

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



**Politecnico
di Torino**

Tesi di laurea

Modellazione virtuale di processi di riparazione per materiali compositi avanzati

Relatori

prof. Enrico Zappino
prof. Marco Petrolo

Candidato

Giacomo Macchi

Ottobre 2025

Indice

1	Introduzione ai materiali compositi	13
1.1	Descrizione delle strutture in composito	15
1.2	Fibre	16
1.2.1	Tipi di fibra	18
1.3	Matrice	21
1.3.1	Resine termoindurenti	21
1.3.2	Resine termoplastiche	22
1.4	Processo di polimerizzazione	24
1.4.1	Metodi di deposizione del materiale	24
1.4.2	Polimerizzazione	25
1.5	Processi di riparazione per materiali compositi	27
1.5.1	Danneggiamenti in servizio	27
1.5.2	Tecniche di riparazione	28
1.5.3	Tecniche di insaccamento sotto vuoto	30
2	Modelli avanzati per l'analisi della manifattura di materiali compositi	31
2.1	Modello cinematico	32
2.1.1	Espansioni di Lagrange	33
2.2	Equazioni di governo per analisi statiche	34
3	Assessment del modello numerico	37
3.1	Trave con due materiali isotropi	37
3.1.1	Modello cinematico con espansioni di Taylor	38
3.1.2	Modello cinematico con espansioni di Lagrange	43
3.1.3	Comparazione risultati	48
3.1.4	Calcoli analitici	48
3.2	Trave composita	49
3.2.1	Risultati	50
4	Simulazione processo di cura	51
4.1	Termochimica	51
4.1.1	Equazioni della termochimica	52
4.1.2	Proprietà meccaniche	54
4.2	Processo di cura	55
5	Analisi del processo di cura	59
5.1	Pannello a L	59

5.2	Piastra piana	64
5.2.1	Laminazione simmetrica	65
5.2.2	Laminazione asimmetrica	66
6	Manifattura virtuale di una piastra composita piana	69
6.1	Risultati	72
7	Analisi del processo di riparazione	77
7.1	Riparazione passante	81
7.1.1	Riparazione passante dritta	82
7.1.2	Riparazione a scalini	89
7.1.3	Riparazione inclinata	99
7.1.4	Riparazione con patch	106
7.1.5	Confronto	113
7.2	Riparazione superficiale	122
7.2.1	Riparazione dritta	122
7.2.2	Riparazione a scalini	130
7.2.3	Riparazione inclinata	137
7.2.4	Riparazione con patch	144
7.2.5	Confronto	151
8	Conclusioni	161

Elenco delle figure

1.1	Boeing 787 Dreamliner (fonte: [1])	14
1.2	Composizione Boeing 787 Dreamliner (fonte: [2])	14
1.3	Esempio di laminazione di un composito (fonte: [3])	16
1.4	Nastri e tessuti (fonte: [3])	17
1.5	Stili di tessitura tipici dei tessuti (fonte: [3])	17
1.6	Materiale non tessuto (fonte: [3])	18
1.7	Automated fiber placement (fonte: [4])	25
1.8	Autoclave per la polimerizzazione dei materiali compositi (fonte: [5]) .	26
1.9	Tecniche di riparazione con toppe composite (fonte: [3])	29
2.1	Sistema di riferimento	31
2.2	Esempi di discretizzazioni della sezione trasversale mediante elementi lineari (L4) e quadratici (L9)	33
2.3	Sezione di un elemento L9	34
2.4	Assemblaggio della matrice di rigidità globale	35
3.1	Trave analizzata per apprendere il software	37
3.2	Deformata della trave analizzata con la teoria di Eulero-Bernoulli	38
3.3	Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza con la teoria di Eulero-Bernoulli	39
3.4	Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave con la teoria di Eulero-Bernoulli	39
3.5	Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza con la teoria di Timoshenko	40
3.6	Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave con la teoria di Timoshenko	40
3.7	Andamento della tensione σ_{yz} lungo lo spessore a metà della trave con la teoria di Timoshenko	41
3.8	Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza TE6	42
3.9	Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave TE6	42
3.10	Andamento della tensione σ_{yz} lungo lo spessore a metà della trave TE6	43
3.11	Sezione e nodi per le espansioni di Lagrange con 2 elementi	43
3.12	Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza con espansioni di Lagrange con 2 elementi	44
3.13	Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave con espansioni di Lagrange con 2 elementi	44

3.14	Andamento della tensione σ_{yz} lungo lo spessore a metà della trave con espansioni di Lagrange con 2 elementi	45
3.15	Sezione e nodi per le espansioni di Lagrange con 4 elementi	46
3.16	Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza con espansioni di Lagrange con 4 elementi	46
3.17	Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave con espansioni di Lagrange con 4 elementi	47
3.18	Andamento della tensione σ_{yz} lungo lo spessore a metà della trave con espansioni di Lagrange con 4 elementi	47
3.19	Trave composita analizzata per apprendere il software	49
4.1	Profilo di temperatura e pressione in autoclave	51
4.2	Passo temporale	53
4.3	Andamenti qualitativi della temperatura e del grado di cura durante la polimerizzazione (fonte: [6])	54
4.4	Proprietà del materiale allo step i	55
4.5	Algoritmo di soluzione per l'analisi del ciclo di cura	56
5.1	Pannello a L	60
5.2	Vista laterale della pannello a L	60
5.3	Ciclo di cura del pannello a L	61
5.4	Andamento dell'angolo di spring-in in funzione della coordinata x al variare del numero dei passi temporali	62
5.5	Deformata del pannello a L dopo la rimozione del tool	62
5.6	Vista dall'alto della pannello a L	63
5.7	Andamento della σ_{xx} lungo lo spessore nel pannello a L	63
5.8	Andamento della ε_{xx} lungo lo spessore nel pannello a L	64
5.9	Modello della piastra piana	65
5.10	Deformata della piastra piana con laminazione simmetrica	65
5.11	Tensione σ_{xx} della piastra piana con laminazione simmetrica	66
5.12	Deformata della piastra piana con laminazione asimmetrica	66
5.13	Tensione σ_{xx} della piastra piana con laminazione asimmetrica	67
6.1	Piastra di riferimento	70
6.2	Ciclo di cura della piastra di riferimento	70
6.3	Modello della piastra di riferimento in assonometria isometrica	71
6.4	Vista frontale del modello della piastra di riferimento	71
6.5	Andamento del modulo di Young E durante il ciclo di cura	72
6.6	Andamento del coefficiente di Poisson durante il ciclo di cura	73
6.7	Andamento del modulo di taglio G durante il ciclo di cura	73
6.8	Deformazione in x della piastra di riferimento analizzata	74
6.9	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0, z)$ della piastra con riparazione passante dritta	75
6.10	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0, z)$ della piastra con riparazione passante dritta	75

7.1	Ciclo di cura usato nella riparazione	78
7.2	Andamento del modulo di Young E durante il ciclo di cura della riparazione	79
7.3	Andamento del modulo a taglio G durante il ciclo di cura della riparazione	79
7.4	Andamento del coefficiente di Poisson durante il ciclo di cura della riparazione	80
7.5	Tratti lungo i quali vengono graficate le deformazioni e le tensioni	81
7.6	Riparazione passante dritta	82
7.7	Modello della piastra con riparazione passante dritta in assonometria isometrica	82
7.8	Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione passante dritta	83
7.9	Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione passante dritta	83
7.10	Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione passante dritta	84
7.11	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta	84
7.12	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta	85
7.13	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta	86
7.14	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta	87
7.15	Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione passante dritta	88
7.16	Riparazione passante a scalini	89
7.17	Modello della piastra con riparazione passante a scalini in assonometria isometrica	89
7.18	Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione passante a scalini	90
7.19	Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione passante a scalini	90
7.20	Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione passante a scalini	91
7.21	Spostamento in direzione z lungo il tratto 3	91
7.22	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini	92
7.23	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini	92
7.24	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini	93
7.25	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini	94

7.26	Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione passante a scalini	95
7.27	Dettaglio della tensione σ_{xx}	96
7.28	Dettaglio della tensione σ_{zz}	97
7.29	Dettaglio della tensione σ_{xz}	98
7.30	Riparazione passante inclinata	99
7.31	Modello della piastra con riparazione passante inclinata in assonometria isometrica	99
7.32	Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione passante inclinata	100
7.33	Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione passante inclinata	100
7.34	Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione passante inclinata	101
7.35	Spostamento in direzione z lungo il tratto 3	101
7.36	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante inclinata	102
7.37	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante inclinata	103
7.38	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante inclinata	104
7.39	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante inclinata	105
7.40	Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione passante inclinata	105
7.41	Riparazione passante patch con patch	106
7.42	Modello della piastra con riparazione passante patch con patch in assonometria isometrica	107
7.43	Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione passante patch con patch	107
7.44	Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione passante patch con patch	108
7.45	Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione passante patch con patch	108
7.46	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch	109
7.47	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch	109
7.48	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch	110
7.49	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch	111
7.50	Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch	112
7.51	Spostamento in direzione z lungo il tratto 3	113

7.52	Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	114
7.53	Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	114
7.54	Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	115
7.55	Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	115
7.56	Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	117
7.57	Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	118
7.58	Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	118
7.59	Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	119
7.60	Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	119
7.61	Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	120
7.62	Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	120
7.63	Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ delle piastre con riparazione passante a confronto	121
7.64	Tratti lungo i quali vengono graficate le deformazioni e le tensioni . . .	122
7.65	Riparazione superficiale dritta	123
7.66	Modello della piastra con riparazione superficiale dritta in assonometria isometrica	123
7.67	Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta	124
7.68	Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta	124
7.69	Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta	125
7.70	Spostamento in direzione z lungo il tratto 3	125
7.71	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta	126
7.72	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta	127
7.73	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta	128
7.74	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta	129
7.75	Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione superficiale dritta	129

7.76	Riparazione superficiale a scalini	130
7.77	Modello della piastra con riparazione superficiale a scalini in assonometria isometrica	130
7.78	Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale a scalini	131
7.79	Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale a scalini	131
7.80	Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale a scalini	132
7.81	Spostamento in direzione z lungo il tratto 3	132
7.82	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini	133
7.83	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini	134
7.84	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini	135
7.85	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini	136
7.86	Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini	136
7.87	Riparazione superficiale inclinata	137
7.88	Modello della piastra con riparazione superficiale inclinata in assonometria isometrica	137
7.89	Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale inclinata	138
7.90	Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale inclinata	138
7.91	Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale inclinata	139
7.92	Spostamento in direzione z lungo il tratto 3	139
7.93	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata	140
7.94	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata	140
7.95	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata	141
7.96	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata	142
7.97	Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata	143
7.98	Riparazione superficiale dritta con patch	144
7.99	Modello della piastra con riparazione superficiale dritta con patch in assonometria isometrica	144
7.100	Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta con patch	145

7.101	Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta con patch	145
7.102	Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta con patch	146
7.103	Spostamento in direzione z lungo il tratto 3	146
7.104	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch	147
7.105	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch	147
7.106	Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch	148
7.107	Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch	149
7.108	Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch	150
7.109	Spostamento in direzione z lungo il tratto 3	151
7.110	Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	152
7.111	Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	152
7.112	Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	153
7.113	Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	153
7.114	Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	155
7.115	Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	156
7.116	Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	156
7.117	Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	157
7.118	Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	158
7.119	Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	158
7.120	Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	159
7.121	Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto	159

Elenco delle tabelle

1.1	Confronto tra le tecniche di ispezione non distruttiva (fonte: [3])	28
2.1	Coordinate naturali dei punti della sezione di un elemento L9	34
3.1	Dimensioni della trave analizzata per apprendere il software	37
3.2	Proprietà dei materiali della trave analizzata per apprendere il software .	38
3.3	Spostamenti massimi con i diversi modelli cinematici	48
3.4	Comparazione dati dello spostamento lungo z all'estremità della trave con la teoria di Eulero Bernoulli	49
3.5	Dimensioni della trave composita analizzata per apprendere il software .	49
3.6	Proprietà dei materiali nella trave composita utilizzata per apprendere il software	49
3.7	Coordinate dei punti riportati in figura 3.19	50
3.8	Comparazione risultati ottenuti per la trave composita con valori in letteratura	50
4.1	Parametri per un composito con fibra in carbonio AS4 e una matrice in resina Hexcel 8552	53
5.1	Dimensioni del pannello a L espresse in millimetri	59
5.2	Dimensioni della piastra piana riportata in figura 5.9 espresse in centimetri	64
6.1	Dimensioni della piastra di riferimento espresse in centimetri	69
6.2	Proprietà del materiale della piastra di riferimento alla fine del ciclo di cura	72
6.3	Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra di riferimento [MPa]	74
7.1	Proprietà dell'adesivo	77
7.2	Proprietà del materiale sostituito alla fine del ciclo di cura	80
7.3	Dimensioni del modello con riparazione passante dritta [cm]	83
7.4	Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta [MPa]	85
7.5	Dimensioni del modello con riparazione passante a scalini [cm]	90
7.6	Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini [MPa]	93
7.7	Dimensioni del modello con riparazione passante inclinata	100
7.8	Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante obliqua [MPa]	102

7.9	Dimensioni del modello con riparazione passante patch con patch [cm]	106
7.10	Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch [MPa]	110
7.11	Confronto delle tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante	116
7.12	Dimensioni del modello con riparazione superficiale dritta [cm]	124
7.13	Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta [MPa]	126
7.14	Dimensioni del modello con riparazione superficiale a scalini [cm]	131
7.15	Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini [MPa]	133
7.16	Dimensioni del modello con riparazione superficiale a inclinata	138
7.17	Deformazioni e tensioni massime in valore assoluto lungo lo spessore alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale obliqua [MPa]	141
7.18	Dimensioni del modello con riparazione superficiale dritta con patch [cm]	145
7.19	Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch [MPa]	148
7.20	Confronto delle tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale	154

Capitolo 1

Introduzione ai materiali compositi

Storicamente si è privilegiato l'utilizzo di materiali metallici poiché questi presentano una serie di proprietà [7]: sono resistenti, rigidi, tenaci, relativamente facili da lavorare, sono abbastanza stabili nell'ambiente atmosferico e sono economici. Alcuni materiali metallici (leghe di alluminio o di magnesio) sono leggeri, altri (acciai, leghe di titanio, superleghe) mantengono buone proprietà meccaniche anche a temperature ben superiori alla temperatura dell' ambiente terrestre. Tuttavia questi hanno il difetto di non presentare tutte queste proprietà contemporaneamente, per esempio le leghe di alluminio sono relativamente leggere ma non resistenti come l'acciaio che di contro è più pesante, ed è qui che entrano in gioco i materiali compositi. Con il termine "materiale composito" si intende un materiale ingegnerizzato costituito da due o più componenti con proprietà fisiche e chimiche significativamente diverse che rimangono separate e distinte a livello macroscopico nella struttura finita.

I materiali compositi stanno diventando sempre più importanti nella costruzione di strutture aerospaziali [3]. Le parti di aeromobili realizzate con materiali compositi, come carenature, spoiler e superfici di controllo del volo, furono sviluppate durante gli anni '60 per il loro risparmio di peso rispetto alle parti in alluminio. I velivoli di nuova generazione di grandi dimensioni sono progettati con strutture di fusoliera e ali interamente in composito, e la riparazione di questi materiali compositi avanzati richiede una conoscenza approfondita delle strutture composite, dei materiali e degli strumenti. I vantaggi principali dei materiali compositi sono la loro elevata resistenza, il peso relativamente basso e la resistenza alla corrosione.

Il Boeing 787 Dreamliner (figura 1.1) è una famiglia di aerei di linea bimotore a fusoliera larga di medie dimensioni e lungo raggio che può ospitare 242-335 passeggeri in una tipica configurazione a tre classi [8]. Questo aeromobile, il primo grande aereo di linea commerciale al mondo a utilizzare materiali compositi come materiale primario nella sua struttura, è l'aereo di linea più efficiente in termini di consumo di carburante di Boeing.

L'aeromobile Boeing 787 è composto per l'80% da materiali compositi in volume. In peso, il contenuto di materiali è 50% composito, 20% alluminio, 15% titanio, 10% acciaio



Figura 1.1: Boeing 787 Dreamliner (fonte: [1])

e 5% altro (figura 1.2). L'alluminio è utilizzato per i bordi d'attacco delle ali e della coda; il titanio è impiegato principalmente nei motori e negli elementi di fissaggio, mentre l'acciaio è utilizzato in varie aree. Ogni aeromobile Boeing 787 contiene circa 32 000 kg di compositi CFRP, realizzati con 23 000 kg di fibra di carbonio. I compositi sono utilizzati nella fusoliera, nelle ali, nella coda, nelle porte e negli interni.

Il Boeing 787 ha ali in composito con estremità alari rastremate, dove la punta dell'ala presenta un grado di freccia maggiore rispetto al resto dell'ala. Questa caratteristica di progettazione aerodinamica migliora l'efficienza del carburante e le prestazioni di salita, riducendo al contempo la lunghezza di decollo. Ciò avviene in modo molto simile a quello dei winglet, aumentando l'allungamento alare effettivo e interrompendo i dannosi vortici di estremità alare, diminuendo così la quantità di resistenza indotta dal sollevamento sperimentata dall'aeromobile. Questa capacità di applicare varie forme di curvatura lungo l'apertura alare, così come una configurazione a doppia curvatura, è particolare delle ali in composito e non può essere ottenuta in modo efficiente nelle ali metalliche.

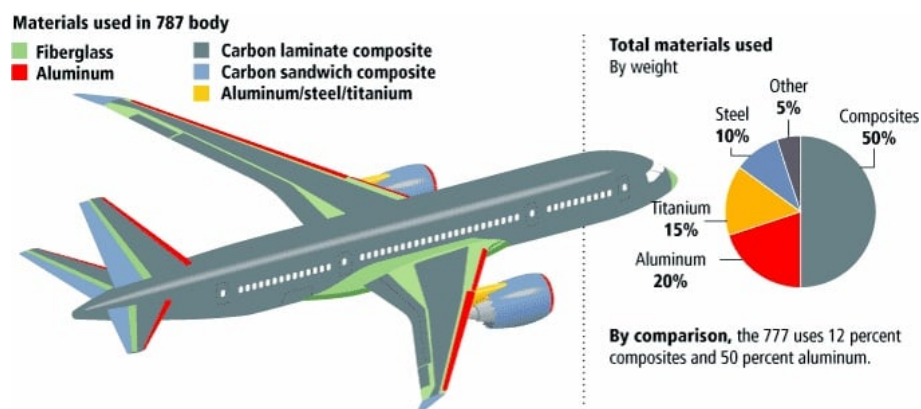


Figura 1.2: Composizione Boeing 787 Dreamliner (fonte: [2])

1.1 Descrizione delle strutture in composito

I materiali compositi consistono in una combinazione di materiali che vengono mescolati insieme per ottenere specifiche proprietà strutturali. I singoli materiali non si dissolvono né si fondono completamente nel composito, ma agiscono insieme come un tutt'uno. Normalmente, i componenti possono essere identificati fisicamente poiché si interfacciano l'uno con l'altro. Le proprietà del materiale composito sono superiori alle proprietà dei singoli materiali da cui è costituito.

Un materiale composito avanzato è costituito da un materiale fibroso immerso in una matrice di resina, generalmente laminato con fibre orientate in direzioni alternate per conferire al materiale resistenza e rigidità.

La fibra è l'elemento primario portante del composito, infatti questo è rigido solo nella direzione delle fibre. I componenti realizzati con compositi rinforzati con fibre possono essere progettati in modo che l'orientamento delle fibre produca proprietà meccaniche ottimali, ma possono solo avvicinarsi alla vera natura isotropa dei metalli, come l'alluminio e il titanio.

La matrice supporta le fibre e le lega insieme nel materiale composito, inoltre trasferisce i carichi applicati alle fibre, le mantiene nella loro posizione e orientamento scelto, conferisce al composito resistenza ambientale e determina la temperatura massima di esercizio di un composito, essendo composta generalmente in materiali polimerici. Le proprietà strutturali, come la rigidità, la stabilità dimensionale e la resistenza di un laminato composito, dipendono dalla sequenza di impilamento degli strati (plies). La sequenza di impilamento descrive la distribuzione degli orientamenti degli strati attraverso lo spessore del laminato. All'aumentare del numero di strati con orientamenti scelti, diventano possibili più sequenze di impilamento. La resistenza e la rigidità di una stratificazione composita dipendono dalla sequenza di orientamento degli strati. L'intervallo pratico di resistenza e rigidità della fibra di carbonio spazia da valori bassi quanto quelli forniti dalla fibra di vetro fino a valori alti quanto quelli forniti dal titanio. Questo intervallo di valori è determinato dall'orientamento degli strati rispetto al carico applicato. Una corretta selezione dell'orientamento degli strati nei materiali compositi avanzati è necessaria per fornire un progetto strutturalmente efficiente. Il componente potrebbe richiedere strati a 0° per reagire ai carichi assiali, strati a $\pm 45^\circ$ per reagire ai carichi di taglio e strati a 90° per reagire ai carichi laterali. Poiché i requisiti di progettazione della resistenza sono funzione della direzione del carico applicato, l'orientamento e la sequenza degli strati devono essere corretti.

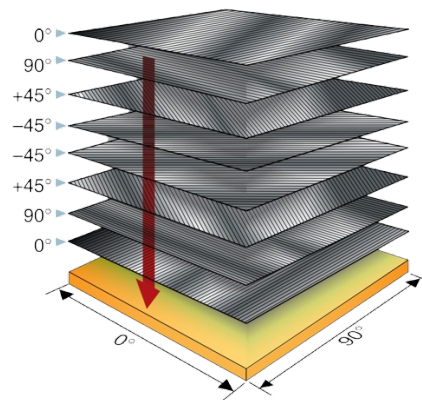


Figura 1.3: Esempio di laminazione di un composito (fonte: [3])

1.2 Fibre

La produzione di materiali compositi inizia con fibre grezze unidirezionali avvolte in bobine, confezionate come filamenti continui. Una singola fibra è chiamata filamento. La parola "strand" (filo) è anche usata per identificare una singola fibra di vetro. Gruppi di filamenti sono identificati come "tows" (stoppini), "yarns" (filati) o "rovings" (mèche). I filati di fibra di vetro sono ritorti, mentre i filati di Kevlar® non lo sono. La maggior parte delle fibre sono disponibili come fibra secca che deve essere impregnata (impreg) con una resina prima dell'uso, oppure come materiali prepreg dove la resina è già applicata alla fibra.

Tape (nastri)

I nastri prepregs unidirezionali sono stati lo standard all'interno dell'industria aerospaziale per molti anni e la fibra è tipicamente impregnata con resine termoindurenti. Il metodo di fabbricazione più comune consiste nel far passare filamenti grezzi collimati nella macchina di impregnazione dove resine fuse a caldo vengono combinate con i filamenti usando calore e pressione. I prodotti in nastro hanno un'elevata resistenza nella direzione delle fibre e praticamente nessuna resistenza trasversalmente alle fibre. Le fibre sono tenute in posizione dalla resina. I nastri hanno una resistenza maggiore rispetto ai tessuti.

Fabric (tessuti)

La maggior parte delle costruzioni in tessuto offre più flessibilità per la stratificazione di forme complesse rispetto ai nastri unidirezionali dritti. I tessuti offrono la possibilità di impregnazione della resina sia tramite soluzione che tramite il processo a caldo. Generalmente, i tessuti utilizzati per applicazioni strutturali impiegano fibre o filamenti dello stesso peso o resa sia in direzione dell'ordito (longitudinale) che della trama (trasversale). Per le strutture aerospaziali, i tessuti a trama fitta sono solitamente la scelta per risparmiare peso, minimizzare la dimensione dei vuoti di resina e mantenere l'orientamento delle fibre durante il processo di fabbricazione.

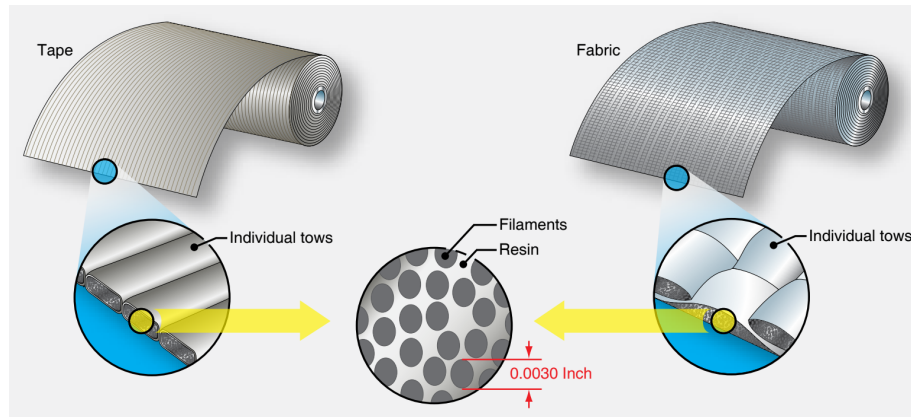


Figura 1.4: Nastri e tessuti (fonte: [3])

I tessuti strutturali sono solitamente costruiti con "tows", "strands" o "yarns" di rinforzo che si intrecciano su se stessi con una disposizione sopra/sotto durante il processo di tessitura. Gli stili di tessuto più comuni sono le armature tela o saia. La costruzione a tela deriva dall'alternarsi di ogni fibra sopra e poi sotto ogni filamento che si interseca. Con le comuni armature saia, come la saia a 5 licci o a 8 licci, i fasci di fibre attraversano sia la direzione dell'ordito che quella della trama cambiando la posizione sopra/sotto meno frequentemente.

Queste armature saia hanno meno ondulazione e sono più facili da distorcere rispetto a un'armatura tela. Con i tessuti a tela e la maggior parte dei tessuti a saia a 5 o 8 licci, il numero di filamenti di fibra è uguale sia in direzione dell'ordito che della trama. Ad esempio, una tela 3K ha spesso una designazione aggiuntiva, come 12 x 12, che significa che ci sono dodici "tows" per pollice in ciascuna direzione. Questa designazione del numero può essere variata per aumentare o diminuire il peso del tessuto o per adattarsi a diverse fibre di peso variabile.

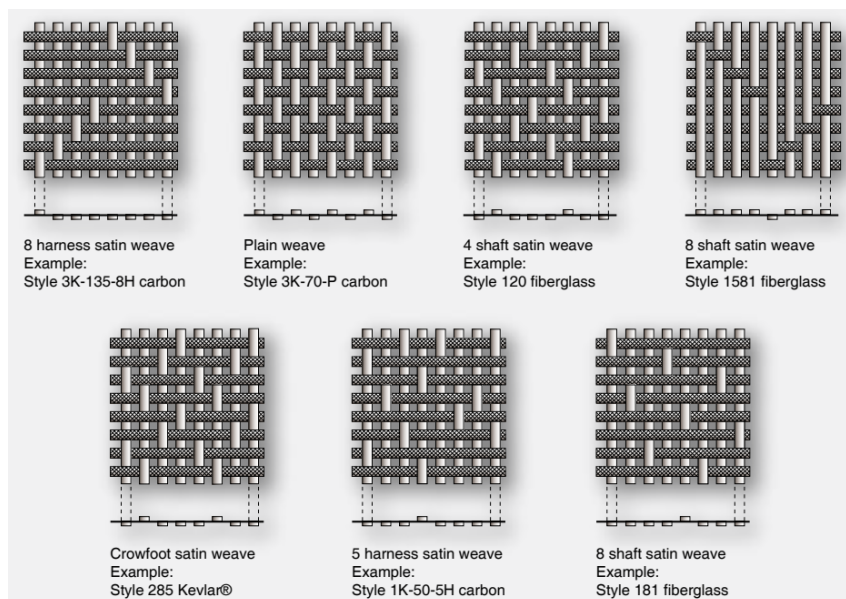


Figura 1.5: Stili di tessitura tipici dei tessuti (fonte: [3])

Materiale non tessuto

I tessuti a maglia o cuciti possono offrire molti dei vantaggi meccanici dei nastri unidirezionali. La disposizione delle fibre può essere dritta o unidirezionale, senza le svolte sopra/sotto dei tessuti. Le fibre sono tenute in posizione da cuciture con filati sottili dopo orientamenti preselezionati di uno o più strati di pelli asciutte. Questi tipi di tessuti offrono un'ampia gamma di orientamenti multistrato. Sebbene possano esserci alcune penalizzazioni di peso aggiuntivo o perdita di alcune proprietà di resistenza finale delle fibre di rinforzo, si possono ottenere alcuni miglioramenti nelle proprietà di taglio interlaminare e tenacità. Alcuni filati di cucitura comuni sono il poliestere, l'aramide o i termoplastici.

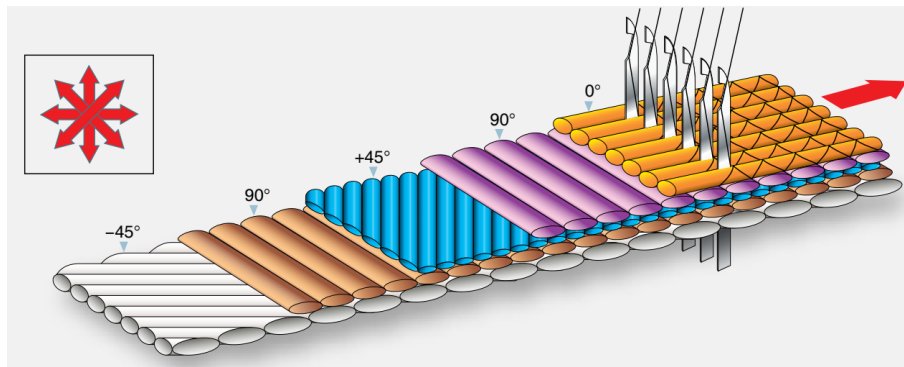


Figura 1.6: Materiale non tessuto (fonte: [3])

1.2.1 Tipi di fibra

Vetroresina

La vetroresina è spesso utilizzata per la struttura secondaria degli aeromobili, come carenature, radome e estremità alari. La vetroresina è utilizzata anche per le pale dei rotori degli elicotteri. Ci sono diversi tipi di vetroresina utilizzati nell'industria aeronautica. Il vetro elettrico, o vetro E, è identificato come tale per applicazioni elettriche. Ha un'alta resistenza al flusso di corrente. Il vetro E è fatto di vetro boro-silicato. Il vetro S e il vetro S2 identificano vetroresine strutturali che hanno una resistenza maggiore del vetro E. Il vetro S è prodotto da magnesia-allumina-silicato. I vantaggi della vetroresina sono un costo inferiore rispetto ad altri materiali compositi, resistenza alla corrosione chimica o galvanica e proprietà elettriche (la vetroresina non conduce elettricità). La vetroresina ha un colore bianco ed è disponibile come tessuto di fibra secca o prepreg.

Fibre aramidiche (Kevlar®)

Kevlar® è il nome commerciale della DuPont per le fibre aramidiche. Le fibre aramidiche sono leggere, resistenti e tenaci. Due tipi di fibra aramidica sono utilizzati nell'industria aeronautica. Il Kevlar® 49 ha un'elevata rigidità e il Kevlar® 29 ha una bassa rigidità. Un vantaggio delle fibre aramidiche è la loro elevata resistenza ai danni da impatto, quindi

sono spesso utilizzate in aree soggette a tali danni. Lo svantaggio principale delle fibre aramidiche è la loro generale debolezza a compressione e l'igroscopia. Rapporti di servizio hanno indicato che alcune parti realizzate in Kevlar® assorbono fino all'8 per cento del loro peso in acqua. Pertanto, le parti realizzate con fibre aramidiche devono essere protette dall'ambiente. Un altro svantaggio è che il Kevlar® è difficile da forare e tagliare. Le fibre si sfilacciano facilmente e sono necessarie forbici speciali per tagliare il materiale. Il Kevlar® è spesso utilizzato per applicazioni militari balistiche e di giubbotti antiproiettile. Ha un colore giallo naturale ed è disponibile come tessuto secco e prepreg. I fasci di fibre aramidiche non sono dimensionati in base al numero di fibre come il carbonio o la vetroresina, ma in base al peso.

Fibre di carbonio e grafite

Una delle prime distinzioni da fare è la differenza tra fibre di carbonio e fibre di grafite, sebbene i termini siano frequentemente usati in modo intercambiabile. Le fibre di carbonio e di grafite si basano su reti di strati di grafene (esagonali) presenti nel carbonio. Se gli strati di grafene sono impilati con un ordine tridimensionale, il materiale è definito grafite. Solitamente è richiesto un processo prolungato di tempo e temperatura per formare questo ordine, rendendo le fibre di grafite più costose. Il legame tra i piani è debole. Frequentemente si verifica disordine tale che è presente solo un ordinamento bidimensionale all'interno degli strati; questo materiale è definito carbonio.

Le fibre di carbonio sono molto rigide e resistenti, da 3 a 10 volte più rigide delle fibre di vetro. La fibra di carbonio è utilizzata per applicazioni strutturali aeronautiche, come travi del pavimento, stabilizzatori, comandi di volo e struttura primaria della fusoliera e delle ali. I vantaggi includono la sua elevata resistenza e resistenza alla corrosione. Gli svantaggi includono una conducibilità inferiore rispetto all'alluminio; pertanto, è necessaria una rete o un rivestimento di protezione contro i fulmini per le parti dell'aeromobile che sono soggette a fulmini. Un altro svantaggio della fibra di carbonio è il suo costo elevato. La fibra di carbonio è di colore grigio o nero ed è disponibile come tessuto secco e prepreg. Le fibre di carbonio hanno un elevato potenziale di causare corrosione galvanica quando utilizzate con elementi di fissaggio e strutture metalliche.

Fibre di boro

Le fibre di boro sono molto rigide e hanno un'elevata resistenza a trazione e compressione. Le fibre hanno un diametro relativamente grande e non flettono bene; pertanto, sono disponibili solo come prodotto in nastro prepreg. Una matrice epossidica è spesso utilizzata con la fibra di boro. Le fibre di boro sono utilizzate per riparare le superfici in alluminio incrinates degli aeromobili, perché l'espansione termica del boro è simile a quella dell'alluminio e non vi è alcun potenziale di corrosione galvanica. La fibra di boro è difficile da usare se la superficie del materiale di base ha una forma sagomata. Sono molto costose e possono essere pericolose per il personale. Le fibre di boro sono utilizzate principalmente in applicazioni militari.

Fibre ceramiche

Le fibre ceramiche sono utilizzate per applicazioni ad alta temperatura, come le pale di turbina in un motore a turbina a gas. Le fibre ceramiche possono essere utilizzate a temperature fino a 1200 °C.

Fibre per la Protezione Contro i Fulmini

Un aeroplano in alluminio è piuttosto conduttivo ed è in grado di dissipare le elevate correnti derivanti da un fulmine. Le fibre di carbonio sono 1000 volte più resistenti dell'alluminio al flusso di corrente, e la resina epossidica è 1 000 000 di volte più resistente. La superficie di un componente composito esterno spesso consiste in uno strato o una lamina di materiale conduttivo per la protezione contro i fulmini, poiché i materiali compositi sono meno conduttivi dell'alluminio. Vengono utilizzati molti tipi diversi di materiali conduttivi, che vanno dal tessuto di grafite rivestito di nichel alle reti metalliche, dalla fibra di vetro alluminizzata alle vernici conduttive. I materiali sono disponibili per il wet layup e come prepreg.

Oltre a una normale riparazione strutturale, il tecnico deve anche ricreare la conduttività elettrica progettata nel pezzo. Questi tipi di riparazione generalmente richiedono l'esecuzione di un test di conduttività con un ohmmetro per verificare la resistenza elettrica minima attraverso la struttura. Quando si riparano questi tipi di strutture, è estremamente importante utilizzare solo i materiali approvati da fornitori autorizzati, inclusi elementi come composti di riempimento, sigillanti, adesivi e così via.

Fibre del futuro

In [2] vengono presentati dei possibili materiali che potrebbero essere utilizzati in futuro. Tra questi troviamo fibre composte in seta di ragno. Queste mostrano un'elevata duttilità, consentendo l'allungamento di una fibra fino al 140% della sua lunghezza normale, inoltre la seta di ragno mantiene la sua resistenza a temperature basse fino a -40 °C. Queste proprietà rendono la seta di ragno ideale per l'uso come materiale in fibra nella produzione di materiali compositi duttili che manterranno la loro resistenza anche a temperature anomale. I materiali compositi duttili saranno utili per un aeromobile in parti che saranno soggette a sollecitazioni variabili, come l'unione delle semiali con la fusoliera. La maggiore resistenza, tenacità e duttilità di un tale composito consentiranno di applicare sollecitazioni maggiori alla parte o all'unione prima che si verifichi un guasto catastrofico. I compositi sintetici a base di seta di ragno avranno anche il vantaggio che le loro fibre saranno biodegradabili, risolvendo in parte uno dei problemi legati ai compositi, ovvero lo smaltimento.

Ad oggi si sono eseguiti molti tentativi per riprodurre la seta di ragno in laboratorio, tuttavia non è stata ancora raggiunta una risintesi perfetta.

1.3 Matrice

1.3.1 Resine termoindurenti

Resina è un termine generico utilizzato per designare il polimero. La resina, la sua composizione chimica e le proprietà fisiche influenzano fundamentalmente la lavorazione, la fabbricazione e le proprietà finali di un materiale composito. Le resine termoindurenti sono le più diverse e ampiamente utilizzate tra tutti i materiali artificiali. Sono facilmente colabili o formate in qualsiasi forma, sono compatibili con la maggior parte degli altri materiali e polimerizzano facilmente (tramite calore o catalizzatore) in un solido insolubile. Le resine termoindurenti sono anche eccellenti adesivi e agenti leganti.

