocità differiscono e non sono più coincidenti come per i materiali omogenei isotropi. Se compariamo poi ulteriormente i due materiali, quello omogeneo e quello non omogeneo a layer, vediamo che la propagazione delle onde di Lamb, dentro il laminato, non comprende solo la dispersione lungo le superfici superiore e inferiore, ma anche la rifrazione e la riflessione tra i singoli layer.

Espandendo l'equazione (1.14) per ogni layer del laminato, otteniamo la (1.27) il cui campo di spostamento per ogni n-esimo layer deve soddisfare l'equazione di Navier:

$$\mu^n \nabla^2 u^n + (\lambda^n + \mu^n) \nabla(\nabla \cdot u^n) = \rho^n \frac{\partial^2 u^n}{\partial t^2} \quad (1.27)$$

In cui

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \quad (1.28)$$

E

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \quad (1.29)$$

Utilizzando efficientemente ancora una volta la decomposizione di Helmholtz sull'equazione (1.27) si riesce ad ottenere il campo di spostamenti u longitudinale e trasversale, utilizzando poi il legame elastico si ottengono gli sforzi generati.

Come detto precedentemente nel materiale omogeneo abbiamo i due modi propagativi S_i e A_i rispettivamente il modo simmetrico nel piano, e il modo anti-simmetrico flessionale fuori piano. Quando si ha a che fare con laminati multi

layer, si aggiunge un ulteriore moto propagativo anch'esso nel piano, quindi simile al modo S_i , ma in direzione ortogonale alla propagazione. In particolare abbiamo che l'onda propaga lungo x_1 , mentre la vibrazione evolve lungo x_2 . Per tale motivo tale onda è denominata SH_i (Shear Horizontal) e la Figura 1.22 ne mostra l'andamento.

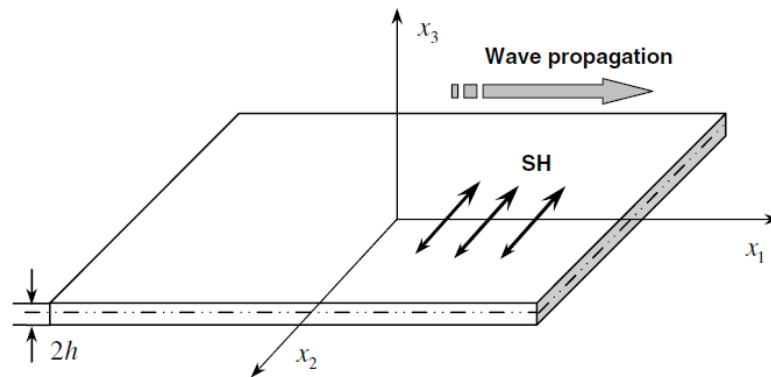


Figura 1.22: Modo propagativo Shear Horizontal

Quest'onda è stata osservata per la prima volta nel 1927 da Love, motivo per cui, il modo SH_i viene detto anche onda di Love [1.26].

In ottica di definizione di tali onde SH_i , possiamo fare l'assunzione tale per cui $u_1 = u_3 = 0$, noto che il modo propagativo SH_i interferisce sia con A_i sia con S_i possiamo dire che è la variazione dello spostamento infinitesimo sia in direzione 1 sia in direzione 3, di conseguenza possiamo scrivere che:

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} * \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \quad (1.30)$$

Applicando la condizione al contorno tale per cui $\frac{\partial u_2}{\partial x_3} = 0$ per $x_3 = 0$ possiamo scrivere la soluzione:

$$u_2(x_1, x_2, t) = A e^{-bx_3} e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (1.31)$$

In cui

$$b = k \left(1 - \left(\frac{\omega}{k * c_T} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.32)$$

Usando ancora la decomposizione di Helmholtz, e unendo il legame elastico si ottiene l'espressione dello sforzo e della deformazione. Se consideriamo infine un materiale composito con layer di differenti materiali le cui caratteristiche di densità e modulo elastico tangenziale sono rispettivamente ρ_1 e μ_1 per il primo layer e ρ_2 e μ_2 per il secondo otteniamo:

$$u_2(x_1, x_2, t) = [Ae^{-b_1x_3} + Be^{-b_2x_3}]e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (1.33)$$

In cui

$$b_1 = k \left[1 - \left(\frac{\omega}{k * c_{T1}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{e} \quad b_2 = k \left[1 - \left(\frac{\omega}{k * c_{T2}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.34)$$

Noto che $c_{T1} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\rho_1}}$ e $c_{T2} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\rho_2}}$ sono le due velocità trasversali.

Abbiamo così definito il comportamento propagativo nel materiale composito definendo A_i ; S_i e SH_i .

1.5.3 Velocità di propagazione

Abbiamo poco fa accennato che nei materiali compositi le onde ultrasonore propagano secondo modi diversi e le velocità associate hanno componenti differenti. Tali componenti si identificano in velocità di fase e velocità di gruppo. La prima di queste è stata già definita come la velocità con cui le creste dell'onda propagano, ma tale moto è disgiunto dall'energia contenuta in esso, che viene a sua volta definita dalla velocità di gruppo. Quest'ultima è definita proprio dallo spazio percorso nel materiale nell'unità di tempo dal pacchetto di energia. La velocità di gruppo dipende dallo spessore e dalla frequenza di eccitazione dell'onda.

Possiamo così esprimere le formulazioni che ci permettono di calcolare tali grandezze valide per entrambi i modi propagativi A_i e S_i . Per la velocità di fase abbiamo:

$$c_{phase} = \lambda * \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.35)$$

Nota la relazione $\omega = 2 * \pi * f$ possiamo ottenere che $c_{phase} = \lambda * f$ con λ e f lunghezza d'onda e frequenza rispettivamente.

Per la velocità di gruppo, funzione del prodotto frequenza per spessore, sfruttiamo la seguente relazione che la lega alla velocità di fase calcolata nella (1.35), infatti abbiamo:

$$c_{group}(f * d) = \omega' \left\{ \left[\left(\frac{\omega}{c_{phase}} \right) \right]^{-1} \right\}' \quad (1.36)$$

In cui abbiamo indicato la derivazione di ω e di $\left[\left(\frac{\omega}{c_{phase}} \right) \right]^{-1}$ con l'apice " ' ". Se svolgiamo la derivata otteniamo:

$$\begin{aligned} c_{group}(f * d) &= \omega' * \left[\frac{\omega'}{c_{phase}} - \omega \frac{c_{phase}'}{c_{phase}^2} \right]^{-1} = c_{phase}^2 * \left[c_{phase} - \omega \frac{c_{phase}'}{\omega'} \right]^{-1} = \\ &= c_{phase}^2 * \left[c_{phase} - (f * d) * \frac{c_{phase}'}{(f * d)'} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (1.37)$$

Quando la derivata della velocità di fase diviene zero, allora velocità di fase e di gruppo coincidono. Per il modo SH_i abbiamo le seguenti espressioni per le velocità:

$$c_p(f * d) = 2C_T * \left(\frac{f * d}{\sqrt{4(f * d)^2 - n^2 C_T^2}} \right) \quad (1.38)$$

$$c_g(f * d) = C_T \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{n}{2} \right)^2}{\left(\frac{f * d}{C_T} \right)^2}} \quad (1.39)$$

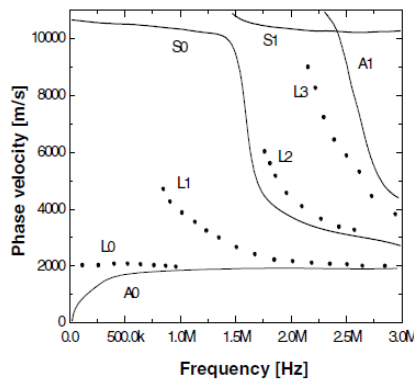
In cui $n = 1, 3, 5, \dots$ considerando i modi anti-simmetrici, oppure $n = 2, 4, 6, \dots$ per i modi simmetrici di SH_i.

È utile adesso far seguire una serie di caratteristiche che distinguono il modo di propagare di queste onde, soprattutto in materiali come i laminati compositi.

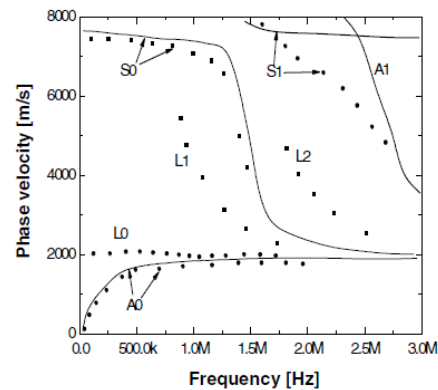
- **Effetto Slowness:** la velocità di propagazione nei materiali compositi laminati è funzione della direzione di propagazione. Definito l'angolo θ

della direzione propagante rispetto alla direzione delle fibre nel laminato, si è visto che per i modi S_i , A_i e SH_i è presente una sorta di rallentamento all'aumentare dell'angolo θ . Si nota infatti che se la direzione di propagazione dell'onda è parallela alle fibre ($\theta = 0^\circ$), si ha la massima velocità di dispersione, diversamente accade per ($\theta > 0^\circ$), in cui si assiste ad un progressivo rallentamento della propagazione nel materiale, fino ad avere il valore minimo di velocità per direzioni di propagazione ortogonali alla direzione delle fibre ($\theta = 90^\circ$). L'effetto Slowness è descritto dalla omonima funzione $1/C_g(\theta)$ [1.26].

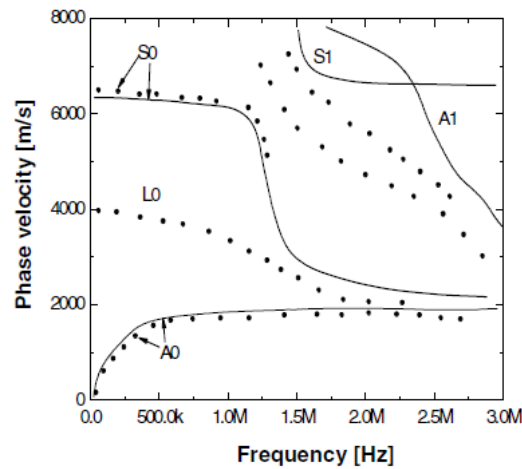
- **Dispersione:** come detto il fenomeno di propagazione delle onde di Lamb è dispersivo ed è dipendente da frequenza e spessore del materiale. Un'osservazione importante è sta nel fatto che se la frequenza di eccitazione è compresa tra 0 e 300kHz abbiamo la presenza dei primi modi $A_{i=0}$, $S_{i=0}$, $SH_{i=0}$. D'ora in poi in questa tesi, dato che il campo di frequenze in cui ci terremo sarà compreso entro i 300kHz, parleremo sempre e solo dei primi modi A_0 , S_0 , SH_0 . La Figura 23 mette in luce le diverse curve di dispersione rispetto alla diversa natura del materiale composito [1.26].



(a)



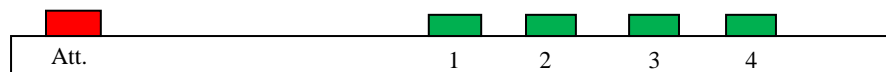
(b)



(c)

Figura 23: Curve di dispersione di un laminato composito: a) 8 ply unidirezionali; b) 8 ply $[0/90]_{2s}$; c) 8 ply quasi-isotropo $[45/-45/0/90]_s$

- **Attenuazione:** si definisce attenuazione la dissipazione di energia da parte dell'onda, man mano che questa procede per il laminato. L'effetto di ciò si manifesta come una graduale riduzione di ampiezza. Inoltre, se vi sono delle non omogeneità, oppure degli irrigidimenti, si assiste ad una attenuazione maggiore. È stato osservato [1.26] che il modo S_0 risulta essere attenuato in minor misura rispetto ad A_0 . Inoltre prove sperimentali su un laminato composito di dimensione 100 x 100 mm, in cui era presente un difetto di 7 mm, hanno messo in luce che l'onda ultrasonora una volta attraversato il difetto, ha portato ad una riduzione di energia pari al 52% rispetto all'onda originale. In Figura 1.24, possiamo vedere il fenomeno di riduzione di ampiezza dovuto all'attenuazione.



(a)

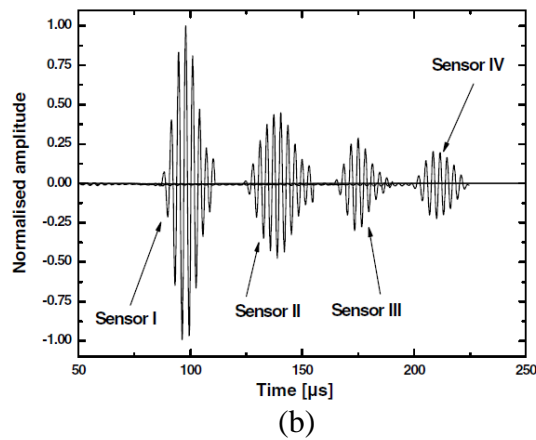


Figura 1.24: Fenomeno Attenuazione: a) schema dimostrativo non in scala di una lastra di alluminio avente 1 attuatore e 4 ricevitori; b) segnale registrato dai sensori posti a 200/400/600/900mm.

1.6 Trasduttori utilizzati per l'attivazione delle onde di Lamb

Per far sì che le onde di Lamb si attivino nel materiale, è necessario disporre di trasduttori in grado di generare l'onda di pressione adatta. È confortante sapere che sul mercato esistono diverse tipologie di trasduttori in grado di svolgere questa funzione. I più famosi e utilizzati sono i seguenti:

- **Sonde EMAT:** esse sono destinate a soli pezzi metallici. Esse sfruttano il principio magnetostrittivo per inviare e ricevere il segnale [1.28]; risultano essere relativamente ingombranti e con un peso non trascurabile (si pensi all'effetto di carico della sonda stessa nella misura). Tuttavia però si contraddistinguono per l'attivazione degli impulsi a banda stretta nei quali si evidenzia una buona energia incidente. Tuttavia il segnale registrato dalla medesima sonda risulta tra i più difficili nell'interpretazione. La Figura 1.25 illustra una sonda EMAT

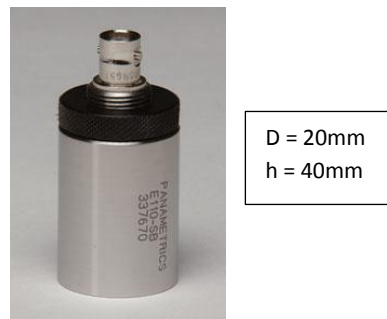


Figura 1.25: esempio di sonda EMAT prodotta da Olympus.

- **Attuatori PZT:** questi sensori/trasduttori, noti con il nome ceramiche Piezoelettriche di Zirconato Titanato di Piombo, (acronimo PZT), si differenziano per la loro economicità, leggerezza, piccole dimensioni. Inoltre possono lanciare impulsi con più modi vibratorii contenuti. Questi saranno i sensori utilizzati nelle prove di questa tesi. Tuttavia il segnale registrato necessita di sofisticate tecniche di processazione, pulitura e interpretazione. Nella Figura 1.26 vediamo un esempio di questi trasduttori [1.29].

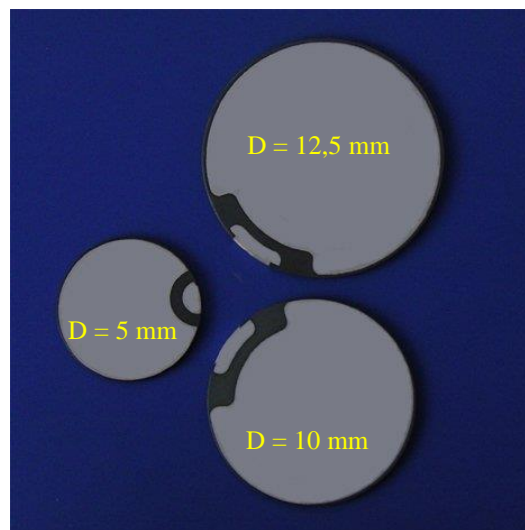


Figura 1.26: esempio di trasduttore PZT prodotto da Annon Piezo Technologies

Altre tipologie di attuatori ultrasonori utilizzati sono sensori MFC caratterizzati dalla loro flessibilità e dall'aver al loro interno fibre piezoelettriche. Essi sono mirati per applicazioni su superfici curve. Gli ultrasuoni poi, possono essere attivati mediante tecnologia Laser-Based, che utilizza l'interferometria per acquisire la risposta delle strutture. Particolarmente adatti per superfici irregolari. Altra soluzione si può trovare nelle sonde Interdigital, le quali sfruttano il Polyvinildene Fluoride, simile al funzionamento piezoelettrico, ma in questo caso più adatte alle basse frequenze, range attorno ai 500Hz, infine queste ultime risultano essere flessibili e quindi anch'esse adatte ad applicazioni su superfici curve.

1.7 Scopi del lavoro svolto

Visto lo stato dell'arte fin qui descritto, la moltitudine di usi in cui viene impiegato il materiale composito CFRP, e la possibilità di valutare lo stato di salute di strutture così create mediante un approccio innovativo con le onde ultrasonore di Lamb, lo scopo del presente lavoro di tesi è volto a investigare il fenomeno di propagazione vibratoria dei modi A_0 e S_0 all'interno dei laminati CFRP il cui uso è molto esteso nei vari settori visti nella sezione 1.1.1. Si attuerà per questo scopo una modellazione FEM semplificata che porterà ad una prima misura delle velocità propagative di A_0 ed S_0 in tutto il campo di frequenze di eccitazione da 0 a 300kHz, per poi passare alla validazione sperimentale direttamente sui laminati SAATI EH550/T800S.

I risultati ottenuti nella parte destinata alla comprensione della propagazione vibratoria, saranno di fondamentale importanza per caratterizzare la bontà dell'approccio Pitch Catch nella valutazione della presenza o meno dell'anomalia, sia essa artificiale o naturale. Si cercherà di localizzare la vera e propria posizione del danno avvalendoci dell'approccio Pulse Echo, in relazione prima con difetti artificiali e poi con difetti naturali ricavati da prove di impatto a energia crescente.

Il lavoro poi sarà corredato dallo studio e dall'individuazione di un parametro sintetico che condenserà al suo interno le informazioni caratterizzanti i danni rispettivamente artificiali e naturali, grazie infine ad un'analisi statistica DOE mediante piano fattoriale 2^k , sarà possibile identificare la significatività di ognuno dei parametri detti.

Tutto ciò è volto a definire una metodologia di analisi per strutture in composito CFRP che permetta di ottenere, in un prossimo futuro, un algoritmo automatico di monitoraggio SHM che tramite i parametri definiti nei capitoli successivi, renderà possibile l'individuazione di eventuali danni creatisi durante il normale esercizio sfruttando le innovative onde di Lamb. Ciò permetterà così in tutta sicurezza, di attuare le normali operazioni di controllo e manutenzione prima di cedimenti a volte anche catastrofici della struttura.

1.8 Bibliografia

Per questo primo capitolo si è fatto riferimento ai seguenti testi, articoli e pagine internet:

- [1.1] D.B. Miracle and S.L. Donaldson, *ASM Handbook Volume 21: Composites*, ASM International, 2001, 978-0-87170-703-1
- [1.2] D. Hull, T. W. Clyne, *An introduction to Composite Materials*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2000.
- [1.3] <http://www.toraycfa.com/product.html>
- [1.4] A.Gianneo, *Analisi e progettazione sperimentale applicata al monitoraggio strutturale di pannelli fibro-rinforzati mediante onde di Lamb*, Tesi 2012, Politecnico di Milano Bovisa.
- [1.5] Hexcel Corporation, Aerostrategy
- [1.6] P. Davoli, A. Bernasconi, M. Filippini, S. Foletti, *Comportamento meccanico dei materiali*, McGraw-Hill, 2005.
- [1.7] <http://www.boeing.com>
- [1.8] <http://www.atk.com>
<http://www.rolls-royce.com/civil/>
- [1.9] <http://www.portalecompositi.it>
- [1.10] <http://www.airbus.com>
- [1.11] Lux Research
- [1.12] <http://www.sae.org>
<http://www.bmw.it>
- [1.13] Ando, K., Nakagawa, K., Araki, T., Hagiwara, H. et al., "Impact Simulation of the CFRP Structure for a GT-Car," SAE Technical Paper 2003-01-2768, 2003, doi:10.4271/2003-01-2768.

Capitolo 1

- [1.14] T. Carlson, D. Orde'us, M. Wysocki and L. E. Asp, *CFRP structural capacitor materials for automotive applications*
- [1.15] Ph.D. Akihiko Kitano, EisukeWadahara, EisukeWadahara, *The CFRP automobile body project in Japan*
- [1.16] CNR DT 203/2006 *"Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato"*
- [1.17] CNR DT 200/2004 *"Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi fibrorinforzati"*
- [1.18] <http://www.uci.ch>
- [1.19] <http://www.pinarello.it>
- [1.20] J. E. MASTERS, *Damage Detection in Composite Materials*. Philadelphia, PA: ASTM, 1992
- [1.21] D. Hull, T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, Second Edition
- [1.22] R. M. Christensen, *The Numbers of Elastic Properties and Failure Parameters for Fiber Composites* J. Eng. Mater. Technol. April 1998 Volume 120, Issue 2, 110 [1.18] A. K. Kaw, *Mechanics of composite materials*, CRC Press, 1997.
- [1.23] J. C. Halpin, J. L. Kardos, *The Halpin-Tsai Equations: A Review*
T. W. Clyne, *A compressibility-based derivation of simple expressions for the transverse Poisson's ratio and shear modulus of an aligned long fibre composite*, vol. 9, pp. 336-339, 1990
- [1.24] Bernard Basile - Advitam, Inc, *Monitoring the Structural Health of the Rion-Antirion Bridge Using the LabVIEW Real-Time Module*, National Instrument.
- [1.25] Daniel Ramírez, CADETECH S.A., *Monitoring Electromechanical Shovels for Open-Pit Mining*, National Instruments.

[1.26] Zhongqing Su, Lin Ye, *Identification of Damage Using Lamb Waves, From Fundamentals to Applications*, Springer

[1.27] Rose, J.L., *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, New York, 1999.

Achenbach, J.D., *Wave Propagation in Elastic Solids*. North-Holland Pub. Co./American Elsevier Pub. Co., New York, 1973.

[1.28] <http://www.olympus-ims.com/it/ultrasonic-transducers/emat/>

[1.29] Annon Piezo Technologies

Capitolo 2 – Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

2.1 Introduzione

Questo capitolo studia il fenomeno propagativo delle onde di Lamb all'interno del materiale SAATI EH550/T800S, passaggio di fondamentale importanza per gli argomenti affrontati nei capitoli successivi, che riguardano l'individuazione dei difetti e interazione dell'onda con i danni presenti nel materiale.

Prima di affrontare in dettaglio come è avvenuta la modellazione del laminato provvisto di sensori, è utile descrivere brevemente il modello SAFE (Semi Analytical Finite Element) ed i relativi risultati propagativi ottenuti nel precedente lavoro [2.1]. Il metodo, ha come obiettivo la modellazione numerica della propagazione delle onde guidate. Esso sfrutta la ricerca numerica agli autovalori e autovettori della soluzione delle equazioni di moto in forma armonica. Il metodo SAFE risulta più mirato rispetto al metodo SPBW (Super Position Bulk Waves) [2.2] che sfrutta la sovrapposizione di onde di volume per caratterizzare fenomeni dissipativi nella propagazione dell'onda nel mezzo o in un fluido, perché esso trascura alcune soluzioni che potrebbero risultare rilevanti ai fini del risultato finale.

In particolare, l'approccio SAFE [2.3] si basa sulla discretizzazione in elementi finiti della sezione trasversale alla propagazione dell'onda, esprimendo analiticamente con l'Equazione (2.1) gli spostamenti nella forma armonica:

$$u(x, t) = Ue^{i(kx - \omega t)} \quad (2.1)$$

Risulta sufficiente una discretizzazione bidimensionale del dominio che, come nel caso del laminato a 17 ply, diviene monodimensionale adottando l'ipotesi di stato di sforzo piano, la Figura 2.1 chiarifica meglio ciò che si sta esponendo. In questo caso si è considerata una lastra semi-infinita lungo l'asse y il cui spessore coincide con quello del laminato oggetto di studio, la discretizzazione è stata

effettuata rispetto alla dimensione z , di fondamentale importanza per ciò che si sta cercando di spiegare, essendo le onde di Lamb guidate nello spessore.

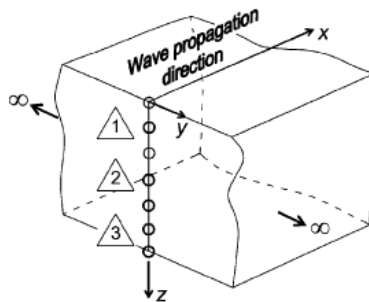


Figura 2.1: Discretizzazione dello spessore del laminato: ipotesi di stato di sforzo piano

L'approccio riduce i costi computazionali nel calcolo rispetto a problemi tridimensionali. Il metodo SAFE, non richiede alcuna discretizzazione temporale e spaziale determinante invece per i metodi tradizionali FEM, soprattutto al raggiungimento di frequenze di eccitazione elevate e piccole lunghezze d'onda.

I risultati del metodo SAFE proposti per il laminato SAATI EH550/T800S a 17 ply in configurazione quasi isotropa, riportano i modi propagativi e in relazione ad essi, la frequenza di taglio oltre la quale risultano presenti più modi oltre a quelli fondamentali A_0 , S_0 e SH_0 . Conoscere la frequenza di taglio, è importante al fine di poter operare con tecniche di monitoraggio strutturale SHM, proposte nel Capitolo 1, in un campo di frequenze in cui sono presenti i tre modi A_0 , S_0 e SH_0 , rendendo più chiari i risultati sull'integrità strutturale del laminato, mediante approccio con onde di Lamb.

L'output numerico SAFE fornisce gli autovalori e autovettori associati, dell'Equazione (2.1) discretizzata. I risultati sono rielaborati al fine di ottenere le curve di dispersione mediante script Matlab già disponibile dal lavoro precedente [2.1]. Sono state considerate, quattro direzioni propagative principali in relazione alle caratteristiche del laminato con un livello di anisotropia pari al 36%.

È interessante evidenziare la variazione della velocità di propagazione, rispetto all'orientazione delle fibre. Si riportano nelle Figure 2.2, i risultati ottenuti rispetto al sistema di riferimento del laminato per inclinazioni: orizzontale di 0° (longitudinale di massima resistenza), 30° , 60° e 90° (trasversale).

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

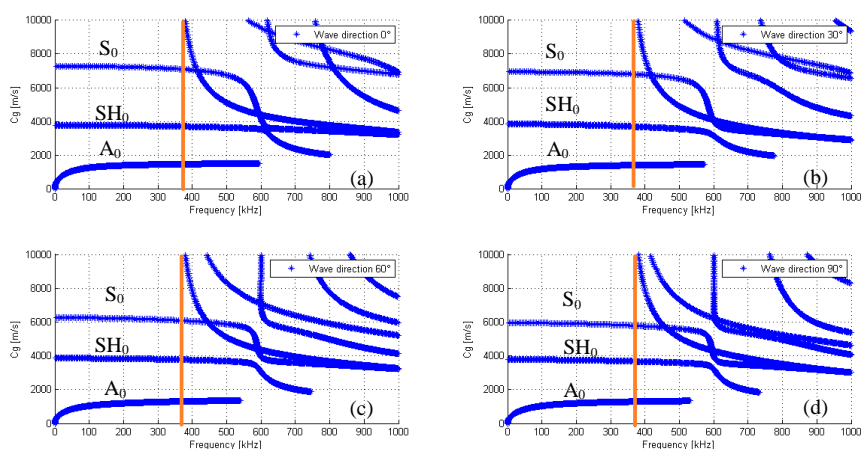


Figura 2.2: Curve di dispersione raffiguranti le velocità di gruppo all'interno del laminato SAATI EH550/T800S: a) 0° rispetto alla fibra, b) 30°, c) 60°, d) 90°

Dall'analisi dei grafici, si possono trarre due conclusioni:

- Il campo di esistenza dei soli tre modi A_0 , SH_0 e S_0 , è indipendente dalla direzione di propagazione dell'onda ed è individuabile in un'unica frequenza pari a 395kHz, limite superiore delle frequenze utilizzabili.
- Le velocità di gruppo risultano dipendenti dalla direzione di propagazione, la Tabella 2.1, evidenzia l'aumentare della velocità man mano che la direzione di propagazione tende ad essere longitudinale rispetto al sistema di riferimento al laminato, direzione di massimo rafforzamento del composito stesso. Questa direzione è stata assunta essere quella parallela alla dimensione maggiore della lamina rettangolare 800 x 400 mm

Per rendere più chiaro il fenomeno nella Tabella 2.1 e 2.2, sono presenti i dati di velocità. Nelle Figure 2.3 e 2.4, sono visualizzati gli andamenti di queste ultime in funzione dell'angolo di propagazione.

Frequenza [kHz]	A_0 ($\theta=0^\circ$) [m/s]	A_0 ($\theta=30^\circ$) [m/s]	A_0 ($\theta=60^\circ$) [m/s]	A_0 ($\theta=90^\circ$) [m/s]
5	763,00	699,70	619,00	579,60
20	1273,00	1176,00	1046,00	1028,00
30	1405,00	1309,00	1166,00	1158,00
50	1523,00	1430,00	1284,00	1302,00
80	1562,00	1475,00	1350,00	1376,00
100	1563,00	1482,00	1368,00	1393,00
150	1553,00	1488,00	1398,00	1408,00
200	1549,00	1495,00	1423,00	1415,00
250	1548,00	1499,00	1435,00	1420,00
300	1540,00	1505,00	1440,00	1431,00

Tabella 2.1: Velocità di gruppo modo A_0 per il laminato SAATI EH550/T800S, risultato dell'approccio SAFE per gli angoli di propagazione 0°, 30°, 60° e 90°

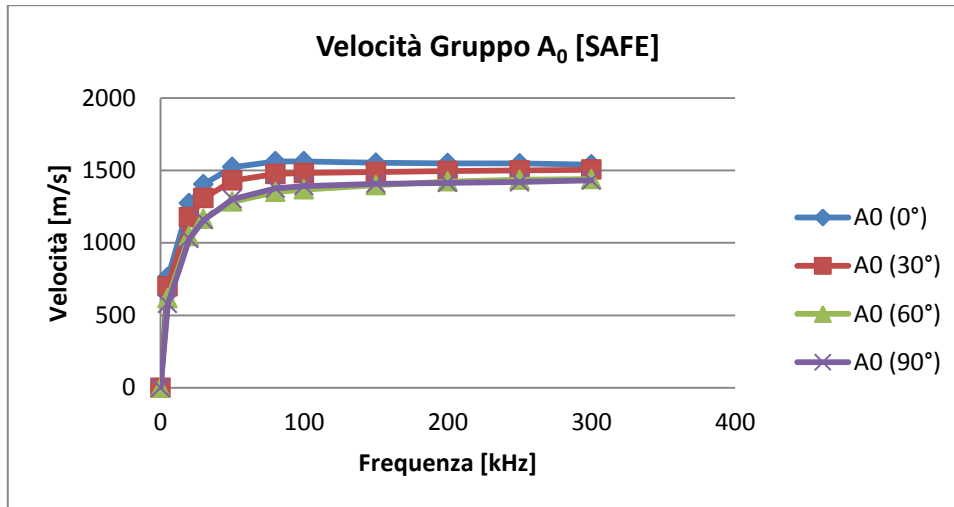


Figura 2.3: Visualizzazione modo A₀ rispetto alla direzione di propagazione, risultato SAFE per laminato SAATI EH550/T800S

Frequenza [kHz]	S ₀ (θ=0°) [m/s]	S ₀ (θ=30°) [m/s]	S ₀ (θ=60°) [m/s]	S ₀ (θ=90°) [m/s]
50	7700,00	6937,00	6254,00	5942,00
80	7274,00	6930,00	6250,00	5937,00
100	7265,00	6925,00	6246,00	5934,00
150	7256,00	6919,00	6230,00	5921,00
200	7235,00	6900,00	6208,00	5899,00
250	7203,00	6880,00	6183,00	5873,00
300	7168,00	6851,00	6145,00	5839,00

Tabella 2.2: Velocità di gruppo modo S₀ per il laminato SAATI EH550/T800S, risultato dell'approccio SAFE per gli angoli di propagazione 0°, 30°, 60° e 90°

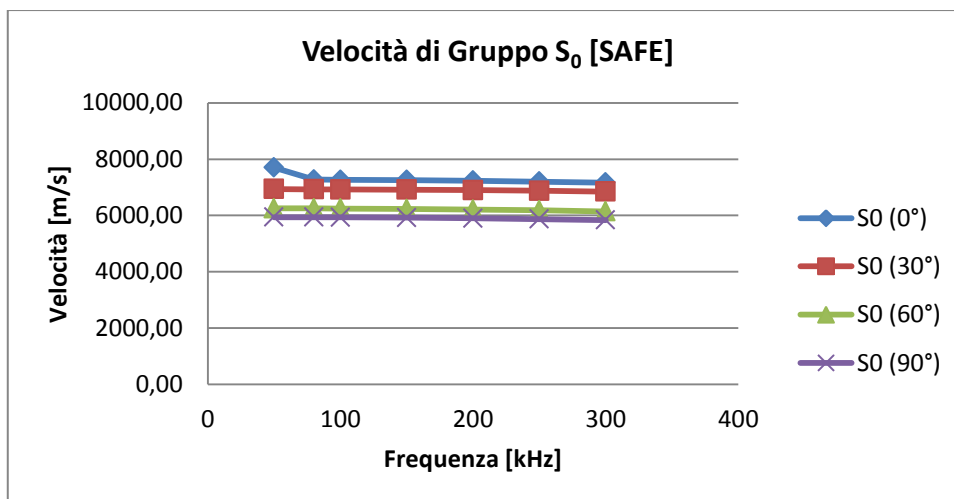


Figura 2.4: Visualizzazione modo S₀ rispetto alla direzione di propagazione, risultato SAFE per laminato SAATI EH550/T800S

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

Non si riportano le curve di dispersione SH_0 perché, avendo velocità in un intervallo compreso tra A_0 e S_0 , risultano visualizzabili dal metodo SAFE, ma sperimentalmente diviene difficoltoso misurarle a causa della sovrapposizione dei due modi. Non disponendo di sistemi di acquisizione adatti a visualizzare il modo SH_0 , si è preferito validare solo i modi fondamentali S_0 e A_0 .

Noti i risultati proposti dal metodo SAFE, si è opportunamente sviluppato un modello FEM allo scopo di ottenere una prima validazione.

2.2 Prove sperimentali per la validazione delle curve di dispersione A_0 e S_0 sul laminato composito SAATI EH550/T800S

In questa parte del Capitolo 2, si sono validati, con prove sperimentali dedicate, i risultati ottenuti dal precedente modello SAFE. La procedura ha previsto un'area di attuazione della propagazione che fungesse da onda diagnostica di riferimento tramite sensori PZT e dei punti di ascolto ottenuti tramite altri sensori posizionati sulle direzioni di propagazione adottate in simulazione. La validazione eseguita, ha previsto le seguenti fasi:

- Preparazione dei sensori PZT necessari all'attuazione e all'ascolto delle onde di Lamb
- Incollaggio sulla piastra di laminato SAATI EH550/T800S
- Attuazione e acquisizione dell'onda
- Pulitura del segnale acquisito
- Analisi del segnale ed estrazione del contributo energetico massimo
- Calcolo del tempo di volo e delle velocità di propagazione dei modi A_0 e S_0

I punti elencati, sono stati eseguiti per ogni direzione di propagazione e per ogni frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica.

2.2.1 Preparazione dei sensori PZT e loro incollaggio

La scelta di utilizzare questo tipo di PZT (ceramica piezoelettrica a base di zirconato titanato di piombo), rispetto ad altri come sorgenti laser o reticoli di Bragg [2.4], è stata dettata da tre fattori: la leggerezza, la compattezza, in modo da limitare l'effetto di carico nelle misure, e l'economicità. È utile presentare brevemente le caratteristiche di questi sensori.

L'effetto piezoelettrico inverso del PZT, determina l'attuazione delle onde ultrasonore a seguito di una deformazione della ceramica per effetto di un input elettrico (qualche decina di V). Mentre l'effetto piezoelettrico diretto, determina l'ascolto. Ovvero il PZT, sollecitato all'ingresso da una deformazione vibratoria meccanica, genera una differenza di potenziale in output corrispondente (qualche decina di mV) [2.5]. Queste proprietà della ceramica piezoelettrica, offrono quindi l'opportunità di utilizzare i medesimi sensori sia in fase di attuazione, sia in fase di ascolto. Per contro la rigidità della ceramica impedisce la conformazione a superfici curve e non offre un risultato soddisfacente nell'eccitazione non selettiva dei modi di Lamb. Anche se il primo svantaggio non influisce sull'esito del lavoro in relazione alla geometria piana del laminato SAATI EH550/T800S, l'assenza di selettività non è un fattore trascurabile. Infatti il PZT eccitato ad una certa frequenza, genererà tutti i modi vibratorii A_0 , S_0 e SH_0 associati a quella frequenza. Quindi nel caso studiato, rimanendo al di sotto della frequenza limite, trovata essere 395 kHz (Paragrafo 2.1), si avranno simultaneamente tutti e tre i modi propagativi delle onde di Lamb, cosa che complicherà non poco l'interpretazione dei segnali.

Esistono tuttavia più approcci, trovati in letteratura, che permettono di diminuire l'effetto dell'eccitazione simultanea dei modi A_0 , S_0 e SH_0 [2.4]. Ciò che si è utilizzato in questa tesi è stato attivare l'onda di Lamb selettivamente in fase e in contro-fase utilizzando due trasduttori in asse, incollati su entrambe le superfici del laminato. Questo tipo di eccitazione permette di magnificare rispettivamente il modo S_0 rispetto ad A_0 e viceversa, scegliendo rispettivamente di eccitare in fase o in contro-fase i due attuatori. Lo schema riportato in Figura 2.5, illustra il tipo di montaggio adottato dei trasduttori, e i collegamenti necessari.

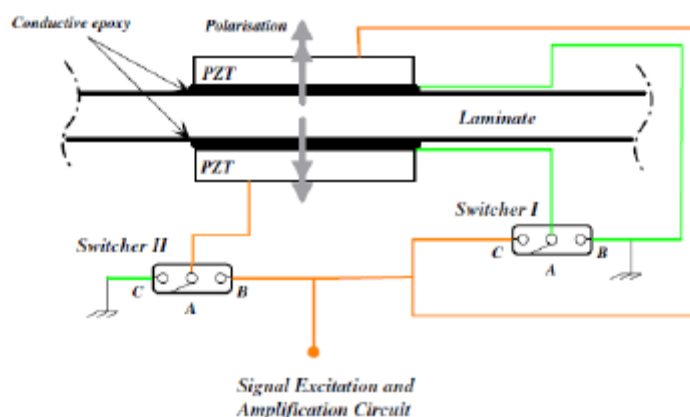


Figura 2.5: Schema logico di posizionamento e collegamento PZT al fine di realizzare l'eccitazione in fase e contro-fase

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

Dopo aver realizzato il circuito elettrico riportato in Figura 2.5, facendo uso di un deviatore a levetta, due boccole di colore diverso per ogni canale in uscita e del connettore BNC da pannello femmina, si è alloggiato il tutto in una opportuna scatoletta preventivamente forata. La Figura 2.6, riporta i componenti utilizzati [2.6].

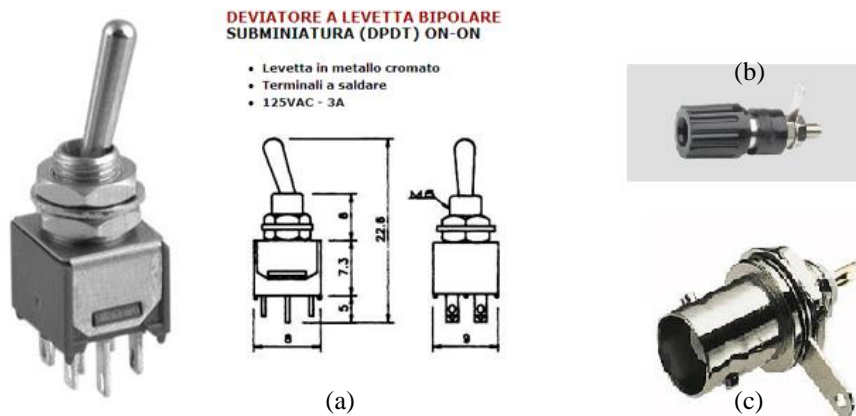


Figura 2.6: Componentistica utilizzata: a) deviatore a levetta bipolare, b) boccole per spine a banana, c) connettore BNC da pannello femmina

La logica di funzionamento del circuito prevede che, se i terminali B sono simultaneamente connessi al terminale A del deviatore, si genera l'eccitazione in fase, mentre ogni volta che i terminali C sono connessi simultaneamente in A, si genera un campo elettrico a-simmetrico che determina l'eccitazione contro-fase, per meglio comprendere è utile consultare la Figura 2.5. Infine, la Figura 2.7 riporta il circuito installato nel contenitore opportunamente conformato, contenente i componenti esposti precedentemente.

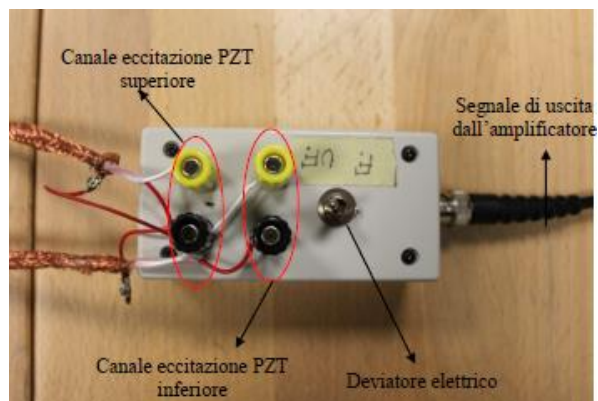


Figura 2.7: Realizzazione circuito fase contro-fase

Questo tipo di connessione elettrica dei PZT, tende a ricreare il campo di spostamenti tipico dei modi S_0 e A_0 , rispettivamente estensionale e flessionale. La Figura 2.8 riposta l'effetto dei campi di spostamento generati dai sensori quando questi sono eccitati in fase o in contro-fase [2.4].

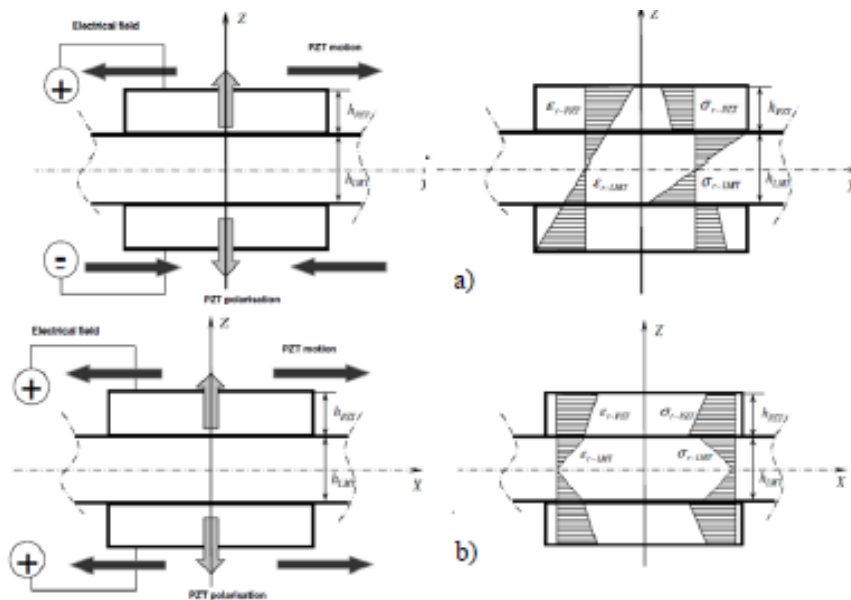


Figura 2.8: Campo di spostamenti generati durante i due tipi di eccitazione: a) in contro-fase, b) in fase

La scelta del tipo di ceramica e le dimensioni meccaniche hanno privilegiato una tipologia di sensori in grado di dare la massima deformazione meccanica quando il PZT è interessato da una tensione in ingresso e viceversa una elevata sensibilità elettrica nel massimizzare il segnale meccanico rilevato, il tutto per offrire le migliori prestazioni sia in attuazione sia in ascolto. Aspetto ulteriormente considerato nella scelta, è stata l'efficienza della ceramica, ovvero la capacità di quest'ultima nel trasformare la maggior parte di energia elettrica in ingresso in deformazione meccanica e viceversa. Tenendo presente questi importanti parametri la letteratura [2.7] ha fornito il miglior compromesso nella ceramica PZT PIC255 di zirconato titanato di piombo. La Tabella 2.3 riporta le caratteristiche della ceramica piezoelettrica, in cui si hanno rispettivamente k il coefficiente di accoppiamento elettromeccanico che identifica l'efficienza del sensore, d il coefficiente che denota la deformazione sviluppata rispetto al campo elettrico imposto e g la sensibilità. Inoltre, è presente la temperatura di Curie, oltre la quale le proprietà della ceramica piezoelettrica vengono meno in

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

caso di giunzioni elettriche con saldobrasatura. È importante sottolineare la presenza dei pedici i, j uniti ai coefficienti della Tabella 2.3, i quali stanno a significare rispettivamente la risposta elettrica e la risposta meccanica secondo le direzioni $1 = x$, $2 = y$ e $3 = z$. Ad esempio, per il coefficiente di deformazione d_{31} il significato espresso è la deformazione meccanica prodotta lungo la direzione polare nel piano x , quando il trasduttore è eccitato imponendo un campo elettrico lungo z . Allo stesso modo, per il coefficiente di sensibilità g_{31} il significato esprime il campo elettrico misurato in direzione z , quando il trasduttore è interessato da una deformazione meccanica lungo x polare nel piano. Coerentemente la Figura 2.9 chiarifica il modo di intendere i coefficienti.

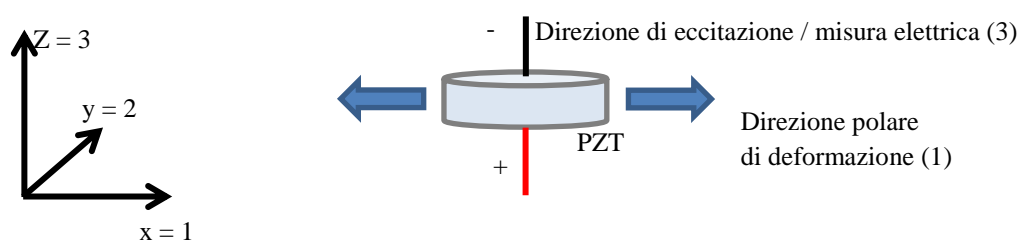


Figura 2.9: Interpretazione dei coefficienti della ceramica PIC255

T_{Curie}	350 [°C]
k_p	0,62
k_t	0,47
d_{31}	$-180 \cdot 10^{-12}$ [C/N]
d_{33}	$400 \cdot 10^{-12}$ [C/N]
g_{31}	$-11,3 \cdot 10^{-3}$ [V*m/N]
g_{33}	$25 \cdot 10^{-3}$ [V*m/N]
N_p	2000Hz*m
N_t	2000Hz*m

Tabella 2.3: Caratteristica della ceramica PZT PIC255

Nel caso di dischi sottili, è uso comune impiegare il pedice p per definire la direzione di risposta meccanica planare/radiale (nel piano x,y), ortogonale a quella di polarizzazione ($3=Z$), mentre il pedice t indica la grandezza in esame nello spessore.

Noto il tipo di ceramica PZT la dimensione risulta vincolata in relazione all'intervallo di frequenza di interesse e alle costanti di frequenza planare N_p e dello spessore N_t in Tabella 2.3, considerando in oltre le esigenze di

Capitolo 2

compattezza, leggerezza e minimo effetto di carico sulle misure si sono scelte le dimensioni dei trasduttori pari al diametro di 5mm e spessore 1mm (Figura 2.10).



Figura 2.10: Trasduttore PZT PIC255 PiCeramic impiegati nelle prove di questa tesi

Note le caratteristiche dei sensori-trasduttori utilizzati, è possibile effettuare le connessioni necessarie alla realizzazione della strumentazione del laminato SAATI EH550/T800S. Si sono rese opportunamente ruvide le piazzole di collegamento del PZT, al fine di garantire una miglior presa dei cavi saldobrasati con la speciale lega di stagno consigliata dalla casa PiCeramic, la quale si compone di: Sn 95,5%, Ag 3,8%, Cu 0,7% [2.7]. Al fine di ottenere la rugosità necessaria delle piazzole, è stato sufficiente abraderle delicatamente con carta-vevtrata a grana fine. Il collegamento fisico dei terminali di lunghezza adeguata per permettere un comodo incollaggio, ha previsto una preliminare stagnatura sia delle piazzole che del trefolo del cavo e successiva saldobrasatura a temperatura non superiore a 350 °C (temperatura di Curie del materiale piezoelettrico). Si evidenzia il fatto che la piazzola di più grandi dimensioni rappresenta il polo negativo superiore della ceramica, mentre quella più piccola riporta il contatto positivo inferiore del trasduttore. È inoltre stata effettuata la saldobrasatura munendosi di supporto in alluminio per permettere una più efficace dissipazione del calore al fine di evitare quanto più possibile la vicinanza della temperatura del trasduttore alla temperatura critica di Curie.

Effettuato il collegamento elettrico dei due terminali positivo e negativo, si è proceduto all'incollaggio dei sensori sul laminato, effettuando anche in questo caso un irruvidimento della zona di incollaggio sul laminato con carta-vevtrata a grana fine. Il collante utilizzato è stato il cianoacrilato Loctite monocomponente indurente a freddo, adesivo con ottime caratteristiche di rigidità per permettere

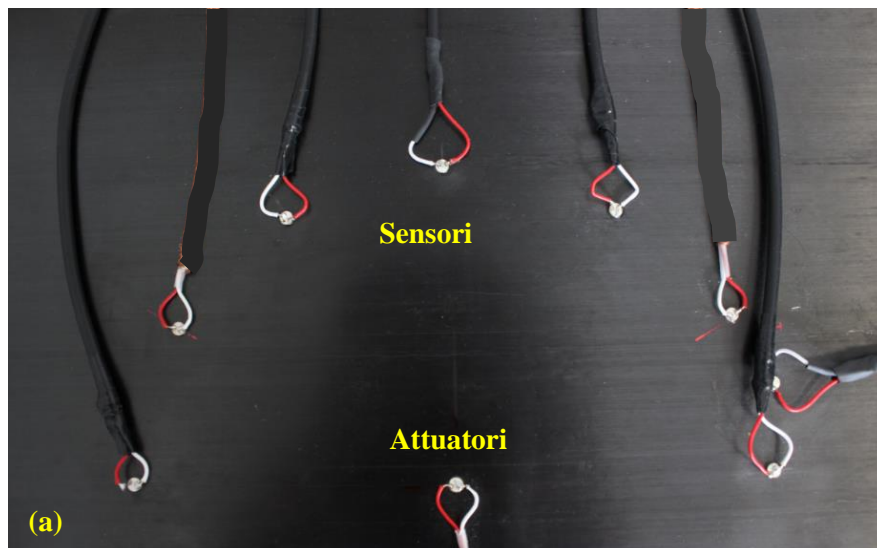
Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

il miglior accoppiamento trasduttore-laminato. Per ciò che riguarda l'attuatore, come suggerito dalla Figura 2.5, si sono incollati i trasduttori affacciati uno all'altro nel centro del laminato, mentre per ciò che riguarda i sensori, si sono incollati radialmente ad una distanza dal centro di 100 mm. La Figura 2.11 riporta il particolare del sensore cablato con i due terminali positivo e negativo e posizionato dopo l'incollaggio sul laminato SAATI EH550/T800S.



Figura 2.11: Particolare del PZT collegato e incollato sulla piastra SAATI EH550/T800S

Infine, la procedura di preparazione ha visto la connessione dei cavi schermati di collegamento RG-58 intestati con opportuni connettori BNC a crimpare. La Figura 2.12, riporta la piastra strumentata destinata alla validazione delle curve di dispersione dei modi A_0 e S_0 di Lamb.



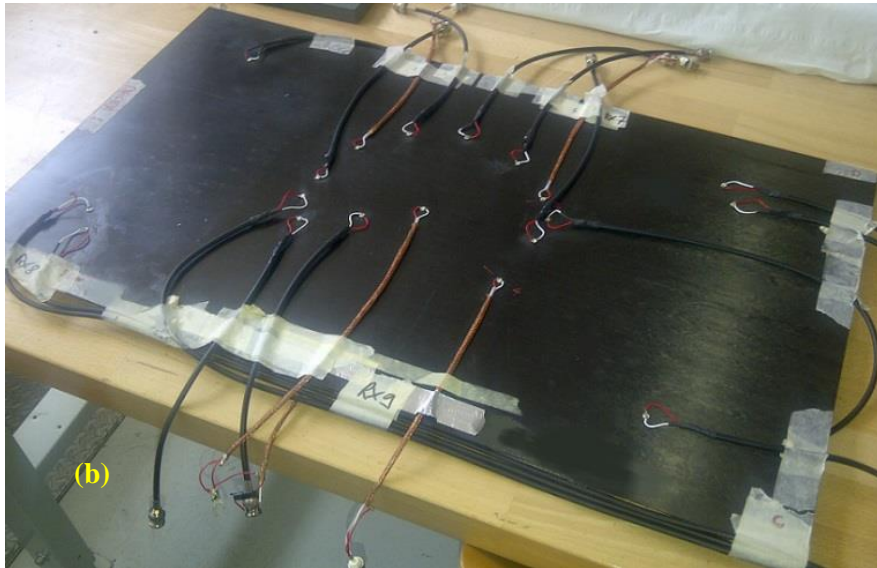


Figura 2.12: Piastra SAATI EH550/T800S strumentata per la misura delle velocità di propagazione A_0 e S_0 di Lamb: a) particolare, b) visione di insieme piastra SAATI EH550/T800S 800 x 400 mm

2.2.2 Attuazione e acquisizione dell'onda di Lamb all'interno del laminato, catena di misura

Per effettuare la misurazione dei tempi di volo è necessario installare una catena di misura che sia in grado di generare la forma d'onda diagnostica da inviare, opportunamente amplificata, agli attuatori posizionati sul laminato e in secondo luogo di registrare il segnale ricevuto dai sensori. Nel Paragrafo 2.2.1, si esponeva l'effetto piezoelettrico diretto, attraverso il quale i sensori interessati da un campo vibratorio meccanico, determinavano un'uscita elettrica di qualche mV. Questa affermazione determina la vulnerabilità del segnale registrato dai sensori a disturbi esterni provenienti da fonti elettromagnetiche o dalla frequenza di 50Hz della tensione di rete di alimentazione. Al fine di limitare al massimo in fase di acquisizione la presenza di disturbo, è stato necessario inserire nella catena un opportuno filtro passa alto, in maniera da eliminare quanto più possibile la presenza indesiderata del fenomeno. Entrando nel merito dell'attuazione e della ricezione del segnale i due strumenti utilizzati sono stati rispettivamente il generatore di funzione arbitraria e l'oscilloscopio.

