



**Politecnico
di Torino**



Politecnico di Torino

Corso di laurea in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di laurea Magistrale

**Fatica nei materiali compositi, test di
caratterizzazione e previsione della vita a fatica di
componenti avionici**

Relatore: Prof. Daniele Botto

Tutor aziendale: Ing. Mauro Michetti

Candidato: Matilde Scotti S324210

Corso di Laurea a.a. 2025/2026

Sessione di Laurea Marzo/Aprile

Indice

Indice.....	2
Indice delle figure	5
Indice delle tabelle	9
Lista degli acronimi	11
Introduzione	13
Capitolo 1 I materiali compositi	15
1.1 Descrizione.....	15
1.2 Classificazione	15
1.2.1 In base alla matrice	16
1.2.2 In base al rinforzo	16
1.2.3 In base al processo produttivo	17
1.2.4 In base all'interazione con le onde elettromagnetiche.....	19
1.3 Proprietà Meccaniche.....	21
1.3.1 Caratteristiche meccaniche di una lamina	22
1.3.2 Caratteristiche meccaniche di un laminato	23
1.4 Fatica nei compositi	28
1.4.1 Fenomeni di danneggiamento a fatica	28
1.4.2 Fenomeni di propagazione dei difetti	30
1.4.3 Valutazione sperimentale del danneggiamento a fatica	31
1.4.4 Fattori che influenzano la resistenza a fatica.....	33
1.4.5 Propagazione del danno.....	38
Capitolo 2 Analisi del composito F155K285.....	41
2.1 Resina epossidica e fibre aramidiche	41
2.1.1 Resina epossidica.....	41
2.1.2 Fibre aramidiche (Kevlar 49)	44
2.2 Materiale HexPly® F155K285	48
2.2.1 Proprietà resina epossidica HexPly® F155	48
2.2.2 Proprietà composito HexPly® F155K285.....	50
Capitolo 3 Progettazione del test	57
3.1 Tipologia di test.....	57
3.2 Procedura sperimentale	58
3.2.1 Obiettivi del test.....	58

3.2.2 Tecniche utilizzate	59
3.2.3 Fasi successive al test	63
3.3 Studio teorico della soluzione	63
3.3.1 Piastra di Kirchhoff	64
3.3.2 Analisi modale	69
3.3.3 Analisi inerziale	80
3.3.4 Approccio Stress-Life	85
3.4 Strumentazione del test	87
3.4.1 Shaker	87
3.4.2 Accelerometri	90
3.4.3 Sostegno per i provini	92
3.4.4 Provini	95
Capitolo 4 Analisi numeriche mediante HyperMesh a supporto delle prove sperimentali	97
4.1 Modellazione del provino e setup	98
4.1.1 Generazione e applicazione della mesh	98
4.1.2 Definizione dei materiali e delle proprietà dei componenti	100
4.1.3 Simulazione del vincolo	101
4.2 Analisi numeriche	104
4.2.1 Analisi modale	104
4.2.2 Analisi inerziale	105
4.2.3 Analisi di risposta in frequenza (FRF)	107
4.3 Risultati delle simulazioni numeriche	108
4.3.1 Analisi della risposta modale dei provini	109
4.3.2 Analisi della risposta strutturale dei provini	109
4.3.3 Analisi e scelta dei valori di input per il test	112
4.4 Considerazioni integrative	113
4.4.1 Valutazione della frequenza di risonanza della piastra di supporto	113
4.4.2 Modellazione della piastra di supporto	114
Capitolo 5 Attività sperimentale e analisi dei risultati	115
5.1 Introduzione al programma di prove	115
5.1.1 Verifica dei materiali e del corretto montaggio del set-up sperimentale	115
5.1.2 Software e strumentazione per il controllo e l'acquisizione dati	118
5.1.3 Parametri di prova e condizioni operative	119

5.2 Prove sperimentali.....	122
5.2.1 Sweep per confronto modello numerico.....	122
5.2.2 Dwell per prove di fatica	123
5.3 Elaborazione dati e risultati.....	124
5.3.1 Calcolo dello Stress Equivalente e del Numero di cicli	124
5.3.2 Curva S-N	128
5.3.3 Valutazione del comportamento a rottura e confronto teorico-sperimentale	130
Conclusione.....	134
Appendice: Elaborazione dati prove.....	136
Bibliografia	153

Indice delle figure

Figura 1-Configurazione materiale composito	15
Figura 2-Schema classificazione compositi	17
Figura 3-Meccanismo di trasparenza alle onde	20
Figura 4-Lamina con fibre lunghe orientate	22
Figura 5-Laminato orientato	24
Figura 6-Forze e momenti agenti sulla lamina	26
Figura 7-Modi della delaminazione	29
Figura 8-Confronto tra cricca semplice e cricche multiple in laminato cross-ply con $P < 20\%$ Pr	30
Figura 9-Nascita e propagazione di cricche in un laminato cross-ply con $P \geq 25\%$ Pr	30
Figura 10-Meccanismi di propagazione dei difetti	31
Figura 11-E, N° relativo cricche, resistenza residua a trazione in funzione del numero di cicli	32
Figura 12-Grafico che lega variazione relativa del modulo di Young ($\Delta E/E$) e il rapporto fra passo delle cricche e spessore della lamina (p/t)	33
Figura 13-Resistenza di compositi in fibra di vetro, confronto tra le diverse matrici	34
Figura 14-Grafico S-N, confronto tra orientamenti delle fibre	35
Figura 15-Grafico S-N in base al Vf	35
Figura 16-Resistenza a fatica di un composito poliestere-fibra di vetro in base alla tensione media	37
Figura 17-Comportamento elastico a seconda dei diversi modelli	40
Figura 18-Pre-polimero termoplastico	42
Figura 19-Struttura aramide	44
Figura 20-Suddivisione in categorie delle fibre aramidiche	45
Figura 21-Diversi formati di Kevlar	48
Figura 22-Gell Time vs Temperature e Rheometrics Curve of F155 Resin	50
Figura 23-Tipo di intreccio	52
Figura 24-Cure Cycle F155K285 HexPly	55
Figura 25-Configurazione per un test di controllo delle vibrazioni Tracked Sine Dwell	60
Figura 26-Notazione strati composito multistrato	64
Figura 27-Schema del piano della piastra	65
Figura 28-Schema Input-FRF-Output	70

Figura 29-Frequenza naturale in base al modo di vibrare.....	77
Figura 30-Sistema libero smorzato ad un grado di libertà.....	78
Figura 31-Configurazione statica.....	80
Figura 32-Curva S-N lineare.....	86
Figura 33-Curva S-N bilineare.....	86
Figura 34-Schema di uno shaker.....	87
Figura 35-Schema elettrico e meccanico dello shaker.....	89
Figura 36-Modi di vibrare di uno shaker	89
Figura 37-Shaker V875 440 di LDS	90
Figura 38-Schema accelerometro piezoelettrico.....	91
Figura 39-Triaxial accelerometer model 356B21	92
Figura 40-Disegno 3D piastra principale	92
Figura 41-Disegno 3D provino con sistema di riferimento	93
Figura 42-Disegno 3D della piastra di supporto	94
Figura 43-Disegno 3D piastrina di serraggio.....	94
Figura 44-Disegno 3D assieme	95
Figura 45-Mesh 2D provino 200x20mm	99
Figura 46-Fori e mesh provino 200mm	100
Figura 47-Modello supporto semplificato e piastrina di serraggio	100
Figura 48-Modellazione provino, supporto e piastrina.....	101
Figura 49-RBE2 fori provino.....	102
Figura 50- CBUSH	102
Figura 51-RBE2 collegati da CBUSH	102
Figura 52-Simulazione massa accelerometro tramite RBE3 e CONM2	104
Figura 53-Output analisi inerziale	105
Figura 54-Primo modo di vibrare provino 200x20mm.....	109
Figura 55-Contour plot Stresses provino 200mm.....	111
Figura 56-Contour plot Strains provino 200mm.....	111
Figura 57-Contour plot FI provino 200mm	112
Figura 58-Sostegno meshato e vincolato	114
Figura 59-Provini di lunghezze 200 mm, 250 mm e 310 mm in materiale composito F155K285 HexPly parte anteriore	116
Figura 60-Provini di lunghezze 200 mm, 250 mm e 310 mm in materiale composito F155K285 HexPly parte posteriore.....	116

Figura 61-Dettaglio superficie anteriore provino materiale composito F155K285 HexPly..	116
Figura 62-Dettaglio superficie posteriore provino materiale composito F155K285 HexPly	116
Figura 63-Set-up montaggio provino e accelerometri di misura e controllo	117
Figura 64-Montaggio accelerometro tramite nastro PET e Loctite	117
Figura 65-Sweep Sine provino 200_15 in materiale composito HexPly F155K285	119
Figura 66-Spostamento istantaneo nel tempo provino 200_15 prova 4g	120
Figura 67-Frequenza istantanea nel tempo provino 200_15 prova 4g.....	121
Figura 68-Spettro di accelerazione in scala peak nel tempo provino 200_15 prova 4g	121
Figura 69-Funzione di risposta in frequenza provino 200_15 prova 4g.....	122
Figura 70-Andamento della frequenza ricostruita per la prova a 5g sul provino 200_3	124
Figura 71-Andamento senoide ricostruita per la prova a 5g sul provino 200_3.....	125
Figura 72-Andamento accelerazione ricostruita tramite interpolazione, provino 200_3 prova a 5g.....	126
Figura 73-Elemento 1107 provino modellato in HyperMesh	127
Figura 74-Curva S-N con $R=-1$ del materiale composito HexPly F155K285 sottoposto a flessione ciclica con 4 livelli di carico	130
Figura 75-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply superiore	131
Figura 76-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply inferiore.....	131
Figura 77-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply numero 7 sulla faccia superiore.....	132
Figura 78-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply numero 2 sulla faccia inferiore.....	132
Figura 79-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply numero 5 sulla faccia superiore.....	132
Figura 80-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply numero 4 sulla faccia inferiore.....	133
Figura 81-Foto incastro provini a seguito dei test	133
Figura 82-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 5g sul provino 200_1	136
Figura 83-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 5g sul provino 200_9	138
Figura 84-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4.5g sul provino 200_11.....	139

Figura 85-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4.5g sul provino 200_12	140
Figura 86-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4.5g sul provino 200_13	141
Figura 87-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4g sul provino 200_6	143
Figura 88-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4g sul provino 200_7	144
Figura 89-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4g sul provino 200_15	145
Figura 90-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 3g sul provino 200_4	147
Figura 91-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 3g sul provino 200_5	149
Figura 92-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 3g sul provino 200_14	152

Indice delle tabelle

Tabella 1-Materiale HexPly F155K285	51
Tabella 2-Proprietà fisiche HexPly F155K285	52
Tabella 3-Proprietà meccaniche HexPly F155K285	53
Tabella 4-Tsai-WU parameters	85
Tabella 5-Dimensioni provini soggettivi a fatica a trazione, normativa D3039	95
Tabella 6-Dati provini analizzati nelle simulazioni	98
Tabella 7-Partecipazione modale di massa e frequenza di risonanza	109
Tabella 8-Valori di Stresses, Strains amplificazione e FI dei tre provini nel caso smorzamento 2% e ampiezza 3g	110
Tabella 9-Confronto ampiezza accelerazione di input provini 200mm	112
Tabella 10-Valori di Stresses e FI del provino 200mm nei casi 3 g, 4 g, 4.5 g, 5 g e smorzamento 2%	113
Tabella 11-Confronto della prima frequenza naturale ricavata da modello e test su provini compositi HexPly F155K285 di lunghezze 200 mm, 250 mm, 310 mm.....	123
Tabella 12-Valori di input e output prove tracked sine dwell per ogni provino	123
Tabella 13-Valori di tempo, frequenza, senoide, accelerazione per cui l'accelerazione campionata risulta un valore di picco, provino 200_3 prova a 5g	125
Tabella 14-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_3 prova 5g	126
Tabella 15-Valori di accelerazione equivalente, stress equivalente e numero di cicli ricavati dai dati sperimentali per ogni provino	128
Tabella 16-Valori di tempo, frequenza, senoide, accelerazione per cui l'accelerazione campionata risulta un valore di picco, provino 200_1 prova a 5g	137
Tabella 17-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_1 prova 5g	137
Tabella 18-Valori di tempo, frequenza, senoide, accelerazione per cui l'accelerazione campionata risulta un valore di picco, provino 200_9 prova a 5g	138
Tabella 19-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_9 prova 5g	138
Tabella 20-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_11 prova 4.5g	139

Tabella 21-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_11 prova 4.5g	140
Tabella 22-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_12 prova 4.5g	140
Tabella 23-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_12 prova 4.5g	141
Tabella 24-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_13 prova 4.5g	142
Tabella 25-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_13 prova 4.5g	142
Tabella 26-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_6 prova 4g	143
Tabella 27-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_6 prova 4g	143
Tabella 28-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_7 prova 4g	144
Tabella 29-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_7 prova 4g	145
Tabella 30-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_15 prova 4g	146
Tabella 31-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_15 prova 4g	146
Tabella 32-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_4 prova 3g	149
Tabella 33-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_4 prova 3g	149
Tabella 34-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_5 prova 3g	151
Tabella 35-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_5 prova 3g	151
Tabella 36-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_14 prova 3g	152
Tabella 37-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_14 prova 3g	152

Lista degli acronimi

- CAD = Computer-Aided Design
- CAE = Computer-Aided Engineering
- CATIA V5 = Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application, Version 5
- EM = Elettromagnetiche
- F-PBO = Fiber-Poly(p-Phenylene BenzobisOxazole)
- SiNO^f = Silicon OxyNitride fibers
- BN = Boron Nitride
- CLT = Classical Lamination Theory
- ASTM = American Society for Testing and Materials
- FRP = Fiber-Reinforced Polymer
- AFRP = Aramid Fiber Reinforced Polymer
- UV = Ultravioletto
- MIL-STD = Military Standard
- DUT = Device Under Test
- SDOF = Single Degree of Freedom
- DOF = Degrees of Freedom
- FEM = Finite Element Method
- FI = Failure Index
- FRF = Frequency Response Function
- PSD = Power Spectral Density
- CSD = Cross Spectral Density
- T-H = Tsai-Hill
- HCF = High-cycles fatigue
- EMF = Electromotive Force
- DC = Direct Current
- MEMS = Micro-Electro-Mechanical Systems
- AC = Alternating Current
- ICP = Integrated Circuit Piezoelectric
- PCOMPG = Property Component for Grid
- RBE2 = Rigid Body Element 2
- CONM2 = Concentrated Mass Element Type 2
- RBE3 = Rigid Body Element 3

- EIGRL = Eigenvalue-Real Linear
- GRAV = Gravity Load
- FREQI = Frequency Input
- SPCD = Single-Point Constraint Dynamic
- RLOAD2 = Rigid Body Load Type 2
- MAT1 = Material Type 1
- PSHELL = Property Shell

Introduzione

Il presente lavoro di tesi rappresenta l'esito conclusivo dell'attività di ricerca svolta in collaborazione tra il Politecnico di Torino e Leonardo S.p.A., presso il sito di Caselle Nord.

L'elaborato nasce in seguito all'esigenza del settore aerospaziale di individuare e studiare materiali con proprietà meccaniche avanzate, strutturalmente leggeri ma dotati di alta resistenza e durevolezza. Soprattutto in ambito avionico, è di fondamentale importanza costruire materiali con queste capacità, che rispondano inoltre ad elevati livelli di sicurezza, efficienza e affidabilità. In tale scenario, i materiali compositi rivestono un ruolo di primaria importanza, rendendo di particolare interesse lo studio del loro comportamento a fatica.

La tesi nasce con l'obiettivo di studiare e caratterizzare sperimentalmente a fatica il pre-impregnato F155K285 prodotto dalla società Hexcel, costituito da un tessuto di fibra aramidica impregnato in matrice epossidica.

La definizione della attività sperimentali ha rappresentato una fase fondamentale del lavoro, richiedendo un'analisi approfondita del tema, la selezione della metodologia di prova, la definizione delle dimensioni dei provini, la progettazione delle attrezzature e una pianificazione accurata delle attività da svolgere e commissionare al fine di rispettare i tempi ristretti previsti dal tirocinio.

Le attività di progettazione e analisi strutturale sono state svolte tramite l'impiego di strumenti CAD e CAE in modo complementare.

Per la progettazione e documentazione delle attrezzature necessarie allo svolgimento delle prove sperimentali e dei provini è stato utilizzato il CAD Catia V5. I provini su cui svolgere i test sono infatti stati appositamente progettati per consentire una valutazione sistematica delle prestazioni del materiale oggetto di studio.

La suite Altair è stata utilizzata per le analisi strutturali, statiche e dinamiche, in cui HyperMesh 2025.1 si impiega per il pre / post processing e OptiStruct come solutore.

Primo obiettivo di questa tesi risulta quindi l'ideazione di un set-up sperimentale funzionale e lo sviluppo di un modello numerico agli elementi finiti che permetta di descrivere in modo coerente la risposta strutturale del sistema.

Per le prove sperimentali è stato utilizzato uno shaker elettrodinamico, interfacciato con il software Simcenter Testlab (Siemens). Il software permette di controllare il livello di accelerazione imposto e di acquisire ed elaborare i dati provenienti dai sensori installati sui provini, in questo caso rappresentati da accelerometri.

Sono state analizzate diverse configurazioni di test, con tipi di eccitazione differenti, al fine di selezionare quella con requisiti di accuratezza e affidabilità dei risultati più idonei, compatibilmente con i vincoli temporali.

Dopo aver stabilito il metodo di prova su queste basi, sono stati definiti nello specifico i profili di accelerazione, i provini e le attrezzature di fissaggio allo shaker.

Il materiale in esame è stato sottoposto a un elevato numero di cicli di carico (HCF) a flessione indotta da vibrazione, per valutarne la resistenza a fatica, individuarne le modalità di danneggiamento e ricavare l'andamento della relativa curva stress-numero di cicli.

Obiettivo ultimo del lavoro è la determinazione della resistenza a fatica del composito sottoposto a differenti livelli di sollecitazione, nonché la correlazione tra i risultati sperimentali, e le simulazioni numeriche.

Capitolo 1

I materiali compositi

1.1 Descrizione

I materiali compositi nascono dall'unione di più componenti, caratterizzati da proprietà chimiche e fisiche differenti tra loro, la cui combinazione dà origine a un materiale con caratteristiche meccaniche superiori a quelle dei singoli. Risultano quindi adeguati per impieghi in cui sono richieste elevate prestazioni strutturali elettriche e di isolamento termico.

La struttura di un materiale composito è costituita da due elementi:

- La **matrice**, o fase continua, la quale conferisce forma e integrità al materiale, in quanto lo rende coeso e trasferisce i carichi al rinforzo; ha il ruolo di proteggere e orientare correttamente il rinforzo e presenta proprietà meccaniche inferiori a questo.
- Il **rinforzo**, o fase dispersa, sopporta la maggior parte delle sollecitazioni applicate, presentando infatti proprietà di resistenza meccanica maggiori.

Le prestazioni superiori dei materiali compositi sono consentite dall'interazione complementare di matrice e rinforzo, che li rendono inoltre adattabili a diverse necessità di progetto [1].

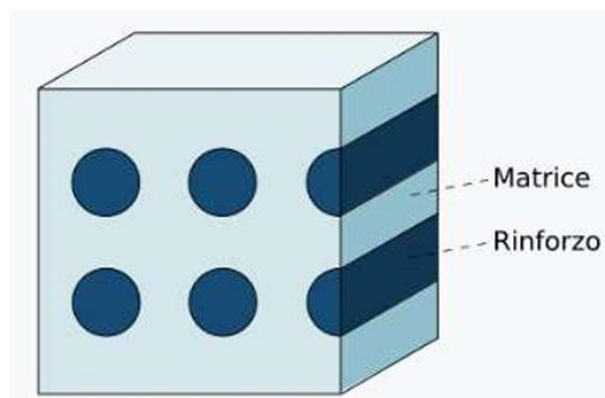


Figura 1-Configurazione materiale composito

1.2 Classificazione

I materiali compositi, come spiegato in [2], vengono classificati in base al tipo di matrice, al tipo di rinforzo, alla geometria della struttura e ai metodi di produzione impiegati, a seconda dei quali possono presentare caratteristiche molto differenti.

1.2.1 In base alla matrice

Le matrici dei materiali compositi possono essere realizzate in metallo, ceramica o polimeri, ma sono proprio questi ultimi a essere i più diffusi. In base al tipo di polimero impiegato, si distinguono due categorie principali: matrici termoindurenti e matrici termoplastiche.

Le matrici **termoindurenti** rappresentano la scelta più comune grazie alla loro facilità di lavorazione, capacità di impregnare adeguatamente le fibre e quindi di proteggerle, oltre a possedere ottime prestazioni meccaniche e resistenza alle alte temperature. Tra i materiali più noti troviamo le resine epossidiche, vinil-estere, fenoliche e poliuretaniche. Tuttavia, il principale limite dei termoindurenti riguarda lo smaltimento, poiché una volta induriti, non possono essere rifusi né riciclati.

Le matrici **termoplastiche**, al contrario, offrono maggiore duttilità, resistenza agli urti e agli agenti chimici e possono essere modellate e rifuse più volte grazie alla loro capacità di ammorbidimento al calore. Tuttavia, la bagnatura delle fibre è generalmente meno efficace rispetto ai termoindurenti. Alcuni esempi comuni includono poliammidi e poliolefine.

1.2.2 In base al rinforzo

Il rinforzo può essere presente sotto forma di particelle o di fibre, le seconde a loro volta possono essere corte o lunghe. A seconda della tipologia e dell'orientamento del rinforzo cambiano le proprietà del composito.

I compositi che presentano **particelle** disperse hanno proprietà meccaniche che tendono all'isotropia e queste possono essere modificate a seconda di dimensioni, forma e concentrazione delle particelle.

Il composito rinforzato con **fibre** invece può avere fibre corte o lunghe, a seconda delle quali presenta proprietà molto differenti. I materiali rinforzati con fibre corte presentano una lavorabilità e resistenza agli urti e all'usura migliore, tuttavia hanno proprietà meccaniche inferiori. Si deve in questo caso tenere conto che l'orientamento di queste fibre varia le proprietà, che nel caso di orientamento in un'unica direzione saranno elevate in quella direzione e inferiore nella altre. Al contrario in caso di orientamento casuale tendono all'anisotropia come nel caso di particelle disperse. Le fibre lunghe invece sono posizionate tutte lungo la stessa direzione, ottenendo così un materiale ortotropo, con proprietà meccaniche alte lungo quella direzione.

Il principale vantaggio che riportano i compositi polimerici fibrorinforzati è l'elevato rapporto tra resistenza e peso, poiché la matrice conferisce leggerezza mentre le fibre resistenza. Questi materiali permettono di progettare le proprietà in quanto, in base all'orientamento delle fibre, si possono ottenere proprietà chimiche, fisiche e meccaniche differenti lungo direzioni specifiche. Risultano quindi molto più flessibili e versatili rispetto ai materiali tradizionali e quindi maggiormente performanti nelle applicazioni ingegneristiche.

L'ultimo fattore che classifica il rinforzo è il **materiale**, che influenza le proprietà del composito. I più utilizzati sono:

- fibre di carbonio: alta rigidità e resistenza, elevata resistenza chimica e termica, ma bassa duttilità e alti costi;
- fibra di vetro: prestazioni inferiori rispetto a quella di carbonio, ma prezzo minore;
- fibre aramidiche: alta tenacità, resistenza elevata a fatica, impatto e combustione;
- fibre ceramiche: elevata resistenza termica;
- fibre di boro: prestazioni superiori rispetto alle precedenti, ma hanno costi più elevati e sono tossiche.

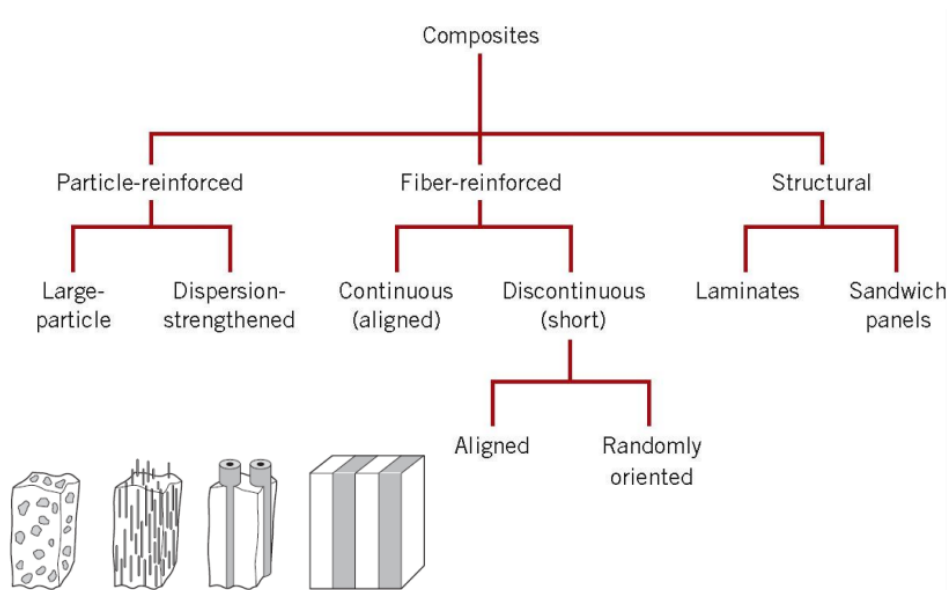


Figura 2-Schema classificazione compositi

1.2.3 In base al processo produttivo

La realizzazione di un materiale composito, come spiegato in [2], si basa su quattro passaggi: scelta preliminare dei materiali, deposizione (lay-up) del rinforzo e della matrice, fase di polimerizzazione o cura e rifinitura del componente.

La selezione iniziale dei materiali è cruciale, poiché il tipo di fibra, matrice e configurazione del rinforzo determina infatti il metodo di deposizione più appropriato, così come la necessità di stampi o attrezzature specifiche.

Lay up:

È il processo attraverso cui fibre e matrice sono depositi in uno stampo per creare la geometria desiderata. Ci sono diversi metodi di deposizione:

- **Processi a stampo aperto**

Processi dove fibre, tessuti e resina vengono stratificati direttamente sullo stampo. Tra questi la tecnica del Wet lay-up o lay-up manuale, in cui gli strati di fibra sono depositati a mano e impregnati con resina tramite opportuni rulli, ripetendo l'operazione fino a ottenere lo spessore voluto. È un processo economico, tuttavia essendo di tipo manuale i vari pezzi della serie presenteranno diverse tipologie di difetti, oltre al fatto che gli operatori entrano in contatto diretto con la resina liquida che contiene sostanze nocive.

- **Processi a stampo chiuso**

Processi utilizzati quando è richiesto un livello maggiore di controllo sulla finitura o sulle tolleranze. I processi a vuoto fanno parte di questi, il principale è il Vacuum Infusion Process (VIP), nel quale una pompa da vuoto, collegata a un sacco chiuso che contiene lo stampo con le fibre in posizione, applica del vuoto che permette di risucchiare automaticamente la resina che va a impregnare le fibre. Il Resin Transfer Molding (RTM) e il Light Resin Transfer Molding (LRTM) sono altri processi che sfruttano la pressione per iniettare la resina nello stampo.

- **Con prepeg**

Le fibre sono preimpregnate e fornite con una disposizione già definita e possono essere collocate nello stampo sia a mano sia tramite sistemi automatizzati. Tra questi l'Automated Fiber Placement (AFP), dove l'uso dell'automazione permette di realizzare componenti di grandi dimensioni, sebbene limitati a forme semplici.

- **Filament winding**

Tecnologia utilizzata per la produzione di componenti cavi a sezione circolare, in cui le fibre vengono avvolte attorno a un mandrino rotante con angoli prestabiliti. Il processo può avvenire a umido con impregnazione delle fibre sul momento, oppure a secco con fibre preimpregnate.

- **Pultrusione**

Processo automatizzato simile all'estrusione, che combina rinforzi e resina in modo prestabilito, che permette grazie alla libertà nella progettazione di ottenere proprietà individuali.

- **Additive Manufacturing (AM)**

Processo che unisce la libertà della stampa in tre dimensioni con le proprietà di questi materiali, rappresentando un avanzamento tecnologico.

Polimerizzazione

Una volta terminata la fase di deposizione, secondo [3], il laminato viene trattato tramite ciclo di cura in autoclave, all'interno del quale si controllano temperatura, pressione e livello di vuoto presente nel sacco. Il ciclo di polimerizzazione si svolge in condizioni termiche controllate, dove la pressione applicata assicura un'adesione ottimale tra gli strati del composito.

La polimerizzazione è un procedimento progressivo suddiviso in tre stadi:

I. Gelificazione

Fase a temperatura ambiente in cui il 70% della matrice polimerizza.

II. Cura

Fase di riscaldamento sotto pressione per garantire un materiale compatto che minimizza le tensioni residue formatesi durante la gelificazione. Viene anche applicata pressione al fine di eliminare residui di aria intrappolati.

III. Post-cura

Svolgimento di un ulteriore trattamento termico, a una temperatura più elevata rispetto alla fase di cura, per completare l'indurimento della matrice e dissipare le tensioni residue ancora presenti.

Dopo la cura, il componente può essere rifinito e preparato per l'assemblaggio.

1.2.4 In base all'interazione con le onde elettromagnetiche

I tessuti e i compositi a base di tessuto sono progettati per interagire con le onde elettromagnetiche tramite **schermatura, assorbimento o trasmissione** [4].

I **materiali trasparenti alle onde** sono materiali che permettono il passaggio delle onde EM e minimizzano la riflessione e la perdita energetica; sono caratterizzati da proprietà meccaniche buone, alta stabilità strutturale e resistenza a fatica. Grazie alla possibilità di modifica delle

caratteristiche di fibre, struttura dei tessuti, densità dei filati è possibile adattarne la progettazione in base all'utilizzo.

La trasparenza elettromagnetica a livello macroscopico è determinata da tre fattori principali, cioè da onde riflesse, onde assorbite e onde trasmesse. Se un'onda EM attraversa un materiale trasparente, una parte viene riflessa sulla superficie, una parte dell'energia viene convertita in calore all'interno del materiale e la parte restante delle onde viene trasmesso.

Questo può essere descritto dall'equazione:

$$T + R + A = 1$$

dove T è il coefficiente di trasmissione, R il coefficiente di riflessione e A il coefficiente di attenuazione.

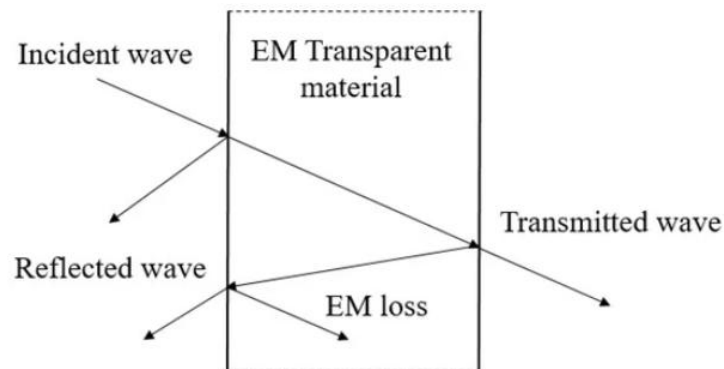


Figura 3-Meccanismo di trasparenza alle onde

La trasmissione a livello microscopico è influenzata da effetto pelle, polarizzazione e perdite magnetiche. L'effetto pelle aumenta la resistenza del conduttore generando calore; il rilassamento di Debye è causato dalla polarizzazione; la perdita dielettrica, legata alla parte immaginaria della costante dielettrica complessa; le perdite magnetiche provocano risonanza e correnti parassite legate alla parte immaginaria della permeabilità complessa e all'angolo tangente di perdita.

I materiali trasparenti alle onde sono caratterizzati da bassa costante dielettrica, bassa tangente dell'angolo di perdita e porosità controllata. L'interazione tra onde EM e materiale può essere descritta dalle equazioni della teoria delle linee di trasmissione, in cui la trasmittanza T dipende da spessore del materiale d , costante dielettrica relativa ϵ_r , tangente dell'angolo di perdita $\tan \delta$, angolo di incidenza θ e lunghezza d'onda λ :

$$T = f(d, \epsilon_r, \delta, \theta, \lambda)$$

Diversi studi sperimentali hanno mostrato che questi materiali presentano efficienze di trasmissione tra il 92% e il 93,6%, con buone proprietà meccaniche, stabilità termica e resistenza alla trazione. Materiali quali Kevlar, F-PBO, SiNO^f/BN e microfibre 3D di SiB/NO vengono trattati tramite metodi di funzionalizzazione chimica e processi di laminazione, pirolisi o filatura elettrostatica, che permettono di ottenere compositi porosi, trasparenti alle onde e resistenti ad alte temperature.

Il trattamento superficiale delle fibre e l'ottimizzazione dei parametri elettromagnetici e meccanici dei compositi sono al centro della ricerca; l'influenza della struttura tessile risulta ancora poco conosciuta nonostante sia di grande influenza in merito alle prestazioni della trasparenza alle onde elettromagnetiche.

1.3 Proprietà Meccaniche

Le proprietà meccaniche di un materiale sono alla base della progettazione strutturale; nel caso dei compositi è fondamentale lo studio del binomio fibra-matrice, come documentato in [5].

1.3.1 Risposta elastica

Il comportamento elastico dei materiali è descritto dalla legge di Hooke:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Lega tensore degli sforzi applicati σ e tensore delle deformazioni provocate ε attraverso il tensore di rigidità C_{ijkl} . Il comportamento meccanico del materiale è descritto dagli 81 coefficienti del tensore di rigidità, ma il tensore degli sforzi e delle deformazioni risultano simmetrici per cui i coefficienti indipendenti si possono ridurre in prima approssimazione a 36. Inoltre la matrice C_{ijkl} è simmetrica rispetto alla diagonale, si può quindi portare questo numero a 21.

Le caratteristiche meccaniche di un materiale composito variano a seconda che si analizzi una singola lamina o un laminato, ossia un insieme di lamine sovrapposte. Per una lamina isolata il comportamento elastico dipende dalle proprietà della matrice e delle fibre che la costituiscono. Nel caso di un laminato è necessario considerare anche le interazioni tra gli strati, che influenzano in maniera rilevante le prestazioni complessive del materiale.

1.3.1 Caratteristiche meccaniche di una lamina

Una lamina con fibre lunghe orientate in un'unica direzione, come detto nel paragrafo 1.2.2, presenta un comportamento ortotropo del materiale. Si definisce ortotropo un materiale le cui proprietà meccaniche risultano invarianti rispetto a tre piani di simmetria tra loro ortogonali, cioè che una rotazione di 180° attorno a ciascun piano lascia invariata la microstruttura del materiale.

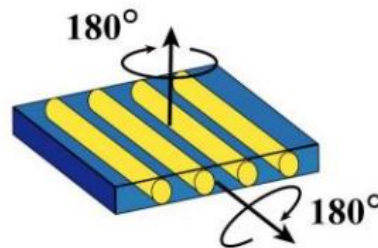


Figura 4-Lamina con fibre lunghe orientate

Questa configurazione di simmetria permette di semplificare ulteriormente la matrice di rigidità C , che si riduce a contenere soltanto 9 costanti elastiche indipendenti, assumendo la forma seguente.

$$\begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{2323} \end{pmatrix}$$

Considerando l'espressione inversa che lega sforzi e deformazioni tramite la matrice di cedevolezza $[S]$, si ottiene la seguente equazione costitutiva, in cui sono evidenziate le proprietà meccaniche del materiale. Sono presenti il modulo di Young E nelle direzioni principali e i coefficienti di Poisson ν .

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

Si può notare che non esiste accoppiamento tra deformazioni longitudinali e tensioni tangenziali, né tra deformazioni di taglio e tensioni normali; inoltre per determinare le costanti elastiche del materiale servono complessivamente nove proprietà ingegneristiche, tre moduli di Young (E_1, E_2, E_3), tre coefficienti di Poisson ($\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$) e tre moduli di taglio (G_1, G_2, G_3).

Nel caso della **singola lamina**, è possibile introdurre un'ulteriore semplificazione poiché essendo lo spessore dello strato molto ridotto, le tensioni che agiscono fuori dal piano si considerano trascurabili. In questo modo si adotta uno stato tensionale nel piano e si ottiene la forma semplificata delle equazioni costitutive:

$$\sigma_{33} = \tau_{13} = \tau_{23} = 0$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

Il comportamento meccanico di una lamina con rinforzo unidirezionale può quindi essere descritto conoscendo soltanto quattro costanti elastiche: E_1, E_2, G_{12} e ν_{12} .

1.3.2 Caratteristiche meccaniche di un laminato

In generale, i materiali ortotropi offrono elevate prestazioni lungo la direzione delle fibre e proprietà ridotte nelle direzioni trasversali. Nei compositi, questo limite può essere superato impilando più lamine con orientamenti differenti delle fibre, dove la sequenza di impilamento determina il tipo di laminato:

- **simmetrici**: la disposizione degli strati è speculare rispetto al piano medio;
- **antisimmetrici**: la sequenza degli strati non è simmetrica rispetto al piano medio;

- **bilanciati**: spessore totale identico con fibre orientate $\pm\theta$;
- **quasi-isotropi**: laminati simmetrici composti da più di tre strati con sequenza di angoli prestabilita.

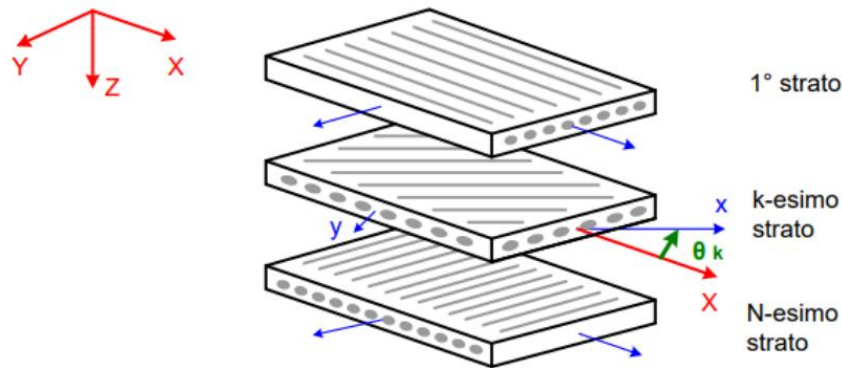


Figura 5-Laminato orientato

Questa strategia consente di combinare proprietà meccaniche elevate nelle direzioni desiderate e garantisce maggiore resistenza e rigidità complessiva rispetto a lamine monodirezionali.

Le proprietà meccaniche dei laminati sono descritte nella “**Classical Lamination Theory**” (CLT), che si fonda sulle tre ipotesi di Kirchhoff:

I. **Ipotesi della planarità delle sezioni**

Le sezioni inizialmente normali al piano medio del laminato rimangono piane dopo la deformazione, senza incurvarsi o distorcersi lungo il piano.

II. **Ipotesi della normale non deformabile**

Le normali al piano medio rimangono perpendicolari al piano anche dopo la deformazione; gli spostamenti fuori dal piano (lungo lo spessore) sono trascurabili rispetto a quelli nel piano.

III. **Ipotesi delle piccole deformazioni**

Le deformazioni e le rotazioni sono sufficientemente piccole da consentire la linearizzazione delle equazioni della meccanica dei materiali, permettendo l'applicazione della legge di Hooke anche per materiali anisotropi.

Dalle prime due ne deriva che gli spostamenti verticali non dipendono dallo spessore del laminato, quindi si ha $\varepsilon_{zz} = 0$; dalla terza che i punti lungo lo spessore del laminato non subiscono deformazioni tangenziali fuori dal piano medio, $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$.

Il campo degli spostamenti diventa:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

- u è lo spostamento lungo la direzione x in un punto a coordinate (x, y, z) ;
- $u_0(x, y)$ è lo spostamento nel piano medio del laminato;
- $-z \partial w_0 / \partial x$ rappresenta l'effetto della curvatura della lastra: più ci si allontana dal piano medio (z aumenta), maggiore è lo spostamento dovuto alla flessione lungo x ;

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y}$$

- v è lo spostamento lungo la direzione y ;
- $v_0(x, y)$ è lo spostamento nel piano medio lungo y ;
- $-z \partial w_0 / \partial y$ è l'effetto della curvatura lungo y ;

$$w(x, y, z) = w_0(x, y)$$

- w è lo spostamento nella direzione z (cioè fuori dal piano della lastra);
- $w_0(x, y)$ è semplicemente lo spostamento verticale del piano medio;
- secondo le ipotesi di Kirchhoff non dipende da z : tutte le sezioni rimangono perpendicolari al piano medio.

Le **equazioni costitutive** della CLT diventano

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{pmatrix}^{(k)} \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

dove il campo delle deformazioni è formato dalla somma della matrice delle deformazioni rispetto al piano medio e della matrice delle curvatura rispetto al piano medio, che ha andamento lineare rispetto a z .

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{pmatrix}$$

In forma compatta

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx}^{(0)} \\ \epsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} \epsilon_{xx}^{(1)} \\ \epsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{pmatrix}$$

L'apice k indica che le grandezze dipendono dallo strato del laminato preso in considerazione, mentre le deformazioni fanno riferimento al piano medio. Le deformazioni, di conseguenza, variano in modo continuo lungo lo spessore, mentre a causa dei possibili valori differenti della matrice di rigidezza per ciascun strato, le tensioni possono risultare discontinue all'interfaccia tra gli strati.

Le forze e i momenti risultanti diventano:

$$N_i^k = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_i dz$$

$$M_i^k = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_i z dz$$

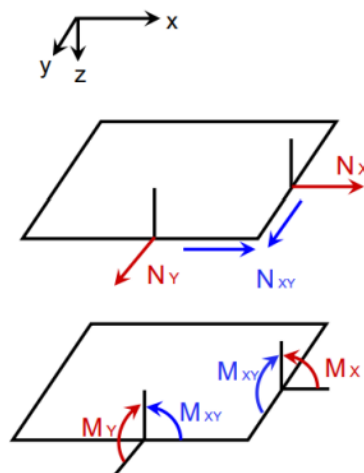


Figura 6-Forze e momenti agenti sulla lamina

Dove:

- N_i rappresenta la forza normale per unità di lunghezza;
- M_i rappresenta il momento flettente per unità di lunghezza.

Il risultato complessivo delle forze e dei momenti sul laminato si ottiene sommando i contributi di tutti gli strati:

$$N_i = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \sigma_i dz$$

$$M_i = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \sigma_i z dz$$

Dove z_k e z_{k-1} rappresentano le coordinate di ciascuno strato.

Sostituendo nelle equazioni precedenti le relazioni tra stress e deformazioni, si ottengono le leggi costitutive generalizzate che collegano forze e momenti a deformazioni e curvature rispetto al piano medio del composito.

In forma compatta e generalizzata:

$$\begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ B & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon^{(0)} \\ \epsilon^{(1)} \end{pmatrix}$$

Dove A , B e D sono sotto-matrici 3×3 che dipendono dalle proprietà elastiche delle singole lamine:

- A rappresenta la rigidità estensionale del laminato, che mette in relazione le tensioni e le deformazioni nel piano;
- B è la matrice di accoppiamento flessione-estensione, che lega le forze in piano alle curvature e i momenti alle deformazioni in piano;
- D descrive la rigidità a flessione, che lega i momenti alle curvature.

Per **laminati simmetrici**, dove angolo e spessore degli strati sopra e sotto il piano medio sono uguali, si ha $[B] = 0$, che indica l'assenza di accoppiamento tra effetti flettenti e membranali, cioè le tensioni nel piano non generano deformazioni fuori dal piano.

Per laminati **quasi-isotropi** la matrice di rigidità e accoppiamento è simmetrica, quindi se il componente è sottoposto a trazione si verificano anche effetti di flessione.

Per i laminati **bilanciati**, anche se $[B] \neq 0$, quando il componente risulta sollecitato in piano

non si generano torsioni; per laminati **non bilanciati** invece si mantengono tutti gli accoppiamenti, quindi se si applica una torsione nel piano si generano torsioni e viceversa.

1.4 Fatica nei compositi

La fatica è un fenomeno che riguarda le modifiche progressive che si verificano in un elemento strutturale sottoposto a carichi ciclici ripetuti, capaci nel tempo di causarne la rottura, anche se i carichi applicati sono inferiori a quelli che normalmente provocano una frattura immediata. Risulta progressivo poiché gli effetti si intensificano con gradualità, inoltre si manifesta in maniera localizzata, nelle zone di maggiore sollecitazione o dove sono presenti difetti. La fatica può manifestarsi tramite formazione di cricche o con la rottura completa del materiale. Le cricche rappresentano il centro dello studio in quanto sono la nucleazione e la crescita delle stesse sotto carico a portare alla rottura improvvisa del materiale, a quel punto non più capace di reggere le sollecitazioni.

Le sollecitazioni a fatica nei materiali compositi sono di grande interesse in diversi settori, dall'aeronautico all'automobilistico, per questo motivo, numerosi studi hanno analizzato il loro comportamento a fatica, cercando di individuare i principali fattori che ne influenzano la resistenza e il meccanismo di danneggiamento.

1.4.1 Fenomeni di danneggiamento a fatica

Il danneggiamento può originarsi e svilupparsi in diverse parti del materiale, come documentato in [6] e in [7], come nelle fibre di rinforzo, nella matrice, nell'interfaccia e tra lamine sovrapposte. La presenza di molteplici meccanismi di danneggiamento rende la previsione del comportamento meccanico globale del composito complessa, che rappresenta quindi una sfida significativa nella progettazione e nell'analisi strutturale.

I principali meccanismi di danneggiamento a fatica nei compositi sono:

I. Debonding (scollamento fibra-matrice)

Il debonding consiste nel distacco progressivo dell'interfaccia fibra-matrice, che riduce la capacità della matrice di trasmettere il carico alla fibre, diventata così la componente principale che sostiene gli stress. Questa, a causa delle sue proprietà meccaniche inferiori rispetto alle fibre, non riesce a sostenere carichi elevati, portando così a cedimenti localizzati e alla rottura del materiale a sollecitazioni relativamente basse.

II. Delaminazione

La delaminazione consiste nella separazione di due o più lamine adiacenti di un composito. Questo fenomeno può essere innescato da carichi applicati fuori dal piano, da impatti o da difetti introdotti durante la fase di produzione. Il meccanismo compromette significativamente l'integrità del laminato, diminuendo la capacità di trasferire il carico tra gli strati e aumentando il rischio di collasso locale o instabilità.