Resine poliestere

Le resine poliestere sono resine relativamente economiche e a rapida lavorazione, generalmente utilizzate per applicazioni a basso costo. Per le parti interne degli aeromobili vengono utilizzate resine in poliestere a bassa emissione di fumo. I poliesteri rinforzati con fibre possono essere lavorati con molti metodi. I metodi di lavorazione comuni includono lo stampaggio a compressione, la stratificazione a umido (wet layup), lo stampaggio a pressa (sotto vuoto), lo stampaggio a iniezione (injection molding), l'avvolgimento filamentare (filament winding), la pultrusione (pultrusion) e la lavorazione in autoclave.

Resina vinilestere

L'aspetto, le proprietà di manipolazione e le caratteristiche di polimerizzazione delle resine vinilestere sono le stesse delle resine poliestere convenzionali. Tuttavia, la resistenza alla corrosione e le proprietà meccaniche dei compositi in vinilestere sono notevolmente migliorate rispetto ai compositi in resina poliestere standard.

Resina fenolica

Le resine fenolo-formaldeide furono prodotte commercialmente per la prima volta nei primi anni del 1900 per l'uso nel mercato commerciale. L'urea-formaldeide e la melammina-formaldeide apparvero negli anni 1920-1930 come un'alternativa meno costosa per l'uso a temperature più basse. Le resine fenoliche sono utilizzate per i componenti interni grazie alle loro basse caratteristiche di fumo e infiammabilità.

Resina epossidica

Le epossidiche sono resine termoindurenti polimerizzabili e sono disponibili in una varietà di viscosità, da liquide a solide. Esistono molti tipi diversi di resine epossidiche. Queste sono ampiamente utilizzate per materiali prepreg e adesivi strutturali. I vantaggi delle resine epossidiche sono elevata resistenza e modulo elastico, bassa emissione di sostanze volatili, eccellente adesione, basso ritiro, buona resistenza chimica e facilità di lavorazione. I loro principali svantaggi sono la fragilità e la riduzione delle proprietà

in presenza di umidità. La lavorazione o la polimerizzazione delle resine epossidiche è più lenta rispetto alle resine poliestere. Le tecniche di lavorazione includono lo stampaggio in autoclave, l'avvolgimento filamentare, lo stampaggio a compressione, sotto vuoto, per trasferimento di resina e la pultrusione. Le temperature di polimerizzazione variano dalla temperatura ambiente a circa 180 °C. Le temperature di polimerizzazione più comuni variano tra 120 °C e 180 °C.

Resine in poliimmidi

Le resine poliimmide eccellono in ambienti ad alta temperatura dove la loro resistenza termica, stabilità all'ossidazione, basso coefficiente di espansione termica e resistenza ai solventi avvantaggiano la progettazione. I loro usi primari sono circuiti stampati e strutture calde di motori e fusoliere. Una poliimmide può essere sia una resina termoindurente che una termoplastica. Le poliimmidi richiedono elevate temperature di polimerizzazione, solitamente superiori a 290 °C. Di conseguenza, i normali materiali per l'insaccamento di compositi epossidici non sono utilizzabili e l'attrezzatura in acciaio diventa una necessità. Vengono utilizzati film per l'insaccamento e il distacco in poliimmide, come il Kapton®. È estremamente importante che l'Upilex® sostituisca i film di insaccamento in nylon e di distacco in politetrafluoroetilene (PTFE) a basso costo, comuni nella lavorazione dei compositi epossidici. Per i materiali di sfato e assorbimento devono essere utilizzati tessuti in fibra di vetro invece di materiali in feltro di poliestere a causa del basso punto di fusione del poliestere.

Resine in polibenzimidazoli (PBI)

La resina polibenzimidazolo è estremamente resistente alle alte temperature e viene utilizzata per materiali ad alta temperatura. Queste resine sono disponibili come adesivo e fibra.

Resine in bismaleimmidi (BMI)

Le resine bismaleimmide hanno una capacità di temperatura più elevata e una maggiore tenacità rispetto alle resine epossidiche e offrono prestazioni eccellenti a temperature ambiente ed elevate. La lavorazione delle resine bismaleimmide è simile a quella delle resine epossidiche. Le BMI sono utilizzate per motori aeronautici e componenti ad alta temperatura. Queste sono adatte, tra gli altri, alla lavorazione standard in autoclave, allo stampaggio a iniezione, allo stampaggio per trasferimento di resina e al compound stampato in fogli (SMC).

1.3.2 Resine termoplastiche

I materiali termoplastici possono essere ripetutamente ammorbiditi con un aumento di temperatura e induriti con una diminuzione di temperatura. La velocità di lavorazione è il vantaggio primario dei materiali termoplastici. Durante la lavorazione non avviene la polimerizzazione chimica del materiale e il materiale può essere modellato tramite stampaggio o estrusione quando è morbido.

Termoplastici semicristallini

I termoplastici semicristallini possiedono proprietà intrinseche di resistenza alla fiamma, tenacità superiore, buone proprietà meccaniche a temperature elevate e dopo impatto, e basso assorbimento di umidità. Sono utilizzati nelle strutture secondarie e primarie degli aeromobili. Combinati con fibre di rinforzo, sono disponibili in compound per stampaggio a iniezione, fogli stampabili a compressione, nastri unidirezionali, prepreg fabbricati da tow (towpreg) e prepreg tessuti. Le fibre impregnate in termoplastici semicristallini includono carbonio, carbonio rivestito di nichel, aramide, vetro, quarzo e altre.

Termoplastici amorfi

I termoplastici amorfi sono disponibili in diverse forme fisiche, tra cui film, filamenti e polveri. Combinati con fibre di rinforzo, sono anche disponibili in compound per stampaggio a iniezione, fogli casuali stampabili a compressione, nastri unidirezionali, prepreg tessuti, etc. Le fibre utilizzate sono principalmente carbonio, aramide e vetro. I vantaggi specifici dei termoplastici amorfi dipendono dal polimero. Tipicamente, le resine si distinguono per la facilità e la velocità di lavorazione, la capacità di alta temperatura, le buone proprietà meccaniche, l'eccellente tenacità e resistenza all'impatto e la stabilità chimica. La stabilità si traduce in una durata di conservazione illimitata, eliminando la necessità di conservazione a freddo dei prepreg termoindurenti.

Polietereterchetone (PEEK)

Il polietereterchetone, meglio conosciuto come PEEK, è un termoplastico ad alta temperatura. Questo materiale chetonico aromatico offre eccezionali caratteristiche termiche e di combustione e resistenza a una vasta gamma di solventi e fluidi proprietari. Il PEEK può anche essere rinforzato con vetro e carbonio.

1.4 Processo di polimerizzazione

La fabbricazione di materiali compositi [9] per l'aerospazio comporta la produzione di materiali costituiti da due o più componenti con proprietà fisiche o chimiche significativamente diverse. Questi compositi sono progettati per ottenere proprietà che i singoli materiali non possono fornire da soli.

Il processo di fabbricazione include fasi come la stratificazione (lay-up), seguita dalla polimerizzazione (curing), dalla finitura e dai controlli di qualità.

Questo avanzato processo di fabbricazione richiede una profonda comprensione del comportamento dei materiali in varie condizioni e la capacità di progettare e produrre componenti in grado di resistere alle sollecitazioni e alle temperature estreme incontrate negli ambienti aerospaziali.

1.4.1 Metodi di deposizione del materiale

Il primo passaggio nella produzione è la preparazione del materiale. Non sempre si opta per un prepreg poiché sebbene più semplice deve essere conservato a bassa temperatura ed è più costoso. Si deve preparare il tool applicando uno spray o un coating, che favorisce il rilascio dopo la polimerizzazione. In seguito viene depositato il materiale, il quale in origine veniva applicato a mano, ora ci sono macchinari automatici che garantiscono una maggiore precisione e automatizzazione. In generale si hanno tre processi principali applicabili per quanto riguarda la deposizione del materiale, sia a livello della fibra, sia a livello di matrice:

1. Wet layup
2. Liquid composite molding
3. Automated fiber placement

Wet layup

La stratificazione a umido è uno dei processi più semplici per la fabbricazione di materiali compositi. Il processo inizia con la disposizione manuale delle fibre su una superficie di lavoro, seguita dall'applicazione, sempre manuale, della resina. Le fibre impregnate possono essere disposte all'interno o all'esterno di uno stampo. Se disposte all'esterno, il materiale composito viene trasferito nello stampo dopo che le fibre sono saturate di resina.

Liquid composite molding

Lo Stampaggio di Compositi Liquidi (Liquid Composite Molding - LCM) è una famiglia di processi in cui fibre secche poste all'interno o sopra uno stampo vengono saturate con una resina liquida. La resina viene distribuita creando un differenziale di pressione, che può essere vuoto, pressione di iniezione o una combinazione di entrambi.

Automated fiber placement

Il posizionamento automatico delle fibre è un processo utilizzato per posizionare automaticamente le fibre (in forma di prepreg) su uno stampo o una superficie per creare componenti compositi avanzati. La testa che applica il materiale può essere montata su un braccio robotico o su un sistema a ponte. Questa tecnica è molto precisa ma, allo stesso tempo, molto costosa e di conseguenza viene utilizzata solo in campo aerospaziale.

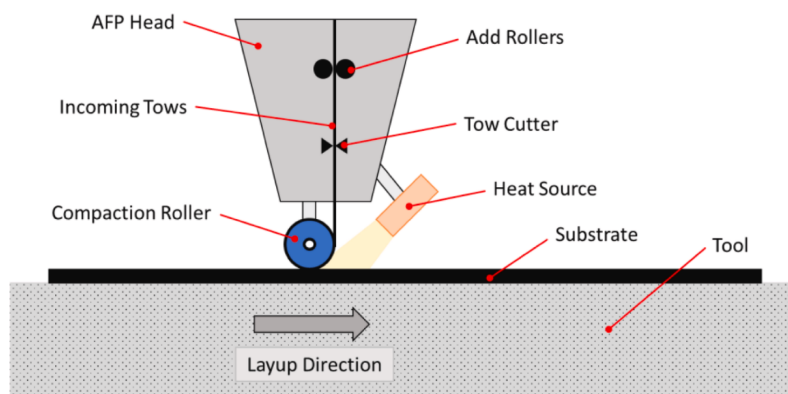


Figura 1.7: Automated fiber placement (fonte: [4])

1.4.2 Polimerizzazione

Le parti e le strutture realizzate con compositi termoindurenti rinforzati con fibre continue vengono fabbricate disponendo la miscela non polimerizzata di fibra e resina nella forma desiderata e quindi polimerizzando il materiale. Il processo di polimerizzazione si realizza esponendo il materiale a temperature e pressioni elevate per un periodo di tempo prestabilito. Le temperature elevate applicate durante la polimerizzazione forniscono il calore necessario per avviare e mantenere le reazioni chimiche nella resina che causano i cambiamenti desiderati nella struttura molecolare. La pressione applicata fornisce la forza necessaria per espellere la resina in eccesso dal materiale, per consolidare i singoli strati e per comprimere i vuoti [10].

Per quanto riguarda la polimerizzazione, o cura, del materiale composito esistono diverse tecniche [5], ognuna con vantaggi e svantaggi. Le più comuni sono:

- **Polimerizzazione fuori da autoclave (OoA):** Il composito viene posizionato in uno stampo, sacco a vuoto per applicare pressione e rimuovere l'aria, e polimerizzato in un forno. Questo processo consente di avere costi inferiori all'autoclave ma allo stesso tempo anche la qualità del componente finale è minore.
- **Stampaggio per Trasferimento di Resina (RTM):** Si tratta di un processo di stampaggio a stampo chiuso in cui le fibre asciutte vengono disposte in uno stampo e resina termoindurente viene iniettata sotto pressione, creando una matrice continua attorno alle fibre. Si ottiene così un'elevata ripetibilità e una buona finitura superficiale. Inoltre se ben progettato si ha un ridotto numero di vuoti. Come contro si ha un elevato costo iniziale per lo stampo, si rende necessario uno studio

del flusso della resina e si hanno limitazioni per quanto riguarda lo spessore del componente.

- **Riscaldamento a induzione:** Una bobina genera un campo magnetico che induce correnti nei materiali compositi conduttivi, come la fibra di carbonio. Queste correnti producono calore localizzato, avviando la polimerizzazione della resina. Si ha quindi un riscaldamento rapido e uniforme, ma è necessario un attento controllo della temperatura per evitare surriscaldamenti localizzati. Inoltre, è mandatorio l'uso di fibre conduttive, il che può limitare la scelta del materiale.
- **Polimerizzazione a infrarossi:** Viene utilizzata la radiazione a infrarossi per riscaldare la superficie del composito, attivando così la polimerizzazione della resina.
- **Stampaggio a compressione:** Si tratta di un processo a stampo chiuso in cui un materiale composito viene compresso e polimerizzato tra due metà di uno stampo riscaldato applicando alta pressione. Come per l'RTM si ha un'elevata ripetibilità e una buona finitura superficiale, tuttavia richiede stampi durevoli e costosi e le geometrie realizzabili sono limitate.
- **Polimerizzazione in autoclave:** Costituisce una metodologia avanzata per la fabbricazione di materiali compositi [11]. Esso si basa sull'applicazione simultanea e controllata di energia termica e pressione all'interno di un ambiente pressurizzato. Previa disposizione del laminato fibra-resina nello stampo e sigillatura sotto vuoto, il sistema viene introdotto in autoclave. Qui, viene implementato un ciclo termico sotto pressione (valori tipici tra 0.6 e 1 MPa) e a temperature che possono eccedere i 453 K, in funzione delle caratteristiche del sistema resina impiegato. Tale combinazione di parametri operativi favorisce la rimozione di gas residui all'interno del composito, la minimizzazione della porosità interna e l'ottenimento di una compattazione uniforme del laminato. Il risultato è un componente caratterizzato da elevate proprietà meccaniche, ridotta massa e un livello qualitativo conforme agli standard del settore aerospaziale.

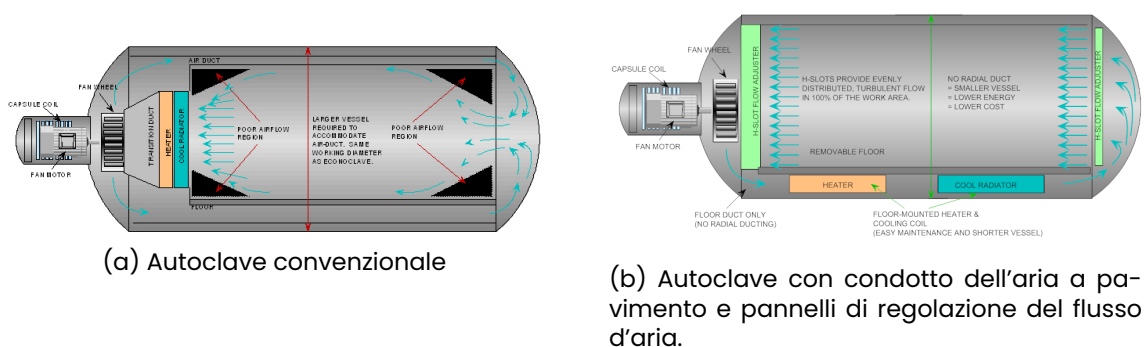


Figura 1.8: Autoclave per la polimerizzazione dei materiali compositi (fonte: [5])

1.5 Processi di riparazione per materiali compositi

1.5.1 Danneggiamenti in servizio

I danni che possono verificarsi in servizio includono [3]:

- Degradazione ambientale
- Danni da impatto
- Fatica
- Cricche da sovraccarico locale
- Scorrimento
- Delaminazione
- Frattura delle fibre
- Erosione

Al fine di verificare lo stato di salute di un materiale composito, è possibile utilizzare tecniche di ispezione non distruttive (NDT).

- **Ispezione Visiva:** Metodo primario che rileva danni superficiali come bruciature, macchie, ammaccature, penetrazioni, abrasioni o scheggiature. Si utilizzano strumenti come torce, lenti, specchi e boroscopi per un'analisi più dettagliata. Non rileva difetti interni.
- **Test Sonoro Acustico (Coin Tapping):** Tecnica che utilizza suoni nella gamma udibile per rilevare delaminazioni e scollamenti. Si picchietta la superficie e si ascolta la risposta sonora; un suono sordo indica un'area difettosa. Efficace per pelli sottili, ma non affidabile per strutture con più di quattro strati.
- **Test di Percussione Automatizzato:** Simile al test manuale, ma utilizza un solenoide per produrre impatti multipli. Un trasduttore misura la forza e la durata dell'impatto; le deviazioni da un segnale di riferimento indicano danni.
- **Ispezione ad Ultrasuoni:** Utilizza onde sonore ad alta frequenza per rilevare difetti interni come delaminazioni, vuoti o inclusioni. Diverse tecniche (trasmissione, eco-impulso, bond tester, phased array) analizzano il segnale sonoro trasmesso o riflesso.
- **Radiografia:** Utilizza raggi X per visualizzare l'interno della parte, registrando l'assorbimento delle radiazioni su una pellicola. Efficace per rilevare anomalie interne parallele al fascio di raggi X, ma meno per delaminazioni perpendicolari al fascio. Richiede precauzioni di sicurezza.
- **Termografia:** Misura le variazioni di temperatura superficiale per rilevare difetti basandosi sulle differenze di conducibilità termica. Efficace per difetti vicino alla superficie o in laminati sottili.

- **Neutronografia:** Tecnica di imaging che utilizza neutroni per visualizzare le caratteristiche interne, in particolare elementi leggeri come l'idrogeno presente in acqua e prodotti di corrosione. Complementare alla radiografia a raggi X.
- **Rilevatore di Umidità:** Misura la perdita di potenza a radiofrequenza causata dalla presenza di acqua, utile per rilevare l'infiltrazione di liquidi nelle strutture a nido d'ape.

Method of Inspection	Type of Defect							
	Disbond	Delamination	Dent	Crack	Hole	Water Ingestion	Overheat and Burns	Lightning Strike
Visual	X (1)	X (1)	X	X	X		X	X
X-Ray	X (1)	X (1)		X (1)		X		
Ultrasonic TTU	X	X						
Ultrasonic pulse echo		X				X		
Ultrasonic bondtester	X	X						
Tap test	X (2)	X (2)						
Infrared thermography	X (3)	X (3)				X		
Dye penetrant				X (4)				
Eddy current				X (4)				
Shearography	X (3)	X (3)						
Notes: (1) For defects that open to the surface (2) For thin structure (3 plies or less) (3) The procedures for this type of inspection are being developed (4) This procedure is not recommended								

Tabella 1.1: Confronto tra le tecniche di ispezione non distruttiva (fonte: [3])

1.5.2 Tecniche di riparazione

Uno dei metodi migliori per riparare parti composite[12] è l'utilizzo di toppe composite. Le toppe composite presentano molti vantaggi rispetto ad altri metodi di riparazione. La toppa migliora il comportamento a fatica, riduce la corrosione ed è facilmente sagomabile. Il vantaggio più importante della toppa composita è che non vengono creati nuovi fori durante l'installazione e la struttura non si indebolisce. La toppa riduce il fattore di intensità degli sforzi (SIF) e di conseguenza rallenta e arresta la cricca. Uno dei principali vantaggi della tecnologia di riparazione con toppe è che il peso della struttura non aumenta notevolmente. L'installazione di una toppa composita richiede meno abilità della saldatura. La leggerezza, la flessibilità e la varietà delle toppe le hanno rese popolari. Il materiale di riparazione deve avere una capacità portante minima pari al materiale di base. L'uso di toppe composite è molto comune nelle riparazioni di aeromobili ed è limitato agli elicotteri. Fondamentalmente, qualsiasi riparazione ai componenti dinamici non è consentita sugli elicotteri e il componente verrà sostituito al termine della sua vita utile. Tuttavia, in casi di emergenza, come quando un albero di un elicottero viene danneggiato sul campo di battaglia da colpi di proiettile, queste toppe possono essere temporaneamente utilizzate per riparare i componenti dell'elicottero. Sebbene l'uso delle toppe composite risalga a 30 anni fa, ora è stato approvato solo per elementi importanti di grado 2. Le ragioni del cedimento della toppa includono l'aumento del SIF sulla piastra principale e l'aumento della deformazione da taglio o dello sforzo di spellamento sull'adesivo, la separazione, la delaminazione, l'assorbimento di umidità, etc. Il materiale della toppa ha scarso effetto sulla resistenza statica e un grande effetto sulla resistenza a fatica.

I due metodi principali per fissare una toppa di riparazione alla struttura danneggiata sono i fissaggi meccanici e l'incollaggio adesivo [13]. Il metodo di fissaggio deve essere in grado di trasferire le sollecitazioni dalla struttura originale al materiale di riparazione per ritardare la crescita delle cricche e minimizzare la concentrazione degli sforzi.

Una differenza fondamentale tra le toppe fissate meccanicamente e quelle incollate adesivamente per la riparazione di cricche è che le prime sono attaccate in modo così flessibile che la cricca continua a propagarsi sotto la toppa, a meno che non venga prima eliminata rimuovendo una quantità sufficiente di materiale per ridurre la concentrazione di sforzi all'apice della cricca. Ciò può comportare la rimozione di grandi quantità di struttura intatta, trasformando cricche acute in fori rotondi. Quando è possibile applicare riparazioni incollate, tuttavia, l'interfaccia tra la toppa e la struttura è così rigida che è possibile rimuovere poco o nessun materiale. Anche un foro praticato attraverso le estremità della cricca potrebbe non essere desiderabile perché rimuoverebbe la zona di materiale incrudito che di per sé impedisce un'ulteriore crescita della cricca.

Il principale svantaggio delle riparazioni incollate è la loro complessità. I controlli del processo di installazione sono molto rigorosi; sono richiesti materiali e processi avanzati; e la progettazione stessa è più complessa.

Gli strati della toppa vengono solitamente posizionati seguendo la sequenza di stratificazione rastremata con lo strato più piccolo per primo, ma un metodo alternativo è quello di utilizzare la sequenza di stratificazione con lo strato più grande per primo [3]. In questa sequenza, il primo strato di tessuto di rinforzo copre completamente l'area di lavoro, seguito da strati progressivamente più piccoli, e quindi viene finito con uno o due strati esterni aggiuntivi che si estendono sopra la toppa e sul laminato sano per una certa distanza. Entrambe le tecniche sono mostrate in figura 1.9.

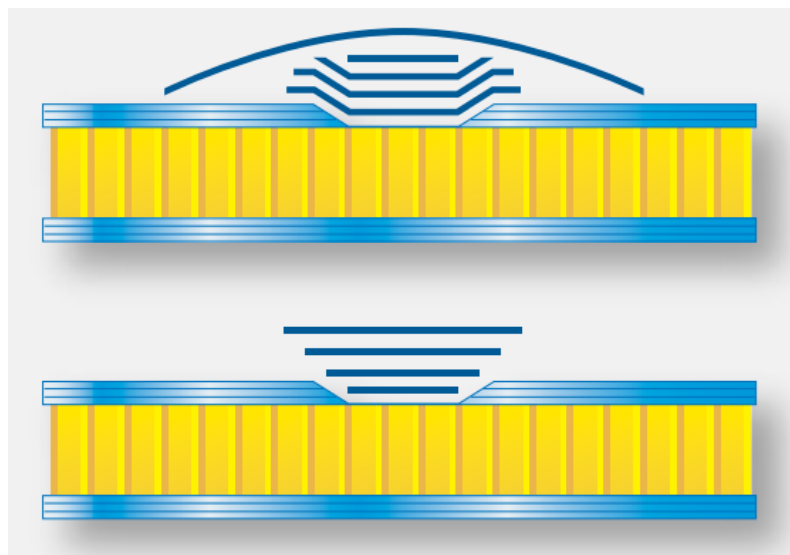


Figura 1.9: Tecniche di riparazione con toppe composite (fonte: [3])

1.5.3 Tecniche di insaccamento sotto vuoto

Lo stampaggio con sacco a vuoto è un processo in cui la stratificazione viene polimerizzata sotto la pressione generata creando il vuoto nello spazio tra la stratificazione e un foglio flessibile posto sopra di essa e sigillato ai bordi. Nel processo di stampaggio con sacco a vuoto, gli strati vengono generalmente posizionati nello stampo tramite stratificazione manuale utilizzando prepreg o wet layup. Per lo stampaggio con sacco a vuoto sono preferibili resine ad alta fluidità.

Insaccamento sotto vuoto monofacciale

Questo è il metodo preferito se la parte da riparare è abbastanza grande da consentire l'applicazione di un sacco a vuoto su un solo lato della riparazione. Il sacco a vuoto viene fissato in posizione con nastro adesivo tackificante e un raccordo per il vuoto viene fatto passare attraverso il sacco per creare il vuoto.

Insaccamento a busta

L'insaccamento a busta è un processo in cui la parte da riparare viene completamente racchiusa in un sacco a vuoto o il sacco viene avvolto attorno all'estremità del componente per ottenere una sigillatura adeguata. Viene frequentemente utilizzato per parti rimovibili di aeromobili, come superfici di controllo del volo, pannelli di accesso, etc., e quando la geometria di una parte e/o la posizione della riparazione rendono molto difficile insaccare correttamente sotto vuoto e sigillare l'area in un vuoto. In alcuni casi, una parte potrebbe essere troppo piccola per consentire l'installazione di un vuoto con sacco monofacciale. Altre volte, la riparazione si trova sull'estremità di un componente di grandi dimensioni che deve avere un sacco a vuoto avvolto attorno alle estremità e sigillato completamente intorno.

Capitolo 2

Modelli avanzati per l'analisi della manifattura di materiali compositi

Nelle analisi che saranno eseguite nei capitoli successivi verrà utilizzato un software sviluppato dal MUL2 (Multilayered structures and multifields analysis) [14], gruppo di ricerca guidato dal Professor Carrera nel Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino. Questo utilizza un modello cinematico unidimensionale. Le equazioni di governo sono state derivate dalla Carrera Unified Formulation (CUF) [15, 16]. Il sistema di riferimento utilizzato è riportato in figura 2.1.

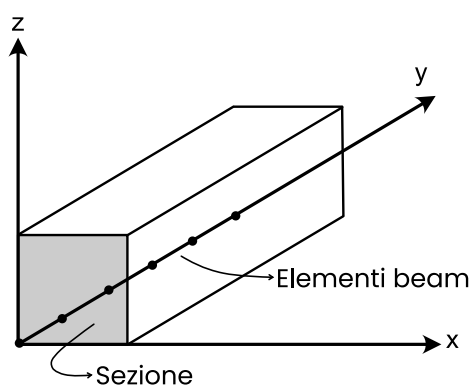


Figura 2.1: Sistema di riferimento

La coordinata y è allineata con l'asse della trave mentre x e z giacciono sulla sezione. Il vettore degli spostamenti è descritto dalla 2.1, dove u_x , u_y e u_z sono le tre componenti di spostamento.

$$\mathbf{u}^T = (u_x, u_y, u_z) \quad (2.1)$$

Di conseguenza le deformazioni e le tensioni sono rispettivamente descritte dalla 2.2 e

dalla 2.3

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xy},) \quad (2.2)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^T = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{xy},) \quad (2.3)$$

La relazione tra gli spostamenti e le deformazioni è descritta dall'equazione geometrica 2.4 dove $\mathbf{D}$ è una matrice di operatori differenziali lineari.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (2.4)$$

Utilizzando la legge di Hooke è possibile ottenere la relazione 2.5 tra gli stress e le deformazioni dove $\mathbf{C}$ è la matrice di rigidità del materiale.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.5)$$

2.1 Modello cinematico

Il modello cinematico monodimensionale raffinato qui adottato assume che il campo di spostamento della sezione trasversale possa essere scritto come espansioni di Taylor (TE) o come un'espansione di funzioni di Lagrange bidimensionali (LE). Nel caso delle espansioni di Taylor si ottiene il sistema di equazioni 2.6, il quale è una generalizzazione del campo di spostamento della trave di Eulero-Bernoulli 2.7.

$$\begin{cases} u_x = u_{x0} + u_{x1}x + u_{x2}z + u_{x3}x^2 + \dots \\ u_y = u_{y0} + u_{y1}x + u_{y2}z + u_{y3}x^2 + \dots \\ u_z = u_{z0} + u_{z1}x + u_{z2}z + u_{z3}x^2 + \dots \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} u_x = u_{x0} \\ u_y = u_{y0} + u_{y1}x + u_{y2}z \\ u_z = u_{z0} \end{cases} \quad (2.7)$$

La figura 2.2 mostra un esempio delle discretizzazioni della sezione trasversale.

Il campo di spostamento può essere descritto in forma generale dalla 2.8, dove $F_\tau(x, z)$ è la funzione di espansione sulla sezione trasversale, $\mathbf{u}_\tau(y)$ è il vettore degli spostamenti incogniti lungo l'asse della trave, e M è il numero di termini nelle funzioni di espansione.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_\tau(y) F_\tau(x, z) \quad \tau = 1, \dots, M \quad (2.8)$$

Se la sezione trasversale è descritta con un elemento di Lagrange a quattro nodi (L4), il campo di spostamento assume la forma 2.9 dove per denotare le funzioni è stata usata la L per sottolineare che si tratta di polinomi di Lagrange.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 L_1 + \mathbf{u}_2 L_2 + \mathbf{u}_3 L_3 + \mathbf{u}_4 L_4 \quad (2.9)$$

Qualora si impieghi più di un elemento, la compatibilità degli spostamenti a livello di sezione trasversale può essere garantita attraverso una procedura di assemblaggio

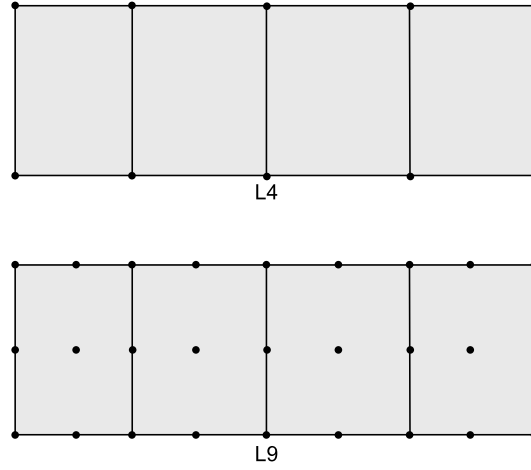


Figura 2.2: Esempi di discretizzazioni della sezione trasversale mediante elementi lineari (L4) e quadratici (L9)

standard.

Il modello ad elementi finiti approssima le incognite assiali $\mathbf{u}_\tau(y)$ servendosi delle funzioni di forma monodimensionali N_j . Il campo di spostamento assume quindi la forma 2.10, dove N_i sono le funzioni di forma introdotte con il modello agli elementi finiti, N_n è il numero di nodi dell'elemento e $\mathbf{u}_{i\tau}$ sono le incognite nodali.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{i\tau} N_i(y) F_\tau(x, z) \quad \tau = 1, \dots, M; \quad i = 1, \dots, N_n \quad (2.10)$$

2.1.1 Espansioni di Lagrange

Da [17], i modelli con espansioni di Lagrange (LE) sfruttano i polinomi di Lagrange per costruire teorie monodimensionali di ordine superiore. Qui viene descritto l'elemento a nove punti, L9, per la sezione trasversale. La formulazione isoparametrica viene utilizzata per trattare geometrie di forma arbitraria. Le funzioni di interpolazione L9 sono date da [18].

$$\begin{aligned} F_\tau &= \frac{1}{4} (r^2 + rr_\tau) (s^2 + ss_\tau) & \tau &= 1, 3, 5, 7 \\ F_\tau &= \frac{1}{2} s_\tau^2 (s^2 - ss_\tau) (1 - r^2) + \frac{1}{2} r_\tau^2 (r^2 - rr_\tau) (1 - s^2) & \tau &= 2, 4, 6, 8 \\ F_\tau &= (1 - r^2) (1 - s^2) & \tau &= 9 \end{aligned} \quad (2.11)$$

r e s variano da -1 a $+1$. La figura 2.3 mostra il posizionamento dei punti, e la tabella 2.1 riporta i punti delle coordinate naturali.

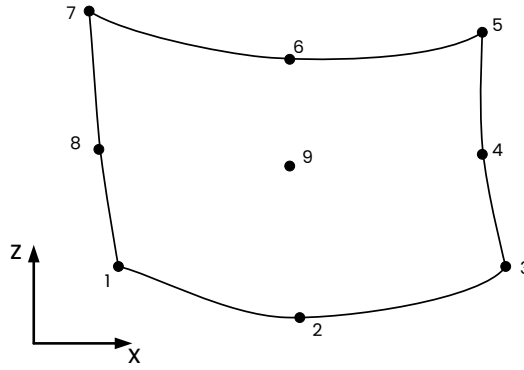


Figura 2.3: Sezione di un elemento L9

Punto	r_τ	s_τ
1	-1	-1
2	0	-1
3	1	-1
4	1	0
5	1	1
6	0	1
7	-1	1
8	-1	0
9	0	0

Tabella 2.1: Coordinate naturali dei punti della sezione di un elemento L9

Il campo degli spostamenti di un elemento L9 è riportato dalla 2.12, dove $u_{x1}, \dots, u_{z9}$ sono le variabili di spostamento del problema e rappresentano le componenti di spostamento traslazionale di ciascuno dei nove punti dell'elemento L9. Ciò significa che i modelli LE forniscono elementi che hanno solo variabili di spostamento.

$$\begin{aligned}
 u_x &= F_1 u_{x1} + F_2 u_{x2} + F_3 u_{x3} + F_4 u_{x4} + F_5 u_{x5} + F_6 u_{x6} + F_7 u_{x7} + F_8 u_{x8} + F_9 u_{x9} \\
 u_y &= F_1 u_{y1} + F_2 u_{y2} + F_3 u_{y3} + F_4 u_{y4} + F_5 u_{y5} + F_6 u_{y6} + F_7 u_{y7} + F_8 u_{y8} + F_9 u_{y9} \\
 u_z &= F_1 u_{z1} + F_2 u_{z2} + F_3 u_{z3} + F_4 u_{z4} + F_5 u_{z5} + F_6 u_{z6} + F_7 u_{z7} + F_8 u_{z8} + F_9 u_{z9}
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

2.2 Equazioni di governo per analisi statiche

Le equazioni di governo sono state derivate dal principio dei lavori virtuali (PLV), il quale nel caso statico assume la forma 2.13, dove L_{int} è il lavoro interno, L_{ext} il lavoro esterno e δ denota che si tratta di variazioni virtuali.

$$\delta L_{\text{int}} = \delta L_{\text{ext}} \tag{2.13}$$

Espandendo i termini si ottiene la variazione virtuale del lavoro interno 2.14

$$\delta L_{\text{int}} = \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV \tag{2.14}$$

Introducendo le equazioni costitutive e le relazioni geometriche si ottiene la 2.15, dove $\mathbf{k}^{ij\tau s}$ è la matrice di rigidezza espressa sotto forma di un nucleo fondamentale, che è una matrice 3x3 con una forma invariante, $\mathbf{u}_{\tau i}$ è il vettore delle incognite nodali e $\delta \mathbf{u}_{sj}$ è la sua prima variazione¹.

$$\delta L_{\text{int}} = \delta \mathbf{u}_{sj}^T \int_V [N_j F_s \mathbf{D}^T \mathbf{C} \mathbf{D} F_\tau N_i] dV \mathbf{u}_{\tau i} = \delta \mathbf{u}_{sj}^T \mathbf{k}^{ij\tau s} \mathbf{u}_{\tau i} \quad (2.15)$$

Il nucleo fondamentale della matrice di rigidezza viene poi assemblato nella matrice di rigidezza globale, $\mathbf{K}$, andando a iterare gli indici i, j, τ e s (figura 2.4).

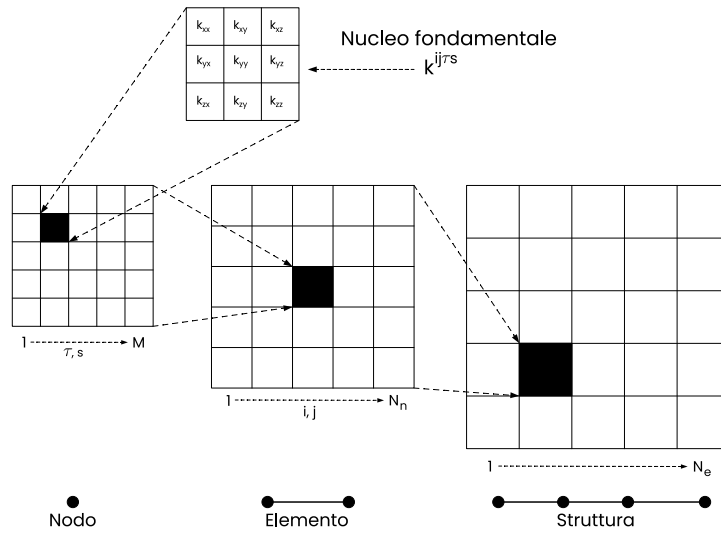


Figura 2.4: Assemblaggio della matrice di rigidezza globale

¹I pedici i e τ fanno riferimento a grandezze reali mentre i pedici j e s a grandezze virtuali.

Capitolo 3

Assessment del modello numerico

Al fine di apprendere il funzionamento del software sono state eseguite diverse analisi, riportate in questo capitolo.

3.1 Trave con due materiali isotropi

Le analisi in questa sezione riguardano una trave a sezione rettangolare riportata in figura 3.1. Le dimensioni della trave sono riportate nella tabella 3.1.