Prima di procedere all'esposizione della strumentazione usata per attuare l'onda diagnostica, è opportuno soffermarsi sulla tipologia di onda. Per giungere ad una scelta vincente al fine di ottenere quanto più possibile i modi propagativi A_0 e S_0

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

separati e non uniti assieme, è stato necessario ricercare e poi sperimentare diverse forme, dal semplice coseno, all'impulso, all'onda quadra, per poi passare alle forme d'onda finestrate in cui è possibile scegliere la dimensione del pacchetto trasmesso [2.4]. Il miglior compromesso in tutte le sperimentazioni di questo capitolo e nei successivi, ha visto scegliere l'onda diagnostica coseno finestrato Hanning a 5,5 picchi. L'Equazione (2.1) riporta l'espressione dell'onda diagnostica:

$$p_i = \left[\frac{1}{2} * \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{N_p} * t_i\right) \right) * \cos(2\pi f * t_i) \right] \quad (2.1)$$

in cui p_i è l'andamento della forma d'onda calcolato per punti, f è la frequenza dell'onda diagnostica, N_p è il numero di picchi dell'onda, t_i è il tempo.

Per costruire l'andamento, è stato scelto un numero di punti sufficiente ad avere un risultato regolare. Nel caso in esame si sono presi 80 punti, nota la frequenza di eccitazione, si è calcolato il periodo T dell'onda con l'Equazione seguente (2.2):

$$T = \frac{f}{N_p} \quad (2.2)$$

Noto il periodo T , si calcola l'incremento temporale dividendolo per il numero di punti scelti a creare la forma d'onda con l'Equazione (2.3):

$$t_i = \frac{T}{N} \quad (2.3)$$

in cui N è il numero di punti scelto. In Figura 2.13, osserviamo l'onda diagnostica creata per una frequenza di 80 kHz.

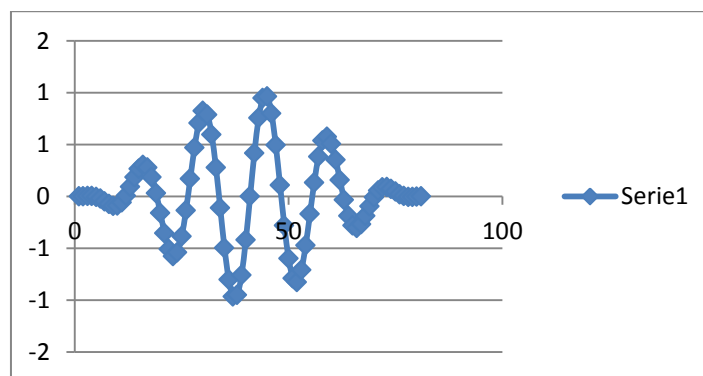


Figura 2.13: Forma d'onda diagnostica ad una frequenza di 80 kHz

Capitolo 2

A questo punto risulta indispensabile la potenzialità del generatore di funzione d'onda arbitraria, il quale permette di generare un segnale di ampiezza massima picco-picco assegnata, la cui forma è decisa dall'utente. Nel caso in esame, la forma d'onda dell'onda diagnostica utilizzata è quella riportata in Figura 2.13, immessa punto per punto nel generatore di funzione, il quale la invierà agli attuatori PZT, con la possibilità di decidere le più appropriate impostazioni di ampiezza, ritardo, numero di pacchetti inviati e frequenza. L'apparecchio scelto nelle prove di laboratorio è stato l'Agilent 33220A, riportato in Figura 2.14.



Figura 2.14: Agilent 33220A

L'oscilloscopio, utilizzato nella catena di misura, ha il compito di acquisire il segnale proveniente dai sensori PZT incollati sul laminato, è uno strumento passivo che sacrifica la risoluzione verticale a 8 bit delle normali schede di acquisizione, ma consente con costi contenuti elevate frequenze di campionamento e la visualizzazione in tempo reale dell'evoluzione del fenomeno.

Lo strumento utilizzato è stato il Teledyne LeCroy WAVEACE 1001, le cui caratteristiche sono riportate qui di seguito nella Tabella 2.4.

Numero di canali di acquisizione	2
Risoluzione convertitore A/D	8 bit
Risoluzione verticale (min, max)	2 mV, 10 V
Risoluzione orizzontale (min, max)	2,5 ns, 50 s
Frequenza di campionamento	1 GS/s

Tabella 2.4: Caratteristiche tecniche Oscilloscopio Teledyne LeCroy WAVEACE 1001

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

In relazione al fenomeno della propagazione nel laminato delle onde di Lamb all'interno del campo di frequenze da 5 a 300 kHz, per rispettare il teorema del campionamento di Nyquist, occorrerebbero delle frequenze di acquisizione di almeno 600 KS/s. Lo strumento utilizzato rispetta ampiamente il vincolo di Nyquist per evitare il fenomeno di Aliasing, dato che permette frequenze di campionamento di un ordine di grandezza superiore fino ad un massimo di 1 GS/s. Nella Figura 2.15 si riporta l'oscilloscopio utilizzato.



Figura 2.15: Teledyne LeCroy WAVEACE 1001

Per consentire un'attuazione efficace dei modi di Lamb nel laminato, si è installato l'amplificatore a banda larga, il TTI WA301. Questo apparecchio ha permesso di pilotare i PZT attuatori con una tensione picco-picco dell'onda diagnostica pari a 30 V, il che ha reso appena sufficiente la visibilità dei modi A_0 e S_0 dai sensori posizionati radialmente sul laminato. La Figura 2.16 riporta l'amplificatore utilizzato.



Figura 2.16: TTI WA301

Capitolo 2

In conclusione è stato possibile migliorare il segnale acquisito in termini di rapporto segnale rumore, utilizzando un filtro passa-alto dotato di amplificatore interno. Lo scopo della connessione dell'apparecchio risulta chiara dalle seguenti due funzioni da esso svolte:

- Taglio del rumore a bassa frequenza di 50 Hz, generato dalla tensione di alimentazione degli apparecchi di misura
- Amplificazione del segnale proveniente dai sensori PZT destinati all'ascolto.

Grazie alla conformazione del filtro KRONHITE 3322 riportato in Figura 2.17, dopo aver appurato che l'immissione di questo strumento non generava ritardi o sfasamenti nel segnale, è stato possibile amplificare il segnale utilizzando in serie i due amplificatori presenti, raggiungendo così 40db totali rispetto al segnale in ingresso.



Figura 2.17: KRONHITE 3322

Qui di seguito si riporta in Figura 2.18 la conformazione della catena di misura ottenuta per la cattura dei modi di Lamb all'interno del laminato. Si riportano inoltre i significati dei colori delle linee di collegamento realizzate con cavi BNC-BNC in RG-58:

- **Nero:** linea destinata all'attuazione delle onde di Lamb
- **Rosso:** linea dedicata alla creazione del riferimento rispetto al quale calcolare il tempo di volo
- **Verde:** linea Trigger dal generatore di funzione all'oscilloscopio per la visualizzazione del segnale
- **Ocra:** linea di ritorno del segnale dai sensori posizionati sul laminato
- **Viola:** uscita dati

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

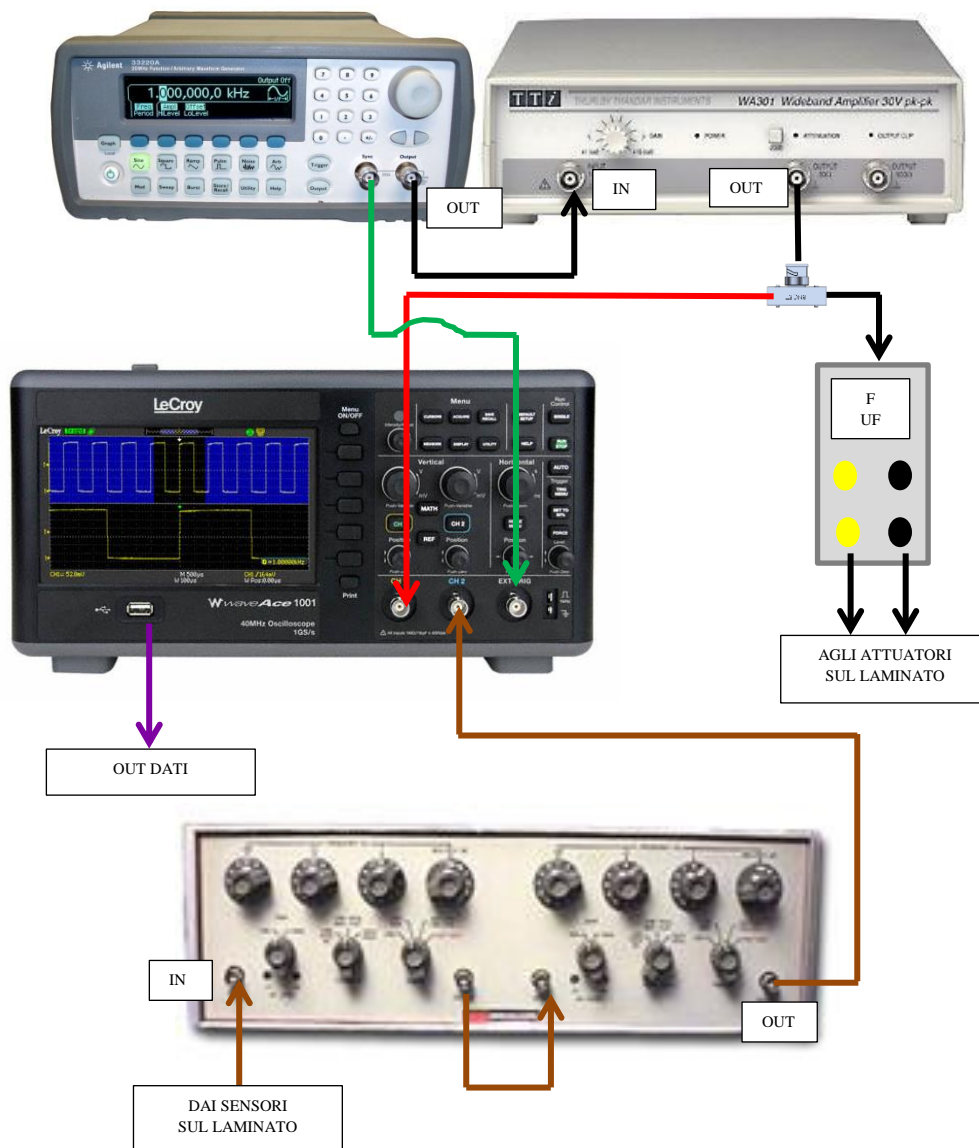


Figura 2.18: Schema di collegamento intuitivo della catena di misura

Installata la catena di misura e connessi i relativi cavi provenienti dal laminato opportunamente strumentato nel Paragrafo 2.2.1 si è pronti per effettuare le acquisizioni e il calcolo delle curve di dispersione.

2.2.3 Analisi del segnale acquisito per la misura della velocità di propagazione del modo A_0

Il presente paragrafo, è dedicato all'esposizione delle operazioni effettuate sui segnali acquisiti dall'oscilloscopio. Si sono provate tutte le frequenze di eccitazione dell'onda diagnostica da 5 a 300 kHz agendo opportunamente sul generatore di funzione. Si ricorda che per la misura della velocità di propagazione del modo A_0 si sono azionati i PZT attuatori in configurazione contro-fase, al fine di magnificare l'ampiezza del modo anti-simmetrico di Lamb. I segnali di risposta ottenuti dall'oscilloscopio sono in formato tabellare .CSV, è stato quindi necessario produrre un opportuno script in Matlab che potesse leggere il formato e inserire i dati in una matrice le cui tre di colonne corrispondevano ai valori di tensione dei canali e al valore temporale dell'acquisizione di ogni punto. Questo ha reso possibile la manipolazione dei dati.

L'efficacia della catena di misura installata, si evidenzia sui segnali ottenuti. Essendo stati filtrati e acquisiti con un numero di medie pari a 64 dall'oscilloscopio, presentano rumore ad elevata frequenza che come si vede nella Figura 2.19, che riporta l'acquisizione generata a 80kHz, risulta minimo. Si è deciso comunque di effettuare l'operazione di de-noising sfruttando lo strumento matematico Wavelet Transform [2.8]., che ha permesso di ottenere una pulitura del segnale visualizzando solo l'informazione desiderata sui modi di Lamb.

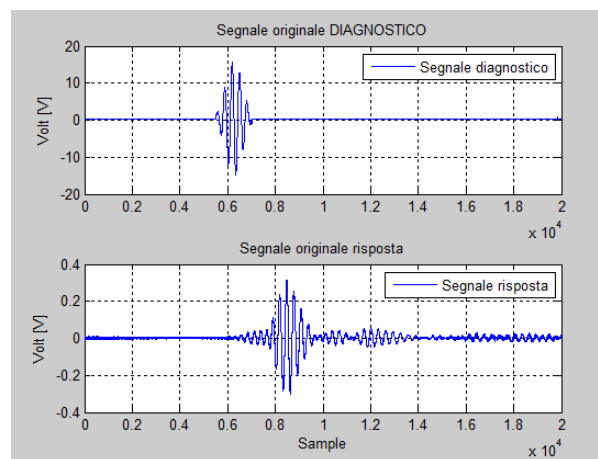


Figura 2.19: Segnali diagnostico e risposta per una frequenza di eccitazione di 80 kHz sul laminato SAATI EH550/T800S acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0°

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

E' opportuno esporre che cosa si intende per trasformata wavelet. Questo strumento matematico permette di rappresentare un segnale mediante l'uso di una forma d'onda oscillante di lunghezza finita o a decadimento rapido, nota con il nome di wavelet madre. Quest'onda è scalata e traslata per potersi adattare al segnale originale in ingresso.

La parola wavelet, letteralmente tradotta "ondina", è dovuta ai matematici Morlet e Grossman che nei primi anni ottanta iniziarono a farne uso classificando la trasformazione in CWT (Continuous Wavelet Transform) e DWT (Discrete Wavelet Transform). La differenza di principio fra le due risiede nel fatto che la trasformata continua opera su tutte le possibili scale e traslazioni, mentre la trasformata discreta usa un sottoinsieme discreto di tutti i valori possibili [2.8].

Nel caso di pulitura del segnale, effettuato nel calcolo delle curve di dispersione, si è utilizzata la trasformata discreta DWT. Il modo di operare di quest'ultima, prevede decomporre il segnale originale associando una specifica forma d'onda predefinita (wavelet madre). Il risultato ottenuto dalla funzione offerta da Matlab *wavedec* è rappresentato a titolo di esempio dal diagramma riportato in Figura 2.20, in cui il segnale viene suddiviso in componenti di minor interesse che non presentano struttura e andamento simile all'informazione cercata, ovvero la forma d'onda diagnostica. È possibile inoltre decidere quanti livelli di decomposizione effettuare in relazione al segnale in ingresso.

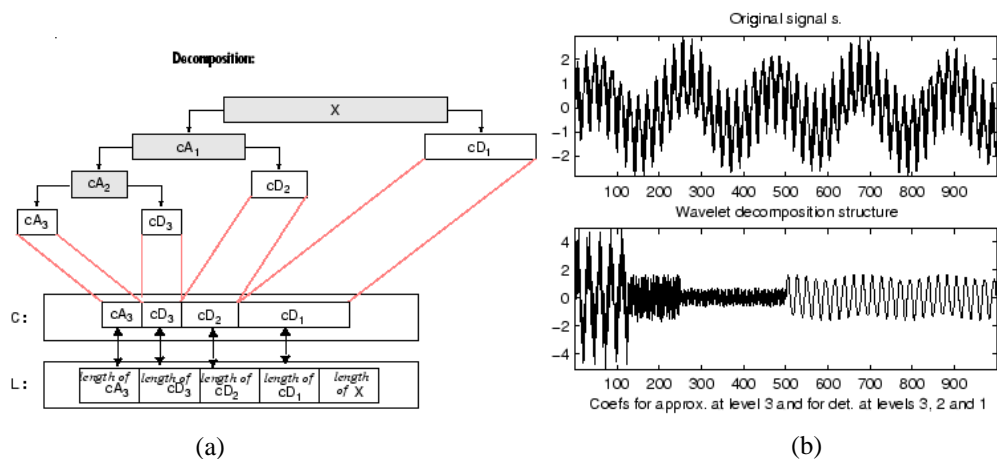


Figura 2.20: Esempio di decomposizione discreta wavelet: a) tre livelli di decomposizione, b) corrispondente segnale d'esempio

Dopo qualche prova sul segnale di risposta registrato dai sensori PZT, il miglior compromesso è stato scegliere 4 livelli di decomposizione utilizzando una wavelet madre db4. È di fondamentale importanza che la wavelet madre scelta debba assomigliare il più possibile al segnale originale, si rimanda a test specifici per l'esposizione dell'algoritmo di decomposizione [2.9]. I 4 livelli di decomposizione forniscono 4 vettori di lunghezza pari al segnale originale che necessitano di essere ricostruiti [2.10] scartando i contributi rumorosi. L'operazione è eseguita utilizzando la funzione *wrcoef* offerta da Matlab R2011a, la quale richiede in ingresso i coefficienti calcolati precedentemente con la funzione *wavedec*, la wavelet madre utilizzata e il numero di livelli. La Figura 2.21 mostra i passaggi effettuati di decomposizione e ricostruzione del segnale di risposta proveniente dai PZT sul laminato SAATI EH550/T800S con l'onda diagnostica a 80kHz.

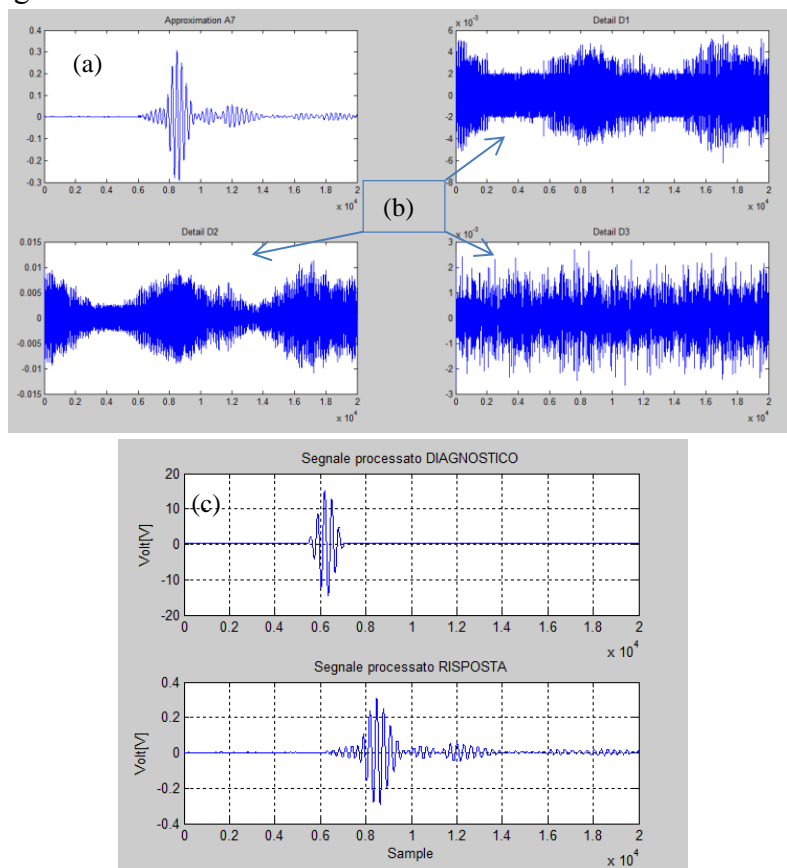


Figura 2.21: De-Noising del segnale ad una frequenza dell'onda diagnostica pari a 80 kHz acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0°: a) Coefficiente di interesse del segnale di risposta, risultato *wavedec*, b) Coefficienti D1, D2, D3 con contributo rumoroso c) Ricostruzione del segnale pulito

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

È importante osservare dai coefficienti D1, D2 e D3 ottenuti dalla funzione *wavedec*, l'assenza di struttura somigliante al segnale originale, questo fa sì che il solo contributo di interesse sia quello di primo livello, chiamato A7 nella Figura 2.21 e rende possibile scartare gli altri 3 coefficienti.

Pulito il segnale, utilizzando d'ora in avanti solo il coefficiente A7, si rende necessario normalizzare i dati al fine di un confronto immediato su una scala coerente, per compiere questa operazione, è necessario calcolare il valore medio del segnale e individuare il valore massimo, per poi applicare l'Equazione (2.4):

$$\bar{s} = \frac{s - \mu(s)}{\max(s)} \quad (2.4)$$

in cui \bar{s} è il segnale normalizzato mentre $\mu(s)$ e $\max(s)$ sono la media e il valore massimo del segnale s . Il risultato della normalizzazione è riportato in Figura 2.22

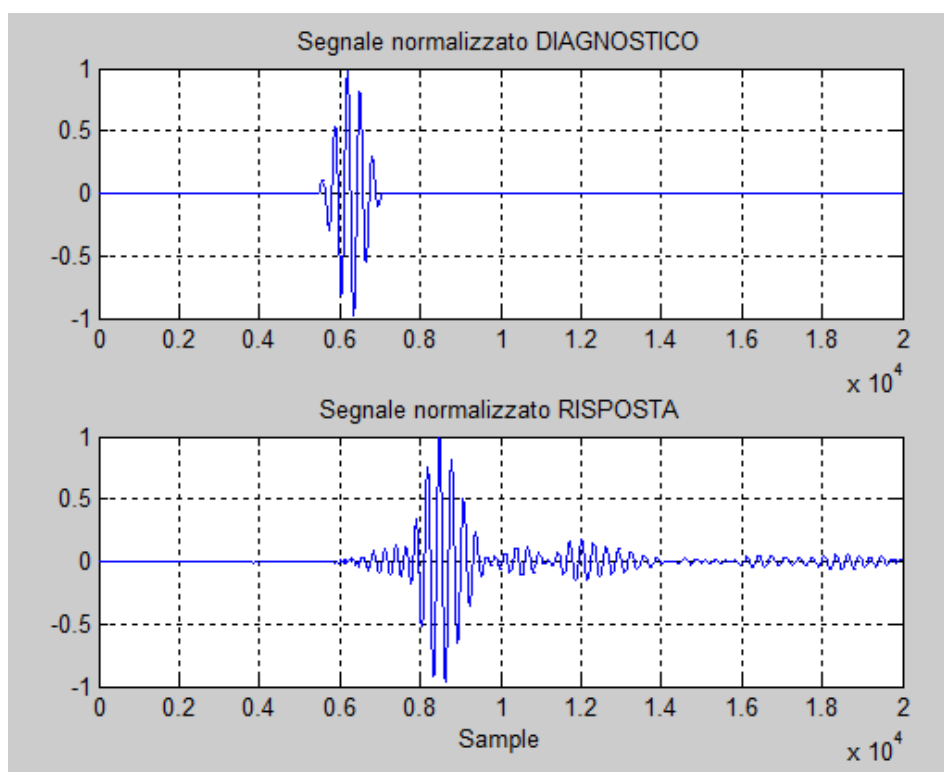


Figura 2.22: Segnali normalizzati, frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 80 kHz acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0°

Capitolo 2

Ultima operazione necessaria prima di effettuare il calcolo del tempo di volo e della velocità, è l'estrazione del contributo energetico centrato sulla frequenza puntuale di eccitazione. È noto che, anche se il segnale di attuazione ottenuto dal generatore di funzione è centrato sulla frequenza impostata, questa non è puntuale, ma l'output si attegga con un andamento a campana. Ciò introduce dei contributi in frequenza che potrebbero falsare l'informazione riportata, ecco che è utile effettuare analiticamente l'estrazione del solo contributo alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica impostata per ogni prova. Lo strumento che si è utilizzato per questo scopo, è ancora una volta la trasformata wavelet, in questo caso continua (CWT).

Il modo di operare è essenzialmente il medesimo della DWT. In questo caso però la funzione *cwt* di Matlab richiede in ingresso un vettore aggiuntivo detto *Scales*, il cui significato rappresenta i gradi secondo i quali la trasformata viene dilatata o compressa. Per ogni valore del vettore *Scales* viene calcolato a sua volta un vettore di coefficienti che rappresenta il contenuto energetico del segnale a tutte le frequenze di un range relativamente ampio scelto arbitrariamente, centrato sulla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica. È stato scelto di usare range di frequenze di analisi di ± 100 kHz rispetto alla frequenza centrale del segnale e corrispondente a quella della forma d'onda della wavelet madre Morlet, la più somigliante al segnale originale. Si rimanda a testi specifici per una migliore comprensione dell'algoritmo della trasformata continua [2.8] [2.9].

Per una migliore comprensione dei risultati è stata utilizzata la rappresentazione in scalogramma, la quale associa ad ogni valore numerico dei vettori dei coefficienti risultato della CWT, un colore. In Figura 2.23, si trova sia per il segnale diagnostico sia per il segnale di risposta il risultato della trasformazione. Lo scalogramma, è una matrice $m \times n$, in cui m rappresenta il numero di righe, ovvero tutti i coefficienti calcolati e n il numero di colonne che è pari alla lunghezza del segnale. Per estrarre il contributo alla sola frequenza centrale dell'onda diagnostica basta estrarre il coefficiente corrispondente al centro del range di frequenze del vettore *Scales*. La Figura 2.24 mostra il solo contributo alla frequenza centrale di eccitazione

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

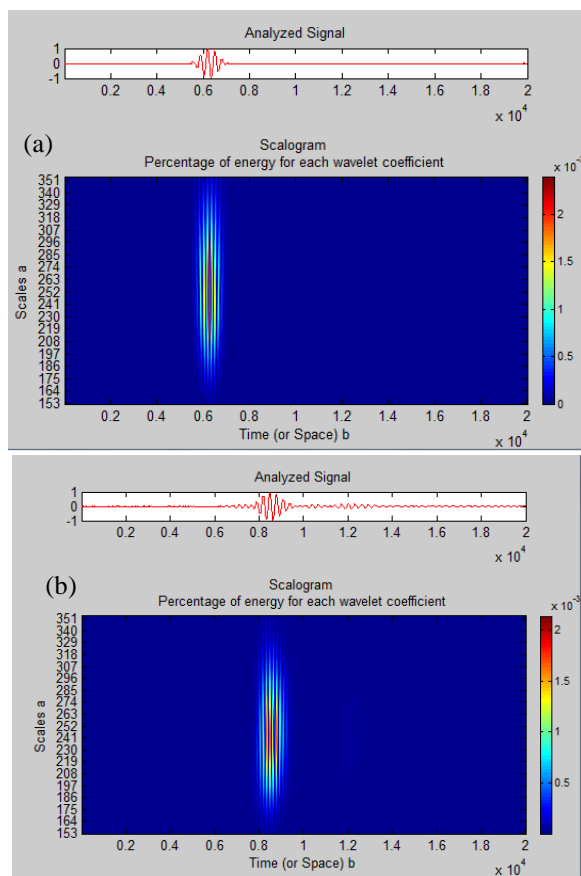


Figura 2.23: Risultato cwt: a) segnale diagnostico, b) segnale di risposta

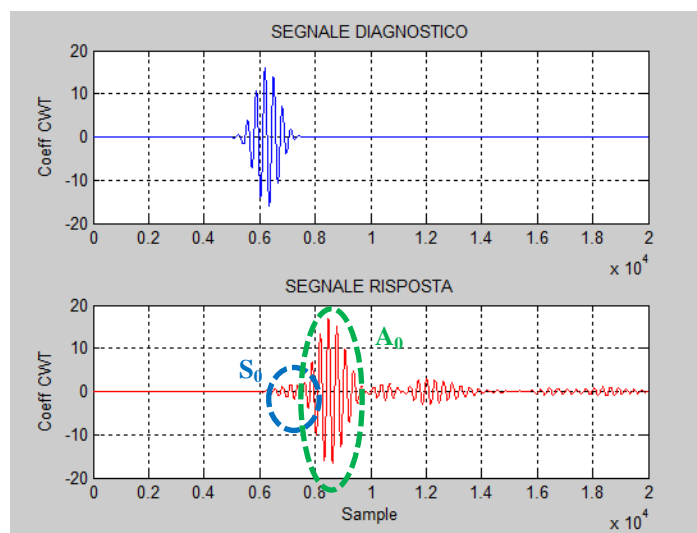


Figura 2.24: Risultato delle operazioni di pulitura, normalizzazione ed estrazione energetica alla frequenza di 80kHz per il laminato SAATI EH550/T800S acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0°

Osservando la Figura 2.24, si possono già notare i due modi di Lamb A_0 e S_0 , oltre alla risposta dei gli echi di fondo.

A questo punto, la teoria esposta in [2.11] rende necessario applicare ai segnali acquisiti l'approccio di Hilbert per l'evoluzione dell'involuppo. Il calcolo è volto a esaminare a fondo segnali provenienti dalle onde di Lamb nel dominio del tempo in termini di distribuzione di energia. L'Equazione (2.5) mostra la forma della trasformata:

$$H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2.5)$$

in cui $H(t)$ è la trasformata di Hilbert per un segnale $f(t)$. L'equazione (2.5) esegue uno sfasamento di 90° del segnale originale, al fine di costruire un segnale analitico $F(t)$ grazie alle seguenti equazioni (2.6) e (2.7):

$$F(t) = f(t) + iH(t) = c(t) * e^{i\varphi(t)} \quad (2.6)$$

in cui

$$c(t) = \sqrt{f^2(t) + H^2(t)} \quad (2.7a)$$

e

$$\varphi(t) = \frac{1}{2\pi} * \frac{d}{dt} \left(\arctan \left(\frac{H(t)}{f(t)} \right) \right) \quad (2.7b)$$

La parte reale è il segnale $f(t)$ e la parte immaginaria è la trasformata di Hilbert del segnale stesso. $c(t)$ è il modulo del segnale analitico $F(t)$ e $\Phi(t)$ è la frequenza istantanea del segnale $F(t)$. L'involuppo del modulo del segnale analitico $F(t)$, rappresenta la distribuzione di energia del segnale originale $f(t)$. La trasformata di Hilbert usata per l'involuppo dei segnali, è effettuata con l'apposito script Matlab R2011a apposito che richiede in ingresso solo i segnali originali. L'analisi del segnale delle onde di Lamb nel dominio del tempo tramite involuppo, è efficace solo nel caso in cui si è in un range di frequenze che determinano il formarsi dei soli modi puri A_0 , S_0 e SH_0 e la geometria analizzata è semplice. Nel caso del laminato SAATI EH550/T800S, si possono ritenere rispettate entrambe le ipotesi. La semplicità della forma è data dalla lastra piana quadrata e il range di frequenze provate si tiene al di sotto del limite fissato a 395 kHz dal SAFE, al di sopra del quale si avrebbero ulteriori modi

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

propagativi oltre a quello fondamentale. La Figura 2.25, riporta i segnali involuppati per l'onda diagnostica a 80 kHz.

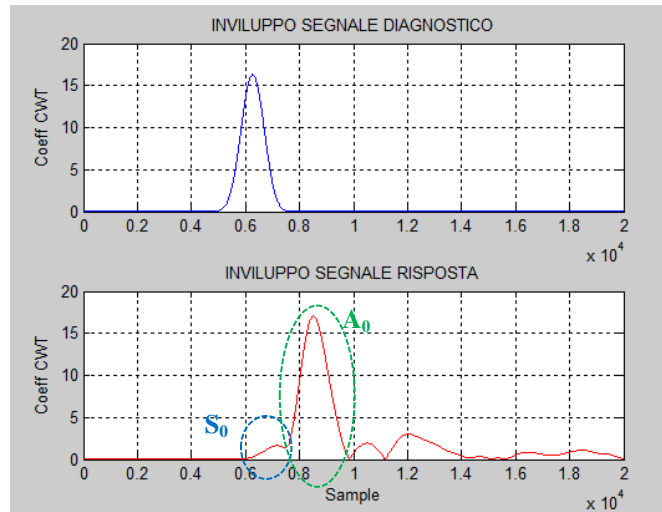


Figura 2.25: Involuppo di Hilbert dei segnali diagnostico e di risposta alla frequenza di eccitazione di 80kHz acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0°

Effettuato l'involuppo dei due segnali, è necessario calcolare il tempo di volo che intercorre tra il segnale di riferimento e il segnale ricevuto al punto di misura. Per fare ciò, basta sottrarre l'indice di posizione temporale del valore massimo del segnale diagnostico meno l'indice di quello di risposta, i punti ottenuti indicano la massima energia che transita dal sensore. È necessario infine, tramutare il tempo di volo calcolato in numero di punti acquisiti a tempo, tale operazione è eseguita conoscendo la frequenza di campionamento dell'oscilloscopio e applicando la seguente Equazione (2.8):

$$\Delta s = i_2 - i_1 \quad (2.8a)$$

$$\text{tof} = \Delta s * dt_samp \quad (2.8b)$$

in cui Δs è il numero di punti che intercorrono tra il massimo dell'involuppo del segnale diagnostico e il massimo dell'involuppo del segnale di risposta, ottenuti sottraendo rispettivamente i_2 e i_1 . Mentre dt_samp è il tempo che intercorre tra l'acquisizione di un punto e il successivo noto dall'oscilloscopio. Noto quindi il tempo di volo tof e nota la distanza tra i due sensori, si calcola la velocità propagativa del modo di Lamb, applicando l'Equazione (2.9):

$$V_{\text{modo}} = \frac{L}{\text{tof}} \quad (2.9)$$

In cui V_{modo} è la velocità propagativa del modo considerato.

Presentati tutti i passi necessari per arrivare al calcolo della velocità propagativa, si è proceduto con la sperimentazione ad ogni frequenza dell'onda diagnostica da 5 a 300 kHz, avendo cura di acquisire il segnale ad ogni punto di misura posizionato sulle differenti direzioni di propagazione (0° , 30° , 60° e 90°) rispetto al sistema di riferimento del laminato. Il Paragrafo 2.3, riporta i risultati delle curve di dispersione sperimentali ottenute per il modo A_0 sul laminato SAATI EH550/T800S.

2.2.4 Analisi del segnale acquisito per la misura della velocità di propagazione del modo S_0

La procedura seguita per il calcolo delle curve di dispersione per il modo simmetrico S_0 di Lamb, ha previsto i medesimi passaggi riportati nel Paragrafo 2.2.3 che non si ripetono per brevità. La differenza essenziale sta nel modo di eccitare l'onda diagnostica attuata in contro-fase in maniera da magnificare il modo S_0 . La Figura 2.26, espone gli involuপি ottenuti dall'acquisizione dell'onda diagnostica eccitata a 80kHz sulla direzione di propagazione di 0° rispetto al sistema di riferimento del laminato. Essi sono destinati alla misura del modo propagativo anti-simmetrico S_0 , di cui si nota una preponderante magnificazione, grazie all'attuazione in contro-fase.

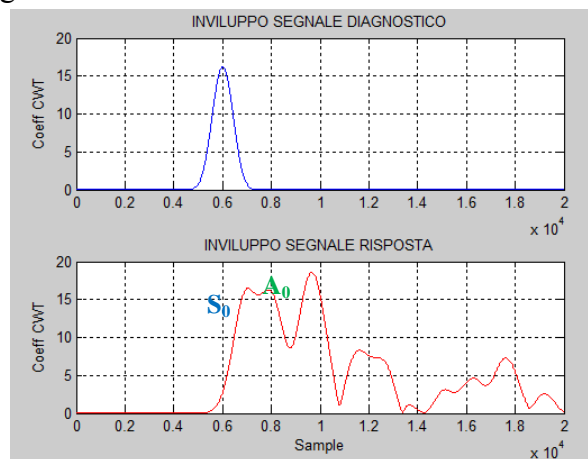


Figura 2.26: Inviluppo di Hilbert dei segnali diagnostico e di risposta alla frequenza di eccitazione di 80kHz acquisito dal sensore PZT nella direzione di propagazione di 0° in modalità FASE

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

Anche in questo caso, si sono acquisiti i segnali in tutto il campo di frequenze da 5 a 300kHz, dell'onda diagnostica, con le stesse modalità esposte nel Paragrafo 2.2.3. In questo caso si è iniziato a scorgere in maniera significativa il modo S_0 per frequenze vicine a 50kHz, ecco che si è preferito acquisire e riportare i risultati nel Paragrafo 2.3, a partire da quella frequenza minima.

2.3 Risultati sperimentali ottenuti per i modi propagativi di Lamb A_0 e S_0

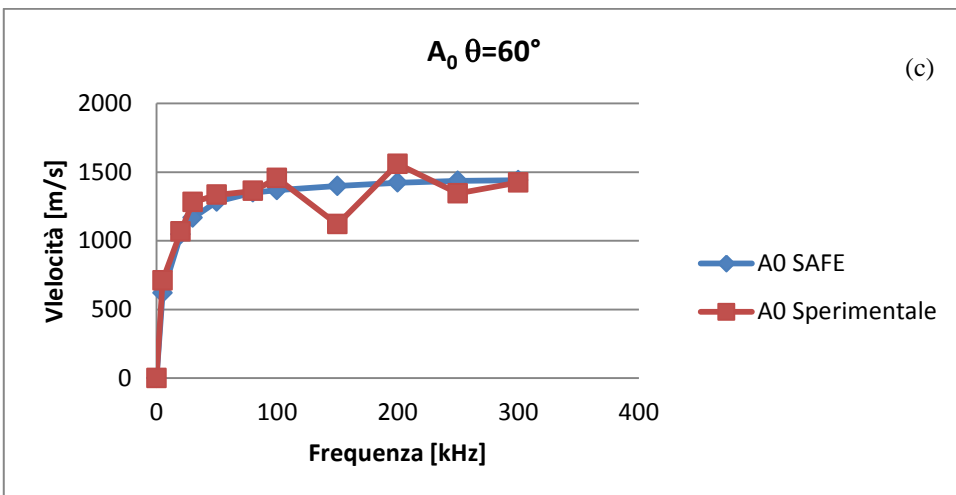
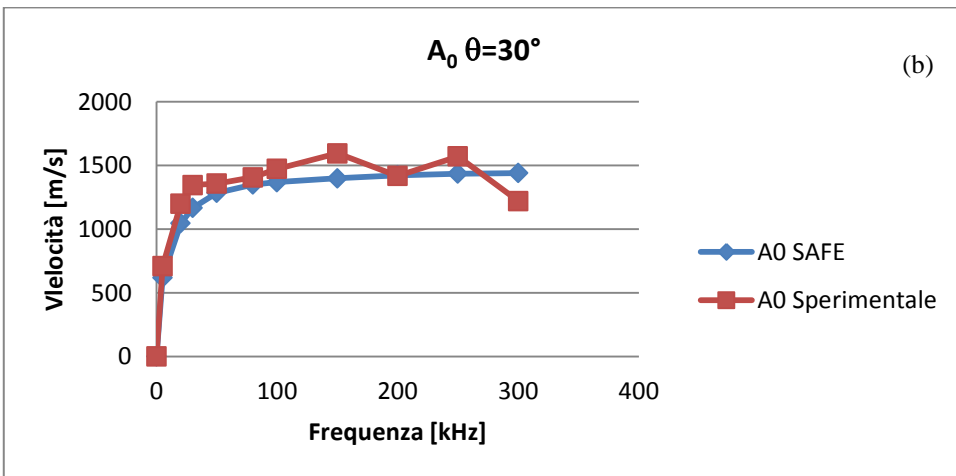
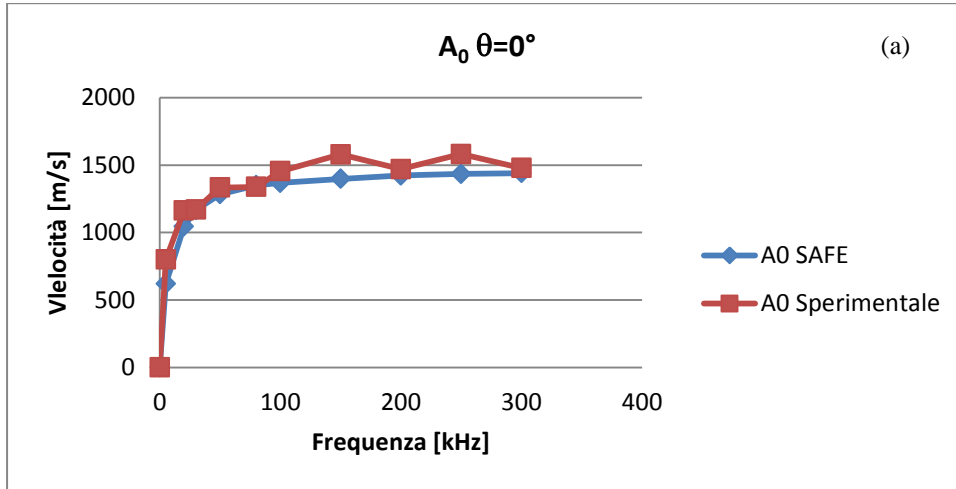
2.3.1 Curve di dispersione modo A_0

Dopo aver eseguito per tutte le frequenze di eccitazione il calcolo del tempo di volo e, nota la distanza dei sensori rispetto all'attuatore, il calcolo della velocità per ogni direzione di propagazione, si espongono qui di seguito nella Tabella 2.5 i risultati sperimentali ottenuti rispetto alle modellazione SAFE.

Sens f	Sens 1 $\theta=0^\circ$			Sens 2 $\theta=30^\circ$			Sens 3 $\theta=60^\circ$			Sens 4 $\theta=90^\circ$		
	A0 (SAFE) m/s	A0 (SPER) m/s	Err %	A0 (SAFE) m/s	A0 (SPER) m/s	Err %	A0 (SAFE) m/s	A0 (SPER) m/s	Err %	A0 (SAFE) m/s	A0 (SPER) m/s	Err %
5	763,00	800,19	-4,9	699,70	709,34	-1,4	619,00	711,28	-14,9	579,60	371,56	35,9
20	1273,00	1163,91	8,6	1176,00	1200,42	-2,1	1046,00	1066,92	-2,0	1028,00	975,34	5,1
30	1405,00	1170,98	16,7	1309,00	1345,30	-2,8	1166,00	1280,30	-9,8	1158,00	1114,68	3,7
50	1523,00	1333,65	12,4	1430,00	1357,00	5,1	1284,00	1333,65	-3,9	1302,00	1258,51	3,3
80	1562,00	1338,83	14,3	1475,00	1405,90	4,7	1350,00	1362,02	-0,9	1376,00	1502,64	-9,2
100	1563,00	1454,89	6,9	1482,00	1472,22	0,7	1368,00	1454,89	-6,4	1393,00	1322,50	5,1
150	1553,00	1579,04	-1,7	1488,00	1594,88	-7,2	1398,00	1119,56	19,9	1408,00	1433,55	-1,8
200	1549,00	1470,14	5,1	1495,00	1417,26	5,2	1423,00	1558,99	-9,6	1415,00	1080,76	23,6
250	1548,00	1581,25	-2,1	1499,00	1570,77	-4,8	1435,00	1343,96	6,3	1420,00	1410,85	0,6
300	1540,00	1478,64	4,0	1505,00	1220,35	18,9	1440,00	1423,74	1,1	1431,00	1662,92	-16,2

Tabella 2.5: Risultati a confronto SAFE e sperimentali modo di propagazione A_0 nel laminato SAATI EH550/T800S

Si riportano in Figura 2.27 le curve di dispersione dei due approcci SAFE e sperimentale per ogni direzione di propagazione al fine di un più immediato confronto.



Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

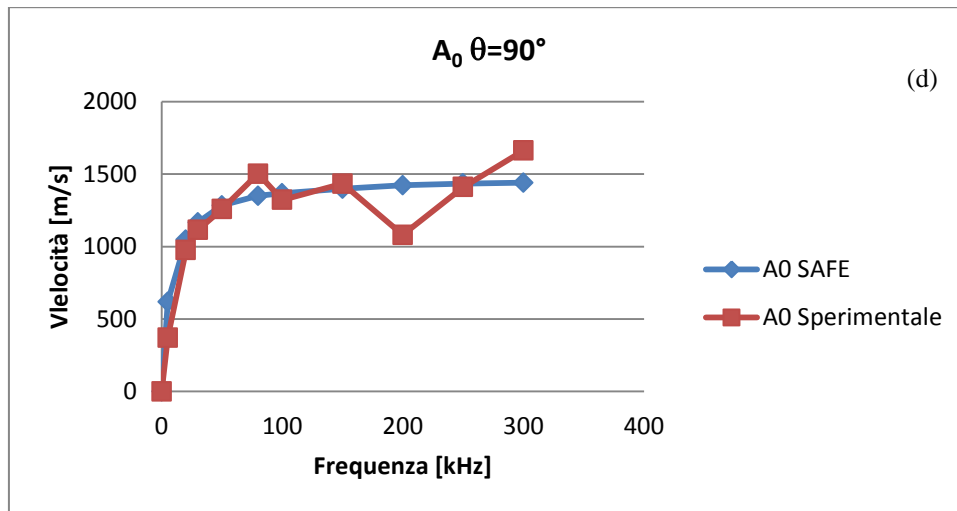


Figura 2.27: Curve di dispersione laminato SAATI EH550/T800S per il modo A_0 di Lamb SAFE e sperimentale per differenti direzioni di propagazione: a) $\theta=0^\circ$, b) $\theta=30^\circ$, c) $\theta=60^\circ$, d) $\theta=90^\circ$

Si riportano in fine le curve di dispersione rispetto alle quattro direzioni di propagazione nella Figura 2.28.

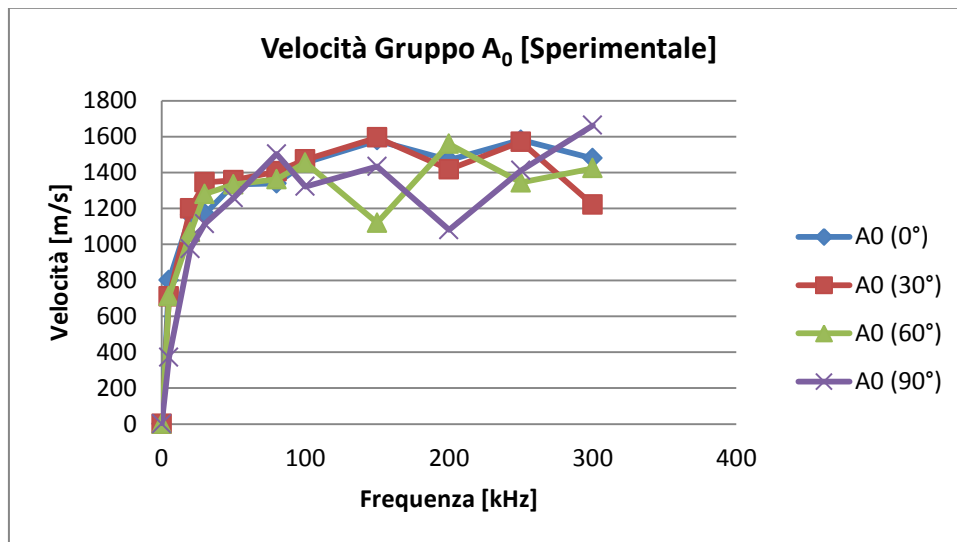


Figura 2.28: Curve di dispersione sperimentali del laminato SAATI EH550/T800S per il modo A_0 di Lamb per differenti direzioni di propagazione

Si evince dalla consultazione dei risultati ottenuti nella misura del modo A_0 avvenuta sperimentalmente, che l'errore rispetto a ciò che fornisce il modello SAFE risulta minimo. Ci sono solo due casi, sulle quaranta prove effettuate in cui si ha un valore di poco superiore al 20% di scostamento rispetto alla

modellazione. Inoltre si evidenzia anche durante la sperimentazione, man mano ci si allontana dalla direzione di massima resistenza, quella longitudinale, la velocità di propagazione diminuisce fino a raggiungere il minimo sulla direzione trasversale di minimo sforzo.

Dato che in tutti i due gli approcci: SAFE e Sperimentale, si sono ottenuti i medesimi andamenti con i medesimi valori, si può dire pienamente validata la dispersione del modo A_0 di Lamb nel laminato SAATI EH550/T800S.

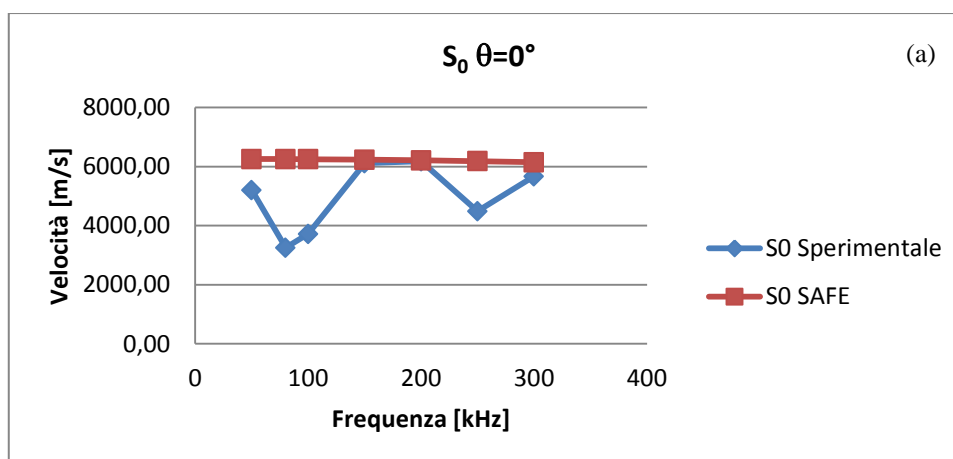
2.3.2 Curve di dispersione modo S_0

Analogamente a quanto esposto nel Paragrafo 2.3.1, si riporta la Tabella riassuntiva 2.6 che colleziona per il modo propagativo S_0 i risultati SAFE in relazione allo sperimentale.

Sens. f	Sens 1 $\theta=0^\circ$			Sens 2 $\theta=30^\circ$			Sens 3 $\theta=60^\circ$			Sens 4 $\theta=90^\circ$		
	S0 (SAFE) m/s	S0 (SPER) m/s	Err %	S0 (SAFE) m/s	S0 (SPER) m/s	Err %	S0 (SAFE) m/s	S0 (SPER) m/s	Err %	S0 (SAFE) m/s	S0 (SPER) m/s	Err %
50	7700,00	5201,83	32,4	6937,00	3629,19	47,7	6254,00	6785,00	-8,5	5942,00	3184,80	46,4
80	7274,00	3251,15	55,3	6930,00	3392,50	51,0	6250,00	5034,03	19,5	5937,00	3149,48	47,0
100	7265,00	3715,60	48,9	6925,00	3806,22	45,0	6246,00	4217,70	32,5	5934,00	2477,06	58,3
150	7256,00	6113,69	15,7	6919,00	3921,99	43,3	6230,00	3873,27	37,8	5921,00	2998,06	49,4
200	7235,00	6174,22	14,7	6900,00	5774,04	16,3	6208,00	5422,58	12,7	5899,00	4049,33	31,4
250	7203,00	4486,31	37,7	6880,00	4486,31	34,8	6183,00	4619,23	25,3	5873,00	4653,70	20,8
300	7168,00	5669,06	20,9	6851,00	5329,88	22,2	6145,00	4551,80	25,9	5839,00	4075,79	30,2

Tabella 2.6: Risultati a confronto SAFE e sperimentali per il modo di propagazione S_0 nel laminato SAATI EH550/T800S

Qui di seguito, nella Figura 2.29, si riportano i grafici esplicativi del modo S_0 per differenti direzioni di propagazione.



Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

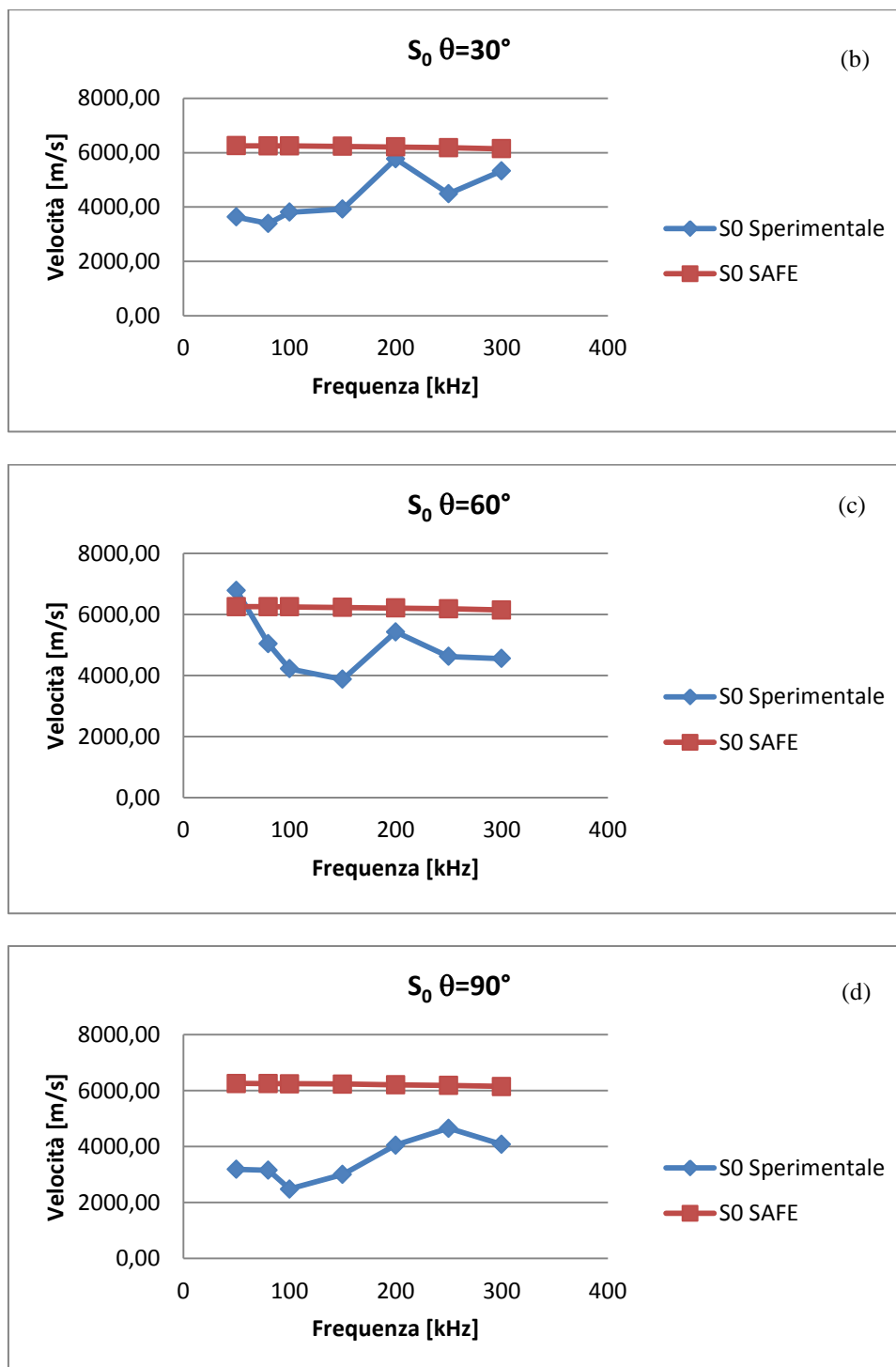


Figura 2.29: Curve di dispersione laminato SAATI EH550/T800S per il modo S_0 di Lamb SAFE e sperimentale per differenti direzioni di propagazione: a) $\theta=0^\circ$, b) $\theta=30^\circ$, c) $\theta=60^\circ$, d) $\theta=90^\circ$

Come di consueto si riporta anche il grafico complessivo per le differenti direzioni di propagazione di 0° , 30° , 60° e 90° , qui in Figura 2.30.