Individuare difetti interlaminari può risultare complesso, poiché spesso si sviluppano all'interno del componente e non lungo i bordi. Una volta presenti, i difetti possono evolvere secondo tre modalità principali:

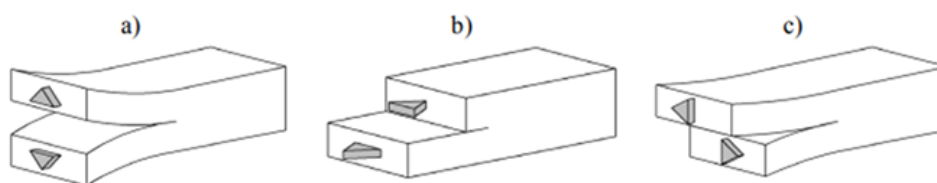


Figura 7-Modi della delaminazione

- Apertura (a) : gli strati si separano perpendicolarmente al piano del laminato a causa di sollecitazioni fuori dal piano;
- Scorrimento (b): le lamine scorrono l'una sull'altra in direzione della propagazione del danno, a causa di carichi di taglio;
- Strappo (c): le lamine scorrono parallelamente alla direzione di propagazione del difetto, dovuto a carichi di taglio.

III. Fessurazione della matrice

All'interno della matrice possono formarsi microcricche, orientate spesso perpendicolarmente alla direzione di applicazione della sollecitazione. Questi difetti possono propagarsi fino all'interfaccia con le fibre, che possono agire sia da concentratori di stress, riducendo la soglia di rottura della matrice, sia da barriera, limitando la propagazione delle cricche.

IV. Rottura delle fibre

Sotto l'azione di carichi di trazione elevati, le fibre del composito possono danneggiarsi, provocando la rottura completa del componente. In condizioni di forte compressione, invece, le fibre possono subire fenomeni di instabilità (buckling), che portano successivamente alla frattura della matrice e, infine, al cedimento delle fibre stesse.

1.4.2 Fenomeni di propagazione dei difetti

Alcuni studi sperimentali sulla fatica dei compositi rinforzati con fibre evidenziano che il danneggiamento si innesca quasi sempre nelle lamine in cui l'orientamento delle fibre è maggiormente inclinato rispetto alla direzione del carico applicato. In un laminato di tipo cross-ply, ad esempio, le prime cricche compaiono sistematicamente nella lamina a 90° , sviluppandosi in direzione perpendicolare al carico e attraversando l'intera sezione resistente della lamina. Nell'immagine di riferimento si osserva la nucleazione di una singola cricca confrontata con la presenza di cricche multiple in un laminato cross-ply; in quest'ultimo caso esse si formano nelle lamine ortogonali al carico e non si estendono a quelle adiacenti. Questo comportamento si manifesta quando il carico applicato resta al di sotto del 20% della resistenza statica del materiale.

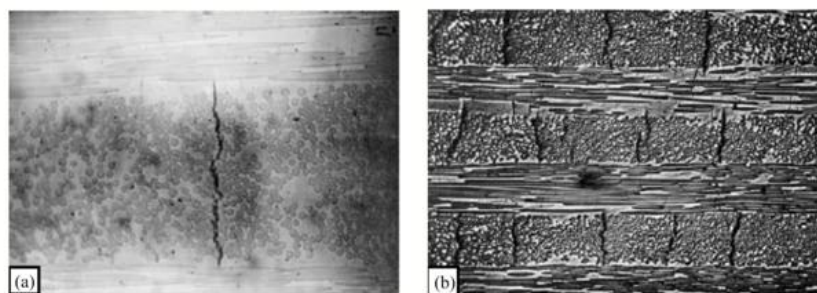


Figura 8-Confronto tra cricca semplice e cricche multiple in laminato cross-ply con $P < 20\% Pr$

Quando la sollecitazione supera il 25–30% della resistenza statica, con l'aumentare del numero di cicli, le concentrazioni di tensione generate dalle cricche in prossimità dell'interfaccia tra le lamine portano alla formazione di cricche di delaminazione parallele all'interfaccia stessa.

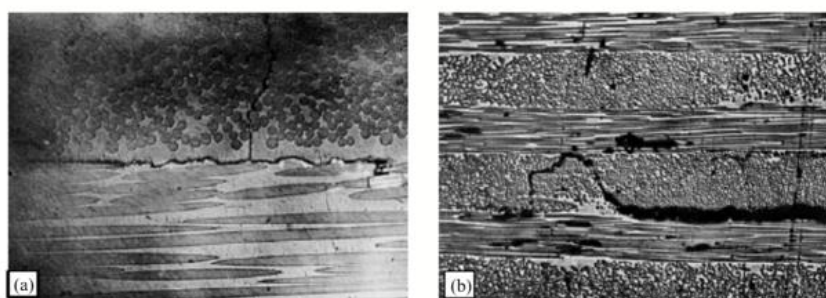


Figura 9-Nascita e propagazione di cricche in un laminato cross-ply con $P \geq 25\% Pr$

La propagazione cresce proporzionalmente ai cicli di carico e può provocare la separazione completa degli strati. In queste condizioni è frequente che ceda la lamina più sollecitata o quella con minore resistenza. La vita residua del laminato, a questo punto, generalmente è inferiore al 10%.

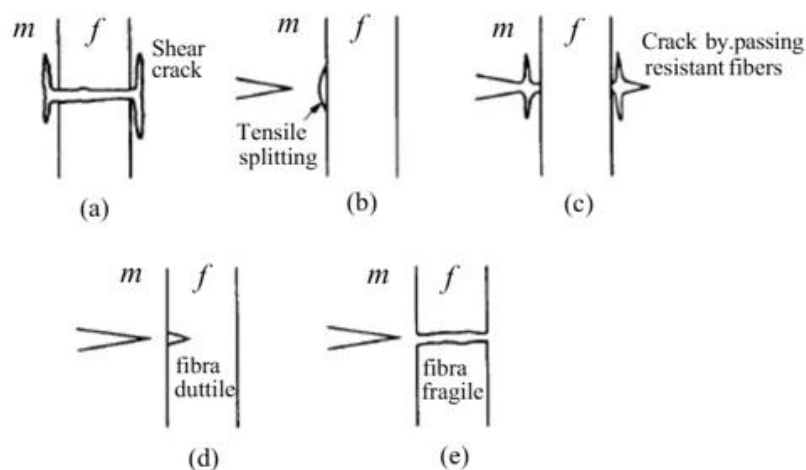


Figura 10-Meccanismi di propagazione dei difetti

Nella fase finale della vita a fatica è possibile che si formino cricche anche nelle lamine con fibre parallele al carico. Tali cricche hanno origine dalle concentrazioni di tensione che si creano per rottura di una fibra (fig. a) e si propagano lungo l'interfaccia sotto l'azione di sollecitazioni di taglio. Un'altra possibilità, solitamente per compositi con bassa adesione fibra-matrice, risulta che la cricca abbia origine nella matrice e dia luogo a fenomeni di debonding quando si avvicina alla fibra, nel caso in cui la tensione concentrata all'apice della cricca si trovi nella zona d'interfaccia (fig. b). In caso di buona adesione, la cricca aggira la fibra e continua a propagarsi oltre di essa (fig. c). Infine, quando le fibre hanno una scarsa resistenza a fatica, la cricca può estendersi direttamente all'interno della fibra. Nel caso di fibre duttili la propagazione può avvenire in modo stabile (fig. d), mentre con fibre fragili può determinare una rottura improvvisa e fragile della fibra stessa (fig. e).

1.4.3 Valutazione sperimentale del danneggiamento a fatica

L'utilizzo di tecniche sperimentali che seguono l'evoluzione del danno e la propagazione dei difetti è necessaria per analizzare e comprendere il comportamento a fatica dei materiali compositi.

Tecniche metallografiche che consistono nell'osservazione microscopica di sezioni trasversali permettono di quantificare il danno attraverso il conteggio delle cricche per unità di superficie e risultano efficaci. Tuttavia, essendo un approccio di tipo distruttivo, richiede molti campioni per monitorare il danno in funzione del tempo senza togliere il componente dal suo ambiente operativo. Altresì vi sono metodi non distruttivi come ultrasuoni, che consentono di individuare cricche interne e di valutarne l'estensione, raggi X, termografia, che grazie alla mappatura

della temperatura durante i test permette di stimare il danno, poiché l'energia dispersa dal ciclo di isteresi meccanica si trasforma in calore concentrandosi nelle zone più danneggiate e interferometria olografica, che rende possibile un'analisi qualitativa dei difetti superficiali.

Un altro metodo per stimare il danneggiamento nei materiali compositi consiste nel misurare la variazione relativa della rigidità, associata al parametro di danneggiamento D . Il valore di rigidità viene calcolato osservando la diagonale del ciclo di isteresi: $D = \frac{E_{iniziale} - E}{E_{iniziale}}$. La figura illustra come E , la quantità relativa di cricche e la resistenza residua a trazione di un laminato cross-ply composto da matrice epossidica rinforzata con fibre di vetro, evolvano in funzione del numero di cicli di carico applicati.

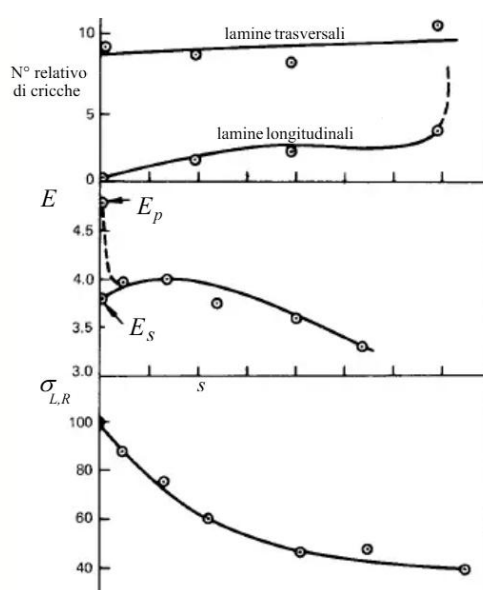


Figura 11-E, N° relativo cricche, resistenza residua a trazione in funzione del numero di cicli

Nei laminati con fibre disposte ortogonalmente, il numero di microfessure presenti per unità superficiale tende ad aumentare in modo quasi proporzionale con il crescere dei cicli di carico. Per le lamine longitudinali, invece, si osserva prima una fase di incremento dei difetti, poi una stabilizzazione temporanea seguita da un rapido aumento poco prima della frattura finale. All'inizio della prova, il modulo elastico del materiale presenta una notevole riduzione; inizialmente il suo valore supera sensibilmente il cosiddetto modulo secondario teorico, ma dopo diverse decine di migliaia di cicli può scendere anche ben al di sotto di tale riferimento. Per quanto riguarda la resistenza residua, questa mostra in genere un declino graduale nel corso della vita a fatica, con una brusca diminuzione in corrispondenza della fase finale dove il danneggiamento accelera subito prima della rottura.

La densità dei difetti risulta un indicatore utile per valutare il danno da fatica nei compositi

laminati tipo cross-ply, che viene definita attraverso il passo medio delle cricche, cioè la distanza media tra due microfessure consecutive lungo una lamina posta perpendicolarmente alla direzione del carico ciclico. Diversi risultati sperimentali hanno dimostrato che il rapporto tra la variazione relativa del modulo di Young ($\Delta E/E$) e il rapporto fra passo delle cricche e spessore della lamina (p/t) segue una relazione quasi lineare.

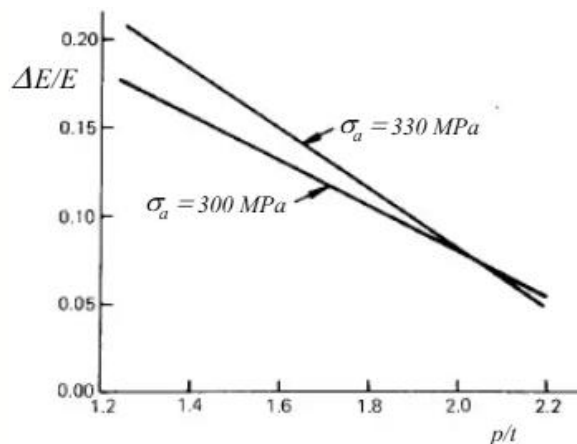


Figura 12-Grafico che lega variazione relativa del modulo di Young ($\Delta E/E$) e il rapporto fra passo delle cricche e spessore della lamina (p/t)

1.4.4 Fattori che influenzano la resistenza a fatica

Il danneggiamento, a seconda dell'applicazione, può essere interpretato come una riduzione della rigidità oppure essere associato al raggiungimento di una certa deformazione limite. La resistenza a fatica dei compositi è influenzata da molteplici fattori, quali la natura dei materiali utilizzati e il tipo di sollecitazione applicata. Di seguito vengono sintetizzati i principali parametri che determinano la vita a fatica di un composito:

I. Tipo di matrice

Gli studi riportano che i materiali caratterizzati intrinsecamente da una elevata resistenza a fatica e una buona adesione fibra-matrice riportano complessivamente la miglior resistenza a fatica. Nel caso di fibre di vetro, ad esempio, la resistenza a fatica maggiore si ottiene con la matrice epossidica.

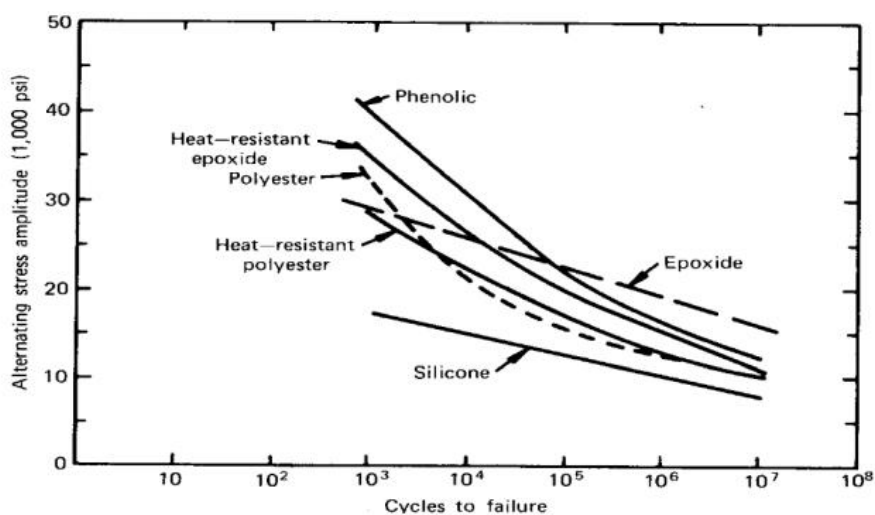


Figura 13-Resistenza di compositi in fibra di vetro, confronto tra le diverse matrici

II. Orientamento delle fibre e sequenza di impacchettamento

L'orientamento delle fibre risulta un fattore di grande influenza sulla resistenza a fatica. Quando le fibre sono allineate con la direzione del carico si ha massima resistenza statica, tuttavia non per forza sono garantite le migliori prestazioni a fatica. I laminati con tutte le fibre orientate parallelamente al carico mostrano infatti una scarsa resistenza trasversale, presentando grande probabilità di formazione di fessure parallele alle fibre, che possono portare alla compromissione dell'integrità del materiale.

Nel caso di lamine orientate a 90° (configurazione cross-ply), che contrastano la formazione precoce di fessurazioni trasversali si ottengono invece valori maggior di vita a fatica. Configurazioni con angoli di $\pm 5^\circ \div \pm 10^\circ$, che contribuiscono a un miglior equilibrio delle tensioni, restituiscono risultati ulteriormente migliori.

La disposizione delle lamine all'interno del laminato incide significativamente sul livello delle tensioni interlaminari, che vanno direttamente a influenzare il comportamento a fatica del composito. Vi sono configurazioni di impaccamento che tendono a limitare le sollecitazioni tangenziali e normali tra gli strati, mentre altre le accentuano, rendendo più probabile l'insorgere di delaminazioni e la conseguente formazione di cricche che possono avanzare verso l'interno del materiale. Per ottenere una maggiore durata e affidabilità di un componente si progetta quindi una sequenza di lamine per minimizzare tali tensioni.

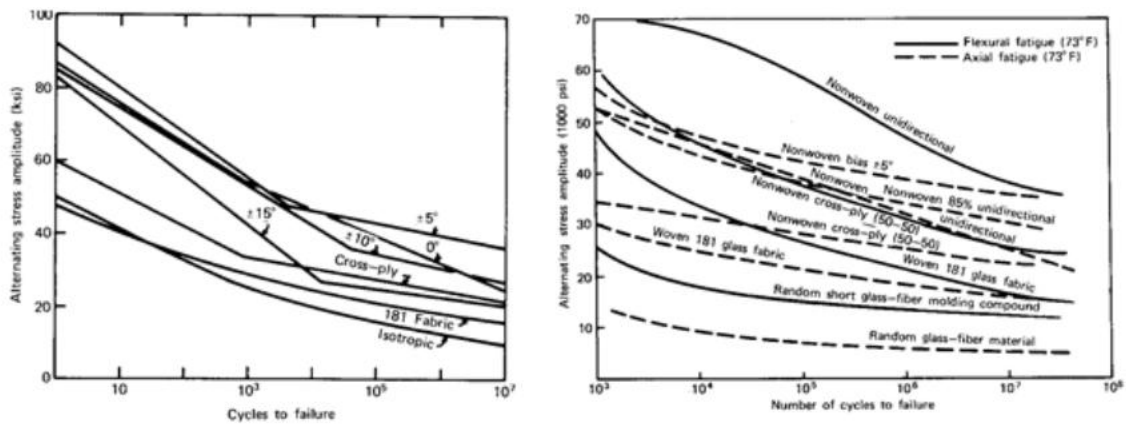


Figura 14-Grafico S-N, confronto tra orientamenti delle fibre

III. Percentuale volumetrica delle fibre

A differenza di quanto accade nei materiali metallici, nei compositi la resistenza a fatica tende ad aumentare con la percentuale volumetrica di fibre, poiché cresce anche la resistenza statica. Test sperimentali su compositi epossidici rinforzati con fibre di vetro hanno mostrato che il miglioramento continua fino a circa il 70% in volume di rinforzo, oltre il quale non si registrano incrementi significativi delle prestazioni.

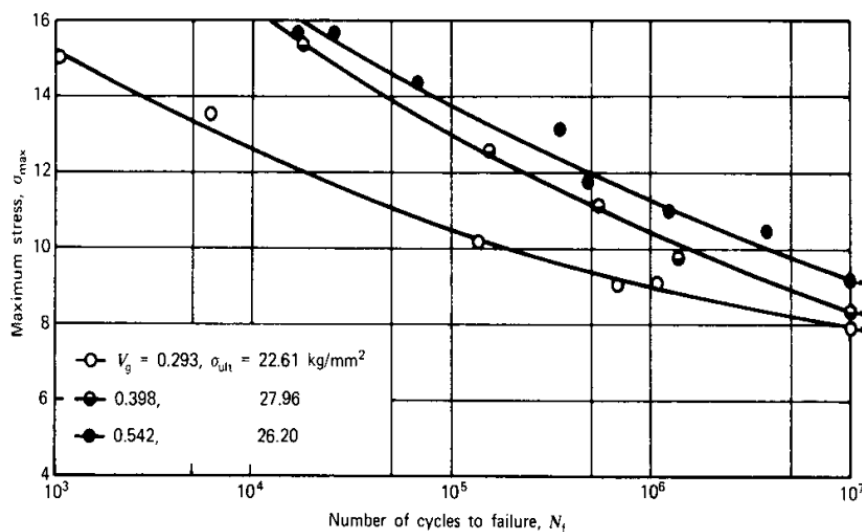


Figura 15-Grafico S-N in base al Vf

IV. Adesione fibra-matrice

Nel caso in cui l'accoppiamento tra fibre e matrice diminuisce il laminato perde il suo comportamento omogeneo sotto carichi ciclici, la matrice non riesce più a trasferire il carico alle fibre, causando una riduzione drastica della resistenza a fatica, portando a fenomeni diffusi di debonding quando si ha propagazione delle cricche nella matrice.

V. Tipo di sollecitazione

Nei materiali compositi il comportamento a fatica non segue le tipiche correlazioni osservabili nei metalli, ma dipende in maniera rilevante dal tipo di sollecitazione applicata. Nei compositi non esiste una relazione consolidata tra resistenza a trazione e resistenza a taglio, le due grandezze infatti sono generalmente indipendenti.

Per laminati in fibra di vetro con matrice epossidica, ad esempio, il rapporto tra resistenza a fatica e resistenza statica risulta più elevato in condizioni di taglio rispetto alla trazione. Questo comportamento, tuttavia non risulta universale, infatti in compositi rinforzati con fibre di boro o grafite si hanno prestazioni migliori in trazione rispetto al taglio.

Ne deriva che i risultati ottenuti per una determinata classe di materiali non possono essere estesi automaticamente ad altre, poiché entrano in gioco fattori specifici quali le proprietà delle fibre, della matrice, dell'interfaccia e la configurazione del laminato.

VI. Tensione media

L'effetto della tensione media sul comportamento a fatica dei materiali compositi presenta sia alcune analogie con quanto osservato nei materiali isotropi, sia differenze significative per via della natura anisotropa e multicomponente del laminato.

I dati sperimentali mostrano che, in condizione di trazione, l'aumento della tensione media porta a una riduzione progressiva dell'ampiezza alternata ammissibile per garantire una determinata vita a fatica. Quando la tensione media si avvicina al valore di rottura del materiale, la tensione alternata corrispondente a quella vita tende a annullarsi. Questa dipendenza viene spesso descritta tramite relazioni analoghe alla legge di Goodman-Boller, utilizzata per i metalli, che può essere applicata anche ai compositi in cicli trazione-trazione a temperatura ambiente. Questo modello non è però universalmente applicabile in quanto le sue previsioni risultano inadeguate se si variano materiale o condizioni operative.

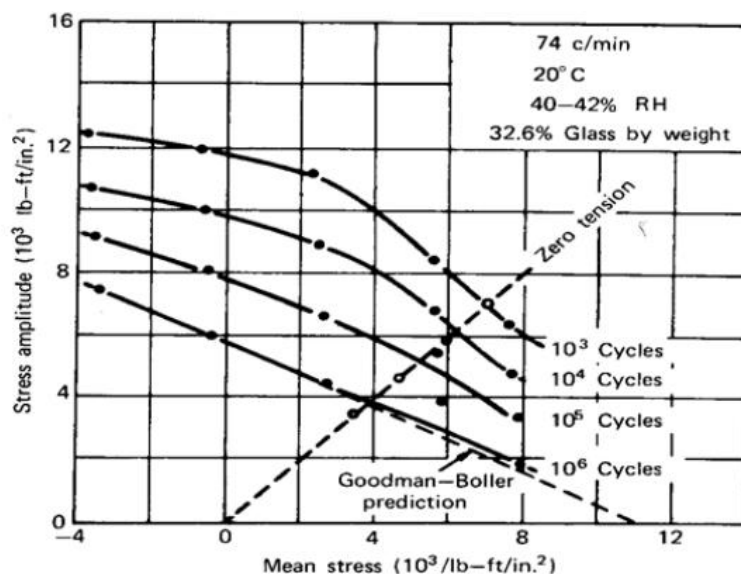


Figura 16-Resistenza a fatica di un composito poliestere-fibra di vetro in base alla tensione media

Nei laminati in fibra di carbonio emergono comportamenti differenti in quanto tensioni medie negative (quindi cicli compressione-trazione) determinano una riduzione più netta della resistenza a fatica rispetto a quanto osservato nei metalli. La presenza di una componente media di compressione accelera infatti i processi di danneggiamento della matrice, favorendo fenomeni di instabilità locale delle fibre (buckling), delaminazione e splitting. Discrepanze analoghe si manifestano anche a temperature elevate, dove le curve di fatica non seguono più la tendenza prevista dalla formulazione classica. Di conseguenza, pur essendo possibile individuare alcune tendenze generali, l'influenza della tensione media sulla risposta a fatica dei compositi non può essere determinata in modo affidabile senza un adeguato supporto sperimentale.

VII. Frequenza di carico

La frequenza con cui il carico viene applicato influisce sul comportamento a fatica dei materiali compositi in modo diverso rispetto ai metalli. Nei compositi, infatti, un incremento della frequenza provoca un aumento della temperatura interna del materiale, che porta generalmente a una riduzione della vita a fatica.

L'entità dell'effetto rimane però limitata nella maggior parte dei casi, soprattutto per i compositi rinforzati con fibre di vetro, nei quali la resistenza a fatica dipende principalmente dalla capacità delle fibre di sopportare il carico. Dal momento che le fibre di vetro sono poco sensibili a lievi aumenti di temperatura, l'influenza della frequenza risulta spesso contenuta.

VIII. Condizioni ambientali

Le condizioni ambientali rappresentano un fattore rilevante nel comportamento a fatica dei materiali compositi. I parametri più influenti risultano temperatura e umidità, infatti un incremento di entrambi tende a ridurre la capacità del materiale di sopportare carichi ciclici.

Ad esempio il Kevlar, che possiede ottime proprietà meccaniche, ha resistenza alla temperatura limitata e può degradarsi se esposto a calore elevato per periodi prolungati; inoltre questo materiale è sensibile all'umidità, un'esposizione costante ad ambienti umidi può infatti ridurre le prestazioni e la durabilità nel tempo. Come soluzione per proteggerlo dall'umidità si utilizzano strati esterni in fibra di vetro E (E-glass) o altre tipologie di rivestimenti protettivi.

IX. Effetti di intaglio

Nei materiali compositi l'effetto degli intagli sul comportamento a fatica si discosta in modo significativo da quanto osservato nei materiali metallici. Nei metalli, infatti, un intaglio tende a ridurre solo moderatamente la resistenza statica, mentre provoca un peggioramento notevole della resistenza a fatica. Nei compositi, invece, la presenza di discontinuità geometriche determina un consistente abbassamento della resistenza statica, influenzando in misura molto meno rilevante sulla resistenza a fatica.

Questo tipo di comportamento viene ricondotto ai meccanismi di danneggiamento che nascono quando il materiale è sottoposto a fatica nelle zone dove il carico è maggiormente concentrato. Il picco di tensione in prossimità dell'intaglio viene infatti ridotto dalla formazione di microcricche e difetti locali. Di conseguenza, pur partendo da una resistenza statica inferiore, il componente può mantenere una capacità a fatica quasi invariata rispetto a un provino integro. In alcuni casi, dopo un certo numero di cicli, la resistenza statica residua del componente può addirittura avvicinarsi a quella di un laminato senza intaglio, mostrando quanto i fenomeni di redistribuzione delle tensioni siano influenti nel comportamento a fatica dei materiali compositi.

1.4.5 Propagazione del danno

In generale, le strutture realizzate con materiali compositi possono accumulare ingenti quantità di danno prima di arrivare al cedimento, il che porta a un approccio molto conservativo nella definizione dei criteri di cedimento. L'analisi del guasto nei compositi si articola in due fasi principali:

- Identificazione dei criteri di rottura per la singola lamina: determinare quale stato tensionale provocherà la rottura di ogni specifica lamina nel laminato.
- Valutazione dell'effetto della rottura della lamina: utilizzo di modelli per valutare come il cedimento progressivo delle lamine influenzi il comportamento complessivo del laminato.

La precisione nella definizione dei criteri di cedimento di ciascuna lamina rappresenta l'elemento più cruciale da considerare.

Per la seconda fase l'approccio più comune è il cosiddetto ply discount.

Modelli di propagazione del danno

La rottura di una singola lamina non implica automaticamente il collasso dell'intero laminato, poiché gli strati non danneggiati possono ancora sopportare una parte del carico applicato. Il danneggiamento del primo strato, conosciuto come **first ply failure (FPF)**, provoca una diminuzione delle proprietà meccaniche della lamina; tuttavia, essa mantiene una certa capacità portante fino a raggiungere la sua rottura definitiva. Il processo di danneggiamento può poi estendersi gradualmente agli altri strati, fino a giungere all'**ultimate ply failure (UPF)**, cioè alla rottura dell'ultima lamina, che coincide con il cedimento finale del composito.

Sono disponibili diversi modelli per descrivere questo comportamento. Il più elementare, detto **constant stress**, ipotizza che, dopo il danneggiamento, la lamina continui a sopportare il carico raggiunto al momento della rottura, pur mostrando un aumento di deformazione, ma senza capacità di sostenere ulteriori incrementi di carico.

Altri approcci utilizzano un fattore moltiplicativo, il *knockdown factor*, che modifica le proprietà della lamina. Nel metodo del **ply discount**, tale fattore è posto pari a 0, indicando che la lamina danneggiata non è più in grado di sopportare alcun carico, che viene quindi trasferito agli strati restanti. Nel **modello knockdown**, invece, il fattore tende a 0, riducendo progressivamente le proprietà della lamina e abbassando la curva elastica originale, ma permettendole comunque di sostenere una parte del carico.

Il modello **gradual unloading** descrive una riduzione graduale delle proprietà meccaniche fino alla completa rottura.

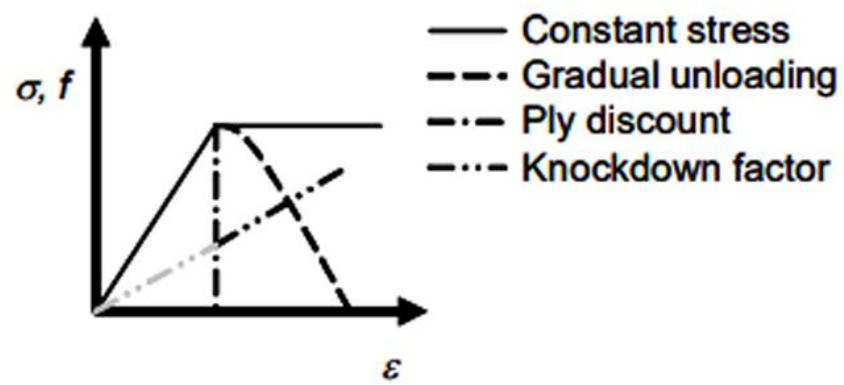


Figura 17-Comportamento elastico a seconda dei diversi modelli

Capitolo 2

Analisi del composito F155K285

2.1 Resina epossidica e fibre aramidiche

In questo capitolo viene presentato il materiale impiegato nello studio, con una descrizione dettagliata delle sue proprietà e caratteristiche meccaniche rilevanti.

Il materiale oggetto di studio è costituito da una matrice epossidica rinforzata con fibre aramidiche; di seguito viene fornita una panoramica delle caratteristiche generali di entrambe le componenti, in base a quanto descritto in [8].

2.1.1 Resina epossidica

I materiali polimerici si dividono in polimeri **termoplastici** e polimeri **termoindurenti**. I termoplastici presentano la possibilità di essere riscaldati e rimodellati, poiché la loro struttura molecolare non viene alterata in maniera permanente con il calore. Al contrario, l'architettura dei termoindurenti, quando sottoposti al processo di reticolazione, si trasforma in una rete tridimensionale stabile, che non può più essere sottoposta a fusione o a rielaborazione.

Un polimero termoindurente, infatti, è costituito da una struttura tridimensionale di atomi di carbonio legati covalentemente; nel reticolo possono essere presenti anche elementi come ossigeno, azoto o zolfo. Questi materiali inizialmente si presentano come resine liquide a temperatura ambiente, formate da molecole identiche e indipendenti tra loro. La trasformazione in solido avviene attraverso un processo chimico detto curing, attivato mediante l'aggiunta di appropriati catalizzatori e l'applicazione controllata di calore e pressione. Durante la fase di polimerizzazione, si formano legami covalenti tra le molecole iniziali, che generano una struttura rigida e reticolata. La sostanza assume in maniera definitiva la forma impostata al termine della reticolazione; eventuali incrementi di temperatura non portano alla fusione del materiale, bensì al suo degrado, poiché l'energia termica finisce per rompere i legami chimici (i cross-link formati nel curing) che sostengono la rete tridimensionale. Questo comportamento rappresenta la differenza più significativa rispetto ai materiali termoplastici, che invece possono essere rimodellati senza perdere la loro integrità chimica.

Le **resine epossidiche** ricoprono, all'interno della categoria dei polimeri termoindurenti, un ruolo rilevante come matrici per materiali compositi. Si tratta di resine organiche liquide a basso peso molecolare che, una volta reticolate, si trasformano in solidi rigidi. Con il

riscaldamento possono mostrare un certo rammollimento, ma non arrivano a rifondere, poiché la reticolazione è un processo irreversibile.

Come accade per tutti i polimeri termoindurenti, anche le resine epossidiche derivano da un pre-polimero termoplastico a basso peso molecolare che, attraverso una reazione di policondensazione, viene trasformato nel materiale finale. Questo pre-polimero, riscaldato, diventa fluido per poter essere lavorato e presenta alle estremità due gruppi epossidici molto reattivi, come spiegato in [9]. La formula chimica delle resine epossidiche commerciali presenta infatti generalmente un'unità benzenica come base strutturale; prodotti con basso grado di polimerizzazione ($n < 2$) risultano liquidi, mentre valori $n \geq 2$ sono associati a resine allo stato solido. Il grado di polimerizzazione n rappresenta il numero medio di unità monomeriche ripetute nella catena del pre-polimero.

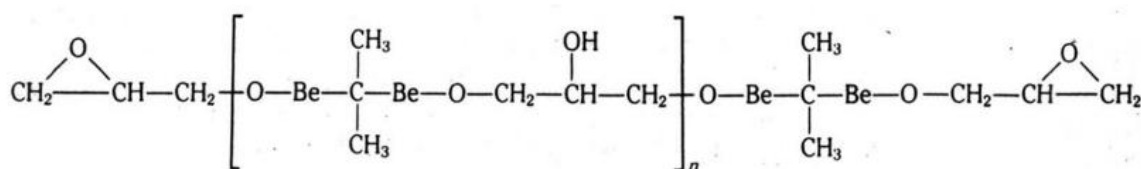


Figura 18-Pre-polimero termoplastico

La forma definitiva del materiale termoindurente si ottiene bloccando i legami del pre-polimero mediante un indurente o agente reticolante, spesso una diammina, che permette la formazione di un materiale rigido e resistente con una struttura tridimensionale reticolata. Ogni gruppo amminico può reagire con due gruppi epossidici terminali, per cui una singola molecola di ammina può collegare quattro catene polimeriche.

Le caratteristiche meccaniche del materiale una volta indurito sono determinate sia dal grado di reticolazione, che nelle resine epossidiche si sviluppa a temperature più alte rispetto ad altre resine plastiche, sia dai parametri con cui avviene il processo di curing. Le resine epossidiche trovano impiego in numerosi campi: nell'industria elettrica ed elettronica grazie alle ottime proprietà isolanti; nel settore aerospaziale, dove vengono integrate con rinforzi come tessuti in kevlar, fibre di vetro o fibre di carbonio; nell'ambito alimentare e farmaceutico per la loro buona resistenza meccanica; nel settore civile, dove sono utilizzate per interventi di ripristino e come base per la formulazione di adesivi.

Alla base della formazione dei materiali compositi con matrice epossidica vi è una reazione di policondensazione, all'interno della quale un monomero bifunzionale reagisce con un monomero dalle medesime caratteristiche, dando origine a una reazione a catena attraverso la

quale la macromolecola cresce. In pratica, due molecole si combinano con la contemporanea eliminazione di una piccola specie molecolare.

Le resine epossidiche risultano più versatili delle resine fenoliche in quanto possono reagire con vari tipi di agenti, a temperature relativamente basse e in tempi relativamente inferiori. Le resine epossidiche appartengono alla famiglia dei polimeri termoindurenti e derivano da monomeri contenenti un anello epossidico a tre atomi. I metodi più recenti di polimerizzazione si basano sulla formazione di un fronte auto-sostenuto, che permette la riduzione dei tempi necessari per ottenere il materiale finale. Un esempio significativo di questa categoria è rappresentato dalla polimerizzazione frontale.

Le resine epossidiche presentano sia aspetti positivi che limitazioni. Di seguito vengono riportati i principali punti di forza e le criticità associate al loro utilizzo:

Aspetti positivi

- elevata bagnabilità, dovuta al basso peso molecolare della resina non ancora reticolata, che garantisce un'elevata mobilità molecolare;
- ottime proprietà meccaniche, in termini di durezza, resistenza e rigidità;
- elevata resistenza chimica, legata alla forte reattività del gruppo epossidico con gli agenti di reticolazione come le ammine, che permette di ottenere un alto grado di reticolazione;
- ridotti ritiri durante l'indurimento, poiché la resina non libera sostanze volatili durante la cura;
- elevata rigidità dielettrica;
- capacità di conservare le proprie proprietà in un'ampia gamma di condizioni ambientali, incluse esposizione ad ambienti acquosi o livelli elevati di umidità;
- assenza di sostanze cancerogene.

Aspetti negativi

- elevata fragilità;
- bassa resilienza;
- bassa deformazione a rottura;
- tempi di cura prolungati;
- costo elevato.

2.1.2 Fibre aramidiche (Kevlar 49)

Come descritto nel paragrafo 1.2.2 di questa tesi, esistono diversi tipi di fibre utilizzate come rinforzo nei materiali polimerici. I principali tipi impiegati sono: fibre di vetro, fibre di carbonio e fibre aramidiche; queste ultime rappresentano una categoria di rinforzi polimerici utilizzati per migliorare le proprietà meccaniche dei materiali compositi.

Le **fibre aramidiche** sono materiali organici costituiti da poliammidi aromatiche altamente orientate; da qui deriva la denominazione ARomatic polyAMIDes, come descritto in [10]. Le poliammidi sono polimeri ottenuti attraverso reazioni di policondensazione tra diammine e acidi dicarbossilici e possono presentare una struttura completamente “lineare” oppure includere anelli aromatici. L’introduzione di tali anelli aromatici nella catena polimerica determina un marcato aumento delle proprietà meccaniche rispetto alle poliammidi lineari, con un miglioramento soprattutto del modulo elastico. Quando la percentuale di gruppi aromatici supera l’85%, la fibra viene classificata come aramide.

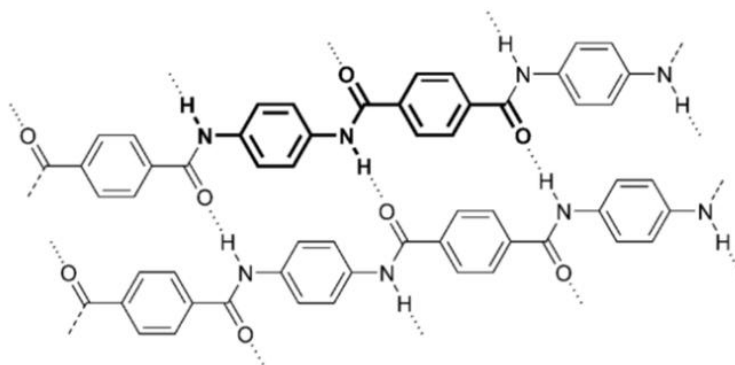


Figura 19-Struttura aramide

La prima realizzazione industriale di fibre aramidiche risale al 1961, con la commercializzazione del Nomex; successivamente, nel 1971, la Dupont introdusse sul mercato il **Kevlar®**, ottenuto tramite brevetto dedicato.

Suddivisione delle fibre aramidiche

In funzione della posizione con cui i legami ammidici si collegano agli anelli benzenici, le fibre aramidiche vengono generalmente suddivise in due categorie principali: **para-aramidi** e **meta-aramidi**, come descritto in [11]. Le differenze nella loro architettura molecolare determinano proprietà sensibilmente differenti e, di conseguenza, impieghi specifici nel settore aerospaziale.

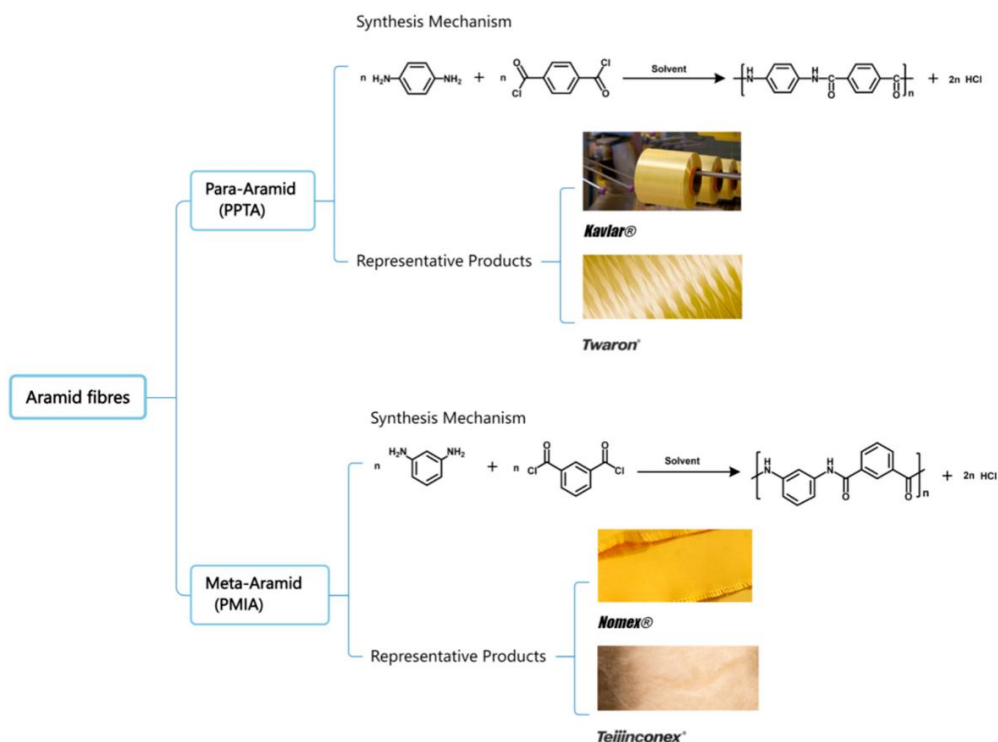


Figura 20-Suddivisione in categorie delle fibre aramidiche

Le **para-aramidi (p-AF)**, tra cui rientrano materiali commerciali come Kevlar® (DuPont) e Twaron® (Teijin), presentano catene molecolari rigide, rettilinee e fortemente orientate lungo l'asse della fibra. Questa configurazione lineare, rafforzata da una fitta rete di legami idrogeno tra le catene, è responsabile dei loro valori estremamente elevati di resistenza a trazione (fino a circa 3,6 GPa) e di modulo elastico. Grazie a queste caratteristiche sono il rinforzo ottimale per applicazioni strutturali dove richiesta grande capacità portante e resistenza agli urti. A causa dell'inerzia chimica e della superficie poco reattiva, queste fibre hanno una scarsa adesione di interfaccia con le matrici polimeriche e richiedono quindi modifiche superficiali con tecniche adeguate.

Le **meta-aramidi (m-AF)**, come Nomex® e Teijinconex®, sono invece caratterizzate da una struttura molecolare non lineare, con una disposizione “a zig-zag” che impedisce un impacchettamento denso e ordinato delle catene. Questo comporta valori di resistenza meccanica inferiori rispetto alle para-aramidi, ma conferisce eccellenti prestazioni in termini di stabilità termica, con una temperatura di transizione vetrosa (T_g) attorno ai 270 °C, e una spiccata resistenza alla fiamma. Di conseguenza, il loro utilizzo in ambito aerospaziale è prevalentemente limitato a componenti non strutturali, dove sono richieste elevate proprietà ignifughe e di isolamento termico. Tra queste applicazioni rientrano le coperte isolanti nei

compartimenti motore, gli strati antifiamma per i sedili e i nuclei a nido d'ape leggeri e ignifughi impiegati nei pavimenti e nei pannelli interni delle cabine.

La **microstruttura delle para-aramidi** rappresenta l'origine sia delle loro notevoli prestazioni sia delle loro principali limitazioni. Presenta una disposizione altamente anisotropa, dovuta a robusti legami covalenti lungo l'asse e legami idrogeno più deboli nelle direzioni trasversali, causa del comportamento fortemente direzionale del materiale, che presenta elevate proprietà meccaniche a trazione lungo l'asse della fibra, ma bassa resistenza a compressione (dovuta a fenomeni di micro-instabilità e microbuckling delle catene rigide) e caratteristiche a taglio e in direzione trasversale ridotte. Questa disposizione viene evidenziata mediante uno studio tramite diffrazione a raggi X, che mostra la presenza di un elevato grado di cristallinità e un forte orientamento delle catene molecolari lungo l'asse longitudinale della fibra.

Questa anisotropia intrinseca influenza in modo significativo le scelte progettuali, i processi produttivi e i limiti applicativi dei compositi rinforzati con fibre aramidiche. Inoltre, la superficie liscia e chimicamente poco attiva di tali fibre rende difficile ottenere una forte adesione con la matrice polimerica.

Interfaccia fibra-matrice

All'interno di un FRP le fibre rappresentano il principale elemento portante della struttura, mentre la matrice polimerica avvolge il rinforzo, preservandone l'orientamento e l'integrità. Oltre a mantenere in posizione le fibre, la matrice consente il trasferimento dei carichi tra di esse e le protegge da agenti ambientali quali umidità e temperature elevate. Ne consegue che la scelta della matrice risulti determinante a determinare le proprietà meccaniche, termiche ma anche di durabilità complessità e costo. In ambito aeronautico trovano impiego sia matrici termoindurenti sia termoplastiche, ognuna con specifici vantaggi e limitazioni.

La zona di contatto tra fibra e matrice non può essere considerata una semplice superficie di separazione, ma piuttosto una vera e propria terza fase all'interno del composito, avente un ruolo determinante sul comportamento meccanico complessivo del materiale.

La funzione primaria dell'interfaccia è quella di consentire un efficiente trasferimento del carico dalla matrice, caratterizzata da rigidità inferiore, alle fibre aramidiche, dotate invece di elevata resistenza. Un'adesione adeguata risulta quindi indispensabile per sfruttare appieno il potenziale meccanico del rinforzo e per prevenire fenomeni di danneggiamento prematuro.

Tuttavia negli AFPR, le fibre aramidiche presentano una superficie chimicamente inerte che non permette l'instaurazione di legami chimici forti con le matrici, a differenza delle fibre di

carbonio, che grazie ai gruppi funzionali superficiali formano legami covalenti con le resine epossidiche. L'adesione delle fibre aramidiche risulta infatti caratterizzata principalmente da interazioni fisiche, come forze di Van der Waals, che rappresentano la causa del ridotto valore di resistenza a compressione in direzione trasversale, poiché l'interfaccia non riesce a garantire un supporto adeguato a contrastare il microbuckling delle fibre. Inoltre, un'interfaccia scarsamente resistente favorisce la penetrazione dell'umidità all'interno del materiale, creando percorsi preferenziali che possono condurre al distacco fibra-matrice (debonding) e accelerare il degrado ambientale del composito.