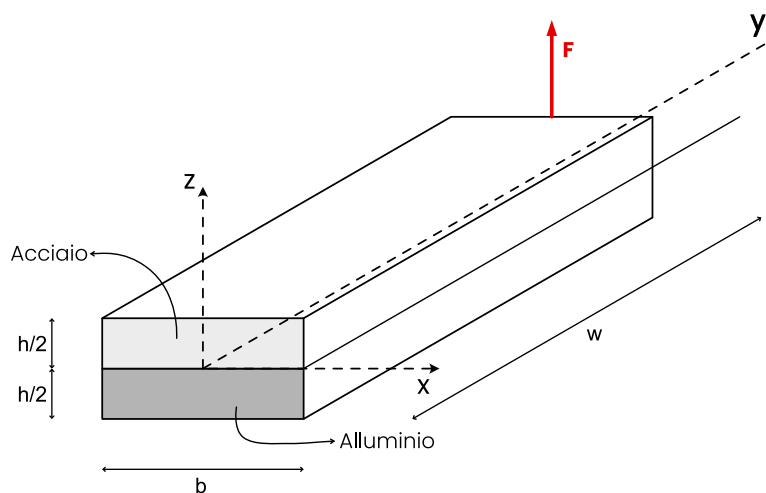


Figura 3.1: Trave analizzata per apprendere il software

b	0.02 m
h	0.01 m
w	0.1 m

Tabella 3.1: Dimensioni della trave analizzata per apprendere il software

La trave è composta da una laminato, in particolare si hanno due strati. Lo strato inferiore è realizzato in alluminio, quello superiore in acciaio. Le proprietà dei materiali sono riportate nella tabella 3.2.

Materiale	E [Pa]	ν [-]	ρ [kg/m ³]
Alluminio	7.3×10^{10}	3×10^{-1}	2.7×10^3
Acciaio	2.1×10^{11}	3×10^{-1}	7.8×10^3

Tabella 3.2: Proprietà dei materiali della trave analizzata per apprendere il software

La trave è incastrata da un lato, mentre all'altra estremità è presente una forza pari a 1000 N diretta parallela all'asse z e rivolta verso l'alto. In particolare è applicata al punto di coordinate $(0, 0.1, 0.005)$.

Si è scelto di analizzare la trave andando a variare il modello cinematico, in particolare si è analizzato sia il caso questo venga scritto come espansioni di Taylor, andando a variare il grado del polinomio, sia il caso in cui si considerino espansioni di Lagrange.

3.1.1 Modello cinematico con espansioni di Taylor

Eulero-Bernoulli

La prima analisi è stata eseguita con la teoria di Eulero Bernoulli. In questo caso il numero di gradi di libertà risulta pari a 279. La deformata della trave è riportata in figura 3.2 e macroscopicamente corrisponde alla deformata che si ottiene con tutte le analisi. Se ci si concentra sull'estremità in cui è applicata la forza si osserva che lungo lo

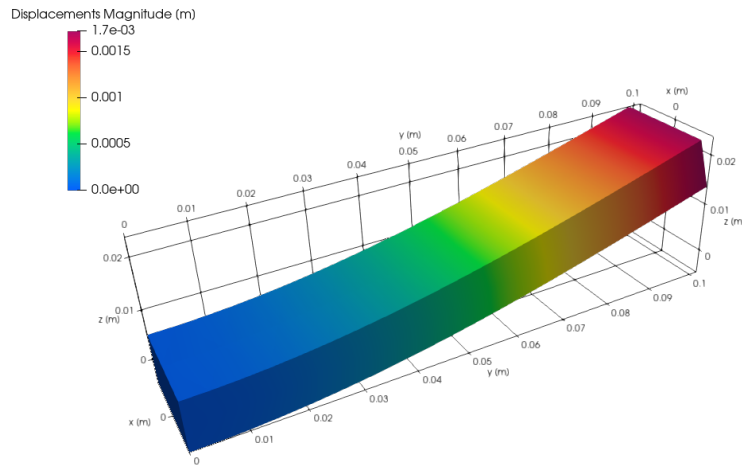


Figura 3.2: Deformata della trave analizzata con la teoria di Eulero-Bernoulli

spigolo lo spostamento è costante (figura 3.3). Questo è coerente con la teoria di Eulero Bernoulli.

In figura 3.4 viene inoltre riportato l'andamento delle tensioni σ_{yy} lungo lo spessore della trave, a metà della trave. Queste hanno un andamento lineare lungo lo spessore ma non continuo, a causa dal cambio di materiale nei due strati.

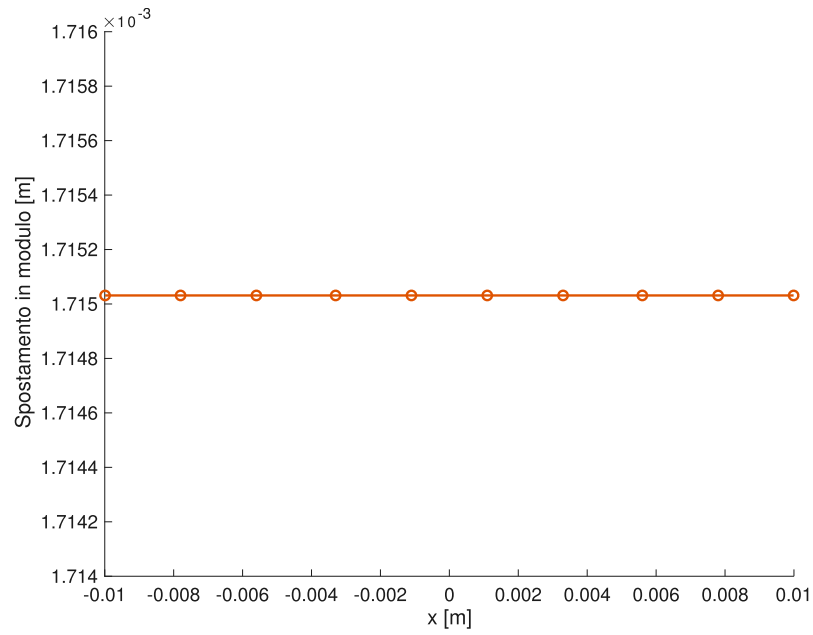


Figura 3.3: Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza con la teoria di Eulero-Bernoulli

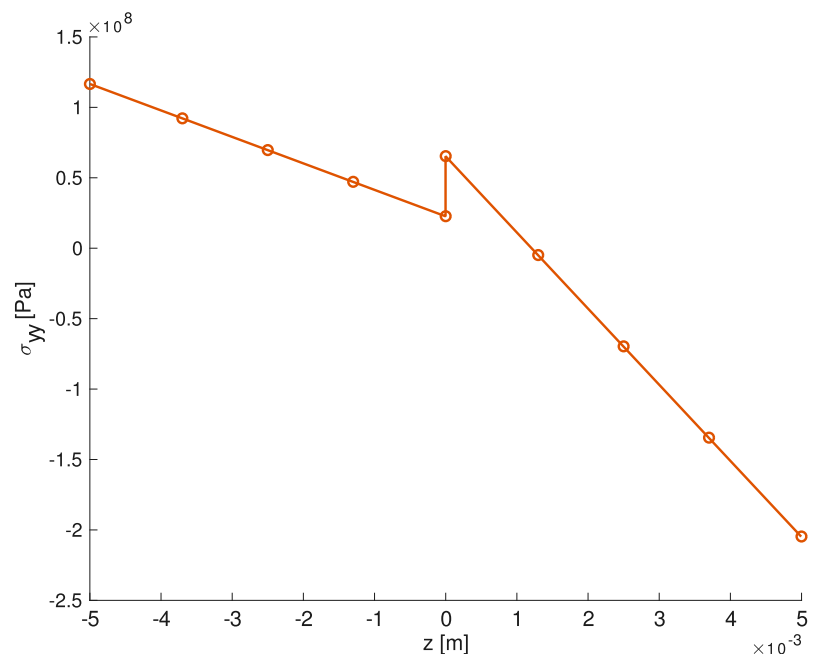


Figura 3.4: Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave con la teoria di Eulero-Bernoulli

Timoshenko

Successivamente si è ripetuta l'analisi utilizzando la teoria di Timoshenko. In questo caso la deformata è praticamente la stessa ottenuta con la teoria di Eulero Bernoulli, riportata in figura 3.2. Tuttavia lo spostamento dello spigolo su cui è applicata la forza, sebbene sia sempre costante, risulta superiore (figura 3.5). Come conseguenza anche le tensioni sono maggiori, come riportato nelle figure 3.6 e 3.7.

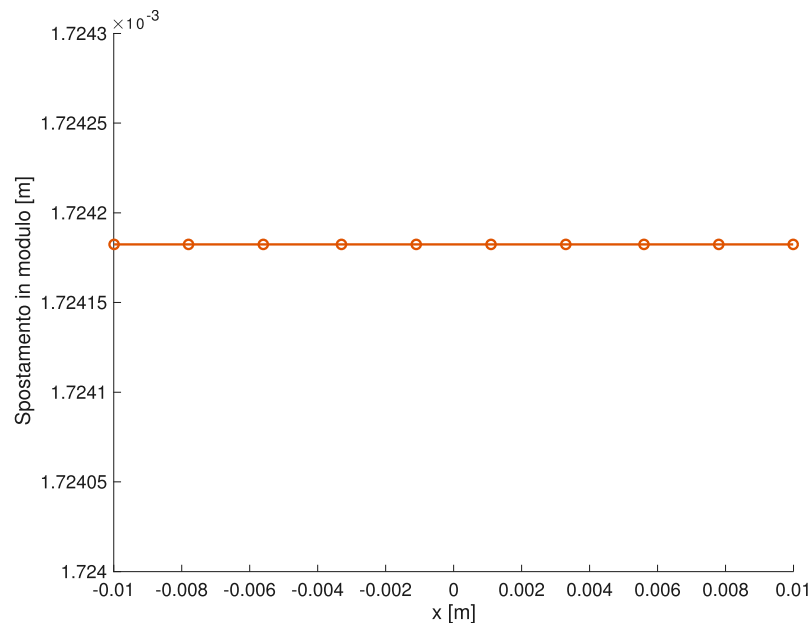


Figura 3.5: Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza con la teoria di Timoshenko

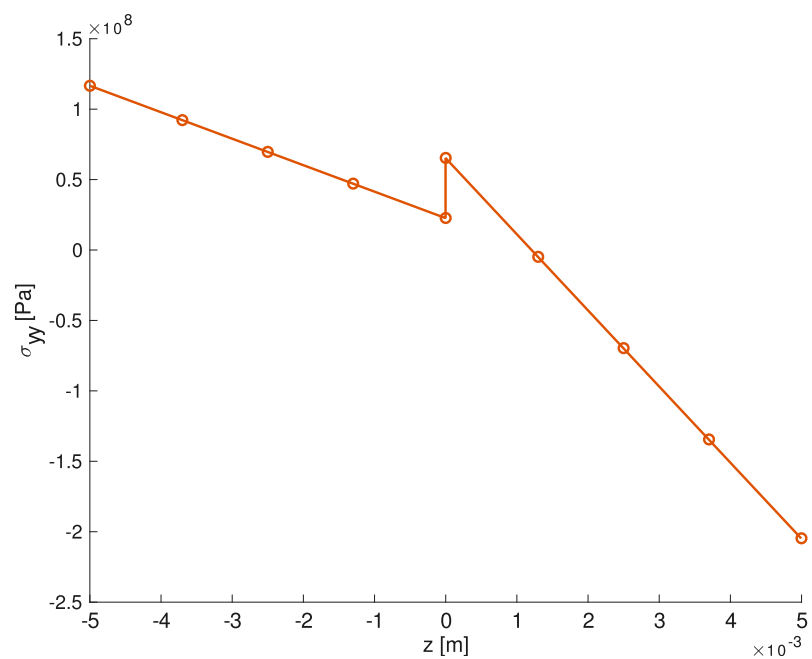


Figura 3.6: Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave con la teoria di Timoshenko

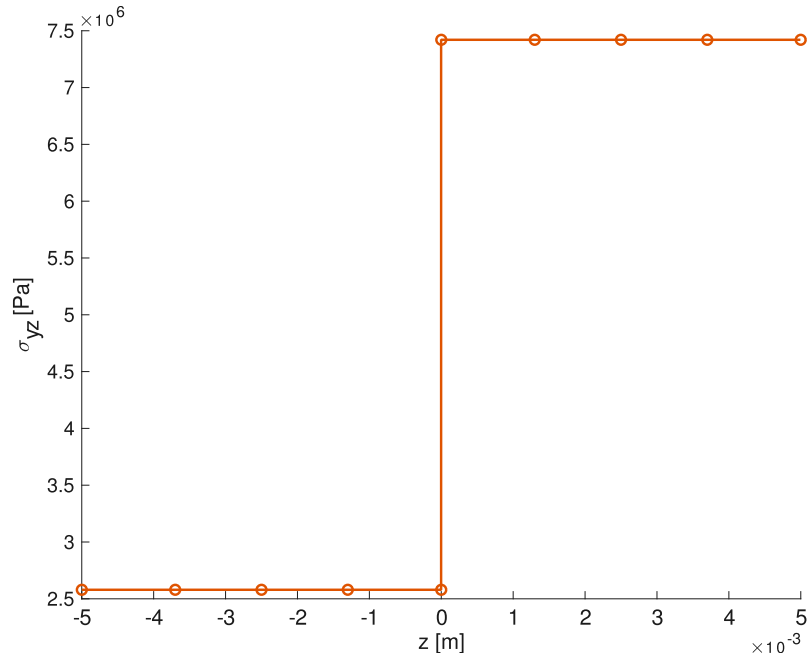


Figura 3.7: Andamento della tensione σ_{yz} lungo lo spessore a metà della trave con la teoria di Timoshenko

Teorie di ordini superiori

Sono state eseguite diverse analisi anche con teorie di ordini superiori. In figura 3.8¹ viene riportato l'andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza e nelle figure 3.9 e 3.10¹ l'andamento delle tensioni σ_{yy} e σ_{yz} lungo lo spessore utilizzando le espansioni di Taylor al sesto ordine.

Lo spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza (figura 3.8) non è più costante, infatti le teorie di ordine superiore riescono a catturare anche le deformazioni lungo la sezione. Ne consegue che le tensioni σ_{yy} e σ_{yz} non sono più lineari lungo lo spessore (figure 3.9 e 3.10).

¹L'andamento è stato graficato per mezzo della funzione spline interpolante i punti

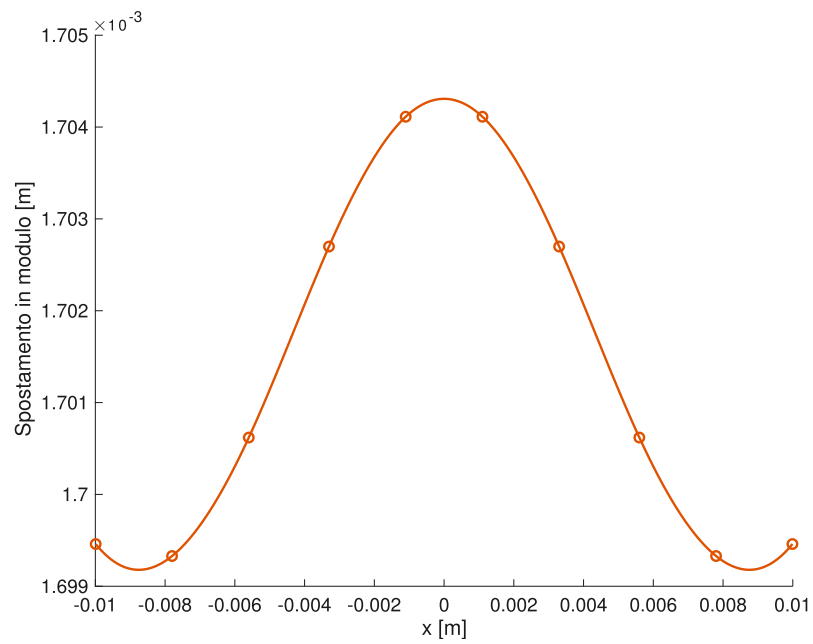


Figura 3.8: Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza TE6

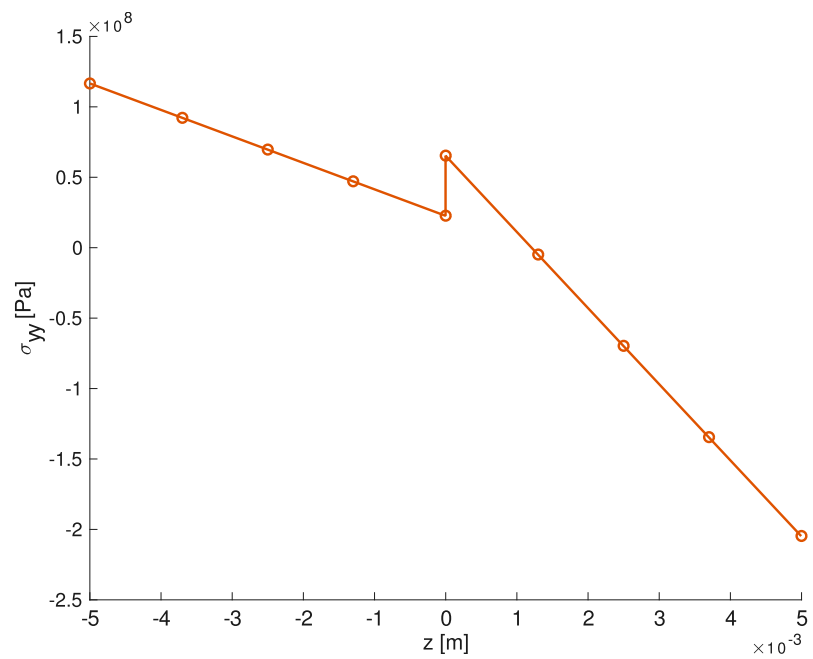


Figura 3.9: Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave TE6

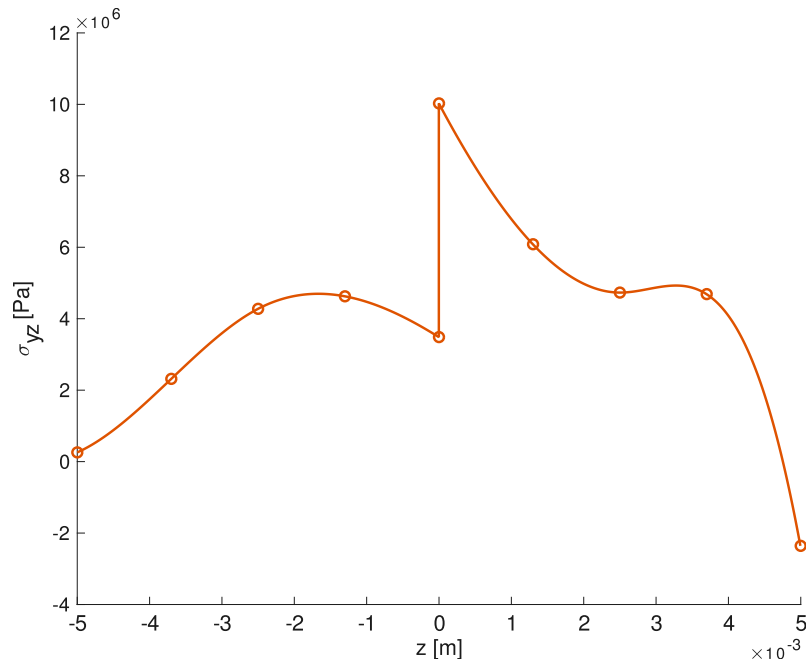


Figura 3.10: Andamento della tensione σ_{yz} lungo lo spessore a metà della trave TE6

3.1.2 Modello cinematico con espansioni di Lagrange

Sono state eseguite due analisi utilizzando le espansioni di Lagrange.

Due elementi

In questo caso per definire la sezione sono stati utilizzati 9 nodi per ogni materiale, come riportato in figura 3.11, per un totale di 15 nodi.

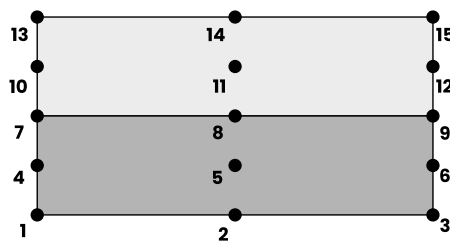


Figura 3.11: Sezione e nodi per le espansioni di Lagrange con 2 elementi

Anche in questo caso si è analizzato l'andamento dello spostamento in modulo lungo lo spigolo su cui è applicata la forza, riportato in figura 3.12.

Anche le espansioni di Lagrange con 2 elementi, come le espansioni di Taylor di ordine superiore, permettono di cogliere differenti deformazioni all'interno della sezione. Nelle figure 3.13 e 3.14 sono riportati gli andamenti lungo lo spessore delle tensioni σ_{yy} e σ_{yz} nella sezione in cui è applicata la forza.

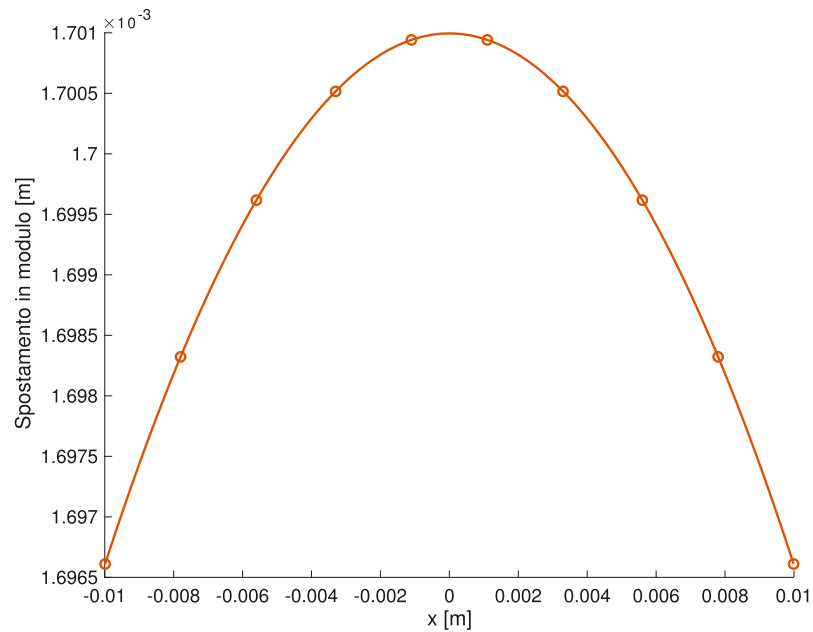


Figura 3.12: Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza con espansioni di Lagrange con 2 elementi

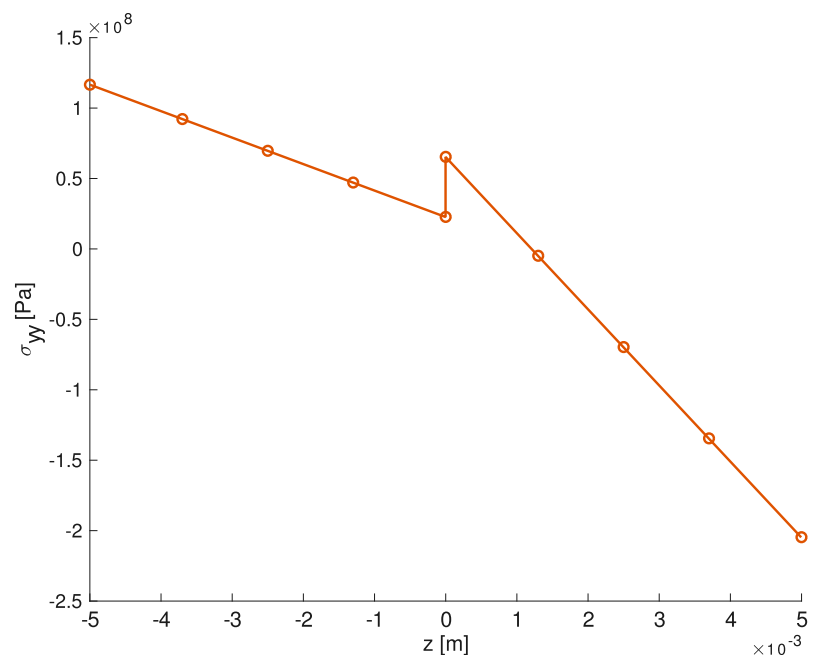


Figura 3.13: Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave con espansioni di Lagrange con 2 elementi

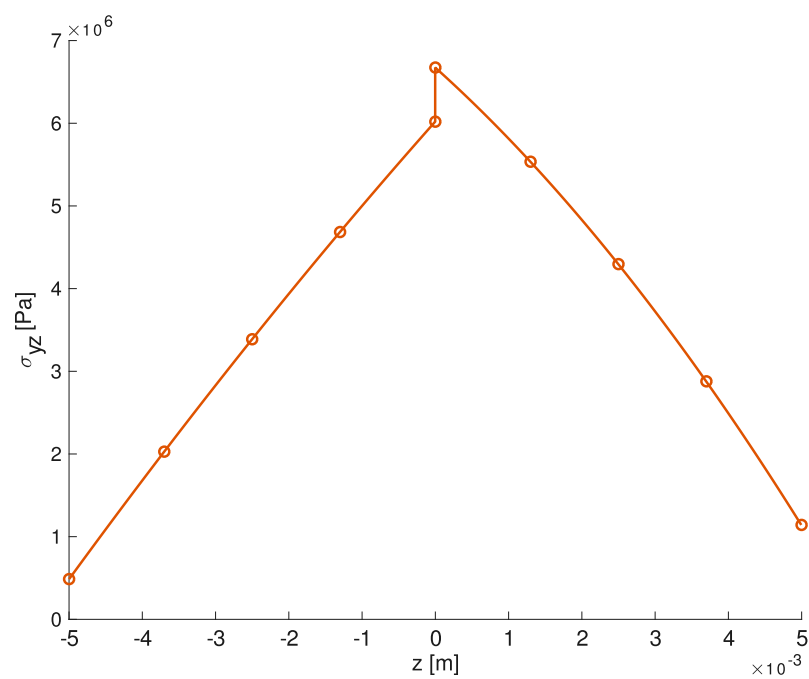


Figura 3.14: Andamento della tensione σ_{yz} lungo lo spessore a metà della trave con espansioni di Lagrange con 2 elementi

Quattro elementi

Si è eseguita anche un'analisi con espansioni di Lagrange con quattro elementi, con nove nodi ciascuno. Per fare ciò si è definita la sezione utilizzando 15 nodi per ogni materiale, per un totale di 25 nodi, come rappresentato in figura 3.15.

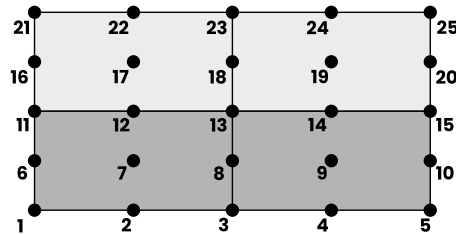


Figura 3.15: Sezione e nodi per le espansioni di Lagrange con 4 elementi

Come nei casi precedenti si è riportato lo spostamento, in modulo, lungo lo spigolo su cui è applicata la forza (figura 3.16) e le tensioni σ_{yy} e σ_{yz} lungo lo spessore, nella sezione in cui è applicata la forza (figure 3.17 e 3.18).

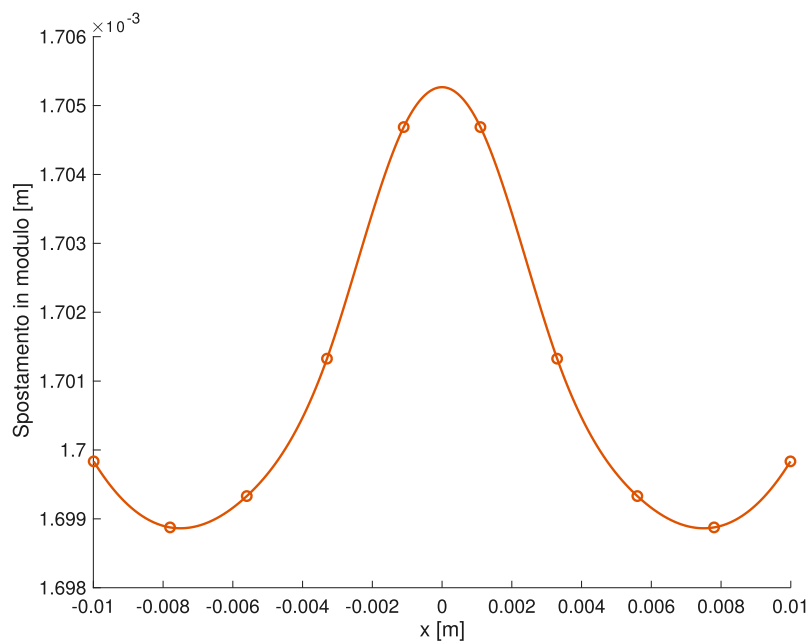


Figura 3.16: Andamento dello spostamento lungo lo spigolo su cui è applicata la forza con espansioni di Lagrange con 4 elementi

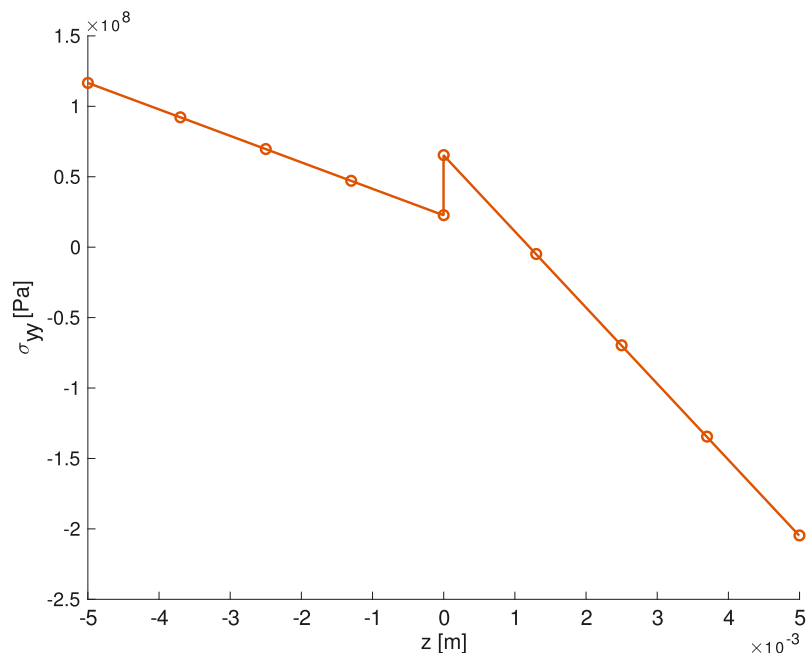


Figura 3.17: Andamento della tensione σ_{yy} lungo lo spessore a metà della trave con espansioni di Lagrange con 4 elementi

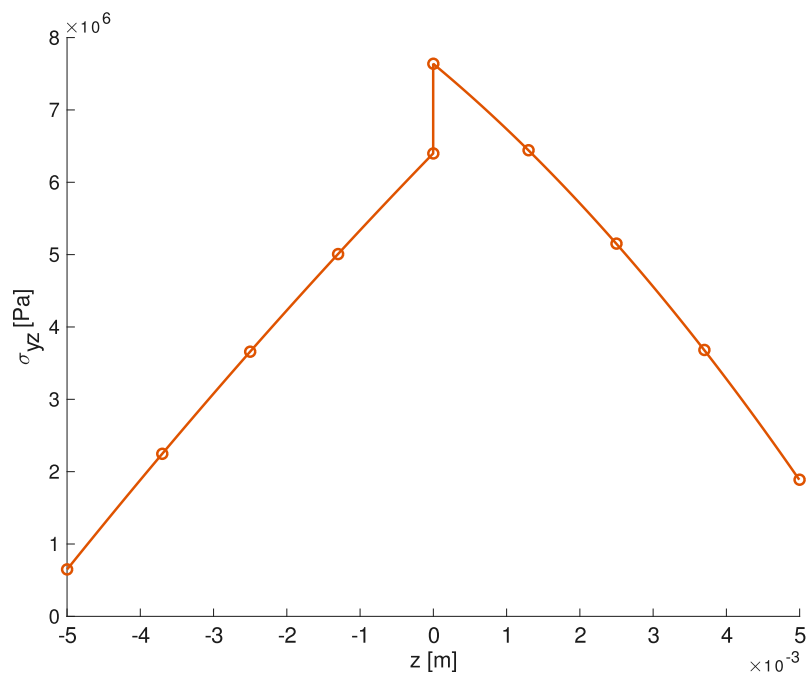


Figura 3.18: Andamento della tensione σ_{yz} lungo lo spessore a metà della trave con espansioni di Lagrange con 4 elementi

3.1.3 Comparazione risultati

Presupponendo che il punto di maggiore spostamento corrisponda al punto in cui viene applicata la forza, nella tabella 3.3 viene messo a confronto lo spostamento massimo ottenuto con i diversi modelli cinematici.

Modello cinematico	Spostamento massimo in modulo [m]
Eulero-Bernoulli	1.7176×10^{-3}
Timoshenko	1.7268×10^{-3}
TE 1	1.7271×10^{-3}
TE 2	1.6993×10^{-3}
TE 3	1.7012×10^{-3}
TE 4	1.7045×10^{-3}
TE 5	1.7062×10^{-3}
TE 6	1.7071×10^{-3}
2 elementi LE con 9 nodi	1.7037×10^{-3}
4 elementi LE con 9 nodi	1.7099×10^{-3}

Tabella 3.3: Spostamenti massimi con i diversi modelli cinematici

3.1.4 Calcoli analitici

Al fine di validare il lavoro svolto si è eseguito il calcolo analitico dello spostamento massimo lungo z della trave. Per fare ciò si è calcolato il modulo elastico equivalente con la 3.1.

$$E_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{E_1} * \frac{h_1}{h_1+h_2} + \frac{1}{E_2} * \frac{h_2}{h_1+h_2}} \quad (3.1)$$

Dove E_1 e E_2 sono i moduli di Young dei due materiali e h_1 e h_2 sono l'altezza dei due materiali. In questo modo si ottiene $E_{eq} = 1.0834 \times 10^{11}$ Pa.

Si calcola anche il momento d'inerzia con la 3.2.

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (3.2)$$

Il momento d'inerzia risulta quindi $I = 1.6667 \times 10^{-9} \text{ m}^4$.

Da [19] lo spostamento lungo z per una trave incastrata con la teoria di Eulero Bernoulli si calcola con la 3.3.

$$v = -\frac{1}{E_{eq}I} \left(\frac{1}{2}Pl y^2 - \frac{1}{6}P y^3 \right) \quad (3.3)$$

Dove P è la forza applicata e l la lunghezza della trave. Ponendosi nell'estremità si ottiene la 3.4.

$$v(y=l) = -\frac{1}{3E_{eq}I} Pl^3 \quad (3.4)$$

Si ottengono i risultati riportati in tabella 3.4.

Spostamento analitico [m]	Spostamento numerico [m]	Errore
1.8461×10^{-3}	1.7148×10^{-3}	6.96 %

Tabella 3.4: Comparazione dati dello spostamento lungo z all'estremità della trave con la teoria di Eulero Bernoulli

3.2 Trave composita

Si è analizzata anche una trave realizzata con 8 strati ortotropi in modo da prendere dimestichezza anche con i compositi. La trave in questione è riportata in figura 3.19. Le dimensioni della trave sono riportate nella tabella 3.5.

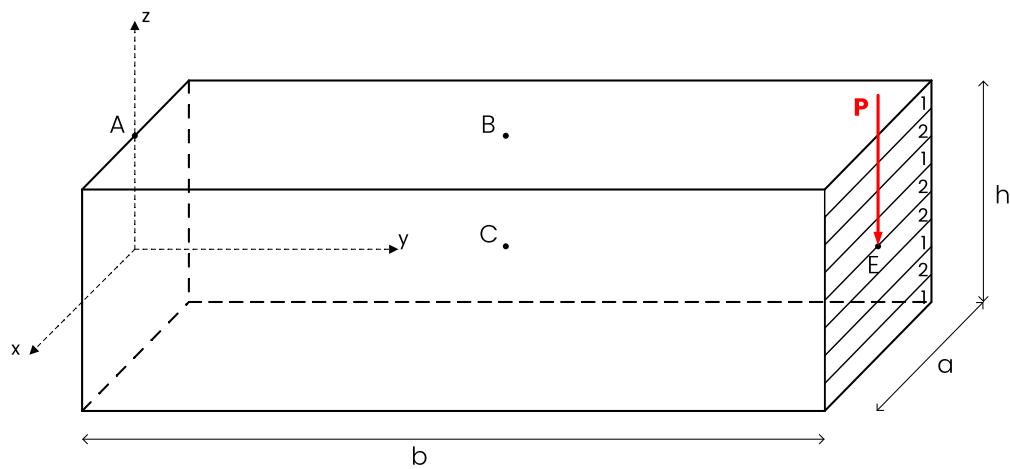


Figura 3.19: Trave composita analizzata per apprendere il software

b	0.09 m
a	0.001 m
h	0.01 m

Tabella 3.5: Dimensioni della trave composita analizzata per apprendere il software

La trave ha una laminazione simmetrica di tipo $[1/2/1/2]_S$ dove 1 e 2 indicano i differenti materiali. Le proprietà dei materiali sono riportate nella tabella 3.6.

Materiale	E_L [GPa]	E_T [GPa]	ν_{LT} [-]	G_{LT} [GPa]
Materiale 1	30	1	0.25	0.5
Materiale 2	5	1	0.25	0.5

Tabella 3.6: Proprietà dei materiali nella trave composita utilizzata per apprendere il software

Il carico P applicato in E è pari a 0.2 N. In tabella 3.7 sono riportate le coordinate dei punti riportati in figura 3.19.

Punto	x [m]	y [m]	z [m]
A	0	0	0.005
B	0	0.045	0.005
C	0	0.045	0
E	0	0.09	0

Tabella 3.7: Coordinate dei punti riportati in figura 3.19

3.2.1 Risultati

La trave viene analizzata con la teoria di Eulero Bernoulli, Timoshenko e con espansioni di Taylor dal primo al quinto ordine. I valori di tensioni e spostamenti ottenuti vengono comparati nella tabella 3.8 con i risultati ottenuti da Surana e Nguyen [20], Carrera et al. [21] e con le espansioni di Lagrange [22].