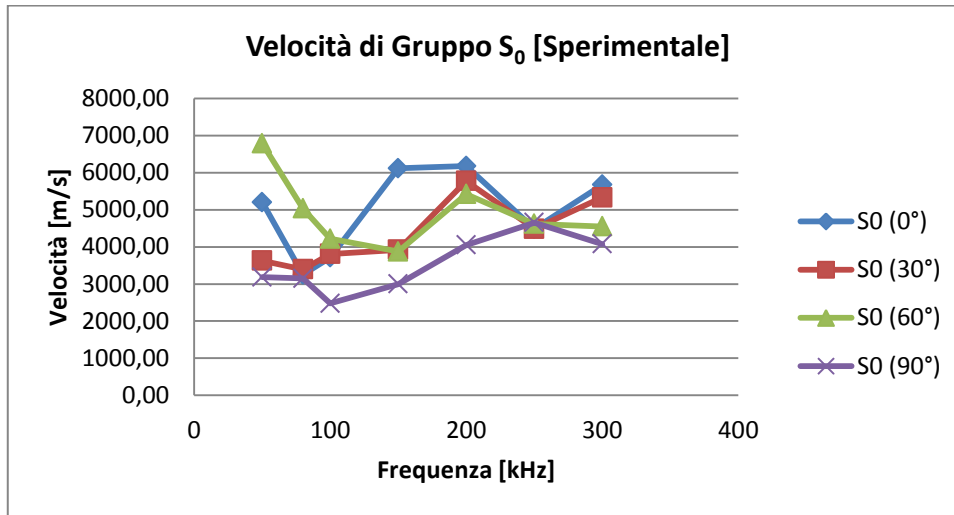


Figura 2.30: Curve di dispersione sperimentali del laminato SAATI EH550/T800S per il modo S_0 di Lamb per differenti direzioni di propagazione

Analizzando i grafici delle curve di dispersione ottenute per il modo S_0 , si può dire che i valori di velocità vedono anche in questo caso, una diminuzione di velocità dalla direzione di 0° longitudinale di massima resistenza, fino alla direzione trasversale di 90° di minima resistenza in cui le velocità risultano minori, si faccia riferimento a questo proposito alla Figura 2.30. Tuttavia, analizzando l'errore che identifica lo scostamento tra il SAFE e lo sperimentale, si nota che i valori sono molto più dispersi. Solo per alte frequenze dell'onda diagnostica da 200 a 300 kHz, si possono osservare errori minori, comunque intorno al 35%. Questo fatto è giustificato ipotizzando che alle basse frequenze si sia considerato SH_0 , invece che S_0 , cadendo esso tra i modi A_0 e S_0 . Sarà obiettivo degli sviluppi futuri andare ad appurare la veridicità di questa ipotesi o meno.

Alla luce dei risultati ottenuti per il modo propagativo S_0 dal laminato SAATI EH550/T800S, si può concludere dicendo che la sperimentazione ha validato parzialmente ciò che è stato ottenuto dal modello SAFE. Questo è relativo per la sperimentazione che si effettuerà da qui in avanti in questa tesi, dato che lo studio dell'interazione dell'onda diagnostica di Lamb all'interno del laminato variamente difettato, avverrà con il solo modo fondamentale A_0 .

2.4 Dimostrazione sperimentale della trascurabilità del modo S_0 di Lamb per frequenze di eccitazione minori di 50 kHz

Ulteriore passo affrontato nella comprensione del fenomeno propagativo dei modi di Lamb all'interno del laminato SAATI EH550/T800S, è stato quello di effettuare prove dedicate alla dimostrazione della presenza trascurabile del modo S_0 per frequenze di eccitazione dell'onda diagnostica al di sotto della frequenza limite di 50 kHz. Nel lavoro di tesi precedente a questo [2.1] era stato ipotizzato che per frequenze di eccitazione dell'onda diagnostica inferiori a 50 kHz, il modo simmetrico S_0 non fosse presente, oppure si iniziasse a manifestare debolmente per frequenze di eccitazione vicine al limite dei 50 kHz, per poi magnificarsi per frequenze superiori fino a 300 kHz. Si ricorda che il campo di frequenze analizzato entro il quale è garantita l'esistenza dei soli modi puri è al di sotto di 395 kHz.

Per dimostrare consistentemente la veridicità dell'ipotesi o al contrario la falsità di quest'ultima, si è pensato di agire andando a calcolare il rapporto in decibel delle ampiezze secondo l'Equazione (2.10):

$$H_{db} = 20 \log_{10} \left(\frac{a(A_0)}{a(S_0)} \right) \quad (2.10)$$

Dove $a(A_0)$ e $a(S_0)$ sono le ampiezze del picco corrispondente rispettivamente al modo A_0 e al modo S_0 di Lamb presi dall'involuppo di Hilbert. Si ricorda che, ottenuto il rapporto in decibel delle due ampiezze, questo riporta, secondo scala logaritmica, quante volte il numeratore dell'Equazione (2.16) è più grande del denominatore. È utile consultare la Tabella 2.7 che riporta il fattore di conversione approssimato tra valore in db e valore assoluto del rapporto tra parentesi.

H_{db}	$a(A_0)/a(S_0)$
1	1,25
2	1,6
4	2,5
6	4
8	6,3
10	10
20	100
30	1000
40	10000
50	100000

Tabella 2.7: Fattore di conversione tra scala decibel e valore assoluto del rapporto $a(A_0)/a(S_0)$

Capitolo 2

È stata effettuata l'acquisizione del segnale attuando prima in fase e poi in controfase l'onda diagnostica coseno finestrato Hanning a 5,5 picchi. In queste prove si è dovuto conservare la reale scala in volt, uscente dall'oscilloscopio, di conseguenza non è stato possibile applicare né la normalizzazione, né l'estrazione mediante CWT del massimo contributo energetico, anche perché in questo caso non ha significato rilevante considerare un solo contributo in frequenza. L'unica operazione eseguita è stata la pulitura mediante DWT e l'involuppo esposti nel Paragrafo 2.2.3. La Figura 2.31, riporta le acquisizioni effettuate prima in fase e poi in contro-fase dal sensore posto a 0° rispetto alla direzione longitudinale con una frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 30 kHz.

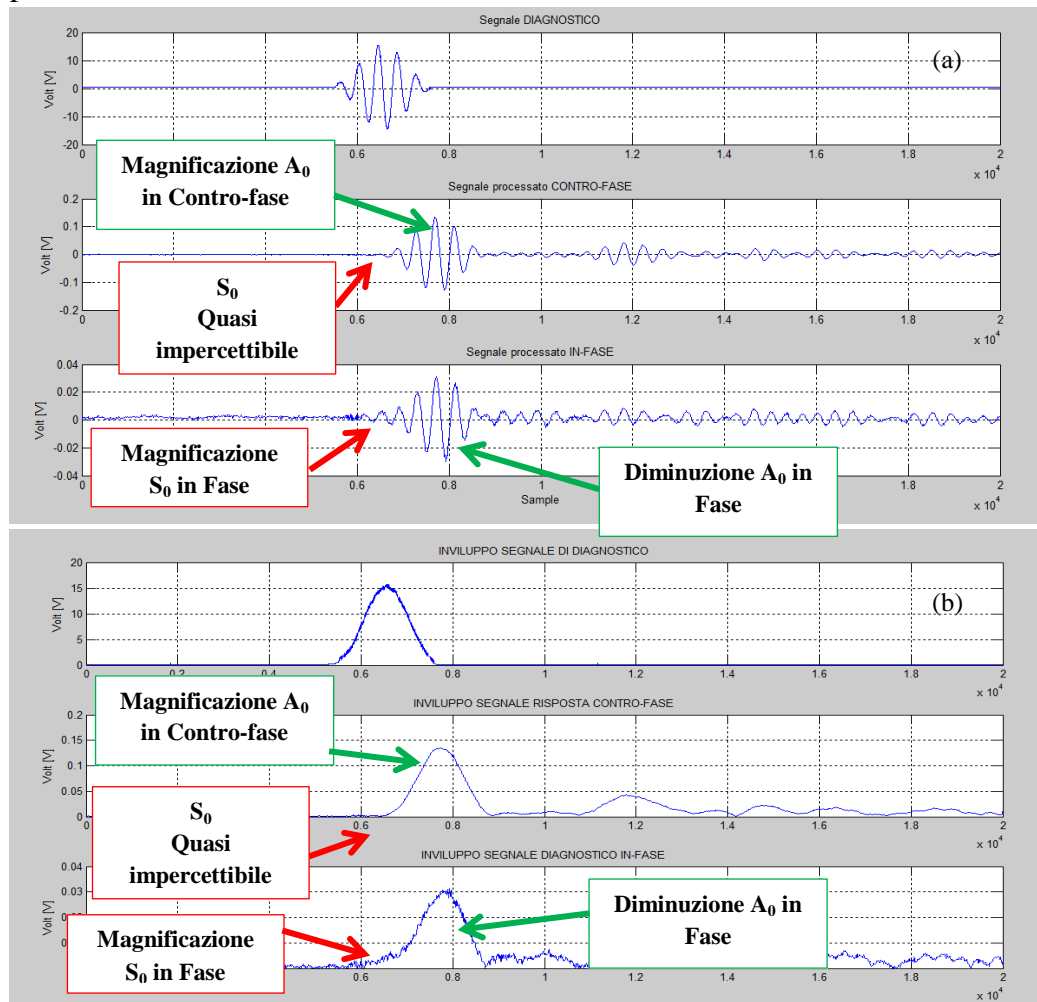


Figura 2.31: Acquisizione da attuazione in fase e controfase dei segnali ricevuti dal sensore posizionato sulla direzione di propagazione parallela alla longitudinale (0°) alla frequenza di 30 kHz dal laminato SAATI EH550/T800S: a) radiofrequenza, b) involuppi

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

Effettuando il calcolo espresso dall'Equazione (2.10) per tutte le frequenze di eccitazione comprese tra 5 e 300 kHz dell'onda diagnostica è emerso quanto segue dai grafici riportati in Figura 2.32.

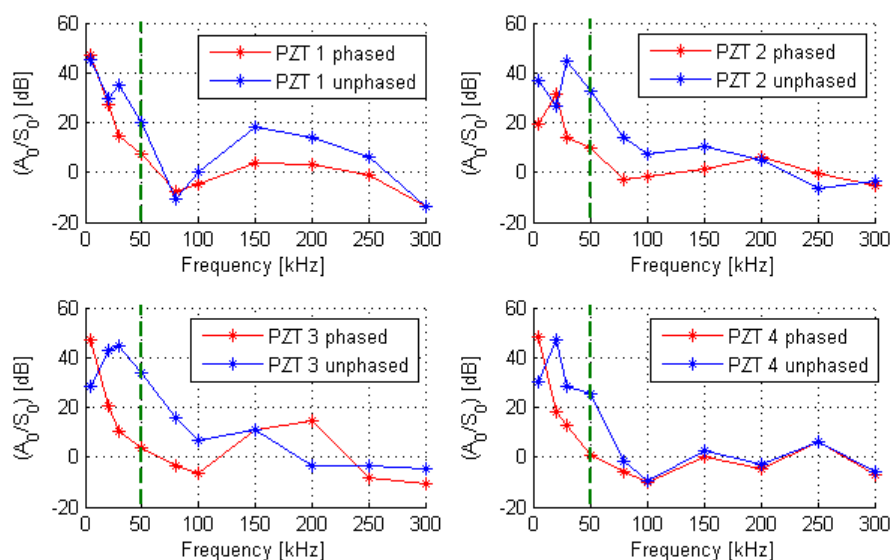


Figura 2.32: Rapporto A_0/S_0 fase, contro-fase in decibel dal laminato SAATI EH550/T800S in funzione della frequenza di eccitazione

In cui PZT1, PZT2, PZT3 e PZT4 corrispondono rispettivamente alle direzioni di propagazione di 0° , 30° , 60° e 90° .

Quello che si nota è effettivamente l'importanza del modo A_0 rispetto a S_0 tanto da renderlo trascurabile fino alla frequenza di poco superiore ai 50 kHz. Infatti se si considera ad esempio il PZT4, in eccitazione in fase che promuove la magnificazione di S_0 , si ottiene per 30 kHz che il rapporto H_{db} è pari a 13 dB. Ciò vuol dire che l'ampiezza di A_0 è circa 30 volte maggiore di quella di S_0 , se poi si scende con la frequenza di eccitazione, il fenomeno aumenta. Sempre a titolo di esempio per il PZT 3 ad una frequenza di eccitazione di 5 kHz in fase, otteniamo il rapporto H_{db} pari a circa 47dB ciò vuol dire che l'ampiezza di A_0 è circa 70000 volte maggiore rispetto ad S_0 . E così per tutti i PZT alle varie inclinazioni. Se però la frequenza di eccitazione eccede i 90 kHz, il rapporto H_{db} diviene negativo, ciò vuol dire che l'ampiezza di S_0 diviene confrontabile o addirittura maggiore di A_0 .

Se ne conclude che l'ipotesi fatta per cui il modo propagativo S_0 di Lamb risulta trascurabile per frequenze di eccitazione minori di 50 kHz o poco superiori, è verificata. Questa dimostrazione assume importanza fondamentale nei prossimi capitoli, in cui le acquisizioni per determinare l'interazione dell'onda diagnostica con difetti delaminativi in approccio Pulse Echo e Pitch Catch, vedranno l'utilizzo del solo modo anti-simmetrico A_0 per frequenze intorno ai 50 kHz.

2.5 Approccio FEM e simulazione delle curve di dispersione del modo A_0 di Lamb

Lo studio del fenomeno con gli elementi finiti ha previsto l'utilizzo del software Abacus 6.11 [2.12], che richiede lo sviluppo dei singoli moduli per completare il modello. Per comprendere il metodo di analisi, è necessario spiegare le scelte fatte per la dimensione geometrica del modello e la discretizzazione dei singoli elementi finiti.

Per definire il tipo di modello geometrico da implementare, nel caso del laminato SAATI EH550/T800S in configurazione aeronautica con spessore di 2,125 mm, è opportuno creare un modello piano bidimensionale a lamina. Ciò consente un primo risparmio computazionale, senza perdita di informazioni utili nella soluzione. Il laminato 400 x 800 mm, ha dimensioni eccessive per la simulazione. Per ridurre il costo computazionale, si è preferito rimpicciolire le dimensioni fino ad un valore di compromesso che permettesse di escludere gli effetti di bordo, lasciando comunque la possibilità di calcolare la propagazione, si è perciò deciso di disegnare una lamina quadrata di dimensioni 300 x 300 mm. Per la discretizzazione con gli elementi finiti, si è assunta una dimensione caratteristica di ogni elemento, applicando la relazione empirica proposta in [2.13], la quale esprime:

$$\text{- Per la dimensione dell'elemento: } L_{el} = \frac{\lambda_{min}}{20} \quad (2.11)$$

in cui troviamo L_{el} la lunghezza caratteristica del singolo elemento, mentre λ_{min} è la lunghezza d'onda dell'onda diagnostica di cui si vuole simulare la propagazione. Si esporrà nella sezione mesh ciò che è stato assunto essere come lunghezza degli elementi finiti.

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

2.5.1 Modulo Part

Il software Abaqus presenta singoli moduli. Il primo di essi, modulo Part, permette di scegliere le opzioni alla base del modello che si sta creando. Si è scelto di creare un modello piano bidimensionale di tipo shell. La Figura 2.33 descrive le modalità di scelta per la creazione della parte.

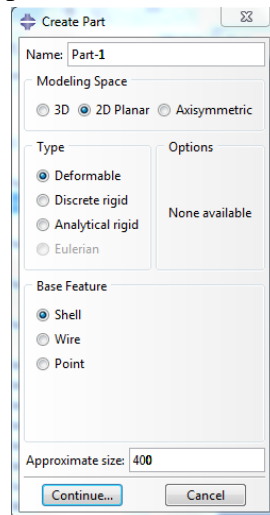


Figura 2.33: Creazione della parte geometrica del laminato 300 x 300 mm, le cui caratteristiche sono: 2D Planar, Deformable e come Base Feature: Shell, la dimensione approssimata dello sketch è stata assunta essere 400 mm

Proseguendo nella creazione della parte si è disegnato il quadrato di lato 300 mm. La Figura 2.34, ne riporta il risultato.

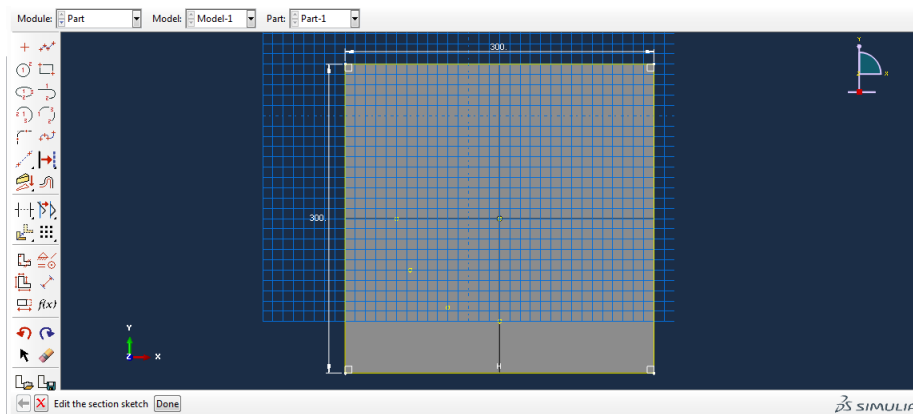


Figura 2.34: Completamento dello sketch Part-1

Nella Figura 2.34, si notano delle partizioni e dei Datum-Point, che verranno giustificate in seguito nel modulo Load, nel modulo Step e nel modulo Mesh.

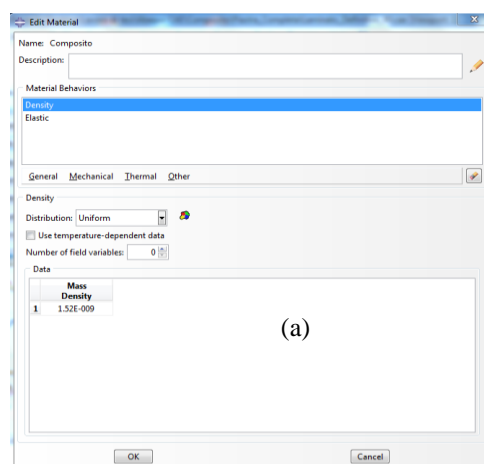
2.5.2 Modulo Property

Creata la parte, è necessario assegnare le proprietà fisiche del laminato interessato dalla propagazione dell'onda di Lamb, di cui si sta simulando il comportamento. Il composito SAATI EH550/T800S, presenta la configurazione a 17 ply aeronautica [0/45/0/-45/90/-45/0/45/90]_s. Nella compilazione della moschera modulo, è necessario inserire le proprietà elastiche e di densità al fine di creare il materiale complessivo che compone il laminato. La Tabella 2.8 riporta i dati elastici e fisici del materiale utilizzati nella simulazione, si consulti il Capitolo 1 per ulteriori informazioni.

Proprietà elastiche	Valore
E_{11}	159420 [MPa]
$E_{22} = E_{33}$	7950 [MPa]
$G_{12} = G_{13}$	4700 [MPa]
G_{23}	2707 [MPa]
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,323
ν_{21}	0,0181
ν_{23}	0,468
ρ	1520 [kg/m ³] = 1,520E-009 [Ton/mm ³]

Tabella 2.8: Proprietà elastiche e fisiche del laminato EH550/T800S

La Figura 2.35 riporta la schermata di Abacus CAE che permette l'inserimento delle proprietà sopracitate.



Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

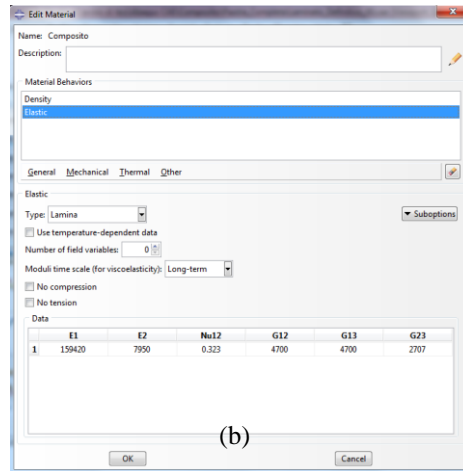


Figura 2.35: Inserimento delle proprietà fisiche ed elastiche del laminato SAATI EH550/T800S: a) Densità del composito, b) proprietà elastiche

Il procedimento previsto con l'applicativo Abaqus, prevede la modellazione del laminato in ogni sua singola ply. È presente la funzione Composite Layup che permette di inserire il numero di ply che compongono la lamina e il materiale di ognuno di essi, il loro spessore e l'orientazione all'interno della lamina. Definito il tipo di materiale, ed assegnata la parte a cui andrà a definirsi il laminato, è sufficiente inserire il singolo spessore e orientazione di ogni ply per ottenere il materiale definitivo oggetto della simulazione. Ricordando la configurazione aeronautica:

$$[0/45/0/-45/90/-45/0/45/90]_s$$

la Figura 2.36 mostra il risultato.

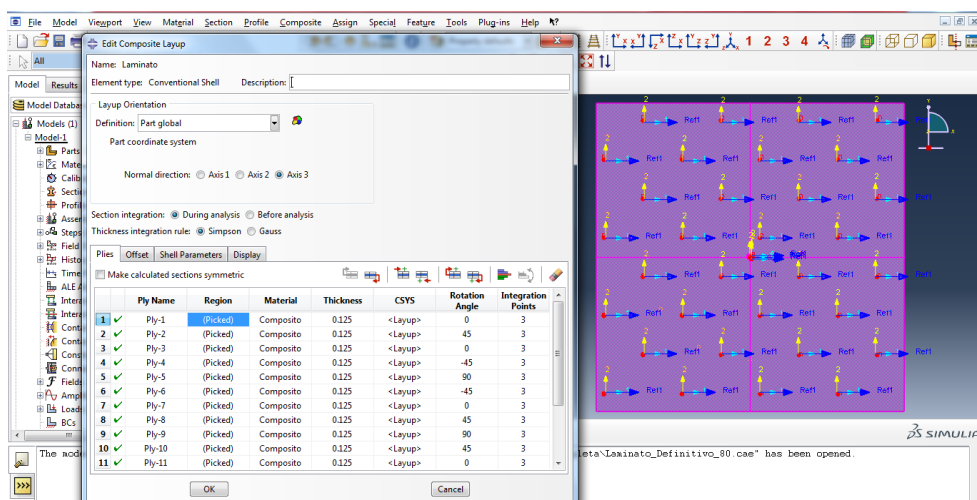


Figura 2.36: Inserimento ply, tramite l'applicazione di Abaqus CAE, Composite Layup

2.5.3 Modulo Step

Dopo aver inserito il modello creato nel modulo Assembly, tramite il tasto *instance part*, è possibile definire nel modulo Step il tipo di simulazione, la sua durata e che risultati ottenere. È necessario scegliere il tipo di analisi per poter definire le regole del calcolo di simulazione. Nel caso analizzato si dovrà effettuare un'analisi di tipo dinamico con una durata sufficiente a far giungere l'onda diagnostica nel punto di misura, al fine di consentirne il calcolo del tempo di volo e della velocità di propagazione. Come è noto in Abaqus [2.12], è possibile scegliere tra analisi di tipo esplicito o implicito. Dato che il problema studiato è di tipo lineare, la cui forzante produce una risposta deformativa stabile, sarebbe inadatto scegliere un'analisi implicita. Questa tipologia è dedicata alla risoluzione propria di problemi non lineari governati da altrettante equazioni. Oppure, l'analisi implicita, viene utilizzata per il calcolo dei modi di vibrare del sistema meccanico, cosa che in questo studio non è di interesse. Infine l'analisi implicita richiede un costo computazionale molto più elevato risolvendo le equazioni che governano il problema, con all'interno due incognite: una a destra e una a sinistra dell'uguale. Il calcolo ottiene i risultati al passo temporale $t + \Delta t$, basandosi sui risultati al tempo t partendo da un valore tentativo iniziale e calcolando di volta in volta l'errore [2.14]. La scelta effettuata è stata di attuare un'analisi di tipo esplicito, propria dell'analisi stabile lineare [2.15].

L'analisi *Dynamic Explicit* che Abaqus mette a disposizione nelle opzioni di scelta, permette di inserire i parametri descritti. A titolo di esempio, si è optato per una durata dello step pari a 0,0002 s, per la simulazione con onda diagnostica a frequenza di eccitazione di 80 kHz, e così per gli altri. Il tempo di durata dello step è essenzialmente stato stimato per permettere il completamento dell'attuazione dell'onda, il transito dell'onda fino al punto di misura, il proseguimento fino al contorno e la riflessione. Chiaramente questo lasso di tempo è funzione della frequenza dell'onda diagnostica.

Per definire i punti di misura si utilizza la funzione *Datum-Point* rispetto ai quali Abaqus fornirà i risultati in configurazione *History Output*. Questi punti rappresentano i sensori riceventi montati sulla piastra reale, si faccia riferimento alla Figura 2.12. La posizione dei punti a 100 mm dal punto centrale, è stata scelta per evitare l'influenza degli effetti di bordo, tradotti negli echi di fondo, nell'individuazione dell'onda di prima trasmissione. La Figura 2.37 evidenzia la

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

disposizione radiale, con differenti angoli di propagazione, in particolare 0° , 30° , 60° e 90° , Il tutto per poter osservare l'effetto dell'anisotropia del materiale, in relazione alla propagazione dell'onda. Infine, è fondamentale associare ogni Datum-Point creato al nodo della mesh solo dopo averla creata. La funzione set, presente nel menu tools di Abaqus, permette l'assegnazione.

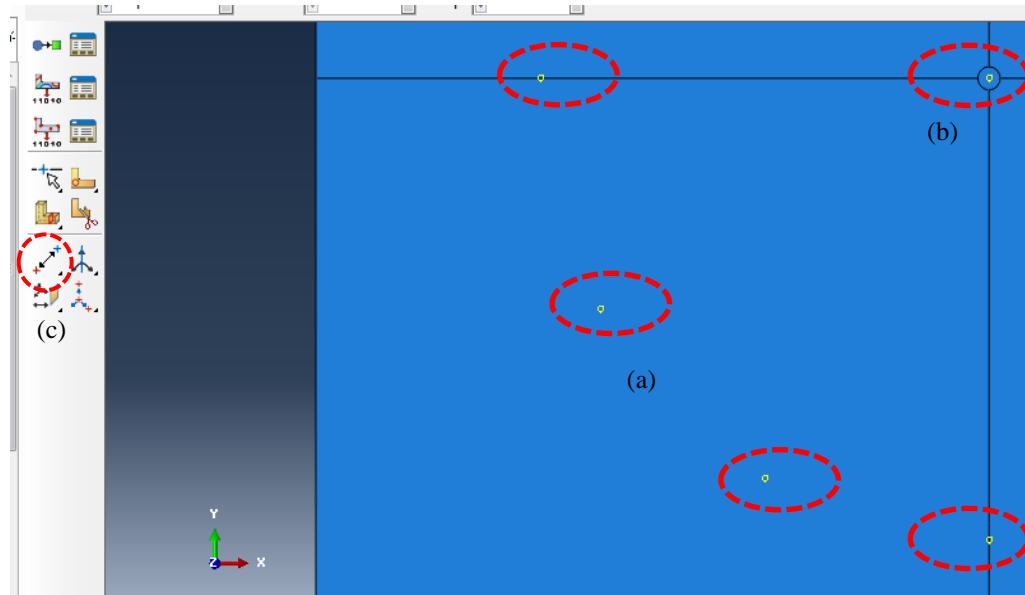


Figura 2.37: Creazione dei punti di misura dal modulo Step al modulo Part: a) Datum-Point di misura con angoli pari a 0° , 30° , 60° e 90° , b) Datum-Point di riferimento: "Start onda diagnostica", c) tasto per la creazione dei singoli Datum-Point

Per proseguire nella procedura, è necessario definire le grandezze che si vogliono ottenere come risultato dell'analisi. Si stanno analizzando gli spostamenti nel tempo indotti dall'onda diagnostica nelle direzioni x , y , z . Per come sono orientati gli assi rispetto alla parte, le direzioni x e y saranno responsabili dei movimenti nel piano, mentre l'asse z , sarà responsabile dei movimenti fuori piano. Di conseguenza x e y concorreranno per la misura del modo propagativo simmetrico S_0 , che non prenderemo in considerazione in questa tesi, mentre z sarà quello destinato al modo anti-simmetrico A_0 . Fatta questa precisazione, per definire i risultati nella History-Output di Abaqus, considerando i punti di misura creati e la nomenclatura interna, per ogni Datum-Point si estrarranno gli spostamenti $U1$, $U2$ e $U3$. La Figura 2.38, evidenzia la selezione effettuata per ottenere i risultati nella History-Output.

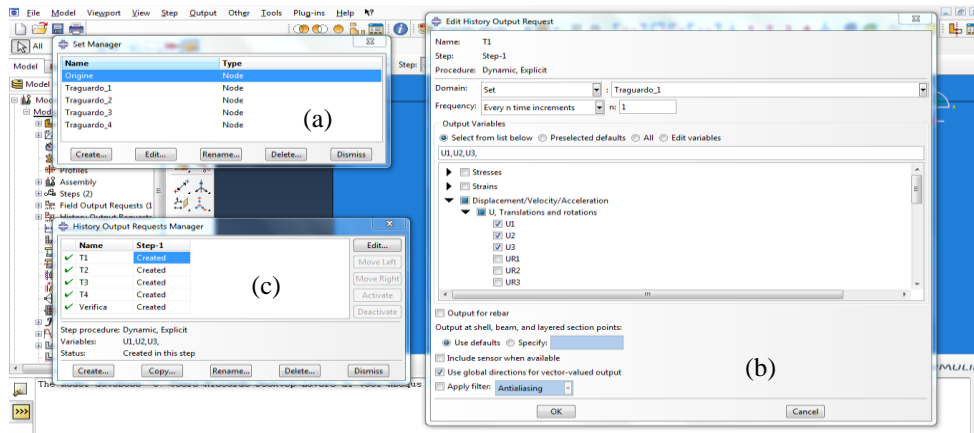


Figura 2.38: Creazione della History-Output: a) Associazione dei Datum-Point ai nodi della Mesh, b) estrazione degli spostamenti U1,U2 e U3 per ogni nodo, c) History-Output creata

2.5.4 Modulo Load

Si ignora il modulo Interaction, perchè il modello che si sta creando non è composto da più parti interconnesse. Passando al successivo modulo Load, è possibile applicare la forzante esterna che determinerà il comportamento del materiale durante la simulazione. Prima di assegnare al laminato la forzante, bisogna effettuare due passi preliminari:

- Creare la forzante con le stesse caratteristiche dell'onda diagnostica utilizzata
- Partizionare la parte con le stesse dimensioni geometriche dell'attuatore PZT

Il primo punto prevede di creare una forzante come pressione agente su una sezione pari a quella del PZT, il cui andamento è identificato nell'onda diagnostica, ovvero il coseno finestrato Hanning a 5,5 picchi già visto nel Paragrafo 2.2.2. L'Equazione (2.1) esprime la forma utilizzata per creare l'onda diagnostica, è necessario però tramutare la modulazione ottenuta in pressione moltiplicando per un valore unitario in [MPa]. Noti così i singoli valori puntuali dell'onda diagnostica, si costruisce la forzante in Abaqus CAE con la funzione amplitude dal menu tools (Figura 2.39), la quale crea l'andamento della forma d'onda inserendo in tabella la variabile p_i creata e il tempo t_i .

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

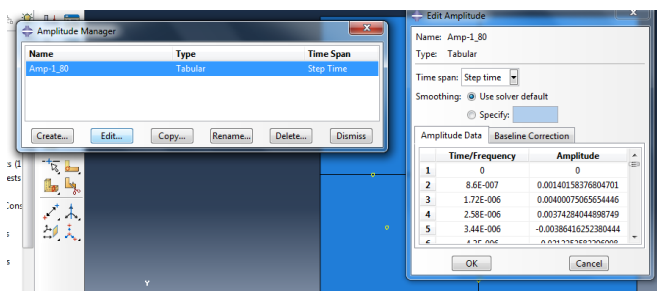


Figura 2.39: Creazione dell'andamento della forzante in forma tabulare

Nota la modulazione d'ampiezza, la si trasforma in carico applicato utilizzando il tasto create load, il quale necessita della superficie su cui andrà ad agire la pressione stessa. Note le dimensioni dei sensori PZT, aventi diametro di 5 mm, si seziona il centro della piastra con una circonferenza di pari diametro e si assegna la forzante come pressione su quell'area appena creata. La Figura 2.40, mostra questo passaggio.

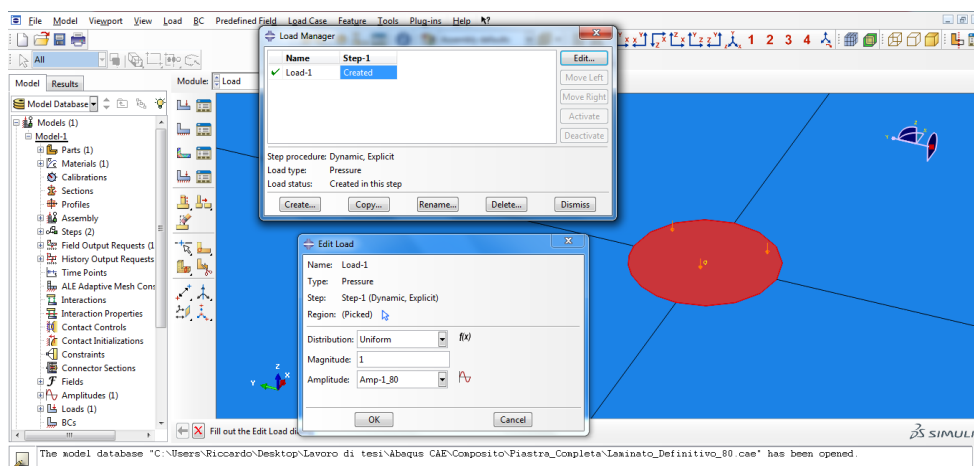


Figura 2.40: Carico assegnato al laminato tramite l'ampiezza calcolata precedentemente

Non richiedendo l'analisi esplicita dei vincoli a terra, il modulo Load, può dirsi completato, occorre tuttavia fare una precisazione. In questa analisi si è modellata l'eccitazione solamente come una pressione agente ortogonalmente alla piastra assumendo quest'ultima di preponderante importanza in relazione al coefficiente d_{33} di Tabella 2.3. Tuttavia la ceramica PZT ha anche il coefficiente d_{31} che denota la contrazione circonferenziale associata, andando a indurre sollecitazioni tangenziali che in questo modello non sono state prese in considerazione per la minor entità di queste ultime.

2.5.5 Modulo Mesh

All'inizio di questo paragrafo, si è descritta la dimensione dei singoli elementi finiti con cui discretizzare il modello. Tale dimensione caratteristica, è funzione della frequenza dell'onda diagnostica che determina una lunghezza d'onda variabile per ogni prova a frequenza crescente. Nell'Equazione (2.11) la regola empirica impone che la lunghezza caratteristica dell'elemento debba essere minore o uguale di un ventesimo rispetto alla lunghezza dell'onda diagnostica che si vuole simulare. È necessario quindi calcolare la lunghezza d'onda [2.16] con l'Equazione (2.12):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.12)$$

In cui C è la velocità di propagazione e f è la frequenza dell'onda diagnostica. Note le velocità di propagazione provenienti dai risultati sperimentali del Paragrafo 2.3, si ottiene la lunghezza dell'elemento finito da utilizzare per ogni prova a frequenza crescente, utilizzando le equazioni (2.11) e (2.12). La Tabella 2.9, riporta le dimensioni degli elementi finiti in relazione alla frequenza e alla minima velocità di propagazione A_0 tra quelle risultate dalle prove sperimentali.

Frequenza [kHz]	Velocità minima A_0 [m/s]	Lunghezza d'onda esatta [m]	Lunghezza elemento [mm]	Lunghezza elemento adottata [mm]
5	711	0,142	7,11	5
20	975	0,049	2,44	1
30	1115	0,037	1,86	1
50	1258	0,025	1,26	1
80	1338	0,017	0,84	0,5
100	1322	0,013	0,66	0,5
150	1119	0,007	0,37	0,4
200	1080	0,005	0,27	0,25
250	1344	0,005	0,27	0,25
300	1220	0,004	0,20	0,25

Tabella 2.9: Lunghezza elementi finiti adottati nel modello

Utilizzando il tasto global seed, è stato possibile suddividere il modello con le dimensioni degli elementi appena calcolate in Tabella 2.9 in funzione della frequenza dell'onda diagnostica. Si è scelto di utilizzare una mesh strutturata con elementi Quad-Dominated, suddividendo in quattro parti la lamina disegnata precedentemente utilizzando il comando partition-face. La Figura 2.41 evidenzia la tipologia di elementi scelti per eseguire la mesh. Essa presenta elementi S4R, identificati in lineari ad integrazione ridotta.

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

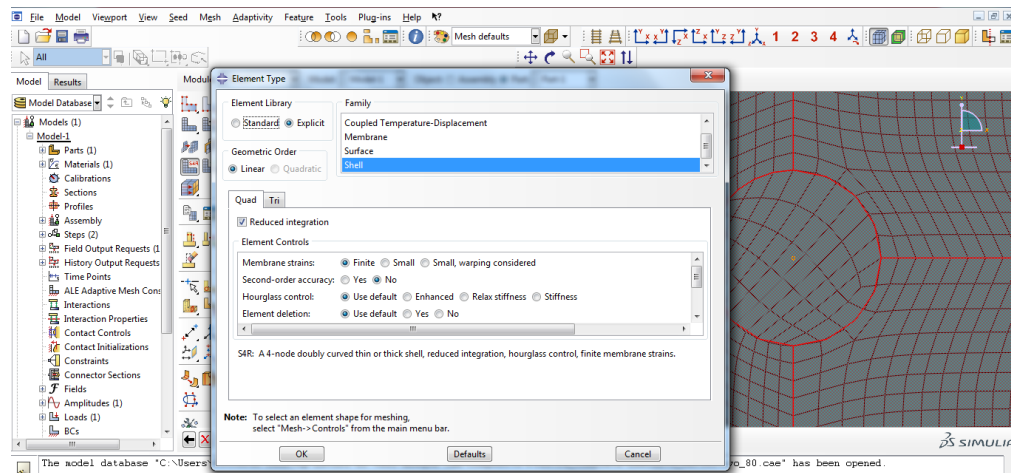


Figura 2.41: Tipologia di elementi scelti per eseguire la mesh

2.5.6 Modulo Job

Dopo aver inserito tutte le informazioni utili a costruire il modello, si è proceduto ad eseguire il calcolo. Si è deciso, per ridurre il periodo di calcolo a tempi ragionevoli, di eseguirlo parallelizzando le operazioni.

Ultimati tutti i Job, si possono analizzare i risultati ottenuti.

2.6 Risultati della modellazione FEM della propagazione delle onde di Lamb

Completato il Job con tutte le caratteristiche inserite a formare il modello, si analizza quanto ottenuto.

Il risultato riportato qui di seguito a titolo di esempio, è stato conseguito con una frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 80 kHz. Le immagini seguenti visualizzano il fenomeno della propagazione (Figura 2.42) dei singoli frame, ottenuti per ogni iterazione effettuata da Abaqus. Risulta significativa la visualizzazione degli spostamenti U_3 , ovvero quelli paralleli all'asse z , che identificano la propagazione del modo antisimmetrico A_0 . Si può osservare dalla Figura 2.42 (f) a seguire fino alla (m) l'effetto degli echi di fondo alla fine del materiale.

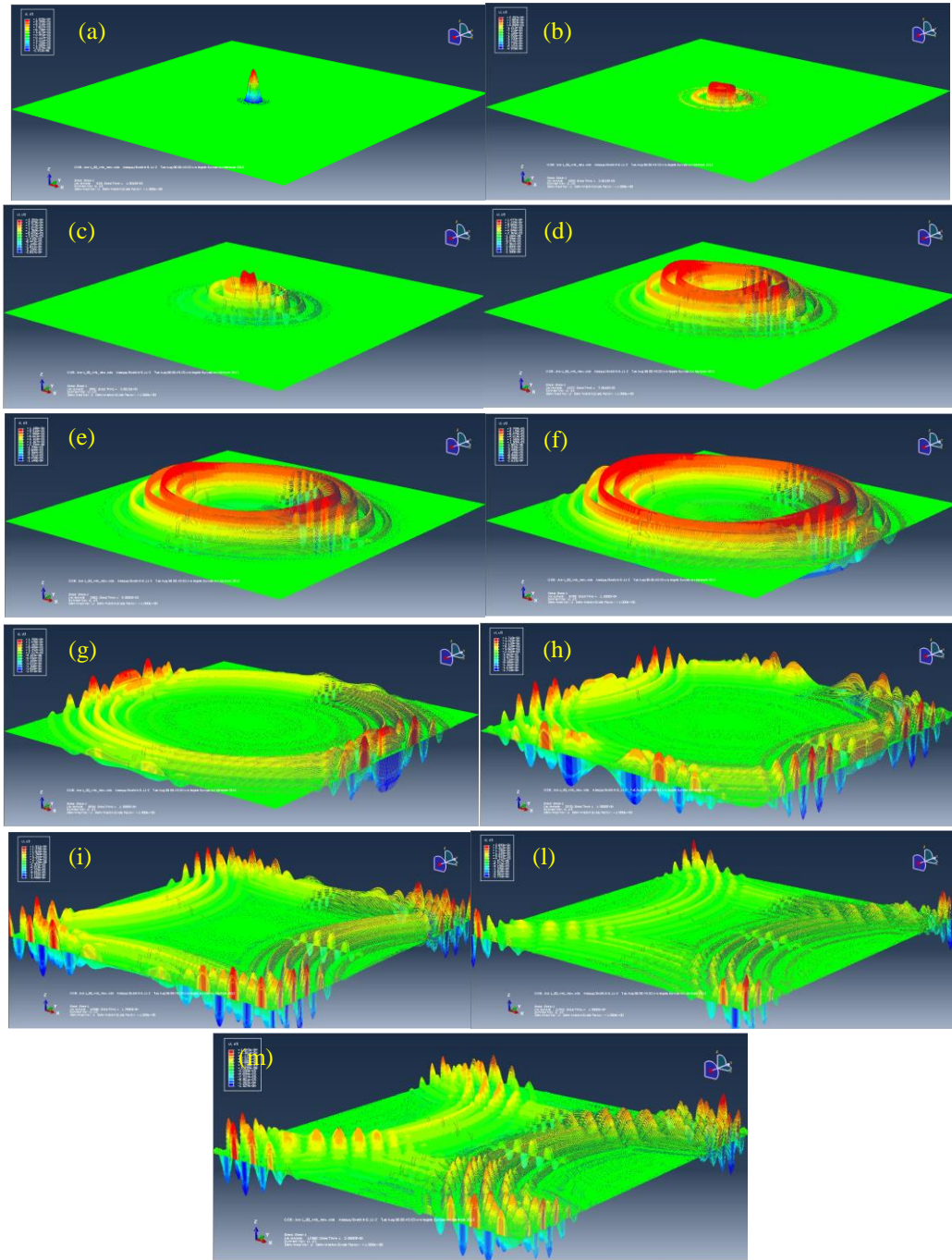


Figura 2.42: Simulazione della propagazione del modo A_0 (spostamenti $U_3(z)$) all'interno del laminato SAATI EH550/T800S con onda diagnostica a 80kHz: a) frame 1: tempo 1,0016E-05 [s], b) frame 3: tempo 3,0015E-05 [s], c) frame 5: tempo 5,0015E-05 [s], d) frame 7: tempo 7,0016E-05 [s], e) frame 9: tempo 9,0000E-05 [s], f) frame 11: tempo 1,1000E-04 [s], g) frame 13: tempo 1,3000E-04 [s], h) frame 15: tempo 1,5000E-04 [s], i) frame 17: tempo 1,7000E-04 [s], l) frame 19: tempo 1,9000E-04 [s], m) frame 20: tempo 2,0000E-04 [s]

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

Si estraggono i valori degli spostamenti U_3 dai punti di misura posti sulle direzioni di propagazione alle inclinazioni di 0° , 30° , 60° e 90° , ad una distanza radiale di 100 mm. Il riferimento di posizione è mostrato dalla Figura 2.37.

Abaqus mette a disposizione i risultati tramite la History-Output, la quale visualizza contemporaneamente sia l'onda diagnostica di riferimento, che quella giunta ai punti di misura. La Figura 2.43 evidenzia i risultati preliminari dell'analisi.

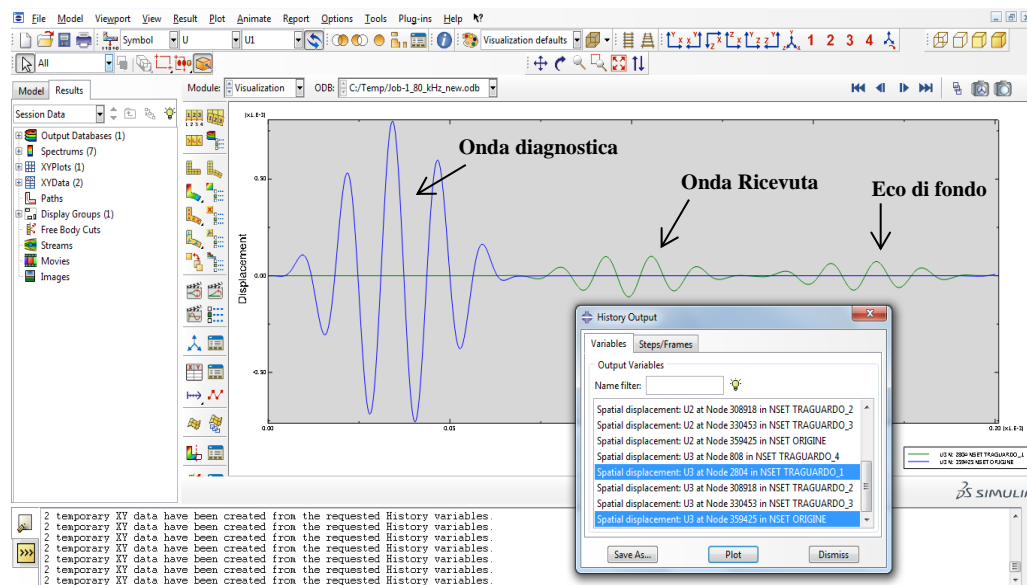


Figura 2.43: Risultati preliminari di spostamento U_3 ottenuti dalla History-Output forniti da Abaqus per il laminato SAATI EH550/T800S

Per calcolare le velocità di propagazione A_0 , è necessario importare i dati visualizzati in Figura 2.43, nel software Matlab R2011a e lì effettuare il calcolo del tempo di volo per percorrere i 100 mm e con relativa la velocità di propagazione. Per esportare i risultati, si è usato il tasto XY Data Manager il quale fornisce, in formato tabellare i valori di tempo e spostamento, come mostra la Figura 2.44. Per l'esportazione dei valori ottenuti in un formato compatibile con Matlab R2011a, si è scelto nuovamente il .CSV, che ha permesso l'ottenimento delle velocità di propagazione.

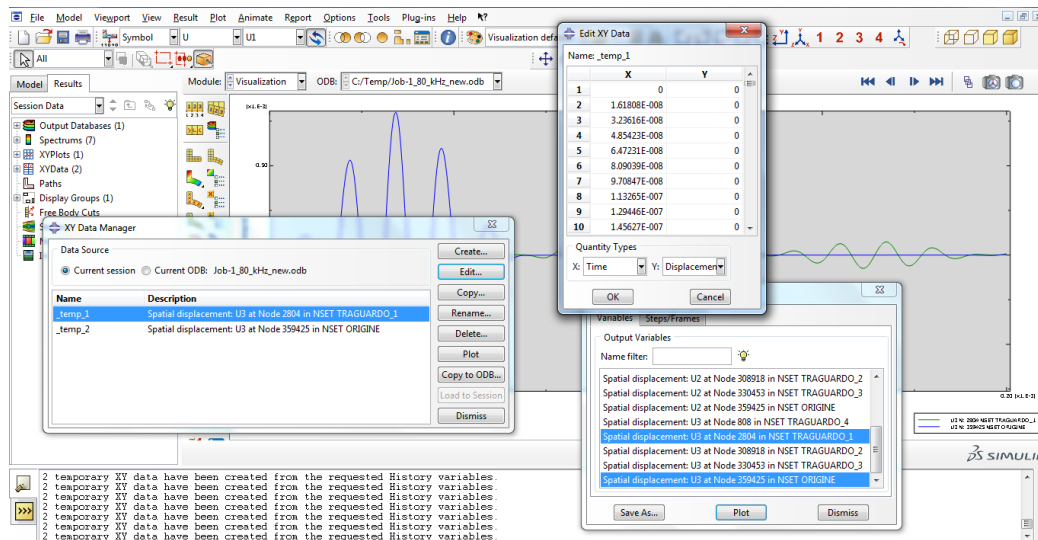


Figura 2.44: Esportazione risultati

2.6.1 Calcolo delle velocità di propagazione del modo A_0 di Lamb

Con i risultati dei tre spostamenti nodali U1, U2, U3 a tutte le frequenze di eccitazione di 5, 20,, 300 kHz, è possibile ora ottenere il tempo di volo tra onda diagnostica di riferimento e onda ricevuta dopo aver percorso i 100 mm tra i due punti di riferimento e misura. Per il calcolo della velocità di propagazione del modo anti-simmetrico A_0 , si utilizzeranno i segnali corrispondenti agli spostamenti fuori piano U3 in direzione z. Ancora una volta sarà necessario attuare l'analisi nel tempo attraverso la normalizzazione dei segnali per renderli confrontabili e utilizzando l'involuppo di Hilbert. I passaggi sono già stati affrontati ampiamente nel Paragrafo 2.2.3, si rimanda quindi a quella sezione per i dettagli. È d'obbligo la precisazione seguente, in questo caso infatti perde di significato la pulitura del segnale e l'estrazione della frequenza a massimo contributo energetico. Essendo il segnale originato da un modello FEM, non presenta al suo interno alcun disturbo elettrico e men che meno contributi a frequenze differenti da quella di eccitazione.

La procedura esposta fa in modo di ottenere i risultati riportati in Figura 2.45, in cui si osservano i segnali provenienti da Abaqus e il rispettivo involuppo per la frequenza di eccitazione di 80kHz.

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

Effettuato l'involuppo dei due segnali provenienti dai risultati di Abaqus, è necessario calcolare il tempo di volo che intercorre tra il segnale di riferimento e il segnale ricevuto dal punto di misura. Per fare ciò basta individuare l'indice della posizione a cui il valore massimo del segnale diagnostico e della risposta si trovano e farne la differenza applicando l'Equazione (2.8a), in termini temporali.

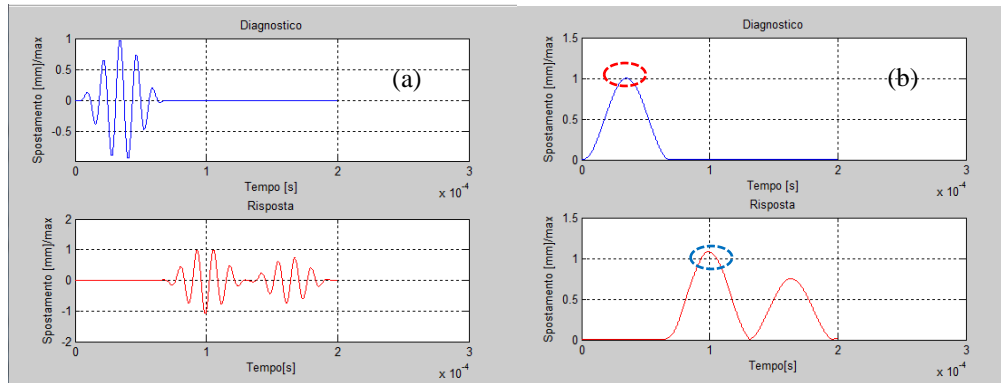


Figura 2.45: Segnali diagnostico e risposta provenienti da Abaqus ed elaborati in Matlab per frequenza di eccitazione di 80kHz nel laminato composito SAATI EH550/T800S: a) Segnali normalizzati, b) Segnali involuppati

Nota quindi il tempo di volo e nota la distanza di 100 mm tra attuatore e punto di misura è immediato calcolare la velocità di A_0 . Eseguendo il calcolo per tutte le frequenze di prova da 5 a 300kHz e per ogni sensore posizionato sulle direzioni di propagazione di 0° , 30° , 60° e 90° , otteniamo in Tabella 2.10 i risultati delle velocità di propagazione provenienti dal FEM, confrontate con il SAFE e con ciò che si è ottenuto con lo sperimentale per il modo A_0 .