Alla luce di queste criticità lo sviluppo di un'interfaccia fibra-matrice robusta stabile nel tempo e resistente agli agenti esterni rappresenta uno degli obiettivi più importanti per migliorare le prestazioni degli AFRP. Le soluzioni proposte a tal fine, spaziano dalla modifica superficiale delle fibre su scala nanometrica all'impiego di nuove formulazioni di matrici polimeriche.

Tipologie di Kevlar®

Oggi sono disponibili varie tipologie di Kevlar che differiscono per struttura molecolare ed esigenze prestazionali. Le versioni più comuni sono:

- **Kevlar-29** (alta tenacità): caratterizzato da una densità bassa e alta tenacità, impiegato per dispositivi di protezione individuale, guanti antitaglio e tubazioni flessibili.
- **Kevlar-49** (alto modulo elastico): trova impiego in vele e, più in generale, nei materiali compositi.
- **Kevlar-129** (modulo elastico molto elevato): di sviluppo più recente, viene utilizzato nella produzione di materiali ad altissime prestazioni destinati ad applicazioni militari e aeronautiche.

Il Kevlar si distingue dalle altre fibre sintetiche per l'elevata resistenza specifica e per la buona robustezza durante le fasi di manipolazione. È disponibile in commercio come filato (yarn), roving e tessuto.



Figura 21-Diversi formati di Kevlar

Le fibre aramidiche mostrano proprietà distintive in termini di resistenza, allungamento e densità, che le rendono particolarmente adatte per applicazioni strutturali in combinazione con matrici polimeriche. Tuttavia, presentano anche alcune limitazioni dovute alla loro sensibilità a determinate condizioni ambientali e alla lavorabilità.

Aspetti positivi

- buone proprietà meccaniche;
- coefficiente di espansione termico negativo, simile a quello delle fibre di carbonio;
- elevata stabilità chimica, sebbene possano subire attacchi da acidi e basi forti;
- alto allungamento a rottura (circa la metà di quello delle fibre S-Glass, ma superiore rispetto alle fibre di carbonio).

Aspetti negativi

- bassa resistenza alla compressione;
- difficoltà nel taglio o nella macinazione;
- elevata degradazione se esposte ai raggi ultravioletti in presenza di ossigeno;
- assorbimento d'acqua (è necessario un sistema di protezione per preservarle dai raggi UV, dall'ossigeno e dall'umidità).

2.2 Materiale HexPly® F155K285

2.2.1 Proprietà resina epossidica HexPly® F155

Nel documento [12] si legge che HexPly® F155 è una resina epossidica modificata ad alte prestazioni, sviluppata per la polimerizzazione in autoclave in modo da garantire elevata resistenza dei laminati, maggiore tenacità alla frattura e proprietà adesive. Questa resina risulta

adatta a laminazione e co-curing a 121 °C, avendo un flusso controllato e soddisfa i requisiti della specifica MIL-R-9300, per cui può essere utilizzata come pelle esterna di strutture honeycomb, essendo sottoposta alla cura direttamente sulla superficie stessa.

Proprietà della resina non polimerizzata

HexPly® F155 permette un distacco equilibrato tra lo stampo e la superficie del pannello honeycomb, grazie alla formulazione di base che presenta un flusso controllato. Le fasi di assemblaggio e layup sono facilitate da una buona adesività e maneggiabilità di questo materiale. La tipologia di resina permette l'associazione con diversi tipi di tessuti e rinforzi fibrosi, e la conservazione anche fuori dal freezer.

Proprietà del laminato polimerizzato

La resina polimerizzata conferisce al laminato alta resistenza meccanica e ottime capacità di incollaggio, sia nel caso di accoppiamenti metallo-metallo, che per pannelli sandwich. È un tipo di laminato con elevata sicurezza strutturale grazie alle proprietà auto-estinguenti.

Proprietà tecniche della resina pura

- Densità specifica: 1,335
- Tg a secco: 121 °C
- Assorbimento di umidità in equilibrio: 9,4%
- Coefficiente lineare di espansione termica: $5,27 \times 10^{-5}$ cm/cm/°C
- Resistenza a trazione: 80 MPa
- Modulo a trazione: 3,24 GPa
- Deformazione a trazione: 5,2%
- Tenacità alla frattura (K1C): 1,65 MPa√m
- Tasso di rilascio di energia di deformazione (G1C): 0,73 kJ/m²
- Tempo di gel a 121 °C: 4-10 minuti

Per caratterizzare il **comportamento termico e reologico** della resina F155, Hexcel fornisce la curva del tempo di gelificazione in funzione della temperatura e la curva reometrica della viscosità durante il riscaldamento.

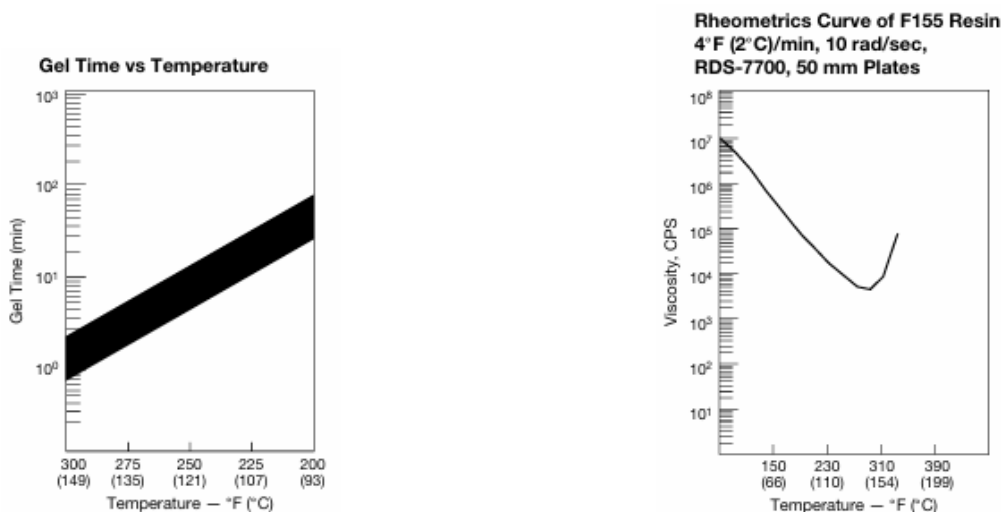


Figura 22-Gel Time vs Temperature e Rheometrics Curve of F155 Resin

Il primo grafico descrive come la velocità di reticolazione della resina aumenti con l'incremento della temperatura, evidenziando la relazione inversa tra temperatura e gel time, parametro essenziale per definire le condizioni di cura e la finestra di lavorazione.

Il secondo grafico riporta invece l'evoluzione della viscosità della resina durante un riscaldamento controllato. La curva mostra la tipica diminuzione iniziale della viscosità, utile per favorire il flusso e l'impregnazione delle fibre, seguita da un minimo e da un successivo aumento legato all'avvio della reticolazione.

Insieme, questi due diagrammi permettono di definire la finestra di processo ottimale della resina, individuando le condizioni in cui il materiale è sufficientemente fluido per essere lavorato e il punto in cui inizia la gelificazione.

2.2.2 Proprietà composito HexPly® F155K285

La tabella mostra le principali caratteristiche del **HexPly® F155K285**, un materiale composito, formato dalla resina epossidica F155 e da fibre aramidiche (Kevlar 49) intrecciate in forma di tessuto.

Come avviene nei tessuti tradizionali, in questo tipo di compositi il rinforzo è formato da fibre singole o da fasci di fibre, che vengono intrecciati per creare una trama. Questa disposizione del rinforzo migliora le caratteristiche del materiale: grazie all'intreccio, le proprietà interlaminari aumentano e le cricche incontrano difficoltà a propagarsi da uno strato all'altro a causa della variazione di direzione delle fibre. La trama si realizza intrecciando due sistemi di filati ortogonali tra loro, uno che corre lungo la lunghezza, chiamato warp, e l'altro disposto in direzione trasversale, denominato weft.

Form	Hexcel Designation	Fiber	Fiber Areal Wt. g/m ²	Weave	Count Warp x Fill	Widths Available Standard Width, in (cm)
Kevlar® Fabrics	K285-38"-F155	Kev. 49 1140	170	Crowfoot	17 x 17	38", 50", 60" (96.5, 127, 152.4)

Tabella 1-Materiale HexPly F155K285

In tabella sono riportati:

- **Form:** specifica la forma del materiale, in questo caso si tratta di un tessuto in fibra di Kevlar®.
- **Hexcel Designation:** identifica il codice commerciale assegnato da Hexcel per questo specifico prodotto, utile per ordini e tracciabilità.
- **Fiber:** indica il tipo di fibra impiegata nel tessuto.

In questo caso il Kevlar 49 1140, dove 1140 indica il denier, cioè la dimensione del filato e quindi le proprietà meccaniche risultanti; un denier di 1140 significa un filato più spesso e robusto rispetto a uno di 195.

- **Fiber Areal:** il peso delle fibre per metro quadrato di tessuto, parametro chiave per calcolare la quantità di fibra presente in un laminato.
- **Weave:** indica il tipo di intreccio del tessuto.

In questo caso è stato utilizzato un intreccio di tipo **Crowfoot Weave**, una particolare variante del *twill* (intreccio che genera un pattern diagonale sulla superficie del componente) caratterizzata da un rapporto warp/weft di 3/1.

È una variante di tessuto che conferisce maggiore drappeggiabilità, migliore permeabilità alla resina, ma una resistenza all'abrasione inferiore rispetto a un *Plain Weave*, dove ogni filamento del warp ha un intreccio con uno del weft (1/1).

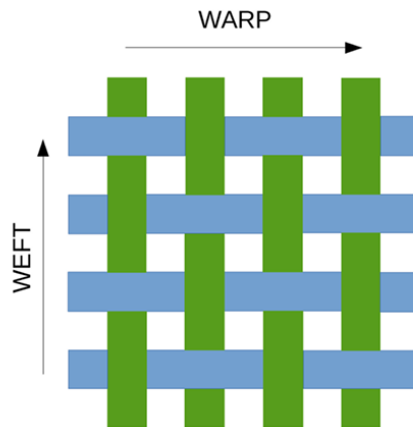


Figura 23-Tipo di intreccio

- **Count Warp x Fill:** specifica la densità dei fili tessili sia in direzione dell'ordito (warp) che della trama (fill); 17 x 17 significa che ci sono 17 fili per pollice in entrambe le direzioni.
- **Widths Available/Standard Width:** indica le larghezze standard di fornitura del tessuto, sia in pollici che in centimetri. Questa flessibilità consente di soddisfare esigenze di vari tipi di pezzi e stampi.

Proprietà fisiche

Nella tabella qui riportata sono presenti le principali informazioni fisiche e tecniche relative al Kevlar® K285, sia nella fase prima della polimerizzazione (prepeg) che dopo la cura (lamine), spiegate in seguito.

	Property	Kevlar
	Material description	K285
Prepeg	% Flow @ 250 °F psi (121 °C 345 kPa)	14-26
	% Resin content (dry)	49-55
Laminate	Cured thickness per ply [cm]	0.025
	% Fiber volume	46

Tabella 2-Proprietà fisiche HexPly F155K285

Prepeg:

- % Flow: la percentuale di flusso di resina quando il prepeg è sottoposto a 121°C e 345 kPa.

Questo dice quanto la resina è fluida durante la cura, quindi quanto si sposta facilmente,

riempiendo ogni spazio tra le fibre o eventuali vuoti; è importante per evitare eccesso o carenza di resina nel laminato.

- % Resin content (dry): la percentuale di resina nel prepreg secco.

Una percentuale di resina maggiore significa maggiore flessibilità ma minore resistenza e rigidità.

Laminate:

- Cured thickness per ply: spessore di una singola lamina (ply) dopo la polimerizzazione (cooking).
- % Fiber volume: frazione di volume occupata dalla sola fibra nel laminato; una percentuale maggiore significa maggiore rigidità e resistenza.

Proprietà meccaniche

La seguente tabella riporta le principali proprietà meccaniche dell'AFRP considerate in questo studio, misurate a temperatura ambiente (24 °C). Sono riportate le costanti elastiche nel piano principale del materiale (E_1 , E_2 , G_{12} e ν_{12}), la densità e le resistenze ultime a trazione, compressione e taglio lungo le direzioni caratteristiche della lamina.

Questi parametri costituiscono la base per la modellazione del comportamento meccanico del singolo ply come materiale ortotropo e per la successiva analisi del laminato mediante la Classical Laminate Theory (CLT).

Proprietà	T (°C)	Valore
E_1 , modulo di Young longitudinale	24 °C	31400 MPa
E_2 , modulo di Young trasversale	24 °C	31200 Mpa
ν_{12} , coefficiente di Poisson	24 °C	0.093
$G_{12}=G_{13}=G_{23}$, modulo di taglio	24 °C	1610 Mpa
ρ , densità	24 °C	1.39×10^{-9} T/mm ³
X_t , trazione lungo la fibra	24 °C	457 Mpa
X_c , compressione lungo la fibra	24 °C	158 Mpa
Y_t , trazione trasversale	24 °C	465 Mpa
Y_c , compressione trasversale	24 °C	157 Mpa
S, resistenza a taglio nel piano	24 °C	86 Mpa

Tabella 3-Proprietà meccaniche HexPly F155K285

Sebbene i valori sperimentali del modulo di Young lungo le due direzioni principali del piano risultino molto simili ($E_1 \approx E_2$), questo fatto non è di per sé sufficiente per considerare il

composito come isotropo nel piano. L'isotropia elastica richiede infatti che tutte le costanti elastiche soddisfino le relazioni tipiche dei materiali isotropi; in particolare, il modulo di taglio dovrebbe rispettare la relazione:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Tuttavia, nel materiale in esame, il valore di G_{12} risulta significativamente inferiore rispetto a quello che si otterrebbe applicando tale relazione con i valori di E e ν forniti. Questa discrepanza indica chiaramente un comportamento anisotropo a taglio, tipico dei materiali compositi rinforzati con fibre, e pertanto esclude la possibilità di trattare il materiale come **isotropo nel piano**.

Caso di singola lamina (single ply)

Nel caso di una singola lamina, il materiale deve essere modellato come **ortotropo**, anche se $E_1 \approx E_2$. In questa approssimazione, il comportamento nel piano è definito da quattro costanti indipendenti:

- E_1 , modulo di Young nella direzione 1;
- E_2 , modulo di Young nella direzione 2;
- ν_{12} , coefficiente di Poisson;
- G_{12} , modulo di taglio nel piano.

Queste costanti vengono utilizzate per costruire la matrice di rigidezza ridotta $[Q]$ o la sua inversa, la matrice di cedevolezza $[S]$, come spiegato all'interno del paragrafo 1.3, fondamentale per l'analisi meccanica e per la successiva formulazione della matrice dei laminati secondo la Classical Laminates Theory (CLT). Pertanto, anche in presenza di una quasi uguaglianza tra E_1 ed E_2 , la lamina deve essere trattata come **ortotropa nel piano**.

Caso di laminato

Nel caso di un laminato costituito da più lamine con orientazioni differenti, la risposta complessiva dipende invece dalla **sequenza di impilamento** (stacking sequence). In particolare, se il laminato è **bilanciato** (ugual numero di piani $+\theta$ e $-\theta$), **simmetrico** rispetto al piano medio e comprende orientazioni distribuite su più direzioni (ad esempio 0° , 90° , $+45^\circ$,

-45°), allora il comportamento globale del laminato nel piano può diventare **quasi isotropo**, pur partendo da lamine intrinsecamente ortotrope.

In questi casi non è il singolo ply ad essere isotropo, ma il laminato equivalente che, a livello macroscopico, mostra una risposta meccanica simile a quella di un materiale isotropo. Tuttavia, tale approssimazione è valida solo a livello strutturale e non microscopico, e deve essere verificata tramite il calcolo delle matrici.

Ciclo di cura

Come descritto nel paragrafo 1.2.3, tutti i compositi sono sottoposti ad un ciclo di polimerizzazione. Nel documento [12] viene spiegato come deve essere svolto e le eventuali differenze nel caso si tratti un pannello sandwich o di un laminato.

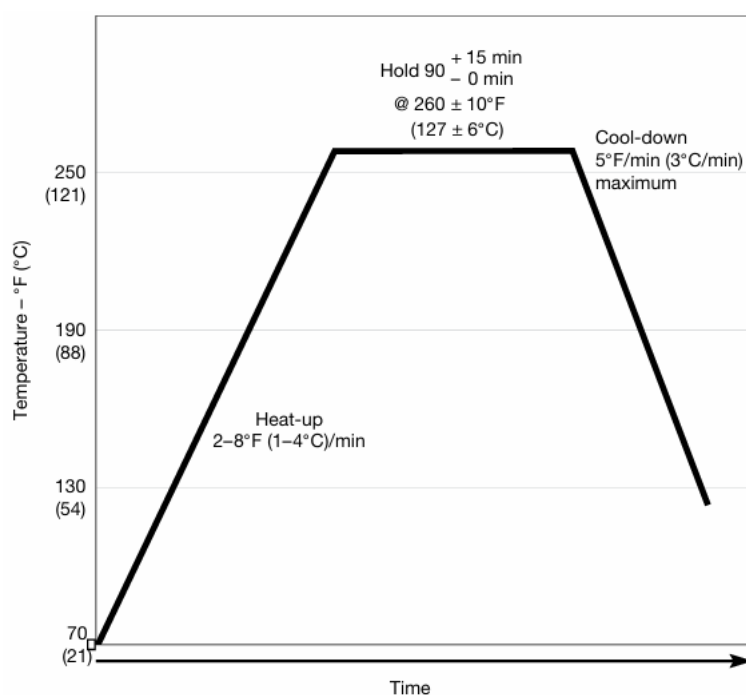


Figura 24-Cure Cycle F155K285 HexPly

Per curare correttamente un laminato in autoclave, si inizia applicando un **vuoto**, in questo caso di minimo 22 pollici di mercurio (74 kPa), nel sacco, per rimuovere l'aria e i gas intrappolati, garantendo che la resina impregni uniformemente le fibre.

Successivamente si applica una **pressione**: per i laminati si usano circa 85 psi (586 kPa), mentre per i pannelli sandwich, che hanno un nucleo leggero interno, la pressione è più bassa, intorno a 45 psi (310 kPa), per evitare di schiacciare il core. La pressione aiuta a comprimere la resina tra le fibre, eliminando vuoti e assicurando la giusta compattazione e il giusto contenuto di

resina durante la cura in autoclave.

Quando la pressione interna raggiunge 20 psi (138 kPa), si può **ventilare** il sacco fino alla pressione atmosferica per ridurre il rischio di deformazioni.

Infine, durante il raffreddamento, quando la temperatura scende sotto 140°F (60°C), si può **rilasciare la pressione e rimuovere il pannello** dall'autoclave, togliendolo dal sacco. Questo passaggio finale assicura che la resina sia completamente indurita e che il laminato mantenga le sue proprietà meccaniche senza tensioni interne.

Capitolo 3

Progettazione del test

In questo capitolo viene descritta la progettazione e l'implementazione del test di fatica che costituisce la parte centrale della presente ricerca. Verranno illustrati gli obiettivi del test, la metodologia adottata, la strumentazione utilizzata e le caratteristiche dei campioni sperimentali. Si pone l'attenzione sulla scelta dei parametri di prova e sulla descrizione dettagliata delle procedure operative, in modo da garantire la riproducibilità e l'accuratezza dei risultati. Questo capitolo costituisce il collegamento tra la parte teorica della tesi e l'analisi dei dati sperimentali, che sarà oggetto dei capitoli successivi.

3.1 Tipologia di test

L'obiettivo principale della prova è valutare la **resistenza a flessione ciclica indotta da vibrazione** del materiale sottoposto a un elevato numero di cicli di carico (HCF), identificando eventuali modalità di danneggiamento o cedimento progressivo.

La prova non è una classica prova di flessione, cioè una bending statica, ma una prova vibrazionale su provino a mensola, con un vincolo di incastro a un'estremità e l'estremo libero eccitato tramite uno shaker. Si parla quindi di flessione ciclica con un ciclo alterno simmetrico puro a media nulla che genera sollecitazioni di momento flettente.

Dato che la sezione risulta vincolata all'incastro si hanno rotazione e traslazione nulle, mentre all'estremo libero si misura lo spostamento imposto dallo shaker, che genera una curvatura lungo la trave.

In questo capitolo verranno analizzati i principali fattori che contribuiscono all'incremento del momento flettente nel provino, tra cui l'effetto di una massa concentrata all'estremità libera e l'eccitazione del sistema alla frequenza di risonanza, condizioni che aumentano significativamente le sollecitazioni.

Questa configurazione, non prevista dalle normative standard, è stata scelta perché rappresenta in modo più realistico le condizioni operative dei componenti in composito soggetti a vibrazioni e carichi ciclici. Permette inoltre di raggiungere un elevato numero di cicli in tempi contenuti, consentendo di osservare fenomeni tipici della fatica ad alta ciclicità, come degradazione della rigidità, micro-cricche, delaminazione e rottura delle fibre.

Nonostante non esistano norme specifiche per questa prova, sono stati utilizzati riferimenti come la norma ASTM D3039/D3039M [13] che tratta la fatica a trazione per i materiali compositi, dove viene definito il metodo di prova. Pur essendo specifico per prove di trazione, il metodo è stato utilizzato come punto di partenza per la progettazione del test, poiché fornisce indicazioni utili sul controllo dei fattori che influenzano il comportamento del materiale durante test ciclici, come preparazione dei provini, condizioni di montaggio, allineamento e parametri di carico.

3.2 Procedura sperimentale

Per definire correttamente la prova sperimentale è necessario soffermarsi su alcuni aspetti chiave della sua progettazione.

3.2.1 Obiettivi del test

Riduzione del tempo di test

Una delle esigenze principali della prova è la riduzione del tempo complessivo necessario per ottenere i risultati. Nei test a fatica, infatti, il numero di cicli richiesto per arrivare a rottura può essere molto elevato (dell'ordine di 10^6 - 10^7 cicli), rendendo le prove estremamente lunghe. Ridurre i tempi di prova consente di ottimizzare l'utilizzo delle apparecchiature sperimentali, che hanno un costo elevato e una disponibilità limitata, di diminuire il consumo energetico e di aumentare il numero di configurazioni analizzabili a parità di tempo di laboratorio. Inoltre, abbreviare la durata del test permette di limitare le variazioni delle condizioni ambientali, rendendo i risultati più ripetibili e affidabili.

Si è scelto, per questo motivo, di testare i provini sollecitandoli alla propria frequenza naturale, permettendone così l'amplificazione del carico.

Determinazione della curva S-N

Lo scopo della prova è ottenere la curva sforzo-numero di cicli (curva S-N), che rappresenta il legame tra il livello di sforzo applicato e il numero di cicli necessari per provocare la rottura del materiale. Nel caso in esame, la condizione di failure non è identificata con la frattura completa del provino, bensì con la riduzione della rigidità al di sotto di una soglia prefissata al 20%, che corrisponde a una diminuzione della frequenza di risonanza del 10%.

Al fine di creare una curva S-N per il materiale in analisi si svolgeranno test su livelli di carico differenti, con più test per ciascun livello così da limitare la dispersione dei risultati.

3.2.2 Tecniche utilizzate

Eccitazione in risonanza

Per ridurre il tempo necessario a causare la rottura, ciascun provino viene eccitato alla propria frequenza di risonanza. Quando un sistema viene sollecitato in corrispondenza della sua frequenza naturale si verifica un fenomeno di amplificazione dinamica per cui l'ampiezza delle vibrazioni aumenta sensibilmente rispetto alla risposta ottenuta a frequenze lontane dalla risonanza. Come diretta conseguenza, anche lo sforzo alternato a cui il provino è sottoposto risulta maggiore, accelerando il danneggiamento a fatica e portando alla rottura in un numero inferiore di cicli, a pari ampiezza di eccitazione imposta.

In questo lavoro è stato scelto di eccitare il primo modo di vibrare, in quanto garantisce una risposta ben definita e facilmente riproducibile; questo argomento sarà approfondito in seguito.

Ricerca di risonanza con Swept Sine [14]

A seguito di quanto detto, risulta necessaria la ricerca della risonanza dei provini come punto di partenza dei test; per farlo si utilizzano Swept Sine tramite software Siemens. Le Swept Sine sono software di acquisizione dati che vengono impiegati per misurare la funzione di risposta in frequenza (FRF) su un oggetto di prova e vengono utilizzati insieme ad un hardware, nel caso specifico il Simcenter SCADAS.

Nel Swept Sine Test si eccita la struttura con una singola onda sinusoidale, la cui frequenza varia in maniera continua all'interno di un intervallo prestabilito. È possibile mantenere l'ampiezza dell'eccitazione e/o della risposta a un valore target, grazie al controllo tramite anello aperto o chiuso, scegliendo se svolgere un controllo tramite forza o accelerazione; nel caso specifico come canale di controllo si utilizzerà l'accelerazione. Il software inoltre fornisce la possibilità, tramite l'impostazione della frequenza di sweep (Hz/s) o tramite l'impostazione del numero di periodi, di modificare la qualità della stima dell'ampiezza, in base all'accuratezza desiderata.

Eccitazione con segnale Tracked Sine Dwell [15]

L'eccitazione di una struttura mediante shaker alla sua frequenza di risonanza, utilizzando un segnale sinusoidale a frequenza singola, rappresenta una tecnica ampiamente adottata per

l'induzione della fatica ad alto numero di cicli (High Cycle Fatigue, HCF). Le frequenze proprie del sistema vengono generalmente individuate tramite prove preliminari di tipo swept sine; tuttavia, durante l'esecuzione del test, tali frequenze possono variare in funzione del danneggiamento progressivo del provino, delle condizioni termiche o della presenza di effetti non lineari nel comportamento strutturale. Al fine di garantire il mantenimento delle condizioni di risonanza nel corso della prova, risulta quindi necessario monitorare l'evoluzione delle frequenze di risonanza e adeguare in modo continuo la frequenza di eccitazione.

Il Tracked Sine Dwell è un'applicazione software impiegata in combinazione con uno shaker elettrodinamico per sottoporre un Device Under Test (DUT) a cicli di vibrazione in corrispondenza delle sue condizioni di risonanza. L'eccitazione alla risonanza consente di ottenere livelli di risposta vibratoria significativamente più elevati, favorendo il raggiungimento della condizione di guasto in tempi ridotti e permettendo di riprodurre scenari di vibrazione assimilabili a condizioni operative di tipo "worst case".

La prova viene condotta in modalità a circuito chiuso (closed-loop), nella quale l'ampiezza della vibrazione viene costantemente misurata e regolata dal sistema di controllo al fine di mantenere le condizioni di prova prefissate.

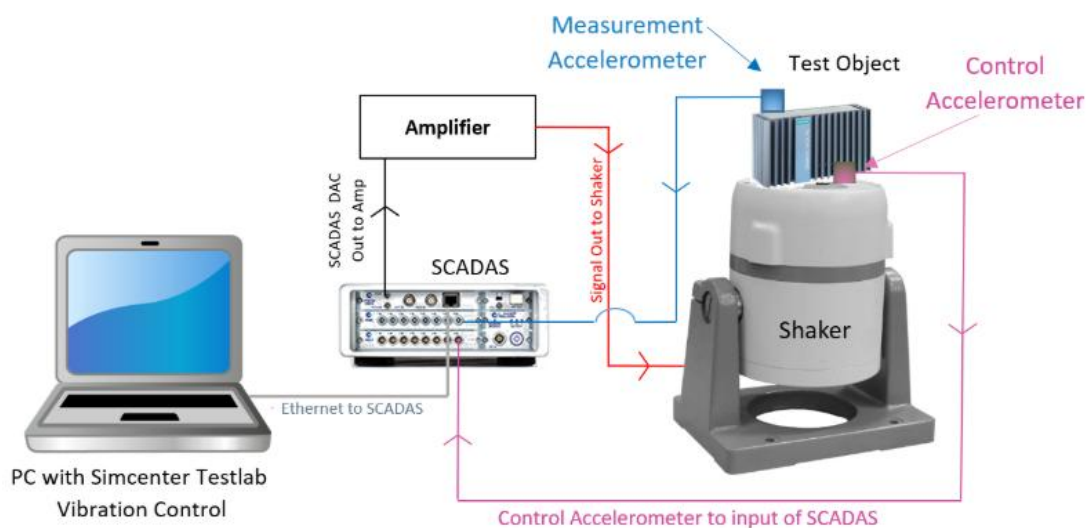


Figura 25-Configurazione per un test di controllo delle vibrazioni Tracked Sine Dwell

Durante la prova, l'eccitazione sinusoidale viene continuamente adattata alla frequenza naturale del componente in esame. Il test viene condotto per un intervallo temporale prefissato oppure fino al raggiungimento di un determinato numero di cicli.

Nella modalità di prova Tracked Sine Dwell vengono regolati e mantenuti sotto controllo sia l'ampiezza sia la frequenza del segnale di eccitazione. Con il progredire del danneggiamento a

fatica o in presenza di variazioni termiche, la frequenza naturale del provino tende a modificarsi, generalmente mostrando una riduzione nel tempo; tale variazione viene rilevata dal sistema di controllo e compensata durante l'esecuzione della prova.

Esistono diverse tecniche per il tracciamento della frequenza naturale di un sistema; tra le più diffuse vi è il monitoraggio della variazione dell'angolo di fase nella funzione di risposta in frequenza (FRF) tra l'accelerometro di controllo e quello di misura. Nel caso di un sistema semplice a un grado di libertà (Single Degree of Freedom, SDOF) soggetto a eccitazione di base, la condizione di risonanza è associata a uno sfasamento di 90° tra il segnale di ingresso e la risposta del sistema e la frequenza di risonanza è definita come $\omega_n = \sqrt{k/m}$. Per frequenze inferiori a quella naturale, lo sfasamento tende a 0° , mentre per frequenze superiori si avvicina a 180° . Sfruttando tale comportamento, il software Tracked Sine Dwell utilizza l'angolo di fase come parametro di riferimento per adattare in modo continuo la frequenza del segnale sinusoidale di eccitazione, al fine di mantenere il Device Under Test (DUT) in prossimità della risonanza. Ciò è possibile poiché, sebbene la frequenza di risonanza possa variare nel tempo a causa del danneggiamento o di effetti termici, l'angolo di fase caratteristico della risonanza rimane sostanzialmente invariato.

È tuttavia opportuno osservare che le strutture reali, caratterizzate da una dinamica più complessa, raramente mostrano un andamento ideale riconducibile a un modello SDOF. A differenza di un sistema a un solo grado di libertà, che presenta un'unica frequenza di risonanza ben definita, le strutture complesse possono esibire più risonanze ravvicinate, con conseguenti variazioni dell'angolo di fase in corrispondenza di ciascun picco modale.

Il procedimento operativo alla base di una prova di tipo Tracked Sine Dwell può essere riassunto come segue:

- Calcolo preliminare della funzione di risposta in frequenza (FRF) del DUT montato sullo shaker, generalmente mediante una prova swept sine, al fine di individuare le frequenze di risonanza e i corrispondenti angoli di fase.
- Definizione di una tabella di dwell contenente le frequenze di risonanza identificate e i relativi valori di fase.
- Assegnazione, per ciascun punto di permanenza, dei livelli di ampiezza e della durata della prova.

- Impostazione di limiti di frequenza superiore e inferiore attorno alla frequenza di risonanza di riferimento, oltre i quali il tracciamento non viene eseguito.

In particolare, il limite inferiore di frequenza è generalmente associato a una condizione di danneggiamento del DUT sufficiente a soddisfare i criteri richiesti dalle prove di fatica ad alto numero di cicli (High Cycle Fatigue, HCF).

Accelerometro come sensore e massa aggiuntiva

L'accelerometro è uno strumento utilizzato per misurare lo spostamento della punta del provino e ricavare tramite analisi FEM lo stato di stress, che in questo specifico caso svolge anche una funzione di massa aggiuntiva.

Pur essendo strumentale, la sua massa non è trascurabile rispetto a quella del provino e altera localmente il comportamento dinamico del sistema. In particolare, introducendo un carico aggiuntivo, modifica la distribuzione delle forze inerziali durante il moto vibrazionale, incrementando il momento flettente e alterando le deformazioni, soprattutto nella zona adiacente al punto di applicazione. In questo modo, l'accelerometro influisce non solo sulla misura, ma anche sulla risposta strutturale del provino, interagendo con la massa del sistema e con le sue frequenze naturali. Nelle analisi numeriche verrà simulata l'aggiunta di questa massa e se ne studierà l'effetto.

Valutazione di ampiezza di accelerazione e Failure Index

Una volta individuata la frequenza di risonanza del sistema e definita quindi la frequenza del segnale di eccitazione in ingresso, è necessario stabilire l'ampiezza dell'onda sinusoidale applicata. Ai fini della determinazione della curva sforzo-numero di cicli (curva S-N), per ciascuna serie di provini vengono imposti differenti livelli di ampiezza dell'eccitazione, in modo da ottenere diversi livelli di carico e, conseguentemente, differenti condizioni di sollecitazione a fatica.

A questo stadio della progettazione sperimentale risulta utile introdurre il concetto di Failure Index (FI), che sarà approfondito successivamente. Il FI è un parametro numerico che quantifica quanto un materiale sia vicino al punto di rottura sotto uno stato di sollecitazione specifico, confrontando le sollecitazioni effettive con quelle massime ammissibili dal materiale.

La scelta dell'ampiezza dell'eccitazione viene effettuata facendo riferimento al FI, che attraverso una simulazione numerica basata sul metodo degli elementi finiti, viene calcolato in

ogni punto o elemento del modello, fornendo così una mappa puntuale del rischio di cedimento lungo l'intera struttura. Ai fini del test non è possibile partire da un FI superiore a 1, poiché la lamina risulterebbe già in condizione di cedimento al primo ciclo, rendendo la simulazione priva di significato. Allo stesso tempo, scegliere un FI troppo basso renderebbe la struttura eccessivamente conservativa, prolungando la simulazione senza fornire informazioni aggiuntive utili. Questo permette di stimare in maniera preliminare la durata della prova e quindi di scegliere in maniera più consapevole i valori di accelerazione a cui svolgere i test.

3.2.3 Fasi successive al test

Determinate analisi dovranno essere svolte a seguito del test di vibrazione, al fine di ottenere le informazioni necessarie alla costruzione della curva di interesse.

Determinazione della tensione equivalente

Lo stress equivalente verrà ricavato tramite analisi FEM, svolta con i valori di accelerazione ricavati dall'accelerometro di misura, posizionato all'estremo libero del provino. Questi rappresentano i valori di accelerazione effettivi a cui è stato sottoposto ciclicamente il materiale durante i test, che restituiranno quindi il valore effettivo di tensione applicato.

Valutazione del punto di rottura

Si analizzerà se la frattura è avvenuta nella zona prevista come più sollecitata dal momento flettente o se altri fattori hanno contribuito alla rottura. Questa valutazione sarà inoltre utile a validare il modello numerico utilizzato per lo studio preliminare del test.

Determinazione del numero di cicli fino alla rottura

Grazie ai dati estratti dalla prova sperimentale sarà possibile ricavare per ogni provino il numero di cicli che ha portato i provini alla failure e quindi, tramite l'integrazione di questi dati con quelli ricavati dal modello FEM, la costruzione delle curve di fatica del materiale.

3.3 Studio teorico della soluzione

La progettazione delle prove si basa su alcuni concetti teorici fondamentali, che è stato necessario studiare per condurre in maniera corretta i test di vibrazione e per la corretta interpretazione dei risultati.

In particolare, la teoria della trave a sbalzo (cantilever) è utile per identificare i punti più sollecitati lungo il provino e per avere un riferimento sulle sollecitazioni attese durante il test. La conoscenza dei modi di vibrare della trave e quindi della sua risonanza, sia nel caso di provino libero sia con masse aggiuntive, permette di scegliere le condizioni di eccitazione più critiche, considerando che le variazioni della lunghezza del provino influenzano significativamente la risposta dinamica.

L'inerzia e lo smorzamento del sistema sono fattori ulteriormente importanti, in quanto determinano la risposta effettiva della struttura alle vibrazioni e la dissipazione di energia durante il ciclo di carico.

Infine, per lo studio di fatica, la conoscenza delle curve S-N risulta fondamentale.

Nei paragrafi successivi verranno approfonditi questi concetti, in maniera tale da fornire gli strumenti necessari per comprendere il comportamento dei provini sotto vibrazione e le modalità di danneggiamento.

3.3.1 Piastra di Kirchhoff

Il provino è vincolato con una configurazione tipica a mensola (cantilever), che si analizza al fine di comprendere la distribuzione delle tensioni e ipotizzare il punto e il momento di rottura.

Si considera una piastra sottile ($h/l < 1/20$) di materiale isotropo e omogeneo, che si flette sotto l'azione di un carico laterale manifestando piccoli spostamenti ($w_{max} < 0.75 h$) [16].

Nel caso di piastra costituita da N strati [17]:

- gli strati vengono numerati da 1 a N nel verso positivo dell'asse z;
- si adotta una notazione che usa l'apice (k) quando una particolare grandezza è associata allo strato k-esimo.

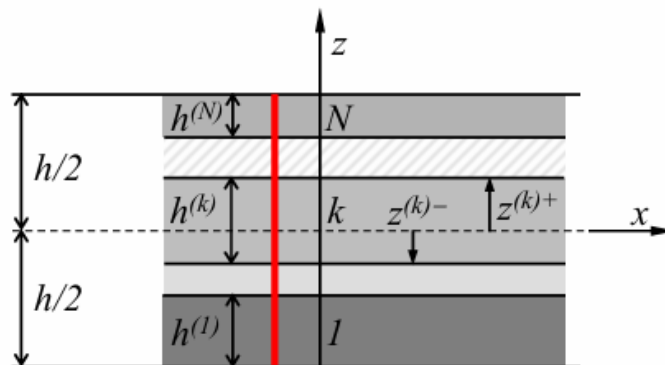


Figura 26-Notazione strati composito multistrato

Si considera una piastra costituita da N strati ($N \geq 1$) e con le seguenti proprietà:

- ciascuno strato ha spessore uniforme;
- ciascuno strato è isotropo o ortotropo (in quest'ultimo caso, l'asse 3 di ortotropia coincide con la direzione del segmento di spessore) e comunque omogeneo al suo interno;
- gli strati sono perfettamente incollati tra di loro (ipotesi continuità spostamenti e tensioni tangenziali all'interfaccia);
- gli spostamenti sono piccoli rispetto allo spessore totale (ipotesi piccoli spostamenti);
- le deformazioni sono piccole rispetto all'unità (ipotesi piccole deformazioni);
- il comportamento del materiale di ogni strato è lineare elastico.

La superficie di riferimento è la superficie media del laminato, coincidente con il piano (x, y) , luogo dei punti aventi $z = 0$.

Geometria e sistema di riferimento

Si considera una piastra rettangolare di Kirchhoff con laminazione simmetrica, in cui tutti gli strati sono orientati a 0° lungo l'asse x . La piastra ha lunghezza L , larghezza b e spessore h , con $L \gg b \gg h$.

Si introduce un sistema di riferimento con:

- asse x lungo la lunghezza;
- asse y lungo la larghezza;
- asse z lungo lo spessore, diretto verso l'alto;
- piano medio nel piano xy ($z = 0$).

Per una sezione rettangolare simmetrica, l'asse neutro in flessione coincide con il baricentro della sezione e quindi con il piano $z = 0$.

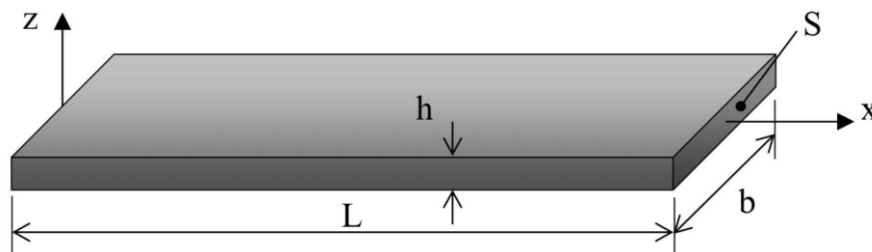


Figura 27-Schema del piano della piastra

Ipotesi della teoria della piastra di Kirchhoff

La teoria della piastra di Kirchhoff si caratterizza per tre fondamentali ipotesi cinematiche e per una assunzione sullo stato di tensione e una sul campo degli spostamenti.

Ipotesi cinematiche:

- i segmenti di spessore, inizialmente rettilinei, rimangono tali a deformazione avvenuta;
- i segmenti di spessore mantengono invariata la loro lunghezza a deformazione avvenuta ($\varepsilon_{zz} = 0$);
- i segmenti di spessore, inizialmente perpendicolari alla superficie di riferimento, lo sono ancora a deformazione avvenuta (non vi è deformazione a taglio fuori dal piano: $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$).

Stato tensionale:

- poiché $h \ll L$ la tensione normale σ_{zz} è trascurabile (stato di tensione piano generalizzato).

Campo degli spostamenti:

- le incognite cinematiche $u^{(0)}(x, y), v^{(0)}(x, y), w^{(0)}(x, y)$ dipendono solo dalle coordinate x e y .

Dalle ipotesi di Kirchhoff è possibile dire che non vi è deformazione di taglio fuori dal piano; Love aggiunge, per piastre sottili, che la tensione normale lungo lo spessore sia trascurabile. Questo permette di ridurre il problema a bidimensionale.

Ipotesi di flessione cilindrica

Si considera il caso di flessione cilindrica nel piano (x, z) , per cui la piastra si deforma solo lungo questo piano.

Per il caso di interesse si assume che:

- lo spostamento nel piano lungo y è nullo;
- i carichi applicati non generino stati tensionali nel piano (x, y) lungo la direzione individuata da y ;
- le tensioni saranno unicamente quelle relative alle direzioni (x, z) .

Sotto queste ipotesi il campo degli spostamenti fuori dal piano è ridotto a $w = w(x)$, quindi i momenti e i tagli lungo y sono nulli.

$$M_{yy} \approx 0, M_{xy} \approx 0, Q_y = 0$$

Ne consegue che l'unico momento significativo risulta M_{xx} .

Riduzione a problema 1D

Nella teoria di Kirchhoff il problema è bidimensionale, ma data l'ipotesi di flessione cilindrica il problema si riduce a monodimensionale, per cui:

$$M_{xx}(x) = M_x(x)$$

Per un laminato simmetrico, inoltre, la matrice di accoppiamento estensione-flessione è nulla ($B = 0$), per cui si considera pura flessione:

$$N = A \varepsilon_0 \text{ e } M = D k$$

Per ipotesi di pura flessione $\varepsilon_0 = 0$, quindi $N_{xx} = N_{yy} = N_{xy} = 0$, non sono presenti sforzi di membrana.

L'unica componente significativa è σ_{xx} , mentre σ_{yy} e τ_{xy} assumono un ruolo secondario, per cui l'elemento strutturale può essere modellato come una trave snella equivalente.

Per cui la rigidezza flessionale D della trave è [18]:

$$D = b \int_{-h/2}^{+h/2} E_x^{(k)} z^2 dz$$

Dall'equazione di equilibrio e dalle condizioni al contorno si può ricavare l'andamento della freccia $w^{(0)}(x)$; la tensione si calcola a partire dalla relativa deformazione:

$$\varepsilon_{xx}(x) = -zw_{,xx}^{(0)}(x)$$

$$\sigma_{xx}^{(k)}(x, z) = E_x^{(k)} \cdot \varepsilon_{xx}(x, z)$$

$$\sigma_{xx}^{(k)}(x, z) = -E_x^{(k)} \cdot zw_{,xx}^{(0)}(x)$$

Il massimo della tensione lungo x si ha dove la curvatura ($-w_{,xx}^{(0)}$) è massima e quindi dove è massimo il momento flettente, che risulta:

$$M = -Dw_{,xx}^{(0)}$$

Nel caso di una trave cantilever sottoposta a carichi trasversali, il momento flettente massimo è sempre localizzato in corrispondenza dell'incastro, mentre all'estremità libera il momento è nullo:

$$M(0) = M_{\max}$$

$$M(L) = 0$$

Di conseguenza, la sezione più sollecitata dal punto di vista tensionale è quella in prossimità dell'incastro, che risulta essere anche la più critica per l'innesco della rottura a fatica.

Effetto dell'eccitazione imposta dallo shaker

Durante la prova la trave non è soggetta a un carico statico ma a un'eccitazione dinamica imposta dal moto dello shaker. Questo applica alle posizioni vincolate del provino uno spostamento di tipo armonico che varia nel tempo:

$$w_{\text{base}}(t) = W_0 \sin(\omega t)$$

dove $w_{\text{base}}(t)$ è la legge di spostamento trasversale imposta dallo shaker al tempo t e W_0 è l'ampiezza massima dello spostamento.

Il vincolo cinematico imposto genera consequenzialmente al moto una deformazione flessionale lungo la trave.

La curvatura nel piano (x, z) è espressa da:

$$\kappa(x, t) = -w_{,xx}^{(0)}(x, t)$$

e lo stato tensionale in ciascuno strato k è determinato da:

$$\sigma_{xx}^{(k)}(x, z, t) = -E_x^{(k)} z w_{,xx}^{(0)}(x, t)$$

dove z è misurato a partire dal piano medio $z = 0$, che nel caso di sezione simmetrica coincide con l'asse neutro. Le fibre esterne ($z = \pm h/2$) subiscono in modo alternato trazione e compressione.

Si definisce lo sforzo alternato massimo, cioè l'ampiezza della tensione a cui le fibre esterne sono sottoposte durante il ciclo di vibrazione:

$$\sigma_{xx}^{(k)}(x, z) = E_x^{(k)} |z| |w_{,xx}^{(0)}|_{\text{max}}$$

Il massimo momento flettente si ha al massimo della curvatura:

$$M(x, t) = -D w_{,xx}^{(0)}(x, t)$$

Nel caso in cui la frequenza di eccitazione ω si avvicini alla frequenza naturale del primo modo della trave, l'ampiezza della risposta aumenta significativamente per effetto della risonanza, provocando incremento di $w^{(0)}(x, t)$, incremento della curvatura $\kappa(x, t)$, incremento dello sforzo alternato σ_a e conseguente riduzione del numero di cicli a rottura.

La sollecitazione massima, a seguito di queste considerazioni, si conferma in prossimità dell'incastro, dove si ottiene:

$$\sigma_{xx,\max}^{(k)} = \sigma_{xx}^{(k)}(x = 0, z = \pm h/2)$$

Inoltre, la tensione longitudinale lungo una trave flessa, varia linearmente aumentando con la distanza dall'asse neutro, dove è nulla. Nel caso di sezione simmetrica, dove l'asse neutro coincide col piano medio, sono le fibre più esterne, quindi quelle a $z = \pm h/2$ a subire la massima deformazione longitudinale e quindi la massima tensione. È quindi nelle fibre esterne in prossimità dell'incastro che vi è la maggiore probabilità di cedimento.