Modello	σ_{yy} [MPa] in A	σ_{yy} [Pa] in B	σ_{yz} [Pa] in C	w [mm] in E
Surana e Nguyen [20]		720×10^3		-3.03×10^{-2}
Carrera et al. [21]		730×10^3	-2.79×10^2	-3.05×10^{-2}
LE [22]	1.689	729.6×10^3	-2.794×10^2	-3.049×10^{-2}
Eulero Bernoulli	1.437	718.254×10^3		-2.587×10^{-2}
Timoshenko	1.437	718.254×10^3	-2.000×10^2	-2.946×10^{-2}
TE 1	1.437	718.254×10^3	-2.000×10^2	-2.946×10^{-2}
TE 2	1.437	718.215×10^3	-2.005×10^2	-2.949×10^{-2}
TE 3	1.587	718.245×10^3	-2.823×10^2	-2.993×10^{-2}
TE 4	1.588	718.232×10^3	-2.823×10^2	-2.997×10^{-2}
TE 5	1.668	718.246×10^3	-2.743×10^2	-2.997×10^{-2}

Tabella 3.8: Comparazione risultati ottenuti per la trave composita con valori in letteratura

Capitolo 4

Simulazione processo di cura

4.1 Termochimica

Durante la permanenza in autoclave il componente viene sottoposto a un determinato profilo di temperatura e di pressione, riportati in figura 4.1.

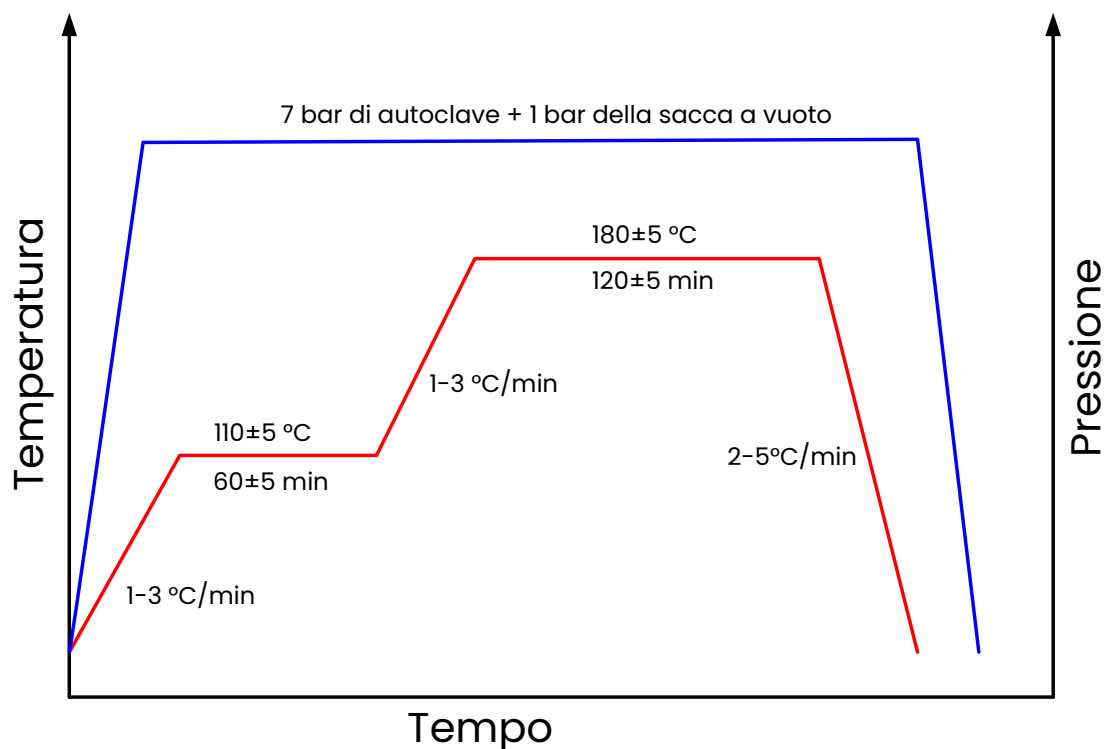


Figura 4.1: Profilo di temperatura e pressione in autoclave

Per quanto riguarda la temperatura si ha un primo aumento che non deve essere eccessivamente rapido per evitare la generazione di difetti come la delaminazione, e allo stesso tempo deve dare modo all'aria contenuta all'interno della resina di liberarsi evitando quindi la formazione di porosità. Successivamente si ha un plateau in cui la temperatura viene mantenuta costante. Questo passaggio fa sì che migliori il "wet-

ting" delle fibre, si riducano i gradienti termici e venga promossa la degassificazione. Nella fase successiva si aumenta la temperatura a circa 180 °C per favorire la polimerizzazione. Questa fase è seguita da un raffreddamento controllato per evitare shock termici, ridurre gli stress termici e minimizzare il rischio di cricche e delaminazioni.

4.1.1 Equazioni della termochimica

Il processo di cura accoppia fenomeni termici e chimici [6]. La generazione di calore dalla reazione esotermica interagisce con il trasferimento di calore all'interno del materiale, portando a gradienti di temperatura T e grado di cura α . Il modello termochimico consiste in un'equazione di trasferimento del calore accoppiata all'equazione della cinetica della polimerizzazione.

L'equazione di trasferimento del calore descrive la distribuzione spaziale e temporale della temperatura del materiale composito e può essere espressa attraverso lo spessore dalla 4.1.

$$\dot{Q} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{per } T(z, t) \text{ in } (0 < z < l) \quad (4.1)$$

Il primo termine può essere espresso come nella 4.2 e rappresenta il calore generato internamente dalla reazione esotermica. Il secondo termine fa riferimento alla conduzione all'interno del componente, mentre l'ultimo rappresenta la variazione di energia termica accumulata nel volume.

$$\dot{Q} = \rho H_r \frac{d\alpha}{dt} \quad (4.2)$$

La cinetica di polimerizzazione governa l'evoluzione temporale del grado di cura. La velocità di polimerizzazione è tipicamente modellata usando un approccio basato su Arrhenius combinato con termini di ordine di reazione, e può essere espressa come dalla 4.3, dove $f(\alpha, T)$ è funzione della temperatura e del grado di cura, inoltre dipende dal materiale del componente composito.

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(\alpha, T) \quad (4.3)$$

Per esempio per un composito che presenta una fibra in carbonio AS4 e una matrice in resina Hexcel 8552, il modello cinetico della cura è riportato dalla 4.4, dove i parametri sono riportati in tabella 4.1.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{K \alpha^m (1 - \alpha^n)}{1 + e^{C[\alpha - (\alpha_{C0} + \alpha_{CT} T)]}} \quad (4.4)$$

$$K = A e^{-\frac{E}{RT}}$$

AS4/8552	
m	0.5
n	1.5
A [1/s]	7×10^4
ΔE [J/mol]	6.5×10^4
α_{C0}	-1.5148
α_{CT}	5.171×10^{-3}
H_r [kJ/kg]	231.7

Tabella 4.1: Parametri per un composito con fibra in carbonio AS4 e una matrice in resina Hexcel 8552

Soluzione approssimata nel tempo

Una soluzione approssimata per trovare la temperatura e il grado di cura è possibile considerando le due variabili disaccoppiate nel singolo passo temporale Δt .

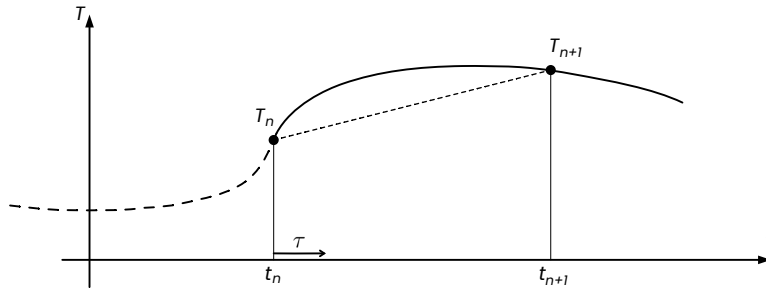


Figura 4.2: Passo temporale

Introducendo il parametro $\tau = t - t_n$, le funzioni temporali $\hat{N}$ rispetto al tempo possono essere scritte come nella 4.5.

$$\hat{N} = \left[1 - \frac{\tau}{\Delta t} \quad \frac{\tau}{\Delta t} \right] \quad \text{per } 0 \leq \tau \leq \Delta t \quad (4.5)$$

La temperatura e la sua derivata nel tempo sono espresse rispettivamente dalla 4.6 e dalla 4.7.

$$\mathbf{T}(\tau) = \hat{N}_n \mathbf{T}_n + \hat{N}_{n+1} \mathbf{T}_{n+1} = \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t} \right) \mathbf{T}_n + \left(\frac{\tau}{\Delta t} \right) \mathbf{T}_{n+1} \quad (4.6)$$

$$\dot{\mathbf{T}} = \left(-\frac{1}{\Delta t} \right) \mathbf{T}_n + \left(\frac{1}{\Delta t} \right) \mathbf{T}_{n+1} = \frac{\mathbf{T}_{n+1} - \mathbf{T}_n}{\Delta t} \quad (4.7)$$

Sostituendo $\mathbf{T}$ e $\dot{\mathbf{T}}$ nella 4.1 e definendo $\theta = \tau / \Delta t$ si ottiene la 4.8. Da questa relazione, è possibile calcolare la temperatura al tempo $n + 1$, conoscendo i valori di temperatura e il grado di cura all'istante di tempo precedente.

$$\left(\frac{C^e}{\Delta t} + \theta \mathbf{K}^e \right) \mathbf{T}_{n+1} = \left(\frac{C^e}{\Delta t} - \mathbf{K}^e (1 - \theta) \right) \mathbf{T}_n + \mathbf{q}^e + \mathbf{M}^e \mathbf{b} \quad (4.8)$$

È possibile trovare il grado di cura al tempo $n + 1$ utilizzando la relazione della cinetica

di polimerizzazione 4.9.

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \frac{K \alpha^n (1 - \alpha^n)}{1 + e^{C[\alpha - (\alpha_{C0} + \alpha_{CT} T)]}} \Delta t$$

$$K = A e^{-\frac{\Delta E}{RT}}$$
(4.9)

Il calcolo viene ripetuto iterativamente per avere i valori di temperatura e grado di polimerizzazione durante tutto il processo di cura.

Si ottiene quindi un'evoluzione della temperatura come quella riportata in figura 4.3a dove si hanno degli overshoot dovuti al calore rilasciato dal processo esotermico. Si ha inoltre un'evoluzione del grado di cura come quella rappresentata in figura 4.3b.

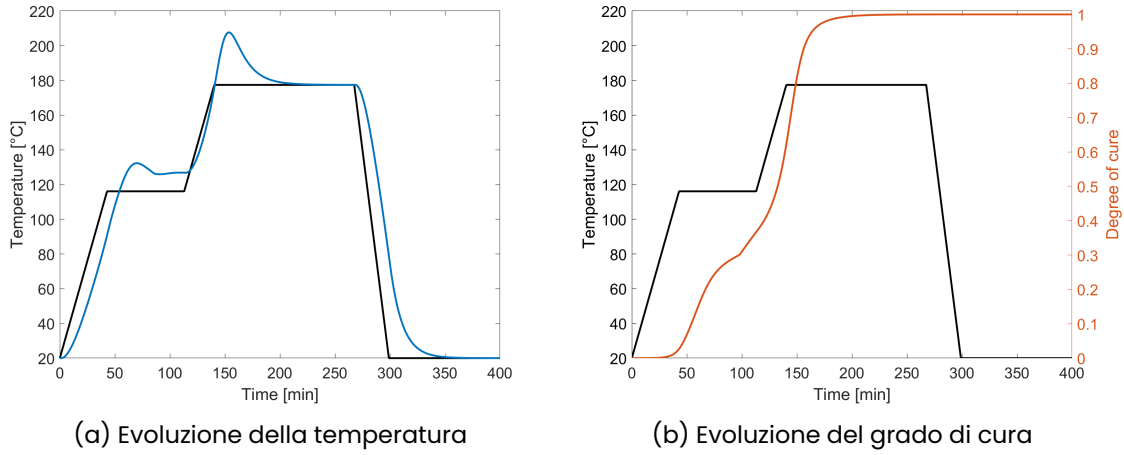


Figura 4.3: Andamenti qualitativi della temperatura e del grado di cura durante la polimerizzazione (fonte: [6])

4.1.2 Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche del composito variano durante il processo di polimerizzazione a causa della dipendenza delle caratteristiche della resina dal grado di cura. Il modulo di Young della resina può essere espresso in funzione del grado di cura tramite la relazione 4.10, dove E_m^0 e E_m^∞ sono rispettivamente i moduli di Young per la resina completamente non curata e completamente curata. α_{gel}^{mod} è il punto di gelificazione e α_{diff}^{mod} è il valore del grado di cura che la resina raggiunge alla fine del processo.

$$E_m = (1 - \alpha_{mod}) E_m^0 + \alpha_{mod} E_m^\infty$$

$$\alpha_{mod} = \frac{\alpha - \alpha_{gel}^{mod}}{\alpha_{diff}^{mod} - \alpha_{gel}^{mod}}$$
(4.10)

Il modulo a taglio istantaneo è ottenuto dalla relazione dei materiali isotropi 4.11, dove ν_m è il coefficiente di Poisson, assunto costante. Le proprietà meccaniche della fibra non variano durante il processo.

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$$
(4.11)

L'aumento del ritiro chimico (shrinkage) ΔV_m è direttamente proporzionale all'incremento del grado di cura $\Delta\alpha$ tramite la relazione 4.12, dove V_{sh} è lo shrinkage totale quando la resina è completamente curata e $\alpha_{diff}^{sh} = 1$

$$\Delta V_m = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{diff}^{sh}} V_{sh} \quad (4.12)$$

La deformazione dovuta al ritiro per un materiale isotropo, $\Delta\epsilon_m$, si calcola con la relazione 4.13.

$$\Delta\epsilon_m = \sqrt[3]{1 + \Delta V_m} - 1 \quad (4.13)$$

4.2 Processo di cura

La simulazione del processo di cura [15] viene eseguita utilizzando il modello costitutivo CHILE [23]. Questo prevede che la soluzione al termine del processo di cura, sia la somma delle soluzioni elastiche istantanee in un numero discreto, N , di passi temporali. Le proprietà del materiale vengono quindi valutate come la media ad ogni passo si hanno quindi la 4.14 e la 4.15.

$$G^i = \frac{G^* + G^{**}}{2} \quad (4.14)$$

$$\Delta t^i = \frac{t^* + t^{**}}{2} \quad (4.15)$$

La figura 4.4 mostra come il modulo di taglio sia definito al i -esimo passo temporale. L'incremento dello shrinkage e delle deformazioni termiche, rispettivamente $\Delta\epsilon_s^i$ e $\Delta\epsilon_T^i$, sono utilizzati come carichi esterni al i -esimo passo temporale.

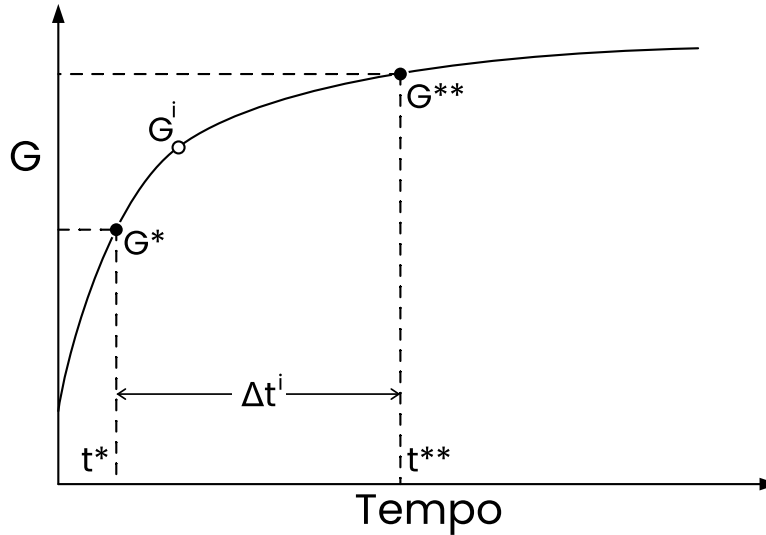


Figura 4.4: Proprietà del materiale allo step i

In figura 4.5 viene riportato l'organigramma della procedura di soluzione.

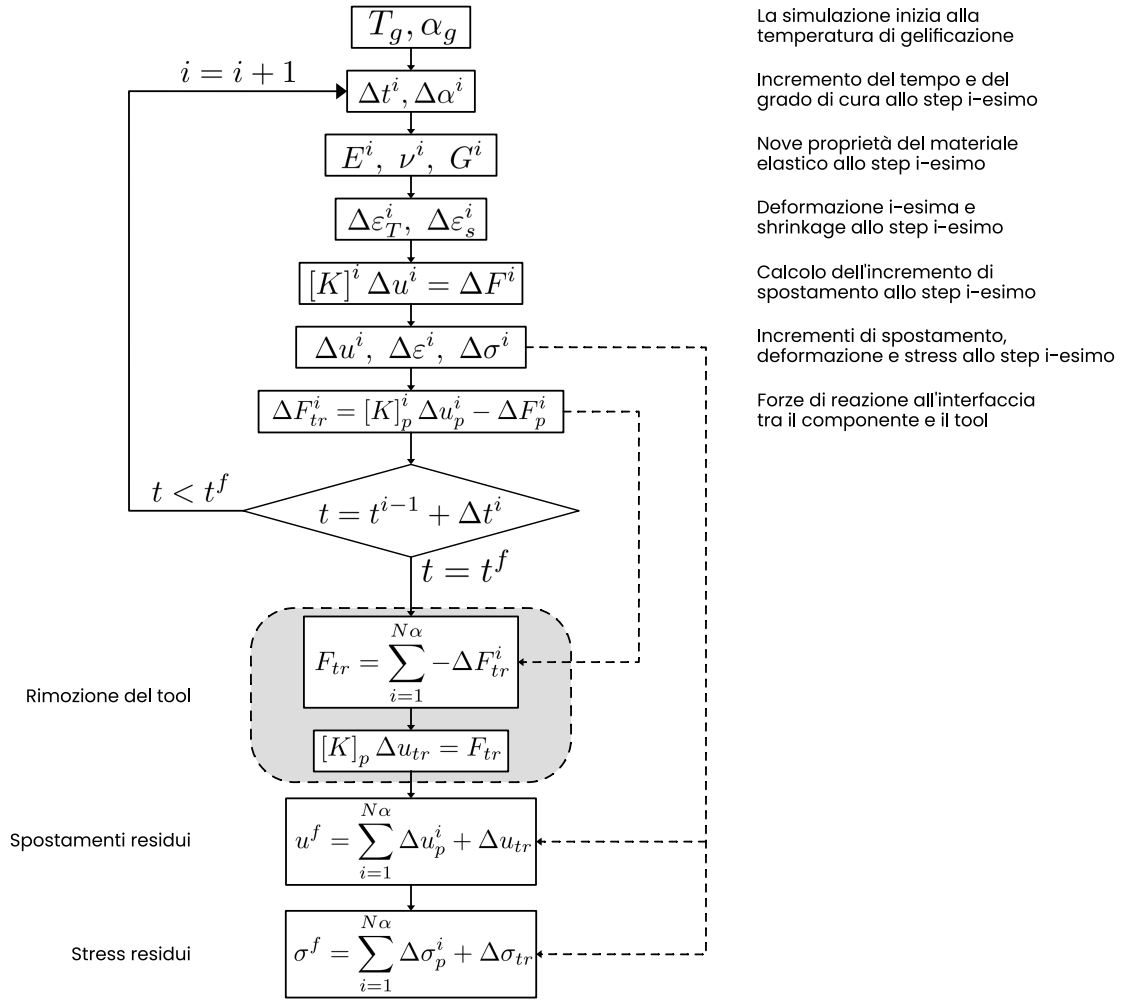


Figura 4.5: Algoritmo di soluzione per l'analisi del ciclo di cura

Inizialmente, le proprietà del materiale e le variazioni di carico sono definite al i -esimo passo, quindi, può essere risolto il problema lineare statico 4.16, dove $\mathbf{K}^i$ è la matrice di rigidezza dell'intero modello (pezzo, utensile e strato tra le interfacce) valutata al i -esimo passo temporale. $\Delta \mathbf{F}^i$ è il vettore di carico al i -esimo passo e $\mathbf{u}^i$ è l'incremento della soluzione.

$$\mathbf{K}^i \Delta \mathbf{u}^i = \Delta \mathbf{F}^i \quad (4.16)$$

Gli incrementi di sforzo e deformazione possono essere valutati tramite le relazioni geometriche e la legge di Hooke 4.17.

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon^i &= \mathbf{D} \Delta \mathbf{u}^i \\ \Delta \sigma^i &= \mathbf{C}^i \Delta \varepsilon^i \end{aligned} \quad (4.17)$$

Le forze interfacciali tool/pezzo possono essere ricavate integrando le sollecitazioni all'interfaccia [23]. Al fine di evitare una successiva procedura di integrazione, le forze di interfaccia possono essere ottenute anche sfruttando le proprietà della matrice di rigidezza che sono già state calcolate nelle fasi precedenti.

La matrice di rigidezza, $\mathbf{K}^i$, può essere considerata come la somma di molti contributi:

- $\mathbf{K}_p^i$ è la matrice relativa alla parte composita;
- $\mathbf{K}_t^i$ è la rigidezza proveniente dall'utensile;
- $\mathbf{K}_{sl}^i$ è il contributo di rigidezza dovuto al modello di interfaccia.

La stessa partizione può essere applicata ai vettori di spostamento e di forza. Le forze che agiscono sulla parte composita, $\Delta \bar{\mathbf{F}}_p^i$, possono essere calcolate come nella 4.18.

$$\Delta \bar{\mathbf{F}}_p^i = \mathbf{K}_p^i \Delta \mathbf{u}_p^i \quad (4.18)$$

Il vettore $\Delta \bar{\mathbf{F}}_p^i$ include la forza esterna dovuta al ritiro, i carichi termici e le forze di interfaccia poiché $\mathbf{K}_p^i$ non include la rigidezza dell'utensile e dello strato di taglio, il che significa che una certa quantità di forza interna non è bilanciata all'interfaccia. Il vettore delle forze di interfaccia all'i-esimo passo temporale, dovuto alla rimozione dell'utensile, $\Delta \mathbf{F}_{tr}^i$, può essere infine ottenuto dalla 4.19.

$$\Delta \mathbf{F}_{tr}^i = \Delta \bar{\mathbf{F}}_p^i - \Delta \mathbf{F}_p^i \quad (4.19)$$

Una volta conclusa la simulazione di polimerizzazione, è possibile procedere con la valutazione delle deformazioni finali indotte dal processo. L'ammontare totale delle forze che l'utensile applica sulla parte composita, $\mathbf{F}_{tr}$, è dato dalla 4.20, dove $N\alpha$ è il numero di passi temporali utilizzati nella simulazione.

$$\mathbf{F}_{tr} = \sum_{i=1}^{N\alpha} \Delta \mathbf{F}_{tr}^i \quad (4.20)$$

L'incremento degli spostamenti che appare come conseguenza della rimozione dell'utensile può quindi essere calcolato risolvendo il sistema lineare 4.21.

$$\mathbf{K}_p \Delta \mathbf{u}_{tr} = \mathbf{F}_{tr} \quad (4.21)$$

Le deformazioni ε_{tr} e gli stress σ_{tr} possono essere calcolati utilizzando la 2.4 e la 2.5. Gli spostamenti, le deformazioni e le sollecitazioni residue totali dovute al processo di polimerizzazione e alla rimozione dell'utensile possono ora essere calcolati dalle 4.22, 4.23 e 4.24.

$$\mathbf{u}^f = \sum_{i=1}^{N\alpha} \Delta \mathbf{u}_p^i + \Delta \mathbf{u}_{tr} \quad (4.22)$$

$$\varepsilon^f = \sum_{i=1}^{N\alpha} \Delta \varepsilon_p^i + \Delta \varepsilon_{tr} \quad (4.23)$$

$$\sigma^f = \sum_{i=1}^{N\alpha} \Delta \sigma_p^i + \Delta \sigma_{tr} \quad (4.24)$$

Capitolo 5

Analisi del processo di cura

In questo capitolo viene analizzato il processo di cura di due componenti, in particolare di un pannello a L e di una piastra piana.

5.1 Pannello a L

In questa sezione si fa riferimento a un pannello a L [15], come quello riportato in figura 5.1. In particolare si riporta in blu il componente vero e proprio e in grigio il tool utilizzato per la produzione. Inoltre, tra il tool e il componente, è presente un piccolo strato detto "shear layer" spesso un decimo dello spessore di ogni strato, ovvero 0.019 mm. Il componente è realizzato con un laminato $(90/0/90/0)_S$ dove ogni strato è spesso 0.19 mm. Gli angoli fanno riferimento alla direzione x parallela al lato l_p .

In figura 5.2 è riportata una vista laterale, nella quale è possibile distinguere i vari strati del composito. Le dimensioni a cui si fa riferimento nelle figure 5.1 e 5.2 sono riportate nella tabella 5.1

l_p	82.89
w_p	86.3
h_p	1.52
h_t	12.7
r_i	20

Tabella 5.1: Dimensioni del pannello a L espresse in millimetri

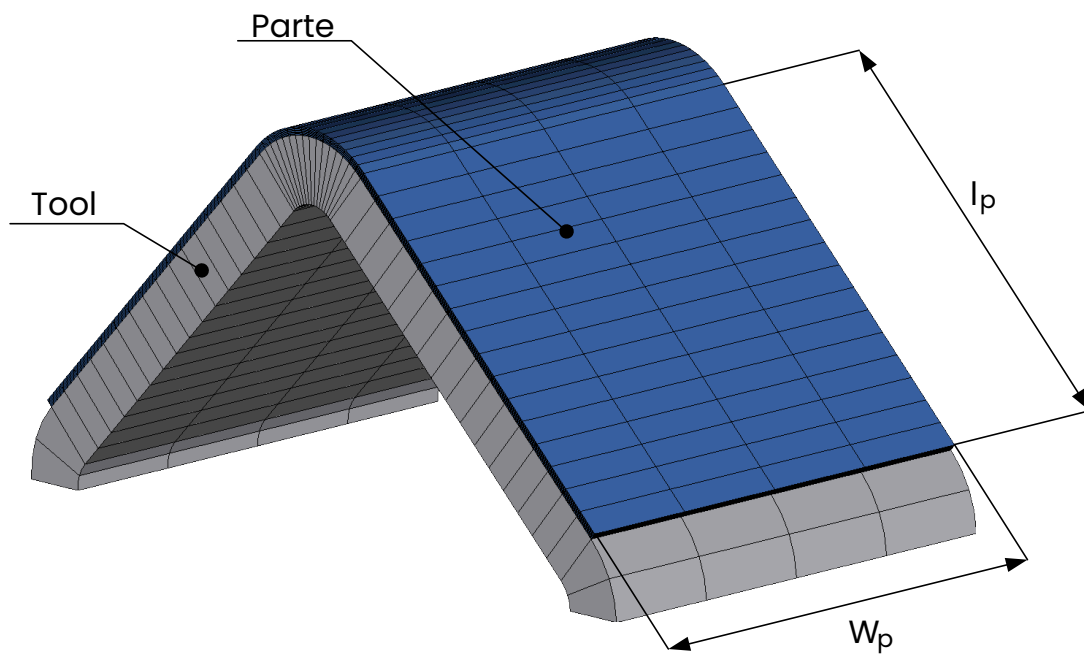


Figura 5.1: Pannello a L

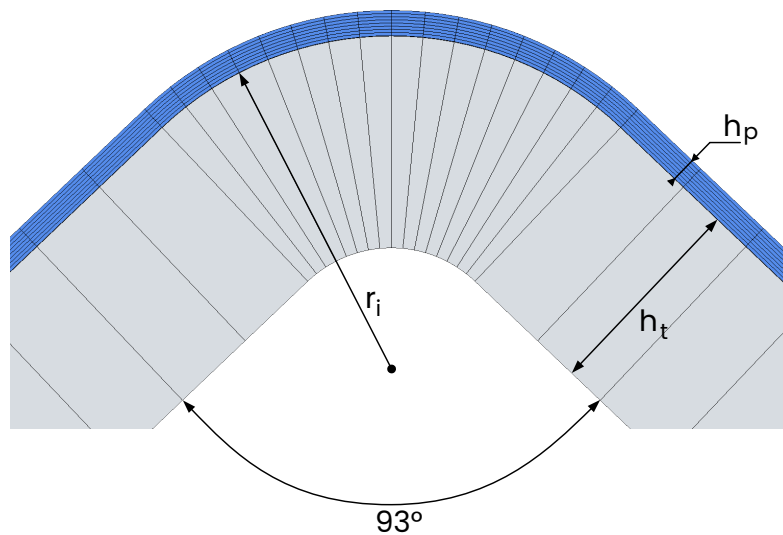


Figura 5.2: Vista laterale della pannello a L

Per il componente si è simulato un ciclo di cura con una sola salita e una temperatura massima pari a 180°C , come mostrato in figura 5.3. Inoltre si nota che il grado di cura massimo raggiunto in questo modo è pari a 0.891.

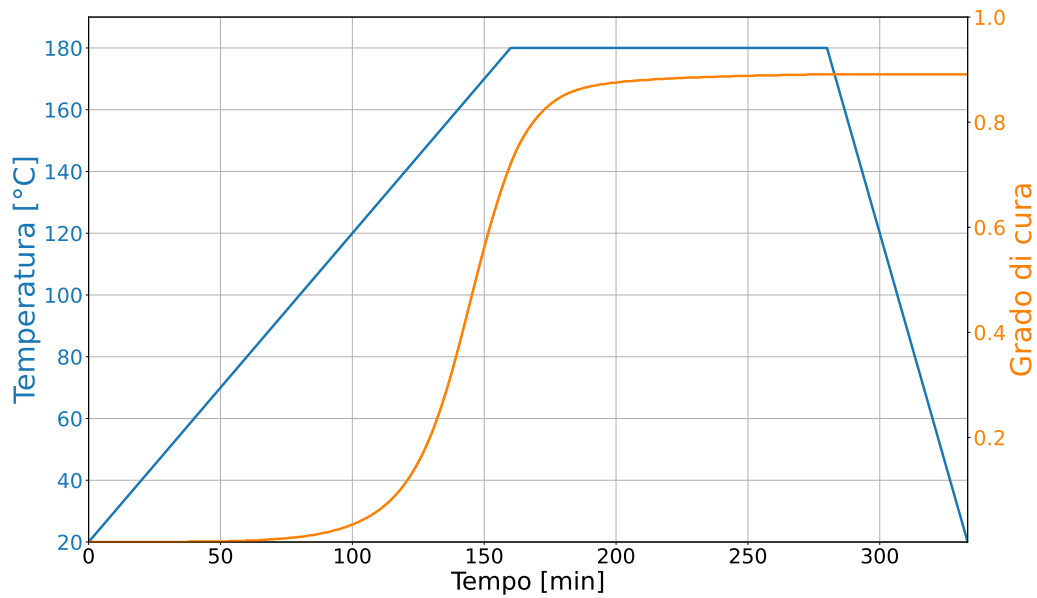


Figura 5.3: Ciclo di cura del pannello a L

Per prima cosa si è fatta un'analisi di convergenza andando a variare il numero di step temporali. Questo deriva dalla scelta della massima variazione ammissibile in qualsiasi proprietà del materiale, ad esempio, del valore finale. In figura 5.4 è riportato l'andamento dell'angolo di spring-in in funzione della coordinata x al variare del numero dei passi temporali.

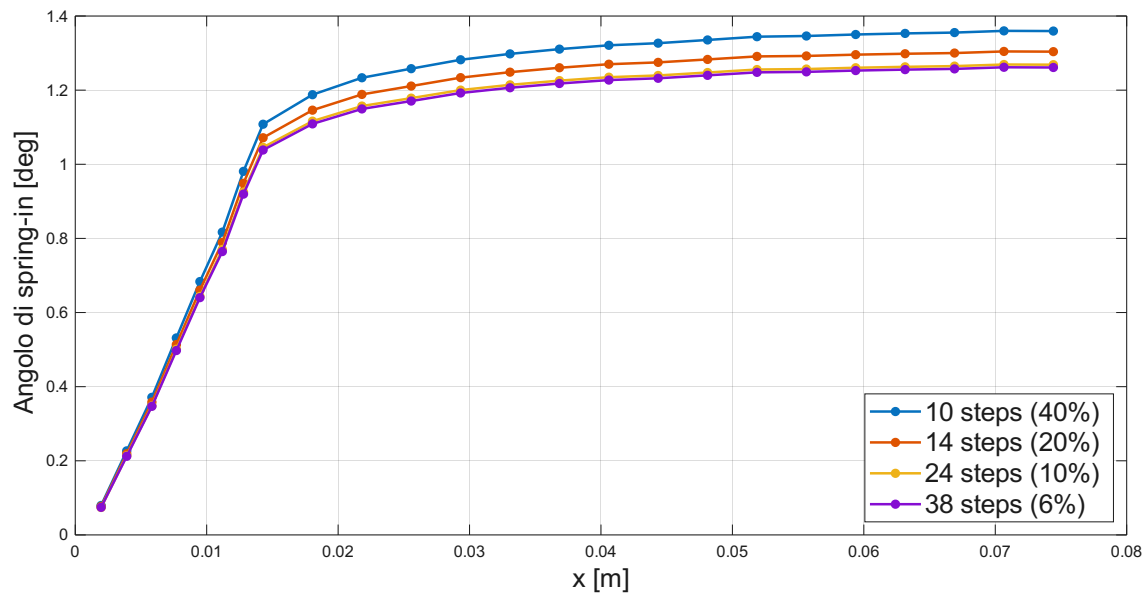


Figura 5.4: Andamento dell'angolo di spring-in in funzione della coordinata x al variare del numero dei passi temporali

Si osserva che con un valore di massima variazione possibile pari al 6% si raggiunge una buona approssimazione del valore finale. Si sono eseguiti 38 step di calcolo temporali.

Partendo da questo caso si analizzano i risultati. Si riporta in figura 5.5 la deformata del pannello a L dopo la rimozione del tool. Si osserva come le tensioni residue tendono a modificare la struttura generando un angolo di spring-in finale.

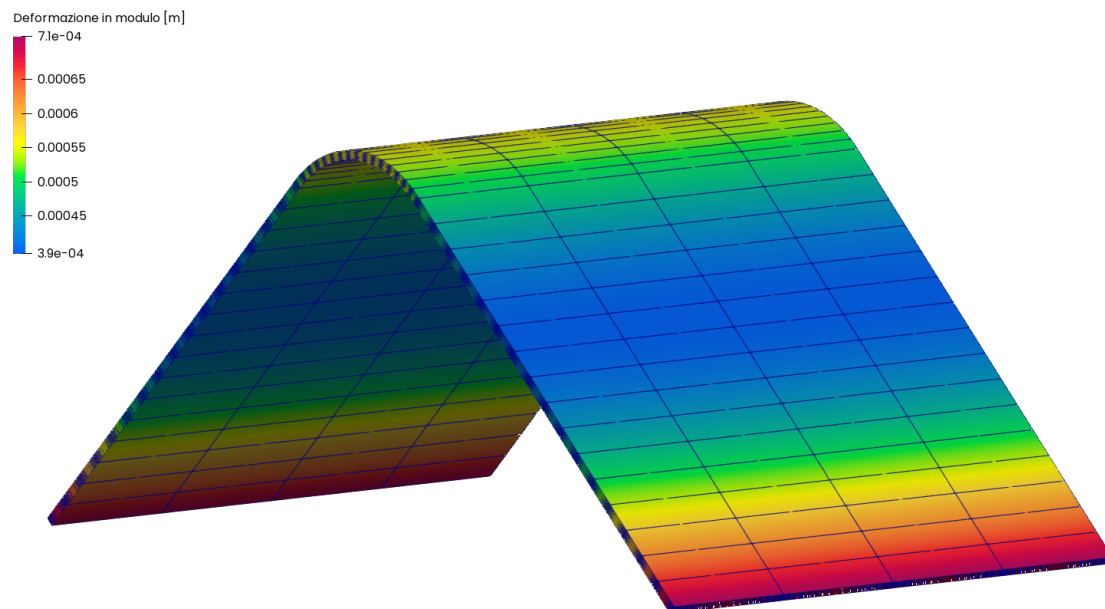


Figura 5.5: Deformata del pannello a L dopo la rimozione del tool

Successivamente si analizza il comportamento della tensione e della deformazione

nella direzione x lungo lo spessore nel punto A (figura 5.6) prima e dopo la rimozione del tool.

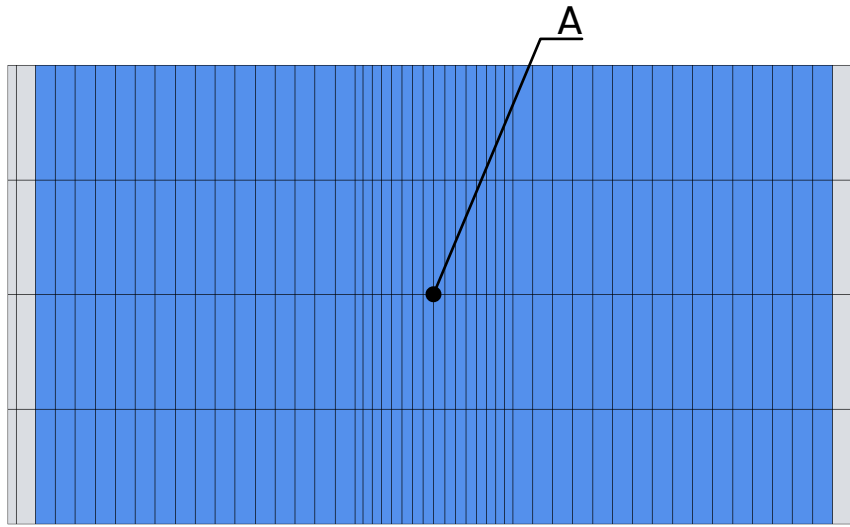


Figura 5.6: Vista dall'alto della pannello a L

In figura 5.7 si riporta l'andamento della σ_{xx} lungo lo spessore nel punto A. Si nota come, dopo la rimozione del tool, si abbia una distensione e regolarizzazione degli stress residui. Nel grafico è anche riportato l'andamento della σ_{xx} estrapolata dall'articolo [15], dopo la rimozione del tool. Si osserva che i dati ottenuti sono sovrapponibili con quelli in [15] e quindi si considera il modello validato.