Sens. f [kHz]	Sens 1 $\theta=0^\circ$			Sens 2 $\theta=30^\circ$			Sens 3 $\theta=60^\circ$			Sens 4 $\theta=90^\circ$		
	A0 (SAFE) m/s	A0 (FEM) m/s	A0 (SPER) m/s	A0 (SAFE) m/s	A0 (FEM) m/s	A0 (SPER) m/s	A0 (SAFE) m/s	A0 (FEM) m/s	A0 (SPER) m/s	A0 (SAFE) m/s	A0 (FEM) m/s	A0 (SPER) m/s
5	763,00	476,60	800,19	699,70	470,20	709,34	619,00	452,13	711,28	579,60	405,36	371,56
20	1273,00	940,40	1163,91	1176,00	1306,20	1200,42	1046,00	1156,30	1066,92	1028,00	1157,30	975,34
30	1405,00	1469,00	1170,98	1309,00	1290,20	1345,30	1166,00	1150,00	1280,30	1158,00	1175,60	1114,68
50	1523,00	1410,70	1333,65	1430,00	1388,50	1357,00	1284,00	1277,80	1333,65	1302,00	1250,60	1258,51
80	1562,00	1553,60	1338,83	1475,00	1491,40	1405,90	1350,00	1404,50	1362,02	1376,00	1346,10	1502,64
100	1563,00	1552,20	1454,89	1482,00	1494,50	1472,22	1368,00	1403,90	1454,89	1393,00	1375,20	1322,50
150	1553,00	1505,40	1579,04	1488,00	1445,10	1594,88	1398,00	1366,60	1119,56	1408,00	1344,70	1433,55
200	1549,00	1467,40	1470,14	1495,00	1394,30	1417,26	1423,00	1333,80	1558,99	1415,00	1314,30	1080,76
250	1548,00	1496,50	1581,25	1499,00	1425,90	1570,77	1435,00	1364,10	1343,96	1420,00	1353,70	1410,85
300	1540,00	1481,80	1478,64	1505,00	1381,60	1220,35	1440,00	1409,90	1423,74	1431,00	1391,70	1662,92

Tabella 2.10: Risultati a confronto SAFE, FEM e sperimentale modo di propagazione A_0 nel laminato SAATI EH550/T800S

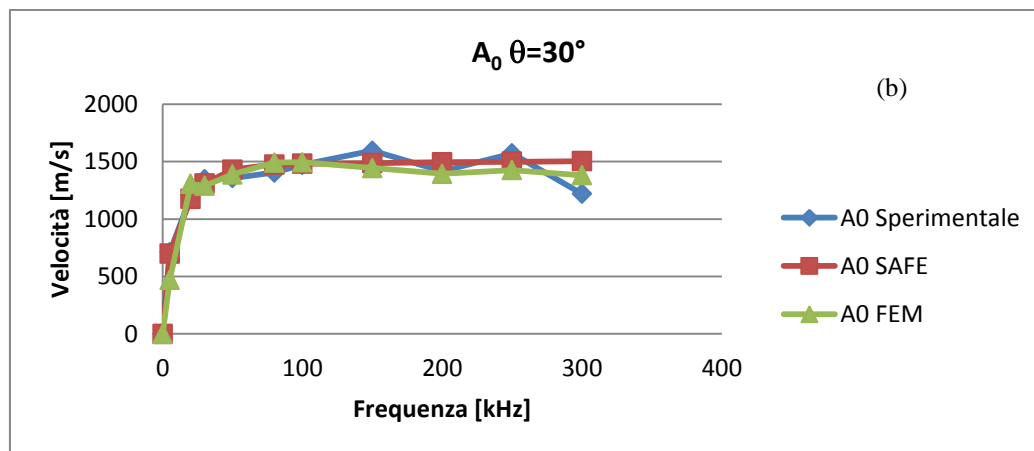
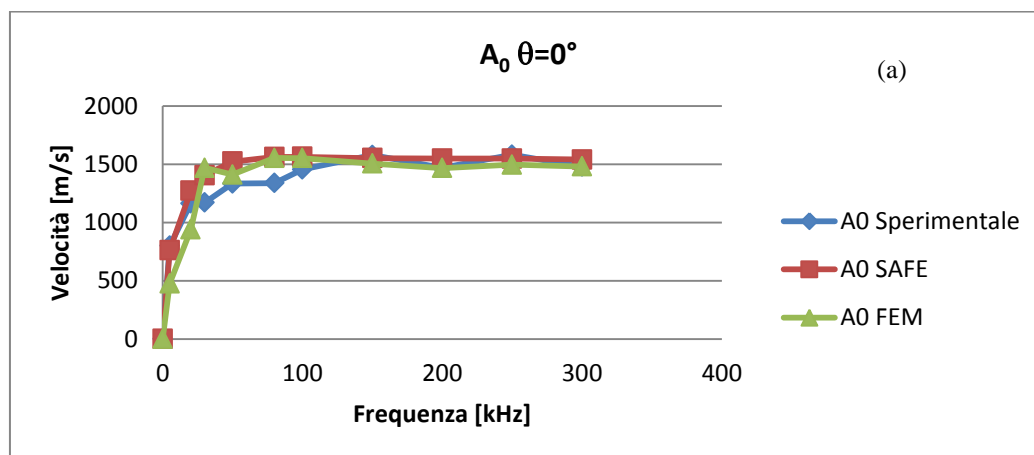
Si riporta inoltre qui di seguito la Tabella 2.11 in cui sono contenuti gli errori di scostamento rispettivamente tra FEM e sperimentale e tra FEM e SAFE.

Capitolo 2

Sens. f [kHz]	Err % Sens 1 $\theta=0^\circ$		Err % Sens 2 $\theta=30^\circ$		Err % Sens 3 $\theta=60^\circ$		Err % Sens 4 $\theta=90^\circ$	
	FEM-SAFE	SPER - FEM	FEM-SAFE	SPER - FEM	FEM-SAFE	SPER - FEM	FEM-SAFE	SPER - FEM
5	37,5	32,8	32,8	33,7	27,0	36,4	30,1	-9,1
20	26,1	21,7	-11,1	-8,8	-10,5	-8,4	-12,6	-18,7
30	-4,6	-9,2	1,4	4,1	1,4	10,2	-1,5	-5,5
50	7,4	-4,0	2,9	-2,3	0,5	4,2	3,9	0,6
80	0,5	-10,5	-1,1	-6,1	-4,0	-3,1	2,2	10,4
100	0,7	-5,4	-0,8	-1,5	-2,6	3,5	1,3	-4,0
150	3,1	5,6	2,9	9,4	2,2	-22,1	4,5	6,2
200	5,3	-3,5	6,7	1,6	6,3	14,4	7,1	-21,6
250	3,3	4,7	4,9	9,2	4,9	-1,5	4,7	4,1
300	3,8	-21,4	8,2	-13,2	2,1	1,0	2,7	16,3

Tabella 2.11: Errore di scostamento tra FEM e SAFE e tra sperimentale e FEM

Di seguito, in Figura 2.46, sono rappresentati gli andamenti dei quattro sensori alle rispettive inclinazioni.



Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

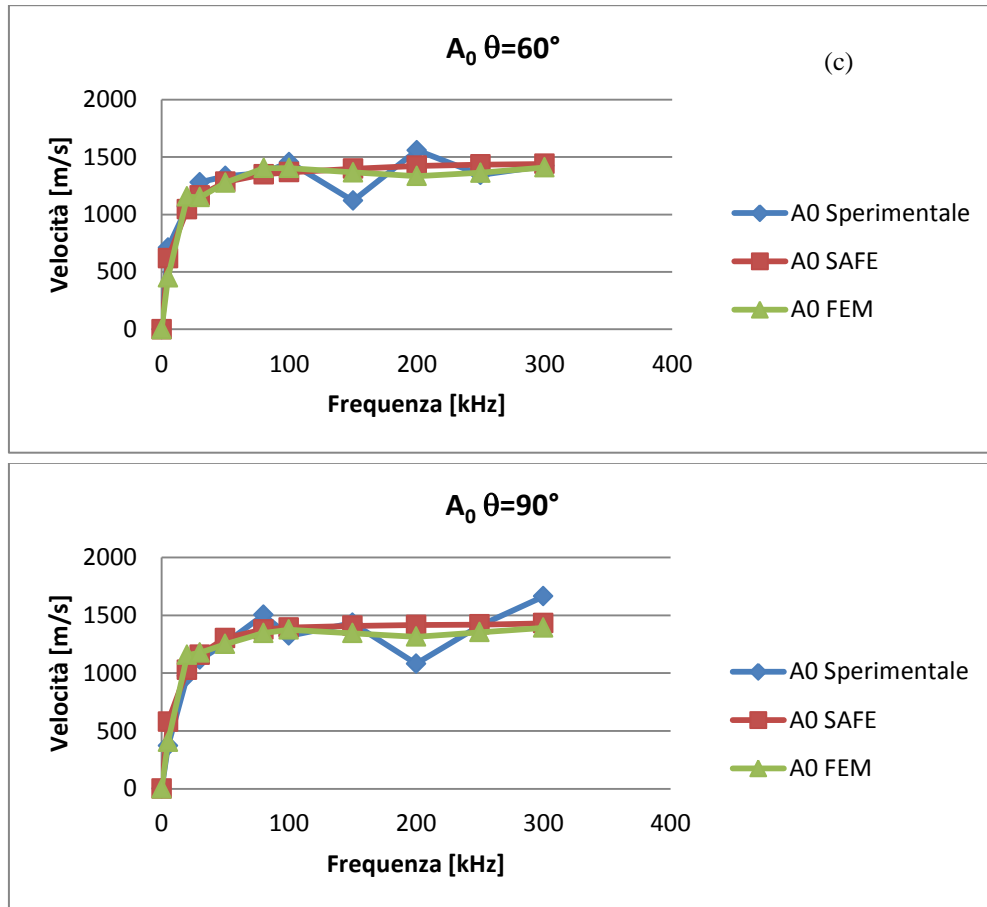
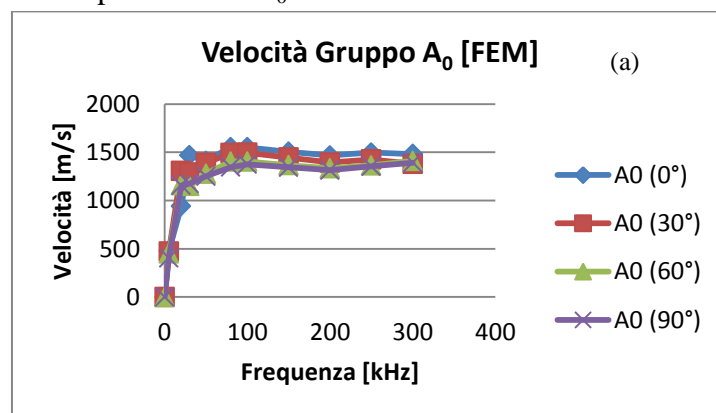


Figura 2.46: Curve di dispersione laminato SAATI EH550/T800S per il modo A_0 di Lamb SAFE, FEM e sperimentale per differenti direzioni di propagazione: a) $\theta=0^\circ$, b) $\theta=30^\circ$, c) $\theta=60^\circ$, d) $\theta=90^\circ$

Infine, in Figura 2.47, si riportano gli andamenti delle curve di dispersione rispetto alle differenti direzioni di propagazione ottenute dal FEM, dal SAFE e dallo sperimentale per il modo A_0 di Lamb.



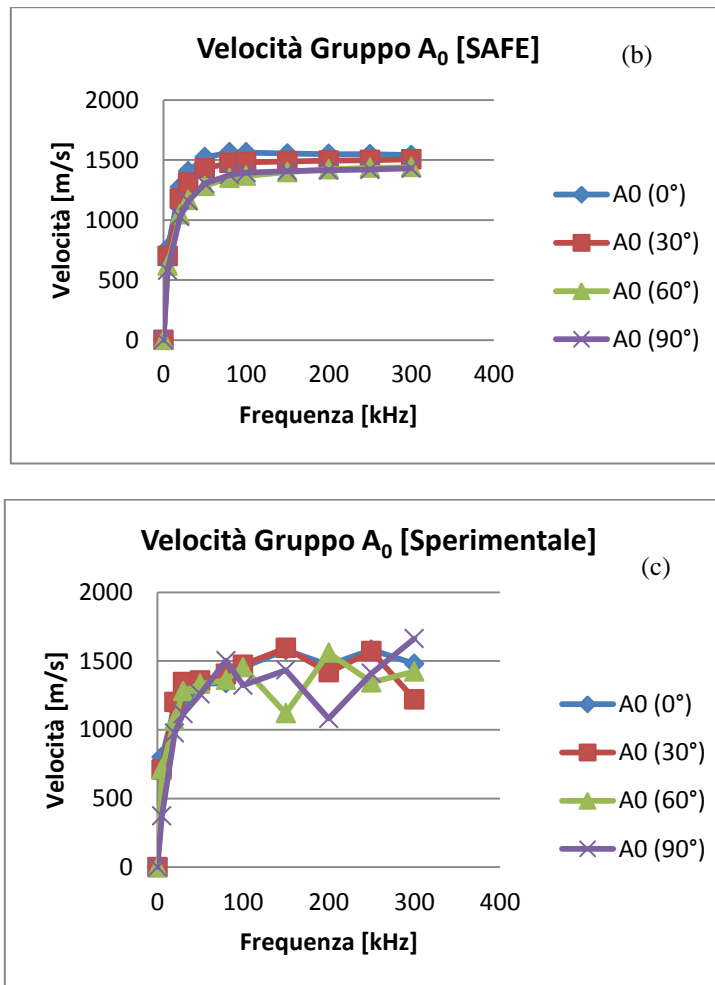


Figura 2.47: Curve di dispersione laminato SAATI EH550/T800S per il modo A_0 di Lamb per differenti direzioni di propagazione: a) Risultati FEM, b) Risultati SAFE, c) Risultati sperimentali

Ciò che si osserva, consultando i risultati riguardanti il modo propagativo A_0 di Lamb nel laminato, sono essenzialmente due:

- Gli andamenti delle curve di dispersione sono coerenti in tutti i modelli fatti precedentemente SAFE, FEM con quelli ottenuti sperimentalmente. Inoltre, i valori assunti dalle velocità risultano praticamente identici fino ad una frequenza dell'onda diagnostica pari a 150 kHz, per poi subire una leggera deflessione nel range di frequenze comprese tra 200 e 300 kHz.

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

- La dipendenza della velocità rispetto all'orientazione della direzione di propagazione. In entrambi i casi, SAFE e FEM, diminuisce man mano che ci si discosta dalla direzione di propagazione longitudinale di 0° , i minimi valori di velocità si ottengono per la direzione di propagazione trasversale a 90° rispetto all'origine. Si può legare questo comportamento alla resistenza del laminato e all'anisotropia che quest'ultimo presenta, ovvero nella direzione di longitudinale di massima resistenza (0°), la propagazione del modo A_0 raggiunge la velocità massima; mentre nella direzione trasversale di minima resistenza (90°), la propagazione del ha la velocità minima.

In conclusione è possibile affermare che la validazione della propagazione del modo A_0 ha trovato pieno riscontro in tutti e tre gli approcci, infatti consultando la Tabella 2.11, notiamo che dopo una stabilizzazione sui 5kHz e 20kHz, in cui troviamo uno scostamento elevato di oltre il 30% tra i metodi, per tutte le altre prove si sono ottenuti valori molto contenuti minori del 10%. Con ciò è del tutto legittimo affermare conclusa la validazione di A_0 .

Per ciò che riguarda la simulazione del modo propagativo S_0 , il FEM non ha prodotto significativi risultati. Ciò è da ricondurre al tipo di eccitazione modellata propriamente per la validazione del modo A_0 . Come si è detto nel modulo Load di Abaqus, si è introdotta solo la forzante ortogonale alla superficie del laminato che non attiva di per se il modo S_0 . Si è preferito quindi non presentare i risultati ottenuti per il modo propagativo simmetrico, confortati dal fatto che le prove che si svolgeranno da qui in avanti, non prevedono l'utilizzo del modo S_0 (si faccia inoltre riferimento alla dimostrazione del Paragrafo 2.4), sarà però obbiettivo degli sviluppi futuri apportare delle modifiche al presente modello FEM che consentano di ottenere l'eccitazione dedicata alla simulazione di S_0 .

2.7 Bibliografia

In questo capitolo si è fatto uso dei seguenti testi, articoli e siti internet:

- [2.1] A. Gianneo, *Analisi e progettazione sperimentale applicata al monitoraggio strutturale di pannelli fibro-rinforzati mediante onde di Lamb*, Tesi 2012, Politecnico di Milano Bovisa.
- [2.2] I. Bartoli, A. Marzani, F. Lanza di Scalea, E. Viola, *Modeling wave propagation in damped wave guides of arbitrary cross-section*, Journal of Sound Vibration, pp. 685-707, 2006.
- [2.3] T. Hayashi, W.J. Song, J.L. Rose, *Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example*, Ultrasonics 41 (2003) 175–183.
- [2.4] Zhongqing Su, Lin Ye, *Identification of Damage Using Lamb Waves From Fundamentals to Applications*, ed Springer 2006.
- [2.5] F. Lionetto, *Ceramici piezoelettrici e loro applicazioni*, 2004
- [2.6] <http://it.rs-online.com/web/p/interruttori-a-levetta/1990976/>
<http://it.rs-online.com/web/p/connettori-bnc/5464897/>
http://www.futurashop.it/index.php?route=product/category&path=4007_3054_976
- [2.7] PiCeramic, Data Sheet, <http://www.piceramic.com>
- [2.8] Daubechies, I. *Ten lectures on wavelets*, CBMS-NSF conference series in applied mathematics. SIAM Ed (1992).
- [2.9] Mallat, S. "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," IEEE Pattern Anal. and Machine Intell., vol. 11 (1989),, no. 7, pp 674–693.
- [2.10] Meyer, Y. (1990), *Ondelettes et opérateurs, Tome 1*, Hermann Ed. (English translation: *Wavelets and operators*, Cambridge Univ. Press. 1993.)
- [2.11] Staszewski, W.J., Worden, K.: *Signal processing for damage detection*. Staszewski, W.J., Boller, C., Tomlinson, G.R. (eds.) *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*, ch. 5, pp. 163–206. John Wiley & Sons, Inc., Chichester (2004)

Analisi della propagazione delle onde di Lamb nel laminato composito SAATI EH550/T800S

- [2.12] Abaqus 6.11, *Abaqus/CAE User's Manual*, Simulia, Dassault Systèmes, 2011
- [2.13] I. Bartoli, F. Lanza di Scalea, M.Fateh, E. Viola, *Modeling guided wave propagation with application to the long-range defect detection in railroad tracks*, NDT&E International 38 (2005) 325–334.
- [2.14] Abaqus 6.11, *Implicit dynamic analysis using direct integration*, Section 6.3.2, Abaqus Analysis User's Manual, Simulia, Dassault Systèmes, 2011.
- [2.15] Abaqus 6.11, *Explicit dynamic analysis*, Section 6.3.3, Abaqus Analysis User's Manual, Simulia, Dassault Systèmes, 2011.
- [2.16] M. McNaught; A. Wilkinson, *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology ("Gold Book")*, 2^a ed. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1997

Capitolo 3 – Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

3.1 Introduzione

In questo capitolo ci si occuperà di studiare l'interazione dell'onda diagnostica di Lamb con i difetti prodotti artificialmente nel laminato. La prima parte del capitolo, spiegherà il comportamento dell'onda diagnostica che interagisce con i difetti artificiali, ottenuti inserendo patch di teflon all'interno del laminato. Sfruttando poi l'approccio Pulse-Echo (PE), si cercherà di localizzare la posizione del danno, confrontandola con la posizione reale fornita dai controlli NDT tradizionali. Il capitolo proseguirà utilizzando l'approccio Pitch-Catch (PC), calcolando il coefficiente di trasmissione dell'onda diagnostica quando questa attraversa il difetto artificiale. Il valore ottenuto per il coefficiente, sarà analizzato al fine di comprendere quali sono i parametri fondamentali caratterizzanti il danno che influiscono sulla sua variazione.

3.1.1 *Descrizione della strumentazione della piastra difettata artificialmente*

Prima di procedere all'esecuzione delle varie prove presenti in questo capitolo, si deve individuare il tipo di materiale e che cosa si vuole trovare in esso. Nel caso in esame, siamo di fronte a due pannelli di laminato composito SAATI EH550/T800S in configurazione aeronautica $[0/45/0/-45/90/-45/0/45/90]_s$ in cui sono state inserite delle delaminazioni artificiali formate da patch di teflon di diametro rispettivamente di 24 e 8 mm. La posizione di queste ultime nello spessore del laminato è rispettivamente tra la 1° e la 2° ply e tra la 16° e la 17°. Il disegno riportato nella Figura 3.1 riporta le quote e le informazioni necessarie.

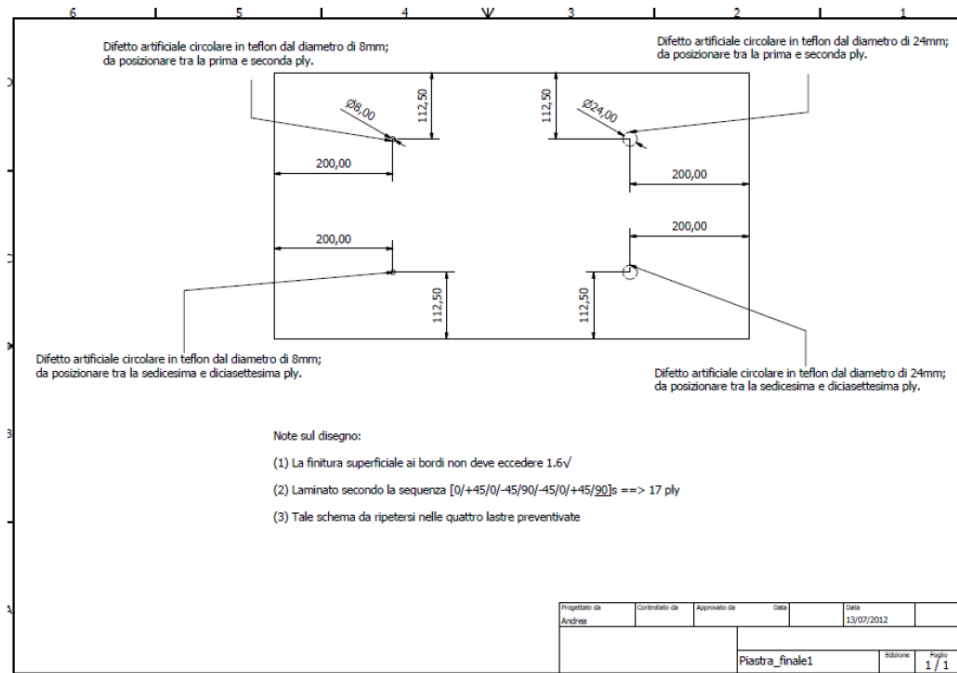


Figura 3.1: Disegno CAD della piastra SAATI SH550/T800S con il posizionamento difetti

Per lo studio dell'approccio PE, è stato necessario strumentare opportunamente le piastre contenente i difetti. La metodologia seguita per effettuare l'operazione, che nello specifico richiede l'incollaggio dei sensori e il loro cablaggio, è stata ampiamente trattata nel Capitolo 2, si rimanda perciò a quella sezione per comprendere come sistemare i trasduttori PZT sul laminato e le loro caratteristiche. Il risultato finale è rappresentato in Figura 3.2.

Si nota anche la presenza dei sensori PC oltre a quelli PE, che si è deciso di inserire a questo livello della sperimentazione per una più facile identificazione della posizione del danno, infatti a valle del controllo radiografico che si è attuato, si otterranno i riferimenti rispetto ai quali misurare la posizione della delaminazione, dato che i sensori rimarranno molto ben impressi sulle lastre radiografiche.

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

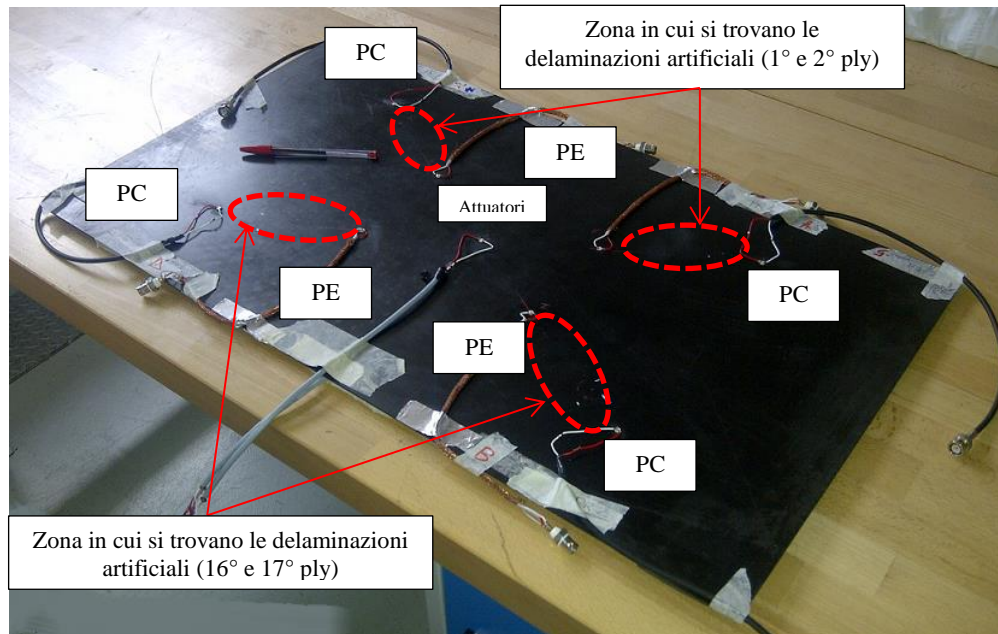


Figura 3.2: Piastra SAATI SH550/T800S strumentata con sensori PE e PC

3.2 Controlli NDT tradizionali applicati ai laminati difettati

Prima di affrontare il tema centrale del capitolo, è opportuno dedicare qualche paragrafo alla descrizione del controllo non distruttivo (RT), il cui risultato è stato assunto come riferimento nel confronto con i risultati PE. Le radiografie nelle zone dei difetti, hanno fornito la posizione esatta delle delaminazioni artificiali, le quali sono state poi confrontate con quelle individuate dall'approccio ultrasonoro studiato.

3.2.1 Radiografic Testing RT

3.2.1.1 Emissione dei Raggi X e loro interazione con la materia

Il controllo non distruttivo RT permette di ispezionare un volume di materiale sfruttando l'effetto di radiazioni ionizzanti dirette contro il pezzo in esame. L'oggetto analizzato assorbe parte della radiazione incidente in funzione del

proprio spessore e della densità locale. L'assorbimento differenziale delle radiazioni nel volume d'analisi, si traduce sulla pellicola in differenti scale di grigio. Al fine di attuare questo procedimento, si sfruttano le proprietà possedute da alcuni materiali, detti isotopi naturali, oppure l'emissione artificiale di radiazione X. È utile quindi approfondire il principio che governa questo tipo di controllo.

Se ci si concentra sulla radiazione X, usata nella prova di questa tesi, essa è generata artificialmente da macchine radiogene dette tubi radiogeni. L'emissione di quest'onda elettromagnetica è l'effetto ottenuto dal bombardamento di particolari materiali ad opera di elettroni ad alta velocità. Il tubo che vediamo in Figura 3.3, in cui è praticato un adeguato livello di vuoto per prevenire la formazione di archi voltaici, è composto da un anodo, un catodo, un filamento, la coppa focalizzatrice e il target o anticatodo.

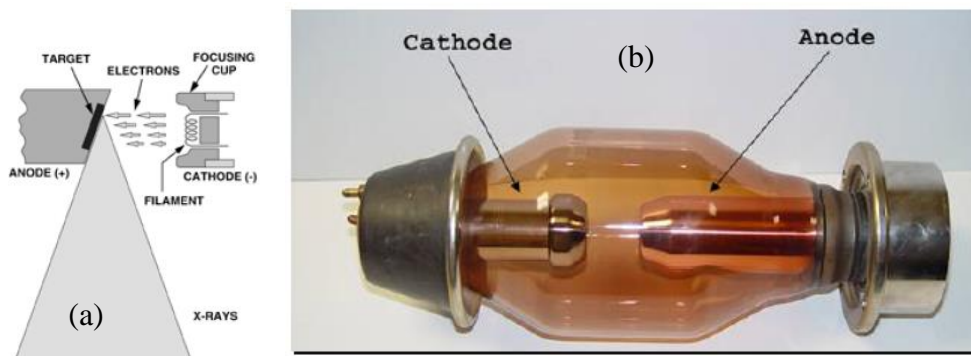


Figura 3.3: Tubo radiogeno: a) schema costruttivo; b) tubo radiogeno reale [3.8]

Il bombardamento dell'anticatodo da parte degli elettroni viene generato grazie a due passaggi intermedi:

- 1) Produzione degli elettroni attraverso l'incandescenza del filamento
- 2) Accelerazione degli elettroni prodotti grazie ad una opportuna differenza di potenziale tra anodo e catodo.

L'emissione utile di raggi X pari all'1% dell'energia introdotta nel sistema, avviene grazie a due fenomeni:

- 1) Urto tra elettrone accelerato e elettrone dell'anticatodo
- 2) Deviazione tra elettrone accelerato e elettrone dell'anticatodo

La restante parte dell'energia si disperde sotto forma di calore. In particolare, la densità di emissione è direttamente proporzionale alla temperatura del filamento che a sua volta è proporzionale all'intensità al quadrato della corrente che alimenta il filamento stesso.

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

In generale le radiazioni utilizzate in radiografia sono caratterizzate dall'aver alta energia e piccola lunghezza d'onda, come le onde che caratterizzano lo spettro elettromagnetico, la Figura 3.4 mette in luce questa affermazione [3.1].

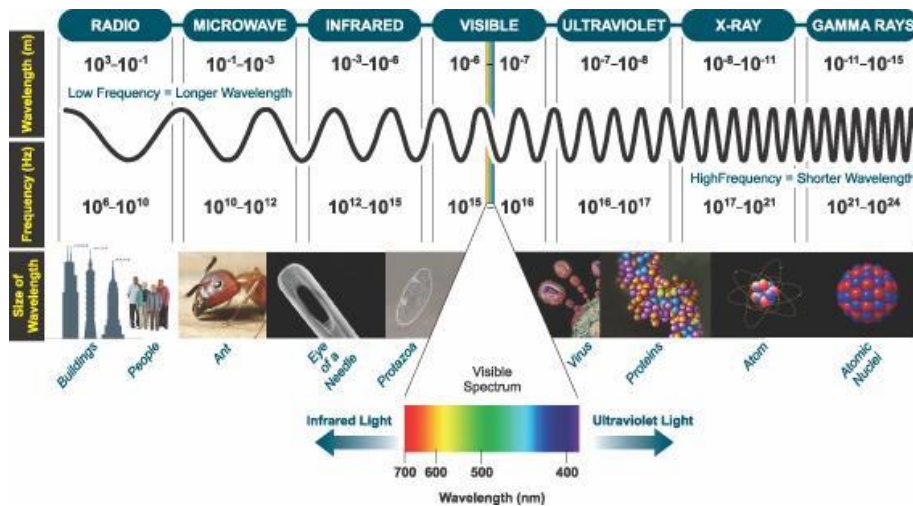


Figura 3.4: Spettro elettromagnetico del visibile

Possiamo quindi definire l'intensità della radiazione come la quantità di energia ceduta nell'unità di tempo ad una superficie unitaria disposta ortogonalmente al fascio uscente dalla sorgente. Infine per le radiazioni di tipo X abbiamo diversi tipi di interazioni con la materia colpita. Immaginando tali radiazioni come fotoni avente energia diversa, quelli a bassa energia tendono ad interagire con l'intero atomo, quelli di energia moderata con gli elettroni orbitali ed infine quelli di alta energia con il nucleo. Cinque sono i meccanismi fondamentali di interazione dei raggi X con questi diversi livelli strutturali: la diffusione classica, l'effetto Compton, l'effetto fotoelettrico, la produzione di coppie e la fotodisintegrazione [3.2], [3.3], [3.4].

3.2.1.2 Sorgente radiogena utilizzata

L'apparecchio utilizzato per la produzione di raggi X (Figura 3.5a), disponibile al Dipartimento di Aerospaziale del Politecnico di Milano con sede in Bovisa, si compone di tre parti:

- Il tubo radiogeno vero e proprio, o tubo di Coolidge riportato in Figura 3.5b

Capitolo 3

- Il trasformatore che consente di convertire correnti e tensioni necessarie al funzionamento del tubo
- Il regolatore, ovvero la plancia di comando del tubo in cui è possibile variare la tensione del campo elettrico, la tensione e la corrente di alimentazione del filamento e il tempo di esposizione (Figura 3.5c).
- Bunker piombato per la sicurezza degli operatori.



Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali



Figura 3.5: Macchina radiogena: a) bunker piombato per la protezione da fughe radioattive; b) tubo di Coolidge; c) Centralina di controllo

Le principali caratteristiche di questo tubo radiogeno si identificano in differenza di potenziale massima del campo elettrico imposto tra anodo e catodo pari a 50 kV e la corrente erogata nel filamento per la produzione di elettroni pari ad un massimo di 12V e 3-6 mA. E' chiaro che le due alimentazioni sono ottenute su circuiti separati. In generale per completezza di informazione, si devono erogare 150kV, 200kV e 300kV per penetrare spessori d'acciaio pari a 10, 35 e 60mm rispettivamente, quindi il sistema RT utilizzato si pone nel campo di applicazione di materiali leggeri tipicamente per uso aeronautico e non per strutture in acciaio di tipico utilizzo meccanico.

Il fascio di raggi X prodotto fuoriesce dal tubo radiogeno grazie ad un foro praticato nella zona inferiore del tubo stesso, in maniera da permettere una concentrazione di tutti i raggi prodotti senza disperderli in maniera inutile in tutto l'ambiente circostante. L'indice che misura la dimensione del fascio è detta macchia focale apparente, ovvero l'area di propagazione nella direzione di uscita. Con più tale grandezza aumenta, con più la qualità delle radiografie diminuisce per effetto penombra. Il radiolight Gilardoni utilizzato al Politecnico, presenta [3.5]:

- Finestra in Berillio
- Modello NEO-Be
- Numero di serie 31/0184
- Tensione massima 80 kV
- Fuoco 0,7 mm
- Filtrazione 1mm

3.2.1.3 *Le pellicole*

Come accennato, il principio di funzionamento del metodo RT sta nell'assorbimento differenziale della radiazione incidente da parte del pezzo. Le zone con assorbimento maggiore, lasceranno transitare una frazione energetica minore, mentre nelle zone con assorbimento minore, la frazione energetica attraversante sarà maggiore. Questo si traduce in una scala di grigi di differente intensità sulla pellicola sviluppata. Questo fenomeno avviene perché la radiazione che colpisce la pellicola trasforma l'emulsione di cristalli di alogenuro di argento costituente la parte sensibile della pellicola vergine, in argento a formare un'immagine latente. La quantità di argento trasformato sulla pellicola sarà proporzionale alla quantità di radiazione trasmessa attraverso il pezzo. Per poter osservare quanto impresso, è infine necessario lo sviluppo della lastra in opportuni bagni per permettere l'ottenimento dei cristalli d'argento metallico, di colore nero. In generale, una pellicola radiografica è composta essenzialmente da uno strato centrale detto supporto in triacetato di cellulosa, dove sulla faccia superiore e inferiore è fatta aderire l'emulsione fotosensibile che viene a sua volta ricoperta da uno strato protettivo di carta. Tra supporto, emulsione e protettivo intercorrono gli strati di aderenza sottilissimi. L'effetto sensibilizzante delle radiazioni incidenti la pellicola può essere, in generale, quantificato in un assorbimento del solo 1%.

Le caratteristiche della pellicola si individuano in:

- Definizione: capacità da parte della pellicola di dare dei contorni più o meno definiti, in pratica è la dimensione dei singoli cristalli (detta "grana") di alogenuro d'argento.
- Contrasto: differenza di densità tra due zone a diverso annerimento.
- Sensibilità: è il tempo necessario di esposizione alla radiazione affinché la pellicola rimanga impressionata. Viene anche detta rapidità.

A titolo di esempio, riportiamo nella Tabella 3.1 alcune pellicole AGFA che si trovano in commercio [3.6]

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

Pellicole AGFA						
Tipo	Esposizione [s]				Classe DIN	Classe ASTM
	100kV	200kV	Co60	Ir192		
D2	8	7	7	7	G1	SPECIALE
D3	3,80	4	4	3,90	G1	1
D4	3	2,60	2,50	2,40	G2	1
D5	1,70	1,60	1,60	1,50	G2	1 – 2
D7	1	1	1	1	G3	2
D8	0,55	0,60	0,55	0,50	G4	2

Tabella 3.1: Pellicole AGFA più comuni sul mercato

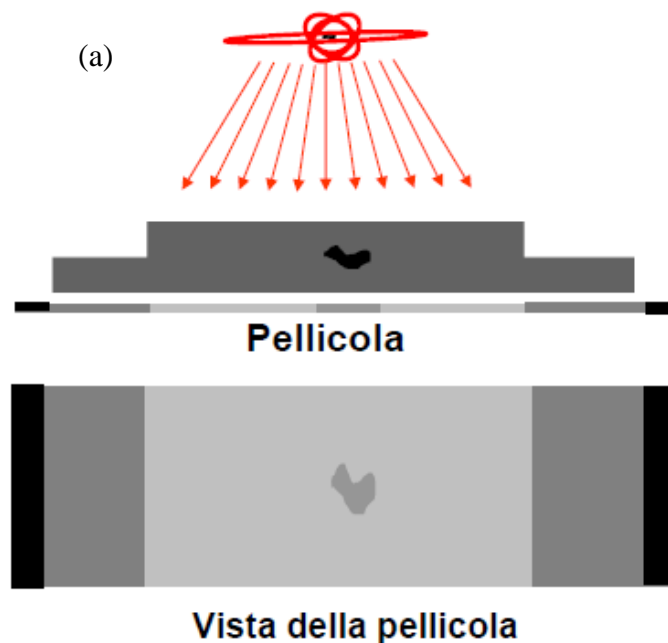
La pellicola utilizzata nella prova è la AGFA STRUCTURIX D4 DW

3.3 Preparazione della piastra CFRP SAATI EH-550/T800S ed esecuzione della prova RT

Il procedimento che ha permesso di strumentare la piastra, si veda il Paragrafo 3.1.1, ha duplice scopo. Il primo è quello di studiare la rilevazione del danno all'interno del laminato mediante gli approcci PE e PC, il secondo, più indiretto, è quello di avere sulle radiografie un riferimento univoco dato dai PZT impressi sulla pellicola per poter conoscere la posizione del difetto rispetto al trasduttore. Prima di procedere all'esecuzione della prova radiografica dobbiamo individuare il materiale che si vuole radiografare e che cosa si vuole trovare in esso. Nel caso in esame si è di fronte al materiale SAATI EH-550/T800S la cui fibra di carbonio ha un elevato potere di assorbimento delle radiazioni. Per evidenziare difetti delaminativi affioranti, è necessario usare un liquido di contrasto. Esso deve penetrare per capillarità nelle zone di decoesione del laminato variando così l'assorbimento dei raggi X. In questa prima parte del lavoro tuttavia, i difetti non sono affioranti ed il liquido di contrasto non è applicabile, però essi sono in materiale differente rispetto al CFRP, quindi si è avvantaggiati nell'aver già di partenza un assorbimento differente del materiale interposto.

3.3.1 Preparazione della prova radiografica

La pellicola radiografica viene posizionata per ognuna delle otto zone di interesse, secondo lo schema riportato in Figura 3.6. Ogni pellicola è sistemata dalla parte opposta rispetto alla superficie investita dal fascio di raggi X, in maniera da registrare le zone ad assorbimento differente. In questo caso si utilizzano pellicole sigillate già pronte all'uso, che non necessitano di preparazione in camera oscura. Una volta incollate le pellicole AGFA STRUCTURIX D4 DW sul retro del laminato facendo attenzione a comprendere entrambi i sensori PZT si è pronti per posizionare il composito all'interno del bunker piombato in cui è contenuto il tubo radiogeno di Coolidge. Per una corretta centratura della piastra nella zona di uscita del fascio, il radiolight è corredato di un'asta di puntamento la quale è stata utilizzata per sistemare correttamente il pezzo. L'ultimo passaggio importante prima di eseguire la radiografia, riguarda il posizionamento delle cifre identificative nella zona superiore opposta rispetto alla pellicola. Queste ultime sono lettere e numeri ricavati in piombo, posizionati a comporre la data del giorno in cui è stata svolta la radiografia e il numero della prova.



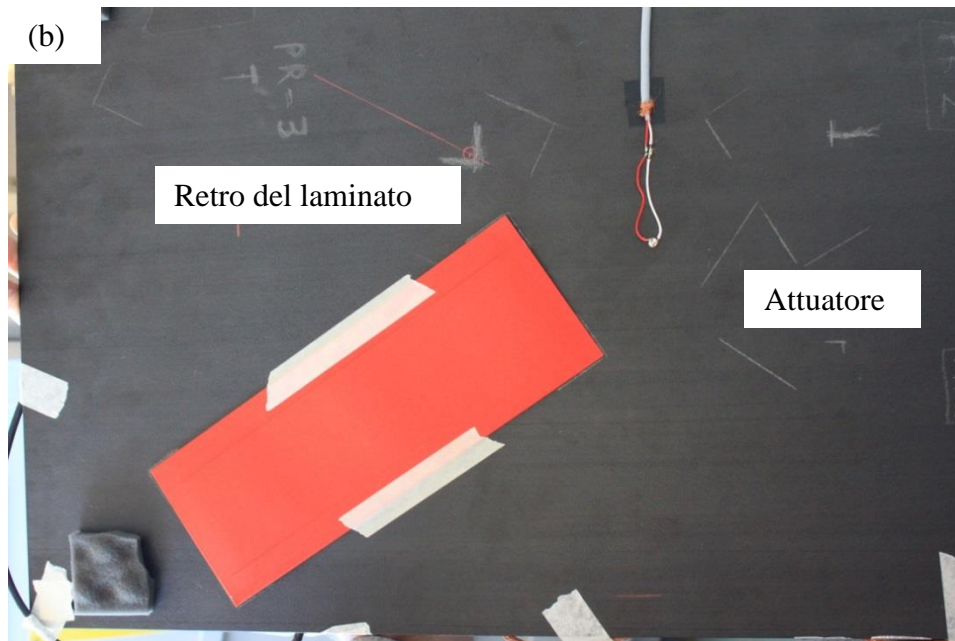


Figura 3.6: Schema di posizionamento della pellicola rispetto al pezzo investito dal fascio di raggi X: a) schema procedurale; b) laminato composito preparato con le pellicole radiografiche

A questo punto si sono scelti i parametri fondamentali per la buona riuscita della radiografia. Questo passaggio è fondamentale e si basa sull'esperienza del tecnico che svolge la prova, tuttavia è necessario eseguire tentativi preliminari di taratura per vedere la qualità delle radiografie prodotte. I parametri regolabili in questa fase preliminare sono:

- Tempo di esposizione
- Differenza di potenziale del campo elettrico
- Corrente erogata nel filamento del tubo.

L'ultimo parametro responsabile della quantità di elettroni prodotti solitamente non si modifica. Il tempo di esposizione e l'intensità del campo elettrico imposto sono i parametri che modificano i risultati della radiografia.

I parametri scelti, ritenuti ottimali dopo due prove preliminari sono stati

- **Tempo di esposizione pari a 30 [s]**
- **Differenza di potenziale pari a 25 [kV]**
- **Corrente erogata nel filamento 5 [mA]**

3.3.2 Sviluppo fotografico e risultati finali.

Come già descritto precedentemente, lo sviluppo fotografico è necessario per trasformare i cristalli dell'emulsione sensibile in argento metallico. Questo processo avviene in un apposito locale, detto camera oscura, nella quale vi è una debole fonte di luce inattinica, ovvero lampade che emettono luce solo in campi rispetto ai quali le pellicole sono poco sensibili (giallo, rosso o verde). Siccome in questo locale c'è un massiccio uso di prodotti chimici, deve essere prevista un'adeguata areazione [3.7].

La prima fase è lo sviluppo, ovvero l'operazione che permette la trasformazione degli alogenuri d'argento in argento metallico. La soluzione acquosa che permette di sviluppare la pellicola è costituita da acqua, idrochinone, solfito di sodio, carbonato di sodio o bromuro potassio. L'immersione della pellicola liberata dalle protezioni in carta nel bagno di sviluppo, deve durare per 5 minuti ad una temperatura ottimale della soluzione di 20 °C. Si usano perciò delle vasche termostate. Terminata la fase di sviluppo, la pellicola subisce la seconda fase detta di arresto. Essa viene immersa per un tempo di 2 minuti nell'omonimo bagno. All'interno della vasca di arresto vi è solitamente acqua corrente con lo scopo di bloccare lo sviluppo per effetto dei prodotti rimasti sulla pellicola. Il processo di sviluppo si conclude con l'ultima immersione della lastra nel bagno di fissaggio, con lo scopo di lavare la pellicola dai cristalli non sviluppati, di fissare i cristalli sviluppati e indurire l'emulsione per aumentare la resistenza della lastra. Questa operazione può richiedere dai 2 ai 4 minuti di tempo a 20 °C. Infine, si esegue il lavaggio finale in acqua corrente dura, ricca perciò di calcare per un tempo di 15 minuti e l'essiccazione in aria o in ambienti termostati per un tempo di 30 minuti. La Figura 3.7 evidenzia i passaggi di sviluppo, arresto e fissaggio.

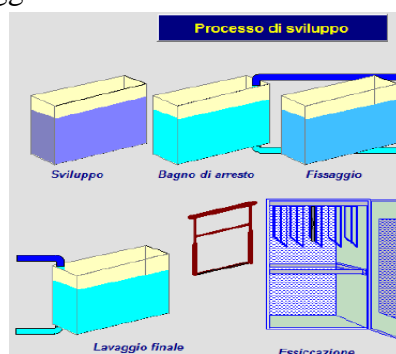


Figura 3.7: Passi logici processo di sviluppo

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

Una volta sviluppata la lastra, per poter ritenere valida la radiografia, si esegue il controllo della densità tramite il densitometro. Il valore ottimale deve cadere nell'intervallo tra 0,5 e 1,5. Le prove effettuate hanno dato un valore medio pari a 1,3.

Si riportano nelle Figure 3.8 e 3.9 le due lastre significative del difetto da 24 mm e da 8 mm di diametro.



Figura 3.8: Radiografia laminato SAATI EH550/T800S con difetto da 8 mm

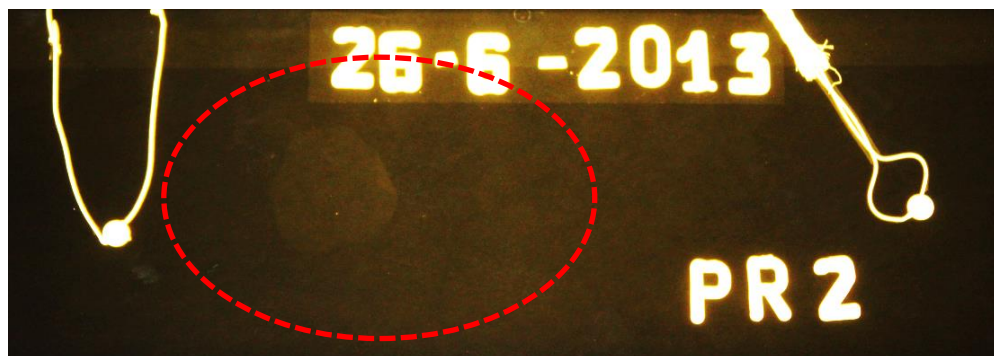


Figura 3.9: Radiografia laminato SAATI EH550/T800S con difetto da 24 mm

Si sono riportate solo due radiografie delle otto prove svolte per brevità di trattazione.

3.3.3 Analisi di immagine

Per ottenere la posizione dei danni in tutti i punti della piastra, è stata utilizzata l'analisi dell'immagine tramite il software GIMP 2. Nota la distanza in millimetri tra sensore PE e sensore PC impressi sulla pellicola, nota la distanza

Capitolo 3

in pixel fornita dal software tra i due sensori e nota la distanza in pixel tra il PZT ricevitore PE e il difetto, si è in grado di calcolare, tramite proporzione, la distanza in millimetri del danno dal sensore ricevitore. Qui di seguito è riportata l'equazione (3.2) che ci ha permesso di calcolare la posizione univoca dei difetti artificiali nel laminato:

$$a : b = c : x \quad (3.1)$$

Quindi

$$x = \frac{b * c}{a} \quad (3.2)$$

In cui, come detto, troviamo:

- a: distanza in [pixel] tra i due sensori impressi sulla pellicola
- b: distanza in [mm] tra i due sensori impressi sulla pellicola
- c: distanza in [pixel] tra il sensore PE e il difetto.

La Figura 3.10 chiarifica le dimensioni a, b, c e c'.

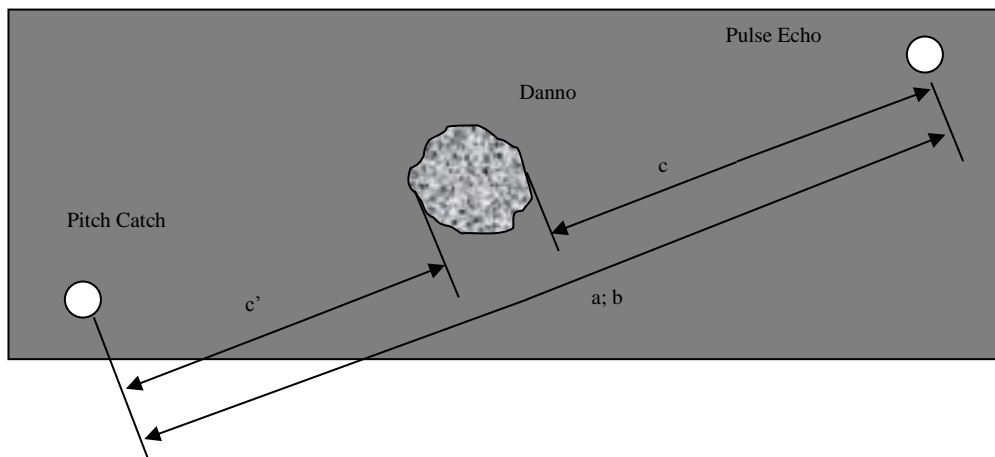


Figura 3.10: Schema quote prese dalla radiografia

Con lo stesso approccio proporzionale siamo in grado di stabilire anche la dimensione della delaminazione artificiale, semplicemente impostando la medesima proporzione anche sulla distanza tra difetto e sensore PC e sottraendo le due distanze calcolate dalla distanza complessiva tra i due sensori.

$$Delamination = b - x - x' \quad (3.3)$$

In cui x' è la proporzione calcolata su c' .

Analisi dell'interazione di un onda di Lamb con delaminazioni artificiali

Di seguito riportiamo le Tabelle 3.2 e 3.3 con tutte le posizioni dei difetti calcolate dalle radiografie con il metodo dell'analisi immagine.

PIASTRA UNO

Prova: RX-8 A	PIXEL	[mm]
Distanza Pulse Echo – Pitch Catch	3936,2	207
Distanza Pulse Echo -- delaminazione	1781	93,7
Dimensione delaminazione	536,7	24

Prova: RX-6 B	PIXEL	[mm]
Distanza Pulse Echo – Pitch Catch	3973,4	208
Distanza Pulse Echo -- delaminazione	1889,9	98,9
Dimensione delaminazione	474	24,81

Prova: RX-9 C	PIXEL	[mm]
Distanza Pulse Echo – Pitch Catch	3480,7	183
Distanza Pulse Echo -- delaminazione	1956,5	102,9
Dimensione delaminazione	196,2	10,31

Prova: RX-7 D	PIXEL	[mm]
Distanza Pulse Echo – Pitch Catch	3455,4	180
Distanza Pulse Echo -- delaminazione	2081,6	108,4
Dimensione delaminazione	172,7	8,99

Tabella 3.2: Posizione e dimensione del danno nella piastra uno del laminato composito SAATI EH550/T800S

PIASTRA DUE

Prova: RX-1 A	PIXEL	[mm]
Distanza Pulse Echo – Pitch Catch	2953,8	156,0
Distanza Pulse Echo -- delaminazione	1993	105,3
Dimensione delaminazione	453,8	24,0

Capitolo 3

Prova: RX-2 B	PIXEL	[mm]
Distanza Pulse Echo – Pitch Catch	2980	157,0
Distanza Pulse Echo -- delaminazione	1947	102,6
Dimensione delaminazione	435	22,9

Prova: RX-4 C	PIXEL	[mm]
Distanza Pulse Echo – Pitch Catch	2906,4	153,0
Distanza Pulse Echo -- delaminazione	1942,3	102,2
Dimensione delaminazione	141,8	7,5

Prova: RX-3 D	PIXEL	[mm]
Distanza Pulse Echo – Pitch Catch	2412,6	155,0
Distanza Pulse Echo -- delaminazione	1674,9	107,6
Dimensione delaminazione	146,8	9,4

Tabella 3.3: Posizione e dimensione del danno nella piastra due del laminato composito SAATI EH550/T800S

Note tutte le posizioni dei difetti sulle due piastre di laminato composito, e la loro dimensione esatta, si è pronti con lo studio dell'approccio PE per verificare le distanze fornite con tale approccio rispetto al riferimento appena creato.

3.4 Approccio Pulse Echo: individuazione della posizione dei difetti artificiali.

Note le dimensioni dei difetti artificiali e nota la loro posizione rispetto al sensore PE è ora possibile attuare la campagna di prove sperimentali che permetterà di capire se è possibile o meno individuare la posizione del difetto tramite la riflessione del modo A_0 . Come prima anticipato, si è sfruttato in questa parte della tesi, la riflessione dell'onda diagnostica generata essenzialmente dall'incontro lungo il suo cammino di una zona ad impedenza acustica differente.

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

Sarà necessaria una fine analisi di ciò che si è acquisito per identificare quello che viene visualizzato nel segnale in relazione alle condizioni al bordo e alla presenza di eventuali altri fattori noti che determinano un'anomalia apparentemente incognita. Una volta che ogni fattore rappresentato dal segnale acquisito sarà stato determinato, ciò che rimane incognito nella zona compresa tra l'onda diagnostica di prima trasmissione e il primo eco di fondo, sarà da attribuirsi al difetto.

3.4.1 *Set-up sperimentale*

Si dispone già delle piastre strumentate grazie al passaggio precedente che ci ha permesso di ottenere le radiografie del laminato composito, ciò che manca ora è la connessione al sistema di eccitazione e di acquisizione. Le apparecchiature utilizzate sono le stesse impiegate nel Capitolo 2, si rimanda perciò alla Figura 2.36 per la spiegazione dettagliata delle connessioni.