Effetto della massa concentrata all'estremità libera

La presenza di una massa concentrata m all'estremità libera del provino dal punto di vista meccanico aumenta l'inerzia del sistema, incrementa la deflessione all'estremo libero, riduce la frequenza naturale della trave e aumenta il momento flettente nella zona dell'incastro.

In condizioni dinamiche, la massa genera una forza inerziale proporzionale all'accelerazione dell'estremità libera:

$$F(t) = m \ddot{w}(L, t)$$

che si comporta come un carico concentrato oscillante in punta. Questo produce un contributo addizionale al momento flettente in corrispondenza dell'incastro:

$$M_{\text{incastro}}(t) = F(t) L$$

In questo caso lo stress alternato vicino all'incastro aumenta ulteriormente, confermando che questa zona rimane il punto più critico per l'innescio e la propagazione di cricche da fatica.

3.3.2 Analisi modale

Per comprendere pienamente la risposta dinamica della trave, risulta necessaria un'analisi modale. L'Analisi Modale, come riportato in [19], è una metodologia che studia il comportamento dinamico delle strutture sottoposte a vibrazioni, forzate o libere, cioè moti oscillatori con ampiezze ridotte rispetto alle dimensioni tipiche della struttura. Queste vibrazioni sono generalmente indotte da un input esterno, che può essere controllato o casuale, che si manifesta attraverso uno scambio continuo tra energia cinetica ed energia potenziale. L'ampiezza della vibrazione tende progressivamente a ridursi a causa dello smorzamento, fenomeno che conferisce alla struttura la capacità di dissipare parte dell'energia meccanica.

Con l'elaborazione dei dati acquisiti tramite algoritmi dedicati, si estraggono i parametri modali della struttura, quali:

- **frequenza naturale** (o pulsazione propria), che identifica le condizioni di vibrazione intrinseche della struttura;
- **forma modale** (o modo di vibrare), che descrive la distribuzione spaziale delle deformazioni associate a ciascun modo di vibrazione;
- **smorzamento modale** (o damping ratio), che caratterizza la dissipazione di energia nel sistema.

Un aspetto cruciale dell'analisi modale sperimentale è la determinazione della Funzione di Risposta in Frequenza (Frequency Response Function, FRF). La FRF descrive la relazione matematica tra la risposta della struttura in un determinato punto e l'eccitazione applicata nello stesso o in un altro punto, in funzione della frequenza della forzante. In una struttura complessa, le diverse funzioni di risposta vengono aggregate in una matrice FRF, che grazie alle proprietà di reciprocità del sistema risulta generalmente simmetrica.

I. Misura e stima della FRF

In pratica, la FRF è ottenuta come rapporto tra il segnale in uscita (risposta della struttura) e quello in ingresso (forzante applicata):

$$H_{i,j}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)}$$

dove $X_i(\omega)$ rappresenta l'output, cioè la deformazione della struttura ed è quindi uno spostamento e $F_j(\omega)$ la forzante di eccitazione applicata come input.

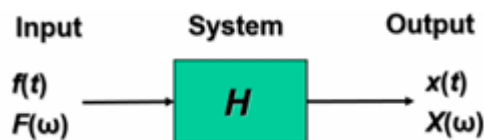


Figura 28-Schema Input-FRF-Output

Dal momento che la FRF in realtà rappresenta una stima, poiché è ricavata in modo indiretto dai segnali misurati di accelerazione, velocità o spostamento, occorre prestare attenzione alla propagazione degli errori durante l'elaborazione.

Per stimare la FRF vengono impiegati metodi basati sulle funzioni di autocorrelazione e

correlazione incrociata dei segnali di ingresso e uscita. Dato un segnale $x(t)$, la sua autocorrelazione $R_{xx}(\tau)$ è definita come:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t + \tau) dt$$

Indica quanto il segnale è correlato con se stesso.

La trasformata di Fourier di $R_{xx}(\tau)$ fornisce la densità spettrale di potenza (Power Spectral Density, PSD):

$$S_{xx}(\omega) = \mathcal{F}\{R_{xx}(\tau)\} = X(\omega)\bar{X}(\omega)$$

Analogamente, la correlazione incrociata di due segnali $x(t)$ e $y(t)$ è definita come:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t + \tau) dt$$

La trasformata di Fourier di $R_{xy}(\tau)$ produce la densità spettrale incrociata (Cross Spectral Density, CSD):

$$S_{xy}(\omega) = \mathcal{F}\{R_{xy}(\tau)\} = Y(\omega)\bar{X}(\omega)$$

A partire da questi spettri, è possibile stimare la FRF mediante diversi stimatori, i più comuni dei quali sono:

- *H1 FRF Estimator*, che minimizza l'effetto dei disturbi sull'uscita:

$$H_1(\omega) = \frac{S_{xf}(\omega)}{S_{ff}(\omega)}$$

- *H2 FRF estimator*, che riduce l'influenza dei disturbi sull'ingresso:

$$H_2(\omega) = \frac{S_{xx}(\omega)}{S_{fx}(\omega)}$$

In condizioni ideali, i risultati ottenuti con H1 e H2 devono coincidere.

II. Frequenza naturale

I problemi dinamici sono strettamente connessi alla determinazione delle frequenze naturali. Una piastra, nella quale si manifesta una deformazione iniziale con assegnata velocità, dopo la rimozione del carico inizia a oscillare liberamente nel senso trasversale.

Ogni struttura elastica possiede delle frequenze naturali, ossia valori di frequenza caratteristici ai quali il sistema tende a vibrare spontaneamente quando viene eccitato. Queste frequenze dipendono esclusivamente dalle proprietà fisiche della struttura, come rigidità, massa, geometria e condizioni al contorno. Quando un sistema viene eccitato alla propria frequenza naturale, si verifica il fenomeno della risonanza, caratterizzato da un significativo aumento dell'ampiezza della vibrazione.

L'analisi delle vibrazioni libere delle travi, come spiegato in [19], [20], [21] e [22] comporta la risoluzione dell'equazione dinamica omogenea sotto carico esterno nullo, ricavando le frequenze naturali e le forme modali che caratterizzano il comportamento oscillatorio non smorzato del sistema. Il processo inizia con l'assunzione di una soluzione separabile per lo spostamento trasversale:

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) q_n(t)$$

Dove $\phi_n(x)$ rappresenta la forma modale del n-esimo modo e $q_n(t)$ la corrispondente evoluzione temporale.

Sostituendo questa forma nella corrispondente equazione differenziale alle derivate parziali

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0$$

e dividendo per $\phi_n(x)q_n(t)$, si ottiene la separazione delle variabili:

$$\frac{EI \phi''''(x)}{\rho A \phi(x)} = -\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = \omega^2,$$

dove ω è la costante di separazione, ovvero la frequenza naturale.

L'equazione temporale

$$\ddot{T}(t) + \omega^2 T(t) = 0$$

fornisce soluzioni armoniche del tipo

$$T(t) = \cos(\omega t + \psi).$$

L'equazione differenziale ordinaria per la parte spaziale diventa

$$\phi''''(x) - \beta^4 \phi(x) = 0$$

$$\beta^4 = \frac{\rho A \omega^2}{EI}.$$

La soluzione generale di questa equazione del quarto ordine è

$$\phi(x) = A \cos(\beta x) + B \sin(\beta x) + C \cosh(\beta x) + D \sinh(\beta x),$$

dove le costanti A, B, C, D vengono determinate applicando le specifiche condizioni al contorno ai due estremi della trave.

Imponendo le condizioni al contorno su $\phi_n(x)$ e le sue derivate si genera un sistema omogeneo di quattro equazioni nelle incognite A, B, C, D . Tale sistema ammette soluzioni solo quando il determinante della matrice associata è nullo, ottenendo così l'equazione caratteristica (o equazione delle frequenze) che determina gli autovalori $\beta_n L$ (per una trave di lunghezza L) e quindi le frequenze naturali.

Considerando il modello trave, quindi per una trave omogenea, sezione costante, lunghezza L , modulo di Young E , momento d'inerzia I , densità ρ e area A , incastrata in un estremo e libera all'altro, la pulsazione naturale si determina nel seguente modo per ciascun modo n :

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}}$$

Da cui la frequenza naturale:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

Come si può vedere è il rapporto tra rigidità e massa a determinare le oscillazioni libere, $EI = k$ rappresenta la rigidità flessionale del sistema, $\rho A = m$ l'inerzia dinamica.

Sebbene il fenomeno della risonanza sia generalmente indesiderabile nelle strutture ingegneristiche poiché può amplificare pericolosamente le vibrazioni e compromettere l'integrità della struttura, nel caso in esame esso viene invece sfruttato intenzionalmente. In particolare, l'eccitazione dei provini alla loro frequenza naturale consente di amplificare la risposta dinamica e quindi di portarli a rottura più rapidamente, riducendo i tempi di prova e aumentando l'efficienza del processo sperimentale. Alla risonanza infatti una piccola forza genera grandi spostamenti e permette di amplificare la risposta e quindi di non dover applicare carichi eccessivi per arrivare a rottura.

È evidente come la **lunghezza della trave** influisca in maniera significativa sulla frequenza naturale. Travi più lunghe presentano frequenze più basse, poiché la loro rigidezza flessionale è ridotta e la struttura oppone meno resistenza alla deformazione, mentre travi più corte vibrano a frequenze più elevate, grazie a una maggiore rigidità complessiva. In particolare, i provini più lunghi, con frequenze naturali più basse, raggiungeranno deformazioni maggiori per lo stesso livello di eccitazione, in cui lo sforzo risulta diffuso lungo la trave. Al contrario, i provini più corti, con frequenze più elevate, presenteranno deformazioni più contenute ma più concentrate vicino al vincolo, modificando la distribuzione dello stress.

Variando la lunghezza dei provini, è quindi possibile studiare l'influenza della geometria sulla risposta dinamica e sulla localizzazione degli sforzi e confrontare come le diverse configurazioni influenzino l'evoluzione delle deformazioni e infine la rottura dei materiali.

Nel presente esperimento, oltre alle proprietà geometriche e materiali della trave, è necessario considerare anche la presenza di una **massa concentrata all'estremo libero**, corrispondente al peso degli accelerometri.

La presenza di una massa aggiuntiva all'estremità modifica le caratteristiche dinamiche della trave, in particolare la frequenza naturale del primo modo. In generale, l'aggiunta di massa abbassa la frequenza naturale, poiché il sistema risulta avere maggiore inerzia: la trave, mantenendo la stessa rigidezza flessionale, deve muovere una massa maggiore e questo rallenta le oscillazioni. Questo effetto è particolarmente evidente nel caso di travi a sbalzo, dove la massa concentrata si trova nella zona di massima escursione della deformata.

Allo stesso tempo, l'aumento della massa all'estremità comporta un incremento della curvatura della trave vicino all'incastro, perché la punta più pesante induce una deformazione maggiore sotto lo stesso momento flessionale, come spiegato in precedenza. Questo aspetto, sebbene modifichi leggermente la frequenza, può essere vantaggioso nell'esperimento, perché accentua lo stato di stress nella zona monitorata, facilitando lo studio della rottura dei provini.

In sintesi, considerare la massa concentrata non solo è necessario per correggere la frequenza di risonanza, ma permette anche di prevedere la distribuzione dello stress e della deformazione, garantendo una maggiore affidabilità e ripetibilità dei risultati sperimentali.

La frequenza naturale del primo modo per una trave cantilever con una massa aggiuntiva m può essere calcolata come [23]:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{(0.2235\rho L + m)L^3}}$$

La formula della rigidezza risulta:

$$K = \frac{3EI}{L^3} = (2\pi f_1)^2 (0.2235\rho L + m)$$

Nel caso del laminato in esame, eccitato prevalentemente in flessione, la diminuzione della prima frequenza naturale rappresenta l'avvenuta riduzione della rigidezza flessionale equivalente del laminato (matrice D, facendo riferimento alla CLT), cioè a una riduzione di EI_{eff} .

Quindi essendoci un rapporto di proporzionalità del tipo $f_1 \propto \sqrt{K}$, quando la prima frequenza naturale diminuisce del 10% si ottiene circa una diminuzione della rigidezza del 20%.

Molti studi, tra cui quello di Barbero e Cortes [24], che tratta l'insorgere del danno, lo correlano alla riduzione della rigidezza stessa del laminato composito. Come citato in [25] una diminuzione della frequenza di risonanza nella risposta in frequenza del 3-5% può essere considerata come fallimento da fatica da vibrazione.

Il degrado della rigidezza [26] viene definito come la riduzione della rigidezza di una struttura sottoposta a cicli di carico e scarico, e funge da indicatore esterno del danneggiamento strutturale. Nei laminati compositi rinforzati con fibre (FRC) sottoposti a carichi continui o ciclici, questo comportamento rappresenta un'indicazione importante dell'evoluzione del danno e della rottura dei laminati compositi e l'analisi corrispondente è chiamata "analisi di rottura progressiva" [27].

In questo elaborato sarà considerato come inizio del danno una riduzione della rigidezza circa del 20% causata da una diminuzione della prima frequenza naturale del 10%, per esplorare un range più ampio.

III. Forma modale

La **deformata** di una trave o di un provino è la forma che assume la struttura quando viene caricata o messa in vibrazione. Se la trave è eccitata in vibrazione libera, la deformata cambia continuamente nel tempo, ma ogni modo di vibrazione ha una deformata caratteristica, chiamata forma modale. La deformata esprime come e quanto si piega la trave, punto per punto lungo la lunghezza.

La trave a sbalzo presenta un'estremità incastrata e un'estremità libera, le relative condizioni al contorno sono:

- estremità incastrata $x = 0$:

$$w(0, t) = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial x}(0, t) = 0;$$

- estremità libera $x = L$:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(L, t) = 0 \quad \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}(L, t) = 0,$$

che esprimono l'annullamento del momento flettente e del taglio.

Applicando tali condizioni alla soluzione generale della vibrazione libera, si ottiene l'equazione caratteristica:

$$\cos(\beta L) \cosh(\beta L) = -1,$$

dove

$$\beta^4 = \frac{\rho A \omega^2}{EI}.$$

L'equazione trascendentale possiede infinite radici $\beta_n L$; le prime sono approssimativamente:

- 1,875104 per $n = 1$,
- 4,694091 per $n = 2$,
- 7,854757 per $n = 3$;
- per modi di ordine superiore ($n \geq 4$) vale approssimativamente:

$$\beta_n L \approx \frac{(2n - 1)\pi}{2}$$

Le corrispondenti frequenze naturali sono:

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}}$$

Le forme modali sono:

$$\phi_n(x) = \cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x) - \sigma_n [\sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x)]$$

con

$$\sigma_n = \frac{\cosh(\beta_n L) + \cos(\beta_n L)}{\sinh(\beta_n L) + \sin(\beta_n L)}$$

Tali funzioni vengono spesso normalizzate in modo che

$$\int_0^L \phi_n^2(x) dx = L$$

come richiesto per l'ortogonalità nell'analisi modale.

Dal punto di vista fisico, la forma del primo modo mostra una curvatura regolare con massima deflessione all'estremità libera e assenza di nodi lungo la trave. Un nodo è un punto lungo la struttura dove lo spostamento trasversale è sempre zero durante la vibrazione. I modi superiori introducono nodi addizionali (uno nel secondo modo, due nel terzo), con deformate che presentano oscillazioni crescenti e gradienti più ripidi vicino all'incastro, il tutto governato dalla flessione pura senza effetti di taglio o inerzia rotazionale [28].

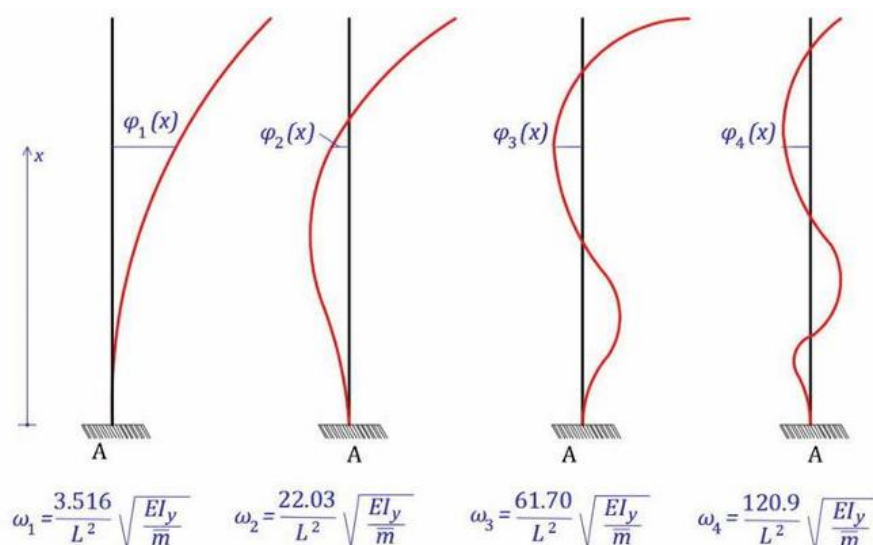


Figura 29-Frequenza naturale in base al modo di vibrare

Nel presente esperimento, ciascun provino sarà eccitato alla frequenza del primo modo di vibrazione, poiché il primo modo presenta una forma modale semplice, senza nodi interni, con deformazione massima localizzata vicino all'incastro. L'eccitazione a questa frequenza consente di ottenere ampiezze elevate e concentrate, facilitando il monitoraggio dello stato di stress e garantendo una maggiore prevedibilità della rottura, mentre eccitare frequenze più alte comporterebbe l'insorgenza di nodalizzazione multipla, deformate complesse e punti critici difficili da controllare, rendendo l'esperimento meno affidabile.

IV. Smorzamento modale

Lo smorzamento rappresenta la capacità di un sistema vibrante di dissipare energia durante l'oscillazione: esso determina la velocità con cui l'ampiezza delle vibrazioni decresce nel tempo [29], per questo riveste un ruolo fondamentale nella descrizione della risposta dinamica dei provini.

Nei sistemi reali è presente uno smorzamento intrinseco, che determina una riduzione progressiva dell'ampiezza delle oscillazioni nel tempo in assenza di forze esterne. Nel caso di smorzamento viscoso, tale effetto dissipativo si manifesta tramite una forza F opposta al moto e proporzionale alla velocità $\dot{x}$ del corpo [30]:

$$F = -\beta\dot{x}$$

La frequenza naturale regola il ritmo dell'oscillazione, mentre il **fattore di smorzamento** ζ definisce la rapidità con cui l'energia vibratoria si dissipa.

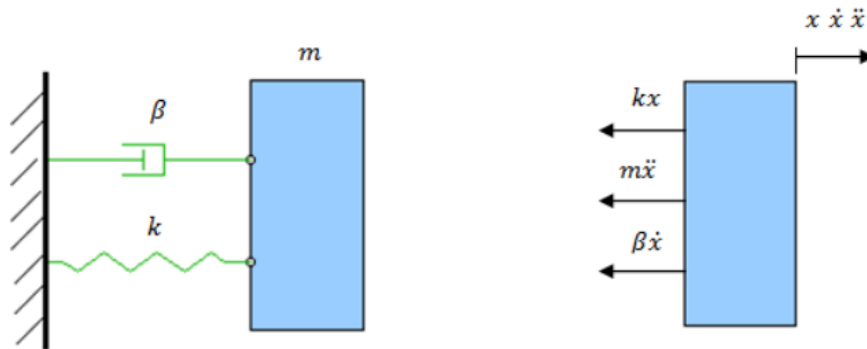


Figura 30-Sistema libero smorzato ad un grado di libertà

Per descrivere il comportamento di un sistema armonico smorzato si considera la seguente equazione differenziale:

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + kx = 0$$

dove m rappresenta la massa della trave, k la rigidità flessionale e β il coefficiente di smorzamento equivalente del materiale composito.

La frequenza smorzata ω_d è definita come:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$\text{con } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{e} \quad \zeta = \frac{\beta}{2\sqrt{km}}$$

dove ω_n è la frequenza naturale non smorzata e ζ il fattore di smorzamento relativo.

Sostituendo nell'equazione del moto otteniamo:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2 = 0$$

Le radici dell'equazione caratteristica sono:

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

Di conseguenza, la risposta generale del sistema può essere espressa come combinazione lineare delle soluzioni:

$$x(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}$$

A seconda del valore del fattore di smorzamento ζ , il sistema si classifica come:

- $\zeta > 1$: sovrasmorzato, il sistema ritorna all'equilibrio senza oscillazioni;
- $\zeta = 1$: criticamente smorzato, il sistema ritorna all'equilibrio nel minor tempo possibile senza oscillare;
- $\zeta < 1$: sottosmorzato, il sistema oscilla con ampiezza decrescente nel tempo.

Nei materiali compositi, il coefficiente β può essere visto come una combinazione dei contributi della matrice e delle fibre:

$$\beta \approx \beta_{\text{epossidica}} + \beta_{\text{fibra}}$$

- $\beta_{\text{epossidica}}$ rappresenta la dissipazione energetica dovuta al comportamento viscoelastico della matrice polimerica;
- β_{fibra} rappresenta il contributo delle fibre aramidiche, generalmente molto basso ma non trascurabile in presenza di micro-deformazioni o interfacce tra fibra e matrice.

Nei provini eccitati alla frequenza del primo modo, la trave oscilla secondo la sua forma modale caratteristica. La lunghezza del provino influisce indirettamente sullo smorzamento osservato: travi più lunghe hanno frequenze più basse e, per lo stesso fattore ζ , la riduzione relativa dell'ampiezza per ciclo risulta più rapida.

L'analisi in frequenza della risposta del provino permette di osservare la curva di risonanza corrispondente al primo modo. Un picco largo indica uno smorzamento elevato, in quanto le oscillazioni si attenuano rapidamente, mentre un picco stretto corrisponde a smorzamento basso. La relazione tra la larghezza del picco Δf e lo smorzamento relativo ζ è data da:

$$\zeta \approx \frac{\Delta f}{2f_n}$$

Durante le simulazioni con il software si è ipotizzato uno smorzamento del 2%; solo durante il test potrà essere misurato in maniera più accurata tramite analisi in frequenza (FRF), in cui sarà possibile osservare la larghezza del picco di risonanza.

3.3.3 Analisi inerziale

L'analisi inerziale consiste nello studio della risposta di una struttura soggetta a forze in funzione della sua massa e distribuzione di massa, i cui parametri fondamentali sono il baricentro, il momento d'inerzia, le rigidezze e le frequenze naturali.

L'analisi inerziale è necessaria al fine di valutare la reazione della struttura ad un carico statico, poiché permette di identificare i punti maggiormente sollecitati. Si considera infatti la massa concentrata come un carico statico equivalente $P = mg$.

Quando non agiscono forze esterne il sistema si trova in una posizione di equilibrio statico in cui la lamina presenta una flessione proporzionale alla posizione della massa.

Nel caso considerato P rappresenta il peso della massa, L_1 la distanza tra il baricentro della massa e il punto di incastro, L indica la lunghezza della parte della lamina libera dall'incastro [28].

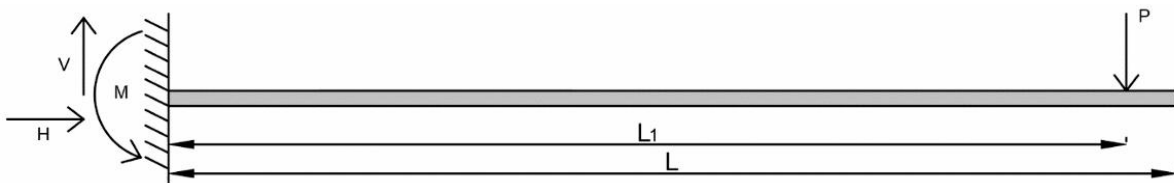


Figura 31-Configurazione statica

Per l'equilibrio statico si scrive:

$$\begin{cases} V = P \\ H = 0 \\ M = P \cdot L_1 \end{cases}$$

Si introduce un sistema di riferimento Oxz con origine nell'incastro della trave, in cui l'asse x segue la direzione della lunghezza della trave e l'asse z è orientato verso il basso lungo la direzione della deflessione. La curva elastica della trave, indicata come $z(x)$, può essere determinata integrando due volte l'equazione differenziale che collega il momento flettente alla curvatura della sezione trasversale:

$$EJ \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = -M(x)$$

dove:

- $M(x)$ è il momento flettente lungo l'asse longitudinale x ;
- E rappresenta il modulo elastico del materiale;
- J è il momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse neutro.

Per la trave caricata con una massa concentrata all'estremità libera, il momento flettente può essere espresso come funzione a tratti:

$$M(x) = \begin{cases} -PL_1 + Px & 0 \leq x < L_1 \\ 0 & L_1 \leq x \leq L \end{cases}$$

In questo caso, il sistema richiede quattro costanti di integrazione: due per il tratto tra l'incastro e la massa ($0 \leq x < L_1$) e due per il tratto tra la massa e l'estremità libera ($L_1 \leq x \leq L$). Queste costanti sono determinate imponendo le condizioni al contorno, che garantiscono lo spostamento e la rotazione nulli all'incastro e la continuità della deflessione e della pendenza tra i due tratti della trave:

$$z_I(x=0)=0$$

$$\frac{dz_I}{dx}(x=0) = 0$$

$$z_I(x=L_1) = z_{II}(x=L_1)$$

$$\frac{dz_I}{dx}(x=L_1) = \frac{dz_{II}}{dx}(x=L_1)$$

dove il pedice I indica il primo tratto della trave ($0 \leq x < L_1$) e il pedice II il secondo tratto ($L_1 \leq x \leq L$).

Integrando due volte l'equazione differenziale del momento flettente e applicando le condizioni al contorno si ottiene l'espressione della linea elastica $z(x)$:

$$z(x) = \begin{cases} \frac{3PL_1x^2 - Px^3}{6EJ} & 0 \leq x < L_1 \\ \frac{1}{EJ} \left[\frac{PL_1^2}{2} (x - L_1)^2 + \frac{PL_1^3}{3} \right] & L_1 \leq x \leq L \end{cases}$$

Questa formulazione descrive la deformata della trave in funzione della posizione x lungo la lunghezza, tenendo conto sia della porzione compresa tra l'incastro e la massa, sia della porzione tra la massa e l'estremità libera.

Teorie del fallimento

L'analisi inerziale permette di determinare le tensioni e le deformazioni nei punti più sollecitati di una struttura, fornendo i dati necessari per applicare le teorie del fallimento e calcolare il Failure Index, così da valutare se e dove il composito raggiunge il cedimento.

L'analisi del cedimento inizia con la valutazione del danno di una singola lamina, tramite l'identificazione della modalità di rottura in un composito monodirezionale, sottoposto a uno stato tensionale complesso. I criteri di fallimento sono tipicamente di tipo fenomenologico, fondati sulla micromeccanica. La maggior parte dei modelli si basa su ipotesi di comportamento elastico lineare, dato che la plasticizzazione riguarda esclusivamente la matrice.

Le teorie del fallimento, secondo [31], si distinguono in:

- teorie del massimo sforzo e della massima deformazione;
- teorie interattive (Tsai-Hill, Tsai-Wu);
- teorie parzialmente interattive (Hashin, Puck).

In generale, a ciascun criterio di cedimento corrisponde uno o più **Failure Index (FI)**, che rappresentano un criterio di cedimento di tipo fenomenologico, cioè indicano solamente l'avvenimento di un cedimento, senza specificarne la modalità.

Un FI che supera il valore unitario indica che, secondo il criterio applicato, il cedimento si verifica [32].

I. Teorie del massimo sforzo e della massima deformazione

Questi criteri appartengono al primo gruppo dei criteri di cedimento, cioè quelli che non considerano alcuna interazione tra le diverse componenti di sforzo.

In un sistema di riferimento cartesiano materiale, in cui la direzione 1 coincide con quella delle fibre, il cedimento nella teoria del **massimo sforzo**, avviene se almeno una delle seguenti condizioni è soddisfatta:

- $\sigma_{11} \geq X_t$ oppure $\sigma_{11} \leq -X_c$
- $\sigma_{22} \geq Y_t$ oppure $\sigma_{22} \leq -Y_c$
- $\tau_{12} \geq S$

Si utilizza la seguente notazione all'interno delle espressioni:

- σ_{11} e σ_{22} sono le tensioni normali nel piano;
- τ_{12} è la tensione di taglio nel piano;
- X_t, X_c sono le resistenze longitudinali (direzione fibra) a trazione e compressione;
- Y_t, Y_c sono le resistenze trasversali a trazione e compressione;
- S è la resistenza a taglio longitudinale.

Il Failure Index è definito come:

$$FI = \max \left[\frac{\sigma_{11}}{X}, \frac{\sigma_{22}}{Y}, \frac{\tau_{12}}{S} \right]$$

con $X = X_t$ oppure $X = X_c$ a seconda che $\sigma_{11} \geq 0$ oppure $\sigma_{11} < 0$; lo stesso vale per la resistenza trasversale a trazione e compressione.

Il criterio delle **deformazioni massime** si ottiene analogamente, sostituendo alle tensioni le deformazioni corrispondenti.

Una volta ottenuto il FI, il carico di cedimento L_F è $L_F = k \cdot L$, dove L è il carico applicato e $k = \frac{1}{FI}$.

II. Teoria interattiva di Tsai-Hill

Il criterio di Tsai-Hill (T-H) è un modello fenomenologico di cedimento, sviluppato come ampliamento del criterio di Von Mises per materiali con comportamento anisotropo. È basato sull'energia distorsionale e per questo è un criterio **interattivo**, cioè considera l'effetto dello sforzo di taglio nel piano; la lamina raggiunge la rottura quando l'energia di distorsione supera il valore limite previsto. Il cedimento si verifica quindi nel momento in cui risulta non soddisfatta la seguente disuguaglianza:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 < 1$$

dove σ_{11} , σ_{22} e τ_{12} rappresentano le tensioni principali nel sistema. Questo criterio considera l'interazione tra le tensioni nel riferimento principale, risulta quindi più conservativo e più in linea con i dati sperimentali.

Con $X = X_t$ oppure $X = X_c$ a seconda che $\sigma_{11} \geq 0$ oppure $\sigma_{11} < 0$; lo stesso vale per la resistenza trasversale a trazione e compressione.

Il carico critico è ancora dato da $L_F = k \cdot L$, ma ora $k = \frac{1}{\sqrt{FI}}$, perché il failure index è di tipo quadratico.

III. Teoria interattiva di Tsai-Wu

Il criterio di Tsai-Hill è stato esteso al criterio di Tsai-Wu per tenere conto delle interazioni tra le sollecitazioni e le resistenze nelle direzioni della fibra e della matrice. Questo criterio polinomiale avanzato considera anche le differenze di comportamento dei materiali sotto trazione e compressione.

Il criterio di Tsai-Wu non deriva da un modello fisico, ma si adatta ai risultati sperimentali. È un criterio interattivo che tiene conto delle tensioni di taglio nel piano.

La condizione di cedimento è:

$$A_{11}\sigma_{11}^2 + 2A_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + A_{22}\sigma_{22}^2 + A_{66}\tau_{12}^2 + B_1\sigma_{11} + B_2\sigma_{22} \geq 1$$

Dove il primo termine della disequazione rappresenta il Failure Index secondo Tsai-Wu, mentre gli altri termini sono i parametri di Tsai-Wu, le cui espressioni sono riportate nella seguente tabella.

Tsai-Wu parameters	
A_{11}	$\frac{1}{X^T X^C}$
A_{22}	$-\frac{1}{2\sqrt{X^T X^C Y^T Y^C}}$
A_{12}	$\frac{1}{Y^T Y^C}$
A_{66}	$\frac{1}{S^T S^C}$
B_1	$\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C}$
B_2	$\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C}$

Tabella 4-Tsai-WU parameters

Il carico di cedimento è dato da $L_F = k \cdot L$, dove k si ottiene da:

$$k = \min \left(\frac{2}{\pm B_1 \sigma_{11} \pm B_2 \sigma_{22} + \sqrt{(4A_{11} + B_1^2) \sigma_{11}^2 + 2(4A_{12} + B_1 B_2) \sigma_{11} \sigma_{22} + (4A_{22} + B_2^2) \sigma_{22}^2 + 4A_{66} \tau_{12}^2}} \right)$$

3.3.4 Approccio Stress-Life

L'approccio stress-life rappresenta il metodo classico di analisi della fatica per lo svolgimento di analisi di HCF (High-Cycles Fatigue) [33]. Questo approccio si basa sull'ipotesi che tutte le tensioni agenti sul componente restino sempre inferiori a un determinato valore, detto limite elastico. La resistenza alla fatica viene espressa attraverso una curva S-N, che riporta sull'asse delle ordinate la sollecitazione S e sulle ascisse il numero di cicli N. I valori riportati sono ricavati applicando vari livelli di sollecitazione ciclica al componente e misurando in seguito il numero di cicli che ha portato a rottura il componente in esame.

In letteratura si hanno a disposizione molte curve S-N dei metalli, diversamente dai compositi a causa della loro complessità. Diversi studi, uno tra i quali svolto su compositi in matrice epossidica [34], mostra come sia presente una grande dispersione sul numero di cicli ricavato da test di fatica svolti su questi ultimi.

Le curve possono essere lineari, come nella figura 32 oppure bilineari in scala logaritmica, come riportato nella figura 33. Da osservare che la maggior parte dei compositi non presenta un limite di fatica.

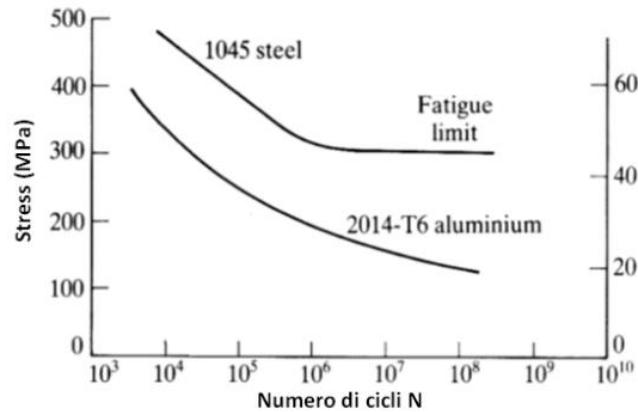


Figura 32-Curva S-N lineare

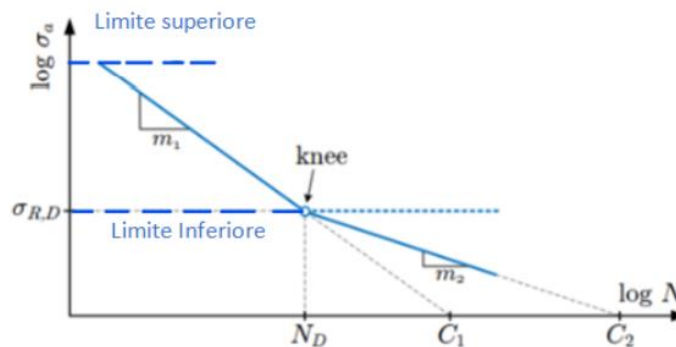


Figura 33-Curva S-N bilineare

Nella figura 33 si può osservare che nell'intorno dei $10^6 \div 10^7$ cicli la curva cambia la sua pendenza; questo punto viene chiamato ginocchio e a seconda del materiale la curva può assumere una forma piatta o diminuire con una pendenza inferiore.

La curva è delimitata da due estremi, quello superiore prende il nome di fatica oligociclica, rappresentando valori di sollecitazione vicini alla tensione di rottura per carico statico, per cui si ottengono numeri di cicli nell'intorno $10 \div 10^4$; quello inferiore rappresenta il limite di fatica, caratterizzato invece da bassi livelli di sollecitazioni che corrispondono a valori di $N > 10^8$. Il limite di fatica rappresenta la massima sollecitazione al di sotto della quale il materiale può essere considerato a vita infinita, vale a dire che non si verifica la rottura nemmeno dopo un numero molto elevato di cicli. Questo parametro è particolarmente significativo nel caso di carichi randomici, applicati un numero molto elevato di volte ma caratterizzati da ridotte variazioni della σ .

3.4 Strumentazione del test

Per lo svolgimento della prova di fatica vibrazionale sul provino composito è stata impiegata una strumentazione sperimentale appositamente progettata per garantire il corretto controllo delle sollecitazioni applicate e della misura della risposta dinamica del sistema.

Il set up del test è costituito da uno shaker, macchinario utilizzato per sollecitare i provini, da accelerometri, strumenti di misura per il raccoglimento dei dati e da una struttura di supporto, ideata per fissare i provini alla macchina.

Le piastre di supporto sono state modellate in CATIA V5 tenendo conto delle dimensioni del provino, della posizione dei sensori e delle modalità di fissaggio, al fine di ridurre al minimo gli effetti indesiderati, come giochi meccanici o deformazioni locali non controllate, per garantire la corretta installazione e il rispetto delle condizioni di vincolo studiate.

3.4.1 Shaker

La modalità di funzionamento di uno shaker [35] è analoga a quella di un altoparlante, alla base vi è una bobina di filo sospesa in un campo magnetico radiale fisso e quando la corrente attraversa la bobina, si genera una forza assiale che viene trasmessa a una tavola di carico a cui è fissato l'oggetto in prova.

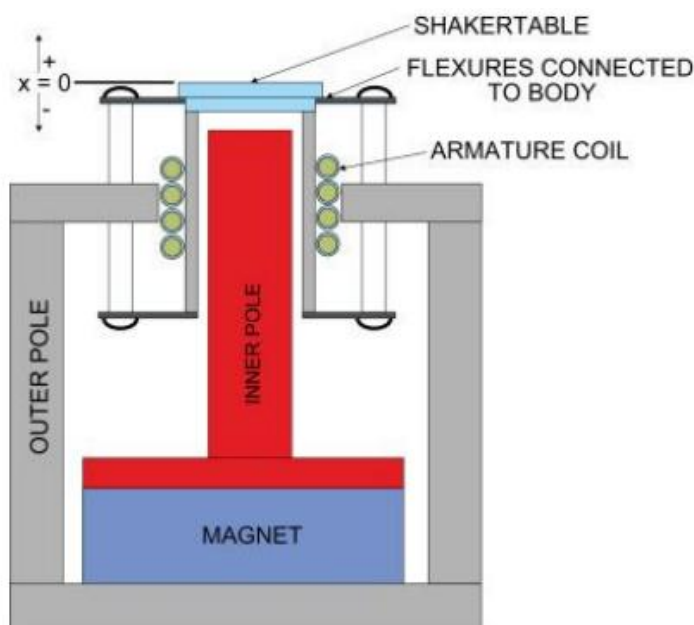


Figura 34-Schema di uno shaker

La forza F è proporzionale alla densità di flusso magnetico B , alla corrente i che scorre nella bobina e alla lunghezza l del filo:

$$F = B \times i \times l$$

L'armatura è costituita da bobina mobile e tavola di carico. Nelle armature moderne, la bobina è fissata alla struttura in magnesio della tavola di carico mediante colle epossidiche. L'armatura deve essere centrata correttamente tra l'inner pole e l'outer pole ed è sostenuta da un sistema di sospensione e guida. Questo collegamento tra armatura mobile e corpo fisso dello shaker forma un sistema a un grado di libertà molla/massa/smorzatore ($K_S/M_T + M_C/C_S$), in cui l'oggetto in prova e l'armatura si muovono insieme rispetto al corpo dello shaker.

Il modello meccanico completo dello shaker prevede altri due gradi di libertà poiché l'armatura non è rigida ma elastica, e viene modellata considerando l'avvolgimento (M_C) e la tavola di carico (M_T) come masse separate collegate da uno smorzatore (C_C) e da una molla (K_C). Inoltre, il corpo dello shaker è isolato in modo meccanico dal pavimento, la massa del corpo dello shaker (M_B) è collegata a terra tramite una molla (K_B) e uno smorzatore (C_B).

Il modello elettrico dello shaker tiene conto della resistenza e dell'induttanza della bobina. La resistenza R definisce l'impedenza minima ai morsetti di ingresso dello shaker; aumenta significativamente con la temperatura (la resistenza del filo di rame cresce di circa il 40% ogni 100 °C) e aumenta leggermente con la frequenza a causa dell'effetto pelle. L'induttanza L della bobina è elevata, poiché la bobina è fortemente accoppiata al ferro dei poli, generando un'impedenza elettrica complessa pari a $R + j\omega L$ che cresce con la frequenza.

Le interazioni tra i domini elettrico e meccanico non sono unidirezionali, infatti quando la bobina si muove nel campo magnetico, si genera in essa una tensione proporzionale alla velocità. Questo fenomeno (back EMF) appare elettricamente come un aumento dell'impedenza della bobina e trasmette l'attività meccanica al circuito elettrico.

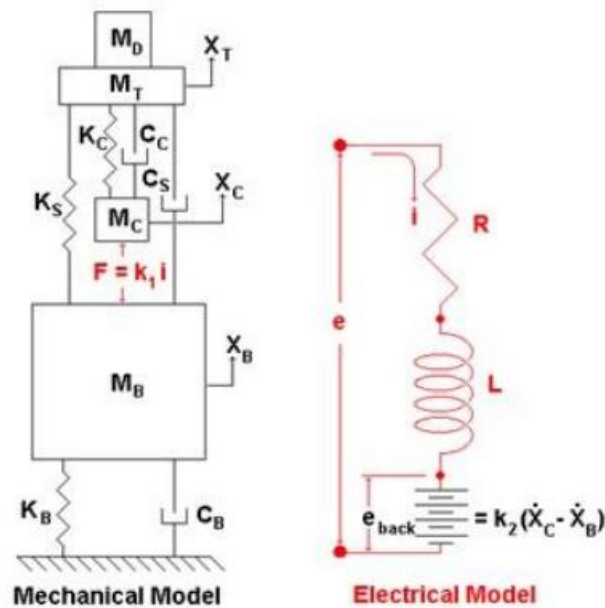


Figura 35-Schema elettrico e meccanico dello shaker

La risposta meccanica dello shaker è influenzata principalmente da tre modalità di vibrazione. A frequenze molto basse (spesso al di sotto dell'intervallo di utilizzo), l'isolamento meccanico permette all'intero shaker di traslare come un corpo rigido senza moto relativo tra le varie componenti; questo comportamento è noto come Modo di Isolamento.

Nella parte inferiore dell'intervallo operativo (tipicamente tra 10 e 40 Hz) prevale il Modo di Sospensione, in cui la tavola (blu) e la bobina (rossa) si muovono insieme rispetto al corpo dello shaker (giallo). Il movimento in questo intervallo è limitato dalla corsa massima.

Vicino o oltre il limite superiore di frequenza si manifesta il Modo di Bobina, indesiderato. In questa modalità la bobina si muove in controfase rispetto alla tavola di carico; sollecitazioni eccessive in tale condizione possono provocare danni allo shaker.

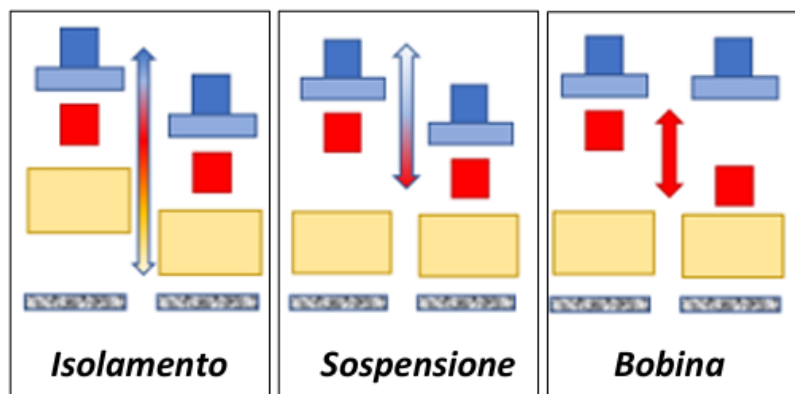


Figura 36-Modi di vibrare di uno shaker

Il sistema di prova utilizzato per questo studio si basa su uno shaker elettrodinamico medium-force, modello V875-440 di LDS, dotato di armatura da 440 mm di diametro e capace di generare forze sinusoidali fino a 35.6 kN, accelerazioni fino a circa 1080 m/s² e spostamenti pk-pk dell'ordine di 50.8 mm [36]. La gamma utile di frequenze va da DC fino a circa 3000 Hz, rendendolo adatto a test vibrazionali, shock, random e transitori. Il sistema è completato da un amplificatore SPA8-40K e da un sistema di sospensione montato su trunnion con isolamento aria, che consente prove affidabili anche a bassa frequenza. Il setup è compatibile con l'utilizzo di sensori (accelerometri, trasduttori di spostamento) e sistemi di acquisizione dati per analisi modale, test di fatica vibrazionale, FRF e controllo in tempo reale della vibrazione.



Figura 37-Shaker V875 440 di LDS

3.4.2 Accelerometri

Un accelerometro è un dispositivo in grado di misurare l'accelerazione, ossia la variazione di velocità di un oggetto rispetto a un sistema inerziale.

Normalmente, un accelerometro contiene una massa di prova (proof mass) sospesa su un elemento elastico (una molla ideale), con un eventuale smorzatore, e un sensore che rileva lo spostamento della massa quando l'accelerometro subisce un'accelerazione.

Quando l'accelerometro viene sottoposto a un'accelerazione, la massa interna subisce una forza data da $F = m \cdot a$. La deformazione della molla o lo spostamento della massa viene convertita in un segnale elettrico proporzionale, che viene acquisito e rappresenta il valore di accelerazione.

In base al tipo di sensore, per lo spostamento o per la forza, gli accelerometri possono avere principi costruttivi diversi (estensimetrici, piezoelettrici, piezoresistivi, MEMS, ecc.). Nel caso specifico si hanno a disposizione accelerometri piezoelettrici della PCB Piezotronics del modello 356B21 [37]. Gli accelerometri piezoelettrici impiegano come elemento sensibile cristalli naturali di quarzo oppure ceramiche policristalline artificiali. La massa di prova è accoppiata al cristallo e, quando durante un'accelerazione viene applicata una forza su di esso, viene generato un segnale di uscita. Questa forza provoca uno stato di stress nel cristallo, che a sua volta genera una carica elettrica proporzionale alla forza applicata, secondo l'effetto piezoelettrico. L'entità della forza è proporzionale all'accelerazione applicata. Gli accelerometri piezoelettrici non possono misurare accelerazioni costanti perché sono intrinsecamente accoppiati in AC; sono generalmente la scelta più versatile ed economica per la misura di accelerazioni transitorie rapide e periodiche.