In figura 5.8 è riportato invece l'andamento delle ε_{xx} lungo lo spessore nel punto A, notando anche qui una regolarizzazione di queste, dopo la rimozione del tool.

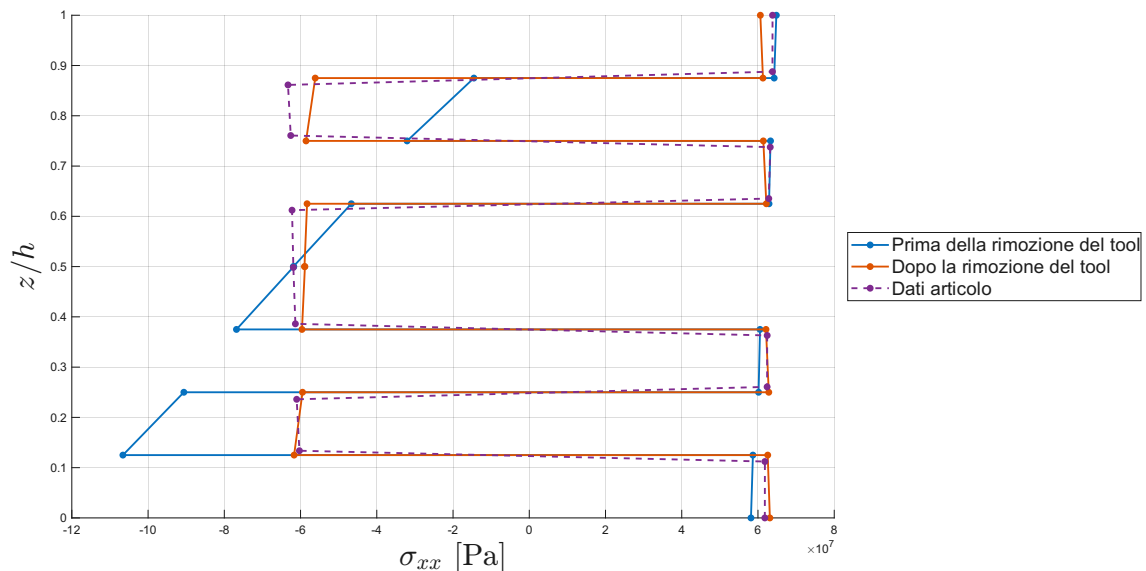


Figura 5.7: Andamento della σ_{xx} lungo lo spessore nel pannello a L

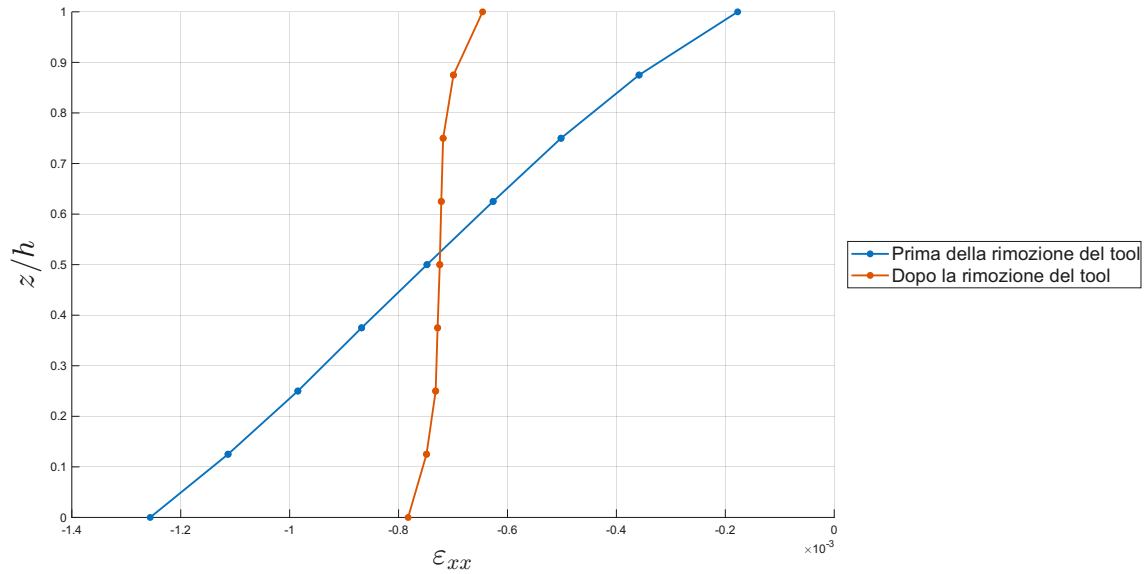


Figura 5.8: Andamento della ε_{xx} lungo lo spessore nel pannello a L

5.2 Piastra piana

Come detto in precedenza si è studiato anche il processo di cura di una piastra piana rappresentata in figura 5.9. Questa è stata analizzata in due casi di laminazione, ovvero con una laminazione simmetrica $(0/90/0/90)_S$ e con una laminazione non simmetrica $2(0/90/0/90)$. Gli angoli della laminazione sono dati rispetto alla direzione dell'asse x . Si evince che la piastra analizzata presenta 8 strati. Ogni strato è spesso 0.2 cm, inoltre tra la piastra e il tool è presente, come in precedenza, uno "shear layer" spesso un decimo rispetto a uno strato del composito, ovvero 0.02 cm. Le dimensioni della piastra sono riportate nella tabella 5.2. In entrambi i casi di laminazione, la piastra piana è stata sottoposta allo stesso tipo di ciclo di cura del pannello a L trattato in precedenza, dove l'andamento della temperatura e del grado di cura nel tempo sono riportati in figura 5.3. In questo caso si è deciso di impostare la massima variazione ammissibile in qualsiasi proprietà tra uno step temporale e l'altro direttamente al 6 %, ottenendo in questo modo 38 step temporali oltre a quello relativo alla rimozione del tool.

l_p	16
l_t	24
w	16
h_p	1.6
h_t	1
a	1.6
b	1.6

Tabella 5.2: Dimensioni della piastra piana riportata in figura 5.9 espresse in centimetri

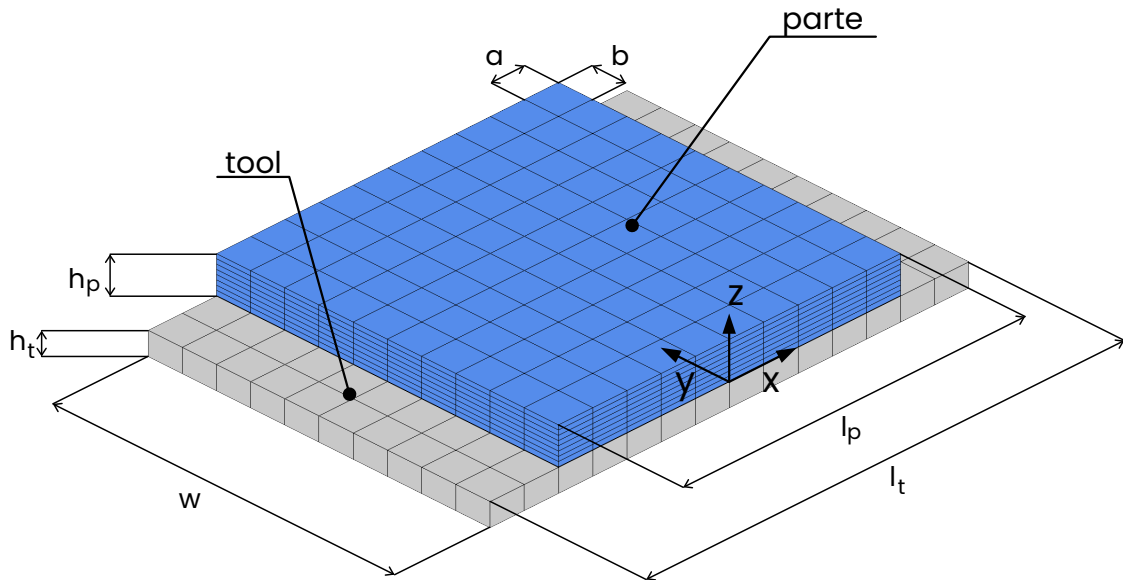


Figura 5.9: Modello della piastra piana

5.2.1 Laminazione simmetrica

La laminazione simmetrica fa sì che non siano presenti accoppiamenti nella deformazione, come si può notare nella deformata riportata in figura 5.10.

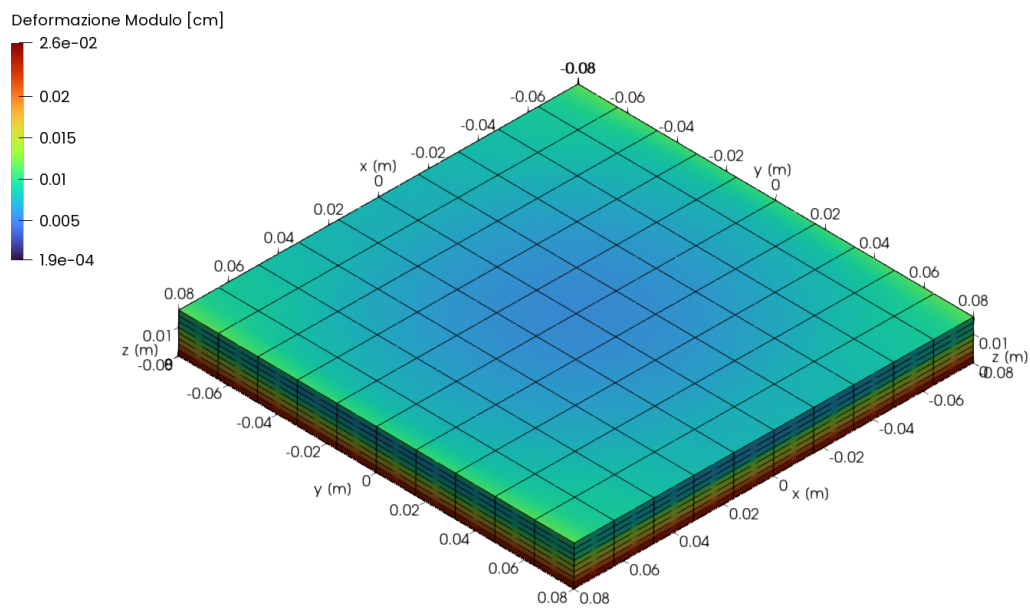


Figura 5.10: Deformata della piastra piana con laminazione simmetrica

Dalla rappresentazione dell'andamento delle tensioni σ_{xx} all'interno della piastra, riportato in figura 5.11, si osserva la variazione di tensione tra uno strato e il successivo, in cui le fibre sono perpendicolari al precedente.

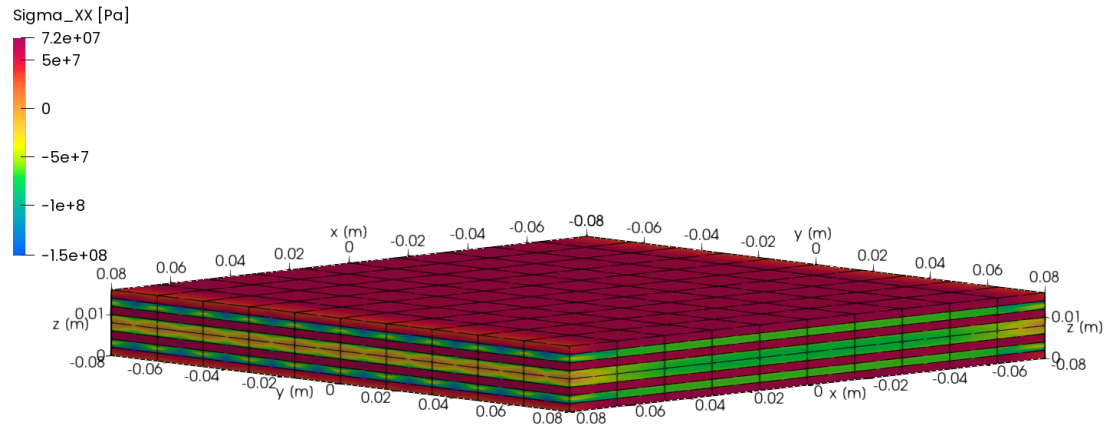


Figura 5.11: Tensione σ_{xx} della piastra piana con laminazione simmetrica

5.2.2 Laminazione asimmetrica

La laminazione asimmetrica crea degli accoppiamenti, in quanto la matrice $[B]$ non è nulla. Di conseguenza la deformazione non sarà costante nel piano, ma si creeranno delle curvature, come è possibile notare in figura 5.12.

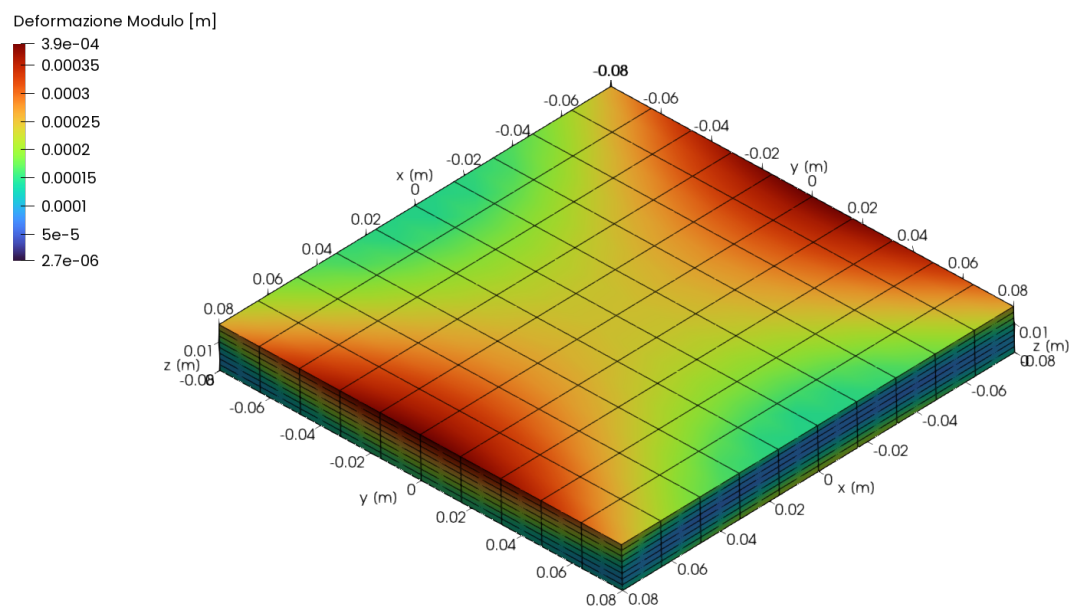


Figura 5.12: Deformata della piastra piana con laminazione asimmetrica

Anche in questo caso è possibile osservare la variazione di orientamento delle fibre attraverso la rappresentazione della tensione σ_{xx} riportata in figura 5.13

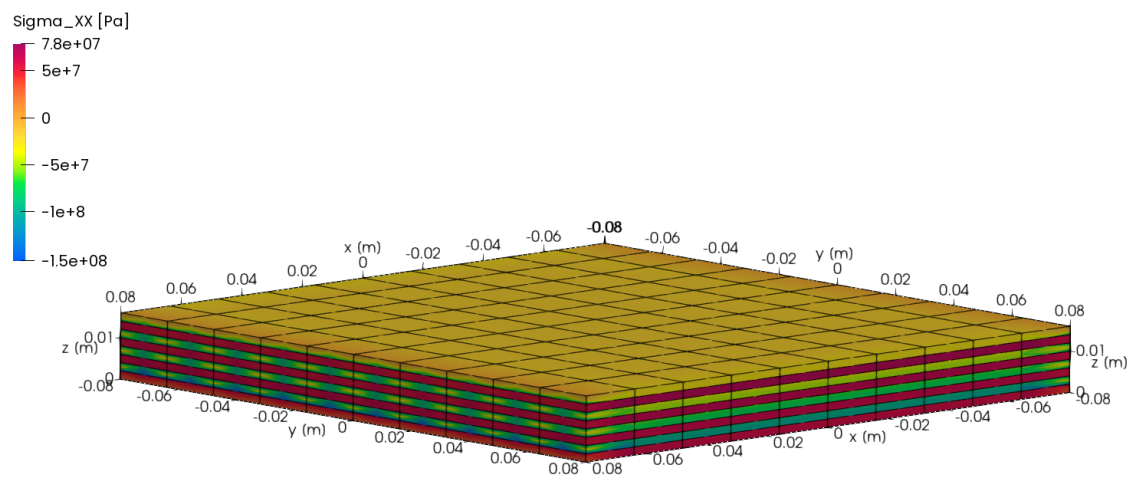


Figura 5.13: Tensione σ_{xx} della piastra piana con laminazione asimmetrica

Capitolo 6

Manifattura virtuale di una piastra composita piana

In questo capitolo viene presentata la piastra di riferimento che viene utilizzata come base per il confronto con le altre piastre nel capitolo successivo, inerente all'analisi del processo di riparazione. Questa piastra rappresenta quindi il componente prima che venisse danneggiato e che quindi fosse necessaria una riparazione.

La piastra in questione è riportata in figura 6.1 e le dimensioni sono riportate in tabella 6.1. La piastra è composta da 8 strati e ha laminazione $(0/90/0/90)_S$, dove l'angolo è dato rispetto alla direzione dell'asse x . Ogni strato è spesso 2 mm. Per semplificare il modello si è deciso di dividere la piastra con due piani di simmetria, in modo tale da aumentare il numero di elementi utilizzati.

a	40
b	40
h	1.6
h_e	0.2
w	20
w_e	2
l	20
l_e	2

Tabella 6.1: Dimensioni della piastra di riferimento espresse in centimetri

I due piani, rappresentati in figura 6.1, sono uno perpendicolare all'asse x e uno perpendicolare all'asse y , entrambi passanti per l'origine. Si sono inoltre vincolati lungo z tutti i nodi con coordinata $z = 0$ in modo tale da non rendere labile la struttura.

Il componente è stato sottoposto a un ciclo di cura come quello riportato in figura 6.2. La fase di salita ha una pendenza di $1\text{ }^\circ\text{C/min}$ partendo da $20\text{ }^\circ\text{C}$ dell'ambiente, fino a raggiungere una temperatura massima di $180\text{ }^\circ\text{C}$ in 160 min. La temperatura massima poi è stata mantenuta per 120 min, e successivamente si è tornati a $20\text{ }^\circ\text{C}$ con una pendenza di $-3\text{ }^\circ\text{C/min}$. Con questo ciclo di cura si è raggiunto un grado di cura (α) pari a 0.891.

La piastra è stata schematizzata con 10 elementi lungo l'asse x , 1 elemento per ogni strato e 10 elementi lungo l'asse y . In figura 6.3 viene riportato il modello in assonome-

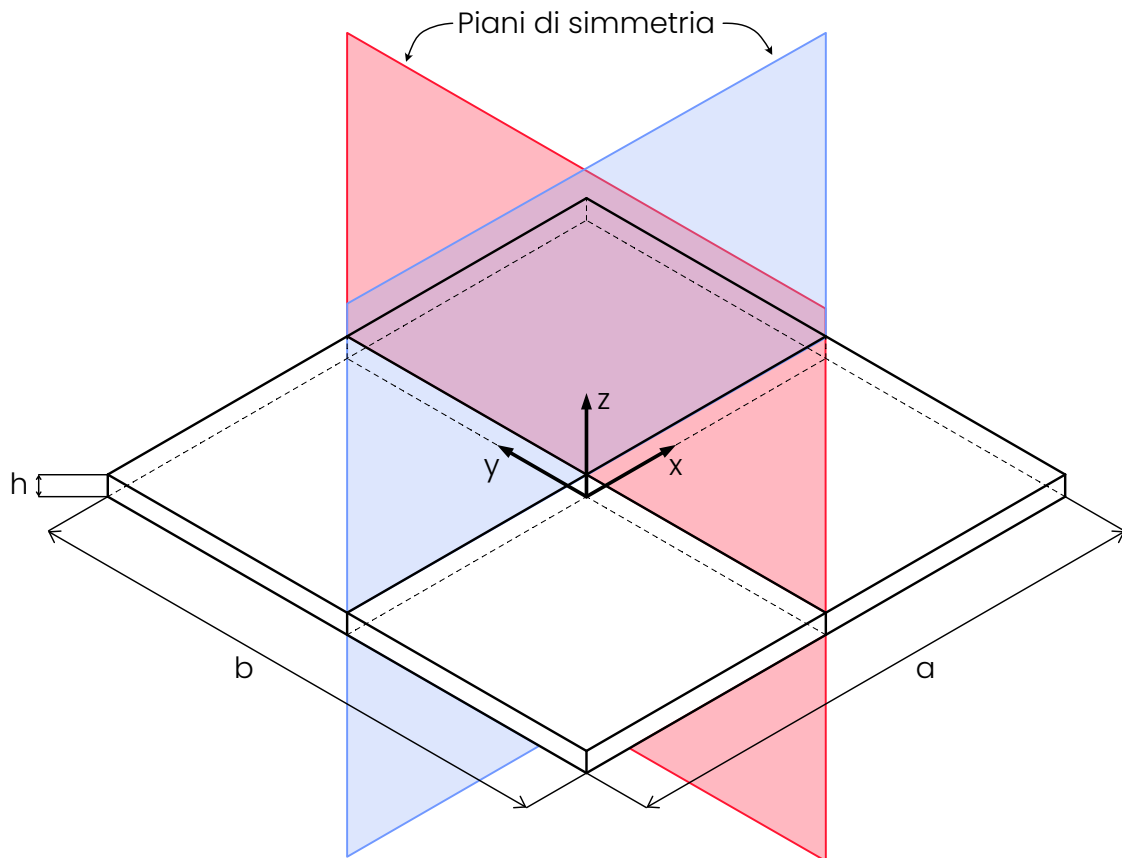


Figura 6.1: Piastra di riferimento

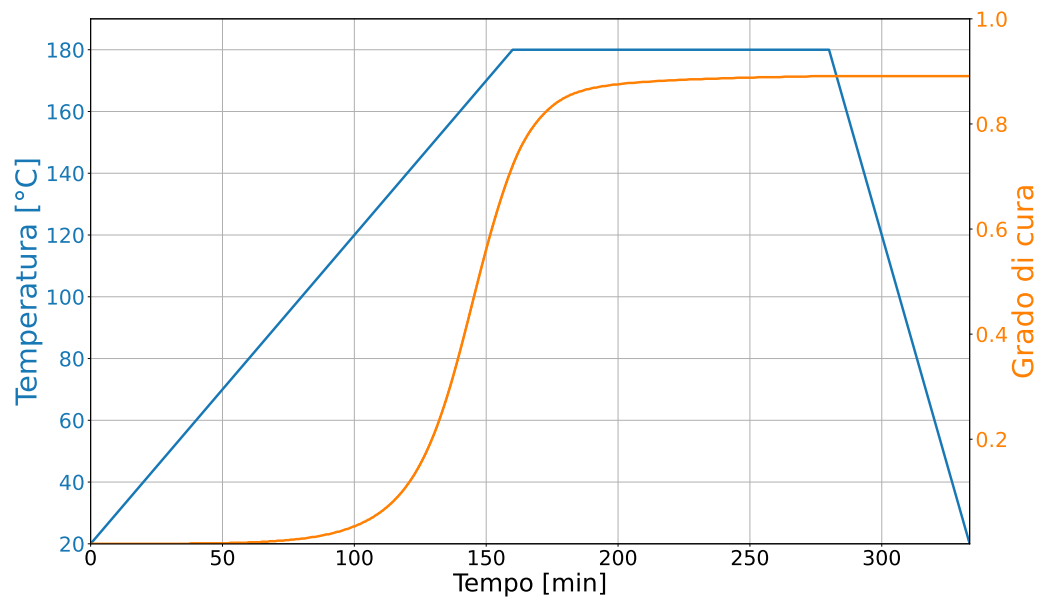


Figura 6.2: Ciclo di cura della piastra di riferimento

tria isometrica e in figura 6.4 la vista frontale della sezione. Le dimensioni a cui si fa riferimento nelle figure 6.3 e 6.4 sono riportate in tabella 6.1. Ogni elemento è stato definito con 9 nodi, ne consegue che sono stati utilizzati 357 nodi e 80 elementi per definire la sezione, per un totale di 800 elementi.

Al fine di simulare il processo di cura con cui il componente è stato prodotto si sono inseriti all'interno del modello anche uno "Shear layer" spesso 0.2 mm e un "Tool" alto 8 mm. Questi poi sono stati rimossi e si è ottenuto il componente finale.

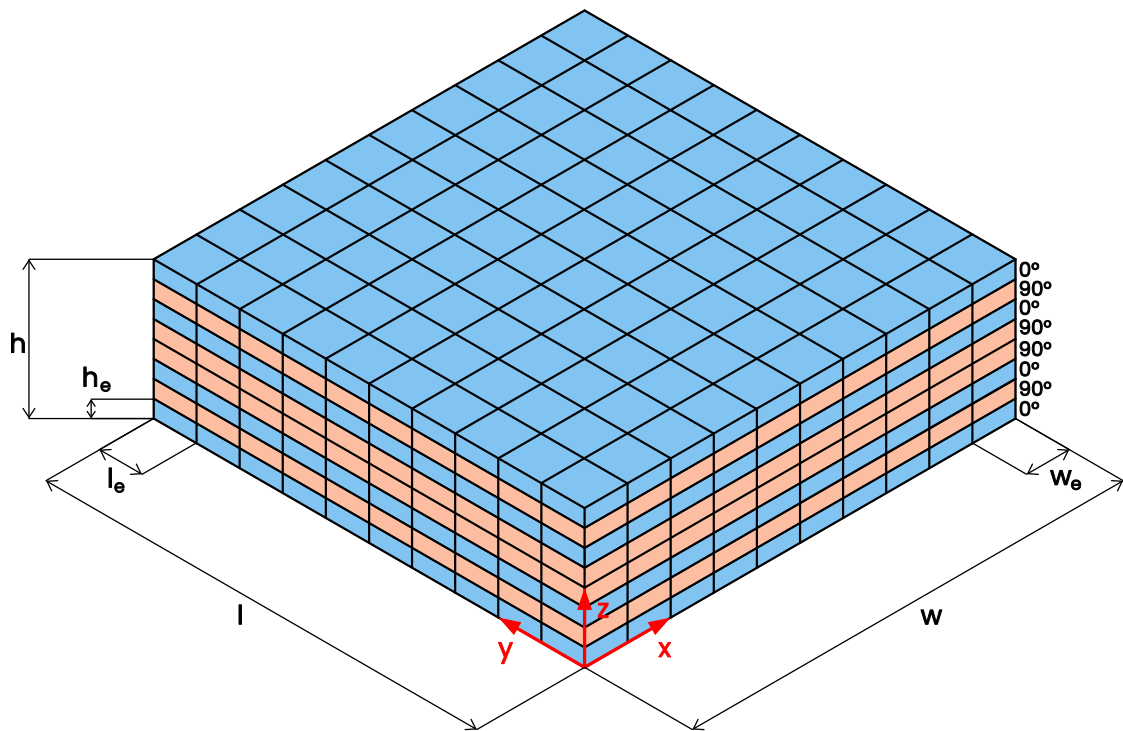


Figura 6.3: Modello della piastra di riferimento in assonometria isometrica

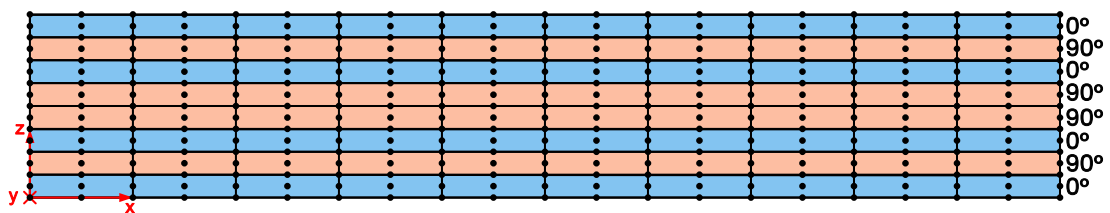


Figura 6.4: Vista frontale del modello della piastra di riferimento

6.1 Risultati

Per prima cosa si riportano gli andamenti delle proprietà del materiale durante il ciclo di cura; in particolare in figura 6.5 sono presenti gli andamenti nel tempo del modulo di Young E in direzione 1 (parallela alle fibre), direzione 2 (perpendicolare alle fibre ma nel piano xy) e in direzione 3 (perpendicolare alle fibre e parallela alla direzione di z). In questo caso si ha che E_2 ed E_3 sono sovrapposte, questo è corretto dal momento che il materiale è ortotropo.

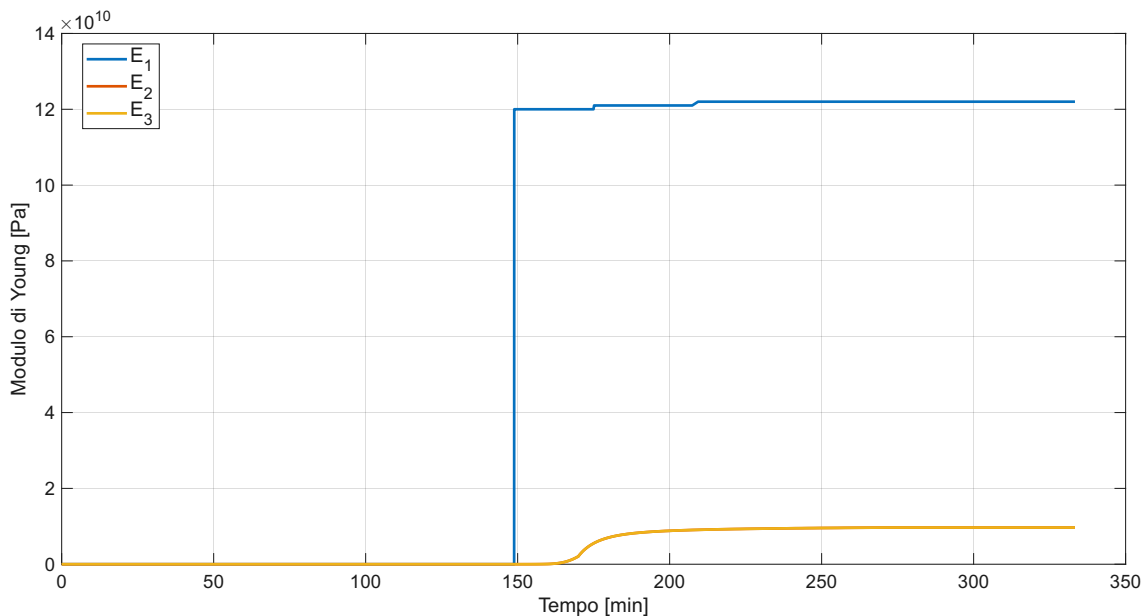


Figura 6.5: Andamento del modulo di Young E durante il ciclo di cura

In figura 6.6 si riporta l'andamento del coefficiente di Poisson durante il ciclo di cura. In questo caso sono ν_{12} e ν_{13} ad essere sovrapposti. In figura 6.7 si presenta l'andamento del modulo di taglio G durante il ciclo di cura. Anche qui G_{12} e G_{13} sono sovrapposti. In tabella 6.2 sono espresse le proprietà del materiale alla fine del ciclo di cura.

E_1 [GPa]	122
E_2 [GPa]	9.67
E_3 [GPa]	9.67
ν_{12}	0.269
ν_{13}	0.269
ν_{23}	0.441
G_{12} [GPa]	5.16
G_{13} [GPa]	5.16
G_{23} [GPa]	3.36

Tabella 6.2: Proprietà del materiale della piastra di riferimento alla fine del ciclo di cura

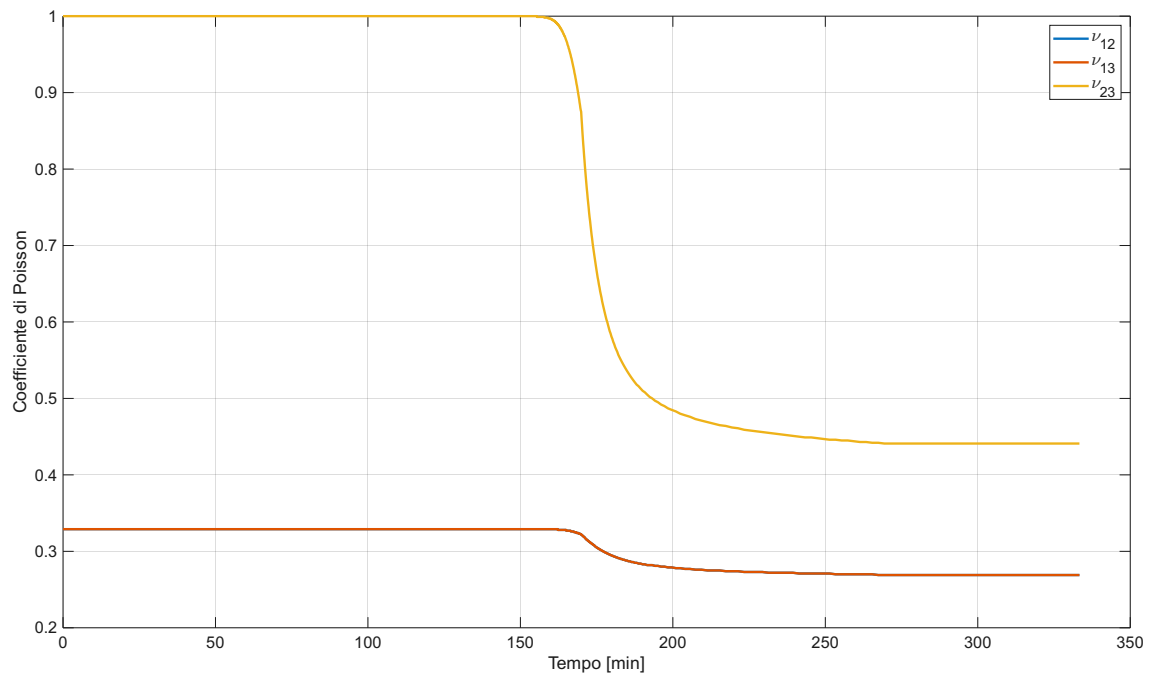


Figura 6.6: Andamento del coefficiente di Poisson durante il ciclo di cura

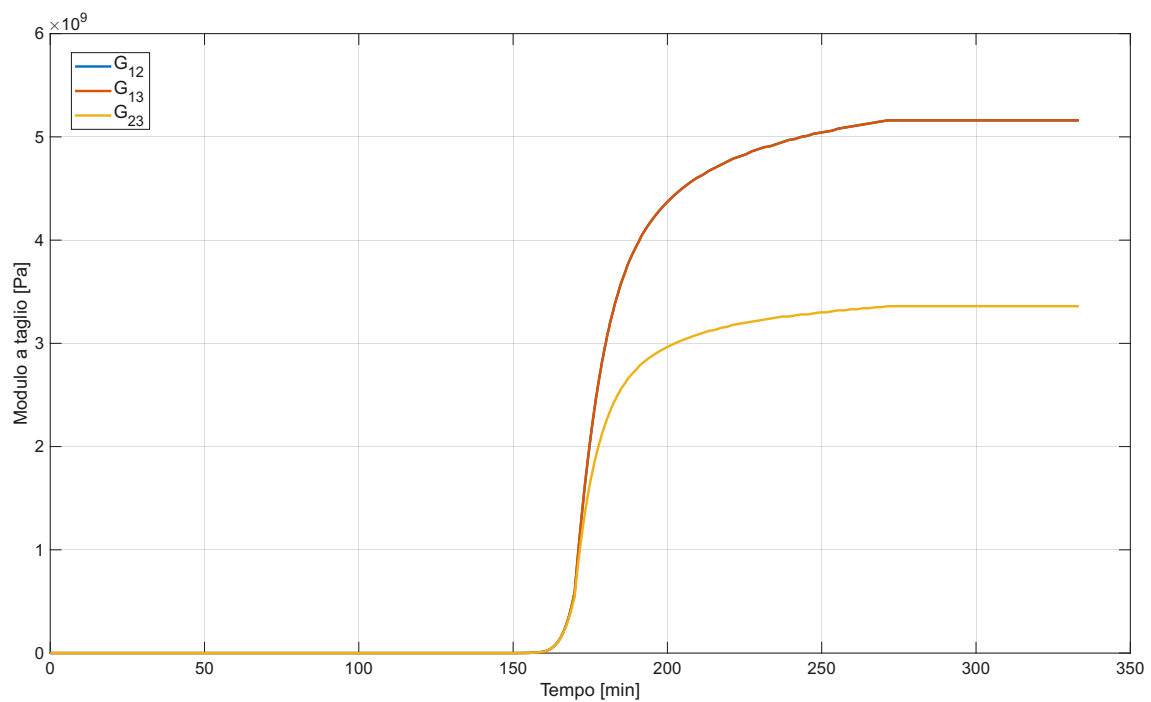


Figura 6.7: Andamento del modulo di taglio G durante il ciclo di cura

Si analizza ora lo stato di deformazione e di tensione residua all'interno del componente. In figura 6.8 si riporta il campo di spostamento in modulo della parte di componente analizzata dopo la rimozione del tool.