3.4.2 *Acquisizione e analisi del segnale Pulse Echo con difetti Artificiali*

La logica di collegamento prevede la generazione dell'onda diagnostica identificata nella funzione coseno con finestrata Hanning da 5,5 cicli, tramite il generatore di funzioni d'onda Agilent 33220A, seguita dalla sua amplificazione di 10 volte che permette di ottenere una tensione picco picco pari a 30 V ai sensori attuatori. Come già detto nel Capitolo 2, l'attuazione prevede l'utilizzo del circuito Fase-Contro-Fase, che determina una preponderante magnificazione del modo propagativo antisimmetrico A_0 quando fatto funzionare in Contro-Fase. Una volta che l'onda raggiunge gli attuatori, essa propaga nel laminato come onda circolare, attraversa la prima volta il ricevitore, raggiunge il danno, viene riflessa grazie alla differenza di impedenza acustica e ritorna al ricevitore percorrendo il tragitto inverso. Allo stesso modo, il cambio di impedenza acustica si ha anche ai bordi del laminato. La Figura 3.11, mette in luce il fenomeno che avviene in una porzione del laminato. Si è scelto di raffigurare il quarto inferiore sinistro.



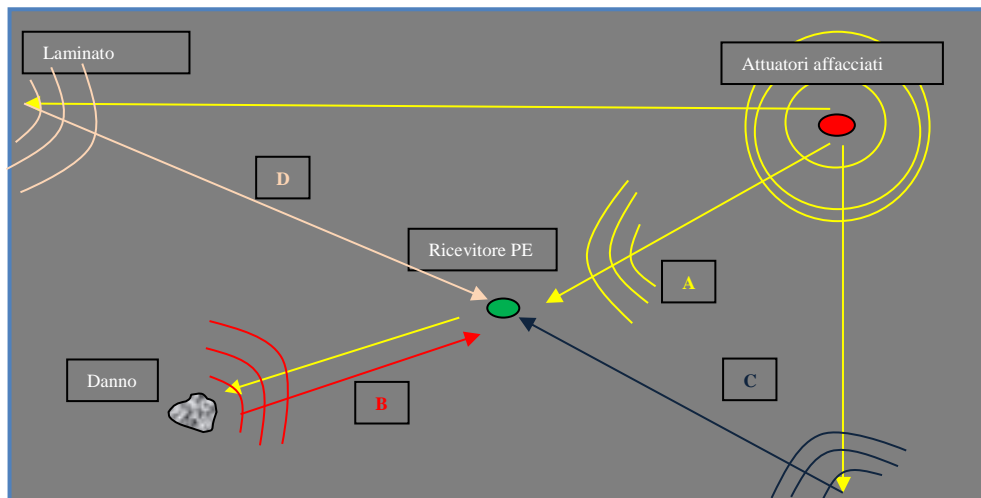


Figura 3.11: Echi presenti nella parte del laminato SAATI EH550/T800S inferiore sinistra

Il segnale ascoltato dal ricevitore PE, contiene quindi una dopo l'altra le seguenti informazioni:

- L'onda diretta **A** proveniente dall'attuatori
- L'eco del difetto **B**
- L'eco di fondo più vicino **C**
- L'eco di fondo intermedio **D**

Come fatto anche nel Capitolo 2, è stato necessario preparare il segnale acquisito attraverso una preliminare pulitura e poi successiva processazione, per estrarre la sola componente alla frequenza di eccitazione. Entrambe le operazioni sono state eseguite utilizzando in due maniere differenti la trasformata Wavelet.

Per quanto riguarda l'operazione di de-noising, come già fatto precedentemente (Paragrafo 2.2.3), si è utilizzata prima la decomposizione del segnale originale utilizzando la trasformata discreta wavelet che tramite la famiglia Daubechies wavelets del quarto ordine dedicata alle operazioni di pulitura segnale, ha estratto le sue componenti; poi con la ricostruzione si è riottenuto il segnale con le sole componenti significative. Nella Figura 3.12, in cui si riporta l'esempio di eccitazione dell'onda diagnostica a 45 kHz, si può vedere il risultato ottenuto dopo le operazioni di pulitura.

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

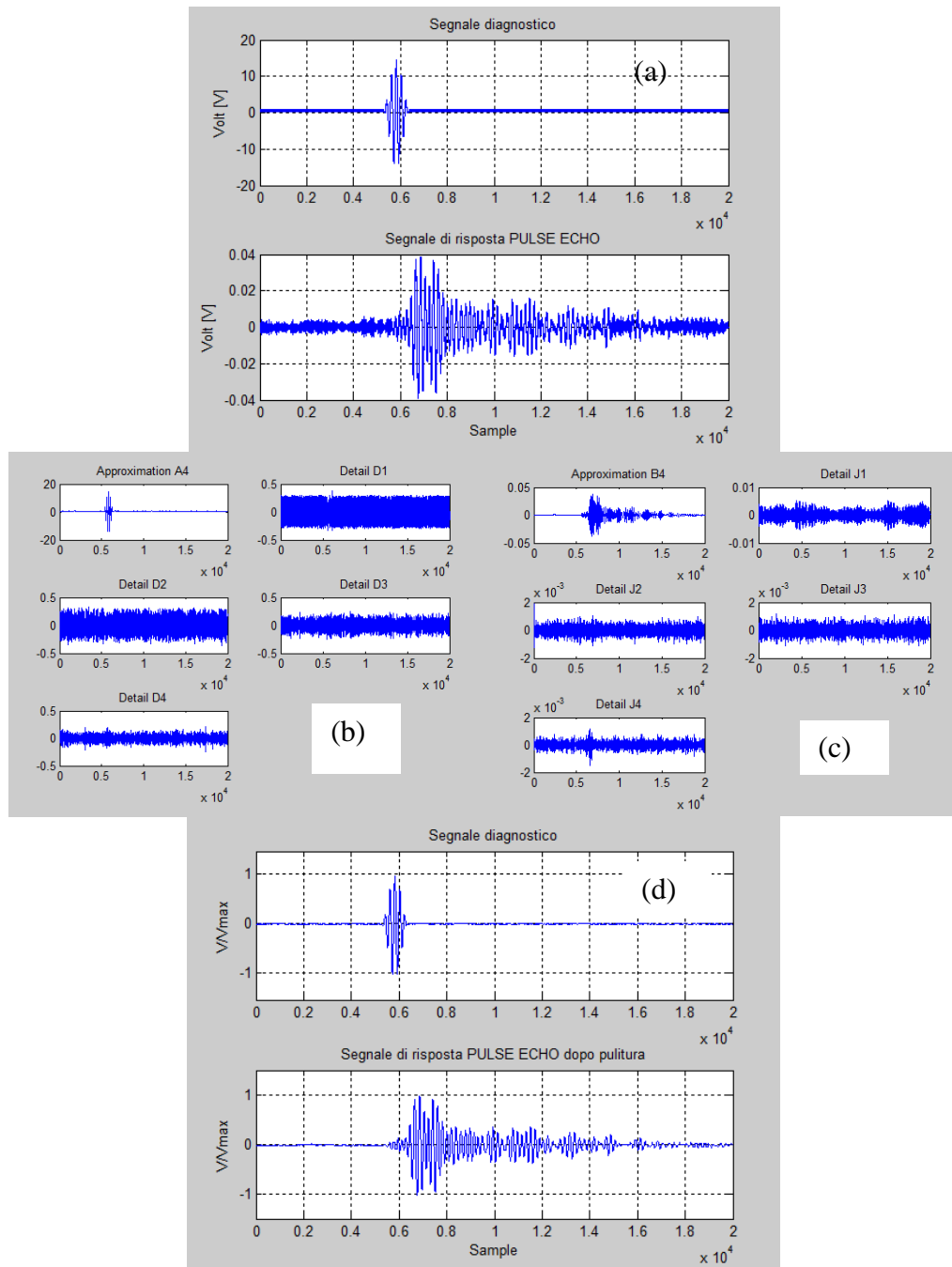


Figura 3.12: Segnale acquisito dalla catena di misura PE sul laminato SAATI EH550/T800S ad una frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 45kHz: a) segnale originale; b) coefficienti uscenti dalla decomposizione discreta wavelet del segnale diagnostico; c) coefficienti uscenti dalla decomposizione discreta wavelet del segnale contenente l'indicazione; d) segnale ricostruito dopo pulitura wavelet e normalizzazione

Dopo aver normalizzato il segnale a ± 1 , con lo scopo di dilatare la scala e visualizzare meglio anche variazioni più piccole, si è estratto il contenuto energetico del segnale alla sola frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica proveniente dall'attuatore. Questa operazione è stata eseguita per eliminare il contributo fuorviante delle altre componenti a frequenze diverse da quella centrale presenti all'interno del segnale, per escludere che quanto visualizzato non fosse realmente ciò che proveniva dal difetto ma altre componenti non significative. Tale estrazione del contributo energetico è stato eseguito come nel Capitolo 2 (Paragrafo 2.2.3), con la trasformata continua wavelet utilizzando la famiglia Morlet wavelets. Prima di eseguire l'estrazione è necessario ancora una volta inserire la frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica per effettuare una coerente suddivisione in componenti grazie alla funzione *centfrq* che necessita di conoscere la famiglia wavelet utilizzata. Fatto ciò è possibile eseguire, mediante la trasformata continua wavelet, il calcolo delle componenti sotto forma di coefficienti. Questi ultimi vengono inseriti in un apposito scalogramma dove vengono associati dei colori ai differenti contributi energetici delle singole componenti. La Figura 3.13 illustra il suddetto scalogramma sia per il segnale diagnostico, sia per il segnale registrato dal sensore PE. Lo scalogramma risultato della trasformata continua è ancora una matrice rettangolare $n \times m$, dove n è il numero di righe pari al numero di componenti (i coefficienti della wavelet) mentre m , il numero di colonne, è pari alla lunghezza del segnale. Per estrarre il contributo alla sola frequenza di eccitazione basta scorrere la matrice dello scalogramma e posizionarsi sulla riga con il più alto contributo energetico. La Figure 3.14 e 3.15 riportano i segnali estratti alla frequenza di eccitazione di 45 kHz provenienti dal sensore PE montato sulla parte inferiore sinistra del laminato SAATI EH550/T800S.

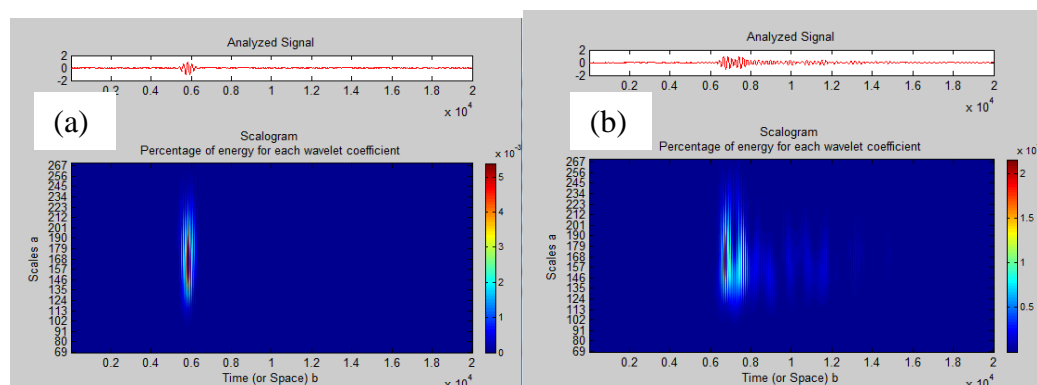


Figura 3.13: Scalogramma wavelet: a) segnale diagnostico; b) segnale Pulse echo

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

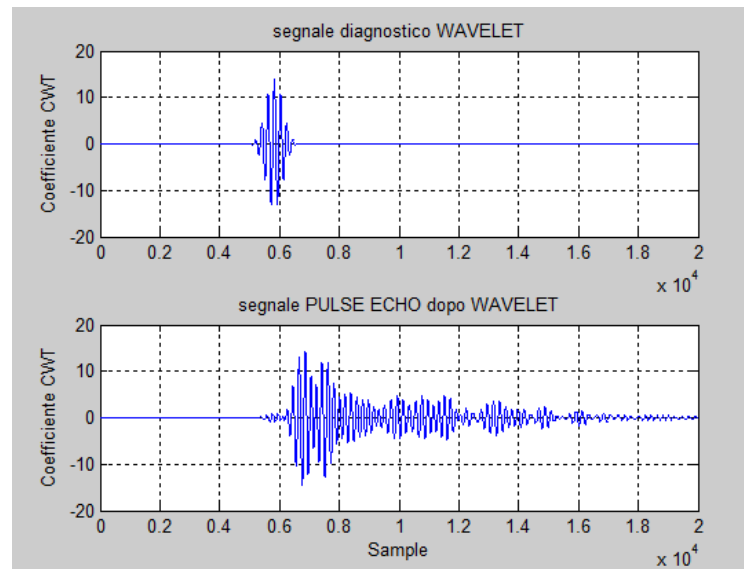


Figura 3.14: Segnale diagnostico e segnale Pulse Echo, estratti alla frequenza di eccitazione di 45kHz

A questo punto si è pronti per calcolare l'involuppo del coefficiente estratto al massimo contenuto energetico. Nuovamente sfruttiamo l'involuppo di Hilbert riportato nel Paragrafo 2.3.1, il quale ribalta i picchi negativi del segnale dato in ingresso e somma i contributi di ognuno di essi unendo i singoli punti di massimo. La Figura 3.15 mette in luce l'operazione di involuppo appena svolta.

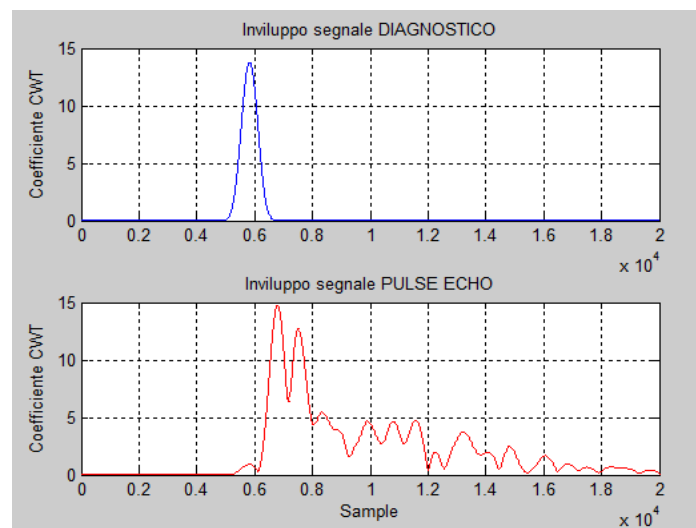


Figura 3.15: Involuppo del segnale diagnostico e del segnale PE a 45kHz, proveniente dal sensore posizionato sulla parte inferiore sinistra del laminato SAATI EH550/T800S

Inizia la fase più delicata. La vera e propria analisi del segnale, attribuire cioè il significato corretto ad ogni informazione contenuta nel segnale appena processato. Si è esposto nella Figura 3.11 il comportamento del modo propagativo A_0 quando questo si disperde dal punto di eccitazione. È ora necessario dimostrare che effettivamente il segnale rappresenti ognuno dei contributi responsabili degli echi A, B, C e D. Si è detto che il modo A_0 antisimmetrico è una vibrazione flessionale propagante in superficie del laminato fuori piano, in oltre si è specificato il fatto che quest'ultimo può interagire molto bene con corpi che vengono messi a contatto con la superficie, a differenza del modo S_0 che, invece, propagando nel piano è più difficilmente investigabile. Si è pensato quindi che per individuare i contributi sarebbe stato sufficiente smorzare settorialmente la vibrazione lungo i percorsi individuati dallo schema di Figura 3.11. Essendo i percorsi A, B, C e D a differente distanza, i corrispettivi echi risultano sul tracciato a distanze temporali differenti, quindi smorzandone uno alla volta, i corrispondenti picchi avrebbero dovuto subire una variazione di ampiezza. Così facendo si è riusciti a caratterizzare ogni eco di fondo e di conseguenza anche l'eco del difetto. Infatti, noto che la distanza sul tragitto B percorsa due volte è minore di quella degli echi di fondo C e D, il picco che si trova tra l'onda diretta A e il primo echo di fondo C è certamente l'eco del difetto, la Figura 3.16 descrive l'analisi del segnale PE.

Analizzando in questa maniera il segnale, si è potuto concludere che nel caso in cui le delaminazioni fossero già presenti nel laminato e non fosse possibile avere un segnale di riferimento prima di queste, il metodo individua bene il danno solo se quest'ultimo è posizionato sulla direzione di propagazione dell'onda. È fondamentale per ciò che il sensore PE debba essere posizionato sulla direzione propagativa. Questo è tanto più stringente quanto più il difetto è piccolo.

Ulteriore passaggio è stato il calcolo della distanza del danno dal sensore PE, confrontando poi ciò che si è ottenuto con la corrispondente distanza fornita dalle prove radiografiche. Per fare ciò si è calcolata la velocità di propagazione del modo A_0 come fatto nel Capitolo 2, nota la distanza tra gli attuatori e il sensore PE. Successivamente, nota la velocità di A_0 , è stato possibile calcolare la distanza del danno dal sensore PE, moltiplicando, la velocità appena calcolata, per il Δt tra segnale di prima trasmissione e l'eco del difetto.

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

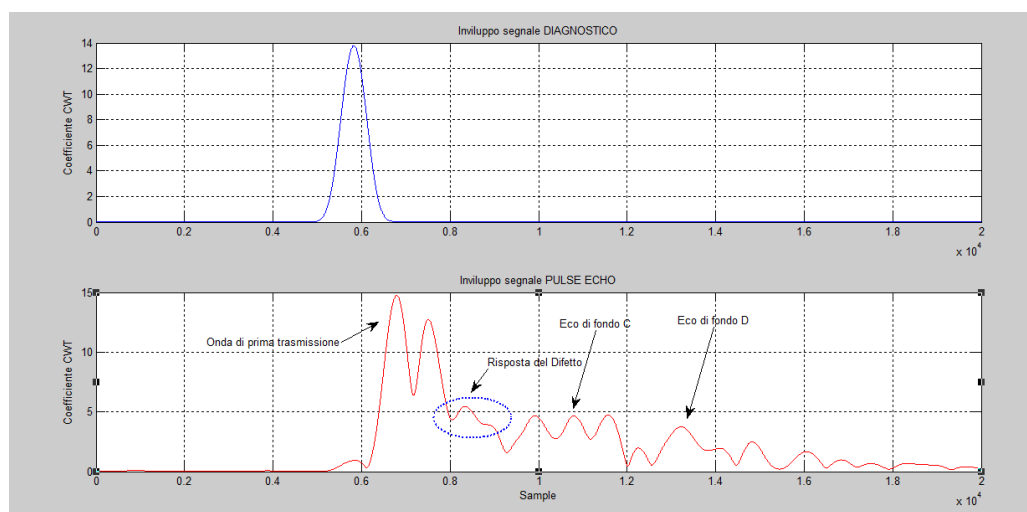


Figura 3.16: Caratterizzazione degli echi di fondo e dell'eco del difetto con una frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 45 kHz, sul laminato

Tale Δt è stato ottenuto, conoscendo il numero di punti campionati tra onda di prima trasmissione e eco del difetto, con la frequenza di campionamento impostata sull'oscilloscopio. La distanza ottenuta è da dividere per due per ottenere la reale posizione del danno, dato che l'onda torna per riflessione. Le prove sono state eseguite per tutte e due le piastre andando a considerare frequenze differenti. La Tabella 3.5 mette in luce le condizioni di eccitazione dell'onda diagnostica e le frequenze di campionamento utilizzate.

Frequenza onda diagnostica [kHz]	Campionamento oscilloscopio [Msamp/s]
45	25
60	25
80	25

Tabella 3.4: Frequenze di eccitazione e campionamento oscilloscopio

In conclusione, si è cercato di esprimere un parametro sintetico che potesse identificare le caratteristiche del difetto stesso, come dimensione, posizione nello spessore e infine frequenza dell'onda diagnostica di indagine. Questo parametro, denominato genericamente in questo lavoro con K , si è definito come il rapporto tra l'ampiezza dell'eco del difetto e l'ampiezza dell'onda di prima trasmissione. L'equazione 3.4, ne esprime la forma:

Capitolo 3

$$K = \frac{\text{Ampiezza onda eco del difetto}}{\text{Ampiezza onda di prima trasmissione}} \quad (3.4)$$

Tale parametro sarà oggetto di studio nel Capitolo 5, in cui con l'analisi statistica DOE andremo ad investigare quali dei parametri, come posizione nello spessore del laminato, dimensione del difetto e frequenza dell'onda diagnostica, risultino essere significativi nella descrizione del danno da parte del parametro K.

Riportiamo qui di seguito nella Tabella 3.5 e 3.6 i risultati ottenuti applicando questo approccio, uniamo a questi risultati quelli provenienti dal test radiografico.

PIASTRA UNO

Prova RX 8 A			
Frequenza	45 [kHz]	60 [kHz]	80 [kHz]
Distanza PE	101,18 [mm]	91,69 [mm]	90,5 [mm]
K	0,0838	0,1152	0,156
Errore localizzazione %	7,98%	-2,14%	-3,41%
Distanza RX 93,7 [mm]		Delaminazione 24 [mm]	

Prova RX 6 B			
Frequenza	45 [kHz]	60 [kHz]	80 [kHz]
Distanza PE	103,65 [mm]	90,56 [mm]	90,51 [mm]
K	0,079	0,0891	0,0885
Errore localizzazione %	4,8%	-8,43%	-8,48
Distanza RX 98,9 [mm]		Delaminazione 24,81 [mm]	

Prova RX 9 C			
Frequenza	45 [kHz]	60 [kHz]	80 [kHz]
Distanza PE	101,9 [mm]	108,54[mm]	99,66[mm]
K	0,0819	0,118	0,1367
Errore localizzazione %	-0,97%	5,48%	-3,14%
Distanza RX 102,9 [mm]		Delaminazione 10,31 [mm]	

Analisi dell'interazione di un onda di Lamb con delaminazioni artificiali

Prova RX 7 D			
Frequenza	45 [kHz]	60 [kHz]	80 [kHz]
Distanza PE	##	97,87 [mm]	97,58 [mm]
K	##	0,039	0,0805
Errore localizzazione %	##	-9,71%	-9,98%
Distanza RX 108,4 [mm]		Delaminazione 8,99 [mm]	

Tabella 3.5: Risultati localizzazione difetto tramite approccio PE piastra uno SAATI EH550/T800S

PIASTRA DUE

Prova RX 1 A			
Frequenza	45 [kHz]	60 [kHz]	80 [kHz]
Distanza PE	87,3 [mm]	87,3 [mm]	111,6 [mm]
K	0,212	0,123	0,160
Errore localizzazione %	-17,09%	-17,09%	5,98%
Distanza RX 105,3 [mm]		Delaminazione 24 [mm]	

Prova RX 2 B			
Frequenza	45 [kHz]	60 [kHz]	80 [kHz]
Distanza PE	##	94,2 [mm]	97,0 [mm]
K	##	0,2301	0,2141
Errore localizzazione %	##	-8,18%	-5,45%
Distanza RX 102,6 [mm]		Delaminazione 22,9 [mm]	

Prova RX 4 C			
Frequenza	45 [kHz]	60 [kHz]	80 [kHz]
Distanza PE	116,72 [mm]	102,7 [mm]	100,26 [mm]
K	0,141	0,1308	0,1184
Errore localizzazione %	14,21%	0,48%	-1,89%
Distanza RX 102,2 [mm]		Delaminazione 7,5 [mm]	

Capitolo 3

Prova RX 3 D			
Frequenza	45 [kHz]	60 [kHz]	80 [kHz]
Distanza PE	109,5 [mm]	110,0 [mm]	103,3 [mm]
K	0,0687	0,0578	0,1331
Errore localizzazione %	1,76%	2,23%	-3,99%
Distanza RX 107,6 [mm]		Delaminazione 9,4 [mm]	

Tabella 3.6: Risultati localizzazione difetto tramite approccio PE piastra due SAATI EH550/T800S

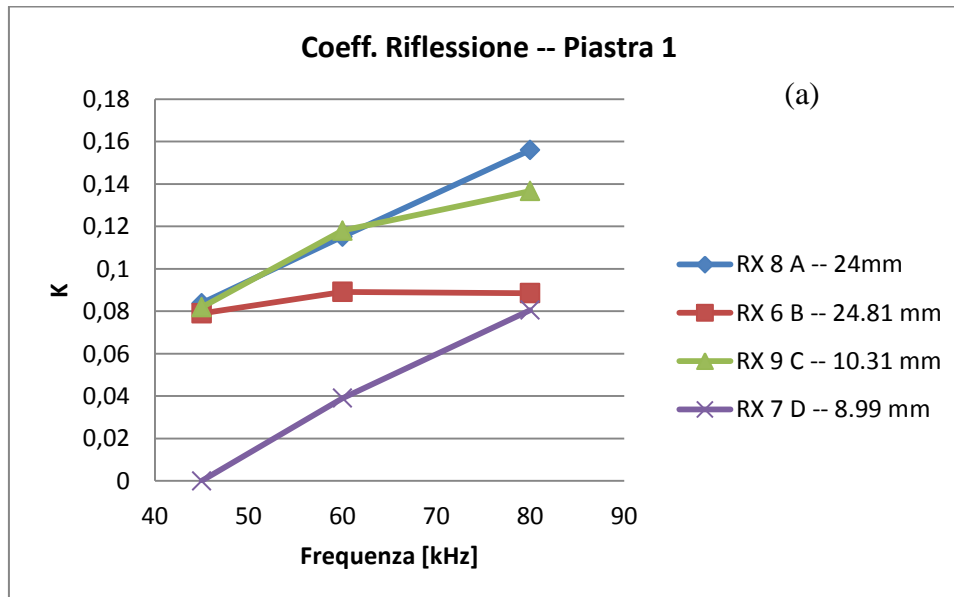
3.4.3 Conclusioni sui risultati finali Pulse Echo con difetti artificiali

Dopo aver analizzato i risultati e averli confrontati con quelli ottenuti dalle prove radiografiche, si può affermare che il metodo PE unito all'eccitazione del modo propagativo A_0 fornisce una buona attendibilità sulla localizzazione del danno. Si nota infatti che rispetto alla distanza della delaminazione ottenuta dalla prova radiografica, per tutte le frequenze la distanza individuata cade nell'ordine di grandezza ottenuto. Non bisogna dimenticare però che questo set-up sperimentale è stato realizzato utilizzando dei sensori PZT incollati manualmente sulla superficie del laminato, utilizzando una quantità di adesivo ciano-acrilato poco controllabile di volta in volta, ciò si ripercuote sull'incollaggio finale di un sensore rispetto ad un altro che risulta essere soggetto a variabilità poco valutabile nel montaggio e nella conseguente risposta del segnale registrato. Si può quindi ritenere che il risultato ottenuto sia più che accettabile. Occorre sottolineare che in due prove effettuate con una frequenza di eccitazione pari a 45 kHz non è stato possibile individuare il picco dell'eco del difetto, di conseguenza non è stato possibile individuare la posizione di quest'ultimo. Il probabile motivo per cui questo fenomeno si è verificato, è da ricercare sulle corrispondenti prove radiografiche, rispettivamente RX 7 D e RX 2 B, nelle quali abbiamo osservato che il sensore PE non era in asse con il difetto. Questo ha fatto sì che facendo compiere un tragitto maggiore all'onda riflessa dal danno, l'informazione è stata fusa all'interno del primo eco di fondo, causando indeterminazione sul picco del difetto. Se ne conclude che poter strumentare piastre molto grandi, o comunque strutture che presentano i loro bordi sufficientemente lontani da essere assimilabili a piastre "infinite", permette di eliminare il problema dell'indeterminazione dell'eco del difetto negli echi di fondo. È chiaro che questa è una affermazione valida in fase di

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

studio e ricerca, in cui le delaminazioni hanno una ben precisa posizione, infatti in condizioni di normale esercizio, non è possibile conoscere a priori dove nascerà il danno all'interno di una struttura, perché esso potrebbe nascere vicino ai bordi, facendo ripresentare il problema. È una buona soluzione quindi prevedere di avere più sensori a formare un array, come noto dalla teoria SHM vista nel Capitolo 1, in maniera da scongiurare la indeterminazione con una sorta di triangolazione del segnale proveniente dal difetto. In generale comunque la tecnica PE ha prodotto buoni risultati in termini di localizzazione. In particolare si nota che sulle otto misure effettuate, ben sei hanno dato un errore di localizzazione minore del 10% con frequenze di eccitazione di 45 e 60 kHz e solamente due per frequenze di eccitazione di 80 kHz. Delle sei prove, ben tre hanno ottenuto un errore minore del 3% per frequenze di eccitazione dell'onda diagnostica pari a 60 kHz. È quindi ragionevole supporre che la frequenza migliore per la localizzazione del difetto sia 60 kHz in approccio PE.

Si riportano nella Figura 3.17, i grafici che illustrano l'andamento del coefficiente di riflessione K in funzione della frequenza dell'onda diagnostica attuata nel laminato SAATI EH550/T800S.



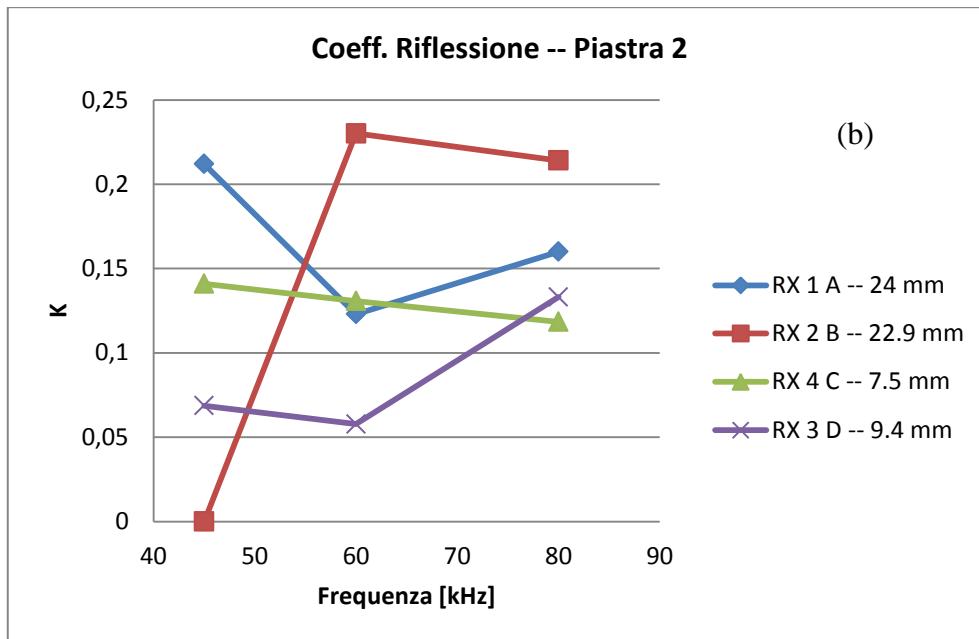


Figura 3.17: Coefficienti di riflessione ottenuti per l'approccio PE su piastra SAATI EH550/T800S difettata artificialmente: a) piastra 1, b) piastra 2

Dall'analisi qualitativa dei due grafici, si nota una probabile interazione con la frequenza ma soprattutto con la dimensione della delaminazione. Ciò che si osserva, è che all'aumentare della dimensione il coefficiente K è più elevato. Questo significa che con più il danno è esteso con più energia viene riflessa verso il sensore. Si rimanda tuttavia al Capitolo 5 per un'analisi statistica che permetterà di evidenziare se il fattore dimensione risulta effettivamente significativo sulla variazione del coefficiente K di riflessione.

3.5 Approccio Pitch Catch applicato ai difetti artificiali

Si analizza ora il secondo approccio che si sta studiando in questa tesi, ovvero la tecnica Pitch Catch per individuare la presenza di anomalie all'interno del laminato in questione. Questa tecnica non permette l'individuazione della posizione del difetto, ma solamente se quest'ultimo è presente o meno nel laminato. Non osservando il fenomeno di riflessione dell'onda nel momento in cui incontra un ostacolo, in questo caso la patch di teflon, non è possibile conoscere l'istante in cui l'onda ha interagito con il difetto, dal momento che quando giunge al sensore PC essa è già stata in qualche modo modificata dal difetto stesso. Scopo di questo paragrafo dedicato alla tecnica Pitch Catch è

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

essenzialmente identificare una maniera efficace con la quale quantificare come l'onda trasmessa viene modificata una volta che attraversa la delaminazione. Anche in questo caso, sebbene esistano molti coefficienti calcolabili su porzioni più o meno vaste di segnale acquisito che possano dare indice della variazione, è sempre indispensabile avere a disposizione un caso base, un segnale che possa fungere da riferimento. Il fatto che il laminato SAATI EH550/T800S sia stato prodotto con già all'interno le delaminazioni fa subito precludere la possibilità di operare facendo delle acquisizioni di riferimento. Si è dovuto perciò trovare un nuovo metodo che permetta di utilizzare lo stesso laminato con all'interno le delaminazioni artificiali per creare il riferimento che funga da base di confronto. Il caso Pulse Echo analizzato nel Paragrafo 3.4 ci è di enorme aiuto, infatti, in quel caso il sensore atto a registrare l'eco del difetto si trova incollato prima della delaminazione, dalla stessa parte dei PZT attuatori, si faccia riferimento alla Figura 3.11, allo stesso modo il sensore PC è sistemato a valle del danno, dalla parte opposta dei PZT attuatori. Noto questo, ipotizzando esente da difetti la parte di laminato compresa tra l'attuatore e il sensore PE, risulta logico identificare il sensore PE come un sensore PC ideale il cui segnale registrato non attraversi alcun difetto. Con ciò è immediato costruire il segnale di riferimento utilizzando la parte di segnale PE che riguarda l'onda di prima trasmissione, tutto ciò che viene temporalmente dopo tale onda, non è più di rilevanza ai fini della caratterizzazione PC. Sarà di esclusivo interesse soltanto l'onda di prima trasmissione, con la fondamentale differenza per cui la porzione di segnale estratta dal sensore PE supposto PC ideale non conterrà alcuna informazione di danno, mentre il segnale PC vero e proprio conterrà l'informazione riguardante il difetto. La Figura 3.18 rappresenta il ragionamento realizzato sul laminato e in fase di analisi post acquisizione.

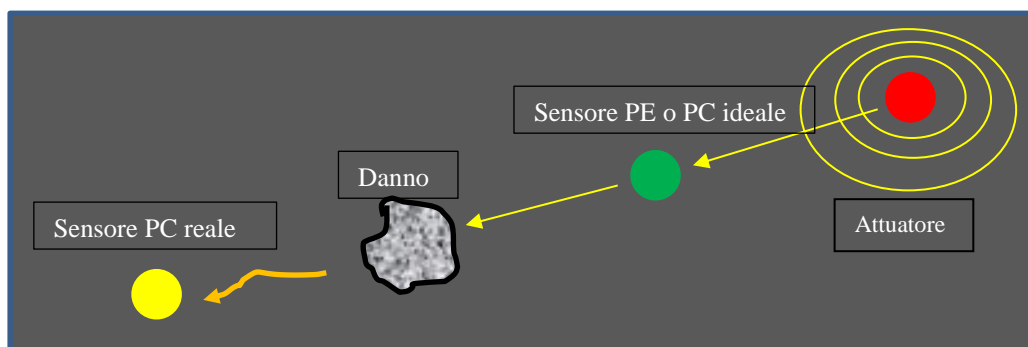


Figura 3.18: Schema Pitch Catch, ottenimento segnale riferimento e segnale d'analisi

Capitolo 3

Nota la possibilità di poter creare un riferimento disponendo di una piastra già difettata in partenza, è necessario considerare l'introduzione di alcuni elementi correttivi che rendano più solido il concetto. Il problema che nasce facendo queste assunzioni è l'effetto di attenuazione, infatti è chiaramente visibile dalla Figura 3.16, che la distanza percorsa dall'onda è considerevolmente differente dal primo traguardo (sensore PE) al secondo (sensore PC) considerando il medesimo attuatore. Se confrontassimo i segnali acquisiti dai due sensori, chiaramente si introdurrebbe il fattore attenuazione dell'onda nel percorrere il materiale, questo inficerebbe la reale informazione proveniente dal danno. Per eliminare l'effetto è necessario rapportare il segnale di riferimento ottenuto dal sensore PC reale, al segnale PC ideale ottenuto. In pratica una volta registrata l'ampiezza dell'onda trasmessa al sensore PC reale è necessario maggiorarla di quella parte di ampiezza persa nel percorrere il tragitto rispetto al sensore PE, così facendo è come considerare le due acquisizioni come se fossero state catturate dal medesimo sensore in termini di tragitto percorso.

È stato infatti osservato che: presi due punti di osservazione alla distanza d_1 e d_2 dall'attuatore, il rapporto delle ampiezze del segnale del modo antisimmetrico A_0 di Lamb misurato sui punti di misura, decresce proporzionalmente con l'inverso del rapporto delle radici quadrate delle distanze percorse. L'equazione (3.5) mette in luce questa relazione [3.9].

$$\frac{A(d_1)}{A(d_2)} = \frac{\sqrt{d_2}}{\sqrt{d_1}} \quad (3.5)$$

In cui $A(d_1)$ e $A(d_2)$ sono rispettivamente le ampiezze del segnale misurato alla distanza d_1 e d_2 . Nota quindi l'ampiezza del segnale PC reale e note le distanze d_1 e d_2 , è possibile risalire all'ampiezza che il segnale avrebbe come se non avesse percorso la distanza dal sensore PE al PC stesso, in questa maniera si elimina l'effetto dell'attenuazione. Rigirando l'equazione (3.5) possiamo calcolare il valore dell'ampiezza corretta come segue:

$$A(d_2) = A(d_1) * \frac{\sqrt{d_1}}{\sqrt{d_2}} \quad (3.6)$$

In cui riconosciamo

- $A(d_1)$: l'ampiezza del segnale PC reale alla distanza d_1 dall'attuatore
- d_1 : distanza del sensore PC dall'attuatore
- d_2 : distanza del sensore PC ideale dall'attuatore

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

- $A(d_2)$: Ampiezza del segnale Pitch Catch reale corretto alla distanza d_2

La correzione dell'ampiezza per eliminare il fenomeno dell'attenuazione risulta di fondamentale importanza per calcolo del coefficiente di trasmissione, indice sintetico più importante che racchiude le informazioni caratterizzanti la delaminazione, quali la dimensione, la posizione nello spessore del laminato e la frequenza utilizzata per eccitare l'onda diagnostica. Il coefficiente H , così è stato scelto di chiamarlo in questa parte del lavoro sul PC, è calcolato come il rapporto tra l'ampiezza dell'onda di prima trasmissione contenente l'indicazione, ovvero quella di registrata dal sensore PC reale corretta dell'attenuazione, e l'ampiezza dell'onda trasmessa di riferimento, registrata dal sensore PC Ideale. Utilizzeremo questo coefficiente nell'analisi statistica DOE nel Capitolo 5 in cui andremo a verificare la significatività di ogni fattore caratterizzante il difetto.

Esistono altri coefficienti utilizzati nell'analisi del segnale per comprendere la variazione di quest'ultimo. Quelli utilizzati in questa parte dell'analisi del comportamento Pitch Catch sono stati:

- Varianza del Segnale
- RMS (Root Mean Square)
- Crest Factor

Inoltre si è calcolato per ogni coppia di segnali riferimento – difetto i valori della velocità, al fine di osservare se il passaggio dell'onda ultrasonora antisimmetrica A_0 all'interno della delaminazione produceva una sorta di accelerazione o rallentamento.

Per ognuna di queste grandezze il modo di procedere è sempre stato di confronto, svolgendo l'analisi prima per il riferimento ottenuto dal sensore PC ideale e poi ripetendo i medesimi conti per il segnale PC reale. Il tutto è stato corredato dal calcolo della variazione percentuale.

3.5.1 *Set-Up sperimentale Pitch Catch e Analisi dei segnali*

Il Set-Up riguardante la sperimentazione Pitch Catch, ha previsto l'utilizzo dei sensori PZT incollati a valle del difetto rispetto all'attuatore nel momento in cui si sono svolte le prove radiografiche. La procedura utilizzata per la preparazione, prevede ancora una volta l'incollaggio manuale mediante cianoacrilato Loctite dei sensori PZT, solo dopo aver saldato i cavi di collegamento positivo e negativo dalle rispettive piazzole del sensore alla basetta di

collegamento (Capitolo 2). Il posizionamento dei rispettivi sensori PC è stato scrupolosamente effettuato in asse con i sensori PE a loro volta posizionati radialmente all'attuatore. L'attuazione dell'onda è stata effettuata mediante gli stessi attuatori destinati originariamente all'approccio PE connessi al circuito fase/contro-fase, inserito in modalità contro-fase, per magnificare il modo propagativo A_0 . La Figura 3.19 mette in luce una porzione di laminato SAATI EH550/T800S una volta strumentato in modalità PC.

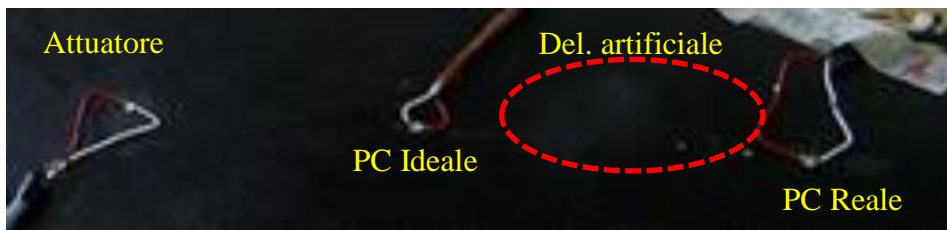


Figura 3.19: Porzione di laminato SAATI EH550/T800S adeguatamente strumentato per la prova Pitch Catch

La catena di misura utilizzata è sempre la medesima della Figura 2.18, in cui osserviamo il generatore di funzioni per l'emissione dell'onda diagnostica identificata nella funzione coseno finestrato Hanning a 5.5 cicli, l'amplificatore a banda larga per il raggiungimento di una tensione picco-picco pari a 30 V, il filtro passa alto e l'oscilloscopio per la visualizzazione e l'acquisizione dei segnali. La catena di misura è stata utilizzata sia per la creazione del segnale di riferimento, sia per l'ottenimento del segnale contenente l'indicazione.

Una volta resi disponibili i segnali in formato manipolabile .CSV, per ognuno di essi si sono eseguite le solite operazioni preliminari di pulitura ed estrazione del massimo contributo energetico alla frequenza di eccitazione, operazioni canoniche eseguite utilizzando rispettivamente le trasformate wavelet discreta e continua. La Figura 3.20, visualizza i risultati intermedi delle operazioni preliminari eseguite sui segnali ottenuti dal laminato SAATI EH550/T800S per ciò che riguarda la parte inferiore sinistra, con una frequenza di eccitazione di 45 kHz

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

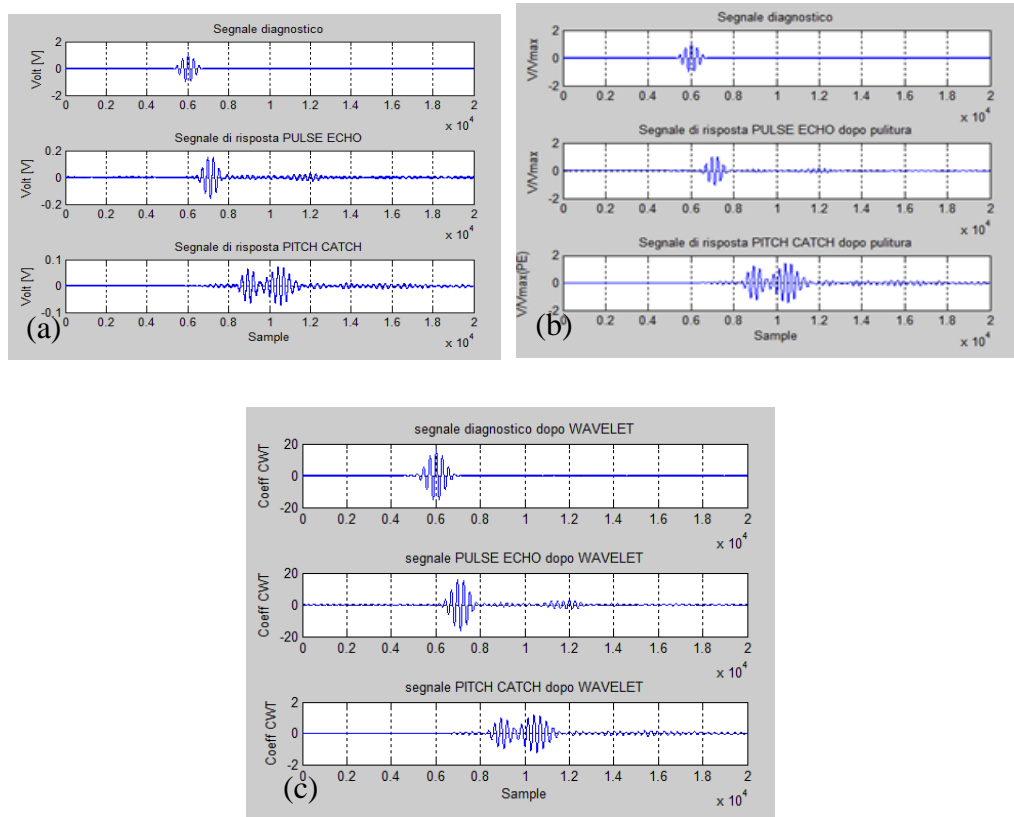


Figura 3.20: Operazioni preliminari sui segnali ottenuti per un'onda diagnostica a 45 kHz: a) segnale originale, b) segnale pulito mediante DWT con normalizzazione; c) segnale elaborato dall'estrazione del contributo energetico massimo alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica mediante CWT

A questo punto si è applicata l'operazione di involuppo di Hilbert come fatto più volte in precedenza, con l'applicazione della correzione d'ampiezza ai valori estratti dai picchi massimi.

Eseguita tutta la procedura, si è effettuato prima per il segnale di riferimento e poi per il segnale contenente il danno i calcoli riportati di seguito. Nell'ordine:

- Il calcolo della velocità di propagazione del modo antisimmetrico A_0

Il calcolo della velocità di propagazione prevede ancora una volta, di ottenere il valore del Δt di tempo che intercorre tra l'onda diagnostica e l'onda di prima trasmissione sia per il segnale di riferimento, catturato dal sensore PC ideale, sia per quello contenente l'indicazione, ottenuto dal sensore PC reale. Nota la distanza tra i due sensori dall'attuatore, è possibile calcolare facilmente la velocità come rapporto tra distanza e Δt .

Note quindi le due velocità è possibile calcolarne la differenza percentuale, in maniera da visualizzare l'effetto sulla dispersione da parte della delaminazione. Si è utilizzata l'equazione (3.7) seguente per ottenere la variazione:

$$P_{vel} = \frac{V_{PE} - V_{PC}}{V_{PC}} * 100 \quad (3.7)$$

In cui V_{PE} è la velocità misurata nel riferimento (sensore PE o PC ideale) e V_{PC} è la velocità misurata nel segnale contenente l'indicazione (sensore PC reale).

- **Calcolo della varianza delle due porzioni di segnali contenenti l'onda di prima trasmissione.**

In questo e negli altri casi, si sono limitati i vettori contenenti i singoli punti campionati alla parte contenente solo l'onda di prima trasmissione. Tutto ciò che è presente dopo, non è di interesse per gli scopi Pitch Catch, se considerassimo il segnale intero, dato che la posizione dei sensori è considerevolmente differente l'una rispetto all'altra, gli echi di fondo varierebbero in maniera importante. Questo si tradurrebbe in una variazione molto importante della varianza, che non è però generata dall'attraversamento del danno, ma degli echi di fondo differenti. L'espressione utilizzata per il calcolo della varianza è riportata nell'equazione (3.8).

$$\sigma^2(x) = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu(x))^2}{n-1} \quad (3.8)$$

In cui troviamo che x è la porzione di segnale di interesse, $\mu(x)$ è la media della porzione di segnale e n è la lunghezza del vettore del segnale considerato.

La varianza $\sigma^2(x)$, della variabile x è una funzione che fornisce una misura di quanto siano dispersi i valori assunti dalla variabile rispetto alla media del segnale. Quindi questa funzione ci permette di visualizzare quanto siano più o meno dispersi i valori del segnale prima e dopo l'attraversamento del difetto rispetto al valore centrale calcolato sul riferimento. Utilizzando l'equazione (3.7) ricalibrata sulla varianza, otteniamo la variazione in percentuale, come fatto per le velocità.

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

- **Root Mean Square (RMS)**

Si definisce RMS, il valore efficace di una funzione periodica. A sua volta si definisce valore efficace quel valore di una funzione costante con media pari a quella della funzione periodica in esame. In pratica, visualizza la potenza del segnale. L'espressione dell'RMS per un segnale discreto è riportato nell'equazione (3.9) in cui si identificano in x_i i singoli punti campionati del segnale e n la lunghezza del vettore corrispondente:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \quad (3.9)$$

È utile calcolarlo per entrambi i segnali al fine di visualizzare la variazione di potenza contenuta nella porzione di segnale dopo che questo ha attraversato il difetto.

- **Crest Factor (CF)**

Questo coefficiente mette in luce, all'interno del segnale, la presenza di uno o più picchi più o meno acuti. Essenzialmente va a calcolare un indice che aumenta proporzionalmente all'aumentare del numero di picchi e della loro forma acuta. Nel caso in esame, dato che la porzione di segnale analizzata non contiene solitamente degli spike, andremo a visualizzare quanto la forma d'onda risulta più o meno acuta in relazione al passaggio attraverso il danno. L'espressione del CF è riportata nell'equazione (3.10) qui di seguito:

$$CF = \frac{\max(x_i - \mu(x))}{rms(x)} \quad (3.10)$$

In cui troviamo al numeratore il valore massimo della differenza tra i singoli punti campionati del segnale e il suo valore medio, mentre al denominatore abbiamo l'RMS [3.10].

- **Coefficiente di Trasmissione**

Come già detto nel Paragrafo 3.5, anche in questo caso si è scelto di calcolare un parametro sintetico che potesse contenere al suo interno informazioni riguardanti la delaminazione. La scelta si è rivolta al calcolo del coefficiente di trasmissione H , sottoforma di rapporto tra le ampiezze delle onde trasmesse del segnale non normalizzato opportunamente corretto dall'effetto di attenuazione

prima di applicare la trasformata continua wavelet. L'equazione (3.11) esprime la forma del calcolo utilizzato:

$$H = \frac{A(d2)}{A(PE)} \quad (3.11)$$

In cui $A(d2)$ è l'ampiezza corretta dell'effetto di attenuazione in riferimento all'equazione (3.6), $A(PE)$ invece è l'ampiezza del segnale di riferimento ottenuto dal sensore PC ideale.

Note tutte queste grandezze si è pronti per analizzare i risultati ottenuti dalle prove Pitch Catch effettuate sui due laminati con difetti artificiali di patch di teflon delle dimensioni di 8 e 24 mm posizionati in superficie e sul fondo della lastra, si faccia riferimento alla Figura 3.1.

3.5.2 Risultati ottenuti dalla tecnica Pitch Catch in relazione ai difetti Artificiali.

Riportiamo qui di seguito le Tabelle 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 riassuntive che riportano tutti i valori calcolati di velocità, varianza, RMS, CF e coefficiente di trasmissione per le prove effettuate. Si è utilizzata, come di consuetudine, l'onda diagnostica corrispondente ad un coseno finestrato Hanning a 5,5 cicli con frequenze di: 35, 45, 50, 60, 80 kHz.