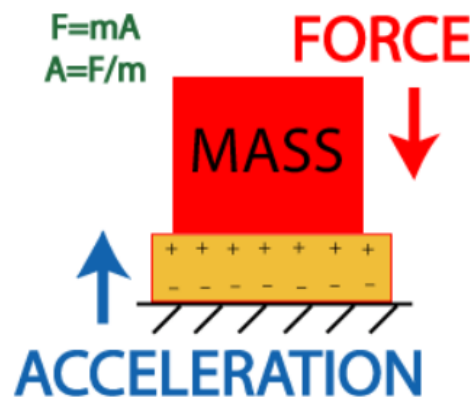


Figura 38-Schema accelerometro piezoelettrico

Il modello utilizzato nel test è un accelerometro triassiale, leggero e miniaturizzato, del tipo ICP® prodotto da PCB Piezotronics. Triassiale significa che racchiude tre elementi di misura ortogonali (tipicamente asse X, Y e Z), permettendo di acquisire simultaneamente le componenti di vibrazione in tre direzioni. Questo risulta utile per analisi strutturali, vibrazioni complesse e per comprendere il comportamento dinamico completo di un sistema. ICP® significa che il sensore è dotato di elettronica integrata che condiziona il segnale: trasforma la carica elettrica generata dal cristallo piezoelettrico in un segnale a bassa impedenza e lo rende più facilmente acquisibile da sistemi di acquisizione dati.

Presenta una sensibilità di 10 mV/g , la quale indica che a ogni “g” di accelerazione ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$) il sensore fornisce circa 10 millivolt in uscita. Il campo di $\pm 500 \text{ g}$ lo rende adatto a misurazioni anche di shock e vibrazioni molto intense o rapide.

Il sensore ha massa molto bassa, per via della costruzione miniaturizzata e dell'uso del titanio, che minimizzano l'effetto massa sull'oggetto da testare (mass-loading effect), che non dovrebbe influenzare eccessivamente la dinamica dell'oggetto stesso, rendendo le misure più affidabili. Nel caso specifico in esame tuttavia, a causa della bassa densità del materiale considerato, la massa dell'accelerometro, che è di 4 g senza considerare quella del filo, influenzerà i risultati; è stata infatti utilizzata come massa aggiuntiva all'interno di tutti i calcoli e test preliminari svolti attraverso software, come verrà spiegato nel capitolo seguente.



Figura 39-Triaxial accelerometer model 356B21

3.4.3 Sostegno per i provini

Sullo shaker è stata inizialmente fissata una piastra di interfaccia, ancorata mediante viti, che costituisce la superficie di supporto per il montaggio dei provini da testare. Tale piastra, fornita dal laboratorio di Leonardo S.p.a., è stata modellata in ambiente CAD, permettendo di sovrapporvi e progettare con precisione i supporti aggiuntivi necessari.

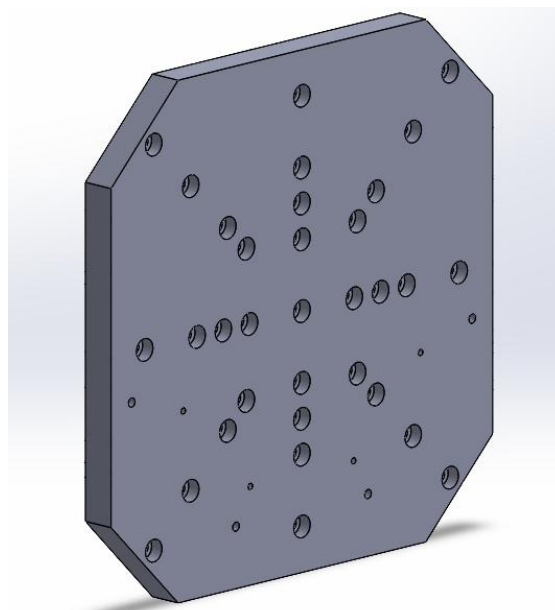


Figura 40-Disegno 3D piastra principale

Per garantire il corretto orientamento verticale dei provini e affinché il moto indotto dallo shaker risultasse allineato all'asse x del sistema di riferimento del provino, si è reso necessario progettare una struttura di sostegno dedicata.

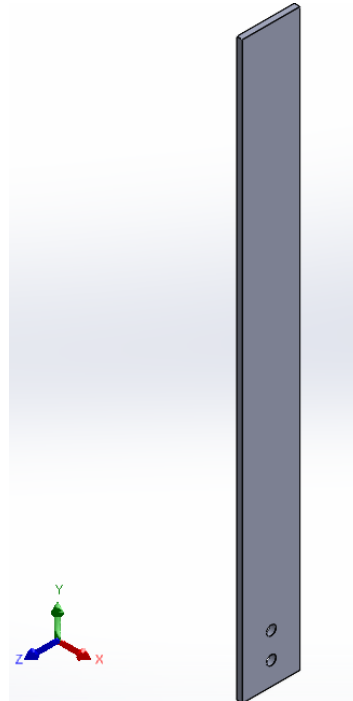


Figura 41-Disegno 3D provino con sistema di riferimento

È stata quindi ideata e modellata in ambiente CATIA V5 una piastra di supporto per il montaggio dei provini. Uno dei due bracci della piastra consente il fissaggio alla piastra di interfaccia dello shaker, mentre l'altro funge da supporto per il montaggio dei provini.

Per garantire un fissaggio corretto i fori sulla base sono stati disegnati in modo da sovrapporsi a quelli già presenti sulla piastra di interfaccia; quelli sul braccio verticale sono stati realizzati per consentire il montaggio dei provini tramite l'utilizzo di due viti M3 per provino, garantendo distanza uniforme tra questi e impedendo rotazioni non desiderate durante le prove.

La piastra permette il montaggio di 12 provini contemporaneamente poiché inizialmente la prova prevedeva di testarli tutti in maniera simultanea; successivamente, si è deciso di eseguire le prove su un singolo provino per volta. Nonostante ciò, la piastra mantiene la flessibilità necessaria per essere utilizzata in diverse tipologie di test.

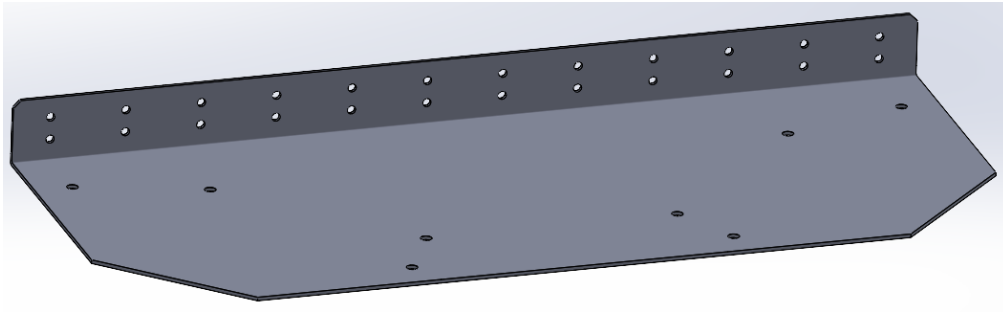


Figura 42-Disegno 3D della piastra di supporto

I provini, opportunamente forati in corrispondenza del braccio verticale della struttura di supporto, vengono fissati mediante viti M3 e bloccati posteriormente tramite una piastrina di serraggio, anch'essa ideata e modellata appositamente su CAD.

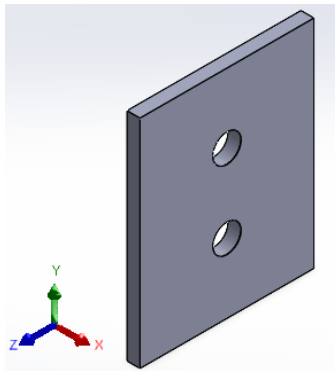


Figura 43-Disegno 3D piastrina di serraggio

La piastra di interfaccia, in acciaio, è fornita dal laboratorio di Leonardo Spa, la piastra di supporto e la piastrina di serraggio sono state appositamente realizzate in acciaio dal fornitore *Mako Shark S.r.l.*, entrambe di spessore 1.5 mm.

Questa configurazione garantisce il corretto posizionamento dei provini e la stabilità del sistema durante le prove di vibrazione, come riportato nel seguente assieme di esempio, che raffigura il set-up di prova per il test simultaneo di tutti i provini.

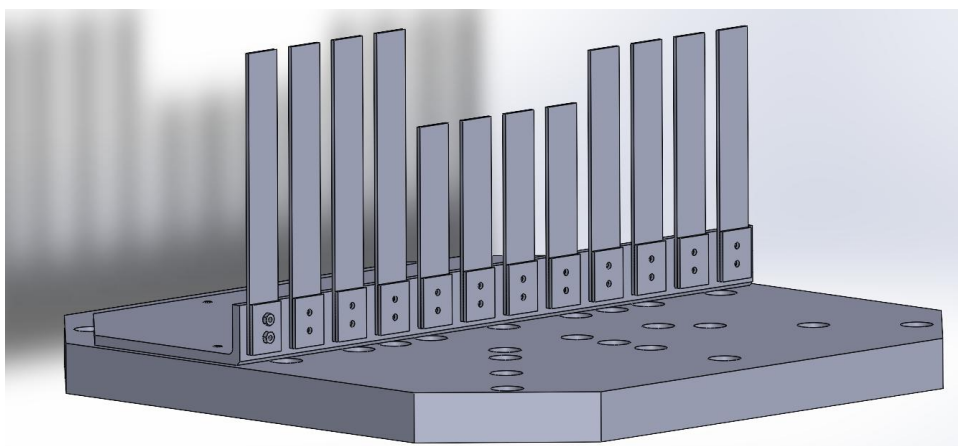


Figura 44-Disegno 3D assieme

3.4.4 Provini

Per determinare le dimensioni dei provini si è fatto riferimento alla normativa ASTM D3039 [13], che indica le misure tipiche da utilizzare per provini compositi destinati a prove di fatica a trazione, variabili in funzione della tipologia di laminato. Poiché la prova in oggetto non dispone di uno standard specifico di riferimento, tali indicazioni sono state adottate come punto di partenza per definire le dimensioni e la geometria dei provini.

TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations^A

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Tabella 5-Dimensioni provini soggetti a fatica a trazione, normativa D3039

La tabella, ricavata dalla suddetta normativa, riporta le dimensioni dei provini, che variano a seconda dell'orientazione delle fibre.

La lunghezza è all'interno di un range che va da 175 a 250 mm, la larghezza da 15 a 25 mm e lo spessore da 1 a 2.5 mm.

Secondo la normativa, le dimensioni consigliate derivano da test con esiti soddisfacenti, ma non sono necessariamente ottimali per ogni materiale. Si tratta di linee guida: ogni scelta va adattata al tipo di prova, al materiale e alla macchina impiegata.

Nel caso in esame i provini sono prodotti tramite sacco a vuoto. I laminati dei provini sono **simmetrici e unidirezionali**; ogni provino è composto da **8 ply** da 0,25 mm, per uno **spessore** totale di **2 mm** e tutti i ply sono **orientati a 0°**.

È stato scelto di condurre le analisi su 3 lunghezze differenti, così da scegliere in seguito quella definitiva su cui svolgere i test in laboratorio; le lunghezze scelte sono **200 mm, 250 mm e 310 mm**.

È stato necessario effettuare simulazioni tramite software HyperMesh per valutare e determinare la lunghezza ottimale del provino, in modo da identificare la frequenza di risonanza e, di conseguenza, definire l'ampiezza di accelerazione da applicare come input per raggiungere i livelli desiderati di FI e di sollecitazione.

Poiché il materiale utilizzato presenta una densità molto bassa, il peso dei provini è dell'ordine di pochi grammi. In queste condizioni, l'aggiunta della massa degli accelerometri ha un effetto significativo sulle frequenze di risonanza, riducendo l'influenza della lunghezza del provino sulla frequenza di risonanza. Se non vi fosse l'aggiunta di massa, una variazione di pochi millimetri nella geometria è sufficiente a modificare sensibilmente la frequenza di risonanza; con l'accelerometro, invece, è stato necessario incrementare in maniera più marcata le differenze dimensionali per ottenere differenze significative di frequenza durante le analisi.

Durante le simulazioni, si è scelto di modificare la lunghezza L dei provini, anziché lo spessore h , poiché, tale parametro risulta essere quello con maggiore influenza sulla frequenza di risonanza, avendo un rapporto quadratico:

$$\omega_n \propto \frac{1}{L^2}, \quad \omega_n \propto h$$

A tal fine, sono stati condotti test modali numerici mediante HyperMesh (come sarà descritto più nel dettaglio nel capitolo seguente), grazie ai quali si è potuto individuare le dimensioni finali dei provini e i livelli di accelerazione in input.

Capitolo 4

Analisi numeriche mediante HyperMesh a supporto delle prove sperimentali

Le attività preliminari di progetto hanno rappresentato una fase fondamentale per la corretta impostazione dell'intero lavoro sperimentale. In particolare, la definizione dei parametri dimensionali dei provini e delle attrezzature di test è stata condotta mediante un approccio integrato CAD/CAE per garantire coerenza geometrica, affidabilità strutturale e condizioni di prova riproducibili.

La modellazione tridimensionale è stata sviluppata in ambiente CAD tramite CATIA V5, come descritto nel capitolo precedente, che ha permesso di realizzare modelli geometrici accurati dei provini e delle relative attrezzature, tenendo conto dei vincoli imposti dalla configurazione sperimentale. Questa fase ha permesso una prima valutazione delle interferenze geometriche e del montaggio complessivo del sistema di prova. Successivamente, i modelli CAD sono stati importati in ambiente CAE, impiegando HyperMesh come strumento di pre e post-processing e OptiStruct come solutore.

Altair HyperMesh 2025.1 è un software di pre-processing utilizzato per le analisi con modello a elementi finiti (FEM), sviluppato da Altair Engineering, che fa parte della piattaforma Altair HyperWorks [38], ambiente che comprende strumenti avanzati per la simulazione numerica, l'analisi strutturale e l'ottimizzazione del design.

Tramite l'utilizzo di HyperMesh è possibile creare e modificare modelli FEM complessi e generare mesh di qualità elevate che garantiscano accuratezza e stabilità alle soluzioni numeriche. All'interno dell'ambiente si definiscono proprietà dei materiali, vincoli, condizioni al contorno e carichi applicati attraverso un modello organizzato da una struttura gerarchica funzionale. I modelli così creati possono essere esportati verso numerosi solutori, tra cui OptiStruct.

Il solver **Altair OptiStruct** [39], che come HyperMesh fa parte della piattaforma HyperWorks, è un software che permette l'esecuzione di analisi statiche, modali, di instabilità, di fatica, termiche, oltre a processi di ottimizzazione per quanto riguarda forma, dimensione e topologia. Questo solutore si basa su modelli agli elementi finiti lineari e non lineari, garantendo risultati

affidabili, grazie alla capacità di ottimizzazione strutturale, che permette di ridurre la massa aumentando l'efficienza della struttura e le prestazioni.

Combinando la preparazione e la visualizzazione del modello numerico svolta con HyperMesh e l'ottimizzazione e i calcoli fatti attraverso OptiStruct si ottiene un flusso di lavoro che permette di passare dal modello CAD ai risultati numerici in modo efficiente. Questo approccio ha rappresentato la base per le analisi svolte all'interno di questo elaborato.

Le simulazioni sono state effettuate su provini di tre lunghezze differenti, per studiare il diverso tipo di risposta modale, statica e dinamica.

Tipo provino	Spessore [mm]	Larghezza[mm]	Lunghezza [mm]	Massa [g]
1	2	20	200	12
2	2	20	250	15
3	2	20	310	18

Tabella 6-Dati provini analizzati nelle simulazioni

4.1 Modellazione del provino e setup

Risulta necessario definire una serie di parametri fondamentali, elencati di seguito:

- generazione e applicazione della mesh;
- definizione del materiale e delle proprietà del laminato;
- simulazione dei vincoli e configurazione delle condizioni di contatto tra i diversi corpi;
- definizione di carichi, output blocks e control cards per il controllo e la gestione della simulazione.

In questa sezione si descrive la modellazione del provino, che rappresenta l'elemento base su cui sono state condotte tutte le analisi strutturali e del supporto, realizzato in modo semplificato per agevolarne lo svolgimento.

4.1.1 Generazione e applicazione della mesh

La generazione della mesh è una fase fondamentale del FEM, in quanto suddivide il modello continuo in elementi discreti e determina l'accuratezza e l'efficienza computazionale dell'analisi. I componenti sono suddivisi in unità elementari detti elementi finiti; più si riduce

la dimensione di queste unità più la simulazione risulterà precisa e il costo computazionale maggiore.

Al fine della simulazione svolta si è generata una mesh con elementi quadrati di dimensioni $2 \times 2 \text{ mm}$ con il comando BatchMesher, che garantisce un'accurata simulazione senza aumentare in modo eccessivo il tempo di calcolo. Prima della discretizzazione, il modello è stato reso bidimensionale tramite il comando Midsurface, permettendo così di adottare una mesh 2D, adeguata alla geometria semplice dei provini.

In questa fase è stata inoltre effettuata la scelta del tipo di elemento. Considerata la geometria sottile e la natura lamellare dei provini, sono stati adottati elementi **SHELL**, che risultano particolarmente adatti per componenti con spessore trascurabile rispetto alle altre dimensioni. Gli elementi shell permettono di catturare efficacemente lo stato di sollecitazione nel piano del laminato, includendo gli effetti di curvatura e flessione.

La densità della mesh è stata modulata in funzione delle zone di maggiore sollecitazione, con un local refinement applicato in prossimità degli incastri, al fine di ottimizzare il compromesso tra accuratezza dei risultati e tempi di calcolo.

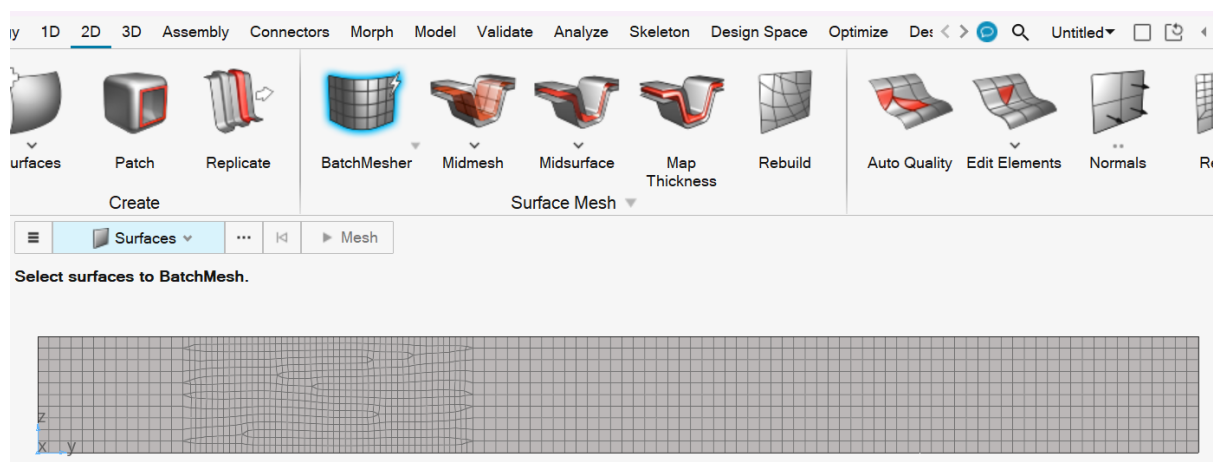


Figura 45-Mesh 2D provino 200x20mm

Per realizzare i fori si è utilizzato il comando Cut Hole nella sezione 2D e si è in seguito adeguata la mesh alla nuova geometria locale.

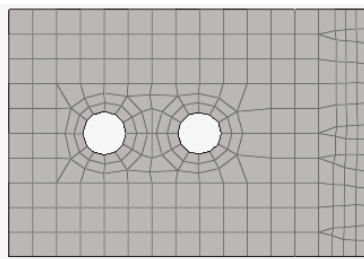


Figura 46-Fori e mesh provino 200mm

Lo stesso procedimento è stato riprodotto per il supporto e la piastrina, utilizzati per simulare il vincolo.

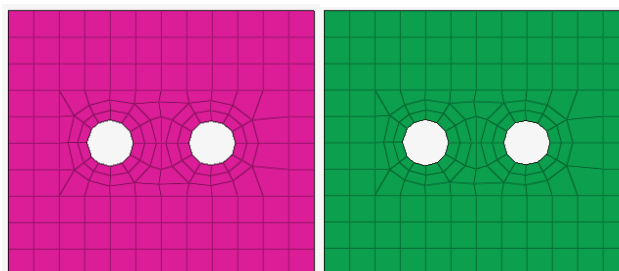


Figura 47-Modello supporto semplificato e piastrina di serraggio

4.1.2 Definizione dei materiale e delle proprietà dei componenti

Laminato

Per la definizione del materiale del laminato è stata utilizzata la scheda **MAT8**, che permette di impostare le proprietà meccaniche di un materiale ortotropo lineare, indipendentemente dalla temperatura, per elementi bidimensionali. All'interno di questa scheda sono stati inseriti i valori delle proprietà meccaniche riportati all'interno del paragrafo 2.2.2 Proprietà composito HexPly® F155K285, nella tabella 3.

Per quanto riguarda le proprietà dei laminati compositi, è stata impiegata la scheda **PCOMPG** [40], che consente di definire la struttura e le caratteristiche di un materiale laminato, identificando globalmente ciascuno strato (ply). All'interno della scheda PCOMPG è possibile specificare:

- l'interlaminar shear stress;
- il failure theory code (nel presente caso, TSAI);
- il numero di strati (ply);
- lo spessore e l'orientamento di ciascun ply.

Utilizzando questa scheda, con la definizione globale degli strati (global ply ID), vi è la possibilità di visualizzare i risultati in base al numero globale del ply, indipendentemente

dall'ordine degli strati, poiché consente di selezionare un ply specifico e osservare il comportamento su tutto il componente. In questo modo, la scheda PCOMPG genera direttamente il laminato composito completo e permette di ottenere, come output nelle analisi, il Failure Index (FI) e i risultati sul ply maggiormente caricato.

Supporto e piastrina di serraggio

Per definire il materiale del supporto e della piastrina di serraggio è stata utilizzata la material card **MAT1**, utilizzata per proprietà di materiali lineari, indipendenti dalla temperatura e isotropi, all'interno della quale sono stati inseriti i parametri meccanici dell'acciaio.

Come scheda per la proprietà si definisce una **PSHELL**, tramite la quale è possibile definire l'accoppiamento tra flessione, membrana, taglio trasversale e flessione membrana degli elementi shell.

È stato sufficiente creare una sola material card e scheda proprietà per entrambi i componenti poiché realizzati nello stesso materiale e di uguale spessore. Una volta creati la material card e la scheda proprietà di un componente, è necessario associarle e in seguito associarle al rispettivo componente del modello.

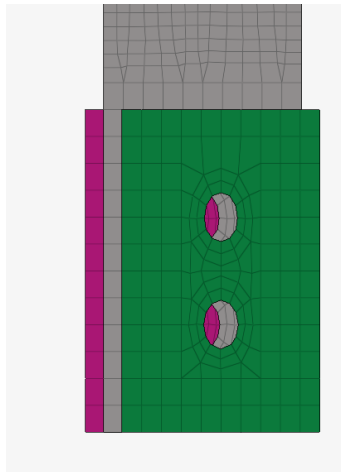


Figura 48-Modellazione provino, supporto e piastrina

4.1.3 Simulazione del vincolo

Vincolo incastro provino

Per la simulazione è necessario riprodurre il modo in cui il provino è fissato al macchinario, cioè tramite il supporto e la piastrina di serraggio, fino a un'altezza di 25 mm.

Per rappresentare correttamente questo collegamento meccanico, in Altair HyperMesh, si utilizzano gli **RBE2** (Rigid Body Element 2), che permettono di simulare un vincolo rigido

senza modellare dettagli geometrici complessi del supporto.

Un RBE2 definisce un corpo rigido i cui gradi di libertà indipendenti sono assegnati a un singolo punto della griglia, il nodo master e i gradi di libertà dipendenti sono assegnati a un numero arbitrario di punti della griglia, i nodi slave, così che spostamenti e rotazioni del nodo master vengano automaticamente trasmessi a tutti i nodi slave, senza introdurre deformazioni tra di essi.

Per tutti e tre gli elementi (provino, supporto, piastrina) viene inserito un RBE2 per ciascun foro, che garantisce una distribuzione rigida del carico dal contorno del foro al nodo di riferimento.

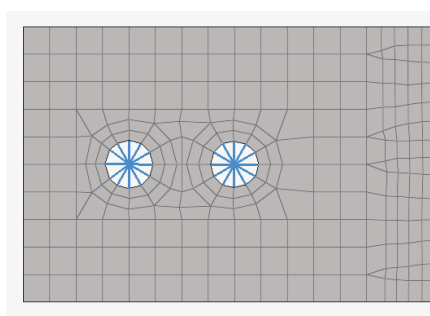


Figura 49-RBE2 fori provino

Per collegare gli RBE2 dei fori corrispondenti si utilizzano elementi **CBUSH**, i quali definiscono un elemento strutturale generalizzato che presenta comportamento elastico e di smorzamento e simulano il collegamento che nella realtà avviene tramite vite e bullone.

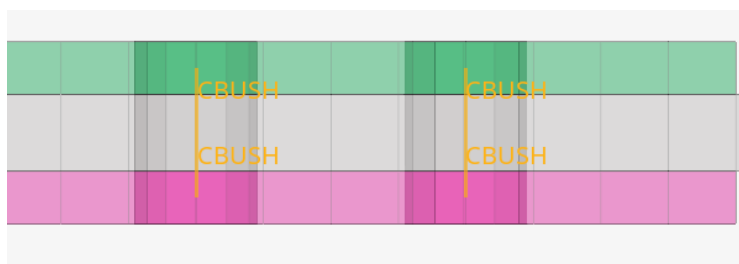


Figura 50- CBUSH

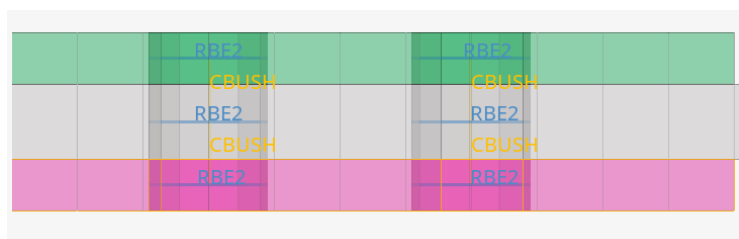


Figura 51-RBE2 collegati da CBUSH

Gli elementi CBUSH devono essere associati a una scheda **PBUSH**, che ne definisce le proprietà nominali.

Per rendere il modello più attendibile e realistico è stato inserito, tra ognuno dei tre elementi, un contatto di tipo **SLIDE**. Questa è una tipologia di contatto scorrevole, che presenta una rigidità normale all'interfaccia di contatto e non tiene conto dell'attrito.

Vincolo massa accelerometro

Nel modello FEM risulta necessario considerare la massa dell'accelerometro, che nel caso specifico risulta significativa (circa 4 g, con circa 2 g ulteriori di filo) rispetto alla scala del provino e influisce quindi sia sulla distribuzione degli stress sia sulle proprietà dinamiche del sistema. La massa concentrata può essere introdotta tramite la scheda **CONM2**, che consente di assegnare una massa puntuale a un nodo senza introdurre rigidità aggiuntiva. Questo approccio è particolarmente indicato per simulare sensori o componenti il cui effetto dinamico è rilevante, ma la deformazione interna è trascurabile.

Per fissare correttamente la massa al provino è stato creato un collegamento rigido mediante un **RBE3** (Rigid Body Element 3). Gli RBE3 sono elementi di vincolo di interpolazione, in cui il movimento di un nodo dipendente è definito come la media ponderata dei movimenti di un gruppo di nodi indipendenti, in cui è possibile specificare i gradi di libertà dipendenti, perciò vengono in genere utilizzati per distribuire carichi o masse applicati al nodo dipendente tra i nodi indipendenti selezionati. Queste caratteristiche lo rendono il modo più ottimale per simulare l'aggiunta della massa dell'accelerometro, senza che la rigidità del provino venga alterata.

Il nodo in cui è applicata la CONM2 rappresenta il centro di massa dell'accelerometro, posizionato in modo da riprodurre correttamente la distribuzione reale del peso.

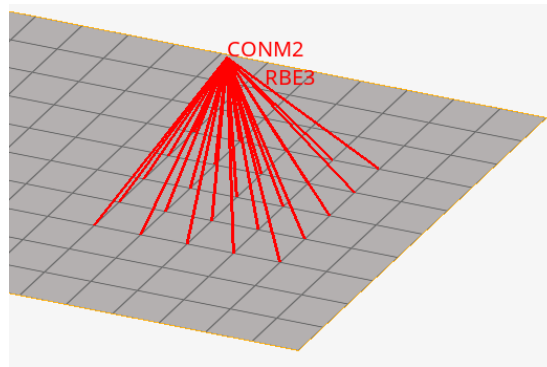


Figura 52-Simulazione massa accelerometro tramite RBE3 e CONM2

Questa combinazione di RBE3, CONM2 e posizionamento del nodo centrale consente di simulare in modo accurato l'effetto dinamico dell'accelerometro sul provino, senza introdurre vincoli eccessivamente rigidi o artefatti numerici nell'analisi FEM.

4.2 Analisi numeriche

Sono state eseguite tre tipologie di analisi numeriche per studiare il comportamento dinamico del provino: modale, inerziale e di risposta in frequenza. Queste analisi consentono di ottenere informazioni complementari sul sistema, fondamentali per identificare le frequenze di risonanza e valutare le sollecitazioni meccaniche.

L'analisi modale permette di determinare le frequenze naturali del provino e i corrispondenti modi propri di vibrazione, descrivendo il comportamento dinamico libero del sistema. L'analisi inerziale valuta le tensioni e deformazioni indotte dalle accelerazioni applicate. Infine, l'analisi di risposta in frequenza consente di calcolare il grado di amplificazione delle vibrazioni in funzione della frequenza.

4.2.1 Analisi modale

L'analisi modale è stata eseguita per determinare le frequenze naturali e i modi propri del provino.

In OptiStruct, l'analisi modale è stata impostata tramite la card **EIGRL**, definendo l'intervallo di frequenze di interesse e il numero di modi da estrarre. La simulazione è stata eseguita mediante un load step modale, privo di carichi esterni, che utilizza le proprietà di massa, di rigidità e i vincoli del modello per il calcolo delle frequenze naturali.

Per l'individuazione delle frequenze considerate di risonanza è stato analizzato l'output **MeffMass**, che consente di valutare la percentuale di massa partecipante associata a ciascun

modo di vibrare. Dall'analisi si ricavano le frequenze modali e si considerano di risonanza solo quelle caratterizzate da una significativa partecipazione di massa (in questa trattazione considerata $\geq 10\%$) nella direzione di eccitazione dello shaker.

Una volta definita l'analisi, la simulazione viene lanciata e il solver genera diversi file di output. Tra questi, il file .out contiene i risultati numerici dell'estrazione modale; in particolare, nella sezione "Modal effective mass fraction" vengono riportate, per ciascun modo proprio, la frequenza naturale e la percentuale di massa partecipante lungo gli assi X, Y e Z.

Parallelamente il file .h3d viene utilizzato per il post-processing in HyperView, dove è possibile visualizzare i modi di vibrare associati alle rispettive frequenze naturali. Attraverso l'animazione dei modi propri, si ottiene una rappresentazione qualitativa del comportamento dinamico del provino, utile per interpretare la natura della deformata modale e verificare la coerenza fisica dei risultati ottenuti.

4.2.2 Analisi inerziale

L'analisi inerziale si svolge al fine di valutare come il peso proprio del provino e della massa dell'accelerometro influenzano lo stato tensionale e deformativo della struttura. In OptiStruct, questa analisi è impostata come analisi statica lineare, tramite l'introduzione di un campo gravitazionale uniforme con la card **GRAV**, la quale applica un'accelerazione costante a tutti i nodi del modello.

Il load step inerziale include il carico GRAV e i vincoli precedentemente definiti, permettendo al solver di calcolare le tensioni (CSTRESS), le deformazioni (CSTRAIN) e gli indici di failure (CFAILURE) nei singoli ply del laminato. I risultati vengono esportati nel file .h3d e analizzati in HyperView, dove è possibile visualizzare tali output in ciascun elemento del provino, ottenendo una mappatura completa della risposta strutturale sull'intera geometria.

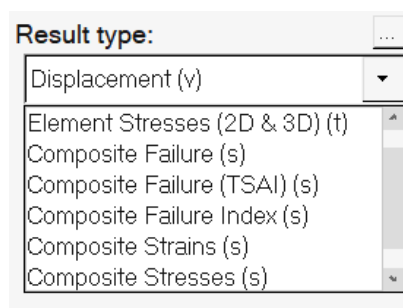


Figura 53-Output analisi inerziale

Gli output principali di interesse per questa analisi sono le tensioni e il failure index. Le tensioni permettono di quantificare lo stato di sollecitazione indotto dai carichi inerziali nei singoli strati

del laminato; il failure index consente di valutare quanto il materiale è prossimo alla rottura in base al criterio adottato, valori inferiori all'unità indicano che il materiale opera in regime elastico sicuro, mentre valori prossimi o superiori a uno suggeriscono che possa avvenire l'innescio di meccanismi di danneggiamento o la rottura nei ply.

L'analisi inerziale iniziale viene eseguita applicando un'accelerazione unitaria pari a 1g. Da questa analisi si ricava il valore P1 Major, che rappresenta la tensione principale maggiore nel piano del laminato (principal stress 1). Tale grandezza costituisce un riferimento utile perché esprime l'intensità massima dello stato di tensione indotto dall'accelerazione inerziale unitaria e può quindi essere utilizzata come termine di normalizzazione.

Tuttavia, durante la prova sperimentale reale, il provino non è sollecitato in condizioni statiche ma in regime dinamico ed in particolare nell'intorno della risonanza al primo modo nella direzione di eccitazione dello shaker. In queste condizioni, la risposta strutturale risulta amplificata rispetto al caso inerziale statico, rendendo necessaria un'analisi di risposta in frequenza.

Come verrà descritto in seguito, l'analisi di risposta in frequenza viene eseguita imponendo un certo numero di g di input, rappresentativi dell'accelerazione applicata durante la prova. Da tale analisi si ricava il Normal X stress, che rappresenta la tensione effettivamente raggiunta dal provino in condizioni di risonanza, preso nella direzione di eccitazione dello shaker.

A partire da questi risultati, viene calcolato un fattore di amplificazione definito come il rapporto tra il Normal X stress ottenuto dall'analisi di risposta in frequenza e il valore di P1 Major ricavato dall'analisi inerziale, entrambe a 1g:

$$\text{Amplification ratio} = \frac{\sigma_{\text{normal, FRF}}}{P1_{\text{Major, inerziale}}}$$

Questo rapporto viene assunto come fattore di amplificazione della risposta strutturale dovuto alla risonanza. Successivamente, l'analisi inerziale viene ripetuta modificando il valore dell'accelerazione applicata nella card GRAV, inizialmente pari a 1g. Questo valore viene moltiplicato per il fattore di amplificazione calcolato e inserito come componente del vettore di gravità nella direzione di eccitazione. In questo modo, l'analisi inerziale tiene conto in maniera indiretta dell'effetto amplificativo della risonanza.

Tramite l'analisi modale inerziale amplificata (cioè moltiplicata per l'amplification ratio) è possibile ricavare le tensioni e il failure index nelle condizioni di eccitazione in risonanza, così da poter stabilire quanto i ply sono sollecitati vicino al loro limite di rottura statica.

4.2.3 Analisi di risposta in frequenza (FRF)

L'analisi di risposta in frequenza studia il comportamento dinamico del provino soggetto a un'eccitazione armonica applicata su un intervallo definito di frequenze. L'obiettivo risulta l'individuazione di fenomeni di amplificazione dinamica e risonanza, nonché la quantificazione della risposta strutturale in termini di spostamenti, accelerazioni e stato tensionale in corrispondenza delle frequenze di risonanza.

Il range di frequenze che si intende analizzare si definisce tramite la card **FREQI**, in cui vengono inseriti frequenza iniziale, passo di campionamento e numero totale di punti di calcolo, così da definire un intervallo di frequenze sufficientemente ampio e discretizzato da permettere una risoluzione adeguata all'analisi.

L'eccitazione dinamica viene applicata al modello mediante un vincolo dinamico **SPCD** (Single-Point Constraint Dynamic), che consente di imporre a uno o più nodi un determinato valore di spostamento, velocità o accelerazione nell'ambito di un'analisi dinamica.

Nel presente caso, gli SPCD sono utilizzati per imporre un'accelerazione armonica lungo l'asse Z, coerente con la direzione di eccitazione dello shaker. Il vincolo è stato applicato ai nodi centrali degli RBE2 che simulano l'incastro del provino, in modo da riprodurre fedelmente le condizioni di prova sperimentali e garantire un controllo accurato dell'ampiezza e della direzione dell'input dinamico.

Per definire l'ampiezza di accelerazione imposta agli SPCD si crea una curva **TABLED1**, dove si impone l'andamento dell'eccitazione in funzione della frequenza. Nel presente lavoro, i valori di accelerazione sono stati variati in modo parametrico al fine di valutare l'influenza dell'ampiezza dell'input dinamico sulla risposta del provino. Tale analisi risulta particolarmente significativa in quanto il livello di accelerazione rappresenta un parametro che, nella prova sperimentale, può e deve essere selezionato in fase di test, influenzando direttamente l'entità delle sollecitazioni indotte nella struttura.

Parallelamente, per tenere conto dei fenomeni dissipativi del sistema, è stata introdotta una curva **TABDMP**, dove si definisce lo smorzamento in funzione della frequenza. Anche lo smorzamento, come l'accelerazione, è stato trattato come parametro di studio al fine di analizzarne l'influenza sulla risposta dinamica e sui livelli di amplificazione in prossimità delle

frequenze di risonanza. A differenza dell'accelerazione di input, il valore di smorzamento non può essere imposto direttamente durante la prova sperimentale, ma deve essere stimato sulla base del comportamento reale del sistema. Per questo motivo sono state eseguite più analisi, considerando diversi livelli di smorzamento, al fine di coprire un intervallo di valori ritenuto realistico. In particolare, lo smorzamento strutturale è stato testato tra 1% e 4%, consentendo di valutare la sensibilità della risposta dinamica a tale parametro. Questa procedura permette di interpretare i risultati numerici tenendo conto dell'incertezza associata alla stima dello smorzamento reale del sistema.

L'input dinamico complessivo del modello è stato definito mediante un **RLOAD2**, che simula il carico armonico dipendente dalla frequenza e lega il moto imposto dagli SPCD e la legge di variazione dell'ampiezza di eccitazione descritta dalla TABLED1.

Per la valutazione della risposta dinamica del provino è stato infine definito un Load Step di tipo **Frequency Response Function (FRF)**. L'analisi utilizza un approccio di tipo modale, basato sulle forme modali ottenute dalla precedente analisi modale, così da ridurre il costo computazionale e focalizzarsi sui modi maggiormente rilevanti per la risposta del sistema.

Il load step richiama il vincolo di incastro, il carico dinamico RLOAD2, il range di frequenze definito tramite FREQI e la curva di smorzamento TABDMP, consentendo al solver di calcolare la risposta del provino in termini di accelerazioni (Acceleration), spostamenti nodali (Displacement), tensioni (CSTRESS) e deformazioni nei singoli ply del laminato (CSTRAIN) al variare della frequenza di eccitazione. Tali output permettono di analizzare l'ampiezza della risposta dinamica, ricostruire le curve di risposta in frequenza nei nodi di interesse e individuare le condizioni di risonanza del sistema, fornendo le informazioni necessarie per la successiva fase di amplificazione dell'analisi inerziale, spiegata nel paragrafo precedente.

4.3 Risultati delle simulazioni numeriche

In questo paragrafo vengono presentati e discussi i principali risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, con l'obiettivo di valutare il comportamento strutturale del provino e di fornire indicazioni utili alla costruzione della prova sperimentale, portando quindi l'attenzione sui valori di deformazioni, stress, fattore di sicurezza e di amplificazione.

Come già discusso nei paragrafi precedenti, l'attività numerica è stata condotta considerando provini di diverse lunghezze nominali, 200 mm (provino 1), 250 mm (provino 2) e 310 mm

(provino 3), al fine di valutare come questa differenza ne influenza risposta dinamica e stato tensionale.

4.3.1 Analisi della risposta modale dei provini

La ricerca della frequenza di risonanza, condotta attraverso l'analisi modale, è stata svolta imponendo come ampiezza di accelerazione di input **1G** e lo smorzamento è stato ipotizzato al **2%**.

	provino 1		provino 2		provino 3	
modo	f_n	asse z	f_n	asse z	f_n	asse z
1	28.07	43%	18.05	45%	11.92	47%
2	154.40	0%	111.90	0%	80.23	0%
3	248.10	9%	152.70	10%	97.08	11%
4	325.90	0%	241.10	0%	185.30	0%

Tabella 7-Partecipazione modale di massa e frequenza di risonanza

I risultati ottenuti confermano lo studio teorico, secondo cui un provino di lunghezza maggiore presenta un primo modo di vibrare a frequenza inferiore.

Risulta possibile, inoltre, visualizzare i modi di vibrare associati alle rispettive frequenze naturali attraverso l'animazione in HyperView, che permette di ottenere una rappresentazione qualitativa del comportamento dinamico del provino, che potrà essere confrontata con quella reale ottenuta in laboratorio. Di seguito si riporta un esempio, riferito al provino di lunghezza 200 mm, alla sua prima risonanza.

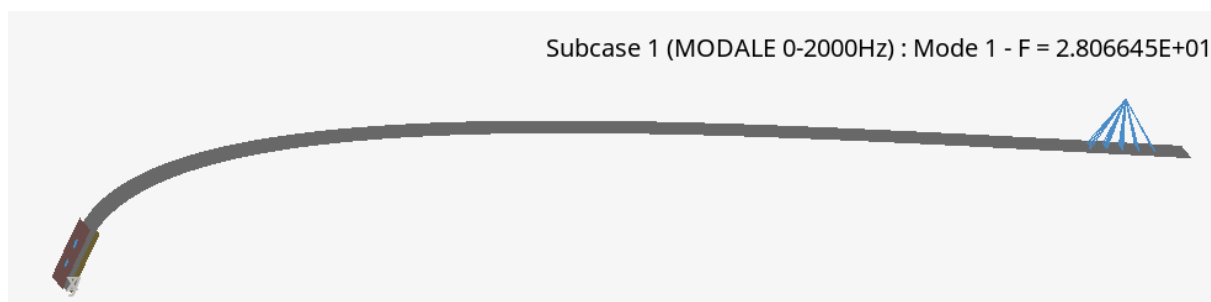


Figura 54-Primo modo di vibrare provino 200x20mm

4.3.2 Analisi della risposta strutturale dei provini

Per ogni provino studiato si sono eseguite analisi parametriche, variando smorzamento e ampiezza di accelerazione, al fine di valutare la sensibilità della risposta dinamica a diverse condizioni di carico. Saranno riportati solo i risultati di maggior interesse allo scopo dell'elaborato.

Analisi di stress, strain, FI e amplitude

Questo studio ha permesso di ricavare i valori di stress, strains, amplificazione e indice di fallimento attraverso l'analisi statica e di risposta in frequenza, al fine di confrontare i risultati ottenuti nelle tre diverse configurazioni analizzate.

Nella seguente tabella sono riportati i risultati di un caso studio che presenta smorzamento pari al **2%** e accelerazione di input di **3G**.

Provino	1	2	3
Input [g]	3	3	3
Amplitude	30.64	30.75	30.65
Strains FRF	0.003	0.005	0.006
Stress [Mpa] statica	1.23	1.79	2.79
Stress [Mpa] FRF	86.2	129.6	182
Amplification Ratio	70	72	65
Failure index	0.49	0.85	1.28

Tabella 8-Valori di Stresses, Strains amplificazione e FI dei tre provini nel caso smorzamento 2% e ampiezza 3g

I risultati riportati si ricavano alla rispettiva frequenza naturale del primo modo, per simulare l'eccitazione in risonanza che caratterizzerà la reale prova in laboratorio.

I valori di accelerazione nello step inerziale sono stati moltiplicati per il fattore di amplificazione ricavato dall'analisi di risposta in frequenza del caso di partenza, come spiegato in precedenza, per riprodurre le condizioni dinamiche effettive della prova. Il valore di stress per la statica infatti corrisponde al valore P1 Major, e quello della FRF corrisponde a Normal X stress e l'amplification ratio è il rapporto tra i due; anche il valore di strain corrisponde alla risposta in frequenza nel caso Normal X.

Il valore di amplitude è ricavato dalla risposta in frequenza in accelerazione, dividendo il valore di accelerazione ottenuto sull'estremo libero del provino per 9810 mm/s^2 e rappresenta l'amplificazione che il provino subisce in accelerazione quando vibra alla prima frequenza di risonanza.

Per ogni provino i dati numerici sono estratti dallo stesso elemento, il numero 1107, situato nella zona prossima all'incastro; risulta infatti l'area in cui si registrano le tensioni e le deformazioni più elevate, identificando quindi i punti più critici a livello strutturale. Utilizzando lo stesso elemento per tutti i provini, è inoltre possibile confrontare in modo coerente la risposta dei diversi campioni, identificando le condizioni maggiormente a rischio di danneggiamento o rottura.

Come da previsione teorica, i provini di lunghezza maggiore presentano valori più elevati di stress, strain e FI. Questo comportamento, tuttavia, è valido solo entro certi limiti, poiché l'aumento eccessivo della lunghezza del provino tende a ridurre la frequenza di risonanza, influenzando l'amplificazione della risposta dinamica.

Contestualmente, dai risultati estratti, si deduce che i provini di lunghezza maggiore, testati a fatica, giungeranno a rottura più probabilmente e velocemente; questo comportamento risulta coerente con le ipotesi teoriche e conferma che il modello numerico sviluppato rispetta i principi meccanici attesi.

Area sottoposta alle sollecitazioni massime

Tutte le simulazioni svolte dimostrano che le tensioni e le deformazioni maggiori si manifestano nella zona prossima all'incastro, dove si concentrerà quindi l'analisi in quanto zona a maggiore probabilità di danneggiamento o cedimento.

Tramite HyperView è possibile visualizzare i risultati numerici in modo chiaro attraverso un contour plot, che ne evidenzia le differenze nelle diverse zone del provino. Si riportano come esempio quelle relative al provino di lunghezza 200 mm, per i valori di stress, strains e FI.