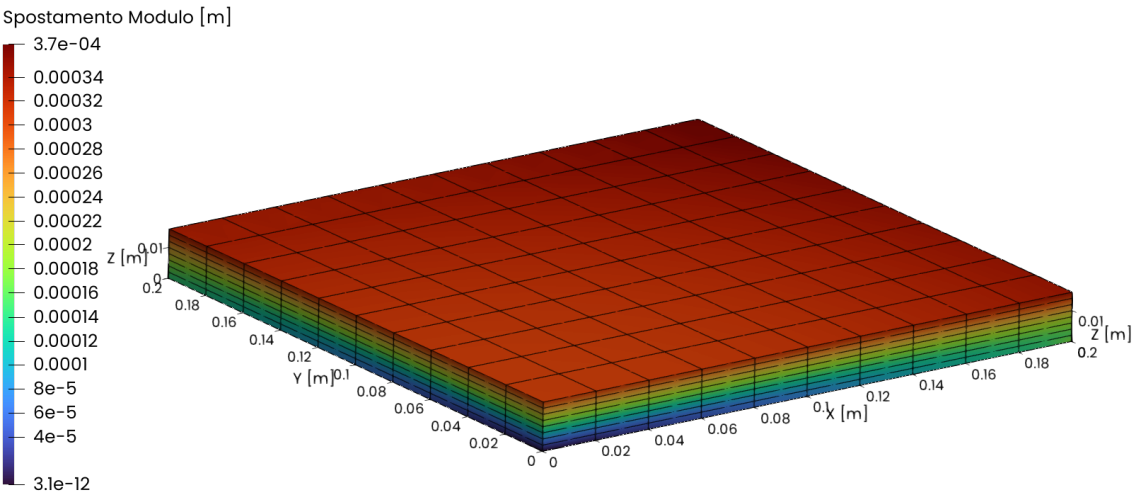
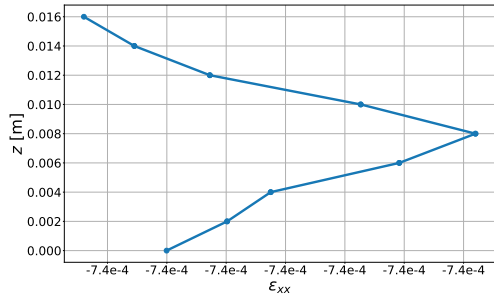


Figura 6.8: Deformazione in x della piastra di riferimento analizzata

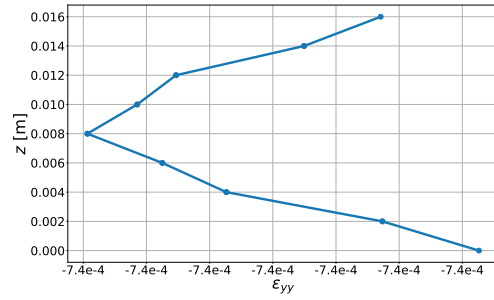
In figura 6.9 sono riportati gli andamenti delle principali deformazioni lungo lo spessore della piastra alle coordinate $(0, 0, z)$, ovvero al centro della piastra. In questo caso si nota come la deformazione ε_{zz} , riportata in figura 6.9c sia quella più significativa, infatti la piastra, dopo il ciclo di cura, risulta più assottigliata. Dalle figure 6.9a e 6.9b si osserva come le deformazioni nelle direzioni x e y siano ridotte rispetto alla direzione z . La deformazione a taglio ε_{xz} , riportata in figura 6.9d, risulta essere trascurabile. In figura 6.10 sono riportati gli andamenti delle tensioni principali lungo lo spessore della piastra, alle coordinate $(0, 0, z)$. In questo caso si nota come le tensioni σ_{xx} e σ_{yy} , riportate rispettivamente in figura 6.10a e in figura 6.10b, siano quelle più significative, con picchi superiori ai 60 MPa. Gli andamenti sono alternati in funzione dell'orientamento delle fibre dei singoli strati. La tensione σ_{zz} , riportata in figura 6.10c, risulta essere molto minore rispetto alle altre due. Le tensioni a taglio non vengono riportate in quanto trascurabili.

σ_{xx}	61.88
σ_{yy}	61.89
σ_{zz}	0.392
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	~ 0
σ_{yz}	~ 0

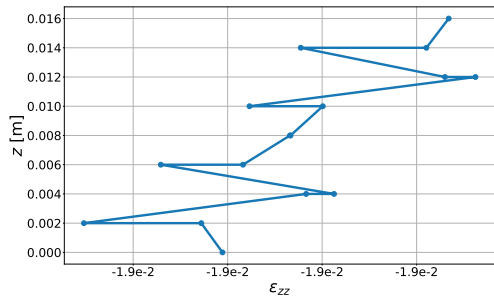
Tabella 6.3: Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra di riferimento [MPa]



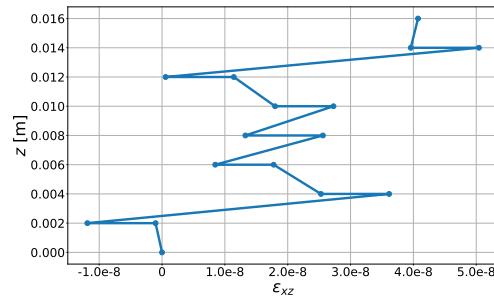
(a) Andamento della deformazione ε_{xx}



(b) Andamento della deformazione ε_{yy}

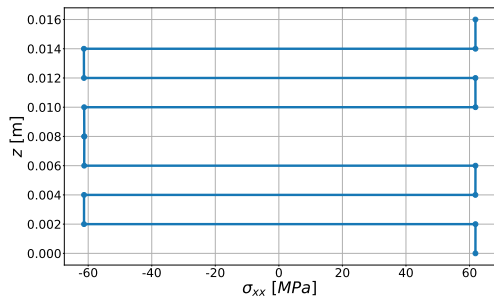


(c) Andamento della deformazione ε_{zz}

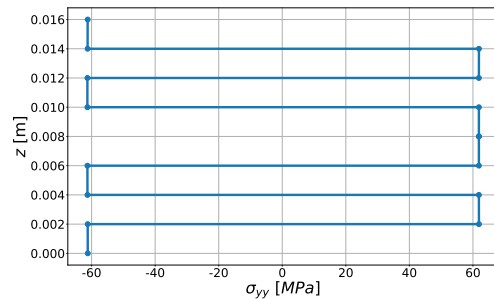


(d) Andamento della deformazione ε_{xz}

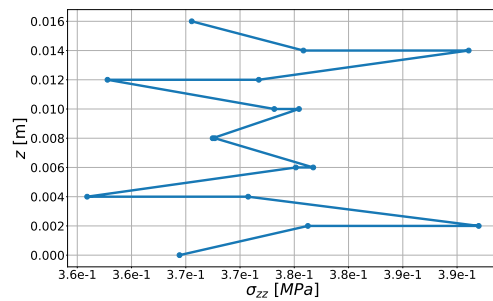
Figura 6.9: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0, z)$ della piastra con riparazione passante dritta



(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}

Figura 6.10: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0, z)$ della piastra con riparazione passante dritta

Capitolo 7

Analisi del processo di riparazione

In questo capitolo viene trattata la riparazione di componenti in materiale composito, in particolare si mettono a confronto geometrie di riparazione di una piastra.

Per simulare la riparazione si è curata solo una porzione della piastra, che rappresenta gli strati sostituiti. Le proprietà del materiale non sostituito sono prese dall'analisi della piastra di riferimento al termine del ciclo di cura e sono riportate nella tabella 6.2. Tra gli strati sostituiti e quelli originali è sempre necessario mettere uno strato adesivo; per simularlo è stato utilizzato un materiale isotropo le cui proprietà sono riportate in tabella 7.1 e fanno riferimento a [24]. Per le diverse geometrie analizzate si è fatto riferimento a [25]. Si sono ipotizzati due tipi diversi di riparazione: passante, in cui si sostituiscono tutti gli strati di una porzione del composito, e superficiale, in cui si sostituiscono solo una parte degli strati.

E [GPa]	3.12
G [GPa]	1.13
ν	0.38
CTE [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	0.7×10^{-6}

Tabella 7.1: Proprietà dell'adesivo

Il ciclo di cura utilizzato per la riparazione è diverso rispetto a quello usato per la produzione, in particolare si utilizza una temperatura massima inferiore e la si tiene per maggior tempo. Questo viene fatto perché non si vuole degradare la parte già curata in precedenza, durante la produzione originale del componente. L'adesivo scelto in [24] prevede una temperatura massima di cura pari a 177°C , che quindi costituisce la temperatura massima utilizzabile durante la cura. In figura 7.1 è riportato il ciclo di cura utilizzato per la riparazione.

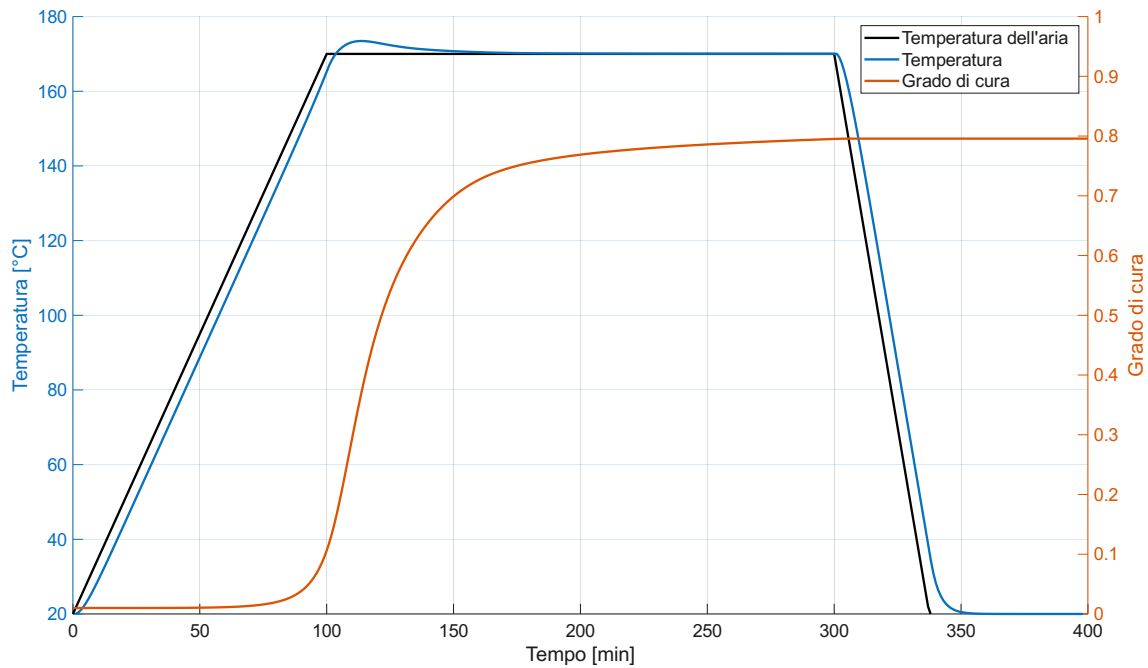


Figura 7.1: Ciclo di cura usato nella riparazione

Si è scelta una temperatura massima dell'aria pari a 170°C ed è stata mantenuta per 200 min, un tempo maggiore rispetto alla produzione; questo si è fatto per compensare la temperatura massima minore. La fase di salita ha una pendenza di $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, partendo da 20°C dell'ambiente. La fase di discesa ha una pendenza di $-4^{\circ}\text{C}/\text{min}$, fino a tornare ai 20°C dell'ambiente. Con questo ciclo di cura, il grado di cura raggiunto è pari a 0.796, inferiore rispetto a quello ottenuto durante la produzione, che era pari a 0.891.

Di seguito, nelle figure da 7.2 a 7.4, sono riportati gli andamenti dei moduli di Young, dei moduli a taglio e dei coefficienti di Poisson durante il ciclo di cura. Si nota che, come nel caso della piastra di riferimento E_2 e E_3 , G_{12} e G_{13} , ν_{12} e ν_{13} sono rispettivamente sovrapposti.

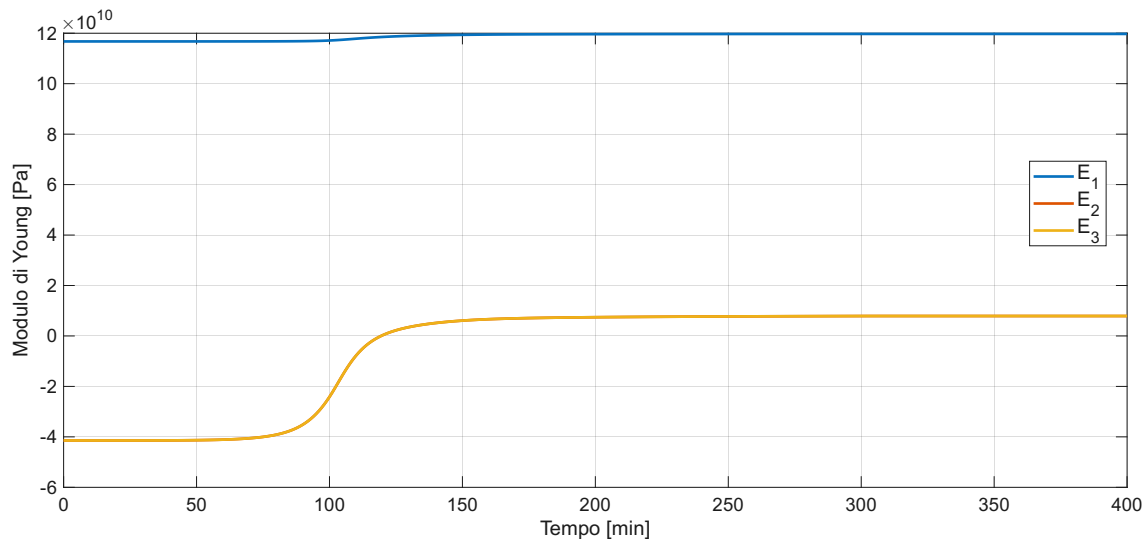


Figura 7.2: Andamento del modulo di Young E durante il ciclo di cura della riparazione

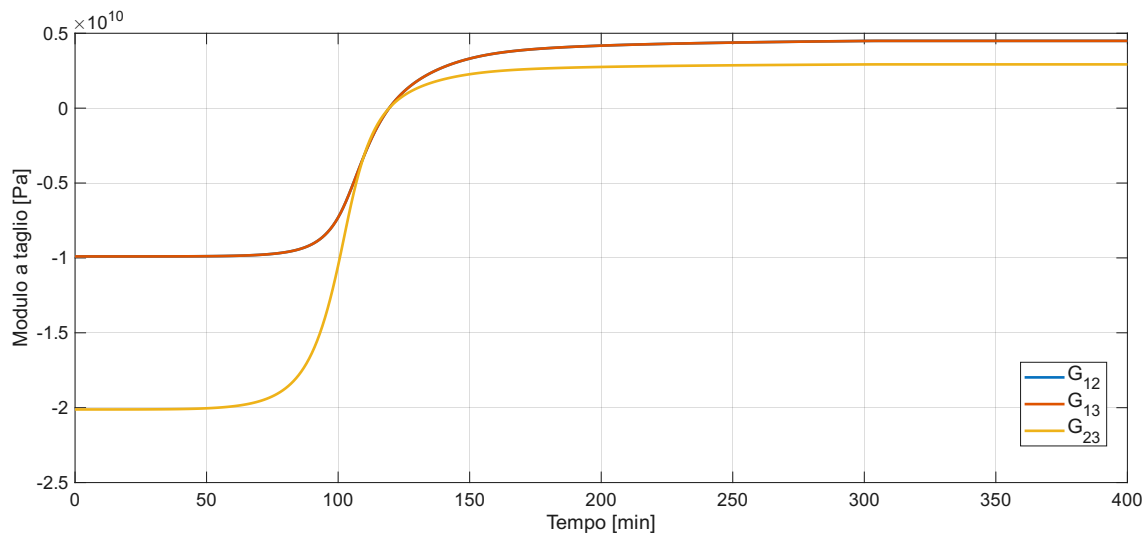


Figura 7.3: Andamento del modulo a taglio G durante il ciclo di cura della riparazione

Nella tabella 7.2 sono riportate le proprietà del materiale sostituito alla fine del ciclo di cura di riparazione. Si osserva come le proprietà del materiale siano inferiori rispetto a quelle del materiale originale (tabella 6.3). Questo è dovuto al fatto che il materiale utilizzato nella riparazione ha subito un ciclo di cura a temperature più basse dove ha raggiunto un grado di cura inferiore.

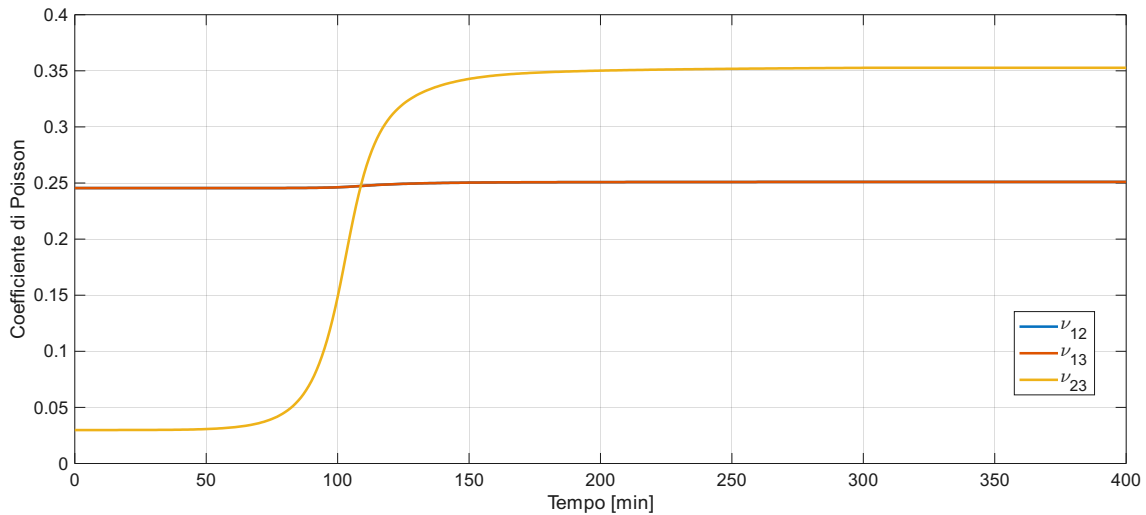


Figura 7.4: Andamento del coefficiente di Poisson durante il ciclo di cura della riparazione

E_1 [GPa]	119.73
E_2 [GPa]	7.90
E_3 [GPa]	7.90
ν_{12}	0.2510
ν_{13}	0.2510
ν_{23}	0.3527
G_{12} [GPa]	4.49
G_{13} [GPa]	4.49
G_{23} [GPa]	2.92

Tabella 7.2: Proprietà del materiale sostituito alla fine del ciclo di cura

Nei modelli che seguiranno, utilizzati per simulare la riparazione, è importante notare come non sia stato modellato alcun *Tool* e *Shear Layer*, in quanto le riparazioni vengono eseguite su un componente già curato a cui si applica una *vacuum bag* su entrambi i lati del laminato in caso di una riparazione passante, oppure su un solo lato nel caso di una riparazione superficiale.

Tutti i modelli realizzati presentano le stesse condizioni al contorno, ideate per simulare una porzione di una piastra più ampia. In particolare sono presenti tre piani di simmetria sui lati $x = 0$, $y = 0$ e $x = 0.2$. Inoltre, per non rendere il modello labile sono stati bloccati tutti gli spostamenti sul lato $y = 0.2$.

In questo capitolo verranno analizzate diverse casistiche di geometrie, in particolare ci si concentrerà su delle riparazioni passanti e delle riparazioni superficiali. Per ognuna di queste due casistiche poi si analizzeranno diverse geometrie. Ci si aspetta una strizione dovuta al ritiro della resina nella parte curata con una conseguente nascita di tensioni sia nella parte curata, sia nella parte originale. L'asimmetria di determinate geometrie potrebbe portare il componente a flettere.

7.1 Riparazione passante

In questa sezione si analizzano diverse geometrie di riparazione, tutte accomunate dal fatto che sono passanti, ovvero si sostituiscono tutti gli strati della piastra di riferimento. Nelle analisi che seguiranno sono stati graficati gli andamenti delle deformazioni e delle tensioni lungo tre tratti, riportati in figura 7.5. Più precisamente il tratto 1 è lungo l'asse z alle coordinate $(0, 0.1, z)$, il tratto 2 è lungo l'asse z alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ e il tratto 3 è lungo l'asse x alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$.

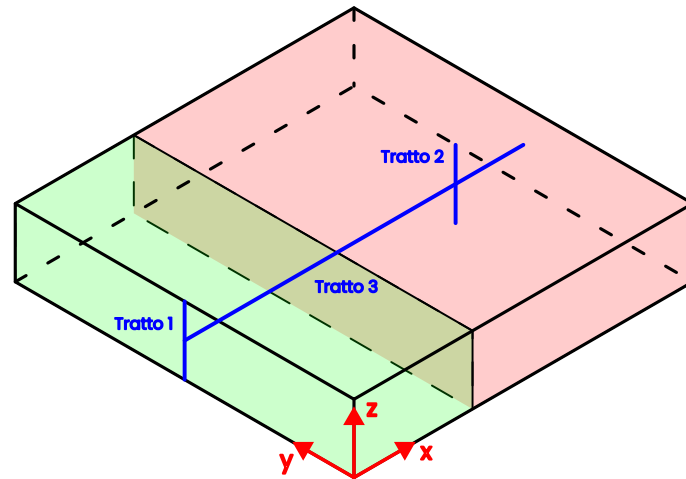


Figura 7.5: Tratti lungo i quali vengono graficate le deformazioni e le tensioni

7.1.1 Riparazione passante dritta

Nel primo caso analizzato si ha una riparazione dritta, come quella rappresentata in figura 7.6.

Il modello realizzato è rappresentato in figura 7.7 e le dimensioni sono riportate nella tabella 7.3.

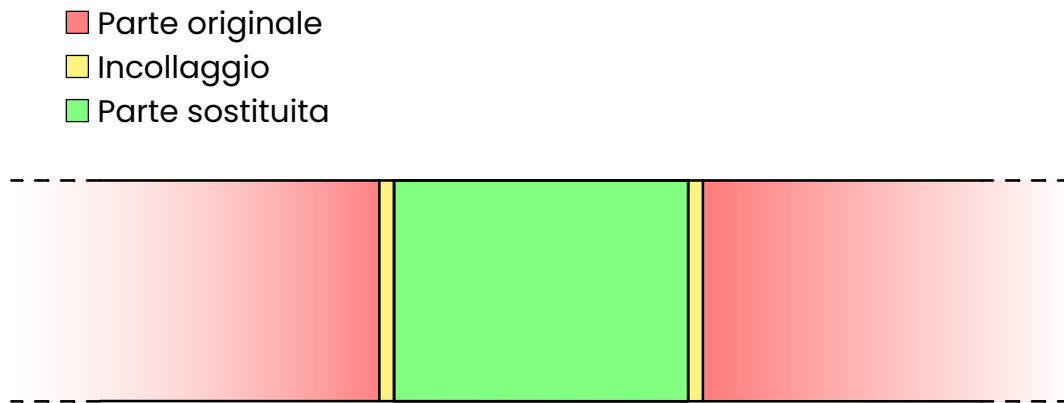


Figura 7.6: Riparazione passante dritta

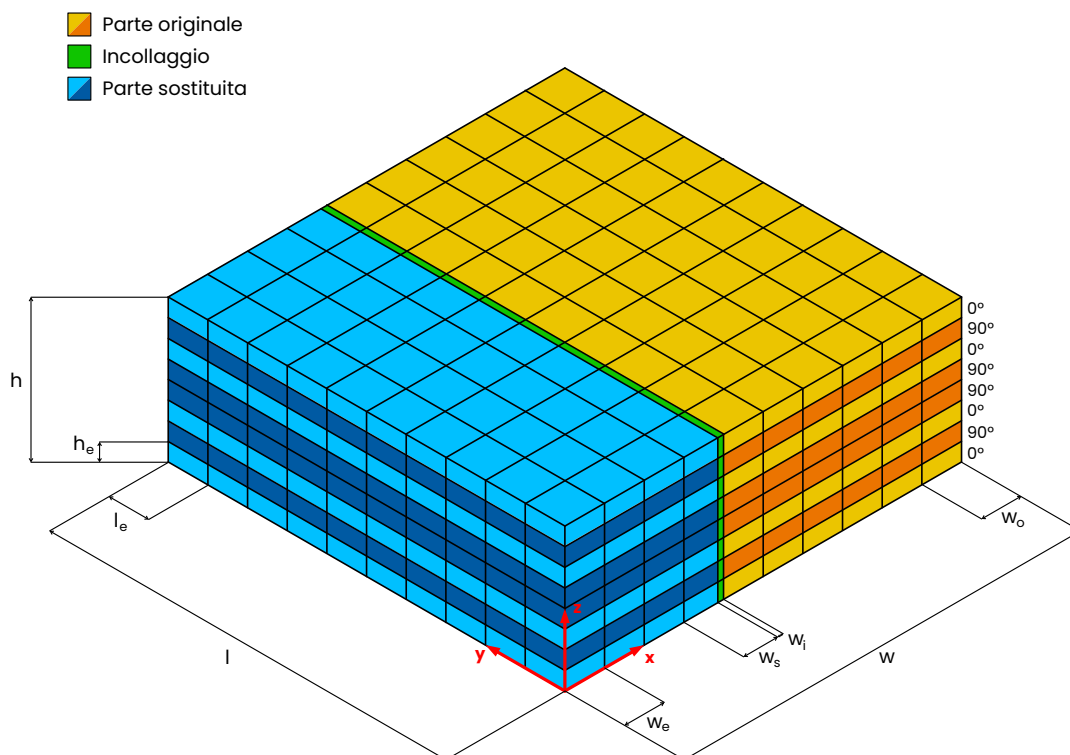


Figura 7.7: Modello della piastra con riparazione passante dritta in assonometria isometrica

h	1.6
h_e	0.2
l	20
l_e	2
w	20
w_e	2
w_s	1.98
w_i	0.02
w_o	2

Tabella 7.3: Dimensioni del modello con riparazione passante dritta [cm]

Risultati

Per prima cosa viene riportato il campo di spostamento della piastra, in particolare in direzione x nella figura 7.8, in direzione z nella figura 7.9. In figura 7.10 è riportato lo spostamento in modulo, inoltre è rappresentata la deformata con un fattore di scala 20:1. Si osserva che lo spostamento in direzione x risulta trascurabile, in direzione z invece, nella parte curata, è più apprezzabile. In generale la deformazione è simmetrica nella parte riparata e la parte originale non subisce spostamenti apprezzabili.

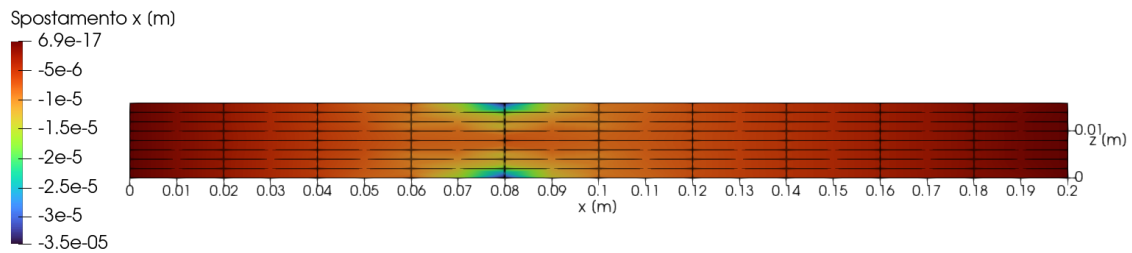


Figura 7.8: Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione passante dritta

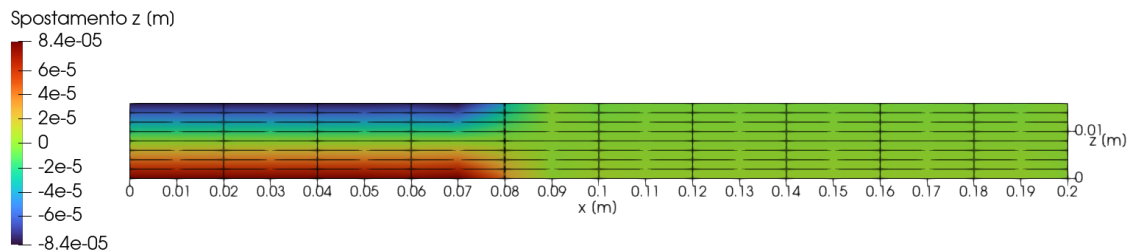


Figura 7.9: Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione passante dritta

A questo punto si riportano gli andamenti delle principali deformazioni e tensioni lungo i tratti descritti in figura figura 7.5.

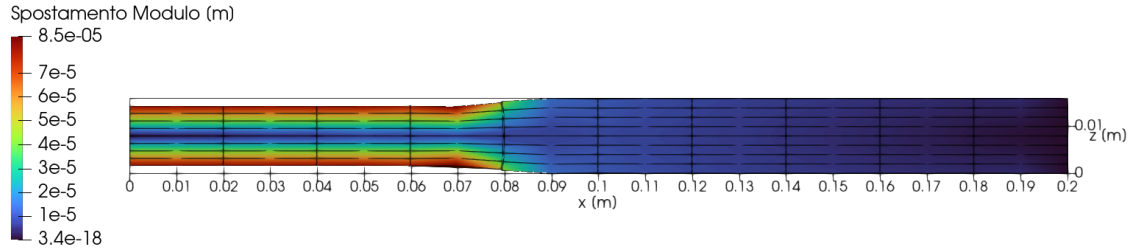


Figura 7.10: Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione passante dritta

Tratto 1

Si riportano in figura 7.11 gli andamenti delle deformazioni ε_{xx} , ε_{zz} e ε_{xz} lungo il tratto 1, ovvero alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra. Le deformazioni non riportate risultano meno rilevanti o nulle.

Nelle figure 7.11a e 7.11b si osserva un comportamento simmetrico rispetto al piano di mezzzeria del laminato. Le deformazioni ε_{zz} sono di due ordini di grandezza maggiori rispetto a quelle in direzione x . Le deformazioni di taglio ε_{xz} sono trascurabili rispetto le altre ed è presente una simmetria centrale.

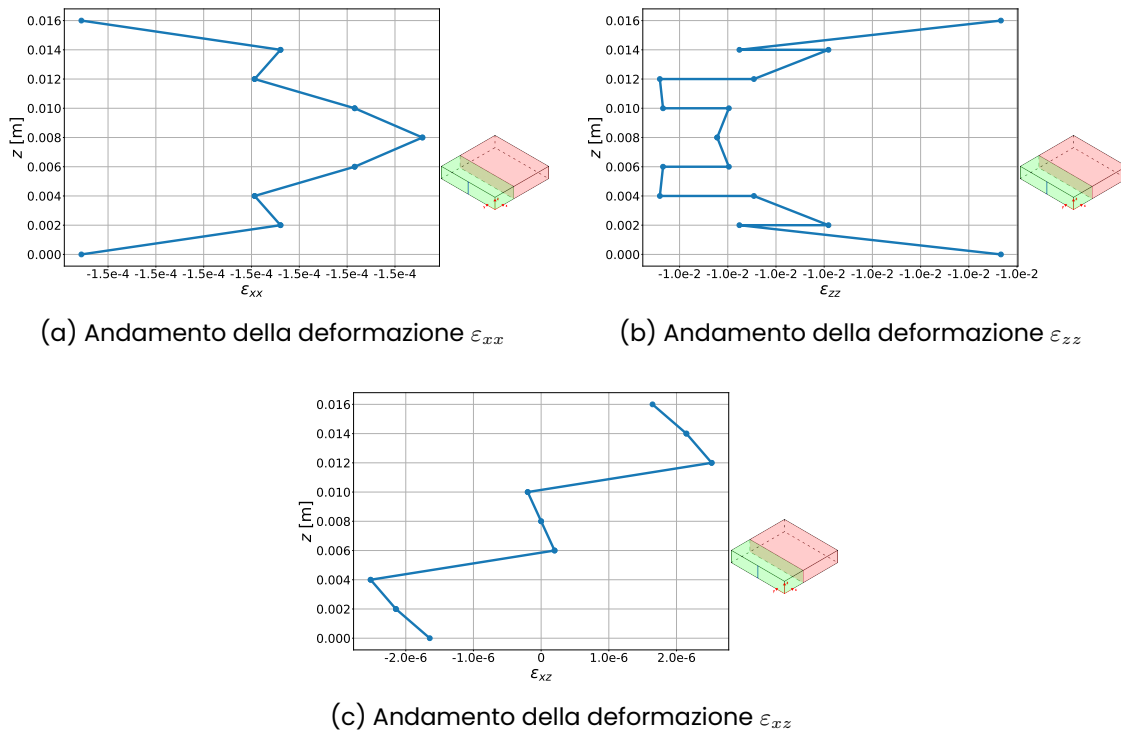


Figura 7.11: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta

In figura 7.12 sono riportati gli andamenti delle tensioni σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} e σ_{xz} lungo il tratto 1. Si osserva come le tensioni in direzione x e in direzione y siano abbastanza elevate, in quanto superano i 50 MPa. Inoltre in direzione x , negli strati con le fibre orientate in

direzione y , si raggiungono valori di tensione negativa a indicare una compressione. Le tensioni σ_{zz} e σ_{xz} risultano trascurabili rispetto le altre due. In tabella 7.4 sono riportati i valori massimi di tensione, in valore assoluto, raggiunti nel tratto 1.

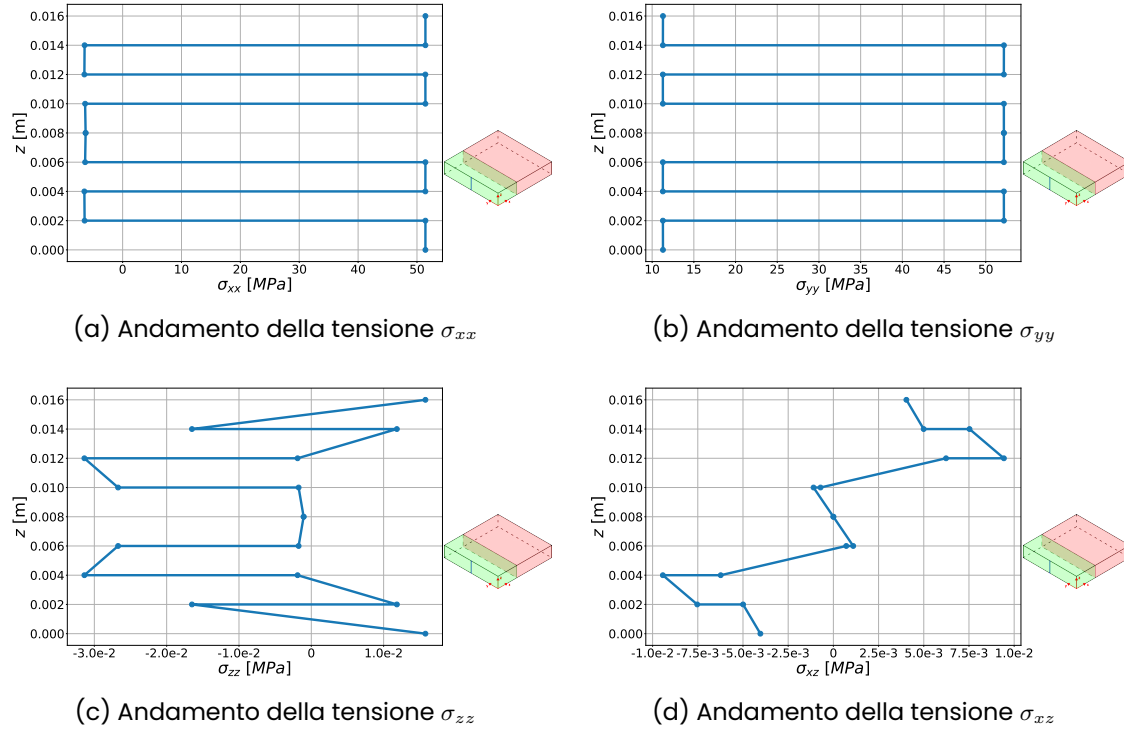


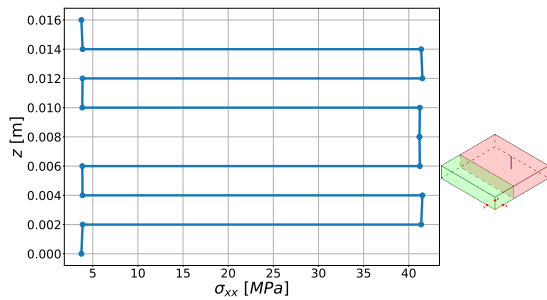
Figura 7.12: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta

σ_{xx}	51.44
σ_{yy}	52.18
σ_{zz}	0.0313
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	0.009 43
σ_{yz}	~ 0

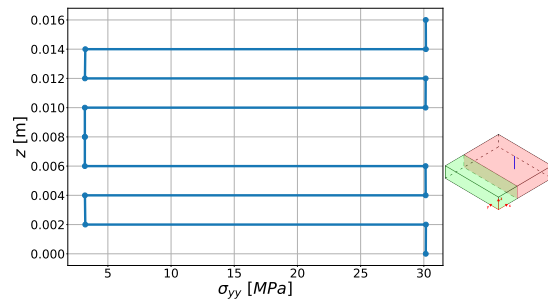
Tabella 7.4: Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta [MPa]

Tratto 2

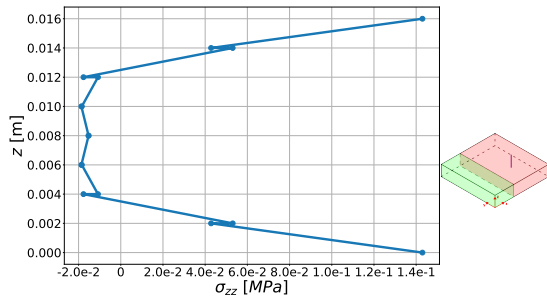
In figura 7.13 si riportano gli andamenti delle tensioni principali nel tratto 2, ovvero alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$. Queste quindi si trovano all'interno della parte non sostituita della piastra. Si è così in grado di vedere gli effetti della riparazione sulla parte non curata. Si osserva come le tensioni di maggior rilievo siano quelle in direzione x e in direzione y (figure 7.13a e 7.13b); queste comunque hanno un'intensità minore rispetto alla parte del componente sostituita. Le σ_{zz} e le σ_{xz} risultano trascurabili. Le tensioni non riportate sono praticamente nulle.