Fare riferimento alla seguente legenda:

- V_PE: Velocità calcolata al riferimento PE (o PC ideale)
- V_PC: Velocità calcolata al sensore PC reale
- % : Variazione in percentuale del segnale contenente l'indicazione rispetto al riferimento
- S_PE: Varianza del segnale di riferimento PE (o PC ideale)
- S_PC: Varianza del segnale contenente l'indicazione, PC reale
- RMS PE: Root Mean Square del segnale di riferimento
- RMS PC: Root Mean Square del segnale contenente l'indicazione
- CF PE: Crest Factor segnale di riferimento PE (o PE ideale)
- CF PC: Crest Factor segnale contenente l'indicazione PC reale
- Max PE: valore dell'ampiezza massima dell'onda di prima trasmissione di riferimento
- Max PC: valore dell'ampiezza massima dell'onda di prima trasmissione del difetto
- Max PC CORRETTO: Correzione dell'effetto attenuazione
- H: Coefficiente di trasmissione prima della correzione (comprende l'attenuazione)

Analisi dell'interazione di un onda di Lamb con delaminazioni artificiali

- H_Corr: Coefficiente di trasmissione dopo la correzione (esclusa l'attenuazione)
- Delta S: spazio percorso su cui è stata calcolata l'attenuazione

F kHz	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_PE	s_PC	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC_CORR	H	H_C orr	Delta S
35	1216,5	1332,2	9,51	7,86	8,15	3,72	0,52	0,18	-65,21	0,66	0,65	-0,55	0,80	0,28	0,46	0,35	0,58	206,00
45	1217,5	1364,6	12,08	29,60	26,30	11,17	0,89	0,30	-66,65	0,81	0,77	-5,00	1,47	0,48	0,80	0,33	0,55	206,00
50	1237,6	1350,5	9,12	25,98	25,08	-3,45	0,65	0,30	-53,34	1,00	0,96	-4,37	1,17	0,54	0,89	0,46	0,76	206,00
60	1208,7	1341,1	10,95	8,45	6,60	21,83	0,43	0,15	-65,45	0,92	0,84	8,64	0,74	0,25	0,42	0,34	0,57	206,00
80	1282,1	1389,4	8,37	0,36	0,27	23,33	0,08	0,04	-50,94	0,98	0,90	8,75	0,15	0,05	0,09	0,35	0,59	206,00

Tabella 3.7: Difetto da 24,8 mm posto sulla piastra uno in superficie (1° e 2° ply) al laminato SAATI EH550/T800S

f kHz	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC_CORR	H	H_Co rr	Delta S
35	1324,10	1320,70	0,26	7,01	3,22	53,98	0,81	0,41	49,10	0,69	0,41	40,00	1,26	0,56	0,93	0,44	0,74	207,00
45	1345,80	1363,70	1,33	33,04	18,71	43,37	1,41	0,61	57,09	0,95	0,76	19,62	2,47	0,99	1,64	0,40	0,67	207,00
50	1349,50	1369,20	1,46	30,03	16,90	43,71	1,32	0,53	59,78	0,98	0,88	9,55	2,32	0,91	1,51	0,39	0,65	207,00
60	1345,80	1372,90	2,01	10,30	5,42	47,42	0,80	0,31	60,87	0,94	0,89	5,95	1,39	0,54	0,90	0,39	0,65	207,00
80	1367,00	1410,60	3,19	0,44	0,23	47,15	0,17	0,07	61,35	0,89	0,84	5,78	0,30	0,11	0,19	0,38	0,64	207,00

Tabella 3.8: Difetto da 24 mm posto sulla piastra uno sul fondo (16° e 17° ply) al laminato SAATI EH550/T800S

f kHz	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC_CORR	H	H_Co rr	Delta S
35	1257,30	1326,50	5,50	9,40	9,26	1,41	0,66	0,26	60,99	0,55	0,54	1,20	0,97	0,37	0,60	0,39	0,62	182,00
45	1302,10	1355,70	4,12	30,04	17,68	41,13	0,77	0,36	53,52	0,96	0,60	37,06	1,35	0,54	0,86	0,40	0,64	182,00
50	1388,90	1375,60	0,96	23,25	21,37	8,09	0,53	0,23	57,22	0,86	0,90	4,84	0,90	0,39	0,65	0,44	0,72	182,00
60	1303,20	1374,10	5,44	5,17	5,28	2,04	0,35	0,15	58,11	0,90	0,85	5,77	0,61	0,25	0,41	0,41	0,67	182,00
80	1153,00	1284,70	11,42	0,17	0,17	1,61	0,81	0,89	9,65	0,82	0,67	18,28	0,12	0,05	0,08	0,41	0,68	182,00

Tabella 3.9: Difetto da 10,31 mm posto sulla piastra uno sul fondo (16° e 17° ply) al laminato SAATI EH550/T800S

Capitolo 3

f [kHz]	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC CORR	H	H_Co rr	Delta S
35	1352,30	1302,10	3,71	6,37	9,12	43,01	0,36	0,32	9,53	0,74	0,45	39,22	0,57	0,45	0,47	0,79	0,83	28,00
45	1267,00	1325,60	4,63	30,58	20,55	32,82	0,72	0,40	45,02	0,87	0,65	25,00	1,22	0,62	0,65	0,51	0,53	28,00
50	1236,50	1336,40	8,08	26,11	16,92	35,22	0,70	0,31	55,88	0,84	0,75	10,19	1,18	0,50	0,83	0,43	0,70	28,00
60	1223,30	1363,60	11,47	9,29	4,58	50,68	0,44	0,15	66,18	0,80	0,81	1,60	0,73	0,25	0,41	0,34	0,56	28,00
80	1233,40	1364,10	10,60	0,45	0,12	74,35	0,09	0,03	70,92	0,84	0,80	4,92	0,16	0,05	0,08	0,29	0,48	28,00

Tabella 3.10: Difetto da 9 mm posto sulla piastra uno in superficie (1° e 2° ply) al laminato SAATI EH550/T800S

f [kHz]	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC CORR	H	H_Co rr	Delta S
35	1242,50	1336,50	7,57	6,04	6,98	15,67	0,75	0,09	88,04	0,69	0,59	14,27	1,18	0,14	0,21	0,12	0,18	154,00
45	1294,60	1378,80	6,50	23,63	29,55	25,04	1,28	0,15	88,12	0,91	0,75	17,74	2,24	0,25	0,38	0,11	0,17	154,00
50	1235,10	1283,00	3,88	23,35	29,86	27,88	1,22	0,13	88,96	0,85	0,52	38,41	2,07	0,19	0,29	0,09	0,14	154,00
60	1245,70	1343,30	7,83	7,51	6,69	10,94	0,77	0,09	88,98	0,80	0,59	26,33	1,28	0,13	0,20	0,10	0,15	154,00
80	1124,00	1272,90	13,25	0,36	0,29	18,86	0,17	0,00	97,17	0,78	0,61	21,49	0,27	0,03	0,05	0,13	0,19	154,00

Tabella 3.11: Difetto da 24 mm posto sulla piastra due sul fondo(16° e 17° ply) al laminato SAATI EH550/T800S

f [kHz]	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC CORR	H	H_Co rr	Delta S
35	1371,70	1191,30	13,15	5,86	11,52	96,63	0,56	0,15	73,03	0,57	0,43	24,08	0,83	0,20	0,31	0,25	0,38	154,00
45	1347,20	1297,70	3,67	25,20	25,18	0,10	0,76	0,24	68,85	0,98	0,40	59,16	1,38	0,32	0,49	0,23	0,35	154,00
50	1299,70	1417,80	9,09	24,10	14,57	39,56	0,73	0,16	77,43	0,93	0,68	27,15	1,27	0,26	0,40	0,21	0,31	154,00
60	1311,60	1488,60	13,49	7,85	5,67	27,71	0,45	0,10	77,53	0,89	0,49	44,73	0,79	0,18	0,15	0,18	0,18	154,00
80	1375,60	1606,80	16,81	0,37	0,37	1,86	1,15	0,96	16,53	0,88	0,71	19,16	0,17	0,04	0,06	0,22	0,33	154,00

Tabella 3.12: Difetto da 22,9 mm posto sulla piastra due in superficie (1° e 2° ply) al laminato SAATI EH550/T800S

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

f [kHz]	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC_CORR	H	H_Corr	Delta S
35	1291,20	1261,10	2,33	7,27	4,98	31,53	0,67	0,37	45,00	0,57	0,34	40,81	0,99	0,48	0,73	0,48	0,73	154,00
45	1381,20	1353,00	2,04	23,79	23,94	0,63	1,09	0,47	56,82	0,71	0,75	6,95	1,72	0,76	1,16	0,47	0,67	154,00
50	1501,00	1385,50	7,69	27,01	24,95	7,62	0,74	0,30	58,98	0,93	1,01	8,45	1,29	0,55	0,84	0,43	0,65	154,00
60	1454,10	1376,50	5,34	6,73	6,55	2,65	0,49	0,21	57,27	0,88	0,92	3,89	0,83	0,36	0,55	0,49	0,66	154,00
80	1291,20	1359,50	5,29	0,28	0,26	6,75	0,09	0,04	57,22	0,92	0,97	5,03	0,16	0,07	0,11	0,44	0,67	154,00

Tabella 3.13: Difetto da 7,5 mm posto sulla piastra due sul fondo (16° e 17° ply) al laminato SAATI EH550/T800S

f [kHz]	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC_CORR	H	H_Corr	Delta S
35	1218,50	1301,70	6,83	5,66	6,13	8,26	0,86	0,31	64,46	0,56	0,41	27,11	1,27	0,41	0,63	0,33	0,49	154,00
45	1201,90	1348,70	12,21	29,38	17,60	40,09	1,48	0,52	64,99	0,81	0,50	38,04	2,43	0,75	1,13	0,31	0,46	154,00
50	1230,50	1360,00	10,52	29,82	23,76	20,33	1,13	0,34	70,26	0,96	1,03	7,45	1,98	0,62	0,95	0,31	0,48	154,00
60	1209,70	1361,10	12,52	8,60	6,03	29,94	0,73	0,21	71,43	0,94	0,80	14,99	1,27	0,35	0,53	0,35	0,42	154,00
80	1340,50	1428,60	6,57	0,34	0,27	18,74	0,15	0,04	72,91	0,97	0,87	10,46	0,26	0,07	0,10	0,27	0,39	154,00

Tabella 3.14: Difetto da 9,4 mm posto sulla piastra due in superficie (1° e 2° ply) al laminato SAATI EH550/T800S

Da un'attenta osservazione dei dati ottenuti, si possono esprimere alcune affermazioni di carattere generale con lo scopo di rendere fruibili questi risultati. Si vede una sorta di accelerazione della velocità di propagazione del modo A_0 che vede in generale un aumento per la piastra uno intorno al 6% medio nell'attraversamento della delaminazione. Andamento complessivo simile anche per la piastra due, anche se i valori sono differenti. La Figura 3.21, illustra l'andamento della variazione percentuale della velocità nell'attraversamento del difetto per entrambi i laminati SAATI EH550/T800S.

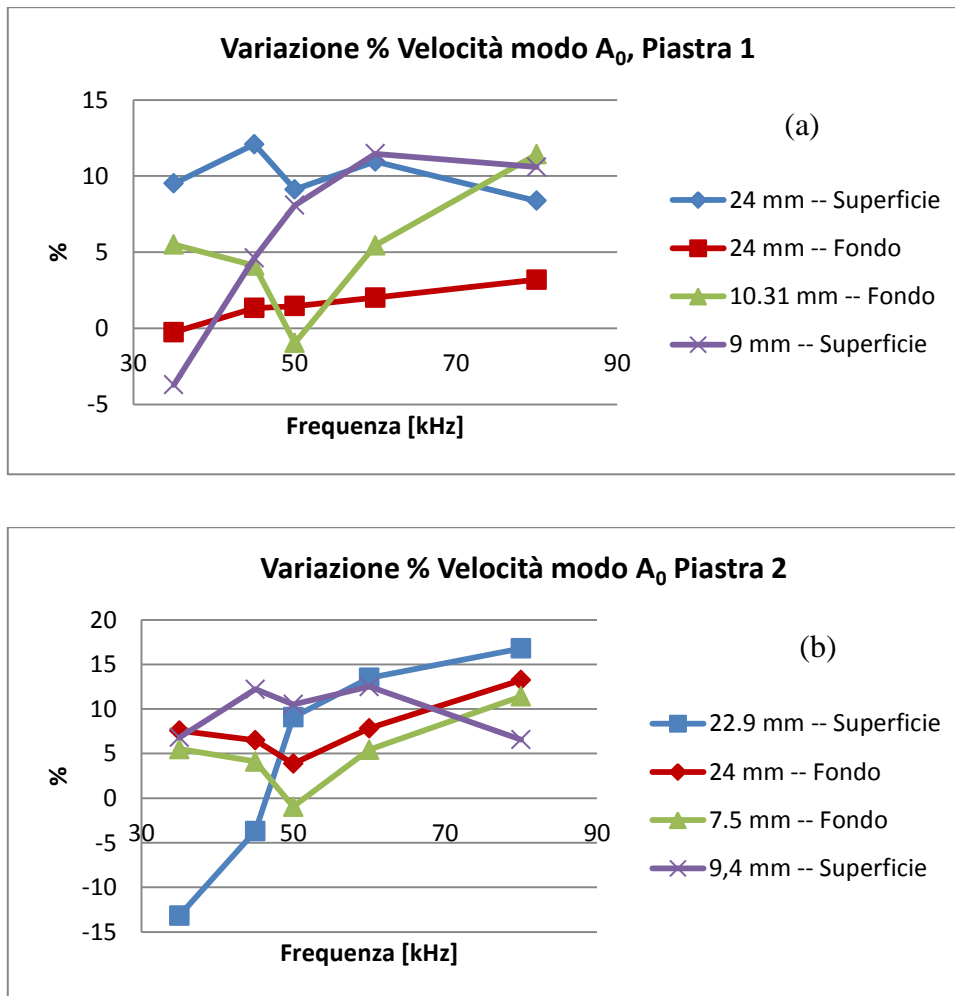


Figura 3.21: Variazione percentuale della velocità di propagazione del modo A_0 nell'attraversamento delle delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S: a) Laminato 1, b) Laminato 2

Non sono da escludere tuttavia due probabili fattori che determinano questa diversità tra le due piastre: presenza di anomalie non conosciute oltre alla patch di teflon lungo il cammino tra i due sensori, oppure effetto di disturbo a causa della variabilità dell'incollaggio del PZT PC. È da ricordare che i sensori PE sono stati incollati in un primo momento, rispetto ai sensori PC, introducendo un fattore di variabilità di questi ultimi dovuto alla procedura stata svolta interamente a mano.

Per la variazione percentuale della varianza dei segnali (Figura 3.22), calcolata sia per il riferimento che per il difetto, si assiste ad una generale diminuzione

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

intorno al 30% per la piastra uno, e intorno al 20% per la piastra due dopo che il difetto ha interagito con l'onda diagnostica.

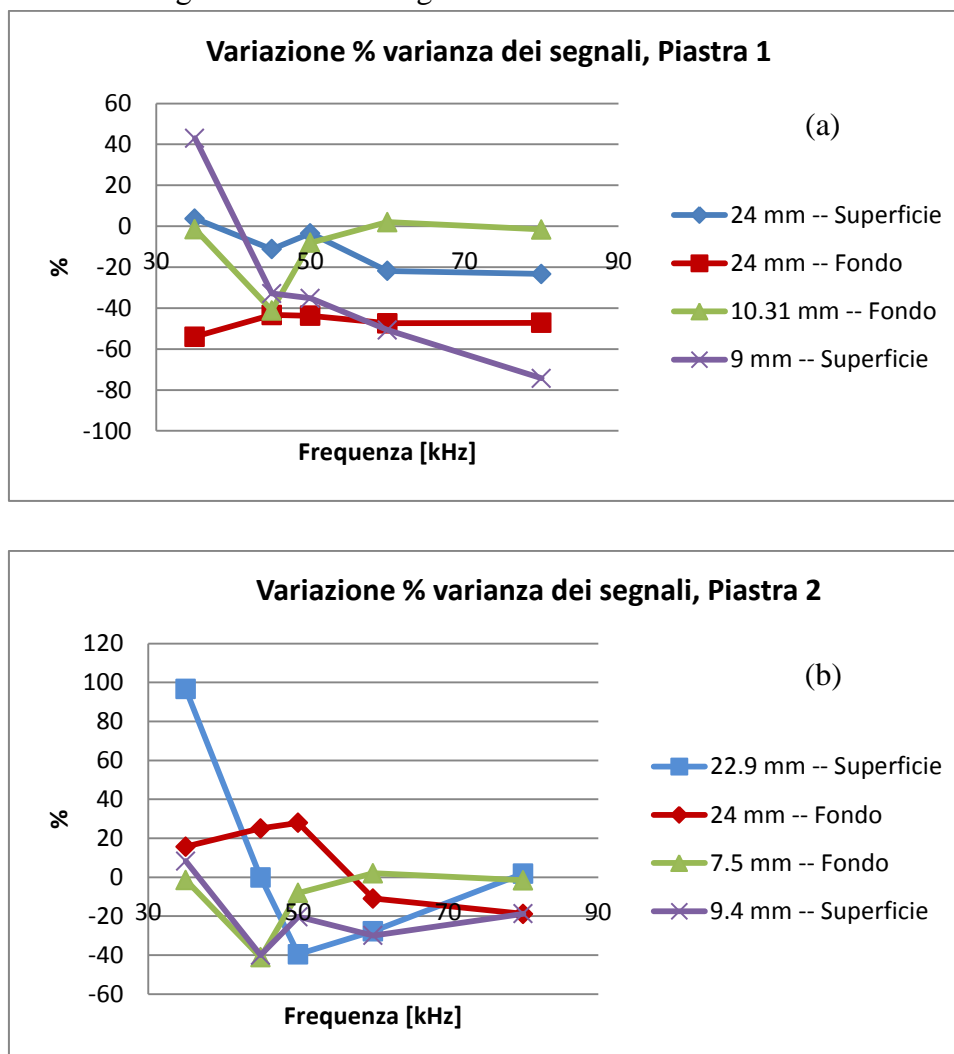


Figura 3.22: Variazione percentuale della varianza nell'attraversamento delle delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S: a) Laminato 1, b) Laminato 2

Vi sono due probabili “out of range” come nel caso della varianza calcolata per il difetto da 22,9 mm sulla piastra 2 alla frequenza di 35 kHz, in cui si vede una variazione rispetto al caso base del 96 %. Possiamo ricondurre la causa di questa variazione, ancora una volta alla diversità dell'incollaggio rispetto al sensore del riferimento, oppure alla presenza di qualche anomalia incognita o ancora al posizionamento fuori asse del sensore rispetto al difetto.

Capitolo 3

La Figura 3.23, mostra i risultati ottenuti dalla variazione dell'RMS. Nel laminato 1, si osserva una diminuzione dell'RMS intorno al 60% medio, come nel laminato 2. Gli andamenti, sono simili anche se il valore della percentuale è differente.

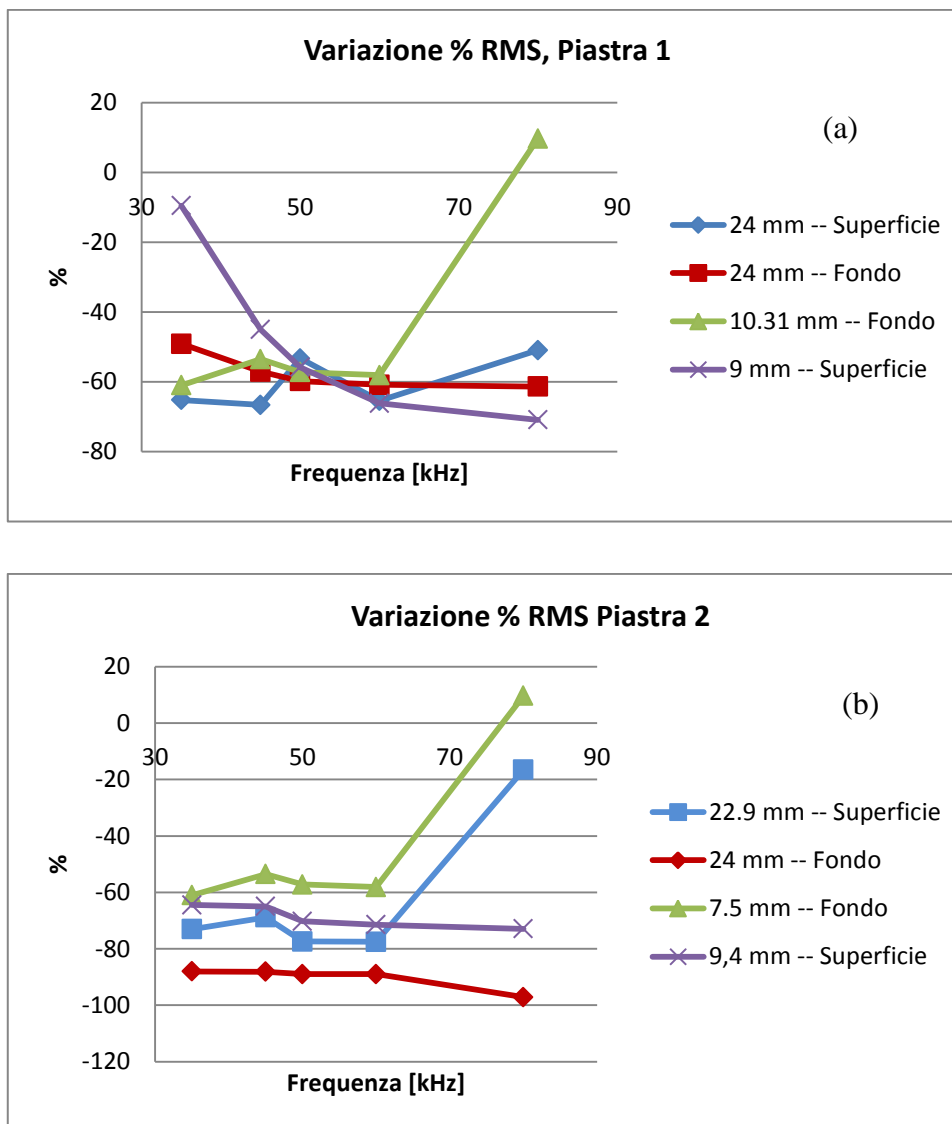


Figura 3.23: Variazione percentuale dell'RMS nell'attraversamento delle delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S: a) Laminato 1, b) Laminato 2

Come ultimo, si riportano in Figura 3.24 i grafici della variazione del CF, nei quali si vede in generale una diminuzione del valore dopo il passaggio attraverso la delaminazione. Osservando gli andamenti, si denota che vi è diversità,

Analisi dell'interazione di un'onda di Lamb con delaminazioni artificiali

solamente il difetto più piccolo posto sul fondo del laminato (16° e 17° ply), presenta la medesima forma del tracciato confrontando il laminato 1 con il laminato 2.

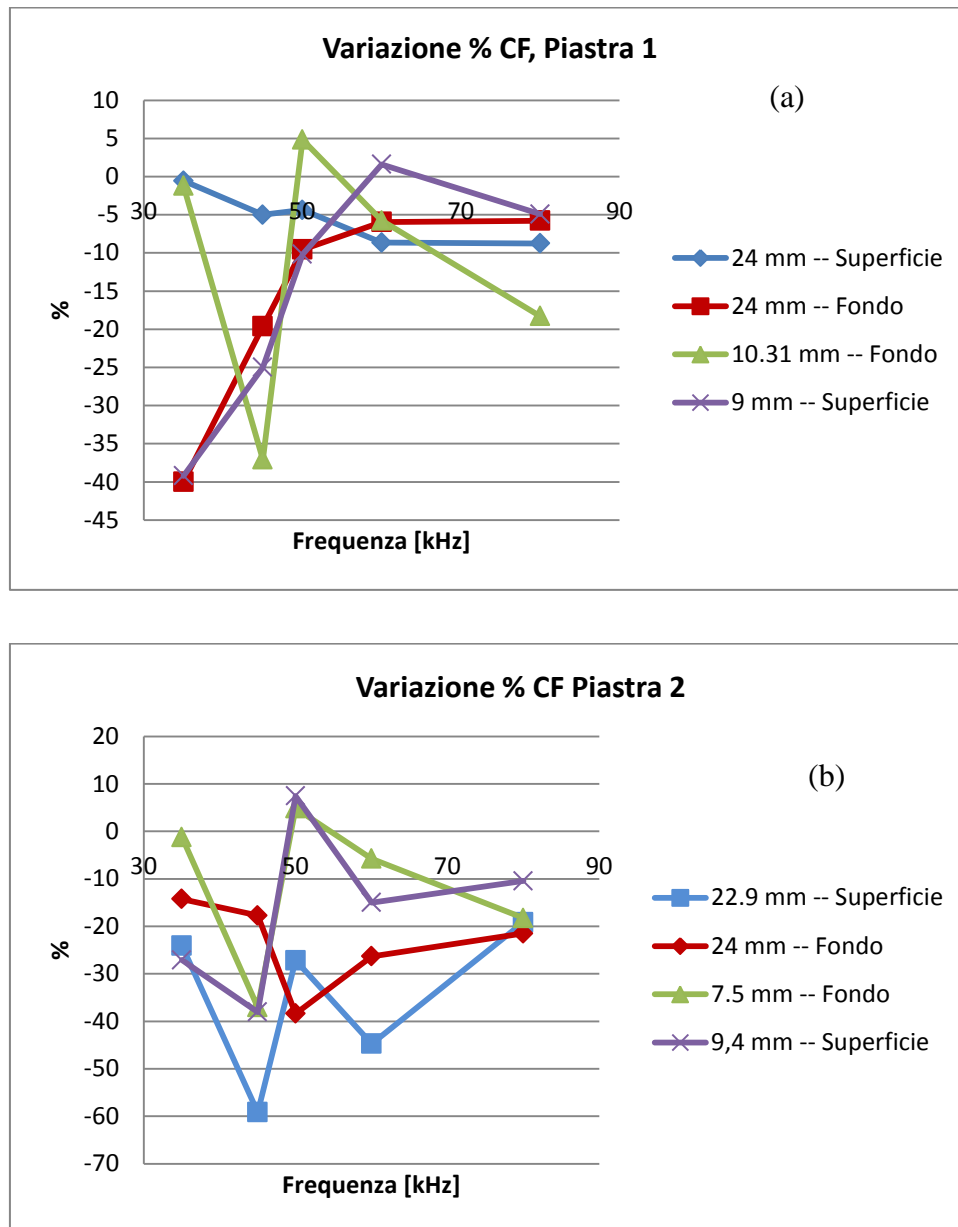


Figura 3.24: Variazione percentuale del CF nell'attraversamento delle delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S: a) Laminato 1, b) Laminato 2

Possiamo in generale concludere che all'attraversamento di una delaminazione in modalità Pitch Catch, si osserva:

- una accelerazione dell'onda antisimmetrica A_0
- una riduzione della potenza del segnale, identificata nella diminuzione del valore RMS motivato dal fatto che parte dell'energia posseduta dall'onda incidente viene dispersa in riflessione per effetto del danno stesso.
- una riduzione della varianza, i segnali si raccolgono più vicino al valore medio
- una riduzione del CF, ovvero si ha uno schiacciamento del picco dell'onda trasmessa rispetto al caso base.

Questi parametri potrebbero essere efficacemente utilizzati in un sistema SHM andando a monitorare la riduzione di ognuno di essi alla nascita di un eventuale danno all'interno della struttura. Con la sostanziale differenza che in una struttura reale il cui stato di salute è ritenuto ottimale al tempo zero in cui il sistema SHM inizia a funzionare, ogni acquisizione precedente fungerà da riferimento rispetto all'acquisizione successiva. Andando a monitorare la diminuzione dei singoli parametri è possibile affermare che qualche cosa di anomalo sta nascendo nella struttura stessa, dando così possibilità di intervento prima del cedimento.

3.6 Bibliografia

Nel Capitolo 3 si è fatto riferimento ai seguenti testi, articoli e pagine internet:

[3.1] John C. Kotz, Paul M. Treichel, Gabriela C. Weaver, *Chimica*, edizioni EdiSES

[3.2] http://www.akisrx.com/inglese/htm/lafisica_x.htm

[3.3] Arthur H. Compton, *A QUANTUM THEORY OF THE SCATTERING OF X—RAYS BY LIGHT ELEMENTS*

[3.4] Paul A.Tipler, *Invito alla fisica*, Edizioni Zanichelli

Analisi dell'interazione di un onda di Lamb con delaminazioni artificiali

- [3.5] Radiolight Gilardoni Be, *Secifiche Tecniche*
- [3.6] http://www.agfa.com/sp/global/en/internet/main/products_services/prod_cat/index.jsp
- [3.7] AIM (Associazione Italiana Metallurgia), “*Le prove non distruttive*”, Collana Tecnica AIM
- [3.8] IIS *istituto italiano della saldatura* ente morale “*Welding Inspection*”
- [3.9] Kim, S.B., Sohn, H., *Instantaneous reference-free crack detection based on polarization characteristics of piezoelectric materials*. Smart Materials and Structures 16, 2375–2387 (2007)
- Prasad, S.M., Balasubramaniam, K., Krishnamurthy, C.V. *Structural health monitoring of composite structures using Lamb wave tomography*. Smart Materials and Structures 13, N73–N79 (2004)
- [3.10] Ernest O. Doebelin, *Strumenti e metodi di misura*, Seconda Edizione McGraw-Hill

Capitolo 4 – Analisi dell’interazione delle onde di Lamb con difetti naturali

4.1 Caratterizzazione delle delaminazioni naturali ottenute mediante prove di impatto

In questo nuovo capitolo, si ripropone l’approccio Pulse Echo e Pitch Catch per delle condizioni più vicine alla realtà. I difetti artificiali che simulano una delaminazione, costituiti da patch di teflon circolari, non rappresentano coerentemente ciò che avviene nella struttura composita durante il normale esercizio quando all’interno di questa viene a crearsi il danno. La delaminazione prodotta, inserendo patch di teflon circolari, risulta essere regolare e ben definita, in una reale delaminazione invece il difetto è disomogeneo e irregolare, si ha infatti rottura della fibra, scollamento della matrice, sollevamento di uno o più ply intorno alla zona interessata. È sicuramente di interesse osservare la risposta dell’approccio PE e PC con onde di Lamb in relazione a questo tipo di danno.

L’ottenimento delle delaminazioni naturali è stata conseguita mediante prove di impatto ad energia crescente, che richiede un breve approfondimento per meglio comprendere la teoria che regola questo tipo di prove che hanno generato il risultato dei test.

4.1.1 Prove di impatto, cenni sui meccanismi e sugli effetti di danno

Le strutture in CFRP, come il laminato composito SAATI EH550/T800S possiedono elevatissime caratteristiche meccaniche di resistenza statica in relazione al peso ma non altrettanto per la resistenza a carichi dinamici impulsivi come gli impatti a bassa velocità, eventi che si possono verificare durante il normale esercizio della struttura. Se un laminato composito è soggetto ad un impatto a sufficiente energia, si possono verificare una moltitudine di danni come:

- Cricatura della matrice
- Delaminazione
- Rottura della fibra

- Indentazione e piegatura del punto impattato con conseguente debonding
- Espulsione di fibra e matrice dal laminato stesso.

Questi danni provocati sulla struttura a seguito di un impatto, incidono negativamente sulla rigidità e sulla resistenza del materiale stesso.

Per prevedere il comportamento in caso di rottura da impatto a bassa velocità, è fondamentale conoscere le caratteristiche meccaniche come rigidità, resistenza statica e resistenza a fatica del materiale, anche la forma del corpo in collisione sul pezzo ha influenza sull'estensione del danno, si è visto infatti che impattatori a forma sferica, producono una zona di delaminazione maggiore rispetto a forme coniche. Le dimensioni dell'impattatore in relazione alla zona del danno, sono meno influenti, infatti all'aumentare delle dimensioni del naso, si genera un aumento moderato della zona delaminata. Il raggio di punta del proiettile e all'energia con cui questo viene proiettato sul laminato, hanno effetti molto più marcati. Infatti raggi di punta piccoli e elevata energia, sono direttamente proporzionali alla dimensione della zona interessata dal danno [4.1].

In generale però è pratica comune legare l'energia di impatto con l'area delaminata e gli effetti sul materiale in termini di resistenza meccanica. Le prove pubblicate in [4.2] descrivono laminati CFRP di spessore compreso tra 2,4 e 6 mm, composti da otto layer di tessuto in fibra di carbonio composti da resina epossidica CY255 e fibra HY255 il cui peso al metro quadrato del laminato è pari a 509 g/m^2 soggetti a differenti energie di impatto. In particolare l'articolo osserva il comportamento del laminato sottoposto a range di energia compresi tra 5 e 60J. Al fine di determinare la soglia di energia oltre la quale si verifica la perforazione del laminato stesso, sono state eseguite prove ripetute in una stessa zona, determinando di volta in volta l'area delaminata fino ad ottenere l'energia limite di perforazione pari a 50J. Nella Figura 4.1, si possono osservare le curve di impatto che illustrano la forza istantanea sul laminato in funzione del tempo di contatto. Anche se queste curve sono state ottenute per un tessuto, e non per un CFRP, i dati esposti, che raggiungono soglie intorno ai 9 kN, forniscono comunque un ordine di grandezza al riguardo.

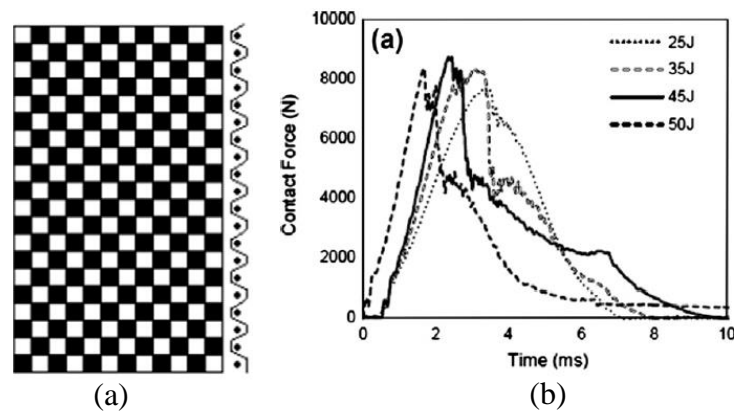


Figura 4.1: Tessuto in fibra di carbonio: a) conformazione del tessuto, b) andamento della forza istantanea durante l'impatto

Riportiamo inoltre nella Figura 4.2 la crescente area di delaminazione all'aumentare dell'energia.

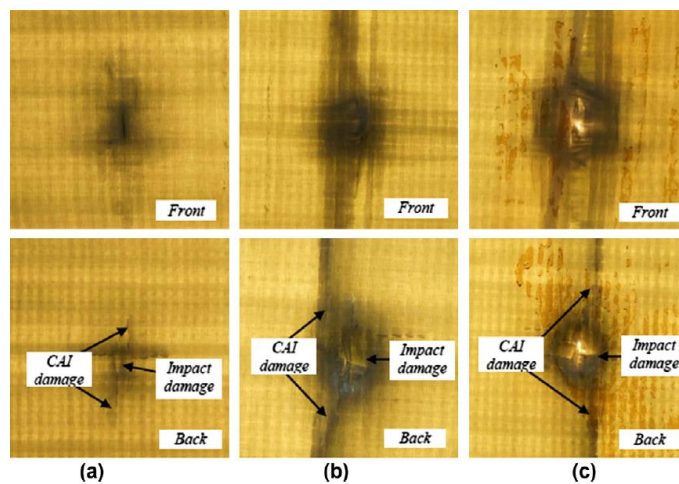


Figura 4.2: Danno in un laminato composito a differenti energie di impatto: a) 25 J; b) 45 J; c) 50 J

Quando il materiale composito è soggetto ad un carico impulsivo puntiforme, lo sforzo che viene generato nel punto impattato si trasmette in tutte le direzioni. Se tale valore di sforzo eccede i valori critici come il limite di resistenza della fibra o della matrice, oppure supera la resistenza dell'interfaccia adesiva, si generano le difettologie riportate nella pagina precedente. In questo studio [4.3] si sono provate energie di impatto molto inferiori a quelle descritte

precedentemente, ma per ognuna di queste si sono calcolati i valori di sforzo compressivo indotto nel materiale dopo la prova riportati in Tabella 4.1.

Material specifications	Original compressive intensity/MPa	Impact energy/J	Compressive intensity after impact/MPa	Proportion of compressive intensity decrease/%
[0/90] _t	561	1.8	449	20
		2.5	337	40
		4.5	202	64
[0/90/±45] _t	330	2	264	20
		2.7	198	40
		5.2	122	63
[±45] _t	126	2.2	102	19
		3	76	40
		5.5	49	61

Tabella 4.1: Sforzi di compressione residua dopo impatto di differenti CFRP

Nel momento in cui l'area del laminato è sottoposta a impatto, la ridotta superficie è interessata da una forza istantanea compressiva, mentre la zona immediatamente sottostante vede agire una forza istantanea di trazione la quale genera una sollecitazione compressiva nella direzione dello spessore. Quando la somma di tutti questi contributi diviene significativa, si generano le condizioni di innesco del danno.

Il meccanismo sopra descritto è promosso nelle aree più deboli come ad esempio nell'interfaccia tra un ply e l'altro. Sotto il carico compressivo, la regione delaminata può essere ulteriormente espansa sotto l'effetto locale di buckling, il quale può ridurre significativamente le caratteristiche di rigidità e resistenza meccanica nel punto impattato [4.4]. A titolo di esempio, per confermare la precedente affermazione è interessante riportare nella Figura 4.3 l'andamento della resistenza a fatica all'aumentare dell'energia di impatto su un materiale composito CFRP.

Tale andamento è spiegato dal modello di Caprino, $\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left\{ \frac{E_{th}}{E_i} \right\}^\alpha$ in cui troviamo: σ_R lo sforzo residuo, σ_0 lo sforzo limite, E_{th} e E_i sono rispettivamente l'energia di soglia e l'energia d'impatto, infine α costante [4.5].

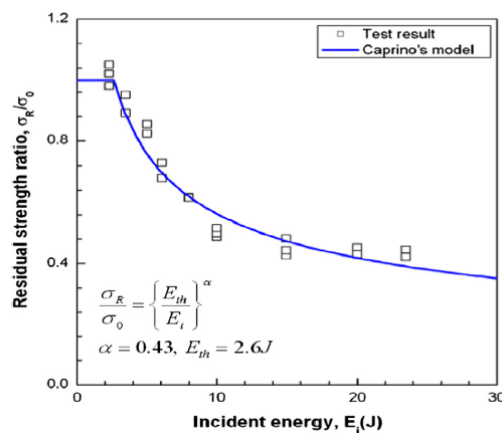


Figura 4.3: Decadimento della resistenza a fatica di un materiale CFRP composto da 16 ply dello spessore di 0,26 mm

4.1.2 Set-up sperimentale per le prove di impatto

La procedura seguita per effettuare le prove di impatto ad energia crescente, è stata suddivisa in due parti. La prima parte, dedicata a comprendere il fenomeno sul laminato per verificare l'effettiva delaminazione prodotta. La seconda, dedicata alla produzione di difetti sulle piastre strumentate per procedere alla rilevazione della posizione del danno.

La macchina per prova di impatto nel Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, prevede un semplice set-up sperimentale, ovvero si trova una guida tubolare di altezza pari a 4 m su cui sono stati ricavati dei riferimenti di altezza a cui riferirsi per la partenza del grave. All'estremità superiore della guida, è posizionata una carrucola per permettere lo scorrimento del cavo di sostegno al quale è fissato l'elettromagnete di movimentazione. Quest'ultimo, comandato dall'operatore, permette di sollevare l'impattatore per portarlo alla quota voluta per poi poterlo sganciare agendo sull'interruttore che apre il circuito di alimentazione dell'elettromagnete stesso. La macchina all'estremità inferiore della guida tubolare, prevede una protezione regolabile in altezza su cui è stata ricavata una scanalatura per la sistemazione del laser a triangolazione, necessario per conoscere la velocità dell'impattatore al momento del contatto con il provino. Questo al fine di confrontare la reale energia dell'impattatore che giunge sul composito, rispetto a quella teorica potenziale calcolata. La Figura 4.4, riporta lo schema della macchina per gli impatti utilizzata.

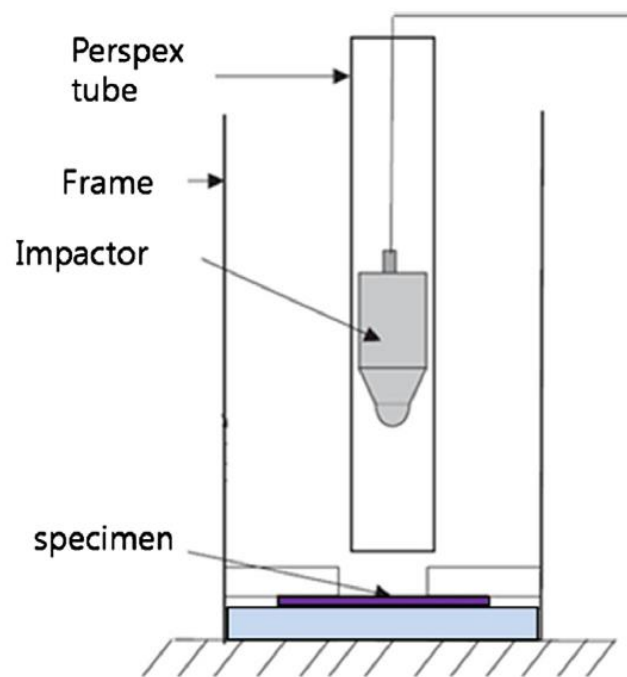


Figura 4.4: Schema della macchina per gli impatti utilizzata

L'impattatore utilizzato, possiede un peso pari a 1,2 kg, con forma del naso semi-sferica. Il laser a triangolazione avente campo di misura pari a ± 10 mm è stato affacciato alla scanalatura ricavata sulla parte inferiore della guida di protezione. Il posizionamento del laser a triangolazione reso possibile grazie alla base magnetica snodabile Mitutoyo, contemplava che il passaggio dell'impattatore avvenisse all'interno del campo di funzionamento del laser stesso. Il dispositivo a triangolazione per la misura del profilo dell'impattatore e quindi della sua velocità di caduta, è stato connesso al sistema di acquisizione attraverso una scheda di acquisizione Texas Instrument a quattro porte. Il basamento su cui posizionare il provino, costituito da due piastre di acciaio dello spessore di 15mm ciascuna, prevedeva i lati forati per permettere il fissaggio del provino posto tra le due piastre stesse. Essendo il nostro laminato spesso 2,125 mm e di peso molto inferiore rispetto alla piastra di fissaggio, si è optato per il fissaggio per solo attrito grazie al peso proprio della piastra superiore. Sotto al provino, posizionato tra le due piastre di fissaggio è sistemato un cuscinetto di materiale polimerico con lo scopo di smorzare l'impatto ma senza indurre effetti esterni. Le Figure 4.5 e 4.6 descrivono la macchina utilizzata nel Dipartimento di Meccanica del Politecnico.

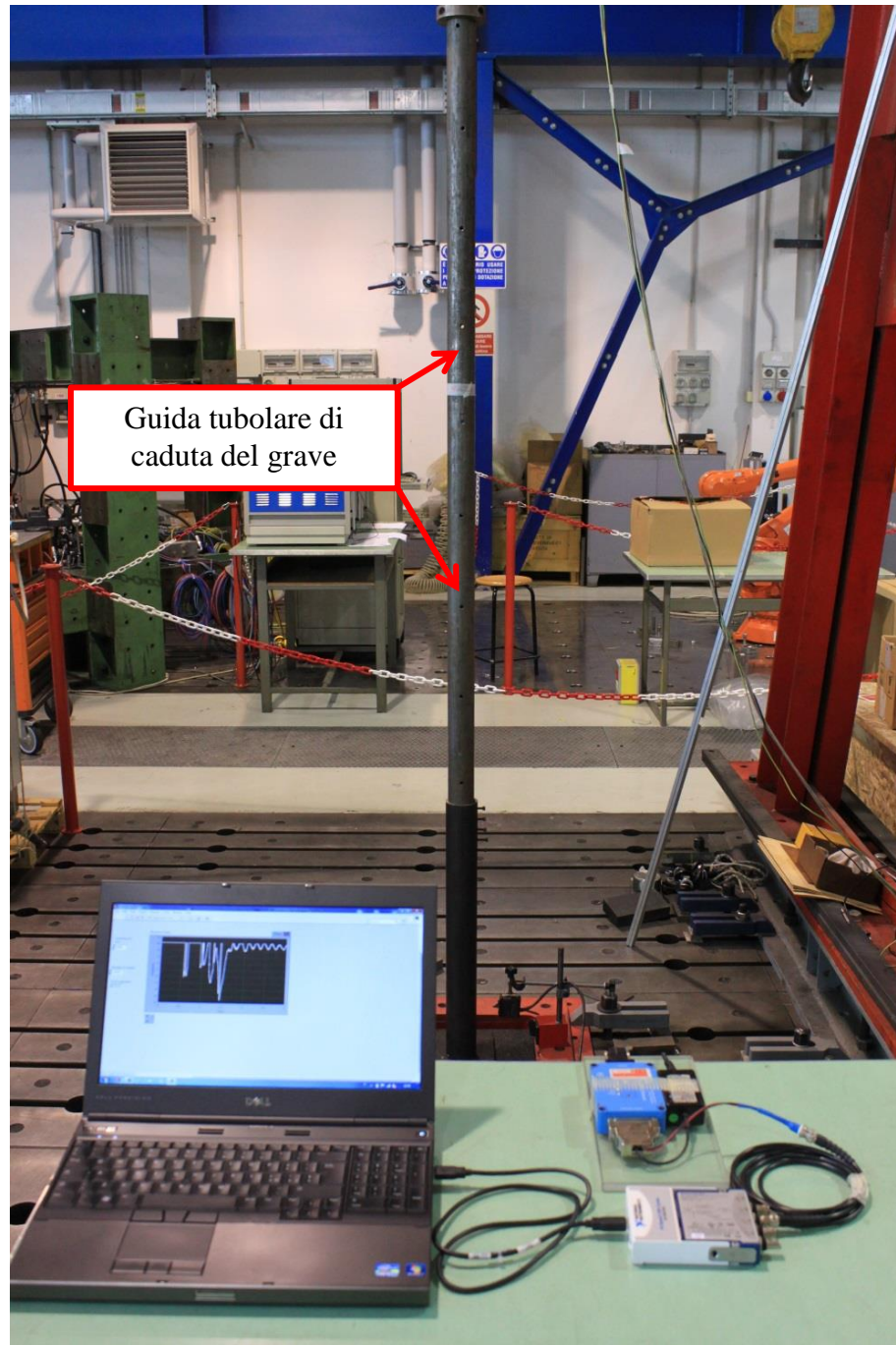


Figura 4.5: Visione di insieme della macchina per gli impatti

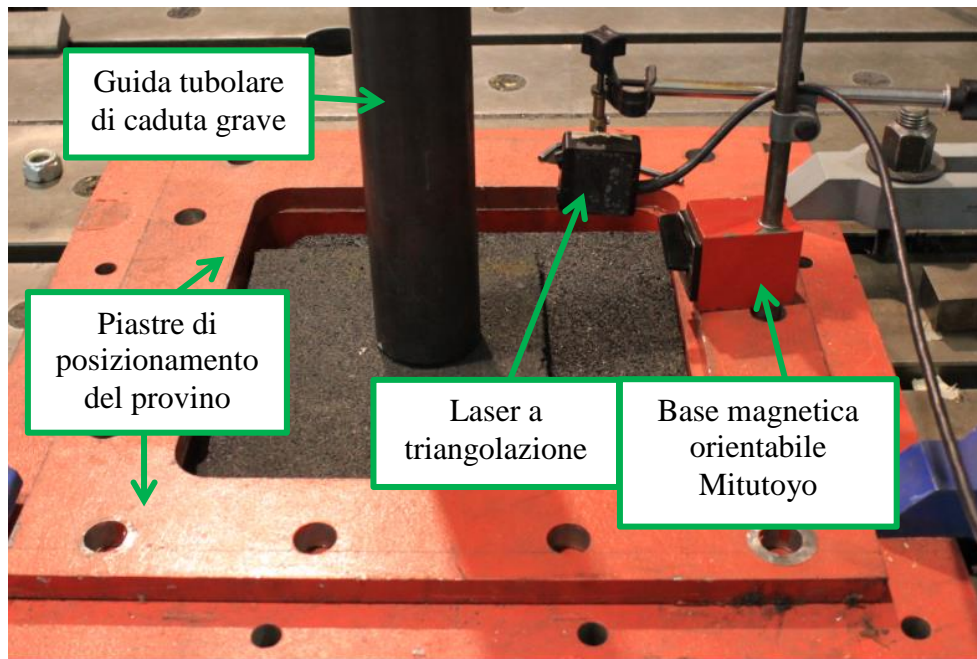


Figura 4.6: Laser a triangolazione

4.1.3 Svolgimento impatti di prova

Come anticipato, si è optato per svolgere la prova in due parti: prima per conoscere il reale danno formato sul laminato SAATI EH550/T800S utilizzando energie crescenti, poi per produrre delaminazioni naturali per l'interazione Pulse Echo e Pitch Catch. Secondo quanto descritto negli articoli citati nel paragrafo 4.1.1, abbiamo scelto di spaziare in un campo di energie comprese tra 5 e 40 J rimanendo al di sotto del limite di perforazione del laminato posto essere a 50 J. Prima si è calcolata la quota di caduta corrispondente, andando a suddividere il campo di energie con un passo di 5 J, fatta eccezione per l'ultima prova che da 20J si è passati direttamente a 40J. L'equazione (4.1) mette in luce l'espressione dell'energia potenziale utilizzata per il calcolo della quota di caduta:

$$E_p = m * g * h \quad (4.1)$$

Che opportunamente invertita fornisce il valore dell'altezza h in metri:

$$h = \frac{E_p}{m * g} \quad (4.2)$$

Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali

in cui E_p è l'energia potenziale che si vuole generare nella caduta dell'impattatore, m è la massa dell'impattatore pari a 1,2 kg e infine g è l'accelerazione di gravità.

Ne consegue la seguente Tabella 4.2 che riporta le energie potenziali teoriche e quelle sperimentali calcolate con la velocità di caduta sfruttando la seguente equazione dell'energia cinetica:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (4.3)$$

Otteniamo quindi:

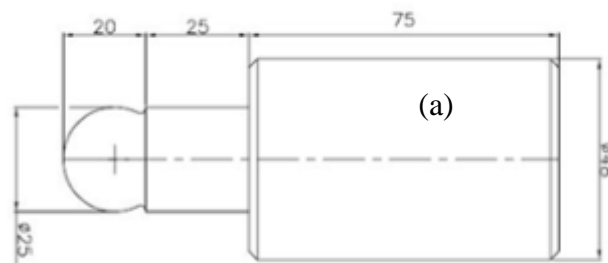
Ep [J]	h [m]	Vel_grave teorica [m/s]	t_caduta [s]	VELOCITA' REALE [m/s]	ENERGIA REALE [J]
5	0,42	2,89	0,15	2,03	2,47
10	0,85	4,08	0,21	3,67	8,06
15	1,27	5,00	0,25	4,79	13,75
20	1,70	5,77	0,29	5,89	20,84
40	3,40	8,16	0,42	8,70	45,39

Tabella 4.2: Energie potenziali teoriche e reali utilizzate negli impatti

Il calcolo della velocità teorica di caduta è stato eseguito ponendo uguali energia cinetica ed energia potenziale, potendo così calcolare la velocità con l'espressione:

$$v = \sqrt{2 * g * h} \quad (4.4)$$

La velocità ottenuta in (4.4) viene confrontata con la velocità reale, calcolata grazie al rapporto tra la lunghezza dell'impattatore e il tempo durante il quale attraversa il laser a triangolazione. La Figura 4.7, mostra il profilo del proiettile acquisito dal laser a triangolazione in relazione alla geometria reale.



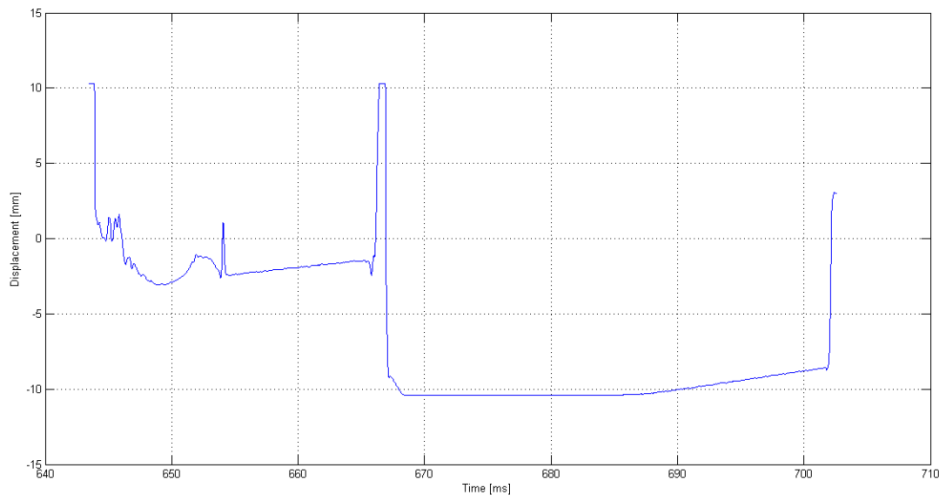


Figura 4.7: Impattore: a) disegno dell'impattore reale; b) profilo acquisito dal laser a triangolazione

Si è deciso di eseguire gli impatti sul laminato CFRP di dimensioni 800 x 450 mm nelle posizioni riportate nello schema seguente in Figura 4.8.

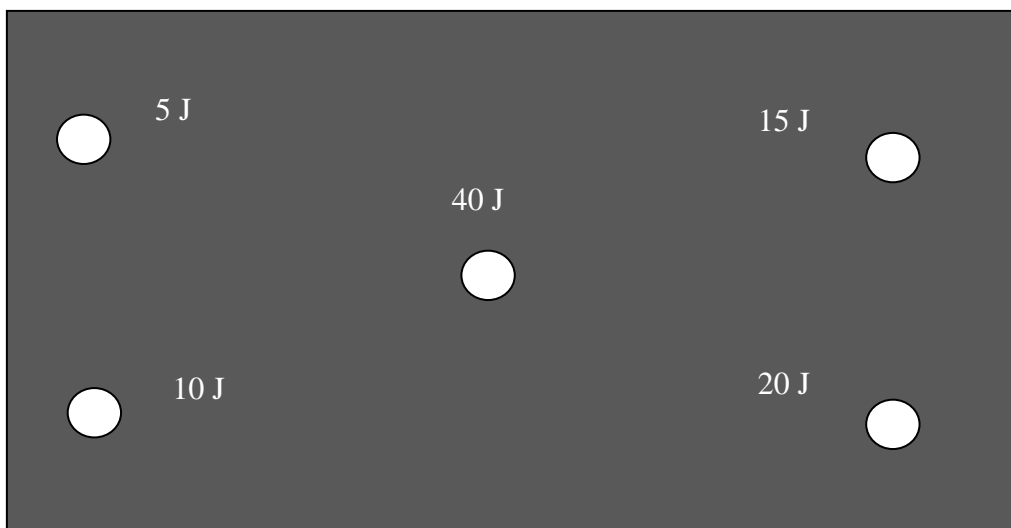


Figura 4.8: Posizioni delle prove di impatto sul laminato SAATI EH550/T800S

4.1.4 Tecnica C-Scan

Per ogni impatto ad energia crescente sul laminato SAATI EH550/T800S, è necessario verificare la zona di delaminazione creata. Ad un primo esame visivo

del composito, si nota una lieve indentazione nella zona impattata per le energie di 10 e 15J. Tale zona si fa più marcata per le energie 20 e 40 J, ma diventa invisibile per l'impatto a 5 J. Interessante è scoprire l'estensione di questa zona al di sotto dell'indentazione visibile in superficie. Al fine di ottenere questo risultato, è necessario eseguire un controllo NDT tradizionale ma in questo frangente si ripresenta il problema della difficoltà della fibra di carbonio nell'essere radiografata. Sarebbe necessaria la presenza di una delaminazione superficiale che renderebbe possibile la penetrazione per capillarità del liquido di contrasto al fine di variare l'assorbimento locale di radiazione, e avere quindi l'indicazione sulla lastra. Dall'esame visivo effettuato, non emerge altro che l'indentazione sul punto impattato. Non potendo utilizzare il liquido di contrasto, la tecnica radiografica non risulta efficace. L'attenzione si è quindi spostata sulla tecnica ultrasonora C-Scan, che esponiamo brevemente.

La tecnica C-scan in modalità Pulse Echo in immersione è un procedimento che utilizza le onde ultrasonore, in maniera differente rispetto al nostro approccio con le onde di Lamb. Tuttavia anche in questo caso la tecnica utilizzata si basa sulla riflessione dell'onda acustica quando questa trova un ostacolo sul suo cammino. Nella tecnica ultrasonora C-Scan, si ottiene un risultato sotto forma di rappresentazione a scalogramma in cui la riflessione dell'eco della discontinuità viene associata ad un colore. Viene fissato un valore di soglia tra il picco del primo eco e il picco dell'eco di fondo risultato di un'accurata calibrazione condotta conoscendo le caratteristiche del materiale, la velocità di propagazione dell'onda ortogonalmente rispetto alla superficie e la geometria del materiale. Il valore di soglia che viene fissato è funzione della dimensione del danno che si sta cercando di visualizzare. Nel momento in cui l'eco del difetto, che arriva prima dell'eco di fondo, se oltrepassa la soglia impostata, viene associato un colore proporzionale all'ampiezza dell'eco stesso. L'analisi viene fatta movimentando la sonda ultrasonora su un piano $x - y$ posizionato parallelamente al laminato sulla zona che si ritiene danneggiata, avendo cura di far sì che il passo di scansione, in relazione alle dimensioni della sonda, sia tale da sormontare le passate precedenti per non lasciare zone anche minime non scansionate. La movimentazione cartesiana viene attuata utilizzando motori passo-passo controllati da un comune software CNC, i quali movimentano delle viti a ricircolo di sfere responsabili del moto della sonda [4.6]. La Figura 4.9, mette in luce che cosa si intende per analisi C-Scan.