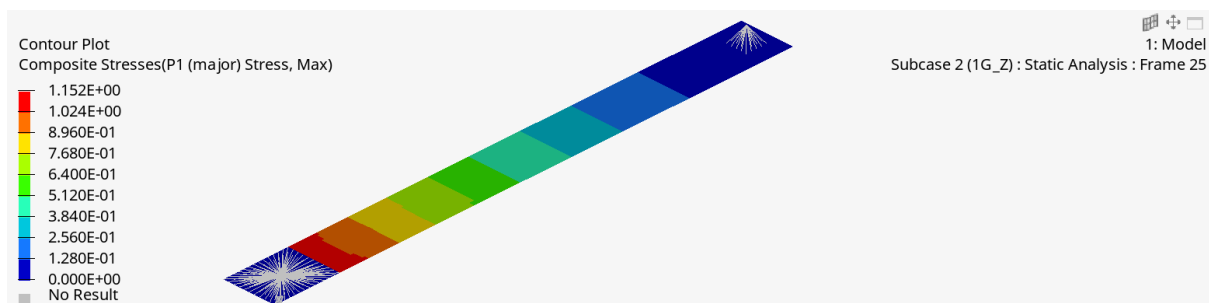


Figura 55-Contour plot Stresses provino 200mm

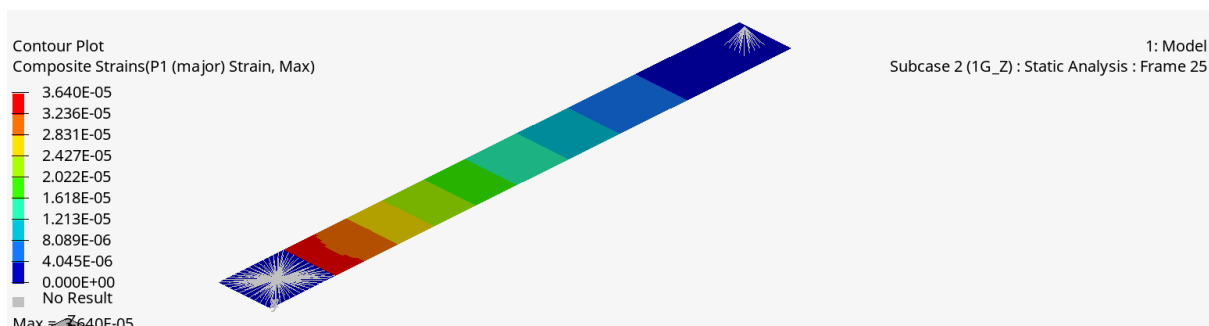


Figura 56-Contour plot Strains provino 200mm

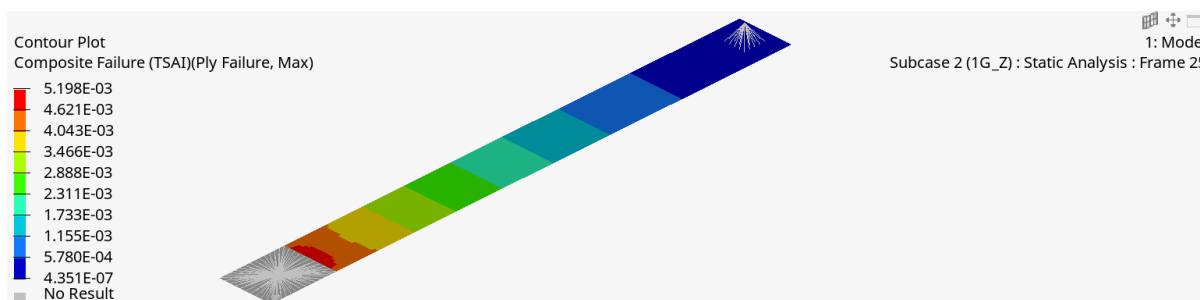


Figura 57-Contour plot FI provino 200mm

4.3.3 Analisi e scelta dei valori di input per il test

Per lo svolgimento dei test sperimentali si è scelto di utilizzare **12 provini di lunghezza pari a 200 mm**. Sono state quindi eseguite simulazioni numeriche variando il coefficiente di smorzamento e l'accelerazione imposta in ingresso, al fine di individuare i valori da utilizzare come condizioni di input per le prove in laboratorio.

Lo smorzamento è stato adottato al 2%, in accordo con quanto utilizzato nell'analisi precedente, mentre l'accelerazione è stata variata in un intervallo compreso tra 2 g e 6 g.

In seguito si riportano i valori del fattore di fallimento ottenuti per ciascuna simulazione, che verranno utilizzati come parametro decisionale per i livelli di carico a cui svolgere le prove.

Accelerazione input [g]	2	3	4	4.5	5	6
Failure index	0.3	0.49	0.68	0.81	0.92	1.17

Tabella 9-Confronto ampiezza accelerazione di input provini 200mm

La scelta dei parametri finali è stata effettuata sulla base del valore dell'indice FI, evitando valori eccessivamente bassi che, dal punto di vista teorico, porterebbero a tempi di rottura troppo elevati e contemporaneamente valori troppo elevati che comporterebbero la rottura del provino dopo un numero molto ridotto di cicli.

Ne deriva che prove di fatica saranno svolte con 3 g, 4 g, 4.5 g e 5 g, di cui di seguito sono riportati i risultati delle simulazioni.

Input [g]	3	4	4.5	5
Provino	1	1	1	1
Stress statico [Mpa]	1.23	1.23	1.23	1.23
Stress FRF [Mpa]	86.2	114.8	129.24	143.6
Amplification Ratio	70.37	93.71	105.5	117.23
Failure index	0.49	0.68	0.81	0.92

Tabella 10-Valori di Stresses e FI del provino 200mm nei casi 3 g, 4 g, 4.5 g, 5 g e smorzamento 2%

4.4 Considerazioni integrative

È stata eseguita un'analisi aggiuntiva per determinare la possibile insorgenza di interferenze strutturali o dinamiche, che comprometterebbero l'affidabilità dei risultati durante la prova sperimentale.

Queste interferenze potrebbero essere causate da effetti dati dal supporto o dall'assieme, nel caso modificassero la risposta del singolo provino, come rigidzze finite, frequenze proprie o amplificazioni locali delle vibrazioni, non riconducibili al provino.

4.4.1 Valutazione della frequenza di risonanza della piastra di supporto

Poiché qualsiasi struttura reale con rigidezza finita e massa possiede una propria frequenza di risonanza, risulta necessario analizzarne la risposta modale, per verificare se possa essere considerata rigidamente vincolata e quindi trascurabile in un'analisi dinamica.

L'analisi numerica svolta sui provini si basa sull'ipotesi che la piastra di supporto vincolata sia perfettamente rigida. Questo risulta verificato in quanto la frequenza naturale della piastra non ricade nel campo di test utilizzato per i provini, quindi tra 0 e 100 Hz, tantomeno risulta vicina a quella dei provini stessi. In caso contrario si potrebbero innescare fenomeni di risonanza del sostegno stesso, che amplificherebbero le vibrazioni e altererebbero la risposta dinamica dei provini, rendendo inaffidabili i risultati.

Come struttura di supporto si utilizza una lamiera in acciaio di 1.5 mm di spessore, la cui prima frequenza naturale in una delle tre direzioni, è pari a 341.5 Hz e risulta quindi nettamente superiore alle frequenze caratteristiche dei provini, permettendo di escludere la possibilità di un accoppiamento dinamico significativo.

Di conseguenza, il sistema formato da supporto e provino può essere considerato dinamicamente equivalente alla configurazione semplificata del vincolo modellato come

descritto nel paragrafo 4.1.3, che risulta idonea per l'esecuzione delle analisi numeriche e sperimentali, non compromettendo l'affidabilità dei risultati.

4.4.2 Modellazione della piastra di supporto

La modellazione della piastra di sostegno è stata effettuata a partire dal modello CAD importato da CATIA V5. Considerato lo spessore ridotto della piastra rispetto alle sue dimensioni in pianta, essa è stata discretizzata mediante una mesh bidimensionale, adottando elementi shell, così da rappresentare in modo efficiente il comportamento strutturale della piastra in termini di flessione e deformazione membranale. Al modello sono state associate una carta materiale di tipo **MAT1**, i cui parametri meccanici inseriti corrispondono alle proprietà dell'acciaio, materiale di realizzazione della piastra e una carta di proprietà di tipo **PSHELL**, come svolto e spiegato per la modellazione delle piastrine di vincolo.

Per svolgere l'analisi è necessario simulare il collegamento della base della piastra di supporto con la piastra dello shaker, che viene ipotizzato rigido e simulato tramite l'inserimento di elementi **RBE2** in corrispondenza dei fori di base. Per simulare il vincolo si sfruttano gli **SPC** che bloccano i sei gradi di libertà, mentre per simulare la risposta in frequenza lungo l'asse di interesse vengono applicati sui punti di vincolo **SPCD**, che impongono uno spostamento/forzante lungo una direzione desiderata (DOF). Questa modellazione permette di eseguire analisi modali e confrontare le frequenze proprie dei provini montati sull'assieme con quelle del caso singolo.



Figura 58-Sostegno meshato e vincolato

Capitolo 5

Attività sperimentale e analisi dei risultati

Nel presente capitolo è descritto lo svolgimento delle attività sperimentali condotte sui provini in laboratorio e la conseguente elaborazione e analisi dei dati ottenuti. La descrizione completa della campagna di prove e le relative finalità, il collegamento con il quadro teorico e la strumentazione e metodologia adottata in sede di laboratorio permette la corretta interpretazione dei risultati.

5.1 Introduzione al programma di prove

L'obiettivo di questo sottocapitolo è la descrizione del programma di prove sperimentali, delle attività preliminari di verifica necessarie, dei parametri di prova e delle condizioni operative definite per i test adottati nel presente lavoro.

5.1.1 Verifica dei materiali e del corretto montaggio del set-up sperimentale

Preventivamente alle prove sperimentali è risultato necessario verificare i materiali prodotti per valutare la corrispondenza tra questi e il progetto di riferimento.

Per assicurarsi che i provini fossero omogenei tra loro e avessero le stesse caratteristiche di quelli modellati tramite HyperMesh se ne è misurato peso, spessore e lunghezza. Successivamente è stata verificata la funzionalità del set-up progettato per il supporto del provino e il suo corretto accoppiamento con la piastra dello shaker.

Questi accertamenti sono risultati fondamentali, in quanto se ci fossero state differenze tra i provini prodotti o un montaggio non coerente con quello progettato e simulato, o nel peggiore dei casi un montaggio impossibile, i risultati sarebbero stati significativamente alterati o non realizzabili.

Di seguito sono riportate le immagini di tre provini nelle tre differenti lunghezze a confronto, dettagli delle superfici anteriore e posteriore di un provino, set-up del montaggio sperimentale, e montaggio dell'accelerometro. La differenza visiva che si nota tra i lati dei provini si

attribuisce al processo di produzione in sacco a vuoto, che ha reso più liscio il lato a contatto con il fondo e più ruvido quello superiore.



Figura 59-Provini di lunghezze 200 mm, 250 mm e 310 mm in materiale composito F155K285 HexPly parte anteriore



Figura 60-Provini di lunghezze 200 mm, 250 mm e 310 mm in materiale composito F155K285 HexPly parte posteriore

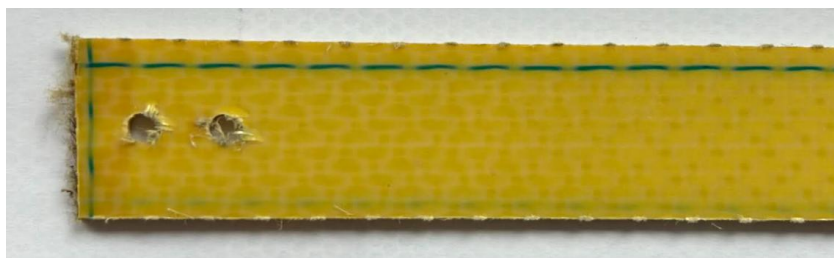


Figura 61-Dettaglio superficie anteriore provino materiale composito F155K285 HexPly

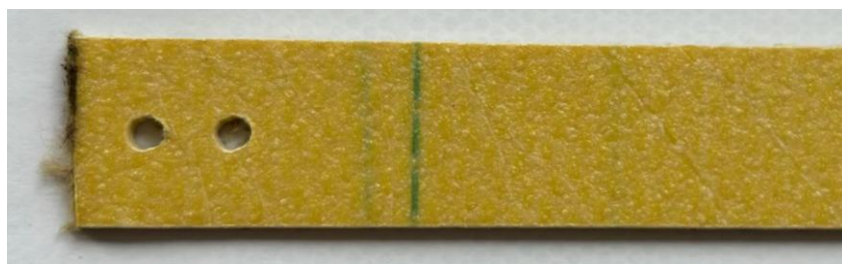


Figura 62-Dettaglio superficie posteriore provino materiale composito F155K285 HexPly

La seguente immagine mostra il set-up di montaggio del provino, sul quale è stato incollato e fissato l'accelerometro triassiale di misura, tramite PET e loctite, mentre l'accelerometro di controllo è stato fissato sulla piastra di interfaccia, con l'utilizzo degli stessi materiali.

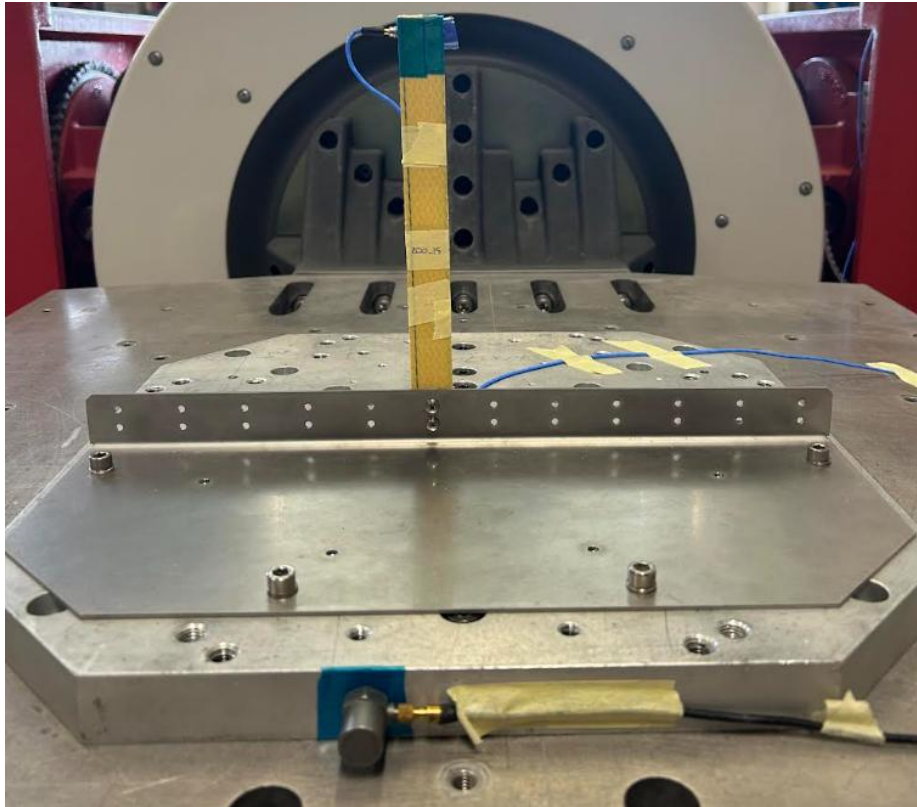


Figura 63-Set-up montaggio provino e accelerometri di misura e controllo

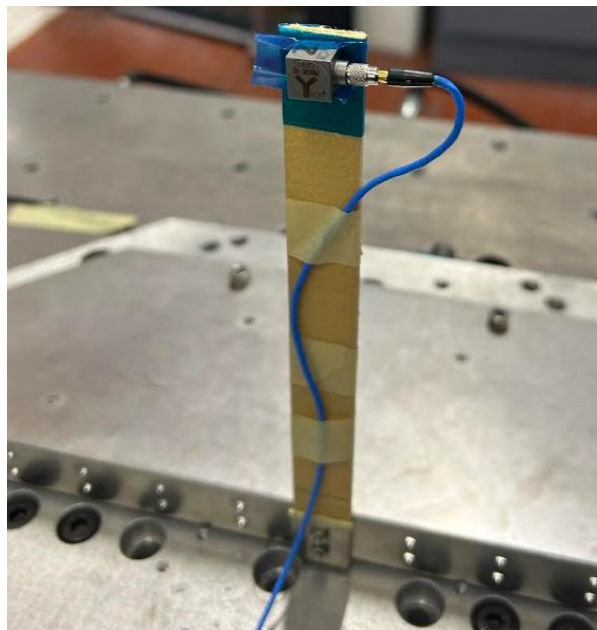


Figura 64-Montaggio accelerometro tramite nastro PET e Loctite

Ai provini è stato assegnato un identificativo numerico univoco, al fine di consentirne il riconoscimento.

In seguito a queste operazioni di controllo e verifica è stato possibile procedere con l'impostazione delle prove tramite software dedicato.

5.1.2 Software e strumentazione per il controllo e l'acquisizione dati

Il software che collega il macchinario con cui si svolgono i test e i software per l'inserimento e l'elaborazione dei dati è fornito da **Siemens**. Questo software viene infatti associato allo shaker e svolge il ruolo di interfaccia tra il sistema sperimentale e l'elaborazione digitale dei risultati.

All'interno del portfolio Siemens, che è un gruppo tecnologico che sviluppa strumenti di simulazione, vi è Simcenter, una piattaforma che integra simulazioni numeriche e prove sperimentali. Nell'ambito del test svolto è **Simcenter Testlab** a gestire set-up, controllo della prova, acquisizione e analisi dei dati; mentre come Hardware di acquisizione collegato ai sensori si utilizza **Simcenter SCADAS**, che digitalizza il segnale.

Come spiegato all'interno del paragrafo 3.2.2 la prova svolta è una Tracked Sine Dwell che si pone l'obiettivo di trovare il numero di cicli che porta a rottura un provino fatto vibrare alla sua prima frequenza propria, preceduta da una prova di Swept Sine per trovare questa frequenza, per ogni provino testato.

Nel paragrafo citato viene inoltre spiegato il closed-loop che lega gli strumenti software utilizzati:

- Computer di controllo con Simcenter Testlab dove i segnali di vibrazione sono visualizzabili in tempo reale.
- Hardware Simcenter SCADAS, il quale converte i segnali analogici provenienti dagli accelerometri in segnali digitali e genera un segnale di uscita verso l'amplificatore/shaker.
- Amplificatore e Shaker che ricevono il segnale e permettono la vibrazione del banco di prova.
- Provino testato, che prende il nome di DUT.
- Accelerometro di controllo, necessario per controllare che venga mantenuto il profilo specifico di vibrazione richiesto.

- Accelerometro di misura, montato sull'oggetto in prova per monitorare la vibrazione nel punto richiesto dell'oggetto in prova.

5.1.3 Parametri di prova e condizioni operative

Di seguito sono descritte le tipologie di parametri di input e di output inserite per lo svolgimento delle prove.

Sweep Sine

La prova Sweep Sine calcola la FRF armonica da cui è possibile ricavare la frequenza di risonanza e l'amplificazione del provino.

Si svolge su un range di frequenze, da 5 Hz a 160 Hz, con una risoluzione variabile per avere un passo più fine solo dove necessario, con uno sweep rate di 1 Oct/min e mantenendo l'accelerazione di controllo costante a 1 g sul sensore di riferimento.

Il sistema estrae la risposta armonica alla frequenza di eccitazione e ne calcola il rapporto con l'input, restituendo quindi una curva FRF complessa $H(f)$ che permette di identificare risonanze e amplificazioni sul punto in cui è posizionato l'accelerometro di misura.

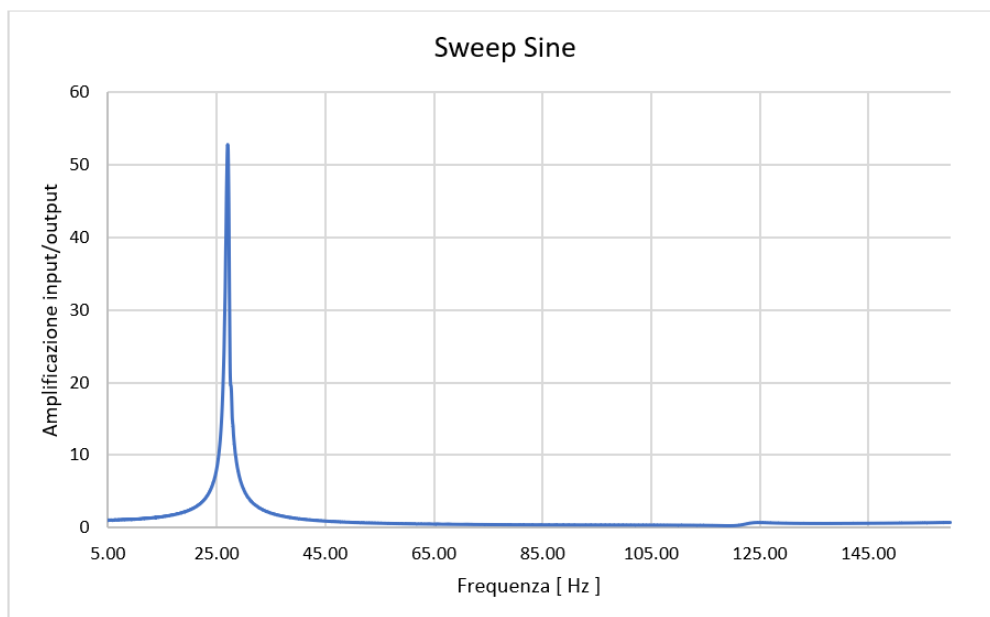


Figura 65-Sweep Sine provino 200_15 in materiale composito HexPly F155K285

Tracked Sine Dwell

Questa prova rappresenta l'effettivo test di fatica svolto su provini; la tipologia scelta serve a mantenere il provino in risonanza, così che l'accelerazione in input risulti sempre amplificata e la prova abbia quindi una durata ridotta, grazie all'amplificazione del carico in input.

Il sistema rileva la frequenza di risonanza, il fattore di amplificazione e la fase dalla relativa

prova sweep sine. Il controllo della risonanza è impostato con il metodo della fase. In input devono essere specificati i g a cui si vuole eseguire la prova, la durata massima oltre la quale il test si arresta anche se non terminato e la frequenza inferiore. Quest'ultima rappresenta il parametro di stop: quando la frequenza di risonanza raggiunge tale valore, il test viene interrotto. In questo caso si imposta una riduzione del 10% rispetto alla frequenza iniziale, per le motivazioni espresse nel Capitolo 3, cioè per ottenere una riduzione della rigidità intorno al 20%.

In output si ottengono lo spostamento nel tempo, la frequenza nel tempo e lo spettro di accelerazione in scala peak nel tempo, riferiti all'accelerometro di misura; la FRF complessa, espressa come rapporto tra il canale di misura e il canale di controllo, associata ai vari istanti/frequenze, che rappresenta l'amplificazione in ogni istante.

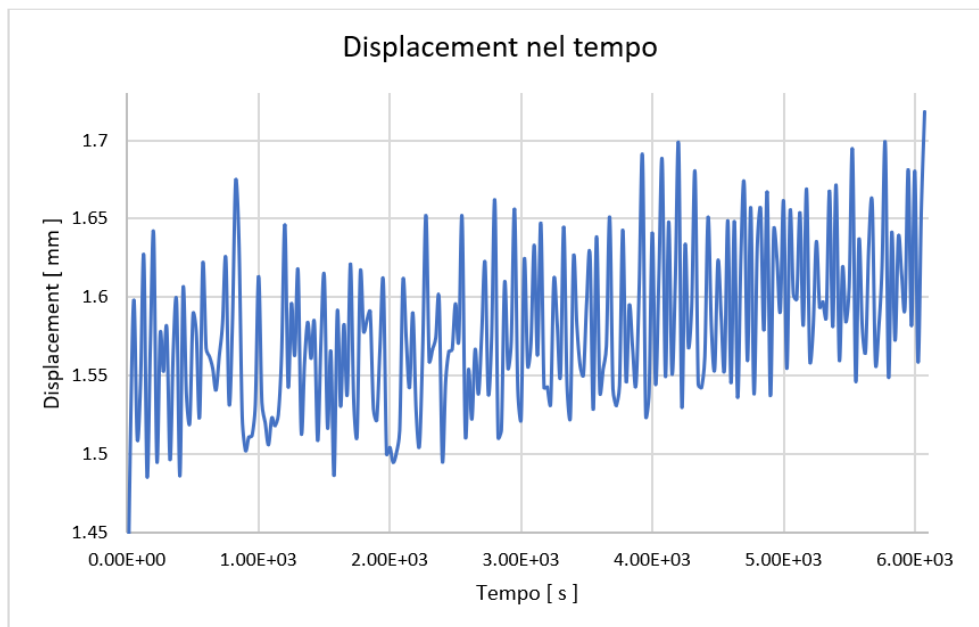


Figura 66-Spostamento istantaneo nel tempo provino 200_15 prova 4g

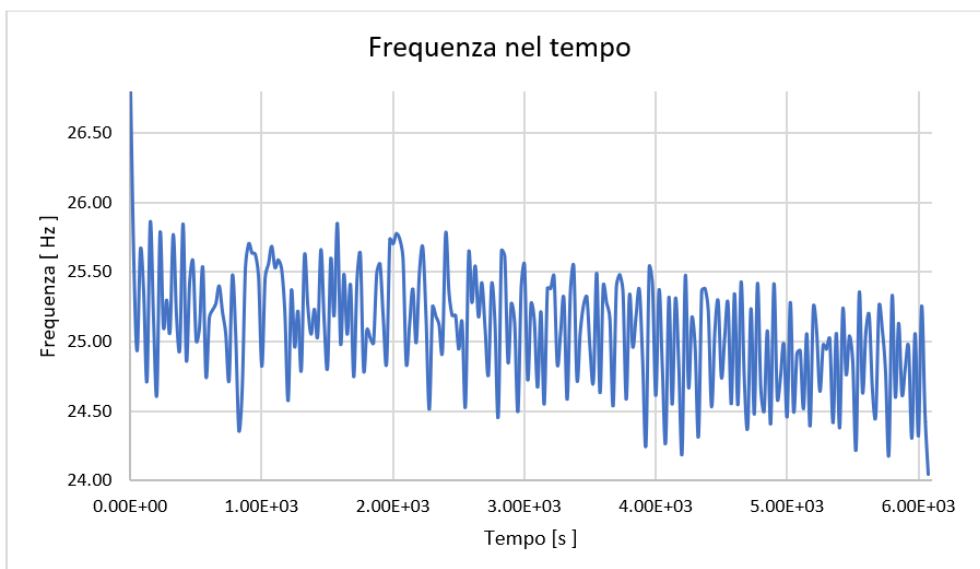


Figura 67-Frequenza istantanea nel tempo provino 200_15 prova 4g

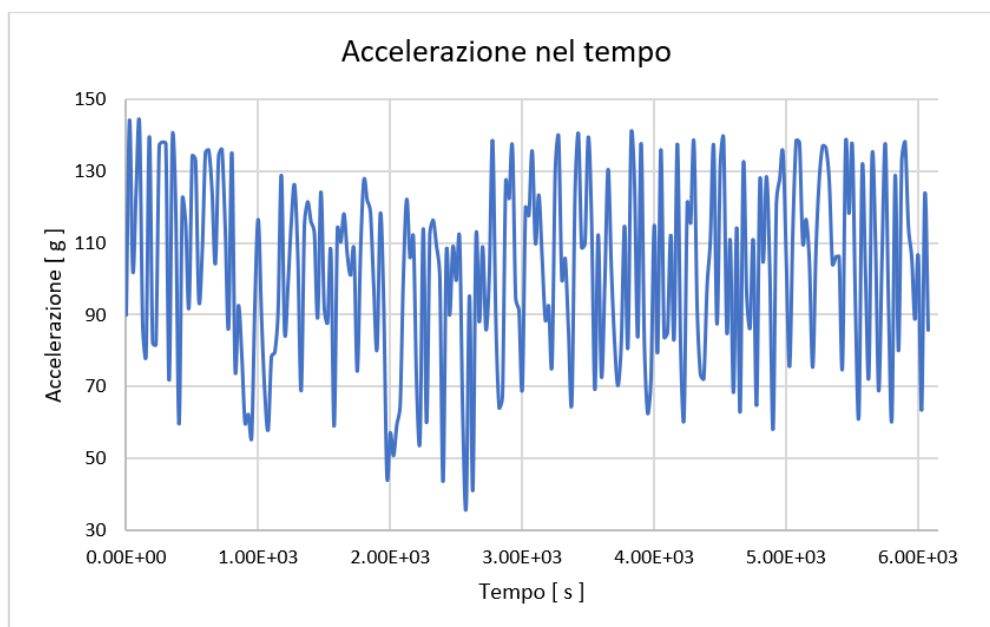


Figura 68-Spettro di accelerazione in scala peak nel tempo provino 200_15 prova 4g

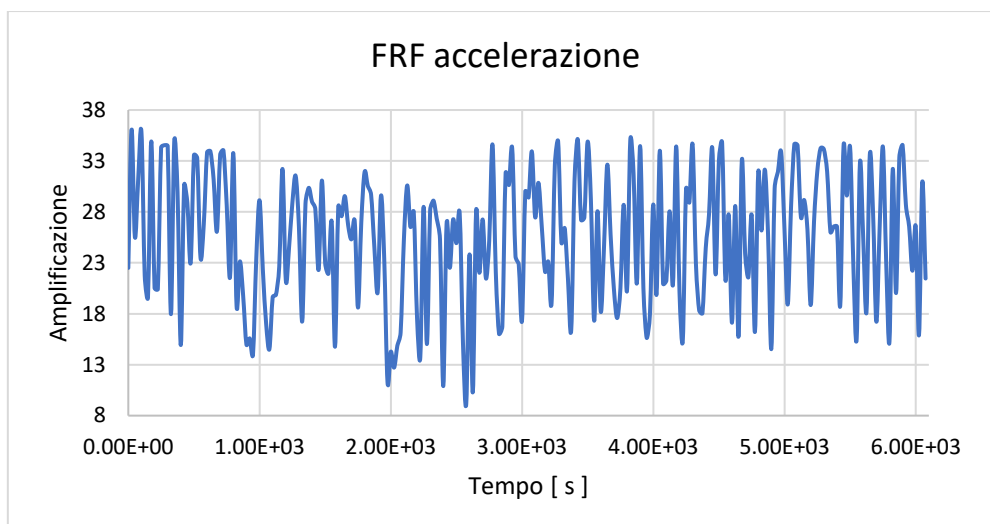


Figura 69-Funzione di risposta in frequenza provino 200_15 prova 4g

5.2 Prove sperimentali

L'obiettivo di questo sottocapitolo è la descrizione dettagliata del programma di prove sperimentali, quindi le modalità e i parametri adottati, in particolare i valori impostati come dati di input e i risultati ottenuti.

5.2.1 Sweep per confronto modello numerico

La prima parte di test ha avuto come obiettivo la validazione del modello numerico utilizzato per le simulazioni durante lo studio preliminare del test.

L'utilizzo di un modello numerico coerente è fondamentale poichè i valori di input utilizzati nei test di fatica sono stati scelti in base a simulazioni svolte tramite HyperMesh; inoltre risulta necessario il modello FEM per ottenere lo stress equivalente sul provino all'incastro da inserire nella curva di fatica. È quindi necessario che mostri una buona corrispondenza con il comportamento reale.

Sono state eseguite tre prove di sweep, rispettivamente su provini di lunghezza 200 mm, 250 mm e 310 mm, al fine di verificare che il modello risultasse coerente e accurato per tutte le lunghezze considerate. Di seguito sono riportate le frequenze di risonanza ottenute sperimentalmente, confrontate con quelle ricavate dalla simulazione.

Provino	1	2	3
Input [g]	1	1	1
F_n calcolata	28.07	18.05	11.91
F_n misurata	27.4	18.5	11.76
Errore %	2.45%	-2.43%	1.28%

Tabella 11-Confronto della prima frequenza naturale ricavata da modello e test su provini compositi HexPly F155K285 di lunghezze 200 mm, 250 mm, 310 mm.

Poiché l'errore risulta inferiore al $\pm 3\%$ per tutte e tre le lunghezze, è possibile confermare la validità del modello e utilizzarlo come strumento di previsione a supporto delle scelte progettuali.

Considerando tutti i test di sweep che saranno svolti sui provini da 200 mm, l'errore massimo risulta circa del 5%, valore considerato accettabile e attribuibile a effetti pratici come piccoli disallineamenti, variazioni nel serraggio dei morsetti, tolleranze dimensionali e attriti locali, che non sono contemplati nel modello ideale. Tali fattori non compromettono l'affidabilità del modello per le scelte progettuali.

5.2.2 Dwell per prove di fatica

Si sono testati 12 provini, 3 per ciascuno dei 4 differenti livelli di carico: 3 g, 4 g, 4.5 g e 5 g.

Di seguito si riportano i valori di input impostati e i valori di output estratti automaticamente dal test, ossia disponibili nell'immediato senza bisogno di ulteriori elaborazioni.

I_p	a_i	F_n [Hz]	F_s [Hz]	R	Q	ζ	Φ [°]	t [s]
200_1	5 g	27.56	24.81	72	33.3	2%	102.69	392
200_3		26.94	24.25	60.5	45.7	1%	116.87	280
200_9		27.31	24.58	56.4	37.1	1%	55.93	352
200_11	4.5 g	26.57	23.91	50	43.8	1%	86.94	1125
200_12		26.94	24.25	51.8	49.3	1%	93.3	850
200_13		26.94	24.25	66.3	61.4	1%	98.73	2480
200_6	4 g	26.57	23.91	58.3	40.7	1%	123.74	10950
200_7		26.94	24.25	60.1	44.2	1%	65.21	2625
200_15		26.72	24.05	53.1	41.8	1%	63.83	6075
200_4	3 g	26.94	24.25	63.3	50.3	1%	98.08	10787.5
200_5		26.94	24.25	62.6	58.4	1%	98.08	37119
200_14		26.87	24.18	51.7	41.9	1%	62.72	43330

Tabella 12-Valori di input e output prove tracked sine dwell per ogni provino

Dove I_p è l'identificativo del provino, a_i è l'accelerazione impostata come input e rappresenta il livello di carico a cui ogni provino è stato testato, F_n la prima frequenza propria, F_s la frequenza di stop impostata, R l'amplificazione, Q il fattore di qualità di risonanza, ζ lo smorzamento del sistema, Φ la fase e t il tempo.

Frequenza naturale, amplificazione, fattore di qualità di risonanza e fase si ricavano dalla prova di sweep all'istante in cui avviene il primo fenomeno di risonanza. La frequenza di stop è la precedente ridotta del 10% e lo smorzamento è calcolato dal fattore di qualità come $\zeta = 1/2Q$. Il tempo rappresenta i secondi che la prova ha impiegato a ridurre la frequenza naturale del provino fino alla frequenza di stop, quindi l'effettiva durata del test.

5.3 Elaborazione dati e risultati

Dalla prova di fatica si estraggono lo spettro di accelerazione nel tempo e la frequenza nel tempo, da elaborare per calcolare dal primo l'accelerazione equivalente, che inserita nel modello FEM restituisce lo stress equivalente, dal secondo il numero di cicli.

5.3.1 Calcolo dello Stress Equivalente e del Numero di cicli

Accelerazione equivalente

Il valore di accelerazione viene ricavato dallo spettro di accelerazione nel tempo; poiché il software ha impostato automaticamente un tempo di campionamento ampio è stato necessario ricostruire il segnale al fine di ottenere valori accurati.

Si è ricostruito l'andamento delle frequenze nel tempo durante la prova, interpolando i punti discreti estratti dal software, utilizzando un intervallo di campionamento temporale più ristretto, per poterne osservare il reale profilo e da questo ricostruire la funzione sinusoidale dell'accelerazione.

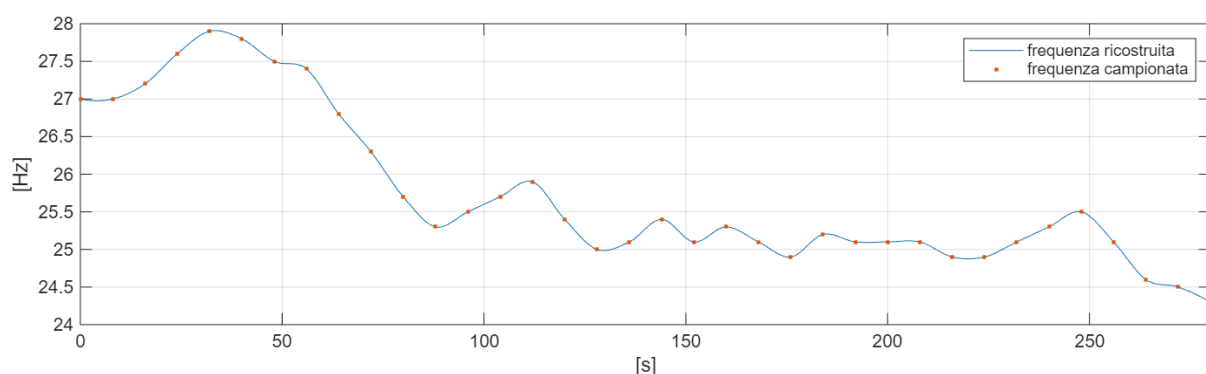


Figura 70-Andamento della frequenza ricostruita per la prova a 5g sul provino 200_3

Nello stesso modo è stato ricostruito l'andamento della sinusoide nel tempo. Al coefficiente A dell'ampiezza della funzione seno è stato assegnato per semplicità il valore unitario, poiché ai fini dell'elaborazione risulta necessario solo valutare il momento temporale in cui la sinusoide

raggiunge il massimo. Per ogni prova sarebbe corretto sostituire questo valore con l'accelerazione reale in g imposta come condizione di carico.

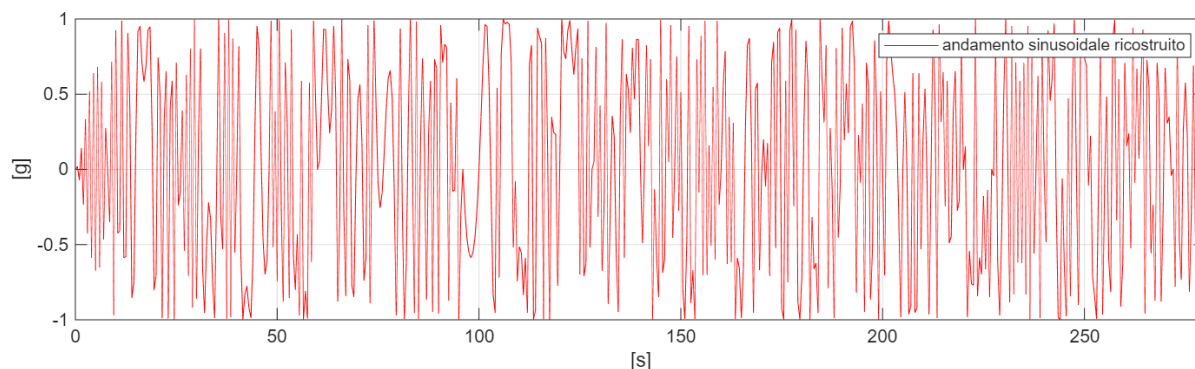


Figura 71-Andamento sinusoide ricostruita per la prova a 5g sul provino 200_3

I valori della sinusoide ricostruita sono stati sovrapposti sulla scala temporale ai dati di accelerazione estratti; questo ha permesso di valutare se i valori discreti potessero essere considerati valori di picco, in caso di coincidenza nel tempo con il valore di massimo della sinusoide. Grazie alla ricostruzione intera dell'andamento della funzione seno si è potuto tenere conto di una percentuale di errore, potendo osservare l'intorno del picco sinusoidale. I valori estratti nell'istante in cui la sinusoide ha valore massimo (con un errore del 10%) sono considerati valori di picco. Per la maggior parte delle prove, un elevato numero di valori estratti trova corrispondenza, per cui è considerabile un valore di picco.

carico 5g - provino 200_3			
t	f	sin	a
16	27.20	0.99	159.36
32	27.90	0.92	143.58
64	26.80	-0.99	141.09
104	25.70	-0.95	134.42
112	25.90	-0.99	154.93
152	25.10	-0.98	120.62
168	25.10	-0.92	148.94
184	25.20	0.95	94.08
192	25.10	0.99	67.09
208	25.10	0.93	147.52
232	25.10	-0.99	98.83

Tabella 13-Valori di tempo, frequenza, sinusoide, accelerazione per cui l'accelerazione campionata risulta un valore di picco, provino 200_3 prova a 5g

Si è ricostruito inoltre l'andamento dell'accelerazione nel tempo, interpolando i dati estratti, così da valutare se durante la prova si fossero raggiunti valori maggiori di quelli campionati.

Nella maggior parte dei casi il valore massimo di accelerazione ricostruito corrisponde al valore massimo di accelerazione campionato dal software durante il test.

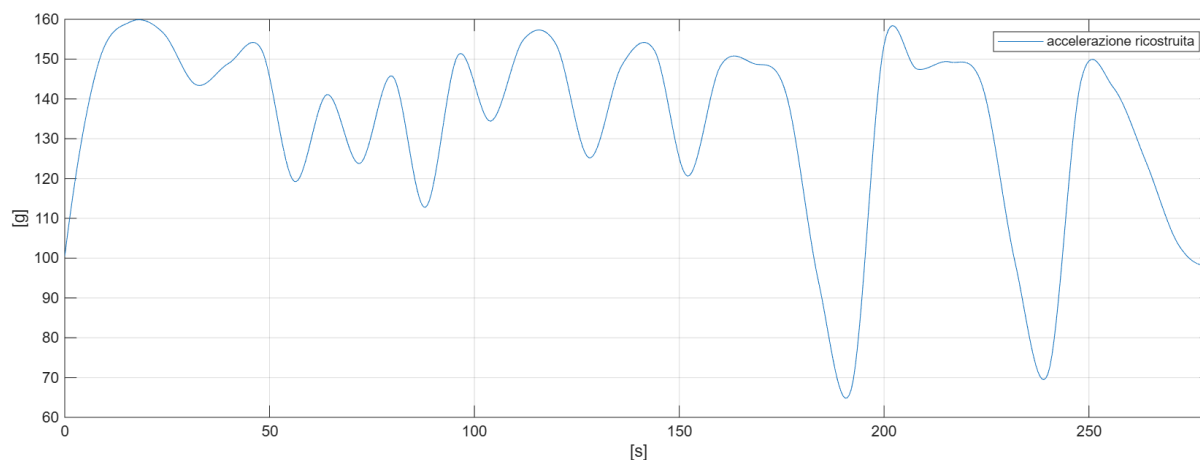


Figura 72-Andamento accelerazione ricostruita tramite interpolazione, provino 200_3 prova a 5g

carico 5g - provino 200_3 - accelerazione	
valore massimo interpolato	159.90
valore massimo campionato	159.36
valore massimo campionato che risulta picco	159.36

Tabella 14-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_3 prova 5g

Questo ha permesso di scegliere con maggiore consapevolezza il valore di accelerazione da utilizzare a titolo di riferimento nel modello FEM per ricavare la tensione a cui il provino è stato sottoposto durante la prova.

Per questo motivo si è scelto di utilizzare, a titolo di esempio, per ogni livello di carico, il valore di accelerazione maggiore campionato dal software nelle tre prove; in questo modo, nel peggiore dei casi, il carico è sovrastimato, permettendo di lavorare a favore di sicurezza.

In questo capitolo vengono riportati come esempio i valori ottenuti sui dati estratti dal test svolto a 5g sul provino numero 3, i risultati delle restanti prove vengono riportati all'interno dell'Appendice: Elaborazione dati prove.

Stress equivalente

Lo stress viene calcolato applicando l'accelerazione, ricavata dai dati sperimentali come appena spiegato, al modello FEM costruito in HyperMesh, svolgendo un'analisi statica. L'accelerazione genera uno stress nel materiale dal quale è possibile ricavare lo stress equivalente, cioè lo stress reale che il provino subisce sotto la specifica sollecitazione.

Dalla simulazione viene estratto il valore di tensione in direzione longitudinale alle fibre, poiché, come spiegato nel Capitolo 3, teoricamente risulta l'unica componente significativa; in prossimità dell'incastro, teoricamente punto più sollecitato; e nelle fibre esterne dei ply esterni, poiché teoricamente rappresentano le zone più sollecitate e di probabile cedimento. In particolare nell'elemento 1107, lo stesso considerato nelle analisi precedenti, per consentire confronti diretti tra i risultati.

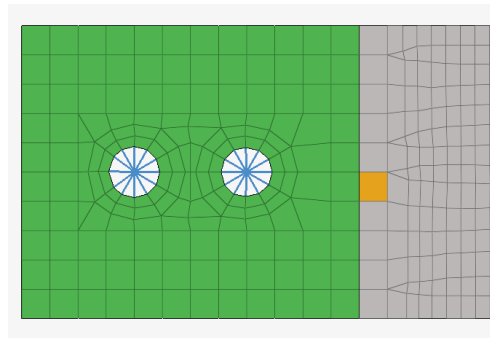


Figura 73-Elemento 1107 provino modellato in HyperMesh

Numero di cicli

Il numero di cicli si ricava dall'andamento della frequenza nel tempo. Poiché la frequenza non è costante ma varia continuamente, si considera il suo valore medio sull'intera durata della prova. Moltiplicando tale valore per il tempo totale della prova si ottiene il numero complessivo di cicli che hanno portato al cedimento del provino.

Risultati

Di seguito sono riportati i valori ottenuti dall'elaborazione dei dati sperimentali; essi saranno utilizzati a titolo di esempio per costruire la curva caratteristica e per formulare le relative considerazioni e conclusioni.

Lo stress è espresso sotto forma di rapporto, considerando il livello inferiore uguale al valore unitario e gli altri calcolati in rapporto a questo.

l_p	a_i [g]	a_{eq} [g]	σ	N
200_1	5 g	159.36	1.243	1.02E+04
200_3				7.21E+03
200_9				9.14E+03
200_11	4.5 g	149.09	1.163	2.81E+04
200_12				2.14E+04
200_13				6.26E+04
200_6	4 g	144.25	1.125	2.75E+05
200_7				6.63E+04
200_15				1.53E+05
200_4	3 g	128.14	1	2.74E+05
200_5				9.59E+05
200_14				1.10E+06

Tabella 15-Valori di accelerazione equivalente, stress equivalente e numero di cicli ricavati dai dati sperimentali per ogni provino

5.3.2 Curva S-N

Per descrivere la resistenza a fatica di un materiale si utilizza la curva S-N, che mette in relazione l'ampiezza della tensione applicata e il numero di cicli a cui si è riportata rottura, costruita a partire dai risultati sperimentali ottenuti dai test. Risulta uno strumento fondamentale per la caratterizzazione a fatica e per la valutazione della vita utile di un materiale in condizioni di carico ciclico, in quanto permette di descriverne l'andamento attraverso modelli matematici basati su legge di potenza, oltre a consentire la sintetizzazione dei risultati sperimentali.