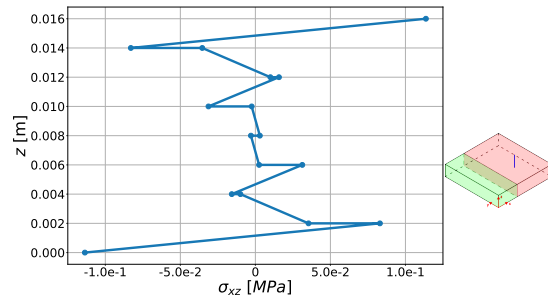
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.13: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta

Tratto 3

Infine si analizza l'andamento delle deformazioni e delle tensioni lungo la coordinata x (tratto 3). Le deformazioni più significative sono state riportate in figura 7.14. Si osserva che la deformazione lungo x , ε_{xx} è molto piccola e presenta un picco all'interno dell'incollaggio tra la parte sostituita e quella originale. Questo è dovuto al fatto che le proprietà dell'adesivo sono più scarse e permettono una maggiore deformazione. In figura 7.14b è riportata la deformazione ε_{zz} ; questa è quasi nulla nella parte originale e decisamente maggiore nella parte curata. Si osserva inoltre che il salto non avviene all'interno dell'adesivo. Le deformazioni ε_{xz} riportate in figura 7.14c risultano molto piccole rispetto le altre riportate, tuttavia si nota un andamento ondulatorio in prossimità dell'incollaggio. Questo probabilmente è dovuto alla mesh troppo poco fitta.

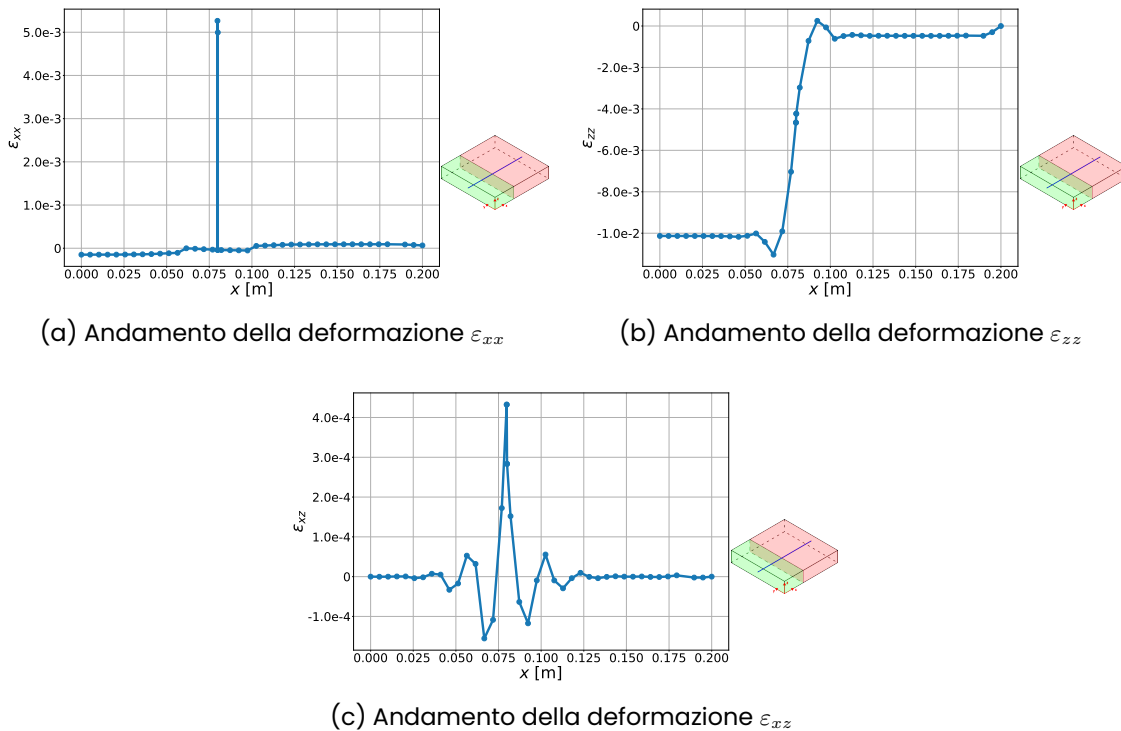
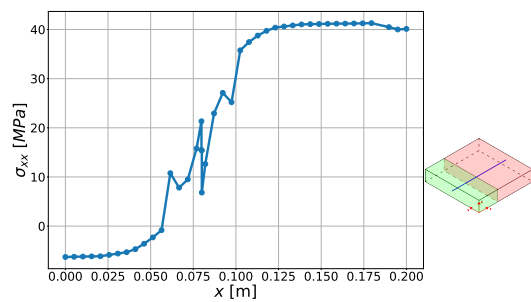
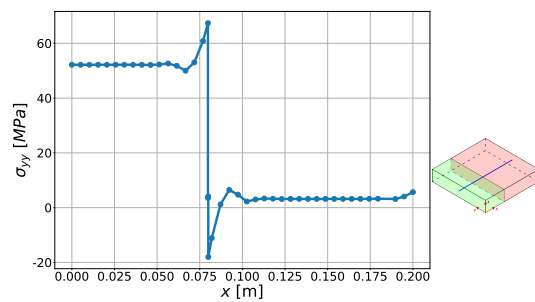


Figura 7.14: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta

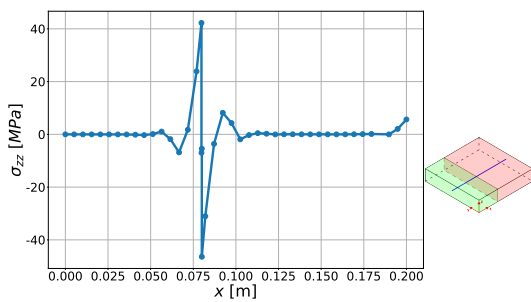
In figura 7.15 si riportano gli andamenti delle tensioni lungo il tratto 3. Si osserva che la riparazione genera tensioni basse in direzione x (figura 7.15a) nella parte curata (dove le fibre hanno direzione y), mentre le tensioni generate nella parte originale sono molto maggiori. Si osserva il comportamento opposto per quanto riguarda le tensioni in direzione y (figura 7.15b). La tensione σ_{zz} (figura 7.15c) è praticamente nulla lungo tutta la piastra, tranne in prossimità dell'incollaggio, raggiungendo picchi che superano i 40 MPa. Anche per quanto riguarda la tensione σ_{xz} (figura 7.15d) presenta un picco in prossimità dell'incollaggio. Inoltre in tutte e quattro le tensioni riportate sono presenti fenomeni ondulatori dovuti alla mesh poco fitta.



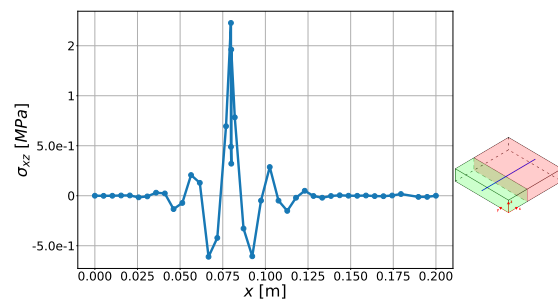
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.15: Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione passante dritta

7.1.2 Riparazione a scalini

Il secondo caso analizzato presenta una sezione con scalini (come quella riportata in figura 7.16) in modo da aumentare la superficie di incollaggio tra la parte originale e quella sostituita.

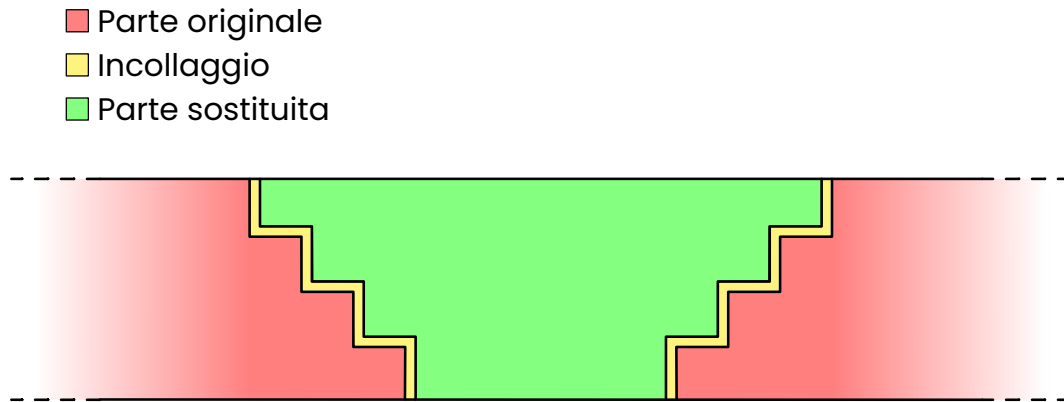


Figura 7.16: Riparazione passante a scalini

Il modello che è stato realizzato è riportato in figura 7.17 e le sue dimensioni sono riportate in tabella 7.5. La mesh è stata raffinata in un punto per osservare più precisamente il comportamento delle tensioni all'interfaccia tra la parte originale e quella sostituita.

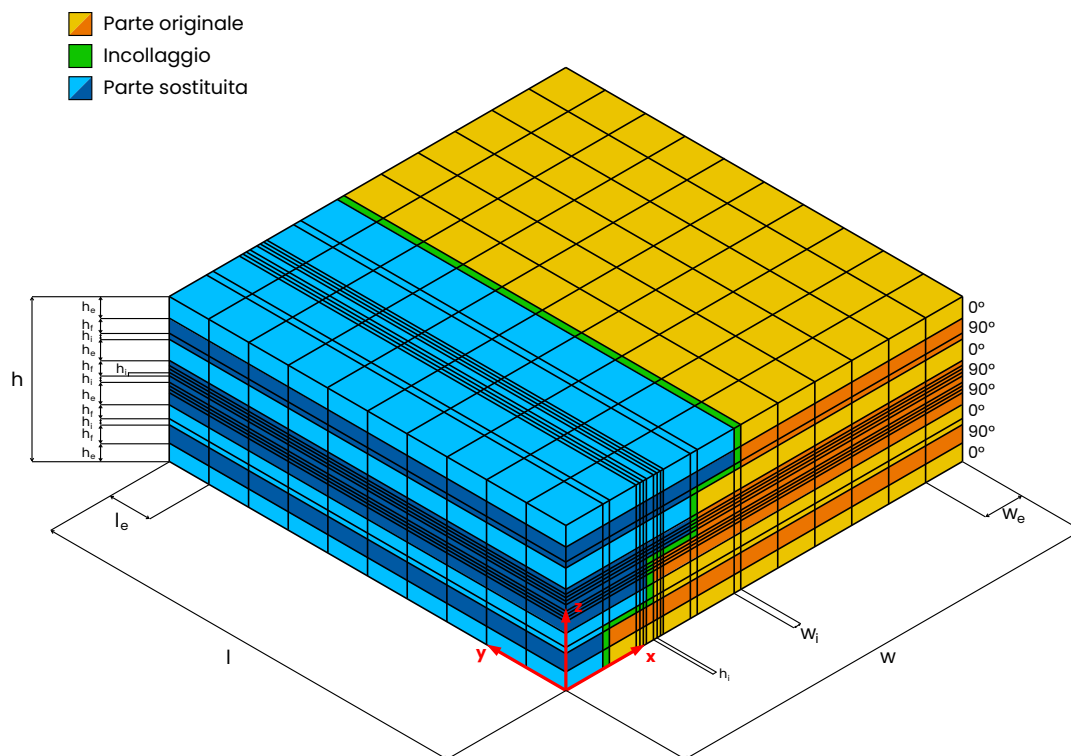


Figura 7.17: Modello della piastra con riparazione passante a scalini in assonometria isometrica

h	1.6
h_e	0.2
h_i	0.02
h_f	0.18
l	20
l_e	2
w	20
w_e	1.92
w_i	0.02

Tabella 7.5: Dimensioni del modello con riparazione passante a scalini [cm]

Risultati

Come nel caso precedente si riportano per prima cosa i campi di spostamento all'interno della piastra dopo la riparazione (figure da 7.18 a 7.20). Si osserva che lo spostamento in direzione x assume il valore maggiore sulla superficie superiore in prossimità dell'incollaggio. Lo spostamento in direzione z non è più simmetrico come nel caso precedente dal momento che la riparazione stessa non è simmetrica. Si nota dalla deformata in scala 20:1 che la deformazione complessiva non è più simmetrica ed è presente un ingobbimento della parte originale indotto dalla riparazione, sempre a causa della asimmetria della riparazione. In figura 7.21 è riportato lo spostamento in direzione z lungo il tratto 3.

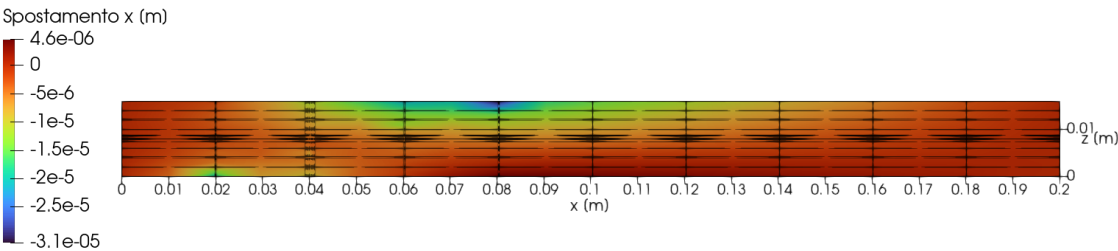


Figura 7.18: Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione passante a scalini

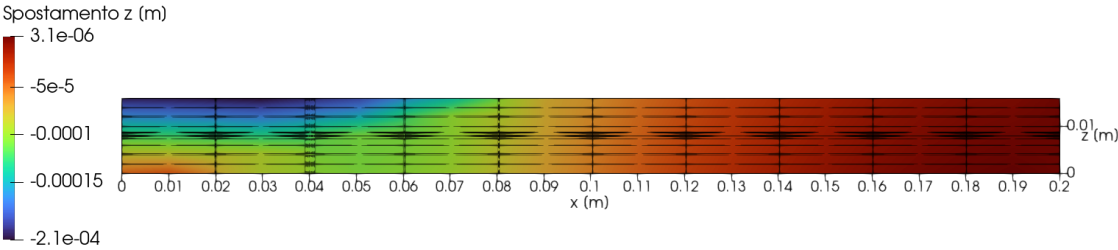


Figura 7.19: Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione passante a scalini

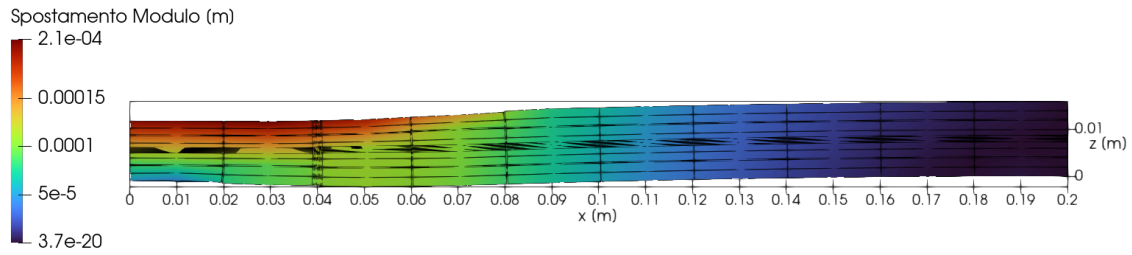


Figura 7.20: Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione passante a scalini

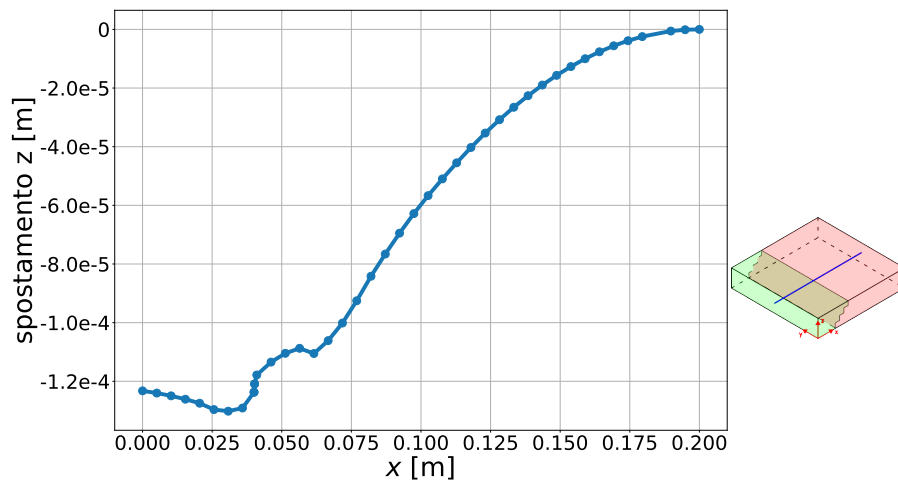


Figura 7.21: Spostamento in direzione z lungo il tratto 3

Tratto 1

Si analizzano gli andamenti delle deformazioni (figura 7.22) e le tensioni (figura 7.23) lungo il tratto 1. Per quanto riguarda le deformazioni si può affermare che quella maggiore avviene in direzione z ovvero si ha un assottigliamento della parte curata. Per quanto riguarda la deformazione ε_{xz} (figura 7.22c) si nota come questa sia quasi nulla negli strati superficiali dove la porzione di piastra sostituita è maggiore, e aumenti negli strati inferiori dove la porzione di piastra sostituita diminuisce.

In figura 7.23 è rappresentato l'andamento delle principali tensioni lungo il tratto 1. La tensione σ_{xx} (figura 7.23a) risulta leggermente maggiore negli strati inferiori e tende a diminuire in quelli superiori, soprattutto negli strati con le fibre orientate in direzione y . La tensione in direzione y risulta avere un andamento pressoché simmetrico rispetto al piano di mezzeria. In figura 7.23c si osserva un aumento della tensione in direzione z negli strati inferiori della piastra; lo stesso avviene per quanto riguarda la tensione di taglio σ_{xz} (figura 7.23d).

Nella tabella 7.6 sono riportate le tensioni massime in valore assoluto nel tratto 1.

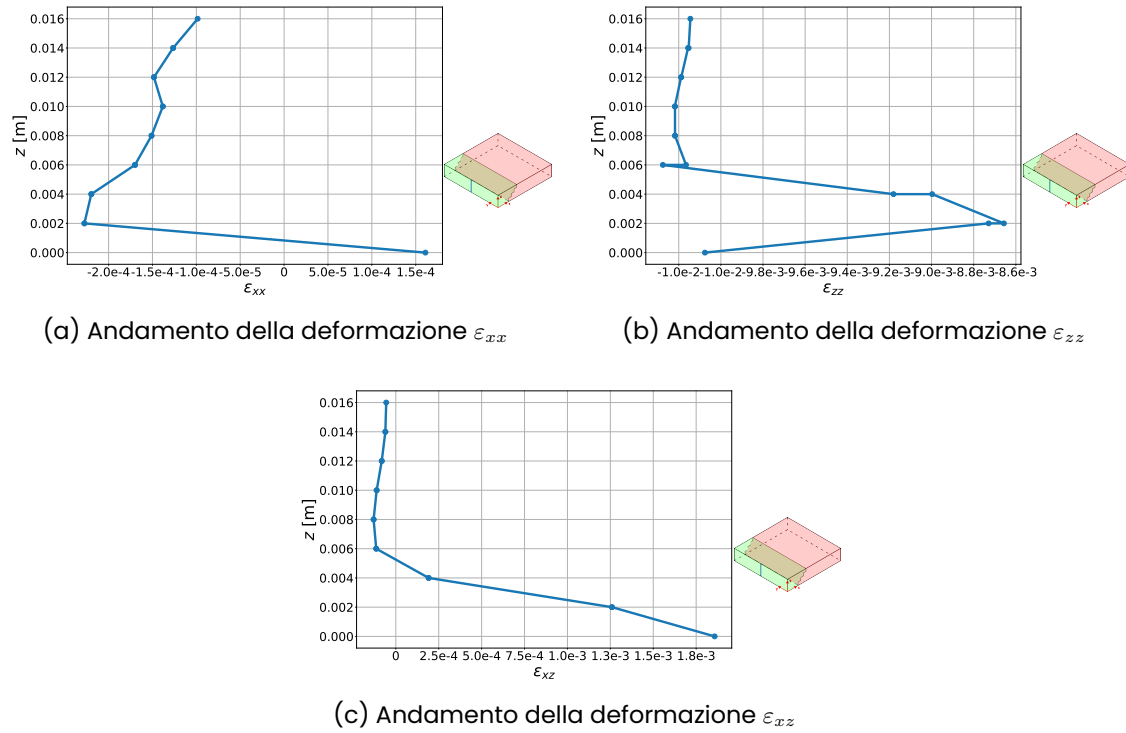


Figura 7.22: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini

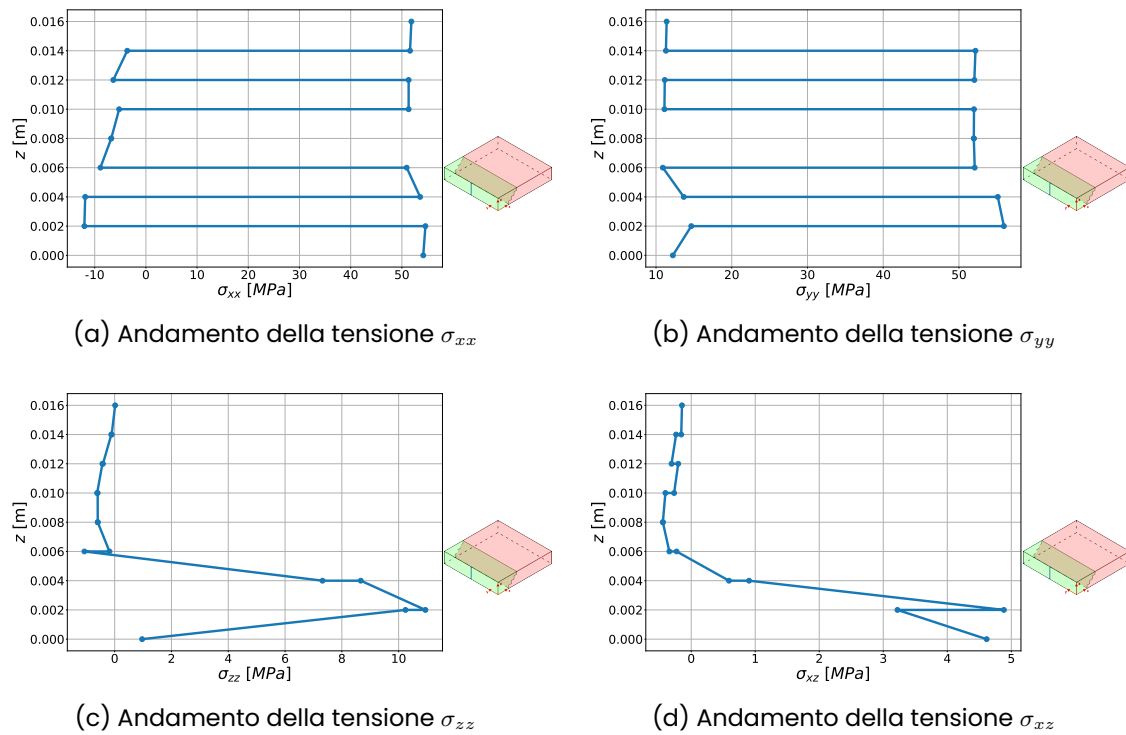


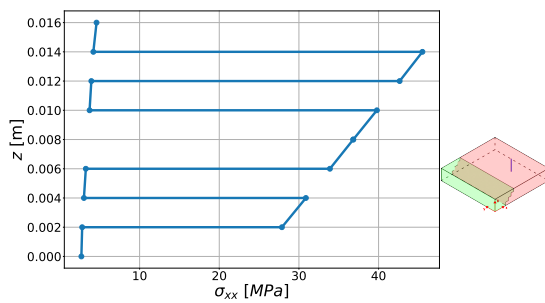
Figura 7.23: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini

σ_{xx}	54.56
σ_{yy}	55.90
σ_{zz}	10.86
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	4.861
σ_{yz}	~ 0

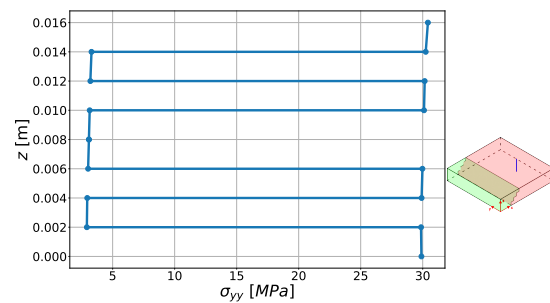
Tabella 7.6: Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini [MPa]

Tratto 2

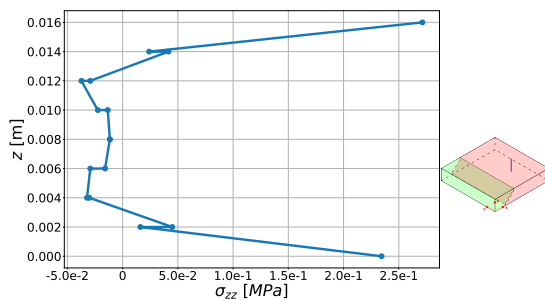
Si riporta in figura 7.24 l'andamento delle tensioni lungo lo spessore nella parte non curata, alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$. La tensione in direzione x (figura 7.24a) generata nella parte non curata risulta maggiore negli strati superficiali, dove la parte di strato sostituito è maggiore. La tensione σ_{yy} (figura 7.24b) è pressoché costante, lungo lo spessore, a meno dell'orientamento delle fibre. Le tensioni σ_{zz} e σ_{xz} (figure 7.24c e 7.24d) sono trascurabili rispetto alle due precedenti.



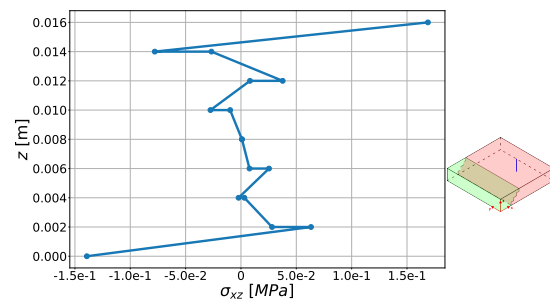
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.24: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini

Tratto 3

In figura 7.25 sono riportati gli andamenti delle deformazioni lungo il tratto 3. Si evidenzia che le deformazioni σ_{xx} e σ_{xz} sono circa costanti e vicine allo 0, tranne in prossimità dell'incollaggio. Dalla figura 7.25b si può dire che la parte non curata non subisce particolari deformazioni in direzione z , mentre queste sono presenti nella parte sostituita.

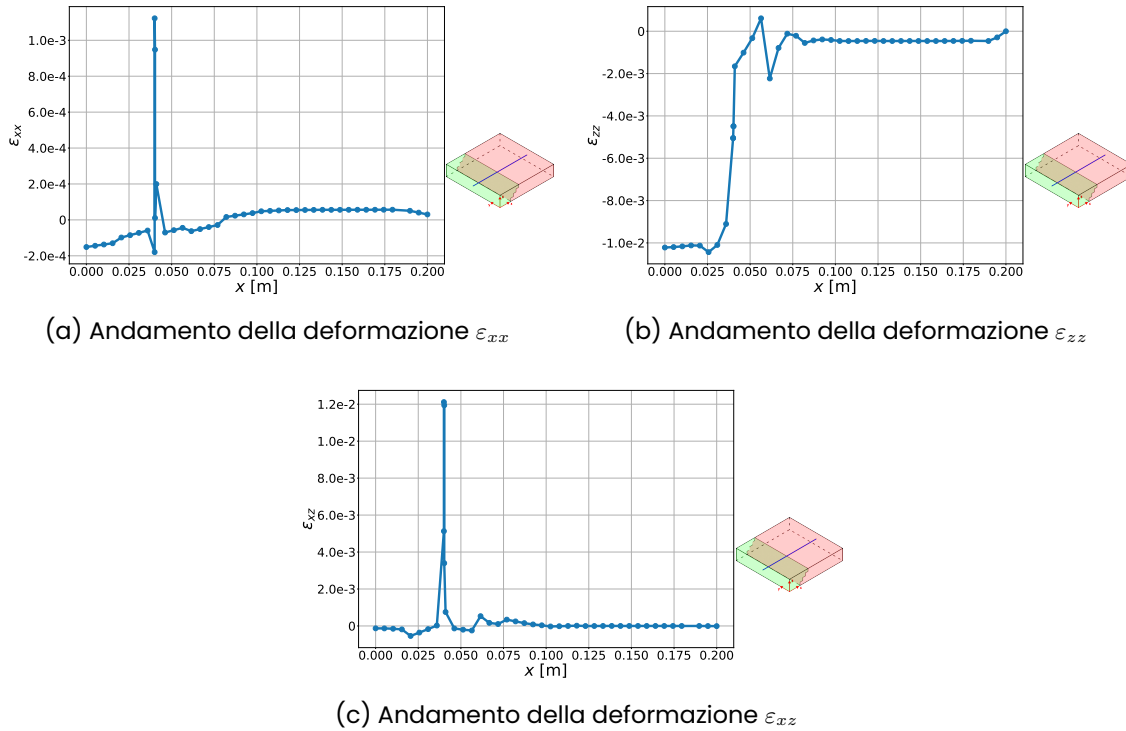
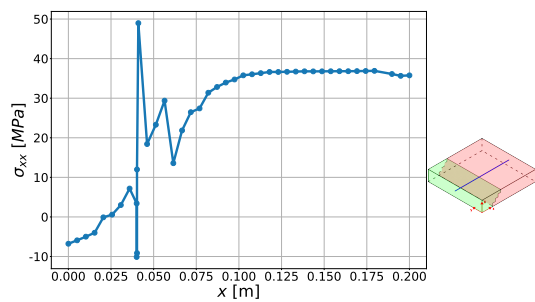


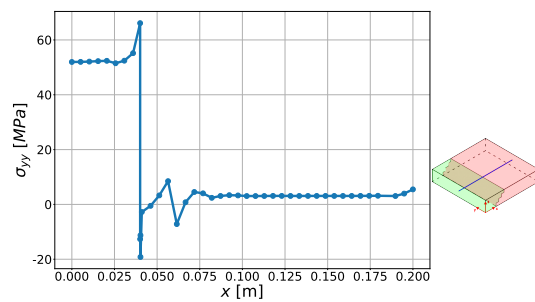
Figura 7.25: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante a scalini

Si riporta in figura 7.26 l'andamento delle principali tensioni lungo il tratto 3. Si nota una tensione in direzione x (figura 7.26a) bassa nella parte sostituita e elevata (circa 37 MPa) indotta nella parte originale. Inoltre è presente un picco in prossimità dell'incollaggio. In direzione y (figura 7.26b) si ha un andamento opposto. La tensione σ_{zz} (figura 7.26c) presenta un andamento pressoché nullo in tutta la piastra tranne un picco per quanto riguarda l'incollaggio. Lo stesso comportamento lo si ha per quanto riguarda la σ_{xz} (figura 7.26d). A causa di questi picchi si è ritenuto opportuno indagare maggiormente il campo delle tensioni in prossimità degli incollaggi. In figura 7.27 si ha un ingrandimento della tensione σ_{xx} in prossimità dell'incollaggio. Si osserva trazione nella parte non curata e compressione nella parte curata.

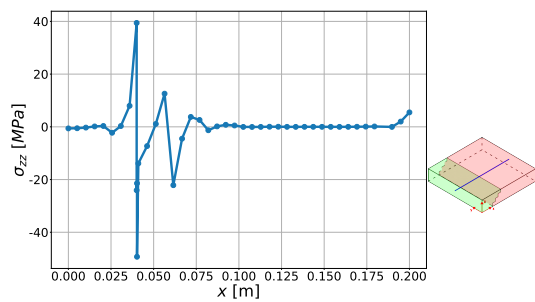
In figura 7.28 si nota come all'interfaccia dell'adesivo siano presenti grandi tensioni opposte che potrebbero portare a delaminazione o distacco dell'adesivo. Per quanto riguarda la tensione σ_{xz} (figura 7.29) si ha un picco sullo spigolo dell'incollaggio che raggiunge i 57 MPa



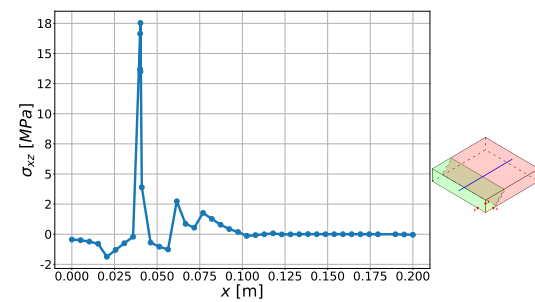
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.26: Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione passante a scalini