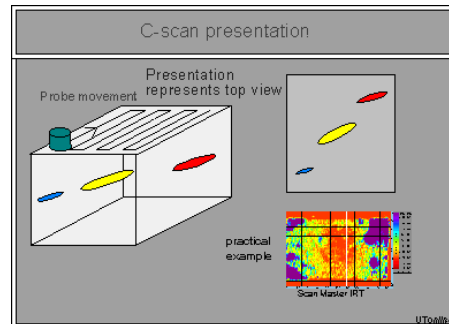


Figura 4.9: Principio alla base della tecnica C-Scan

In generale la procedura che viene eseguita punto per punto sul laminato, prevede di movimentare la sonda, lanciare l'onda diagnostica che entra nel materiale e viene riflessa dal fondo ed eventualmente parte di essa anche dal difetto presente. La Figura 4.10 descrive il procedimento.

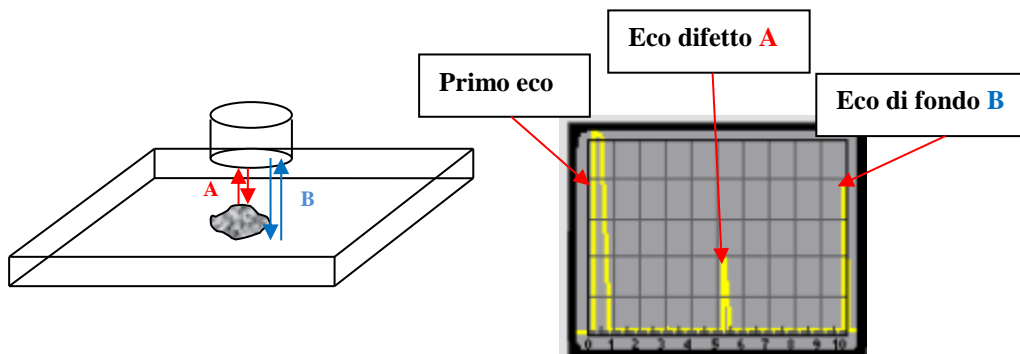


Figura 4.10: Procedura C-Scan

All'eco del difetto **A** viene associato un colore proporzionale alla sua ampiezza, ottenendo così per tutta la zona scansionata, una mappatura delle risposte che danno informazioni sulla posizione, larghezza e lunghezza del danno, ma non è possibile conoscere la sua estensione in profondità. A titolo di esempio la Figura 4.11 riporta un'immagine risultato di una prova C-Scan [4.7].

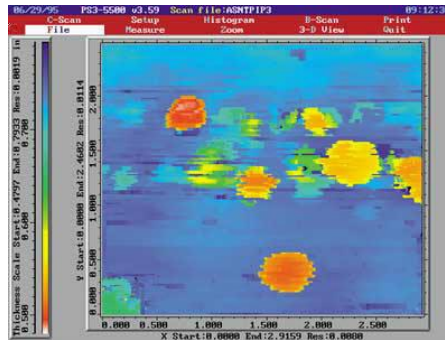


Figura 4.11: Risultato C-Scan di una scansione di una superficie metallica in avanzato stato di degrado corrosivo

Il sistema quindi si compone di una centralina ultrasuoni corredata di sonda appropriata, un sistema di movimentazione CNC, un computer di acquisizione e un sistema di elaborazione dati. È fondamentale ricordare che sia il sistema CNC che la centralina ultrasonora sono contemporaneamente interconnessi tra loro, questo per associare ad ogni picco oltre il livello di soglia, una posizione sul piano scansionato.

Nella tecnica C-Scan, in cui l'esecuzione è totalmente automatica, pezzo e sonda sono immersi in una vasca contenente acqua, solitamente vengono aggiunti additivi per prevenire l'ossidazione del pezzo o la formazione di bolle durante il movimento della sonda. L'acqua garantisce un ottimo accoppiamento anche quando la sonda risulta lontana dal pezzo. In questo caso è utile riportare un accorgimento da osservare per non falsare l'esame. Infatti l'interfaccia acqua-pezzo crea un eco di risposta che giunge prima dell'eco di fondo creando indeterminazione sulla vera risposta del difetto. È necessario scegliere la corretta altezza della sonda rispetto al pezzo al fine di evitare che l'eco di interfaccia arrivi prima dell'eco di fondo, così facendo si elimina l'indeterminazione di scelta.

4.1.5 Set-up del C-Scan utilizzato e risultati ottenuti

Il C-Scan che abbiamo utilizzato, è stato messo a disposizione dal Dipartimento di Aerospaziale del Politecnico di Milano Bovisa. Come accennato prima, si compone di un sistema di movimentazione cartesiana per la sonda 20 MHz, una vasca per l'immersione e di una attrezzatura appositamente messa a punto, capace di sorreggere il laminato nella posizione corretta per l'esame. Fattore critico di questo tipo di prova sta nella perfetta planarità rispetto al piano della

sonda. Superfici che non vengono correttamente montate, possono portare a risultati non significativi, caratterizzati da false indicazioni, proprio per il posizionamento scorretto del provino. La preparazione della prova e la sistemazione del laminato, garantendo la planarità, è stato un passaggio cruciale portato a termine dal tecnico specializzato che ha effettuato l'esame.

Il sistema C-Scan utilizzato, è raffigurato nella Figura 4.12, in cui vediamo i particolari della macchina.



Figura 4.12: Apparecchiatura C-Scan del Dipartimento Aerospaziale del Politecnico di Milano:
a) Interno vasca, in cui è presente la lastra impattata sospesa sull'apposita attrezzatura; b)
sistema di movimentazione cartesiano su guide a ricircolo di sfere

Per accelerare la prova, si è deciso di effettuare un'analisi parziale del laminato andando a circoscrivere delle aree di lato 100 x 100 mm centrate sulla zona impattata, la sonda ultrasonora mediante la programmazione ISO per la movimentazione, è stata posizionata sulle aree delimitate.

L'elaborazione dei segnali è avvenuta in una seconda fase, ovvero prima, per ogni area scansionata sono stati acquisiti tutti i valori di posizione e valore dei picchi associati alla risposta del materiale, poi i valori acquisiti sono stati elaborati associando la scala di colore ai picchi oltre alla soglia del valore d'allarme impostato. Riportiamo nella Figura 4.13, i risultati ottenuti.

Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali

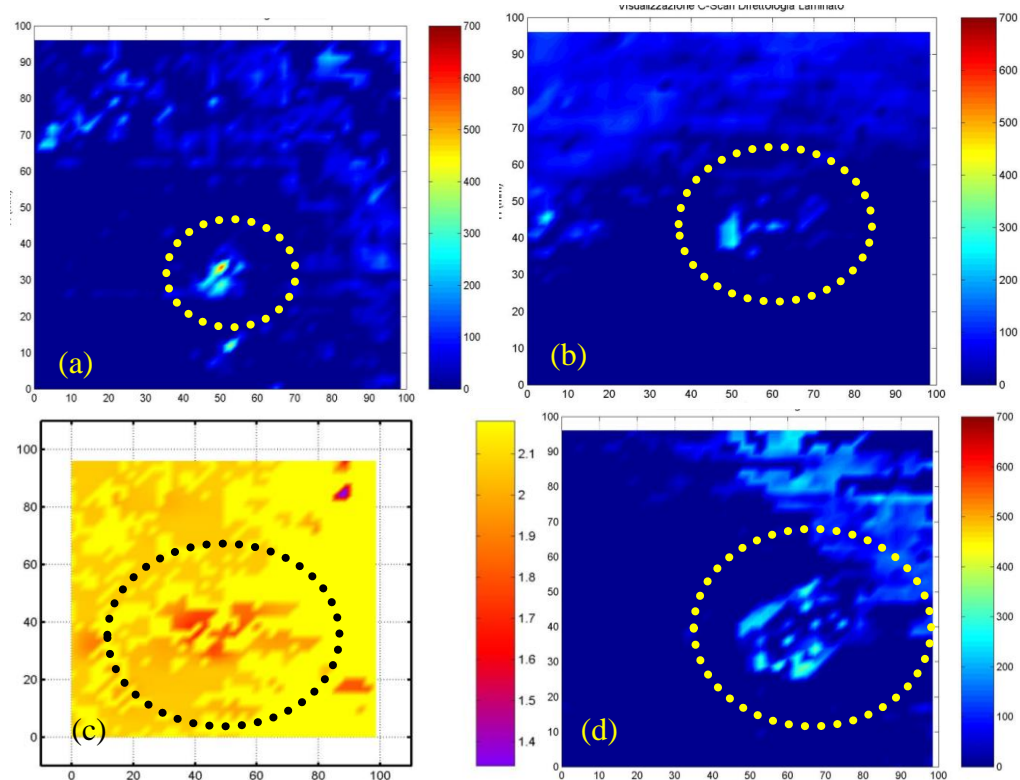


Figura 4.13: Risultati C-Scan: a) Impatto a 10J; b) Impatto a 15J; c) Impatto a 20J; d) Impatto a 40J

Non è stato possibile ottenere una risposta significativa per la prova effettuata a 5 J, di conseguenza possiamo ritenere che a 5 J il danno provocato non risulta visibile con questa tecnica, considereremo comunque questa energia nella sperimentazione Pulse Echo e Pitch Catch con le onde di Lamb. Lo scalogramma riportato nella Figura 4.13 c, è stato ottenuto applicando un algoritmo di elaborazione con scala di colori differenti, ma il significato è il medesimo degli altri tre. Abbiamo potuto quindi esprimere le dimensioni delle delaminazioni in direzione x e y, sfruttando le immagini fornite. La Tabella 4.3 associa ad ogni energia di impatto, la dimensione della delaminazione ottenuta.

Energia potenziale [J]	Energia Reale [J]	Delaminazione X [mm]	Delaminazione Y [mm]
10	8,06	14,4	11,3
15	13,75	16,3	10,7
20	20,84	25,7	17,3
40	45,39	31,9	23,7

Tabella 4.3: Dimensioni della delaminazione associata all'energia di impatto

Con questi risultati si è riusciti a caratterizzare il comportamento del laminato quando è sottoposto a energie di impatto crescenti, si nota in tutte le prove che la dimensione x della delaminazione risulta più estesa rispetto alla dimensione y, si ritiene per tanto che il danno naturale provocato in tutti i casi sia di forma ellittica. Vi sono molteplici ipotesi che determinano questo comportamento, una delle più importanti è da ricercarsi nelle direzioni di massima e minima resistenza. L'estensione maggiore della delaminazione si ha ortogonalmente alla direzione più resistente, per effetto dell'insinuarsi del danno in percorsi preferenziali di minima resistenza.

Con i risultati sin qui conseguiti si è in grado di scegliere le energie di impatto e procedere alla sperimentazione Pulse Echo con onde di Lamb.

Si procederà alla sperimentazione sul laminato strumentato con le sole energie di 5, 10, 15 e 20 J, dato che la prova a 40J, per effetto della violenza di impatto, potrebbe danneggiare i sensori presenti, compromettendo i risultati. È inoltre da precisare che la prova C-Scan non sarà possibile attuarla sulle piastre destinate alla sperimentazione PE e PC, infatti saranno dotate di sensori cablati, il che rende impossibile l'immersione. L'approccio C-Scan è stato fondamentale per avere un'idea sull'ordine di grandezza delle delaminazioni prodotte con diverse energie di impatto.

4.2 Approccio Pulse Echo, individuazione della posizione dei difetti naturali

A differenza di quanto fatto nel Paragrafo 3.4, che riguardava i difetti artificiali, la procedura presente ha seguito un differente metodo nello studio dell'interazione dell'onda diagnostica con difetti naturali. Nel caso dei difetti delaminativi creati attraverso l'inserimento di patch di teflon, si è attuata una analisi del segnale specifica, con l'obiettivo di determinare il significato di ogni informazione presente sugli echi di fondo. Il modo di procedere in quel momento è stato dettato dal fatto che le piastre SAATI EH550/T800S erano state prodotte già con all'interno le delaminazioni delle dimensioni volute, ciò ha reso impossibile fare un confronto tra segnali prima e dopo l'introduzione del difetto. D'altro canto non era nemmeno possibile svolgere un confronto tra segnali provenienti da piastre senza difetti con segnali contenenti l'informazione

della delaminazione a causa della risposta totalmente differente e non confrontabile. Il lettore potrebbe pensare dopo queste affermazioni, che il metodo Pulse Echo non sia generalizzabile. In realtà siccome si basa su un approccio a confronto, se si dispone di una risposta di riferimento rispetto alla quale confrontare i dati acquisiti in un secondo momento, ecco che il metodo diviene applicabile teoricamente ovunque. È possibile strumentare una qualsiasi struttura e di quella “fotografare” il suo stato di salute di quel momento, ecco che da lì in poi tutte le successive acquisizioni saranno confrontate con la prima, ciò che emergerà di anomalo, sarà un allarme su cui investigare.

Con i difetti naturali, si dispone di piastre che non contengono al loro interno alcuna anomalia, questo permette di creare un segnale di risposta detto di riferimento che potrà essere confrontato in un secondo momento con quello proveniente sempre dagli stessi sensori, ma dopo che si sono svolti gli impatti a energia crescente.

Nota questa importante informazione si è proceduto alla strumentazione delle piastre con i medesimi sensori in posizione Pulse Echo di Paragrafo 3.4, a cui si rimanda per una descrizione più completa del set up. Si è poi acquisito il segnale di riferimento alle frequenze di 45 e 60 kHz grazie alla catena di misura mostrata in Figura 2.36, che ha permesso la memorizzazione dei dati con un campionamento di 25 Msamp/s e un onda diagnostica identificata in una funzione seno finestrato Hanning a 5.5 cicli.

Con le medesime modalità seguite nel Paragrafo 3.5, si sono eseguiti gli impatti alle energie di 5, 10, 15 e 20 J. Eseguiti gli impatti, che hanno prodotto le delaminazioni naturali, si è nuovamente acquisito il segnale contenente l'indicazione, rendendo possibile l'analisi di confronto. È evidente che una volta acquisito il segnale di riferimento, esso detta le condizioni per l'acquisizione dei segnali successivi, ovvero tutto ciò che era stato impostato in fase di creazione del riferimento deve essere mantenuto invariato, in particolare la frequenza di campionamento e le frequenze di eccitazione dell'onda diagnostica. Ultimata la procedura, si è pronti per effettuare il confronto ed estrarre i risultati di posizione del danno dalla tecnica Pulse Echo con onde antisimmetriche A0. La Figura 4.14, mette in luce la piastra strumentata.

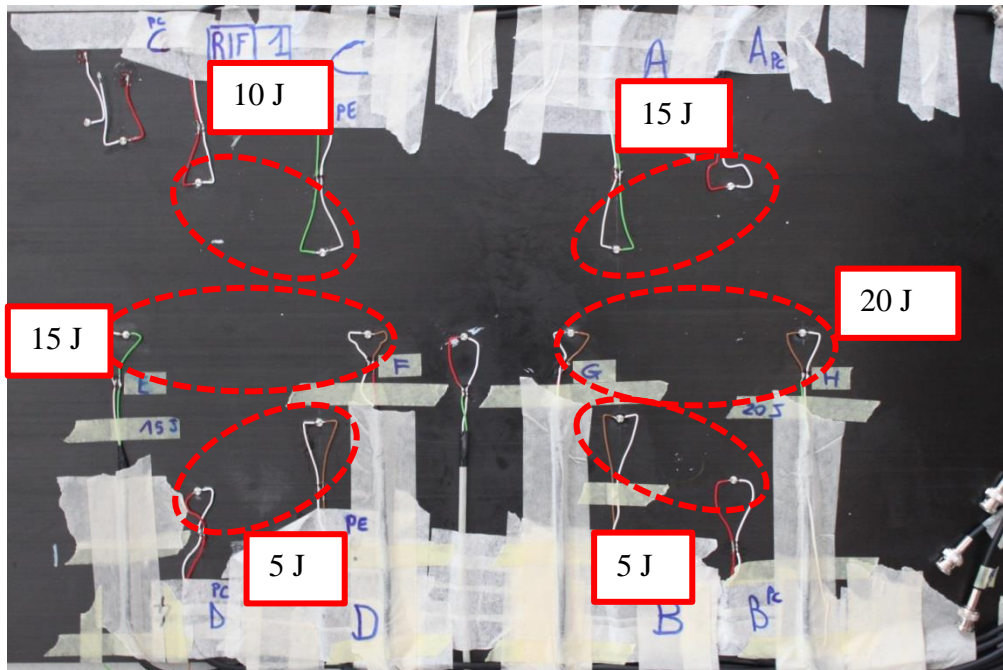


Figura 4.14: Laminato strumentato, destinato alla prova di impatto, in cui sono indicate le zone e le energie utilizzate per la creazione dei difetti naturali

4.2.1 Analisi di confronto dei segnali Pulse Echo

Per brevità, omettiamo gli stessi passaggi di pulitura ed estrazione del contributo energetico alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica, utilizzando rispettivamente le trasformate discrete e continue wavelet viste sia nel Capitolo 2, sia nel Capitolo 3. Ci si concentra sui passaggi più determinanti, eseguiti per effettuare il confronto tra i due segnali acquisiti, rispettivamente quello di riferimento creato a laminato vergine e quello ottenuto dopo le prove di impatto. La logica che sta alla base del confronto stabilisce quanto i due segnali siano simili e soprattutto in quale zona temporale di acquisizione questi non lo siano più. Avendo acquisito i segnali dagli stessi sensori, incollati nella medesima posizione, gli effetti sulla variabilità dell'incollaggio oppure la variazione degli echi di fondo per diversità nel posizionamento dei PZT non sono più influenti. Gli stessi effetti risultano presenti sia prima, sia dopo la prova di impatto facendo sì che non siano più un contributo di diversità tra i due segnali. Il modo di procedere essenzialmente è stato quello di rapportare i due segnali calcolando e diagrammando l'errore del segnale del difetto rispetto a quello di riferimento.

Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali

Dopo aver pulito e normalizzato i due vettori tra ± 1 rispetto a se stessi in maniera da avere evidenziato le variazioni più piccole e aver estratto il contributo energetico alla frequenza centrale di eccitazione, sono stati eseguiti gli involuپی con la trasformata di Hilbert. La Figura 4.15 visualizza i segnali acquisiti e successivamente puliti e processati dalle wavelet.

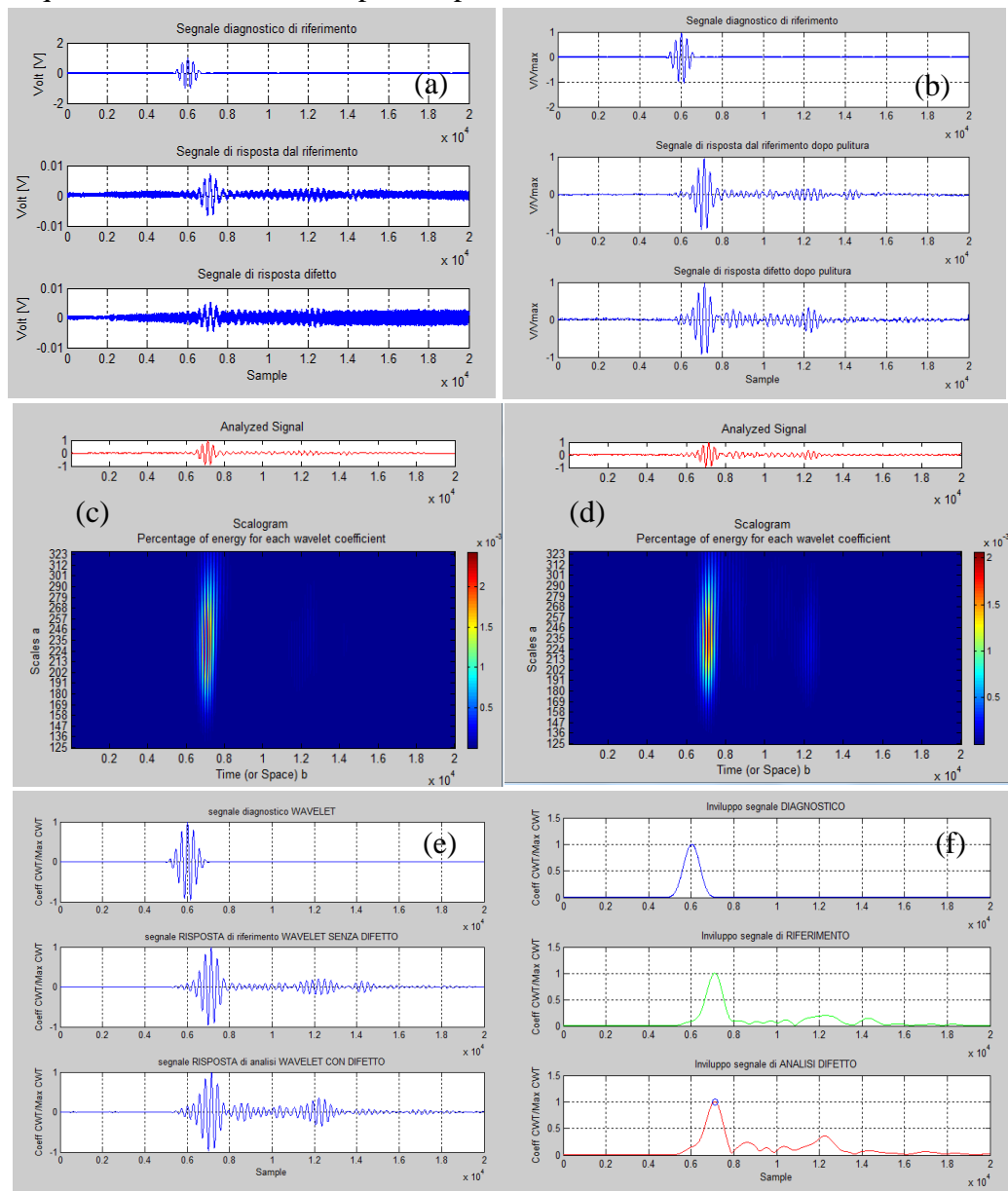


Figura 4.15: Processazione del segnale con frequenza di eccitazione pari a 45 kHz: a) Segnali di riferimento e dopo le prove di impatto, originali come escono dalla catena di misura; b) Segnali dopo la pulitura grazie all'utilizzo della trasformata discreta wavelet; c) Scalogramma segnale riferimento; d) Scalogramma segnale indicazione; e) Estrazione del contributo in

Capitolo 4

frequenza centrale con trasformata continua wavelet dal segnale normalizzato; f) Inviluppo dei segnali processati

A questo punto ottenendo i segnali i cui picchi negativi risultano ribaltati e uniti dall'inviluppo, applicando l'equazione (4.5) si è calcolato il vettore dell'errore:

$$Err = \frac{Riferimento - Difetto}{Riferimento} * 100 \quad (4.5)$$

Si osserva la zona in cui risiede l'indicazione nel momento in cui si nota una variazione considerevole dell'errore in percentuale, ovvero quanto è diverso il segnale contenente il difetto rispetto al segnale prima dell'impatto (Figura 4.16).

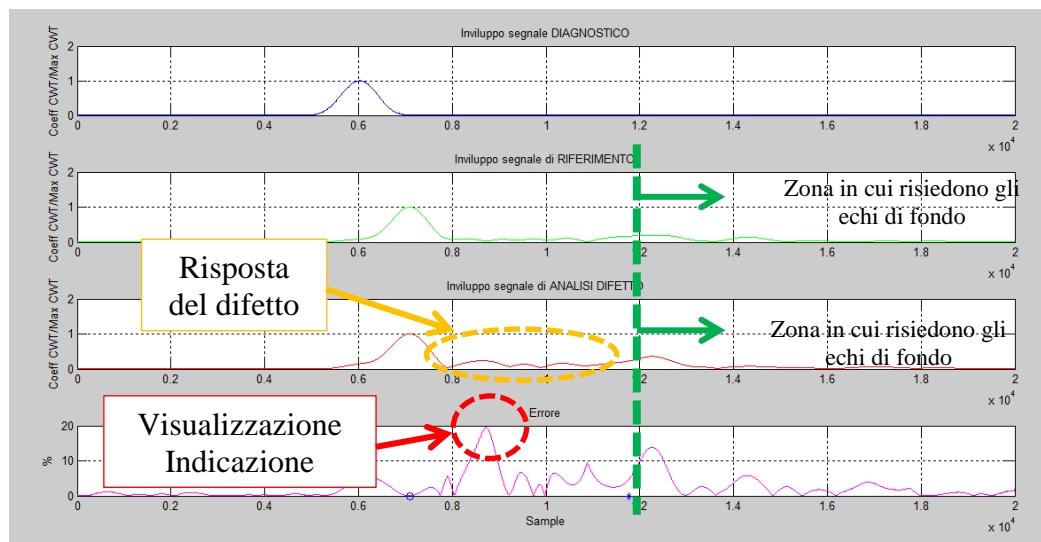


Figura 4.16: Errore percentuale tra segnale di riferimento e quello contenente la delaminazione dopo un impatto sul laminato SAATI EH550/T800S di 15J

Occorre fare una precisazione sulla scelta del picco dall'errore percentuale, in relazione all'analisi del segnale effettuata nel Paragrafo 3.4. In quel caso sono stati identificati gli istanti temporali in cui compaiono i picchi responsabili degli echi di fondo, oltre la linea tratteggiata verde di Figura 4.16. Tutto ciò che viene prima di quel limite, compreso tra l'onda di prima trasmissione e il primo eco di fondo, è responsabile di qualche cosa di anomalo.

Dopo l'impatto, si ha una redistribuzione di energia generata dall'onda diagnostica per effetto della delaminazione che porta al cambiamento della forma d'onda (grafico rosso), andando a magnificare più punti di risposta. La

Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali

Figura 4.17 riporta un ingrandimento del tracciato nella zona temporale in cui risiede l'indicazione.

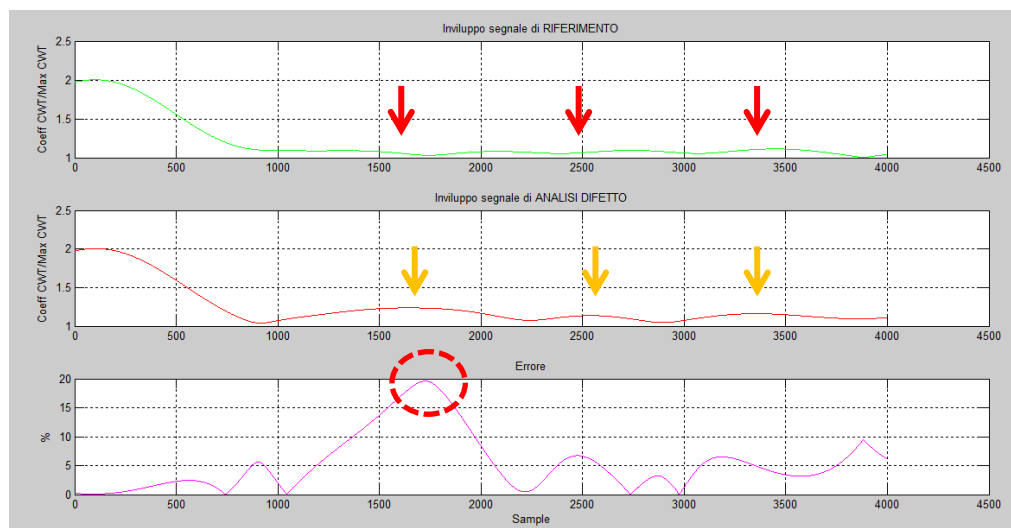


Figura 4.17: Magnificazione della risposta di delaminazione dopo un impatto sul laminato SAATI EH550/T800S di 15J

Per visualizzare il picco responsabile del difetto, è stato calcolato l'errore percentuale tra il segnale di riferimento e quello dopo l'impatto avendo cura di sommare un valore costante ad entrambi i segnali (sia al segnale di riferimento che al segnale del danno). Questa operazione è stata effettuata per evitare l'effetto del denominatore tendente a zero, che porta il rapporto ad un valore tendente a infinito non responsabile della vera delaminazione. Ciò determina una leggera diminuzione della sensibilità di rilevazione in relazione alla scelta del valore costante, si è perciò scelto di sommare il valore unitario. Dopo aver eseguito tutte le prove a differente frequenza e a differente energia di impatto, è stato visto che il difetto è in tutti i casi individuato dal valore massimo di errore percentuale.

Come fatto nel Paragrafo 3.4 è necessario calcolare prima la velocità di propagazione del modo A_0 , selezionando i valori di picco massimo dei segnali involuppati onda diagnostica e onda di prima trasmissione sul segnale di riferimento. Noto poi il Δt tra i due picchi, grazie alla frequenza di campionamento impostata sull'oscilloscopio e il numero di punti che intercorrono tra i due picchi scelti, è immediato calcolare la velocità di

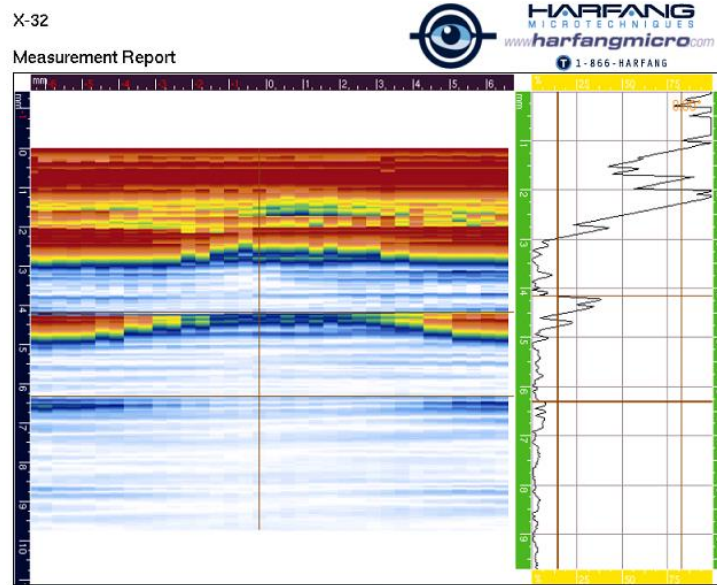
propagazione. Si esegue il rapporto tra la distanza che intercorre tra sensore attuatore e sensore PE e il Δt calcolato.

A questo punto utilizzando il diagramma dell'errore percentuale tra i due segnali che risulta tracciato sul medesimo asse dei tempi dei precedenti, si calcola il Δt che intercorre tra il massimo dell'onda di prima trasmissione sul segnale contenente l'informazione del danno e il picco che evidenzia la differenza percentuale circolettata in rosso in Figura 4.16 e 4.17. Moltiplicando infine il Δt appena calcolato per la velocità si ottiene il valore di distanza della delaminazione dal sensore PE, è chiaro che tale valore va nuovamente dimezzato a causa della doppia percorrenza del tragitto.

La validazione dei risultati di localizzazione è stata effettuata con l'apparecchiatura ultrasonora Phased-Array Harfang a disposizione nel Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano Bovisa, la quale, utilizzando una sonda a 32 cristalli attivi eccitati a 10 MHz, ha permesso di identificare il punto esatto di inizio delaminazione compatibile con tale picco. La Figura 4.18 visualizza il report ottenuto dal sistema utilizzato. Il modo di operare in questo caso è stato quello di generare una mappa tramite scansioni eseguite in riferimento alla griglia posizionata sulla zona di delaminazione. La dimensione dell'area scansionata è stata scelta essere di 110 x 80 mm, con passo dei settori di 10 mm l'uno dall'altro. Muovendo la sonda settore per settore e per ognuno generare il report della Figura 4.18, è stato possibile ottenere con buona approssimazione l'estensione della delaminazione assumendo che il danno visto nello spessore ha la stessa estensione se guardato dall'alto ortogonalmente al laminato. L'operazione è stata eseguita per la zona impattata con energia di 20 J.



Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali



Inspection

File Name : Configuration_ONDEDILAMBFRP_10MHzIM_32elmts_0.8mmprch_nozoccolo_linearscan.hcf		
Nb Probes : 1	Nb Encoders : No Encoder	Nb Scans : 1
LW Velocity : 2.850mm/s	SW Velocity : 3.200mm/s	Density : 0.0
Thickness : 2.50mm	Clock Freq : 100 kHz	PRF : 2666Hz
Travel Mode : Half Path	Measure Sys : Metric	Voltage : 100volts
Trigger : Free Running		

Probe #1

Probe Width : 50mm	Frequency : 5.00MHz	Manufacturer : Harfang
Model : PE-50MG250.8P	Serial : 0158	Type : One dimension
Shape : Planar	Start Seg : 1	Nb Elements : 32
Nb Elements : 1	Elmt Size D1 : 0.78mm	Elmt Size D2 : 12.00mm
Elmt Space D1 : 0.04mm	Elmt Space D2 : 0.50mm	Elmt Pitch D1 : 0.80mm
Elmt Pitch D2 : 12.50mm	Elmt Offset D1 : 3.20mm	Elmt Offset D2 : 8.60mm
Connectivity : Bottom Left Row	With Probe : 1	X Rotation : 0.0°
Y Rotation : 0.0°	Z Rotation : 0.0°	X Translate : 0.0mm
Y Translate : 0.0mm	Z Translate : 0.0mm	Is Master : Yes

Configuration_ONDEDILAMBFRP_10MHzIM_32elmts_0.8mmprch_nozoccolo_linearscan_Sat_Jan_1_2000_00_48_17_20_J 1/2

(b)

X-32
Measurement Report

Scan #1

Nb Samples : 6843PL	Nb Beams : 34#	Focal Dist : 500.0mm
Start Angle : 0.00°	Start Path : 0.00mm	Stop Path : 9.72mm
Scan Type : Linear	Focalisation : Normal	Skew Angle : 0.00°
Tilt Angle : 0.00°	Translate : 0.0mm	Nb Active Elmt Tx : 16
Nb Active Elmt Rx : 16	Double Res : Yes	Elmt Shut-off : No
Manual Shut-off : No	Shut-Off Thresh : 12 dB	Select origin : Exit point center
SD offset : 0.00mm	Filter : 2-12 MHz	Gain : 21.5dB
Delay : 0.82mm	Rectification : Full	Smoothing : Lin - Slow
Sub-Sampling : 1:1	Wave Mode : Longitudinal Wave	Velocity : 2.850mm/s
Probe Tx : 1	Probe Rx : 1	Filter-Catch : No
Focalisation : Focalisation Tx	First Elmt Tx : 1	Last Elmt Tx : 32
First Elmt Rx : 1	Last Elmt Rx : 32	

Cursor - Lscan - Scan #1

Extractor	Beam : 17	A : 0.00°	
Cursor #2	Beam : 17	D : 4.168mm	PL : 4.166mm
Cursor #3	Beam : 17	D : 6.313mm	PL : 6.313mm

Cursor - Ascan - Scan #1

Extractor	Beam : 17	A : 0.00°	
Cursor #2	Ampl : 83.14%	Beam : 17	D : 4.166mm PL : 4.166mm
Cursor #3	Ampl : 14.51%	Beam : 17	D : 6.313mm PL : 6.313mm

Configuration_ONDEDILAMBFRP_10MHzIM_32elmts_0.8mmprch_nozoccolo_linearscan_Sat_Jan_1_2000_00_48_17_20_J 2/2

Figura 4.18: Prova ultrasonora Phased-Array sul laminato SAATI EH550/T800S impattato con un'energia pari a 20 J: a) esecuzione della prova, b) report generato dallo strumento

Come eseguito nel Paragrafo 3.4 per le delaminazioni artificiali, anche per i difetti naturali si è cercato di condensare le informazioni di dimensione della delaminazione, energia di impatto e frequenza dell'onda diagnostica in un parametro sintetico. Per fare ciò si è calcolato il rapporto K tra il picco responsabile del danno e il picco dell'onda di prima trasmissione sul segnale acquisito dopo l'impatto. Per localizzare quale fosse il picco del difetto ci si è nuovamente serviti del grafico della differenza percentuale, grazie all'uguaglianza della scala dei tempi di quest'ultimo rispetto ai segnali acquisiti, il punto in cui si ha il massimo errore percentuale, possiede il valore temporale corrispondente al picco del difetto sul segnale acquisito, è stato perciò facile determinare con esattezza il valore di ampiezza del picco del danno.

4.2.2 Risultati ottenuti e discussione.

Eseguendo la procedura di analisi, utilizzando per tutte le prove di impatto l'eccitazione contro-fase per magnificare il modo propagativo antisimmetrico A_0 , e ripetendo il calcolo per le frequenze di 45 e 60 kHz, si sono ottenute le distanze del danno rispetto al sensore PE e i rapporti K per le delaminazioni naturali. Qui di seguito si riporta la Tabella 4.4 e 4.5 in cui sono inseriti i valori delle distanze calcolate e i rapporti K tra ampiezza del picco del difetto e ampiezza dell'onda di prima trasmissione.

La validazione della localizzazione, è stata effettuata per l'impatto a 20J, per cui si è applicata la procedura esposta nel Paragrafo 4.2.1 per triangolare la risposta del difetto sfruttando tutti i segnali provenienti dai sensori PE. Il risultato ottenuto si è poi confrontato con quello Phased-Array, per verificare che le due zone di risposta fossero compatibili. La Figura 4.19 mostra la zona mappata dal Phased Array sovrapposta alla triangolazione con onde di Lamb per il difetto naturale provocato con un energia di impatto di 20J.



Figura 4.19: Mappatura ottenuta sul laminato SAATI EH550/T800S nella zona di delaminazione a 20 J in cui si confrontano i risultati del Phased Array con ciò che è stato ottenuto dalla triangolazione con le onde di Lamb

Osservando la Figura 4.19, si vede chiaramente che l'area di delaminazione ricostruita con i report forniti dal Phased-Array, risulta sovrapposta ai punti di risposta ottenuti dalla triangolazione PE con le onde di Lamb. Analizzando i segnali provenienti dai sensori, si sono potuti tracciare degli archi di circonferenza che visualizzano i punti in cui l'onda ultrasonora viene riflessa indietro, essi coincidono con le delaminazioni viste con l'approccio tradizionale. Si riportano in Tabella 4.4 e 4.5 le misure effettuate per gli altri difetti alle varie energie di impatto.

Capitolo 4

Localizzazione	Energia di impatto [J]	Dist. Delaminazione Pulse Echo[mm]	Rapp. K (pk.diff/pk.rif)
D5	5	87	0,039
C10	10	60	0,208
A15	15	54	0,049
D15	15	93	0,231
F15	15	59,1	0,214
G20	20	58,1	0,267
B20	20	70	0,094

Tabella 4.4: Risultati di localizzazione del danno e coefficiente K alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica di 45 kHz

Localizzazione	Energia di impatto [J]	Dist. Delaminazione Pulse Echo[mm]	Rapp. K (pk.diff/pk.rif)
D5	5	51	0,238
C10	10	48	0,203
A15	15	32	0,297
D15	15	25,2	0,146
F15	15	88,8	0,209
G20	20	32,8	0,333
B20	20	58,1	0,1638

Tabella 4.5: Risultati di localizzazione del danno e coefficiente K alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica di 60 kHz

È da sottolineare che i risultati ottenuti nella localizzazione tramite approccio PE per difetti naturali, non sono direttamente confrontabili, infatti, ricordando che il danno visibile è quello la cui dimensione caratteristica d è maggiore di $\frac{\lambda}{4}$ in cui λ è la lunghezza d'onda dell'onda diagnostica, è possibile che variando la frequenza di eccitazione, rispondano in maggior modo punti differenti del difetto. In generale però, in riferimento alla Figura 4.19, è ragionevole supporre che i punti di risposta dell'approccio PE sono contenuti in tutta l'area delaminata. Si può quindi concludere che le misure ottenute nelle Tabelle 4.4 e 4.5, rappresentino gli archi di circonferenza che attraversano la zona delaminata a causa degli impatti a cui si è sottoposto il laminato SAATI EH550/T800S rispetto ai quali si ha la risposta PE del danno. Chiaramente sono differenti in relazione alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica e alla dimensione caratteristica individuabile.

E' da ricordare che nella risposta potrebbe avere effetto non trascurabile lo sviluppo del danno verso una direzione preferenziale, infatti l'impatto potrebbe aver verosimilmente provocato rottura locale nella direzione verso la quale la resistenza era minore per effetto di anomalie pre-esistenti o difetti di produzione. Questo ha fatto sì che lo sviluppo del danno fosse in misura maggiore rispetto all'energia fornita nell'impatto. In questo caso unendo la differente modalità di risposta in relazione alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica, si può in parte giustificare la diversità dei risultati di localizzazione ottenuti. Sarà tuttavia scopo degli sviluppi futuri di questo lavoro determinare rigorosamente se il meccanismo di danneggiamento ha effetto sul buon funzionamento del metodo, ci si servirà per questo dell'analisi statistica affrontata nel Capitolo 5.

4.3 Approccio Pitch Catch per difetti naturali creati con prove di impatto ad energia crescente.

Ci si accinge con questo ultimo paragrafo del Capitolo 4, a descrivere l'ultima tipologia di prova effettuata per capire l'interazione delle onde di Lamb, con le delaminazioni presenti all'interno del laminato. Come eseguito per le precedenti, anche per l'approccio PC è giunta la volta di verificarne il comportamento in relazione alle delaminazioni naturali ottenute con le prove di impatto. Si rimanda al Paragrafo 4.1 per approfondimenti sulla modalità di esecuzione della prova e sulle dimensioni dei danni prodotti in relazione all'energia utilizzata in ogni impatto.

Per completare il lavoro sull'approccio PC si è in un primo momento pensato di effettuare un ragionamento analogo al procedimento svolto per quanto è stata la caratterizzazione PE, svolta nel Paragrafo 4.2, in cui prima si è acquisito il riferimento, poi si sono effettuati gli impatti e infine si è acquisito il segnale contenente l'indicazione del difetto prodotto.

Tuttavia in questo ultimo passaggio, per mancanza di ulteriori piastre SAATI EH550/T800S vergini, si è preferito sfruttare gli impatti già presenti sul laminato, effettuati per la prova PE. Fatta questa precisazione fondamentale, il modo di procedere per caratterizzare il comportamento dell'approccio Pitch Catch, è stato il medesimo di quello svolto nel Paragrafo 3.5 in tutte le sue parti. Si è quindi provveduto ad installare mediante incollaggio, dopo opportuno

collegamento elettrico, ulteriori sensori PZT a valle della zona impattata a creare il punto di ascolto PC, si faccia riferimento alla Figura 3.17 per una più facile comprensione.

Avendo strumentato la piastra, utilizzando la medesima catena di misura esposta in Figura 2.18 adattata al caso Pitch Catch, si è proceduto all'acquisizione del segnale di riferimento dal sensore Pitch Catch detto Ideale con le stesse modalità esposte nel Paragrafo 3.5 in maniera tale da ottenere solo la porzione di interesse su cui svolgere l'analisi, ovvero il picco di prima trasmissione. Immediatamente dopo, si è acquisito il segnale PC detto reale a valle dell'impatto. Come al solito sono state effettuate le operazioni preliminari sui segnali appena acquisiti, ovvero i passaggi canonici di pulitura, ed estrazione del massimo contributo energetico alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica e involuppo, utilizzando rispettivamente le funzioni DWT, CWT, e involuppo di Hilbert come nel Capitolo 2 e 3.

Resi disponibili i segnali su cui svolgere i calcoli dei coefficienti d'esame, la Figura 4.20 raccoglie i risultati intermedi dopo pulitura ed estrazione, si sono calcolati rispettivamente sia per il riferimento che per il segnale contenente l'informazione sulla delaminazione:

- Velocità di propagazione del modo A_0
- Varianza del segnale
- Contenuto energetico RMS
- Crest Factor
- Coefficiente di trasmissione H

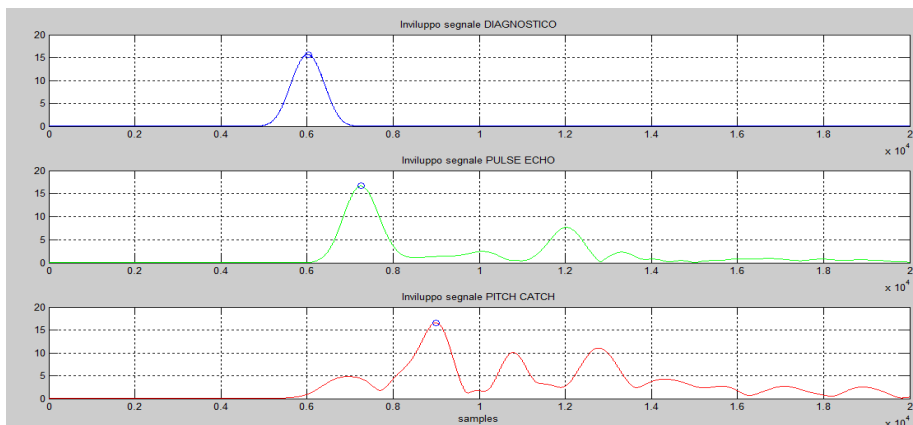


Figura 4.20: Segnali PC resi disponibili dopo le operazioni di pulitura, estrazione del massimo contributo energetico alla frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica di 45kHz e involuppo

Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali

Per il coefficiente di trasmissione H, parametro sintetico utilizzato nel Capitolo 5 per determinare i fattori significativi della delaminazione che ne determinano la variazione tramite l'analisi statistica DOE, è importante ricordare che anche in questo caso è stata effettuata la compensazione sull'attenuazione rispetto alla distanza percorsa differente tra caso base e segnale dal difetto.

Di tutti gli altri coefficienti, si è calcolata la variazione percentuale per visualizzare in maniera più significativa lo scostamento dal caso base. Si faccia riferimento alle equazioni (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10) e (3.11).

4.3.1 Risultati ottenuti dalla tecnica Pitch Catch applicata ai difetti naturali

Si sono sfruttati gli impatti effettuati precedentemente alle energie di 5J, 10J, 15J e 20J provati ognuno alle frequenze di eccitazione dell'onda diagnostica seno finestrato Hanning a 5.5 cicli. Ed è emerso quanto segue, le Tabelle 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. Riportano i risultati ottenuti. Fare nuovamente riferimento alla legenda di Paragrafo 3.5.2

f kHz	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC CORR	H	H_Co rr	Delta S
35	1238,20	1320,40	6,64	9,64	6,64	31,13	0,10	0,01	86,43	0,64	0,70	10,13	0,16	0,02	0,03	0,14	0,19	94,00
45	1324,90	1333,70	0,66	26,54	23,46	11,62	0,15	0,02	86,14	0,78	1,03	31,13	0,24	0,04	0,05	0,15	0,21	94,00
50	1564,20	1343,10	14,14	16,35	18,79	14,92	0,04	0,02	51,34	0,79	1,04	31,50	0,07	0,04	0,05	0,54	0,72	94,00
60	1334,70	1342,50	0,58	5,13	5,23	2,01	0,07	0,01	82,35	0,77	0,90	16,84	0,11	0,02	0,03	0,19	0,26	94,00
80	1455,00	1421,70	2,29	0,18	0,23	27,23	0,01	0,00	80,00	0,81	0,84	3,33	0,02	0,00	0,01	0,20	0,27	94,00

Tabella 4.6: Risultati ottenuti per la delaminazione sul laminato SAATI EH550/T800S prodotta a seguito di un impatto di energia pari a 5J

f kHz	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC CORR	H	H_Co rr	Delta S
35	1167,40	1198,60	2,67	8,45	6,85	18,90	0,14	0,11	24,73	0,49	0,50	0,49	0,20	0,15	0,15	0,76	0,81	90
45	1256,70	1253,00	0,29	32,02	32,15	0,38	0,20	0,14	29,55	0,75	0,94	25,33	0,32	0,24	0,24	0,76	0,81	90
50	1269,10	1276,80	0,61	26,14	20,84	20,28	0,13	0,11	17,64	0,99	0,93	6,49	0,24	0,19	0,19	0,81	0,91	90
60	1265,70	1259,00	0,53	6,65	6,53	1,79	0,08	0,07	14,53	0,91	0,84	7,83	0,14	0,12	0,12	0,83	0,92	90
80	1127,30	1192,60	5,79	0,27	0,24	9,70	0,02	0,01	5,92	1,06	0,74	30,12	0,03	0,02	0,02	0,81	0,91	90

Tabella 4.7: Risultati ottenuti per la de laminazione sul laminato SAATI EH550/T800S prodotta a seguito di un impatto di energia pari a 10J

Capitolo 4

f [kHz]	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_PE	s_PC	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC_CORR	H	H_Corr	Delta S
35,000	931,677	909,645	2,365	5,856	2,647	54,802	0,032	0,007	77,950	0,503	0,416	17,445	0,046	0,010	0,013	0,210	0,281	91,000
45,000	1101,300	1311,500	19,087	28,499	10,165	64,331	0,046	0,011	75,541	0,769	0,555	27,858	0,075	0,017	0,022	0,223	0,297	91,000
50,000	1170,000	1302,300	11,308	26,540	10,015	62,267	0,042	0,012	72,076	0,824	0,563	31,651	0,069	0,018	0,023	0,253	0,337	91,000
60,000	1240,700	1265,700	2,015	7,875	5,942	24,553	0,025	0,008	68,400	0,821	0,599	26,995	0,042	0,012	0,016	0,284	0,377	91,000
80,000	1301,000	1136,900	12,613	0,394	0,388	1,649	0,006	0,002	64,286	0,866	0,590	31,890	0,010	0,003	0,004	0,313	0,416	91,000

Tabella 4.8: Risultati ottenuti per la de laminazione sul laminato SAATI EH550/T800S prodotta a seguito di un impatto di energia pari a 15J

[kHz]	V_PE [m/s]	V_PC [m/s]	%	s_P E	s_P C	%	RMS PE	RMS PC	%	CF PE	CF PC	%	Max PE	Max PC	Max PC_CORR	H	H_Corr	Delta S
35	904,36	1191,50	31,75	8,43	6,79	19,51	0,14	0,02	82,72	0,52	0,46	10,40	0,20	0,03	0,05	0,17	0,23	112,00
45	986,00	1288,10	30,64	24,09	9,91	58,87	0,22	0,03	85,94	0,80	0,62	22,55	0,37	0,05	0,07	0,13	0,18	112,00
50	921,00	1548,20	68,10	22,60	9,36	58,59	0,21	0,02	89,38	0,65	0,60	7,62	0,33	0,03	0,05	0,10	0,15	112,00
60	939,00	1460,10	55,50	5,72	1,79	68,66	0,13	0,02	87,36	0,58	0,43	24,57	0,20	0,02	0,03	0,12	0,16	112,00
80	1078,80	1464,60	35,76	0,26	0,10	61,27	0,03	0,00	88,13	0,49	0,63	28,22	0,04	0,01	0,01	0,13	0,18	112,00

Tabella 4.9: Risultati ottenuti per la de laminazione sul laminato SAATI EH550/T800S prodotta a seguito di un impatto di energia pari a 20J

Osservando attentamente quanto emerso, notiamo che il comportamento dell'approccio PC è simile a quanto visto per le delaminazioni artificiali, bisogna ancora una volta sottolineare che in quelle naturali, nulla è più regolare rispetto alla circolare patch di teflon inserita nello spessore del laminato. Quindi anche se i risultati rispecchiano quanto osservato nella prova precedente, la variazione dal segnale di riferimento al segnale con l'indicazione, risulta più accentuata. In particolare notiamo che per quanto riguarda la velocità di propagazione del modo antisimmetrico di Lamb A_0 il passaggio attraverso il danno ne provoca un aumento che risulta essere intorno al 6 % medio con energia di 5 J fino a picchi che vanno oltre il 65% per energie pari a 20 J. Notiamo però che in alcune prove, ad esempio 5J a 50 kHz (Tabella 4.6) oppure 15J a 80kHz (Tabella 4.8) si ha un rallentamento invece che una accelerazione della propagazione, il motivo del comportamento potrebbe essere ricondotto alla presenza di forti irregolarità nel danno attraversato che determinano interazioni differenti al variare della frequenza dell'onda diagnostica, oppure alla variabilità introdotta dall'effetto di incollaggio, ancora una volta eseguito manualmente. Si

Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali

Faccia riferimento alla Figura 4.21, in cui si riporta il grafico della variazione percentuale della velocità rispetto al riferimento nell'attraversamento del danno.

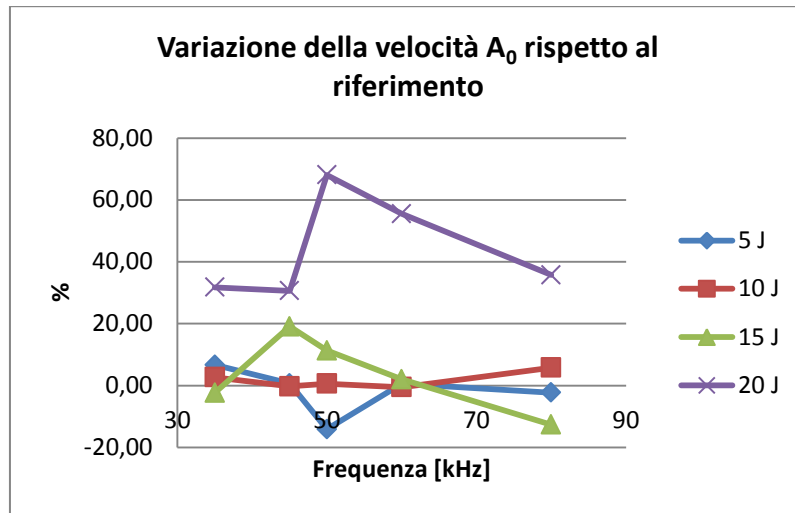


Figura 4.21: Variazione della velocità del modo A_0 nell'attraversamento della delaminazione nel laminato SAATI EH550/T800S

Quello che si può ulteriormente osservare è che l'energia di impatto ha effetto solamente per valori elevati, 15 e 20 J, mentre la frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica non sembra avere grande influenza a parte per le prove ad alta energia.