Per costruire la curva è necessario definire il rapporto di carico $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ riferito al segnale di input. La legge di moto dello shaker è $x(t) = A \sin(\omega t)$, dove A rappresenta l'ampiezza del carico di accelerazione, per cui, essendo il segnale di input sinusoidale simmetrico e alternato a media nulla, si ha $R = -1$.

La legge di moto del provino su un punto specifico è $x(t) = A \sin(\omega t) + \Phi$, difatti la risposta che si ottiene in uscita non è puramente sinusoidale a causa di fenomeni di risonanza e smorzamento.

L'asse delle ascisse si rappresenta in scala logaritmica, per facilitare la lettura dell'ampio intervallo di cicli a fatica considerati nei test, come di consuetudine secondo la convenzione di Wöhler.

La legge di potenza utilizzata per descrivere l'andamento medio dei dati è $\sigma_a = KN_i^a$, che in scala log-log diventa lineare. A partire da questa e dalle coppie di dati sperimentali (σ_a, N_i) , attraverso regressione lineare ai minimi quadrati, si ricavano i parametri K e a , così ottenendo la curva S-N media.

Nel caso specifico $K = 236.467 \text{ MPa}$ e $a = -0.044$.

Viene calcolata la deviazione standard dei residui in scala $\log_{10}(\sigma_a)$ come scarto quadratico medio tra i valori sperimentali $\log_{10}(\sigma_a)$ e i corrispondenti valori ricostruiti tramite la retta di regressione, come metodo di valutazione della dispersione. Supponendo come normale la distribuzione degli scarti dei dati rispetto alla curva media, vengono costruite due curve aggiuntive che corrispondono a ± 1 deviazione standard dalla curva media. Queste permettono di valutare la dispersione dei dati raccolti durante l'esperimento.

La deviazione standard $\log_{10}(\sigma_a) = 0.0122$, cioè $\pm 1\sigma$ corrisponde a $\pm 2.85\%$ sulla tensione. Questo valore indica che la dispersione è contenuta.

I punti sperimentali ottenuti tramite il medesimo livello di carico vengono rappresentati con lo stesso colore, in modo da evidenziare la dispersione della vita a fatica per ogni livello, ottenuta sui diversi provini.

Questa tipologia di rappresentazione rende facile l'interpretazione della curva e la lettura qualitativa dell'influenza dello scatter in questa campagna sperimentale.

Di seguito è riportato il grafico che rappresenta la curva S-N del materiale composito HexPly® F155K285 sottoposto a flessione ciclica.

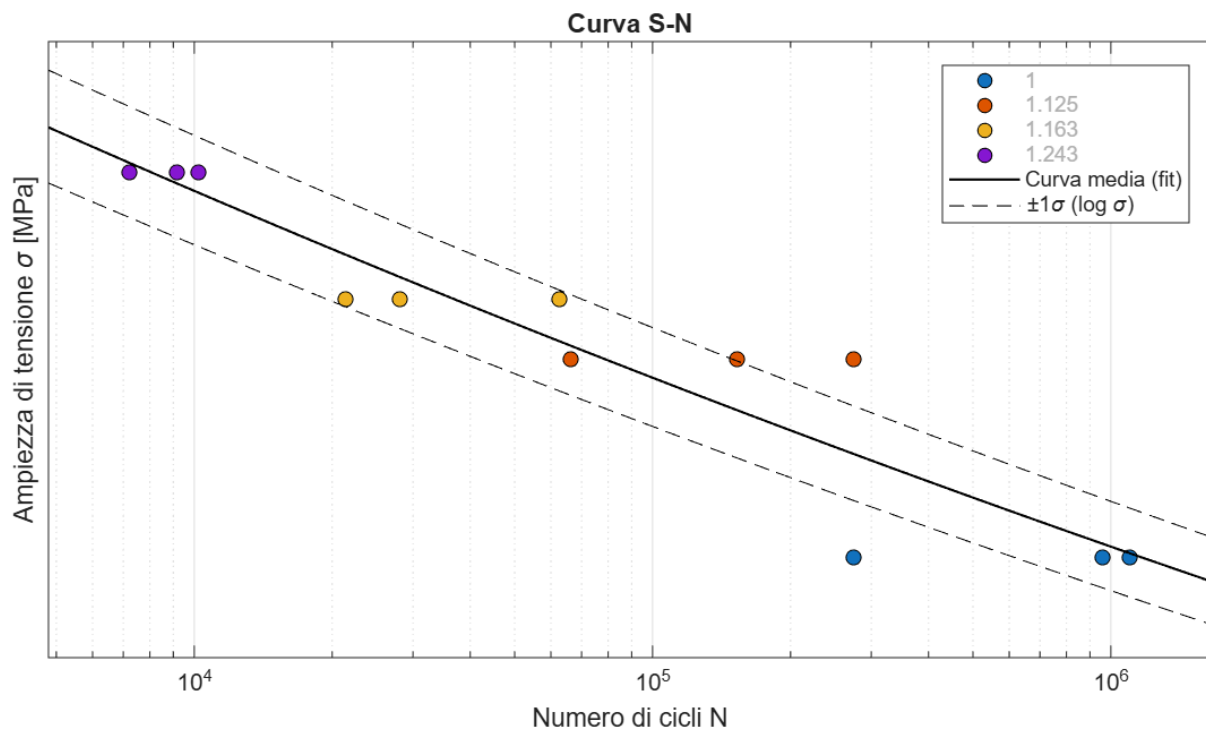


Figura 74-Curva S-N con $R=-1$ del materiale composito HexPly F155K285 sottoposto a flessione ciclica con 4 livelli di carico

5.3.3 Valutazione del comportamento a rottura e confronto teorico-sperimentale

La previsione del cedimento riveste un ruolo centrale nella caratterizzazione di un materiale a fatica. Come descritto nel Capitolo 1, la rottura può avvenire per diversi meccanismi. Si analizzano le principali ipotesi di rottura e si confrontano con i risultati sperimentali ottenuti.

Trend di potenza

Si riscontra la presenza di un trend di potenza per cui il numero di cicli che porta a rottura diminuisce all'aumentare del livello di carico.

Inoltre si dimostra che il FI, all'interno dell'intervallo di carico considerato, descrive correttamente il trend qualitativo della vita a fatica del materiale, evidenziando la presenza di una relazione monotona tra il livello di carico e il numero di cicli a rottura. A un livello di carico di 5 g corrisponde un $FI = 0.92$, valore molto prossimo alla condizione di cedimento, per cui ci si aspetta una vita a fatica ridotta, infatti solo un provino raggiunge 10^4 cicli. Al contrario a 3 g, dove il $FI = 0.49$, valore significativamente distante dal cedimento che fa ipotizzare una vita a fatica più lunga, un provino arriva a superare i 10^6 cicli.

Componenti di carico

Il provino è assimilato a una trave snella caricata in punta che produce sollecitazioni di momento flettente. A seguito dei test è possibile, tramite simulazione HyperMesh, ricavarsi lo stato degli sforzi.

La sollecitazione è di flessione ciclica con ciclo alterno simmetrico a media nulla ($R = -1$), quindi lo stato tensionale a cui il provino è sottoposto varia periodicamente tra trazione e compressione. In particolare quando le fibre esterne del ply superiore sono sollecitate a trazione, quelle del ply inferiore lo sono a compressione; con l'inversione del segno del momento flettente il ply superiore è compresso e quello inferiore in tensione.

La simulazione conferma che i valori massimi di tensione, predetti dalla teoria nel Capitolo 3, si riscontrano in prossimità dell'incastro, in corrispondenza delle fibre esterne dei due ply esterni e che la tensione in direzione longitudinale alle fibre risulta l'unica componente significativa. In seguito se ne riportano alcuni esempi.

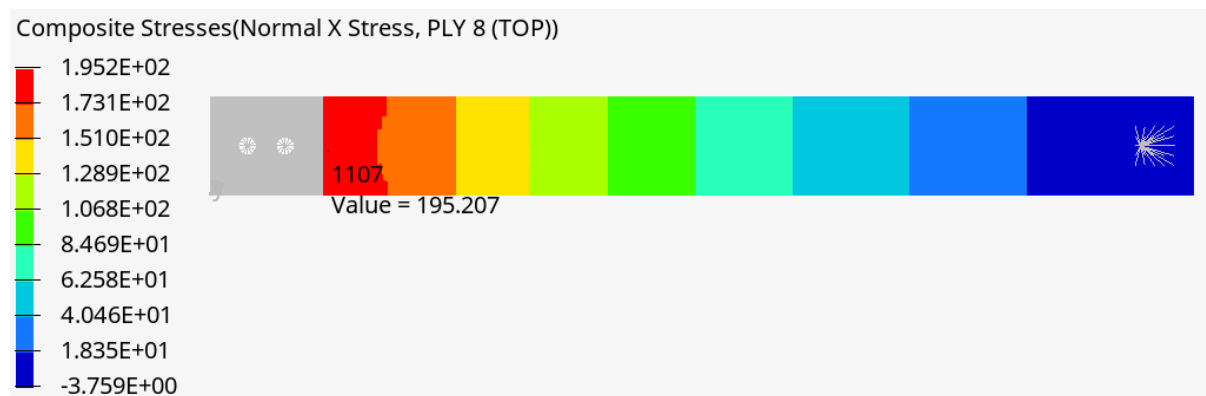


Figura 75-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply superiore

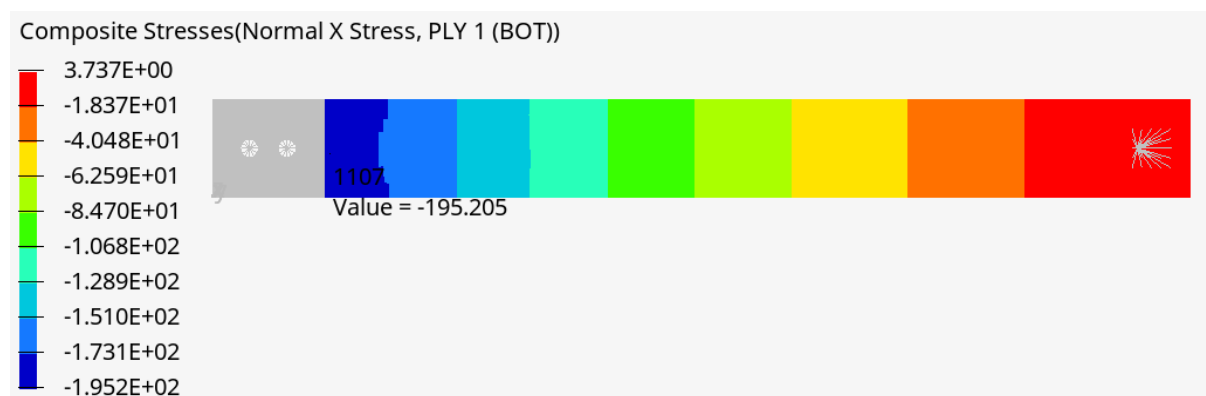


Figura 76-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply inferiore

Osserviamo che quando le fibre sul lato superiore del ply superiore sono tese, quelle sul lato inferiore del ply inferiore risultano compresse con tensione uguale e contraria. Questo si ripete

per ogni coppia di ply avvicinandosi all'asse neutro. Si dimostra inoltre come avvicinandosi all'asse neutro del provino la tensione diminuisca.

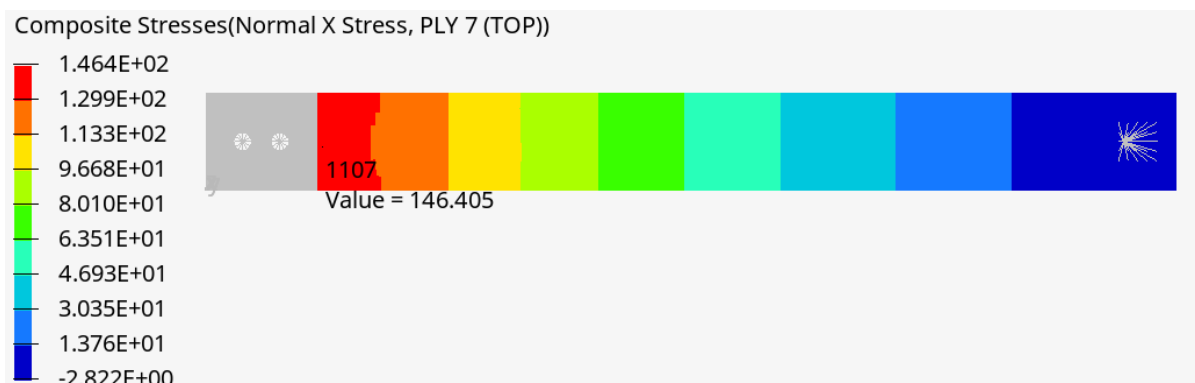


Figura 77-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply numero 7 sulla faccia superiore

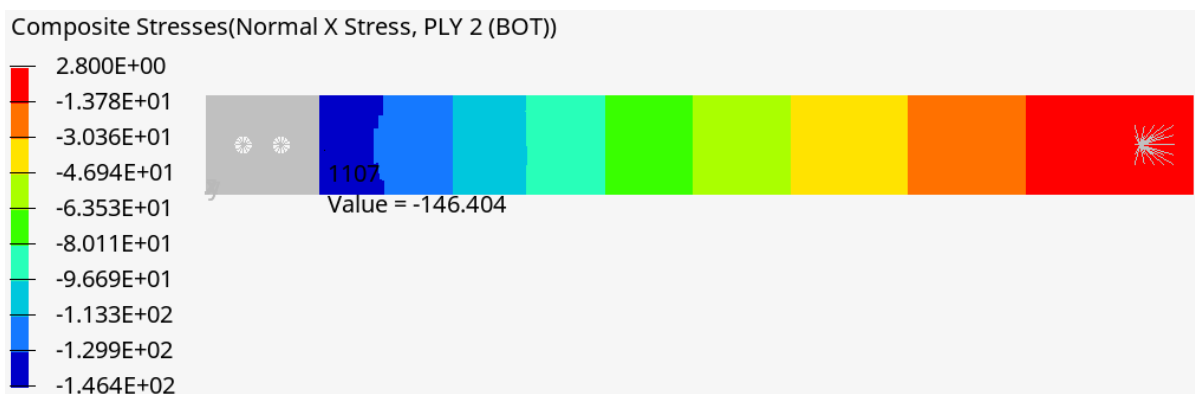


Figura 78-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply numero 2 sulla faccia inferiore

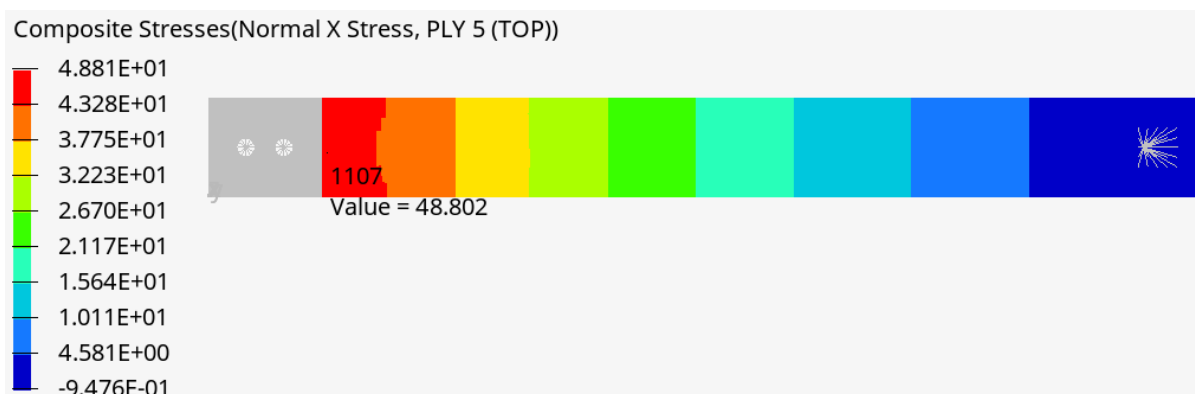


Figura 79-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply numero 5 sulla faccia superiore

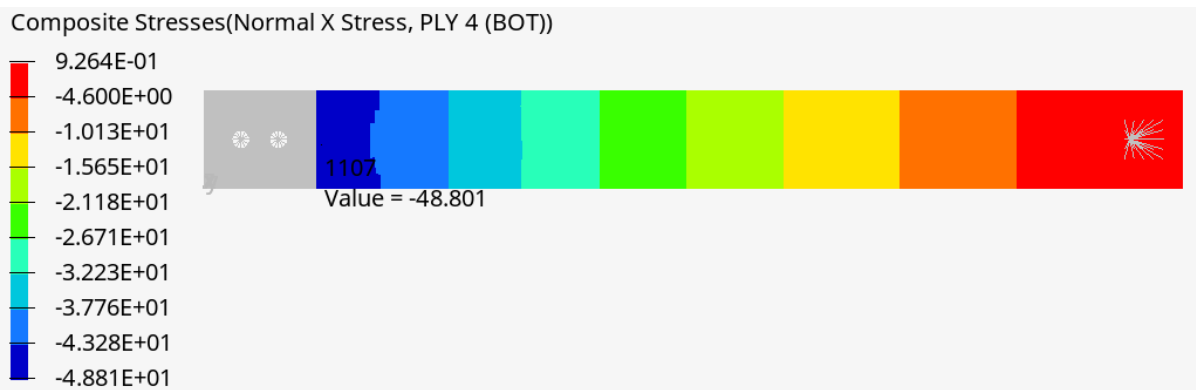


Figura 80-Contour plot tensione longitudinale nella faccia esterna del ply numero 4 sulla faccia inferiore

Osservazioni preliminari sullo stato superficiale

Dall'osservazione della superficie esterna dei provini non risulta la presenza di nessun difetto riconducibile all'innesco di cricche.

Sul lato del provino che durante i test era a contatto con la piastra di supporto si osserva un difetto superficiale esteso; questa imperfezione tuttavia è attribuibile al contatto con lo spigolo della piastra, quindi non associato a fenomeni di danneggiamento strutturale.



Figura 81-Foto incastro provini a seguito dei test

Conclusione

Il presente lavoro di tesi nasce con l'obiettivo di caratterizzare il comportamento dinamico e a fatica del materiale HexPly® F155K285, laminato composito in fibra aramidica e matrice epossidica, tramite l'integrazione di studio teorico, modellazione numerica e analisi sperimentale. Il settore ingegneristico, in modo particolare nel contesto dell'aerospazio, richiede l'impiego di materiali con proprietà meccaniche avanzate, da qui l'esigenza di una maggiore ricerca nel campo dei compositi, che offrono elevato rapporto tra resistenza e peso. Per una progettazione innovativa e affidabile ne risulta necessaria una conoscenza approfondita dei fenomeni di danneggiamento a fatica.

L'analisi numerica, sviluppata mediante modellazione agli elementi finiti tramite software CAE (HyperMesh e OptiStruct), ha permesso di descrivere il modello del materiale in modo accurato, riproducendone le proprietà ortotrope e la stratificazione. Le analisi modali, statiche e di risposta in frequenza hanno fornito risultati coerenti con le previsioni teoriche e con le prove sperimentali, permettendo la validazione del modello FEM. La frequenza naturale del primo modo proprio dei provini ricavata sperimentalmente ha trovato corrispondenza con i valori ottenuti tramite simulazione; le previsioni teoriche per cui la zona maggiormente sollecitata si sia riscontra nell'intorno dell'incastro sulle fibre superiori dei ply più esterni e che l'unica componente di tensione significativa risulta quella in direzione longitudinale alla fibre trovano riscontro nei risultati numerici.

La configurazione ideata per le prove sperimentali, differente rispetto agli standard ASTM, si è dimostrata innovativa e funzionale per la caratterizzazione del comportamento meccanico a flessione ciclica del materiale. La scelta di vincolare un solo estremo dei provini, congiuntamente all'utilizzo di uno shaker elettrodinamico come sistema di eccitazione, ha permesso di generare uno stato tensionale coerente con le ipotesi teoriche, concentrando le sollecitazioni principali nella zona di interesse al test.

L'utilizzo della Sine Dwell Tracking, modalità di prova vibrazionale che mantiene il provino in condizioni di risonanza, ha inoltre permesso l'amplificazione dell'accelerazione per l'intera durata della prova e di conseguenza dello stato tensionale applicato. Mediante tale approccio è stato possibile ridurre in modo significativo la durata dei tempi di prova rispetto alle tradizionali campagne di High Cycle Fatigue, senza compromettere l'affidabilità dei risultati. La stabilità e la riproducibilità del set-up, insieme ai risultati ottenuti, attestano la validità dell'approccio sperimentale adottato.

La curva S-N ottenuta dai test di fatica evidenzia dispersione nei risultati, dato compatibile con quanto riporta la letteratura per materiali polimerici fibrorinforzati, causata dall'anisotropia e della sensibilità ai difetti caratteristica dei compositi. Nonostante ciò, nel caso in esame, la dispersione non risulta eccessiva, i dati mostrano coerenza e ripetibilità sperimentale, riconducibile a un trend di potenza in linea con quanto atteso.

Sebbene i risultati siano positivi, il lavoro presenta margini di miglioramento; l'utilizzo di un tempo di campionamento più fitto e l'esecuzione di prove con accelerazione costante semplificherebbero la fase di post-processing, limitando la quantità di elaborazioni necessarie e di conseguenza riducendo possibile incertezza e percentuale di errore. Una futura estensione di questo studio potrebbe inoltre utilizzare un maggior numero di provini e introdurre modelli numerici avanzati per l'analisi del danno progressivo.

Complessivamente i risultati sperimentali hanno validato sia il modello numerico sia le ipotesi semplificative formulate a livello teorico, il metodo sviluppato si è rilevato coerente ed efficace al fine di caratterizzare in modo affidabile il comportamento a fatica del materiale analizzato. Nel contesto di un interesse crescente per i materiali compositi e del loro diffuso impiego nei settori quali l'aerospazio, questo elaborato contribuisce fornendo dati sperimentali sulla curva di fatica e una metodologia scalabile, applicabile a configurazioni analoghe o come base per indagini più complesse e avanzate.

Appendice: Elaborazione dati prove

Lo scopo dell'appendice è riportare l'andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruito tramite interpolazione a partire dai dati campionati dal software; i valori di tempo, frequenza, sinusoide, accelerazione per cui l'accelerazione campionata risulta un valore di picco; il confronto tra i valori di accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, per tutte le prove svolte.

Prove a 5g

Provino 200_1

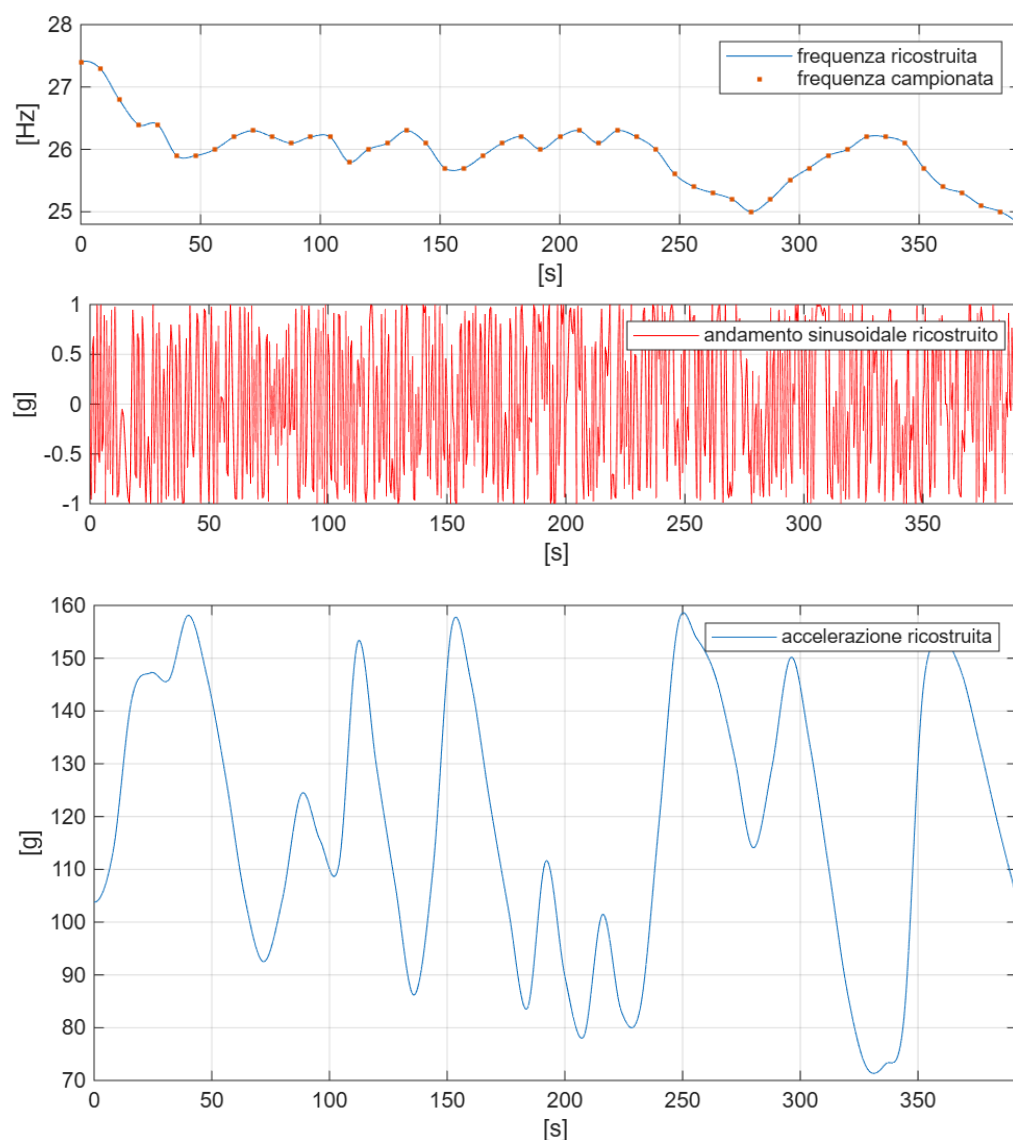


Figura 82-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 5g sul provino 200_1

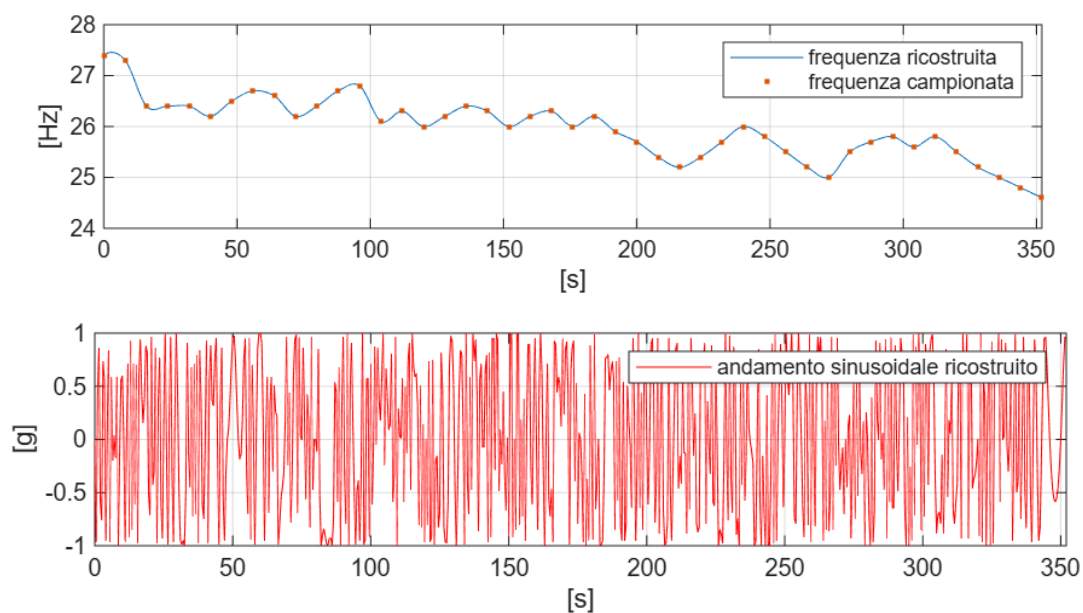
carico 5g - provino 200_1			
t	f	sin	a
16	26.8	0.99	142.31
32	26.4	0.94	146.06
48	25.9	0.98	146.39
64	26.2	-0.95	104.70
88	26.1	-0.99	124.26
96	26.2	-1.00	115.50
104	26.2	1.00	110.88
128	26.1	-0.95	106.81
136	26.3	-0.92	86.18
168	25.9	-0.98	123.06
184	26.2	0.91	83.58
224	26.3	0.98	83.04
248	25.6	0.93	156.31
264	25.3	-0.94	146.49
304	25.7	0.92	133.72
312	25.9	0.99	110.49
336	26.2	-0.92	73.04

Tabella 16-Valori di tempo, frequenza, sinusoide, accelerazione per cui l'accelerazione campionata risulta un valore di picco, provino 200_1 prova a 5g

carico 5g - provino 200_1 - accelerazione	
valore massimo interpolato	158.62
valore massimo campionato	158.13
valore massimo campionato che risulta picco	156.31

Tabella 17-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_1 prova 5g

Provino 200_9



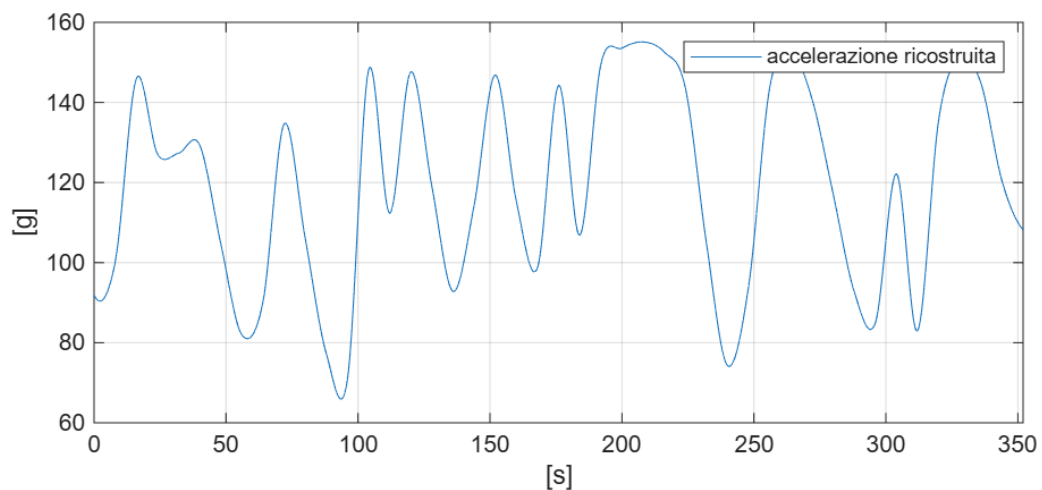


Figura 83-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 5g sul provino 200_9

carico 5g - provino 200_9			
t	f	sin	a
32	26.4	-0.96	127.31
56	26.7	-0.97	81.96
96	26.8	0.99	70.85
144	26.3	-0.99	114.29
184	26.2	0.93	106.82
192	25.9	-0.98	149.47
208	25.4	-0.98	155.10
216	25.2	-0.95	152.61
264	25.2	-0.98	152.62
296	25.8	-0.94	84.90
344	24.8	0.96	120.39
352	24.6	-1.00	108.18

Tabella 18-Valori di tempo, frequenza, senoide, accelerazione per cui l'accelerazione campionata risulta un valore di picco, provino 200_9 prova a 5g

carico 5g - provino 200_9 - accelerazione	
valore massimo interpolato	155.12
valore massimo campionato	155.10
valore massimo campionato che risulta picco	155.10

Tabella 19-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_9 prova 5g

Prove 4.5g

Provino 200_11

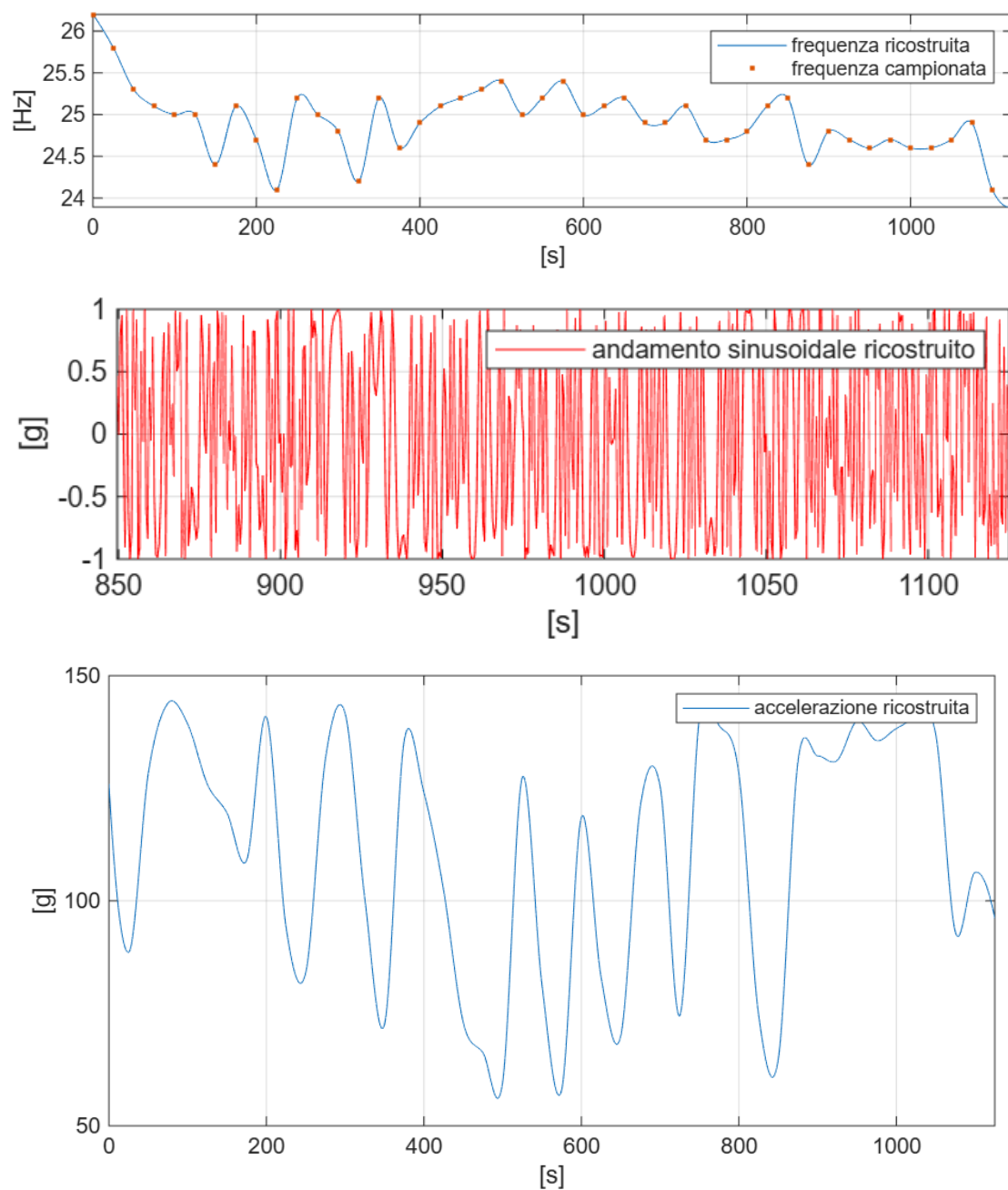


Figura 84-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4.5g sul provino 200_11

carico 4.5g - provino 200_11			
t	f	sin	a
/	/	/	/

Tabella 20-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_11 prova 4.5g

carico 4.5g - provino 200_11 - accelerazione	
valore massimo interpolato	145.55
valore massimo campionato	143.90
valore massimo campionato che risulta picco	/

Tabella 21-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_11 prova 4.5g

Provino 200_12

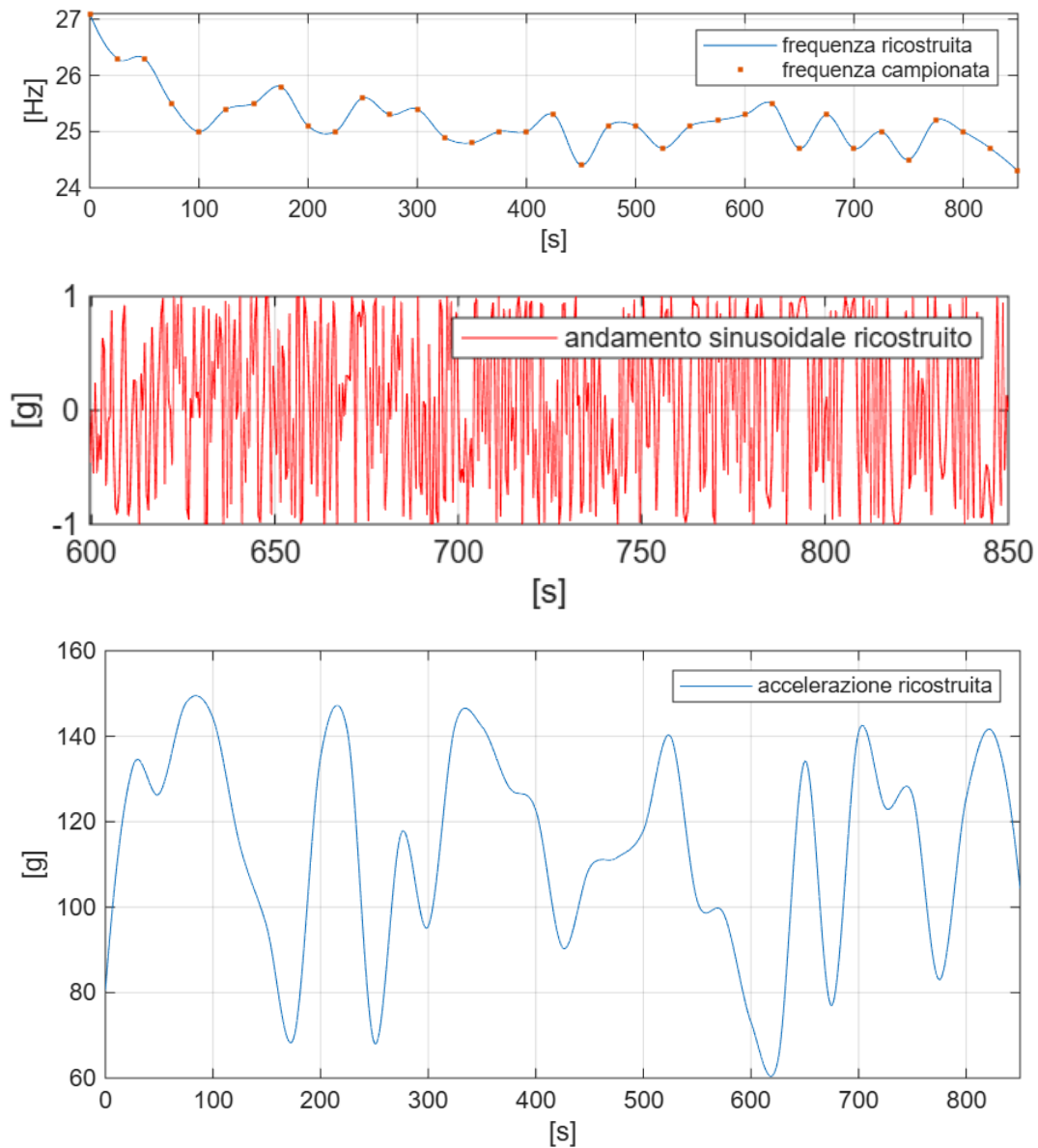


Figura 85-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4.5g sul provino 200_12

carico 4.5g - provino 200_12			
t	f	sin	a
/	/	/	/

Tabella 22-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_12 prova 4.5g

carico 4.5g - provino 200_12 - accelerazione	
valore massimo interpolato	149.47
valore massimo campionato	147.86
valore massimo campionato che risulta picco	/

Tabella 23-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_12 prova 4.5g

Provino 200_13

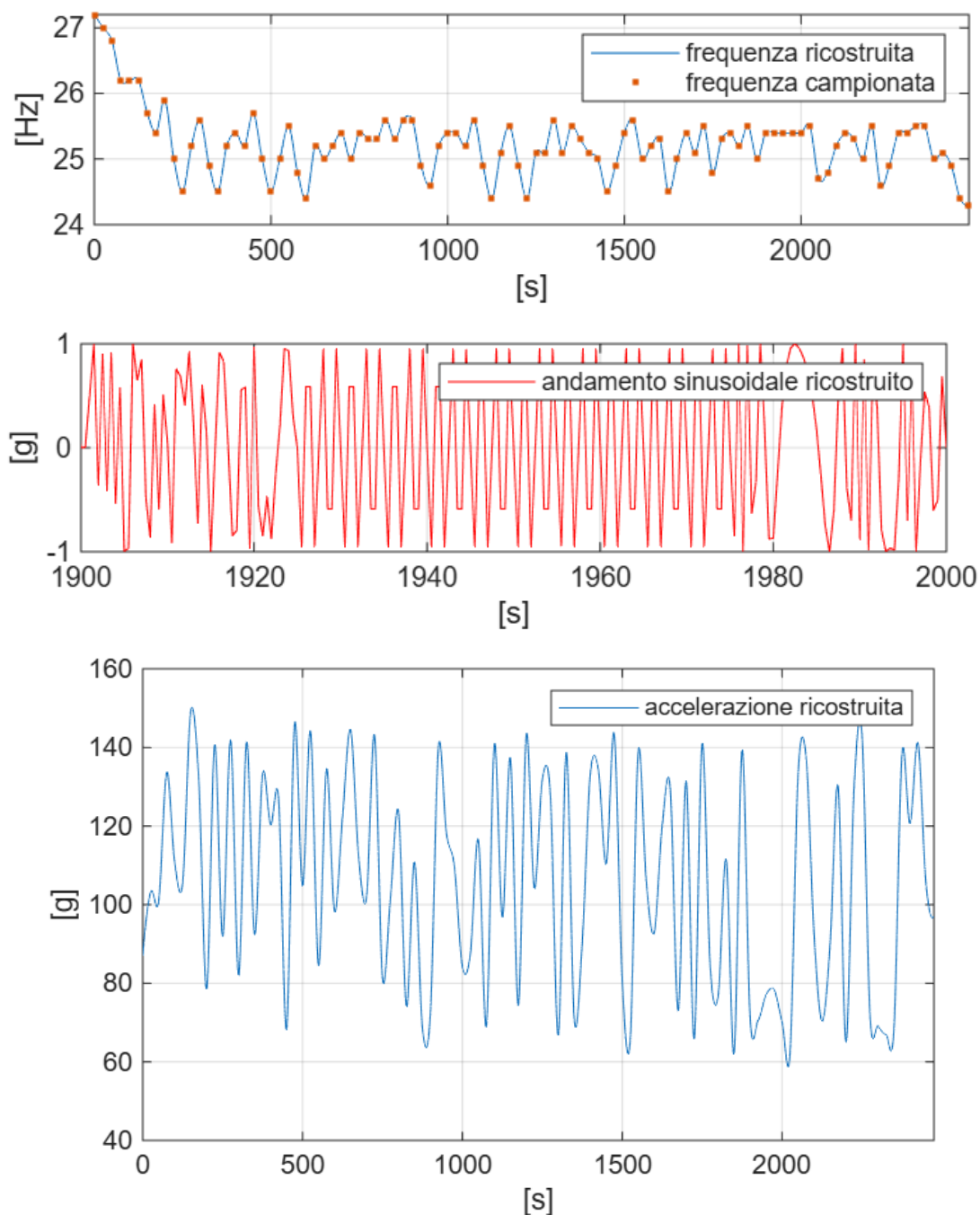


Figura 86-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4.5g sul provino 200_13

carico 4.5g - provino 200_13			
t	f	sin	a
/	/	/	/

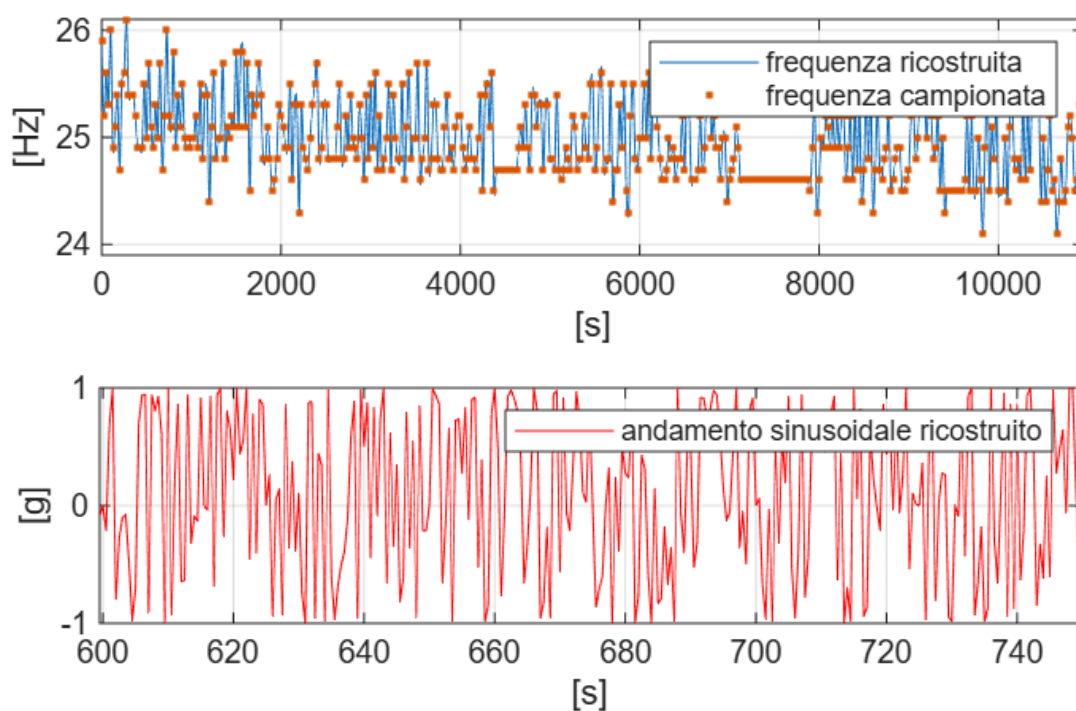
Tabella 24-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_13 prova 4.5g

carico 4.5g - provino 200_13 - accelerazione	
valore massimo interpolato	150.19
valore massimo campionato	149.09
valore massimo campionato che risulta picco	/