Il calcolo della varianza della porzione di segnale riguardante solo l'onda di prima trasmissione, la cui variazione rispetto al riferimento è riportata in Figura 4.22, ha evidenziato che sia energia che frequenza di eccitazione sembrano avere influenza determinando una netta diminuzione per le energie più elevate di impatto identificate in 15 e 20 J. In quel caso si assiste ad una riduzione che supera il 65% rispetto al caso base. Ma contrariamente a quanto visto precedentemente con le delaminazioni artificiali, per energie di 5 e 10 J si è visto mantenere la quasi costanza o addirittura un aumento della varianza passando dal segnale di riferimento al segnale contenente l'indicazione.

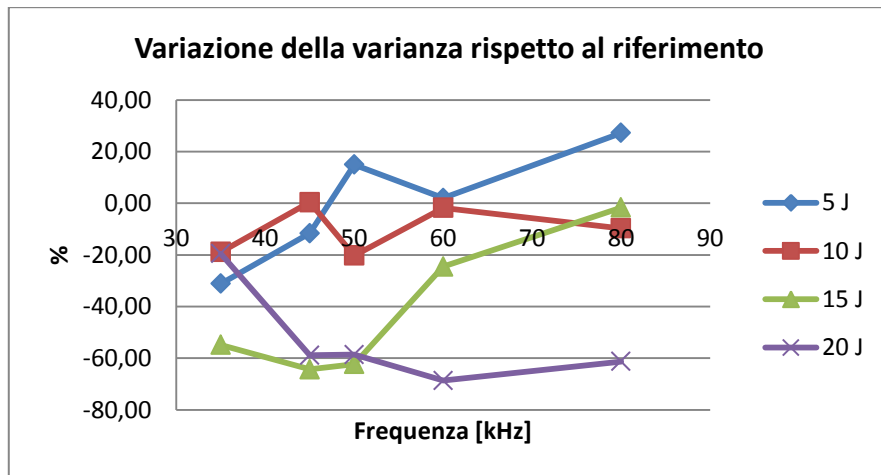


Figura 4.22: Variazione percentuale della varianza della porzione di segnale di prima trasmissione all'interno del laminato SAATI EH550/T800S

In particolare, si è visto che nel caso dell'impatto a 5 J, passando da una frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica di 35kHz fino al massimo di 80 kHz, si assiste prima ad una diminuzione della varianza, poi alle frequenze intermedie di 45 e 50 kHz piccole variazioni di quest'ultima attorno allo zero, per poi incrementare alla massima frequenza. Mentre per il caso della delaminazione a 10 J, si assiste ad un comportamento di transizione. Si può attribuire questo comportamento all'interazione con diverse parti del difetto creato in relazione alla lunghezza d'onda dell'onda diagnostica. Per energie di impatto più basse il danno provocato non è ancora del tutto netto, cioè esistono ancora zone in cui fibra e matrice hanno delle continuità con il materiale circostante, presentando però cricche e fessurazioni di differente dimensione. Mentre ad energie più elevate questo fenomeno di transizione della varianza, si è pensato non possa avvenire dato che la rottura all'interno del laminato risulta completa, più assimilabile ad una delaminazione artificiale con patch di teflon in cui si ha netta separazione del materiale, riconducendo così il comportamento a quel caso.

Per quanto riguarda il calcolo del valore efficace RMS (Figura 4.23), l'unico fattore di influenza sulla variazione percentuale rispetto al riferimento sembra essere l'energia di impatto. Nei casi 5, 15 e 20J si ha una forte diminuzione nell'attraversamento della delaminazione rispetto al caso base, quantificabile per ogni prova a differente energia di impatto pari a più dell'80% per la massima energia, 70% per l'energia a 15 J, e 80 % per la prova a 5 J. Risulta strano il

Analisi dell'interazione delle onde di Lamb con difetti naturali

caso a 10J, in cui l'andamento risulta differente rispetto agli altri. Motivo probabile di questa anomalia per la prova eseguita a 10J, è riconducibile a effetti di incollaggio che hanno inficiato sulle rilevazioni.

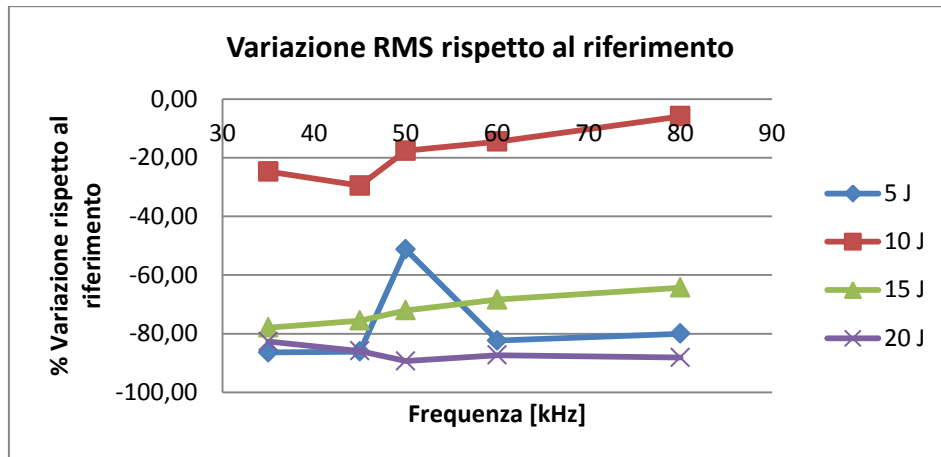


Figura 4.23: Variazione percentuale dell'RMS rispetto al riferimento per differenti energie di impatto sul laminato SAATI EH550/T800S

Infine il coefficiente CF (Figura 4.24) in cui sembra che sia energia che frequenza di eccitazione abbiano influenza, vede lo stesso comportamento osservato per la varianza, si ha una netta diminuzione per energie di impatto elevate pari a 15 e 20 J rispetto al caso base con variazioni rispetto al segnale di riferimento superiori al 30 % medio. La prova eseguita a 10 J, ritorna ad avere un comportamento di transizione, in cui si osserva una diminuzione rispetto al caso base pari al 30%, mentre per frequenze più basse si nota addirittura un aumento rispetto al riferimento pari al 25%. In conclusione per la prova a 5 J, il Crest Factor ha dato valori di incremento rispetto al segnale di riferimento.

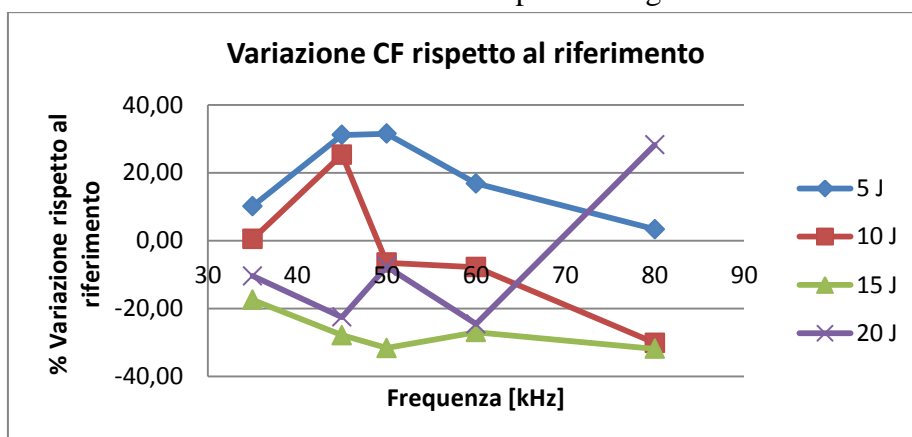


Figura 4.24: Variazione percentuale del Crest Factor durante l'attraversamento dell'onda nella delaminazione all'interno del laminato SAATI EH550/T800S

Noti i ragionamenti fatti e visti i risultati ottenuti, escludendo dall'analisi la prova Pitch Catch eseguita sull'impatto a 5 J è possibile dire che il comportamento è aderente a quanto visto per i difetti artificiali. In ottica SHM, si rimanda a quanto esposto alla fine del Paragrafo 3.5.2 per la tecnica Pitch Catch abbinata ai difetti artificiali, per un efficace futura attuazione.

4.4 Bibliografia

In questo capitolo si è fatto riferimento ai seguenti testi, libri, articoli e pagine internet.

- [4.1] Jae-Mean Koo, Jung-Hun Choi, Chang-Sung Seok, *Evaluation for residual strength and fatigue characteristics after impact in CFRP composites*
- [4.2] Mehmet Aktas, H. Ersen Balciog̃lu, Alaattin Aktas, Erkan Turker, M. Emin Deniz, *Impact and post impact behavior of layer fabric composites*
- [4.3] LI Zhipeng, XIE Xiaolin*, HONG Zhen, LU Chao, WANG Gaochao, *Evaluation of Impact Damage Tolerance in Carbon Fabric/epoxy-matrix Composites by Electrical Resistance Measurement.*
- [4.4] G. Caprino, *Residual Strength Prediction of Impacted CFRP Laminates*
- [4.5] Koo JM, Choi JH, Seok CS, *Prediction of residual strength of CFRP after impact.* Composites Part B 2013; in press.
- [4.6] E Jasiūnien, R Raišutis, R Šliteris, A Voleišis, A Vladišauskas, *Application of different ultrasonic techniques for non-destructive testing of the wind turbine blades* Ultrasound Institute
Kaunas University of Technology Lithuania
- S. Samanta, S. S. Samant, A. Banerjee, N. Nayak and D. Datta, *Ultrasonic Imaging of Impacted Composite Armour*s, Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation
- [4.7] http://www.advanced-ndt.co.uk/Automated_Testing.html

Capitolo 5 -- Analisi del coefficiente di trasmissione e riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti artificiali e naturali

Nella parte conclusiva del presente lavoro, si analizzeranno i coefficienti di riflessione e di trasmissione calcolati con le tecniche PE e PC sul laminato SAATI EH550/T800S variamente difettato. L'analisi è di tipo statistico, che attraverso la progettazione degli esperimenti e alla stesura di un piano fattoriale 2^k , andrà ad analizzare se i fattori caratterizzanti il difetto sono significativi o meno. Come accennato, le caratteristiche del danno assumono caratteristiche differenti se esso è stato ottenuto artificialmente inserendo delle patch di teflon all'interno del laminato, oppure se è determinato da impatti. In particolare, è possibile distinguere i fattori caratterizzanti della delaminazione artificiale come:

- 1) Dimensione
- 2) Posizione all'interno dello spessore

Con il danno naturale, l'unico fattore diviene l'energia di impatto. Infine, la frequenza dell'onda diagnostica che attraversa il laminato è un fattore comune di entrambe le tipologie di difetti.

Prima di analizzare i risultati ottenuti dall'analisi statistica, è opportuno spiegare che cosa si intende per progettazione degli esperimenti e analisi ANOVA.

5.1 Progettazione e analisi degli esperimenti

In termini di progettazione degli esperimenti, l'approccio ad una o più campagne sperimentali, soprattutto se queste prevedono grande numerosità di campioni o modelli onerosi dal punto di vista computazionale ed economico, avviene con taglio statistico al fine di utilizzare le risorse di tempo e di calcolo in maniera efficiente. La tecnica utilizzata è il DOE (Design Of Experiment)

[5.1], strumento potente e trasversale che permette in primo luogo di fissare la progettazione sperimentale e così ottenere un miglioramento del sistema di acquisizione e analisi. Un flow chart delle operazioni creato prima di applicare il DOE, descrive l'approccio al problema [5.1].

- 1) Caratterizzazione del problema, in cui si individuano i fattori significativi del fenomeno. Questi fattori saranno quelli che determineranno l'output degli esperimenti. Si sono esposti ampiamente quali sono fattori di input in relazione alle prove PE e PC svolte e ai difetti, mentre l'output si identifica nel coefficiente di riflessione e di trasmissione ottenuti.
- 2) Ottimizzazione del problema, agendo sulle variabili di input del punto precedente, si determina l'output più favorevole.
- 3) Progettazione robusta, in cui si stabilisce un livello di taratura degli esperimenti in maniera da ottenere dei risultati non influenzati dalla variazione dei parametri operativi.

Dopo questi tre passaggi, è possibile applicare il DOE, per ottenere il massimo numero di informazioni del problema studiato, con il minimo numero di esperimenti. Con un numero di prove limitate i risultati ottenuti saranno caratterizzati da informazioni meno accurate. Di conseguenza l'approccio statistico diviene fondamentale per interpretare informazioni incomplete e permettere di trarre conclusioni logiche, non potendo effettuare un numero di prove tendente a infinito per essere certi del risultato completo. Lo strumento statistico diviene l'unico modo per interpretare i risultati.

Quando l'insieme di dati è affetto da errori sperimentali, per eseguire la campagna di prove corretta, è necessario progettare il piano fattoriale più appropriato in relazione al problema che si vuole studiare con gli esperimenti. La progettazione propedeutica alla scelta del piano, deve seguire tre principi fondamentali [5.1]:

- 1) Ripetibilità, cioè rendere gli esperimenti ripetibili per uno stesso set di dati. Questo determina l'ottenimento di un risultato più preciso a valle del calcolo della media e della stima dell'errore sperimentale tra un'acquisizione e l'altra a parità di condizioni al contorno.

Analisi del coefficiente di trasmissione e di riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti naturali e artificiali

- 2) Casualità, al fine di limitare l'introduzione di errori sistematici. Il principio è attuato effettuando gli esperimenti in maniera casuale, così da svincolare una acquisizione dalla successiva.
- 3) Esecuzione a blocchi, ovvero gli esperimenti vengono eseguiti a gruppi simili di fattori caratterizzanti. Questo per rendere più accurati i risultati e ridurre la variabilità.

5.2 Piani sperimentali DOE

In letteratura esistono diversi piani sperimentali [5.1], tuttavia uno di quelli di più largo uso, è l'OAT (One factor At Time) un fattore alla volta. Questo metodo consiste nello scegliere uno o più valori iniziali per ciascun fattore caratterizzante il fenomeno e in un secondo momento far variare uno alla volta il valore scelto per ognuno, mantenendo fissi gli altri. Questo metodo di facile attuazione, presenta però due svantaggi: lascia delle aree inesplorate che aumentano velocemente all'aumentare del numero di fattori considerati, in più non contempla la possibile interazione tra i fattori scelti come significativi.

Il fatto di non contemplare l'interazione tra i fattori, cioè considerare che un fattore causa lo stesso effetto sulla risposta al variare dei livelli di un altro fattore, ha reso inadatto il metodo per lo studio dell'interazione tra onde di Lamb e danno. L'approccio corretto nell'analisi statistica, sta nel considerare la variazione congiunta di ogni fattore del fenomeno di interazione, resa possibile dal piano fattoriale completo 2^k .

È utile riportare due definizioni preliminari per descrivere un piano fattoriale completo, prima di proseguire con l'esposizione.

Si definisce effetto Main di un singolo fattore la differenza tra i valori assunti dalla variabile di risposta y a differenti livelli del fattore stesso [5.1]. Si consideri ad esempio un fenomeno contraddistinto dai fattori a , b , c . L'equazione (5.1) riporta l'espressione per l'effetto Main del fattore a :

$$M_a = \frac{y_A + y_{AB} + y_{AC} + y_{ABC}}{4} - \frac{y_I + y_B + y_C + y_{BC}}{4} \quad (5.1)$$

in cui troviamo y_A la risposta dell'esperimento settato al valore alto del fattore a , y_{AB} la risposta congiunta dell'esperimento al valore alto contemporaneo dei fattori a , b e così per gli altri. Unica eccezione sta in y_I in cui il pedice I indica la risposta y congiunta dell'esperimento al valore basso dei fattori a , b e c . Analogamente vale per gli effetti Main dei fattori b e c .

Si definisce invece interazione tra due o più fattori la differenza tra i valori assunti dalla variabile di risposta y a valori incrociati superiori e inferiori di quei fattori [5.1]. L'equazione che esprime l'interazione tra due fattori a e b , è riportata qui di seguito:

$$M_{ab} = \frac{y_I + y_C + y_{AB} + y_{ABC}}{4} - \frac{y_C + y_{AC} + y_B + y_{BC}}{4} \quad (5.2)$$

la cui interpretazione è del tutto analoga alla (5.1).

5.2.1 Piano Fattoriale completo 2^k

Il piano fattoriale completo analizza la variazione della variabile di output per effetto della variazione congiunta di più fattori caratterizzanti il fenomeno, sfruttando in maniera efficiente i dati disponibili dopo le acquisizioni. In generale quando tutti i fattori vengono indagati con lo stesso numero di livelli, si parla di una famiglia di piani fattoriali a L livelli e k fattori. Dove L^k rappresenta il numero di prove da effettuare per caratterizzare completamente il fenomeno. Un piano fattoriale si dice completo quando nell'analisi statistica si utilizzano tutte le possibili combinazioni dei fattori. In particolare nei casi studiati, si è adottato un piano fattoriale 2^k , ciò significa che ogni fattore ha solo due modalità, ad esempio basso o alto. Questi due livelli, convenzionalmente si denotano con la simbologia +1 (alto) e -1 (basso), indicando i fattori a livello alto con una lettera maiuscola. Si pensi ad esempio alla sperimentazione PE e PC con difetti naturali in cui si sono analizzati i $k = 2$ fattori di energia e frequenza, denominati rispettivamente con le lettere A e B. La Tabella 5.1 riporta le combinazioni.

Analisi del coefficiente di trasmissione e di riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti naturali e artificiali

Fattore	A (Energia di impatto)	B (Frequenza)
(I)	-1	-1
a	+1	-1
b	-1	+1
ab	+1	+1

Tabella 5.1: Piano fattoriale completo 2^k per le prove PC e PE difetti naturali

Per le prove effettuate con difetti artificiali, i fattori considerati sono tre: dimensione delaminazione, posizione nello spessore del laminato e frequenza, indicati rispettivamente con le lettere A, B e C. La Tabella 5.2, riporta le otto combinazioni effettuate.

Fattore	A (Dimensione delam.)	B (Posizione nello spess.)	C (Frequenza)
(I)	-1	-1	-1
a	+1	-1	-1
b	-1	+1	-1
c	-1	-1	+1
ab	+1	+1	-1
bc	-1	+1	+1
ac	+1	-1	+1
abc	+1	+1	+1

Tabella 5.2: Piano fattoriale completo 2^k per prove PE e PC con difetto artificiali

È ora possibile definire graficamente il piano fattoriale, che si identificherà in uno spazio euclideo quadrato per il caso in cui i k fattori sono 2, e in uno cubico in cui i k fattori sono 3, rispettivamente nel caso dei difetti naturali e in quelli artificiali, la Figura 5.1 ne riporta l'esempio.

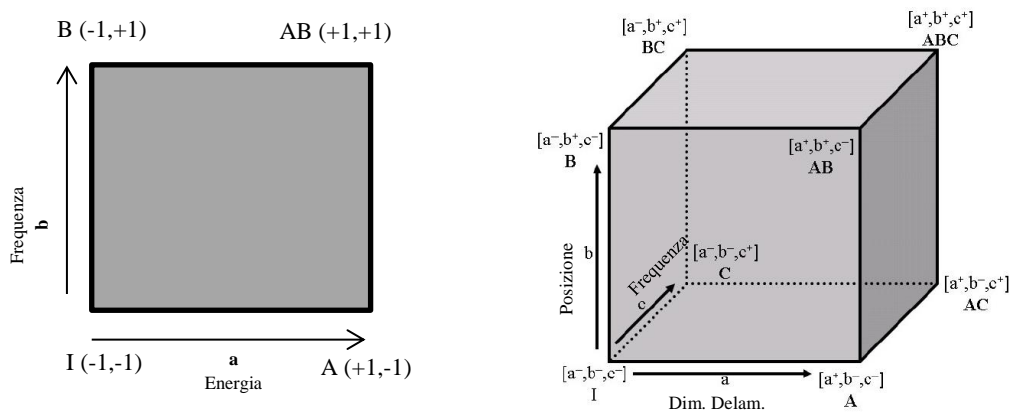


Figura 5.1: Rappresentazione euclidea dei piani fattoriali 2^k effettuati sulla piastra SAATI EH550/T800S con tecnica PE e PC: a) difetti naturali, b) difetti artificiali

Una volta organizzate le varie combinazioni dei fattori che descrivono il problema, è opportuno focalizzare l'attenzione sull'obiettivo del DOE e sulla scelta del numero di livelli in relazione al fenomeno studiato. Il numero di livelli si comporta in modo analogo al numero degli elementi utilizzati in un modello FEM laddove è necessario seguire accuratamente il fenomeno. In quel caso, il numero di elementi finiti aumenta infittendosi, allo stesso modo, il numero di livelli del piano aumenterà dove il fenomeno si discosterà dalla linearità. Metodi a due livelli permettono la descrizione di fenomeni lineari o bilineari, quelli a tre livelli permettono di seguire risposte quadratiche o biquadratiche. Nel caso in cui la risposta del fenomeno è lineare, come nei casi studiati, è inutile aumentare il numero di livelli oltre a due. Il piano 2^k risulta particolarmente indicato per la valutazione degli effetti Main e le interazioni tra i fattori.

5.2.2 *Analisi ANOVA*

L'analisi ANOVA (ANalysis Of VAriance) utilizzata all'interno del DOE, è un insieme di tecniche di statistica inferenziale, le quali permettono di analizzare n gruppi di dati, confrontando la variabilità interna (Within) degli stessi con la variabilità esterna (Between) tra i gruppi [5.2]. Lo scopo applicativo dell'analisi, è valutare l'importanza relativa delle diverse fonti di variabilità osservata nel corso di un esperimento. Tale variazione può essere di tipo sistematico, che rimane sotto il controllo di chi esegue gli esperimenti, oppure di tipo stocastico, dovuta a condizioni ambientali, errori di misura, contributi non previsti, ecc.

Si tratta perciò di formulare un'ipotesi nulla H_0 la quale prevede che tutti i gruppi abbiano la stessa media a significare che l'appartenenza ad uno stesso gruppo non determina variazione del risultato, che i dati di ogni gruppo provengono dalla stessa popolazione e che la variabilità osservata sia solamente dovuta al caso. Definita l'ipotesi nulla, è necessario che sia presente anche la sua negazione, l'ipotesi alternativa H_a . Spesso quest'ultima coincide con quello che si vuole dimostrare, cioè che almeno un gruppo ha media differente dalle altre e i fattori considerati sono significativi [5.3]. Nei casi studiati, si vuole dimostrare che i fattori considerati negli approcci PE e PC, per difetti naturali o artificiali, siano effettivamente responsabili della variazione osservata sulle variabili di output rispettivamente nel coefficiente di riflessione e trasmissione.

Analisi del coefficiente di trasmissione e di riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti naturali e artificiali

Nota la varianza Within dovuta alla casualità interna e quella Between della variabile di risposta attribuibile alla manipolazione degli esperimenti, si cerca di determinare il peso di una rispetto all'altra con lo scopo di capire se la variazione osservata a causa del cambiamento dei fattori sia effettivamente attribuibile a tale cambiamento oppure ad altro. Il coefficiente calcolato che determina l'accettazione o il rigetto dell'ipotesi nulla, è il p -value, ossia il livello di significatività del test. Fissati ipotesi nulla e il livello di significatività $\alpha = 10\%$ su cui condurre il test, una volta calcolato il relativo p -value è possibile comportarsi come segue:

- se $p\text{-value} \geq \alpha$ l'ipotesi nulla va accettata;
- se $p\text{-value} < \alpha$ l'ipotesi nulla va rigettata.

Ulteriore precisazione, riguarda la valutazione della normale variabilità del processo. Tale operazione è effettuabile se si posseggono almeno due repliche di dati, ovvero gruppi di acquisizioni provenienti da campioni diversi creati con le stesse caratteristiche.

Tuttavia dopo aver applicato l'analisi ANOVA per la significatività dei fattori, è necessario verificarne le ipotesi di:

- 1) Indipendenza delle osservazioni
- 2) Normalità della distribuzione
- 3) Omogeneità delle varianze
- 4) Omogeneità delle co-varianze

Per la verifica della normalità, si possono utilizzare alternativamente il test di Shapiro, oppure il test di Kolmogorov-Smirnov. Per la verifica dell'omogeneità delle varianze e delle co-varianze, si utilizzano rispettivamente il test di Bartlett e il test di Mauchly, che come si vedrà dai risultati ottenuti nel prossimo Paragrafo 5.3, risultano verificati. Si rimanda a test specifici per comprendere nel dettaglio i test statistici utilizzati [5.3].

Noto quindi lo scopo del DOE e dell'analisi ANOVA, si è pronti per presentare i risultati ottenuti dall'approccio statistico nelle tecniche PE e PC applicate sul laminato SAATI EH550/T800S. Sono stati resi disponibili i rispettivi coefficienti di riflessione e di trasmissione per i difetti artificiali e per quelli naturali. Anche se si sono esposti quali sono i fattori che più influenzano la

Capitolo 5

variabilità dei coefficienti, in realtà in un processo SHM basato sulle onde di Lamb, ne esistono ben nove, in particolare:

- 1) Materiale composito e configurazione del laminato
- 2) Modi di Lamb
- 3) Frequenza di eccitazione
- 4) Forma d'onda diagnostica
- 5) Tipologia di trasduttore utilizzato
- 6) Modalità di attuazione dei PZT
- 7) Modalità di ricezione dei segnali di risposta
- 8) Tipologia, dimensione, geometria e collocazione del difetto
- 9) Temperatura, vibrazioni, rumore elettro-magnetico

Di questi nove, leggendo i capitoli precedenti, si sono mantenuti volutamente fissi:

- Il materiale composito e la configurazione del laminato, dato che questi ultimi rispecchiano la tipologia ad oggi più utilizzata in campo aeronautico, si faccia riferimento al Capitolo 1.
- Il modo A_0 di Lamb, l'impossibilità di generare un modo puro di Lamb, determina la necessità di lavorare in un campo di frequenze in cui esiste principalmente solo il suddetto modo, come dimostrato nel Capitolo 2.
- Tipologia e geometria del difetto delaminativo, data che è la più comune e determina la maggior gravità nel degrado della struttura.
- Forma d'onda diagnostica con segnali caratterizzati da ristrette bande di frequenza
- Modalità di eccitazione in contro-fase, data l'efficacia nella magnificazione del solo modo anti-simmetrico A_0 .

Noto ciò, risultano fattori di disturbo: la temperatura, le vibrazioni e il rumore elettromagnetico, mentre fattori di interesse: la frequenza di eccitazione, la posizione nello spessore del laminato e la dimensione della delaminazione, dei quali si andrà a valutare l'effettiva significatività.

Analisi del coefficiente di trasmissione e di riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti naturali e artificiali

5.3 Analisi dei risultati statistici ottenuti per difetti artificiali e naturali sul laminato SAATI EH550/T800S con approcci PE e PC

Prima di procedere all'analisi dei risultati dai metodi statistici, è opportuno riassumere i dati ottenuti dalle prove effettuate nei Capitoli 3 e 4, in cui si sono calcolati i coefficienti di riflessione per la tecnica PE e i coefficienti di trasmissione per l'approccio PC, entrambi per difetti artificiali e naturali. Le Tabelle 5.3 e 5.4 riportano i rispettivi risultati per il laminato SAATI EH550/T800S, per ciò che riguarda il difetto artificiale identificato nella patch di teflon inserita in diverse posizioni nello spessore.

F [kHz] Prova	45	60	80
RX8A (24 mm) (16°-17°)	0,0838	0,1152	0,156
RX6B (24,8 mm) (1°-2°)	0,079	0,0891	0,0885
RX9C (10,3 mm) (16°-17°)	0,0819	0,118	0,1367
RX7D (9 mm) (1°-2°)	##	0,039	0,0805
RX1A (24 mm) (16°-17°)	0,212	0,123	0,160
RX2B (22,9 mm) (1°-2°)	##	0,2301	0,2141
RX4C (7,5 mm) (16°-17°)	0,141	0,1308	0,1184
RX3D (9,4 mm) (1°-2°)	0,0687	0,0578	0,1331

Tabella 5.3: Coefficienti di riflessione approccio PE per difetti artificiali sul laminato SAATI EH550/T800S

F [kHz] Prova	35	45	50	60	80
P UNO (24,8 mm) (1°-2°)	0,35	0,33	0,46	0,34	0,35
P UNO (24 mm) (16°-17°)	0,44	0,40	0,39	0,39	0,38
P UNO (10,3 mm) (16°-17°)	0,39	0,40	0,44	0,41	0,41
P UNO (9 mm) (1°-2°)	0,79	0,51	0,43	0,34	0,29
P DUE (24 mm) (16°-17°)	0,12	0,11	0,09	0,10	0,13
P DUE (22,9 mm) (1°-2°)	0,25	0,23	0,21	0,18	0,22
P DUE (7,5 mm) (16°-17°)	0,48	0,47	0,43	0,49	0,44
P DUE (9,4 mm) (1°-2°)	0,33	0,31	0,31	0,35	0,27

Tabella 5.4: Coefficienti di trasmissione approccio PC per difetti artificiali sul laminato SAATI EH550/T800S

Capitolo 5

Le Tabelle 5.5 e 5.6 riportano i valori dei coefficienti di riflessione e di trasmissione per i difetti naturali ottenuti dalle prove di impatto ad energia crescente

F [kHz]	45	60
Prova		
D (En = 5 [J])	0,039	0,238
C (En = 10 [J])	0,208	0,203
A (En = 15 [J])	0,049	0,297
D (En = 15 [J])	0,231	0,146
F (En = 15 [J])	0,214	0,209
G (En = 20 [J])	0,267	0,333
B (En = 20 [J])	0,094	0,1638

Tabella 5.5: Coefficienti di riflessione approccio PE per difetti naturali sul laminato SAATI EH550/T800S

F [kHz]	35	45	50	60	80
Prova					
Impatto 5 [J]	0,14	0,15	0,54	0,19	0,20
Impatto 10 [J]	0,76	0,76	0,81	0,83	0,81
Impatto 15 [J]	0,21	0,223	0,253	0,284	0,313
Impatto 20 [J]	0,17	0,13	0,10	0,12	0,13

Tabella 5.6: Coefficienti di trasmissione approccio PC per difetti artificiali sul laminato SAATI EH550/T800S

Ottenuti tutti i coefficienti di trasmissione e di riflessione, è possibile inserirli all'interno del software statistico MiniTab [5.4], che permette l'ottenimento del DOE attraverso il piano fattoriale 2^k . Da precisare che i valori dei coefficienti, andranno inseriti rispettando le Tabelle 5.1 e 5.2, ed è necessario scegliere i due livelli basso e alto rispetto ai fattori caratterizzanti. Per quel che riguarda i difetti artificiali, i fattori sono tre:

- Dimensione delaminazione (Fattore a)
- Posizione nello spessore (Fattore b)
- Frequenza di eccitazione (Fattore c)

Analisi del coefficiente di trasmissione e di riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti naturali e artificiali

Di conseguenza, rispetto alla Tabella 5.2, si inseriranno i coefficienti di trasmissione e di riflessione corrispondenti al livello basso (-1) con frequenza scelta di 45 kHz, dimensione minore pari a 8 mm e posizione nello spessore inferiore. Mentre per il livello alto (+1) si dovranno inserire i coefficienti ottenuti a frequenza di 60 kHz, dimensione maggiore di 24 mm e posizione superiore nello spessore. Con la stessa logica si inseriranno i coefficienti corrispondenti alle condizioni intermedie dei singoli fattori.

Con riferimento alla Tabella 5.1, che riporta il piano fattoriale per i difetti naturali ottenuti con le prove di impatto, noti i fattori:

- Energia (Fattore a)
- Frequenza (Fattore b)

Il metodo di inserimento dei coefficienti di trasmissione e riflessione è la medesima della precedente, ovvero come livello basso (-1) si considererà frequenza bassa di 45 kHz e minima energia di impatto di 5 J, mentre come livello alto (+1) i coefficienti inseriti corrisponderanno alla frequenza di 60 kHz ed elevata energia di impatto di 20 J. Analoga metodica per le combinazioni intermedie.

Applicata la procedura, si analizzano i risultati di significatività dei fattori caratterizzanti per le due tipologie di delaminazione.

5.3.1 Significatività dei fattori caratterizzanti i difetti artificiali con tecniche PE e PC

I coefficienti di riflessione, nella modalità PE applicata ai difetti artificiali, sembrano essere influenzati dai potenziali fattori di dimensione della delaminazione e la sua interazione con la frequenza dell'onda diagnostica attuata nel laminato. Tale affermazione è confermata dai risultati di Figura 5.2 in cui sono illustrati i grafici degli effetti principali e delle interazioni tra i fattori.

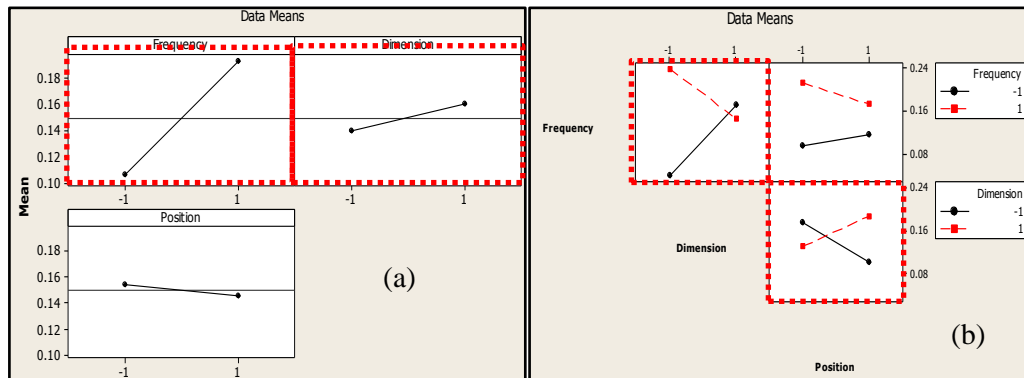


Figura 5.2: Risultato del DOE per l'approccio PE in relazione ai danni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S: a) effetti principali, b) interazioni

In Figura 5.2b si nota anche una lieve interazione della dimensione del danno con la sua posizione nello spessore del laminato.

L'analisi ANOVA, eseguita con un livello di significatività α pari al 10%, evidenzia l'interazione tra dimensione della delaminazione e frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica per effetto di un basso p-value che permette di rifiutare l'ipotesi nulla H_0 in favore dell'ipotesi alternativa H_a . Quest'ultima afferma, che i dati analizzati abbiano media differente da quella della popolazione e i fattori considerati sono significativi. Tuttavia la variabilità dei coefficienti di riflessione dovuta alla sola frequenza dell'onda diagnostica, risulta scarsamente significativa per effetto di un alto p-value, che permette di accettare l'ipotesi H_0 , la quale afferma che i dati provengano dalla stessa popolazione e l'unica variabilità sia dovuta al caso non essendo significativi i fattori considerati. Tutti gli altri fattori non risultano avere un livello elevato di significatività.

La Tabella 5.5, riporta il risultato ANOVA per il piano fattoriale completo applicato ai coefficienti di riflessione dall'approccio PE per difetti artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S.

Per completezza si riportano nella Figura 5.3 i test dei residui applicati per la verifica delle ipotesi di normalità, omogeneità della varianza per i coefficienti di riflessione, che determinano l'applicabilità dell'analisi ANOVA.

Analisi del coefficiente di trasmissione e di riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti naturali e artificiali

Estimated Effects and Coefficients for Response (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.14952	0.03025	4.94	0.001
Frequency	0.08687	0.04344	0.03025	1.44	0.189
Dimension	0.02073	0.01036	0.03025	0.34	0.741
Position	-0.00903	-0.00451	0.03025	-0.15	0.885
Frequency*Dimension	-0.11245	-0.05622	0.03025	-1.86	0.100
Frequency*Position	-0.03075	-0.01537	0.03025	-0.51	0.625
Dimension*Position	0.06505	0.03252	0.03025	1.08	0.314
Frequency*Dimension*Position	0.00283	0.00141	0.03025	0.05	0.964

S = 0.121001 PRESS = 0.468522
R-Sq = 46.92% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 0.48%

Tabella 5.7: Tavola ANOVA per i coefficienti di riflessione PE per delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S

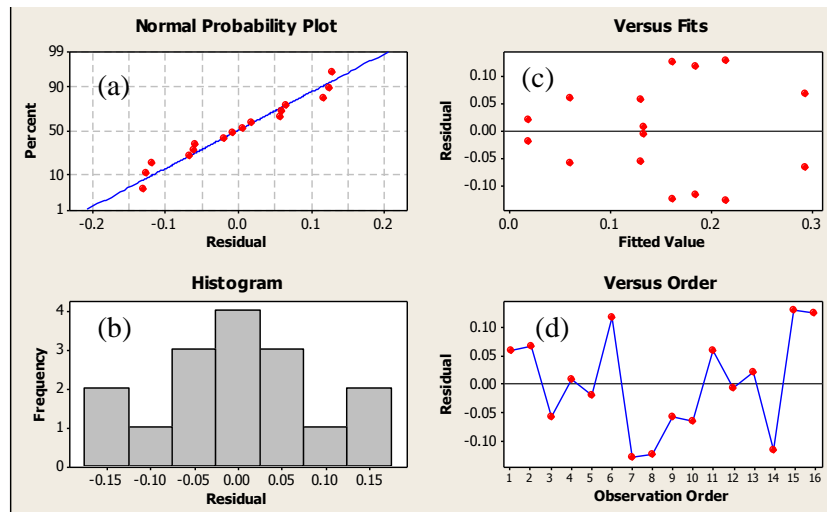


Figura 5.3: Ipotesi di applicabilità del modello ANOVA per i coefficienti di riflessione PE da delaminazioni artificiali: a), b) test di normalità, c), d) omogeneità della varianza, assenza di struttura, e indipendenza dei dati

L'approccio Pulse Echo applicato a delaminazioni artificiali, le cui performance sono quantificate dai coefficienti di riflessione, risultano essere influenzati dall'interazione della dimensione del danno con la frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica. Le variazioni osservate, per effetto degli altri fattori diversi dall'interazione dimensione-frequenza, risultano indipendenti. In conclusione l'approccio PE risulta poco sensibile alle delaminazioni estese, mentre ad alta frequenza dell'onda diagnostica si osserva una ripresa della significatività del fattore dimensione quando l'estensione del difetto risulta piccola.

Capitolo 5

Per ciò che riguarda il coefficiente di trasmissione, ottenuto dall'approccio PC applicato a difetti artificiali, si può osservare la Figura 5.4 in cui si sono inseriti i diagrammi degli effetti principali e di interazione per il laminato SAATI EH550/T800S.

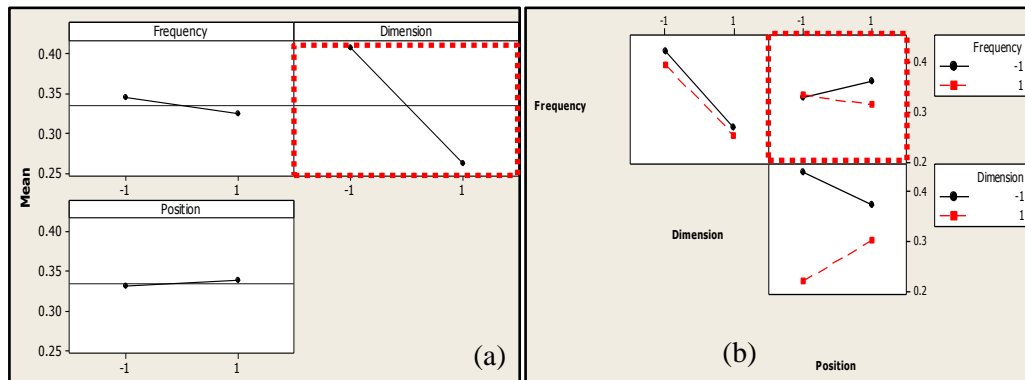


Figura 5.4: Risultato del DOE per l'approccio PC in relazione ai danni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S: a) effetti principali, b) interazioni

In questo caso rispetto alla configurazione PE, è la dimensione della delaminazione l'unico fattore significativo nella variabilità del coefficiente di trasmissione. L'esito risulta confermato dalla corrispondente analisi ANOVA riportata in Tabella 5.6, in cui il più basso valore del p-value associato alla dimensione porta a rifiutare l'ipotesi nulla H_0 in favore dell'ipotesi alternativa H_a .

Estimated Effects and Coefficients for Response (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0.33439	0.02979	11.23	0.000	
Frequency	-0.02031	-0.01016	0.02979	-0.34	0.742	
Dimension	-0.14621	-0.07311	0.02979	-2.45	0.040	
Position	0.00714	0.00357	0.02979	0.12	0.908	
Frequency*Dimension	0.00579	0.00289	0.02979	0.10	0.925	
Frequency*Position	-0.02626	-0.01313	0.02979	-0.44	0.671	
Dimension*Position	0.07419	0.03709	0.02979	1.25	0.248	
Frequency*Dimension*Position	0.01129	0.00564	0.02979	0.19	0.854	
S = 0.119150 PRESS = 0.454296						
R-Sq = 49.83% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 5.92%						

Tabella 5.8: Tavola ANOVA per i coefficienti di trasmissione PC per delaminazioni artificiali nel laminato SAATI EH550/T800S

Analisi del coefficiente di trasmissione e di riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti naturali e artificiali

In conclusione, le variazioni del coefficiente di trasmissione, ottenuto dalle prove PC, sono dovute esclusivamente alla dimensione della delaminazione incontrata sul cammino del modo A_0 . Con più il danno è esteso, con più si assiste ad una variazione cospicua del coefficiente di trasmissione, essendo la dimensione l'unico fattore significativo.

La Figura 5.5 mostra i risultati dei test sulle ipotesi di applicabilità dell'analisi della varianza.

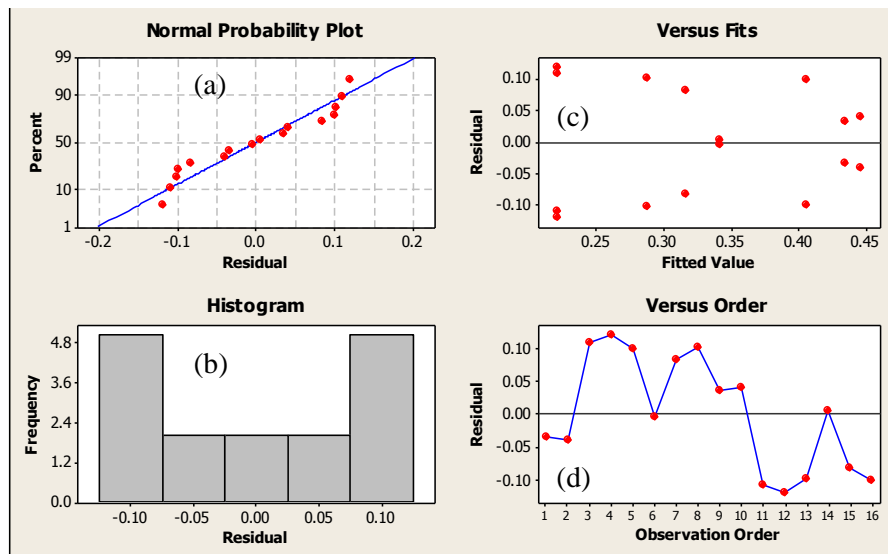


Figura 5.5: Ipotesi di applicabilità del modello ANOVA per i coefficienti di trasmissione PC da delaminazioni artificiali: a), b) test di normalità, c), d) omogeneità della varianza, assenza di struttura, e indipendenza dei dati

5.3.2 Significatività dei fattori caratterizzanti i difetti naturali con tecniche PE e PC

Con la stessa procedura del Paragrafo 5.3.1, si ripete l'analisi statistica per i coefficienti di riflessione generati dai difetti naturali prodotti sul laminato SAATI EH550/T800S. Identificati i fattori caratterizzanti il difetto delaminativo naturale, in energia e frequenza, la Figura 5.6 riporta il risultato del DOE per l'approccio PE.

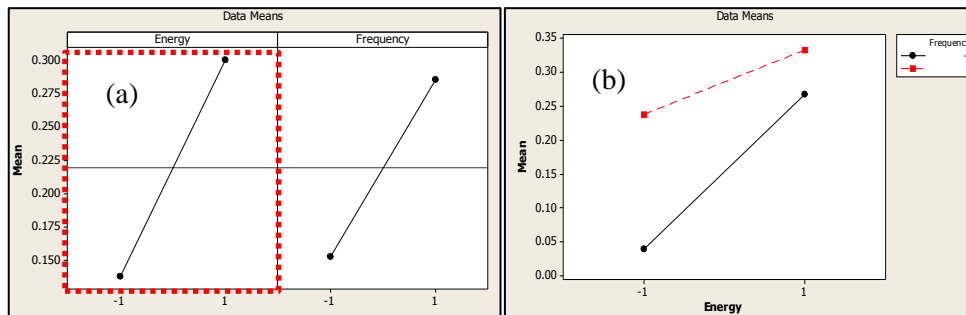


Figura 5.6: Risultato del DOE per l'approccio PE in relazione ai danni naturali a seguito di impatti ad energia crescente nel laminato SAATI EH550/T800S: a) effetti principali, b) interazioni

I due diagrammi di Figura 5.8, mettono in luce una significativa variabilità del coefficiente di riflessione per effetto dell'energia di impatto e della frequenza di eccitazione dell'onda diagnostica. Non essendo direttamente quantificabile la dimensione della delaminazione, si è preferito associare l'energia utilizzata nelle prove di impatto con l'estensione del danno creato, rendendo possibile il confronto dei risultati.

In questa seconda analisi i dati provengono da un'unica piastra sulla quale si sono svolti gli impatti. Essendo il numero di repliche pari a una, non è stato possibile svolgere una rigorosa analisi ANOVA, perché in mancanza dei gradi di libertà necessari, la valutazione della normale varianza di processo non è effettuabile. In questo caso comunque si osserva significatività dell'interazione tra energia-frequenza, o equivalentemente dimensione-frequenza, nella variabilità del coefficiente di riflessione per difetti naturali. La variazione massima del coefficiente ottenuto dall'approccio PE, si ha quando l'onda diagnostica è attivata ad elevata frequenza contro difetti di piccole dimensioni. L'influenza dei fattori di energia e di frequenza, ognuno indipendente dall'altro, è attribuibile alle complesse forme di danneggiamento che si generano a valle di prove di impatto rispetto ad una regolare patch di teflon inserita tra le ply del laminato: scollamento della matrice, rottura della fibra, ecc.

Osservando i risultati dell'analisi statistica per il coefficiente di trasmissione dalla tecnica PC per difetti naturali, si evince dalla Figura 5.7 che l'energia di impatto, o equivalentemente la dimensione del difetto generato, risulta un fattore significativo nella variazione del coefficiente.

Analisi del coefficiente di trasmissione e di riflessione d'onda per gli approcci PC e PE nel caso di difetti naturali e artificiali

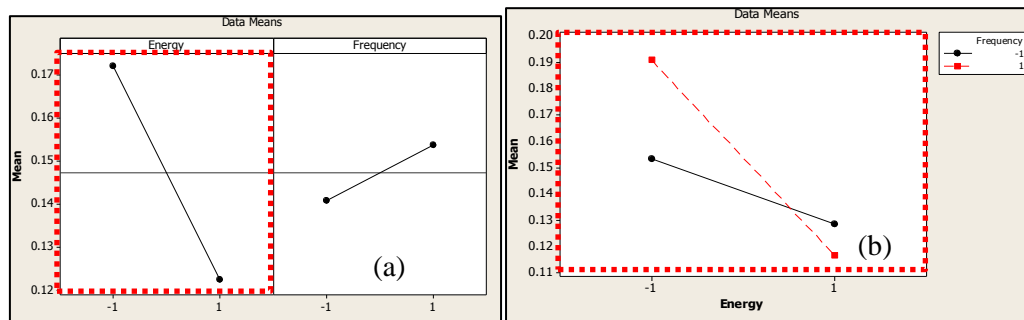


Figura 5.7: Risultato del DOE per l'approccio PC in relazione ai danni naturali a seguito di impatti ad energia crescente nel laminato SAATI EH550/T800S: a) effetti principali, b) interazioni

Con più la dimensione della delaminazione risulta elevata, maggiore è la variabilità del coefficiente di trasmissione, analogamente al caso dei difetti artificiali. Questo è riconducibile al fatto che maggiore è l'estensione del danno, minore è l'energia che lo attraversa. Tale affermazione quindi suppone che la modalità con cui si crea il difetto sia ininfluyente, ma l'estensione del danno risulta significativa nella variabilità del coefficiente di trasmissione, e quindi dell'approccio PC.

5.4 Bibliografia

In questo capitolo si sono consultati i seguenti testi e articoli.

[5.1] C. D. Montgomery, *Progettazione e analisi degli esperimenti*, McGraw-Hill, 2005

[5.2] S. Zani, *Analisi dei dati statistici*, vol. I, 1994, Giuffrè editore, Milano

[5.3] A. Gili., B.V. Frosini, G. Zanardi, M. Zenga, *Variability and concentration*, versione italiana *contribution to the methodology of statistic*, 1987, Cleup, Padova

[5.4] <http://www.minitab.com/en-IT/default.aspx?langType=2057>

Capitolo 6 – Conclusioni e sviluppi futuri

6.1 Conclusioni complessive sul lavoro svolto in questa tesi

Ricordando lo scopo di un processo SHM, il lavoro svolto in questo elaborato ha voluto approfondire il comportamento delle onde di Lamb all'interno del laminato SAATI EH550/T800S uno dei compositi maggiormente utilizzati in applicazioni aeronautiche, con il fine ultimo di sviluppare gli approcci ultrasonori Pulse-Echo e Pitch-Catch nell'individuazione dei difetti sfruttando le onde di Lamb. La prima parte del lavoro ha riguardato la sperimentazione, volta alla comprensione del fenomeno di propagazione dell'onda diagnostica all'interno del laminato del modo fondamentale A_0 propedeutico alla determinazione della posizione dei difetti nell'approccio PE. La sperimentazione ha evidenziato una frequenza limite individuata intorno ai 50 kHz dell'onda diagnostica, al di sotto della quale il modo propagativo S_0 risulta trascurabile. I risultati sperimentali ottenuti hanno permesso di avviare la modellazione FEM dedicata al solo modo A_0 . Gli esiti della modellazione hanno supportato la validazione dei risultati SAFE tramite il calcolo sperimentale delle velocità.

Compresa l'evoluzione del fenomeno di propagazione del modo A_0 all'interno del laminato, si è passati alla seconda parte dedicata allo studio dell'interazione dell'onda diagnostica con i difetti introdotti nel laminato prima artificiali, poi naturali. Il confronto dell'individuazione della posizione dei difetti ha trovato risultati coincidenti con i tradizionali metodi non distruttivi radiografico e Phased Array. Essi hanno permesso inoltre l'individuazione di parametri sintetici che potessero quantificare la veridicità dei metodi innovativi ultrasonori con onde di Lamb. In conclusione l'analisi statistica posta a corredo del presente studio, ha permesso di confermare i fattori significativi che governano i metodi PE e PC rispetto alla tipologia di difettosità, in ottica di applicazioni reali SHM.

Noto tutto quanto è stato studiato, anche se vi sono numerosi argomenti al riguardo ancora da esplorare, l'utilizzo delle tecniche PE e PC abbinato alle onde di Lamb in laminati compositi per applicazioni aeronautiche, inizia a diventare uno strumento innovativo appetibile in applicazioni reali dell'industria. Si pensi ad esempio, di strumentare i pannelli in composito costituenti un aeromobile con i trasduttori PZT, prevedere un adeguato sistema

di condizionamento del segnale per pulire le acquisizioni da disturbi ambientali, quali rumori e vibrazioni, e fotografare lo stato zero di salute del velivolo. Le successive acquisizioni, una dopo l'altra a intervalli prestabiliti, renderanno disponibili i segnali da confrontare con lo stato zero. Il confronto dovrà prevedere il monitoraggio dei coefficienti sintetici visti precedentemente e, posta una soglia d'allarme sull'errore percentuale calcolato tra stato zero e acquisizione presente, evidenziare la nascita di un'anomalia. Una volta deciso il numero di acquisizioni positive da osservare prima di generare allarme, per evitare false indicazioni che porterebbero a fermi macchina con costi veramente ingenti, sarà possibile fermare l'esercizio per permettere una adeguata manutenzione del velivolo.

Un prestigioso traguardo sarà infine quello di poter non solo attuare questa procedura, ma certamente di riuscire a rendere affidabili i metodi PE e PC abbinati alle onde di Lamb tanto da renderli di ugual valenza rispetto ai metodi NDT tradizionali di individuazione.

6.2 Sviluppi futuri

Ripercorrendo quanto effettuato, vi sono alcune lacune da colmare. Il primo punto su cui approfondire sarà quello sulla validazione della propagazione di S_0 , dato che i risultati ottenuti fanno presupporre la sovrapposizione anche del modo SH_0 . Infatti consultando i grafici del Capitolo 2 di Figura 2.29, si nota un andamento lontano da quello proprio di S_0 proposto dal modello SAFE, soprattutto a bassa frequenza. Si dovrà investigare se il riscontro sperimentale ottenuto in questo lavoro è effettivamente proprio di S_0 oppure è una sovrapposizione di SH_0 .

Oltre alla validazione sperimentale di S_0 si dovrà implementare altresì un modello dedicato FEM, con un eccitazione propria del modo simmetrico, in maniera da supportare tali risultati. Riuscendo a simulare correttamente anche S_0 , diventerà possibile validare tramite simulazione la dimostrazione sulla trascurabilità del modo simmetrico per frequenze dell'onda diagnostica minore di 50 kHz effettuata sperimentalmente nel Paragrafo 2.4.

Non da ultimo sarà altresì fondamentale controllare il metodo di incollaggio dei trasduttori PZT sul laminato, agendo sulla procedura e sulla quantità di colla.

Questo per ottenere la massima ripetibilità nella strumentazione della piastra al fine di eliminare il più possibile la variabilità della misura dovuta alla procedura di incollaggio. Dovrà essere poi verificato che le misure non siano influenzate dall'effetto sensore, ovvero l'effetto introdotto dal lieve irrigidimento locale dovuto all'incollaggio.

In conclusione, in ottica dell'applicazione SHM vera e propria, dovrà essere pensato un sistema che acquisisca e condizioni il segnale in maniera automatica, tenendo presente l'effetto delle vibrazioni e del rumore ambientale non più trascurabile.

Si è certi che questo lavoro assieme al precedente [6.1], forniranno solide basi per un proseguimento di successo in ottica NDT e SHM.

6.3 Bibliografia

In questo capitolo si sono consultati i seguenti testi e articoli

[6.1] A. Gianneo, *Analisi e progettazione sperimentale applicata al monitoraggio strutturale di pannelli fibro-rinforzati mediante onde di Lamb*, Tesi 2012, Politecnico di Milano Bovisa.