Tabella 25-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_13 prova 4.5g

Prove 4g

Provino 200_6



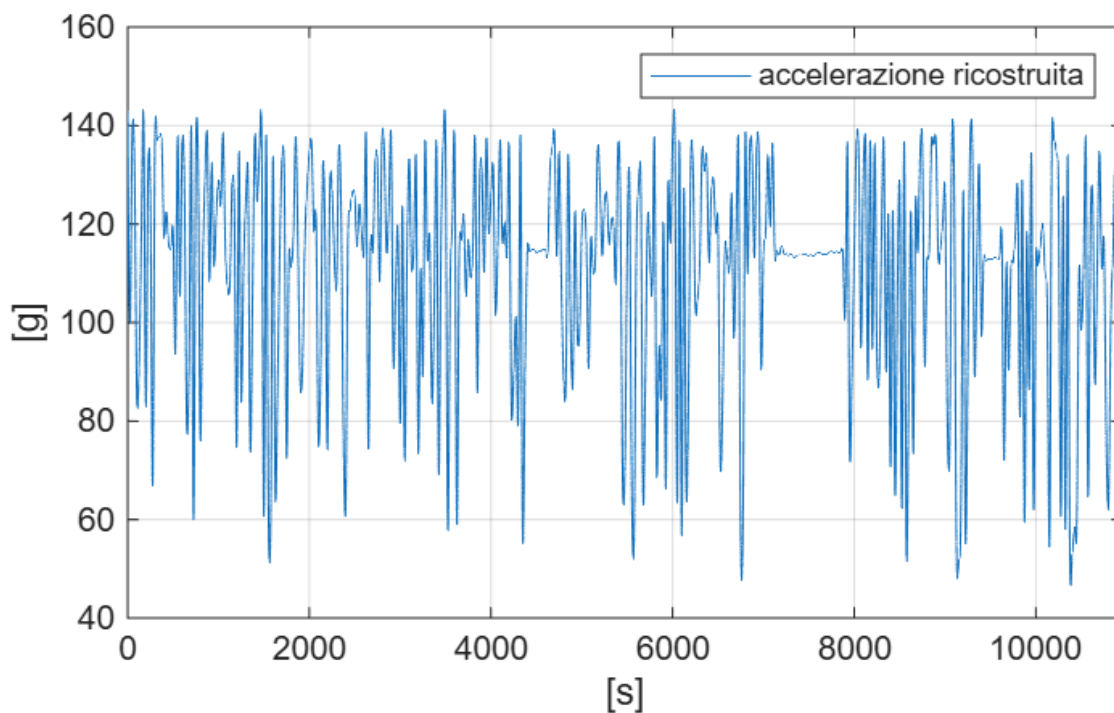


Figura 87-Andamento di frequenza, senoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4g sul provino 200_6

carico 4g - provino 200_6			
t	f	sin	a
/	/	/	/

Tabella 26-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_6 prova 4g

carico 4g - provino 200_6 - accelerazione	
valore massimo interpolato	143.29
valore massimo campionato	143.03
valore massimo campionato che risulta picco	/

Tabella 27-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_6 prova 4g

Provino 200_7

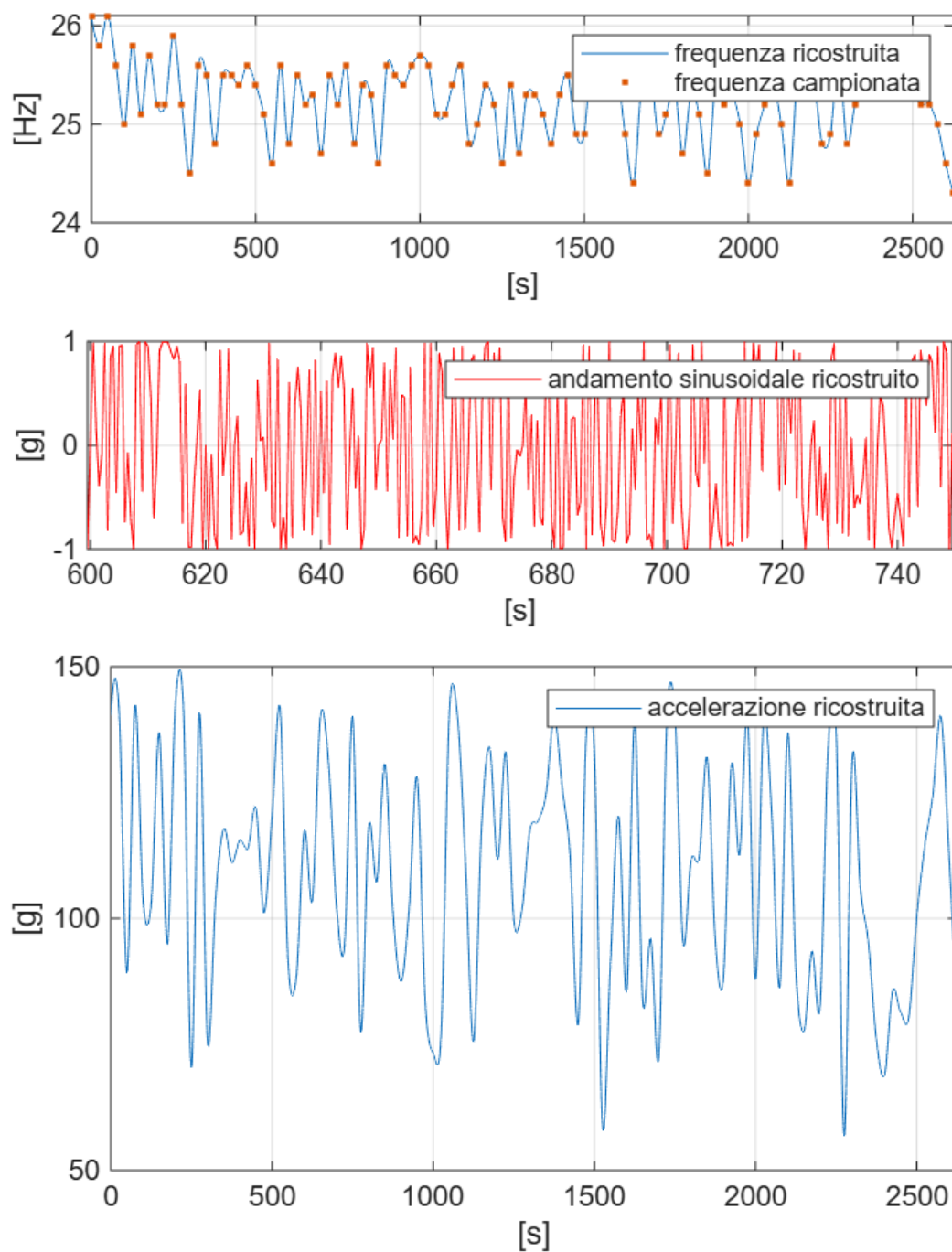


Figura 88-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4g sul provino 200_7

carico 4g - provino 200_7			
t	f	sin	a
/	/	/	/

Tabella 28-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_7 prova 4g

carico 4g - provino 200_7 - accelerazione	
valore massimo interpolato	149.38
valore massimo campionato	142.31
valore massimo campionato che risulta picco	/

Tabella 29-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_7 prova 4g

Prova 200_15

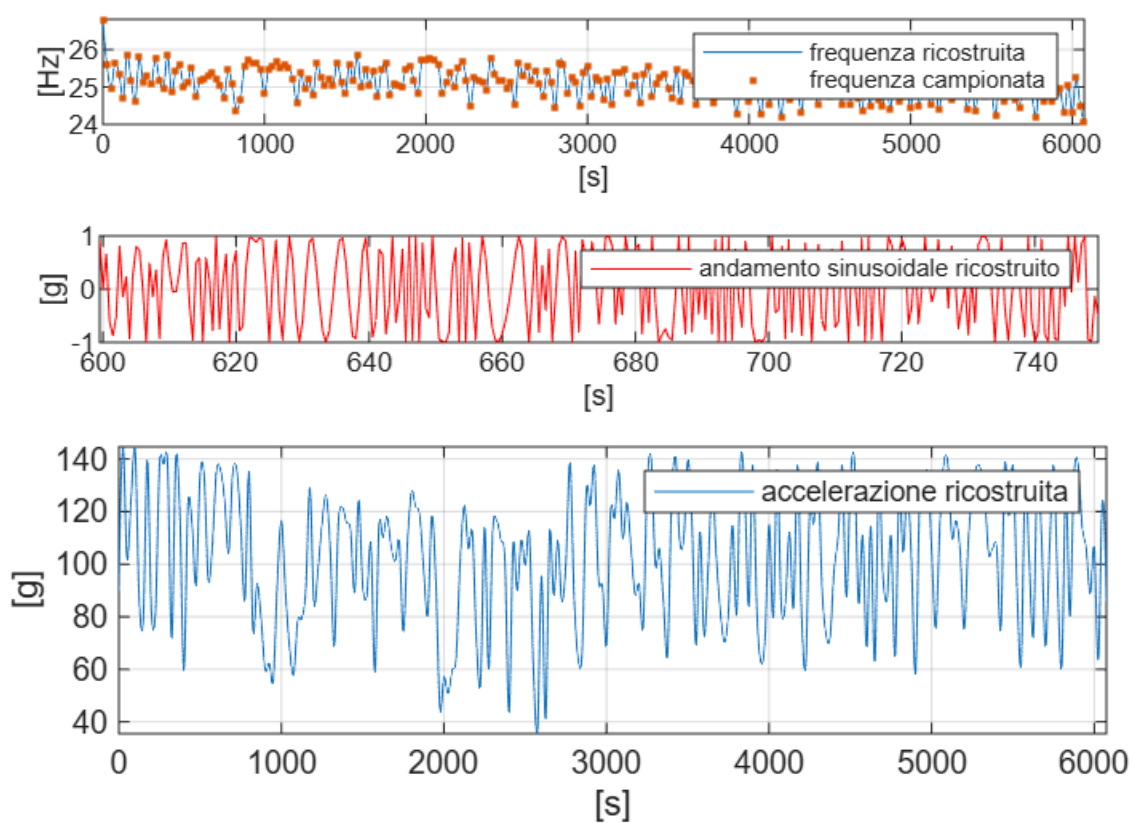


Figura 89-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 4g sul provino 200_15

carico 4g - provino 200_15							
t	f	sin	a	t	f	sin	a
225.00	25.80	1.00	81.80	3025.00	24.70	-1.00	119.90
325.00	25.80	-0.90	71.90	3075.00	25.10	-1.00	135.70
375.00	24.90	-1.00	119.90	3225.00	25.50	-1.00	76.20
425.00	24.90	0.90	122.10	3325.00	24.60	-1.00	105.70
525.00	25.10	-1.00	133.20	3425.00	25.10	1.00	140.60
575.00	24.80	-1.00	107.00	3575.00	24.60	1.00	112.30
625.00	25.20	-1.00	136.00	3775.00	24.60	-1.00	114.70
775.00	25.50	0.90	86.40	3875.00	25.40	-1.00	83.90
1075.00	25.70	0.90	58.10	3975.00	25.40	0.90	71.90
1125.00	25.60	-1.00	79.50	4025.00	25.40	1.00	79.70
1225.00	25.40	-0.90	98.10	4075.00	24.30	1.00	83.90
1375.00	25.00	-1.00	121.50	4125.00	24.60	-0.90	112.20
1575.00	25.90	1.00	59.00	4225.00	25.50	0.90	61.20
1625.00	25.50	1.00	110.30	4275.00	25.20	1.00	115.60
1675.00	25.40	-1.00	106.70	4425.00	24.50	1.00	111.00
1725.00	25.50	-1.00	108.30	4475.00	25.30	1.00	87.50
1825.00	25.00	0.90	122.10	4525.00	25.00	1.00	139.10
1875.00	25.50	1.00	98.00	4575.00	24.60	1.00	110.90
1925.00	25.20	-1.00	118.20	4625.00	24.60	1.00	114.30
2125.00	25.10	0.90	122.30	4675.00	24.70	1.00	132.20
2175.00	25.00	1.00	111.80	4875.00	24.40	-0.90	102.80
2275.00	24.50	-1.00	60.00	5075.00	24.90	1.00	138.60
2375.00	24.90	1.00	101.20	5175.00	24.40	-1.00	105.00
2475.00	25.20	-1.00	109.00	5575.00	24.60	-1.00	131.20
2575.00	25.60	-1.00	36.70	5625.00	25.20	-0.90	72.90
2625.00	25.50	-1.00	41.10	5725.00	25.10	-1.00	105.60
2825.00	25.60	-1.00	64.10	5775.00	24.20	1.00	92.10
2875.00	24.90	-1.00	127.30	6075.00	24.10	-0.90	85.80
2975.00	25.40	-0.90	91.40				

Tabella 30-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_15 prova 4g

carico 4g - provino 200_15 - accelerazione	
valore massimo interpolato	144.67
valore massimo campionato	144.25
valore massimo campionato che risulta picco	140.563

Tabella 31-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_15 prova 4g

Prove 3g

Provino 200_4

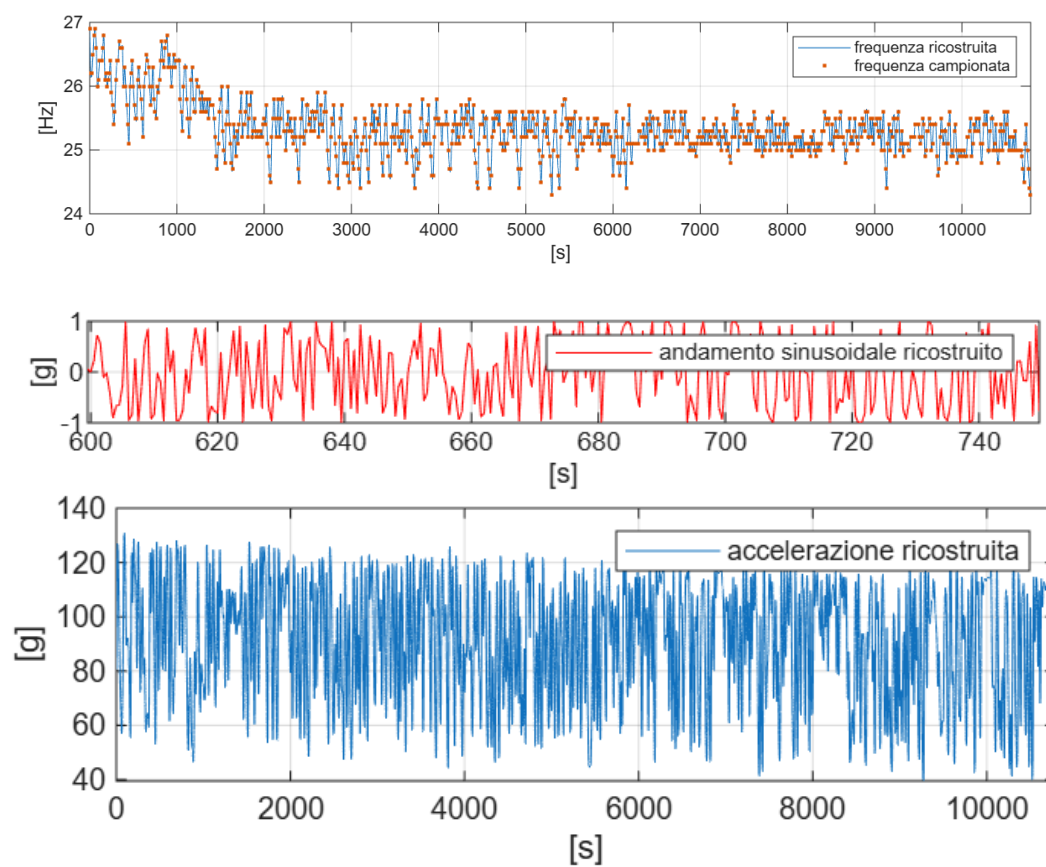


Figura 90-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 3g sul provino 200_4

carico 3g - provino 200_4											
t	f	sin	a	t	f	sin	a	t	f	sin	a
37	27	-1	83	4387	26	-1	72	7388	26	-1	44
63	27	-1	57	4437	24	-1	76	7412	26	-1	56
213	26	1	117	4462	25	-1	114	7488	25	1	88
262	26	1	108	4537	26	1	74	7512	25	-1	113
338	27	-1	59	4637	25	-1	100	7538	25	1	112
512	26	-1	122	4662	26	1	71	7562	25	-1	89
537	26	1	90	4713	25	1	121	7662	25	1	75
563	26	-1	80	4788	25	1	120	7712	25	1	116
762	26	-1	87	4838	25	1	89	7762	25	1	75
788	26	1	126	4913	25	1	102	7788	26	1	54
912	27	1	71	4938	25	-1	94	7812	25	1	76
963	27	-1	65	5062	25	-1	97	7837	25	-1	103
1062	25	-1	71	5088	26	-1	66	7887	25	1	111
1087	26	1	88	5188	25	1	108	7963	26	1	51
1163	26	-1	113	5262	25	-1	111	8063	25	1	105
1288	26	1	77	5363	25	-1	118	8213	25	-1	105
1363	26	-1	109	5463	26	-1	67	8263	25	-1	116
1388	26	1	96	5487	26	1	61	8287	25	1	104
1412	26	1	97	5587	25	-1	101	8337	25	-1	107
1462	25	1	63	5613	25	1	90	8363	25	-1	101
1613	25	1	119	5637	25	-1	112	8387	25	-1	106
1638	25	-1	73	5663	25	-1	116	8413	25	1	86
1688	25	-1	124	5713	26	1	67	8438	26	-1	51
1737	26	-1	55	5763	25	1	112	8488	25	-1	104
1837	26	-1	67	5787	26	-1	57	8562	25	-1	91
1888	26	-1	95	5813	26	-1	61	8688	25	1	77
1938	25	1	105	5863	25	-1	86	8712	26	1	50
1963	25	1	112	5887	25	-1	112	8762	25	-1	73
2037	25	1	120	5913	25	-1	107	8812	25	-1	105
2188	26	-1	87	5962	25	1	114	8862	26	-1	57
2238	25	1	106	5988	25	1	116	8888	25	-1	74
2288	25	-1	112	6012	25	1	115	8988	25	1	111
2313	25	1	106	6112	26	-1	58	9038	25	-1	85
2338	25	-1	120	6162	25	1	112	9062	26	1	54
2387	25	-1	97	6188	26	1	48	9087	25	-1	76
2462	25	1	120	6238	25	1	117	9187	25	-1	84
2487	26	-1	63	6262	25	-1	115	9213	26	-1	58
2537	25	-1	103	6288	25	1	116	9237	25	1	116
2587	26	-1	75	6312	25	-1	93	9263	26	1	48
2612	26	-1	49	6362	25	-1	106	9313	25	-1	74
2737	25	1	94	6388	26	-1	55	9337	25	1	100
2812	25	-1	120	6438	25	1	95	9363	25	1	105
2888	26	1	56	6462	26	-1	63	9613	25	1	79
2938	25	1	120	6512	26	1	58	9663	25	-1	110
3038	25	-1	106	6538	25	1	110	9712	25	-1	114
3088	25	-1	85	6562	25	1	114	9738	25	1	101
3187	25	-1	95	6587	25	1	84	9762	26	1	53
3237	26	-1	55	6613	25	-1	107	9788	25	1	110
3287	25	1	103	6687	26	1	63	9812	25	1	75
3337	25	-1	120	6713	25	-1	80	9838	25	-1	106
3412	25	1	120	6737	25	1	112	9912	25	-1	81
3588	25	-1	120	6763	25	-1	85	10012	25	-1	115
3762	25	1	94	6787	26	1	54	10037	25	1	115
3787	25	1	103	6863	25	-1	80	10088	25	1	73
3837	25	1	119	6887	25	-1	107	10112	25	1	114
3862	25	-1	118	6963	25	-1	112	10163	26	-1	51
3887	26	1	53	6987	25	-1	85	10188	25	-1	78
3912	25	1	113	7013	25	1	102	10212	25	-1	103
3962	26	1	70	7037	26	1	61	10237	25	-1	100
4037	25	1	119	7063	25	1	88	10337	26	1	53
4138	25	1	89	7087	25	-1	114	10437	25	1	67
4163	25	1	86	7137	25	-1	84	10613	25	1	68
4238	25	1	119	7188	26	-1	58	10688	25	-1	112
4263	26	-1	53	7212	25	-1	107	10713	24	1	86
4313	26	1	52	7288	25	-1	114	10762	25	1	102
4363	25	-1	93	7338	25	-1	117	10788	24	-1	67

Tabella 32-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_4 prova 3g

carico 3g - provino 200_4 - accelerazione	
valore massimo interpolato	130.834
valore massimo campionato	128.138
valore massimo campionato che risulta picco	126

Tabella 33-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_4 prova 3g

Provino 200_5

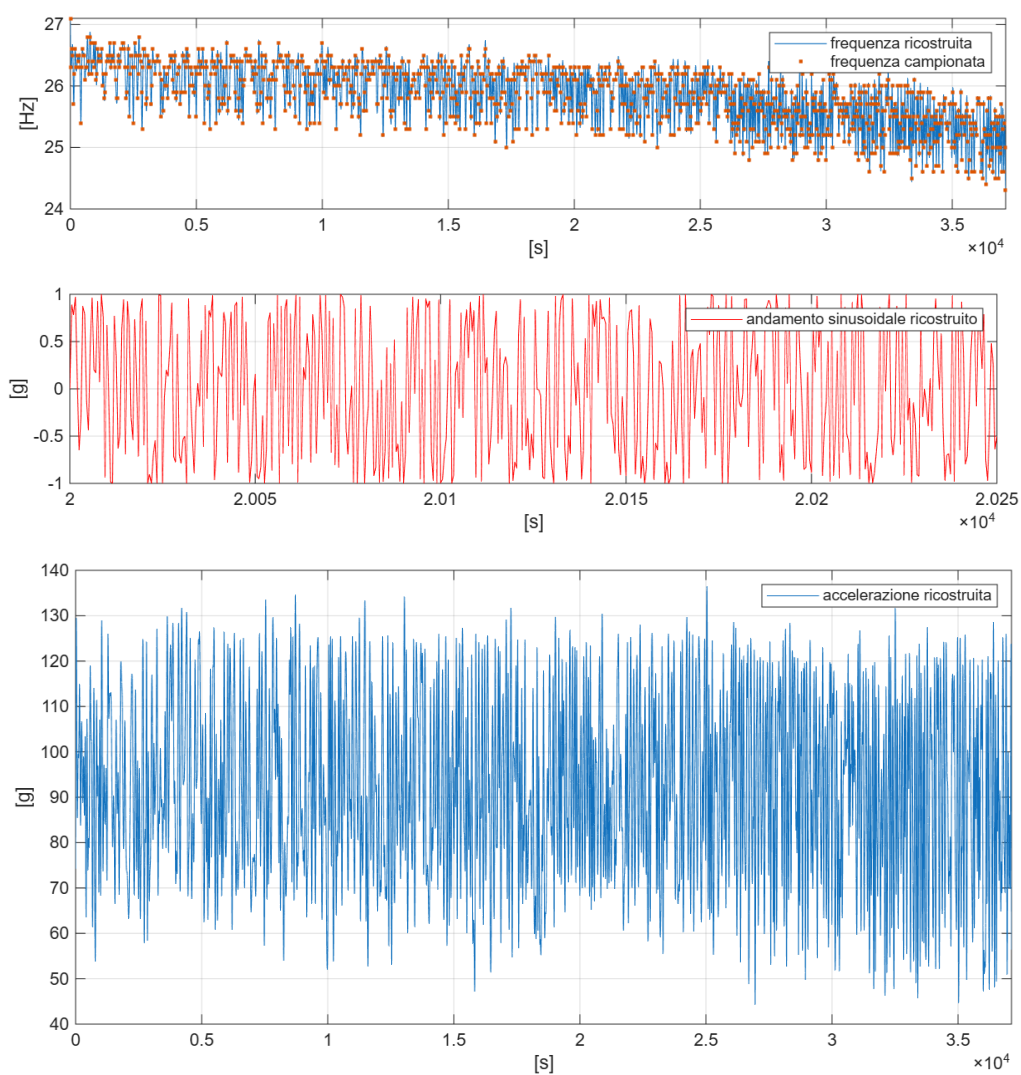


Figura 91-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 3g sul provino 200_5

carico 3g - provino 200_5															
t	f	sin	a	t	f	sin	a	t	f	sin	a	t	f	sin	a
192	27	1	84	12384	26	-1	125	21696	26	1	81	29994	25	1	62
224	26	-1	103	12416	25	1	60	21728	26	1	61	30019	25	-1	107
256	26	1	102	12576	26	-1	122	21856	26	-1	75	30044	25	1	108
384	26	-1	102	12864	26	1	87	22016	26	1	125	30094	25	-1	97
736	26	-1	110	12896	25	-1	73	22176	25	1	69	30119	26	1	55
1056	26	-1	113	12928	26	-1	103	22208	26	1	85	30169	25	-1	104
1088	27	1	74	13024	26	1	124	22336	25	1	72	30269	26	-1	84
1248	27	1	73	13056	26	-1	124	22368	26	1	113	30294	26	1	52
1344	26	-1	112	13152	26	1	72	22624	25	1	74	30369	26	-1	107
1632	26	-1	93	13216	26	1	93	22912	26	-1	94	30444	26	1	96
1792	26	-1	120	13248	25	-1	85	23008	26	1	116	30469	26	-1	96
1824	26	-1	115	13344	25	-1	74	23104	25	1	70	30494	25	1	99
1856	26	1	109	13376	26	-1	89	23328	26	1	91	30569	26	1	100
1888	26	1	85	13696	26	1	124	23392	25	1	105	30669	26	1	77
2048	27	-1	73	13728	26	1	115	23456	26	-1	75	30744	26	1	96
2176	26	1	99	13824	26	1	87	23552	26	1	92	30819	26	1	84
2464	26	-1	97	13856	26	1	123	23776	26	1	71	30869	26	1	95
2656	26	1	118	13952	26	-1	75	23904	26	-1	67	30919	25	-1	99
2912	27	-1	71	14144	26	-1	83	23936	26	-1	71	30944	26	1	89
3104	26	1	102	14176	26	-1	80	24064	26	-1	125	31019	25	1	114
3328	26	-1	85	14208	26	1	115	24096	26	-1	66	31069	26	-1	81
3392	26	1	89	14368	26	-1	70	24192	26	1	104	31094	25	1	117
3488	26	1	88	14464	26	1	75	24256	26	-1	124	31194	26	-1	104
3904	26	-1	90	14496	26	-1	80	24384	26	-1	68	31269	25	-1	64
3936	26	-1	93	14528	26	-1	95	24416	26	-1	80	31319	26	1	88
4128	26	1	80	14592	26	1	69	24544	25	1	86	31344	25	1	118
4256	26	1	97	14816	25	-1	62	24672	26	1	77	31369	26	-1	99
4512	26	1	87	14848	26	-1	98	24704	26	-1	119	31594	26	1	91
4576	26	1	89	14912	25	1	81	24736	26	1	123	31644	25	1	61
4608	27	1	68	14976	26	1	95	24768	26	-1	108	31694	25	1	119
4928	26	-1	124	15104	26	1	124	24928	25	1	108	31769	26	-1	89
5024	26	1	105	15264	26	1	72	25056	26	-1	122	31794	26	-1	78
5056	26	-1	95	15328	26	1	120	25216	26	1	65	31894	26	1	88
5088	27	1	65	15424	26	1	81	25504	26	1	69	31969	26	-1	96
5216	26	1	90	15456	25	1	77	25536	25	-1	87	31994	26	-1	76
5248	27	-1	63	15552	26	-1	118	25632	25	1	73	32069	26	-1	95
5312	25	-1	71	15584	26	1	81	25728	26	-1	81	32094	26	-1	51
5472	26	1	120	15712	26	1	121	25888	26	1	84	32144	25	1	114
5536	25	-1	61	15808	27	-1	56	26112	26	-1	123	32169	25	-1	59
5632	27	-1	64	15936	26	1	81	26144	26	1	73	32269	25	1	120
5664	26	-1	90	15968	26	-1	103	26169	26	1	111	32319	25	1	112
5696	26	1	88	16064	26	1	89	26194	26	1	121	32394	26	-1	90
5728	26	-1	80	16128	26	1	122	26244	26	1	69	32419	26	-1	107
5792	25	1	68	16224	26	-1	123	26269	25	-1	80	32494	25	1	120
5824	26	1	98	16352	26	1	122	26344	26	1	120	32569	26	1	89
5952	26	1	77	16384	26	-1	87	26444	25	-1	78	32719	26	1	88
6016	26	-1	107	16512	25	-1	94	26469	25	1	87	33044	26	1	93
6176	26	-1	93	16576	26	-1	77	26644	26	1	112	33069	25	1	121
6304	26	1	124	16608	26	1	70	26719	26	1	65	33319	25	-1	66
6336	26	1	84	16736	26	1	87	26744	25	-1	95	33369	25	1	121
6528	26	1	124	16896	26	-1	90	26769	26	1	120	33569	25	-1	66
6656	26	1	125	17024	26	1	95	26794	26	-1	119	33594	26	1	69
6752	26	1	111	17152	26	1	117	26944	25	-1	50	33669	25	-1	118

6848	25	-1	78	17216	26	-1	78	26994	25	1	102	33744	26	1	66
6912	26	-1	104	17248	26	1	118	27019	26	-1	111	33994	25	1	66
7072	26	-1	76	17472	26	-1	118	27044	26	-1	116	34069	25	1	121
7168	26	-1	80	17536	26	-1	124	27119	25	1	102	34169	25	1	119
7264	26	-1	103	17568	25	-1	59	27144	26	-1	119	34219	25	-1	117
7328	26	-1	77	17632	26	-1	93	27169	26	-1	110	34269	26	-1	65
7456	26	1	83	17664	25	1	72	27294	25	1	83	34369	25	1	65
7552	26	-1	125	17824	26	1	125	27319	26	-1	60	34469	25	-1	68
7616	26	-1	92	17856	26	-1	70	27369	26	1	111	34494	26	-1	73
7648	25	-1	71	17984	26	-1	89	27419	26	1	108	34519	25	-1	120
7872	26	-1	104	18016	26	1	88	27594	25	1	103	34644	26	-1	73
8032	26	1	110	18048	26	1	90	27619	26	1	112	34669	26	1	74
8256	27	-1	54	18176	26	1	73	27644	26	1	115	34719	26	1	58
8288	26	1	78	18272	26	-1	66	27719	26	-1	55	34769	25	-1	116
8512	26	1	113	18304	26	-1	123	27744	25	-1	92	34894	26	1	73
8608	26	-1	124	18336	25	1	61	27769	26	-1	111	34919	26	1	67
8704	26	1	123	18368	26	-1	98	27844	26	-1	109	34944	26	1	66
8768	26	1	73	18496	26	1	82	27919	26	1	100	35044	26	1	70
8832	26	1	77	18592	26	-1	67	27994	26	1	101	35119	26	-1	63
8896	26	1	124	19008	26	1	115	28044	25	1	110	35144	25	1	78
9088	25	-1	78	19072	26	-1	89	28169	26	-1	114	35194	25	-1	119
9152	26	1	69	19104	26	-1	80	28194	26	-1	54	35269	25	1	121
9312	26	-1	123	19136	26	1	80	28219	25	1	83	35294	25	-1	118
9344	26	1	83	19232	26	-1	109	28469	25	1	101	35369	25	-1	92
9376	25	-1	74	19264	26	1	71	28544	25	1	109	35469	25	1	120
9536	26	1	91	19328	26	1	95	28569	25	1	83	35569	26	1	62
9664	26	-1	91	19424	26	-1	75	28669	25	1	55	35669	25	1	100
9792	26	-1	73	19488	25	1	87	28694	26	1	112	35744	25	1	108
9824	26	1	96	19616	26	-1	122	28744	25	1	98	35794	25	-1	119
9856	26	-1	90	19872	26	-1	122	28769	26	-1	100	35894	25	1	107
9888	25	1	84	19904	26	1	78	28894	26	1	109	35944	25	-1	108
9984	27	1	52	19968	26	1	92	28944	26	1	51	35969	25	-1	115
10048	26	1	123	20032	26	1	102	28969	25	1	93	35994	26	-1	53
10176	26	-1	125	20096	25	-1	70	29019	25	1	93	36019	26	1	56
10272	26	-1	105	20128	26	-1	96	29044	26	-1	57	36044	26	-1	51
10464	26	-1	80	20256	26	1	124	29069	25	1	89	36069	26	-1	54
10656	26	1	86	20352	26	-1	110	29094	26	-1	96	36094	26	1	64
10784	26	1	81	20384	26	1	69	29269	26	1	105	36169	25	1	95
10848	26	-1	107	20416	26	1	123	29294	25	1	116	36244	26	1	54
10944	26	1	84	20576	26	-1	67	29319	25	1	90	36269	25	-1	113
10976	26	-1	125	20672	26	1	95	29394	25	1	88	36294	25	1	112
11008	26	1	98	20704	25	1	74	29419	26	1	56	36319	25	-1	114
11072	26	-1	74	20768	26	1	117	29444	25	1	100	36419	25	1	114
11392	26	-1	74	20992	26	-1	86	29469	26	-1	90	36444	26	1	49
11456	26	1	125	21024	25	-1	74	29494	26	1	109	36469	25	1	87
11648	26	-1	107	21216	26	1	85	29544	26	-1	90	36494	25	1	107
11808	26	-1	70	21312	26	1	94	29619	25	1	117	36519	26	1	49
11872	26	1	108	21376	26	1	71	29669	25	1	64	36544	25	-1	97
11904	26	1	92	21472	26	-1	112	29694	25	1	95	36669	25	-1	89
11936	26	-1	91	21536	26	1	123	29719	26	1	101	36794	25	1	113
11968	26	1	65	21568	26	-1	84	29744	26	1	102	36944	26	1	52
12128	26	1	74	21632	26	1	96	29894	25	-1	100	36994	25	1	97
12256	26	-1	79	21664	26	1	83	29944	26	1	108	37119	24	-1	56

Tabella 34-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_5 prova 3g

carico 3g - provino 200_5 - accelerazione	
valore massimo interpolato	136.42
valore massimo campionato	125.93
valore massimo campionato che risulta picco	125.00

Tabella 35-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_5 prova 3g

Provino 200_14

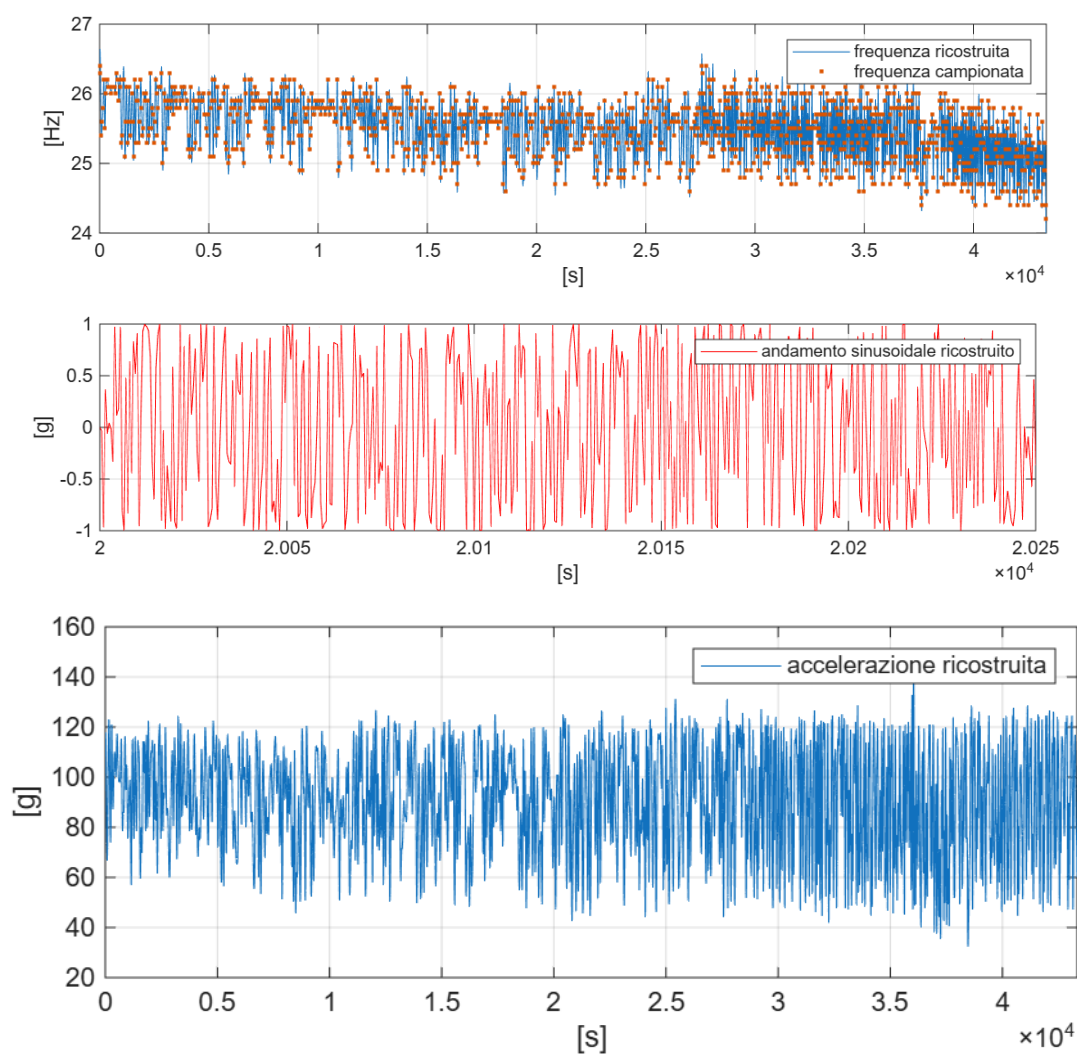


Figura 92-Andamento di frequenza, sinusoide e accelerazione ricostruita per la prova a 3g sul provino 200_14

carico 3g - provino 200_14			
t	f	sin	a
/	/	/	/

Tabella 36-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_14 prova 3g

carico 3g - provino 200_14 - accelerazione	
valore massimo interpolato	141.24
valore massimo campionato	127.54
valore massimo campionato che risulta picco	/

Tabella 37-Confronto valori accelerazione massima interpolata, massima campionata e massima campionata che risulta picco, provino 200_14 prova 3g

Bibliografia

- [1] “Materiale Composito”, Wikipedia, https://it.wikipedia.org/wiki/Materiale_composito
- [2] “Materiali compositi”, Moodle Sapienza, Sapienza Università di Roma, https://elearning.uniroma1.it/pluginfile.php/899817/mod_resource/content/1/Materiali%20compositi.pdf
- [3] “LA LAVORAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI Laminazione e Finitura di Compositi Fibrorinforzati Processi Produttivi Automotive e Motorsport”, Università di Pisa, https://www.centropiaggio.unipi.it/sites/default/files/course/material/2019-05-21_-_materiali_compositi.pdf
- [4] J. Yin, W. Ma, Z. Gao, X. Lei, C. Jia, “A Review of Electromagnetic Shielding Fabric, Wave-Absorbing Fabric and Wave-Transparent Fabric”, *Polymers*, v. 14, n. 3, 19 Jan. 2022, p. 377, <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/3/377>
- [5] R. Mardegan, “Experimental and numerical investigation on the LVI response of glass and Kevlar/PU- elastomeric matrix composites”, Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Milano, 2023
- [6] B. Zuccarello, “Cap9_fatica_compositi”, in *Progettazione meccanica con materiali non convenzionali*, 2008, <https://it.scribd.com/document/233606286/Cap9-fatica-compositi>
- [7] M. Antoniazzi, “Analisi del comportamento a fatica di laminati in materiale composito e nanocomposito”, Tesi di laurea Magistrale, Università degli studi di Padova, 2013, https://thesis.unipd.it/retrieve/e6480e98-5fe4-48dd-ae9a-0525741e9d71/Tesi_ok.pdf
- [8] ITS Maker Academy, “Materiali Compositi”, <https://itsmaker.it/wp-content/uploads/2018/11/MATERIALI-COMPOSITI.pdf>
- [9] A. D'Anna, “Fotopolimerizzazione frontale di compositi a matrice epossidica”, Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017, <https://webthesis.biblio.polito.it/6558/1/tesi.pdf>

- [10] F. Cerrini, “Interventi di rinforzo innovativi per cupole in muratura”, Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2017,
<https://webthesis.biblio.polito.it/6511/1/tesi.pdf>
- [11] X. Xu, Y. Guo, Z. Shen, B. Liu, F. Yan, N. Zhong, “Aramid Fiber-Reinforced Plastics (AFRPs) in Aerospace: A Review of Recent Advancements and Future Perspectives”, *Polymers*, v. 17, n. 16, 20 Aug. 2025, p. 2254, <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/16/2254>
- [12] Hexcel, “HexPly® F155 resin systems for advanced composites”, Hexcel Corporation, 2020,
https://fileserv.mates.it/Prodotti/1_Rinforzi/TDS/_Prepreg/HexPly/HexPly_F155_us_DataSheet3.pdf
- [13] ASTM International, “D3030/D3039M-17 Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, 2017.
- [14] SIEMENS Community, “Simcenter Testlab MIMO Swept and Stepped Sine”,
<https://community.sw.siemens.com/s/article/Simcenter-Testlab-MIMO-Swept-and-Stepped-Sine>
- [15] SIEMENS Community, “Simcenter Testlab: Tracked Sine Dwell”,
<https://community.sw.siemens.com/s/article/Simcenter-Testlab-Tracked-Sine-Dwell>
- [16] A. Marinò, “Elementi di teoria delle piastre inflesse”,
https://moodle2.units.it/pluginfile.php/187362/mod_resource/content/0/Piastre.pdf
- [17] M. Gherlone, “Analisi di piastre isotrope, composite, sandwich e irrigidite”, Politecnico di Torino
- [18] M. Gherlone, “Dimensionamento di travi composite e sandwich”, Politecnico di Torino
- [19] R. Liaci, “Ground, Taxi and Flight Vibration Test of full-composite Very Light Aircraft”, Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2020,
<https://webthesis.biblio.polito.it/14664/1/tesi.pdf>
- [20] M. Caresta, “Vibrations of a Free-Free Beam”,
https://www.cce.pk.edu.pl/~jpamin/dyd/SOKI/Vibrations_unsupported_beam_Caresta.pdf

- [21] G. Incerti, “Vibrazioni di sistemi continui monodimensionali”, https://giovanni-incerti.unibs.it/esercizi/Esercizi_Continui.pdf
- [22] M. G. Marsano, “Indagini sperimentali e numeriche sul comportamento dinamico di una trave: influenza del danno e della temperatura”, Tesi di laurea Magistrale, Università di Bologna, 2024, https://amslaurea.unibo.it/id/eprint/32417/1/MarsanoMariaGrazia_TesiMagistrale.pdf
- [23] T. Irvine, “Bending frequencies of beams, rods, and pipes”, 2012, https://leehite.org/documents/Euler_Irvine.pdf
- [24] E. Barbero, D. Cortes, “A Mechanistic Model for Transverse Damage Initiation, Evolution, and stiffness reduction in laminated composites”, *Composites Part B: Engineering*, v. 41, n. 2, Mar. 2010, pp. 124–132, West Virginia University, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836809001851>
- [25] Y. Jiang, S. Zhang, X. Chen, Z. Fan, “Experimental Research on Vibration Fatigue of CFRP and Its Influence Factors Based on Vibration Testing”, *Shock and Vibration*, 2017, pp. 1–18, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2017/1241623>
- [26] ScienceDirect, “Stiffness Degradation”, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/stiffness-degradation>
- [27] P. F. Liu, J. Zheng, “Recent Developments on Damage Modeling and Finite Element Analysis for Composite Laminates: A Review”, *Materials & Design*, v. 31, n. 8, Sept. 2010, pp. 3825–3834, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306910001858>
- [28] G. Bottini, “Studio del moto di una trave a sbalzo con massa all’estremità attraverso l’elaborazione di immagini acquisite con fotocamera ad alta velocità”, Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2021, <https://webthesis.biblio.polito.it/18473/1/tesi.pdf>
- [29] SIEMENS Community, “How to calculate damping from a FRF?”, <https://community.sw.siemens.com/s/article/how-to-calculate-damping-from-a-frf>
- [30] “Appunti di Meccanica delle Vibrazioni sistemi ad un grado di libertà”, Università degli studi di Cagliari, 2012, <https://people.unica.it/andreamanuello/files/2012/04/Appunti-Vibrazioni.pdf>

- [31] S. W. Tsai, E. M. Wu, “A general theory of strength for anisotropic materials”, *Journal of composite materials*, 1972, <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA306350.pdf>
- [32] A. Grasso, “Implementation of classical and advanced failure criteria for composite layered structures in FEMAP and assessment of results”, Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2018, <https://webthesis.biblio.polito.it/6883/1/tesi.pdf>
- [33] L. Callegari, “Analisi della vita a fatica mediante teorie strutturali avanzate”, Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2023, <https://webthesis.biblio.polito.it/28868/1/tesi.pdf>
- [34] T. K. O’Brien, A. D. Chawan, R. Krueger, I. Paris, “Transverse Tension Fatigue Life Characterization Through Flexure Testing of Composite Materials”, NASA, 2001, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20010071650/downloads/20010071650.pdf>
- [35] BPS s.r.l., “Capire la fisica delle prestazioni di uno shaker elettrodinamico”, <https://www.bpsweb.it/wp-content/uploads/Capire-la-fisica-di-uno-shaker.pdf>
- [36] LDS group, “Product Data: LDS V875-440 metric Shaker (BN0544)”, <https://www.bksv.com/~media/literature/Product%20Data/bn0544.ashx>
- [37] PCB PIEZOTRONICS, “Accelerometri e sensori di vibrazione per la ricerca e lo sviluppo”, <https://www.pcb.com/it/sensori-per-test-e-misure/accelerometri>
- [38] ALTAIR, Altair HyperWorks, <https://altairengineering.it/altair-hyperworks>
- [39] ALTAIR, Altair Optistruct, <https://altair.com/optistruct>
- [40] ALTAIR, “Introduction to Practical Aspects of Composites with Altair OptiStruct”, 2021, https://www.advanced-eng.cz/wp-content/uploads/2021/06/2021_ebook-Composite_with_Altair_OptiStruct.pdf