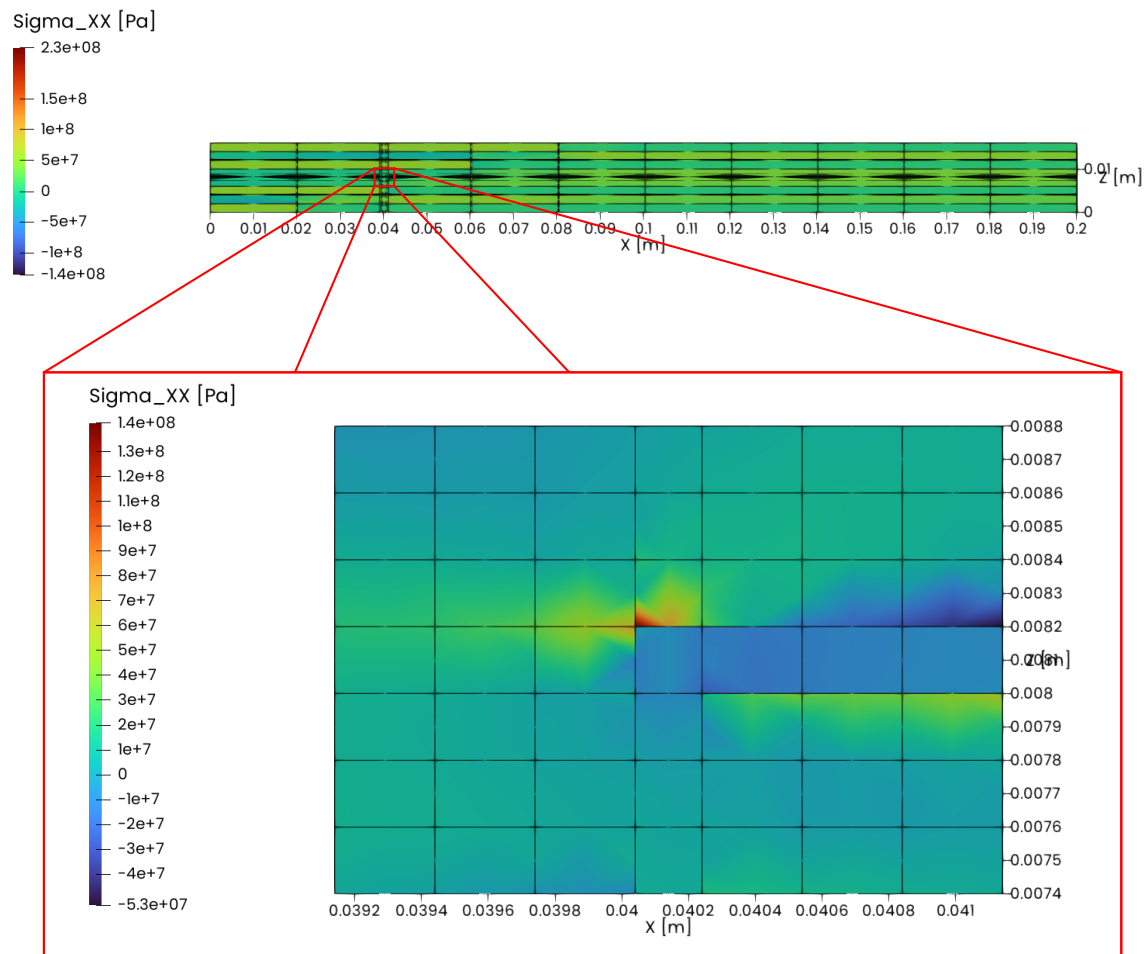


Figura 7.27: Dettaglio della tensione σ_{xx}

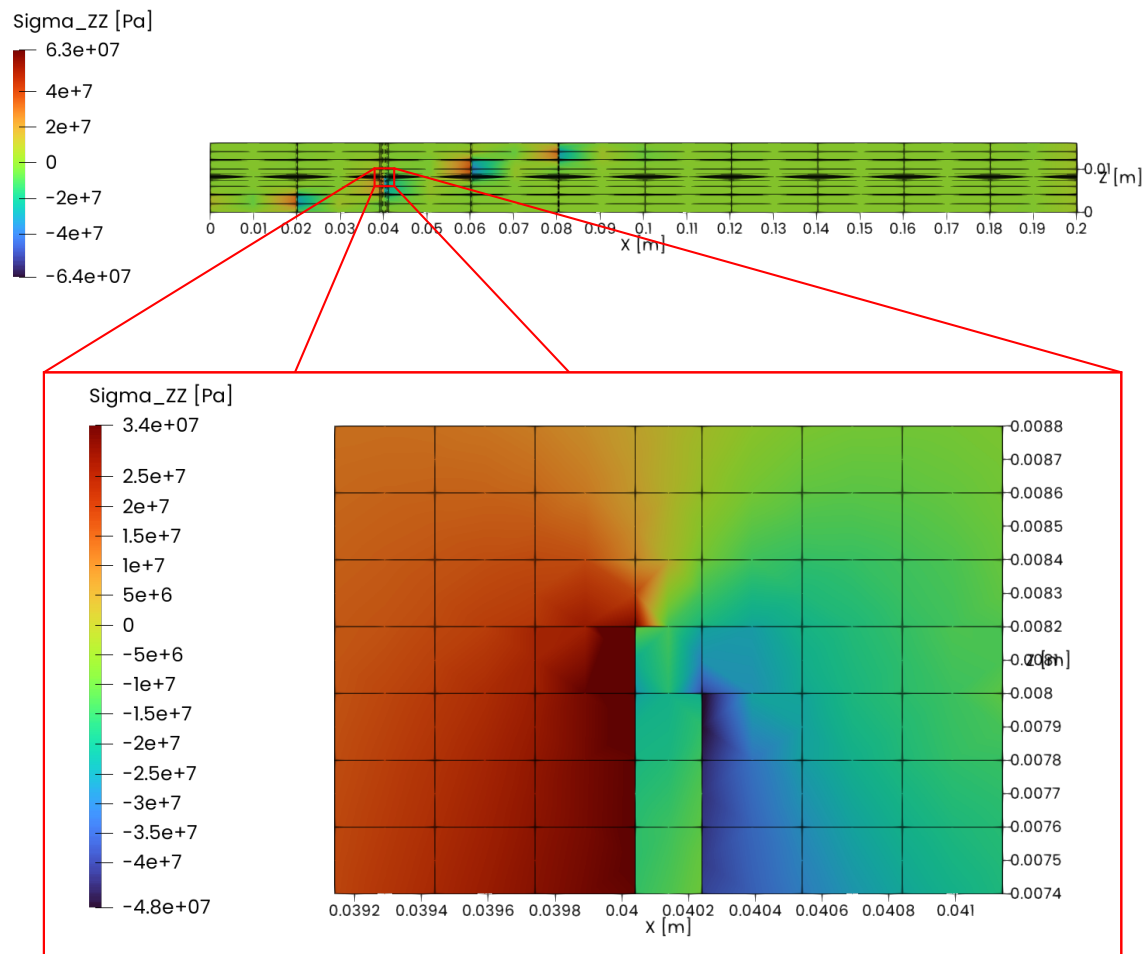


Figura 7.28: Dettaglio della tensione σ_{zz}

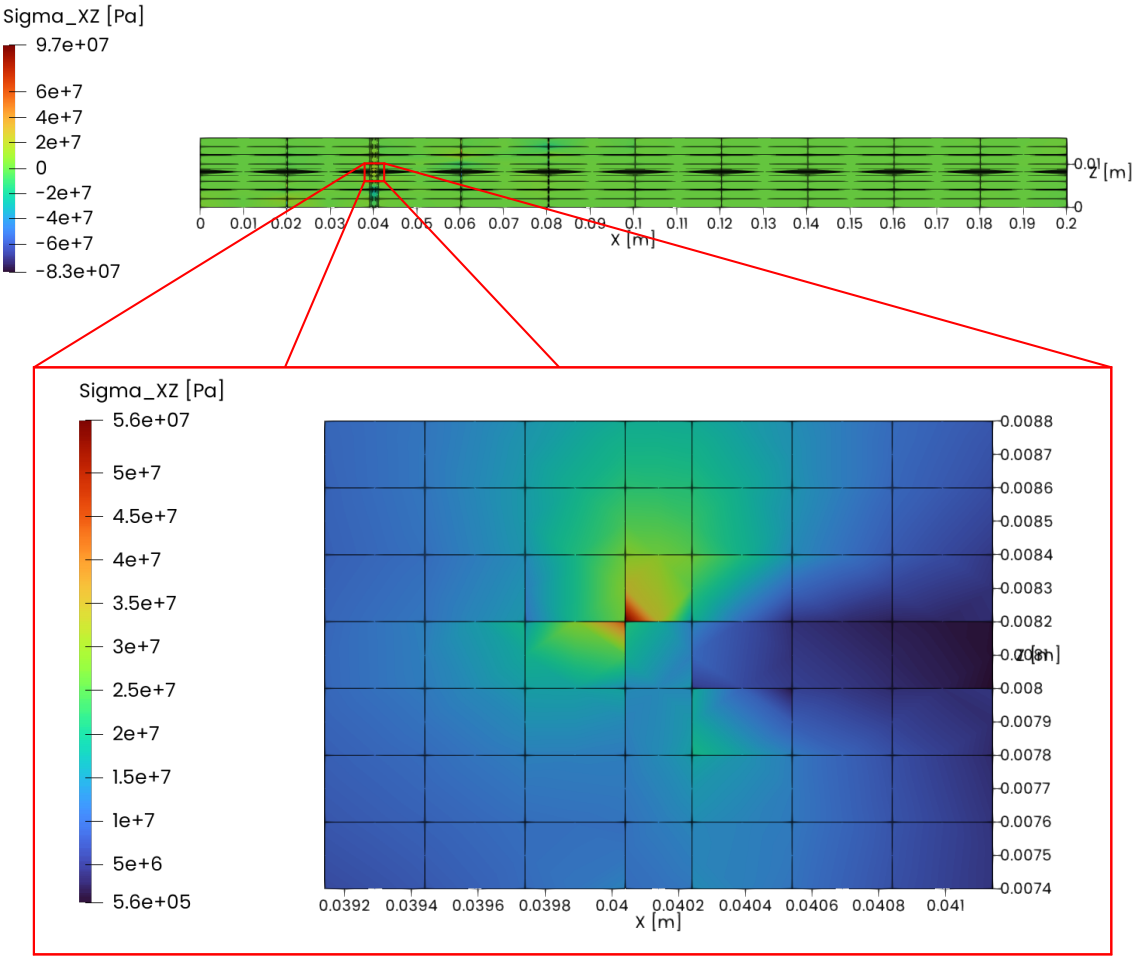


Figura 7.29: Dettaglio della tensione σ_{xz}

7.1.3 Riparazione inclinata

Il tipo di riparazione analizzato successivamente è quello con taglio inclinato, come in figura 7.30, al fine di diminuire gli spigoli ma allo stesso tempo aumentare la superficie di contatto.

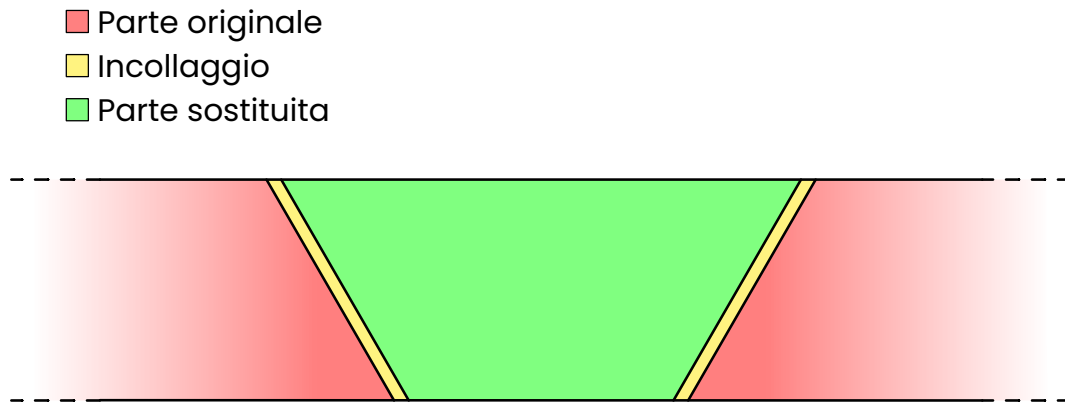


Figura 7.30: Riparazione passante inclinata

Il modello realizzato è raffigurato in figura 7.31 e le sue dimensioni sono riportate in tabella 7.7.

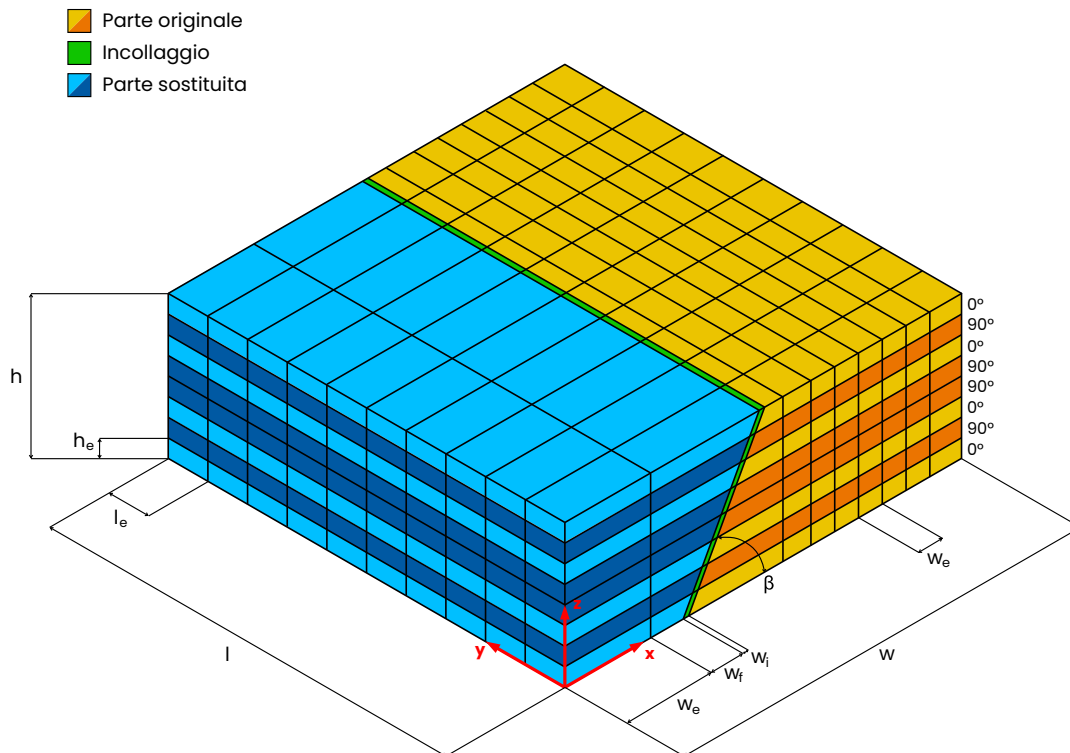


Figura 7.31: Modello della piastra con riparazione passante inclinata in assonometria isometrica

h [cm]	1.6
h_e [cm]	0.2
l [cm]	20
l_e [cm]	2
w [cm]	20
w_e [cm]	2
w_f [cm]	1
w_i [cm]	0.02
β	30°

Tabella 7.7: Dimensioni del modello con riparazione passante inclinata

Risultati

Si riportano nelle figure da 7.32 a 7.34 i campi di spostamento, rispettivamente in direzione x , z e in modulo con una deformata avente fattore di scala 20:1. Si evidenzia che lo spostamento in direzione x è molto basso in tutta la piastra e aumenta in prossimità dell'incollaggio. Lo spostamento in z è concentrato nella parte curata dove si ha un assottigliamento della struttura. Dalla deformata si osserva, come nel caso precedente una deflessione della parte non curata, indotta dalla riparazione. Questa risulta comunque meno pronunciata rispetto al caso di riparazione passante a scalini. In figura 7.35 è riportato lo spostamento in direzione z lungo il tratto 3.

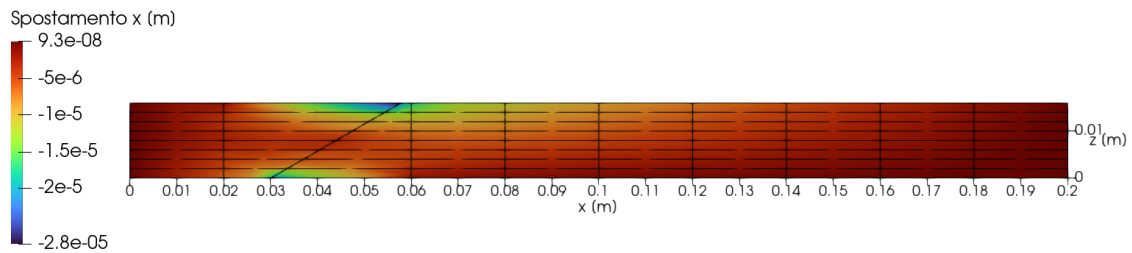


Figura 7.32: Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione passante inclinata

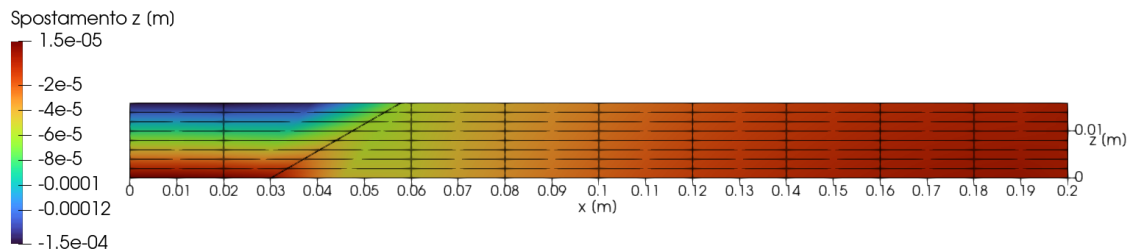


Figura 7.33: Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione passante inclinata

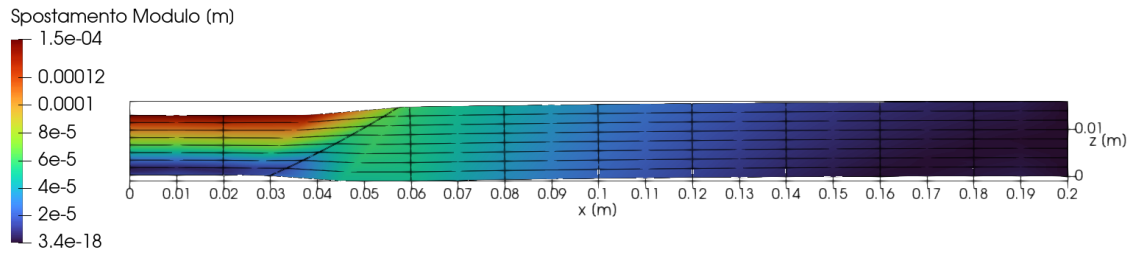


Figura 7.34: Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione passante inclinata

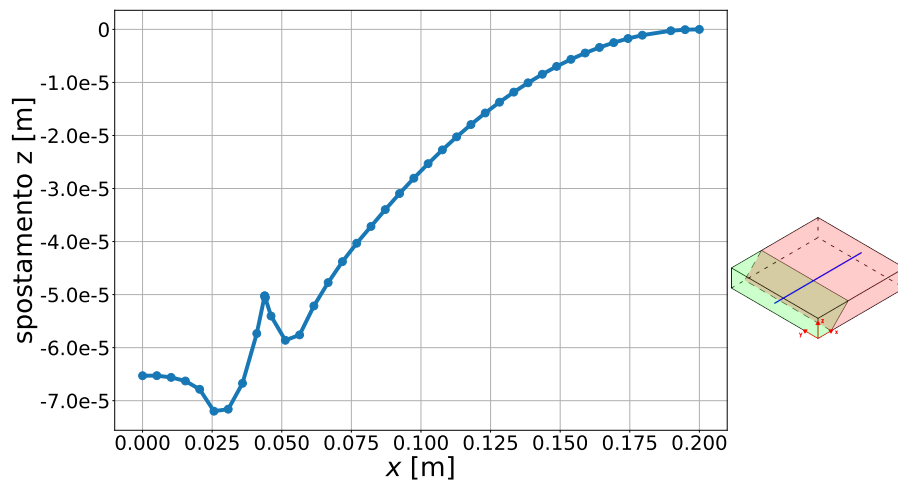


Figura 7.35: Spostamento in direzione z lungo il tratto 3

Tratto 1

In figura 7.36 sono riportati gli andamenti delle deformazioni lungo il tratto 1, in particolare ε_{xx} in figura 7.36a, ε_{zz} in figura 7.36b, ε_{xz} in figura 7.36c. Queste risultano aver maggior intensità in direzione z , si ha infatti un assottigliamento della parte sostituita dovuto alla cura.

Dall'andamento delle tensioni riportato in figura 7.37 si evince che le tensioni di maggiore intensità sono quelle in direzione x e y . Le prime, negli strati con le fibre orientate lungo y risultano anche negative ma vanno a diminuire negli strati superiori, dove la porzione di piastra sostituita è maggiore. Quelle in direzione y risultano costanti, a meno dell'orientamento delle fibre. Le tensioni σ_{zz} e σ_{xz} risultano trascurabili rispetto le altre.

Nella tabella 7.8 sono riportate le tensioni massime in valore assoluto lungo il tratto 1 per la piastra con riparazione passante obliqua.

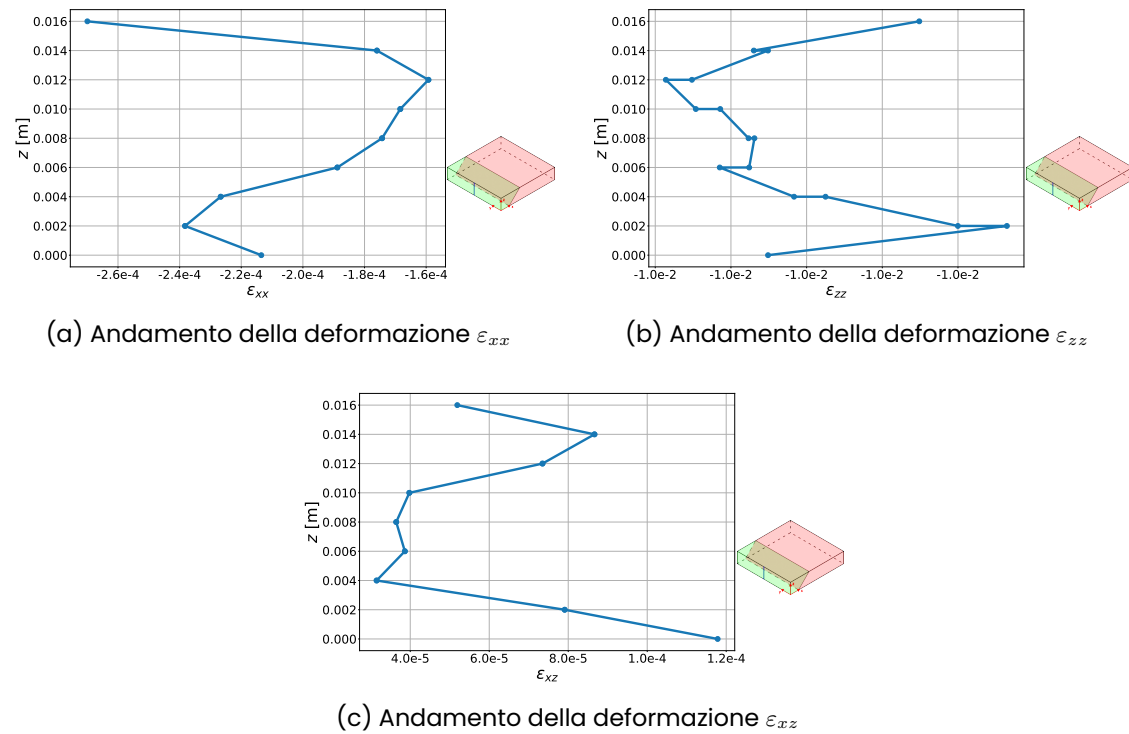
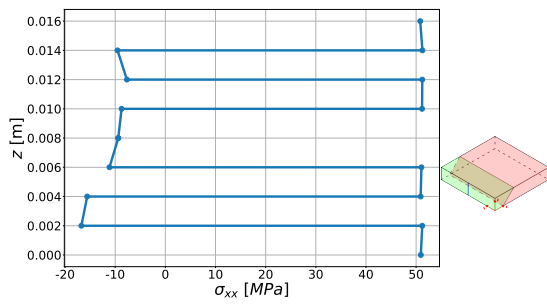


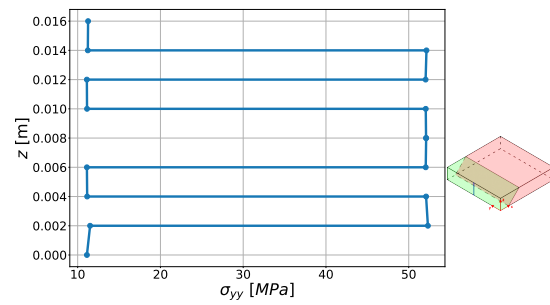
Figura 7.36: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante inclinata

σ_{xx}	55.81
σ_{yy}	54.94
σ_{zz}	9.166
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	2.395
σ_{yz}	~ 0

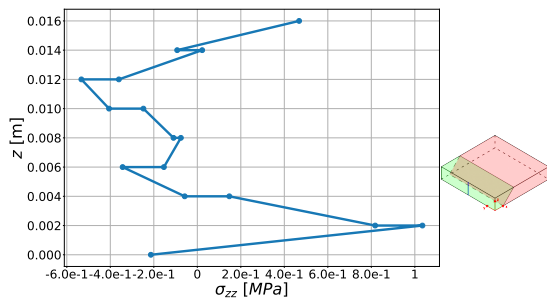
Tabella 7.8: Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante obliqua [MPa]



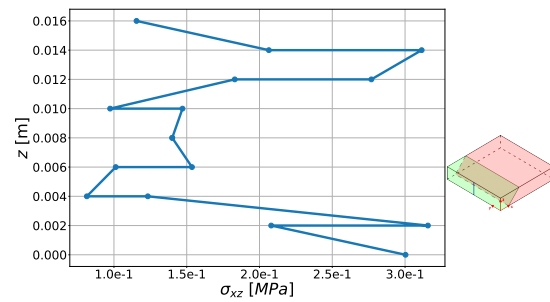
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}

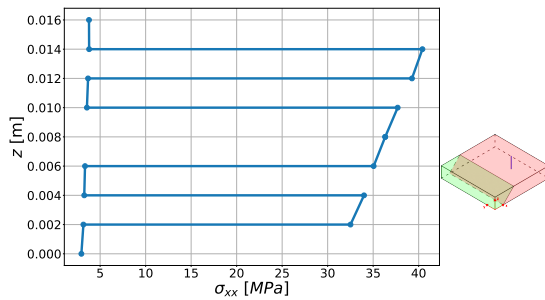


(d) Andamento della tensione σ_{xz}

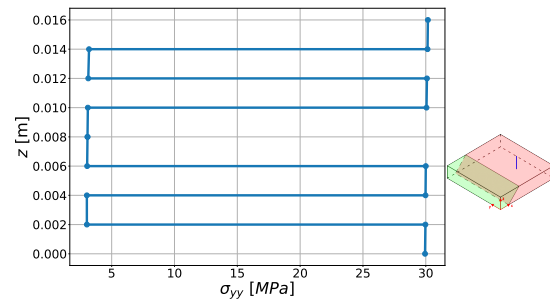
Figura 7.37: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante inclinata

Tratto 2

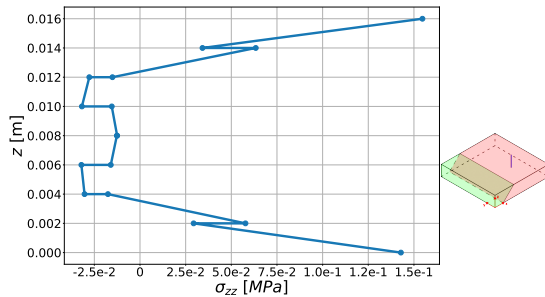
Si riporta in figura 7.38 l'andamento delle tensioni lungo il tratto 2. Si osserva che le σ_{xx} (figura 7.38a) e le σ_{yy} (figura 7.38b) sono quelle di maggiore intensità. In questo caso sono sempre positive quindi a trazione. Le tensioni in direzione x aumentano negli strati superiori per gli strati con le fibre posate in direzione y , mentre risultano circa costanti e con bassa intensità negli strati con le fibre in direzione x . Le σ_{zz} e le σ_{xz} generate dalla riparazione nel materiale non sostituito, risultano avere intensità minore ed essere quindi trascurabili.



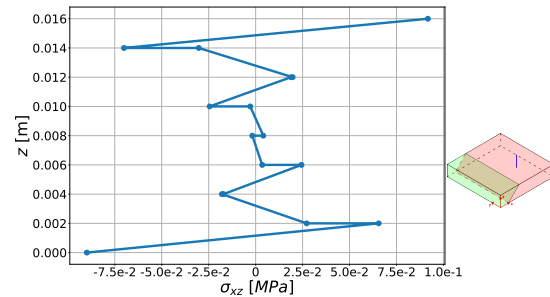
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.38: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante inclinata

Tratto 3

Si riportano ora gli andamenti delle deformazioni e delle tensioni principali lungo il tratto 3 nelle figure 7.39 e 7.40. Si osservano in genere deformazioni quasi nulle in tutti i grafici riportati, tranne per quanto riguarda quelle in direzione z nella parte curata. Sono inoltre presenti dei picchi in prossimità dell'incollaggio.

Per quanto riguarda le tensioni si osserva che la tensione σ_{xx} (figura 7.40a) è negativa nella parte curata (si ricorda che le fibre lungo il tratto 3 sono orientate in direzione y) e molto positiva nella parte originale. L'inverso avviene per la tensione in direzione y (figura 7.40b). Le tensioni σ_{zz} e σ_{xz} (figure 7.40c e 7.40d) sono nulle lungo tutto il tratto 3 tranne per dei picchi di notevole intensità in prossimità dell'incollaggio.

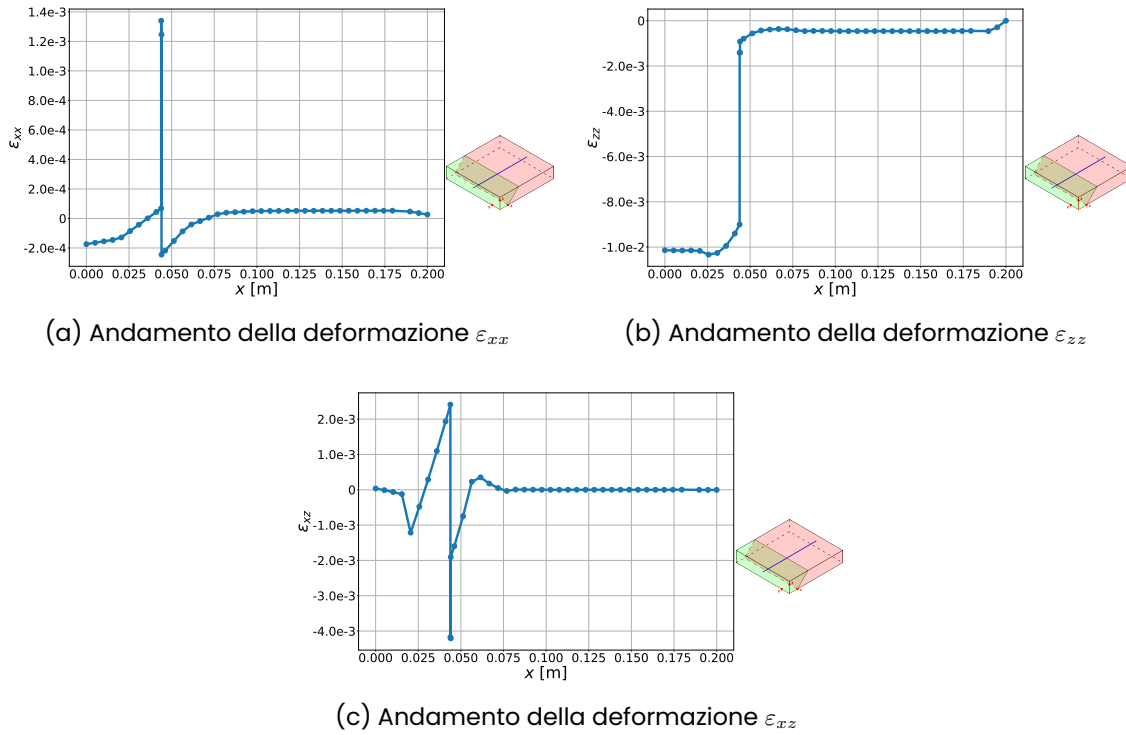


Figura 7.39: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante inclinata

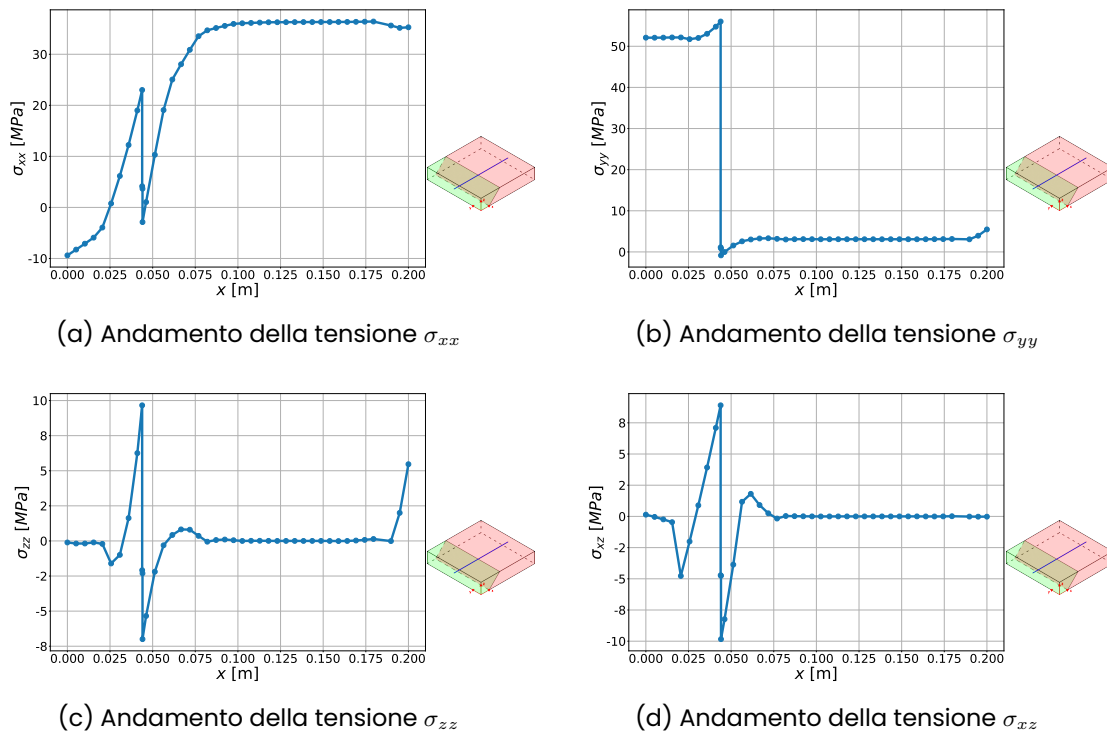


Figura 7.40: Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione passante inclinata

7.1.4 Riparazione con patch

In questo caso si analizza una piastra con una riparazione passante dritta con una patch per lato per dare rinforzo, come quella rappresentata in figura 7.41.

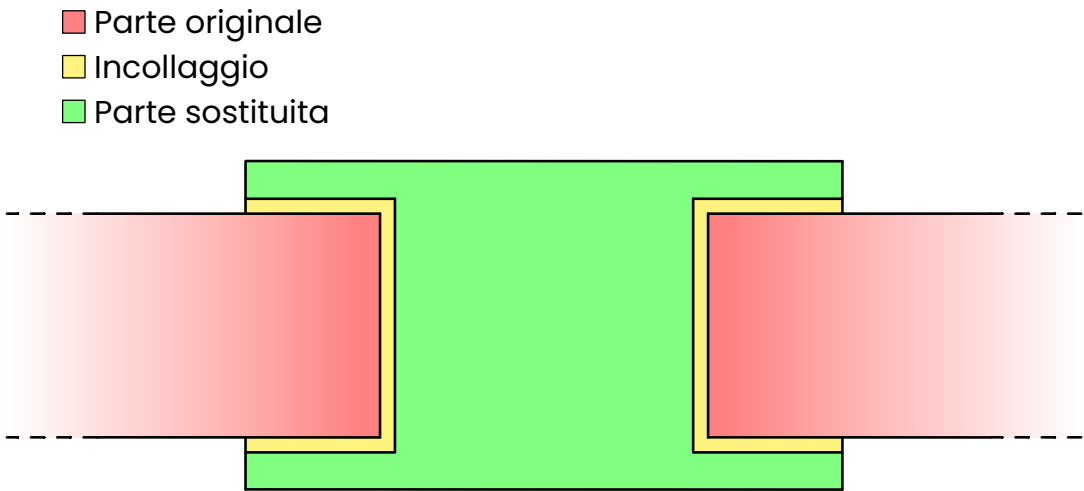


Figura 7.41: Riparazione passante patch con patch

Il modello analizzato è riportato in figura 7.42 e le sue dimensioni in tabella 7.9

h	2
h_e	0.2
h_i	0.02
h_s	0.18
l	20
l_e	2
w	20
w_e	2
w_i	0.02
w_s	1.98
w_o	2

Tabella 7.9: Dimensioni del modello con riparazione passante patch con patch [cm]

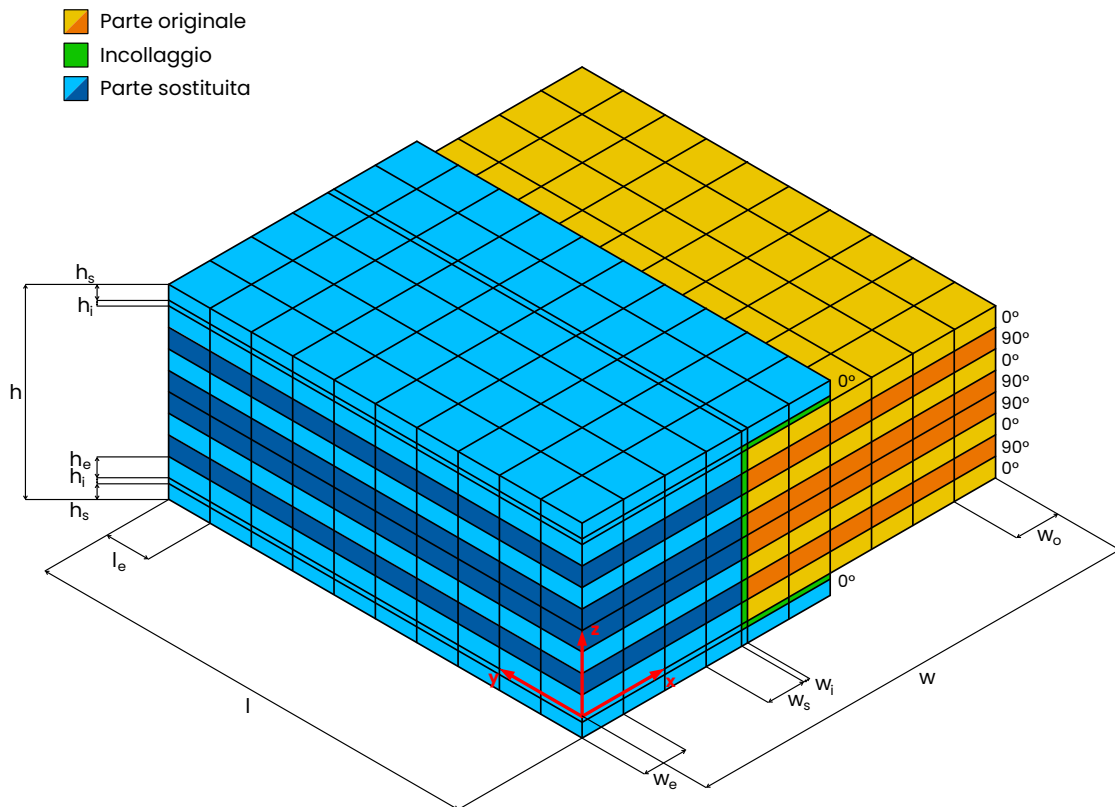


Figura 7.42: Modello della piastra con riparazione passante patch con patch in assonometria isometrica

Risultati

Nelle figure da 7.43 a 7.45 sono riportati i campi di spostamento della piastra. Si osservano spostamenti principalmente in direzione z con un assottigliamento della parte curata. Essendo la riparazione simmetrica rispetto al piano di mezzeria non si hanno deflessioni della parte originale.

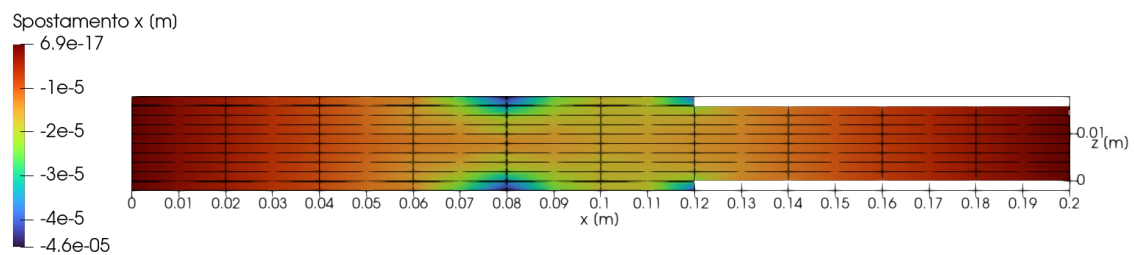


Figura 7.43: Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione passante patch con patch

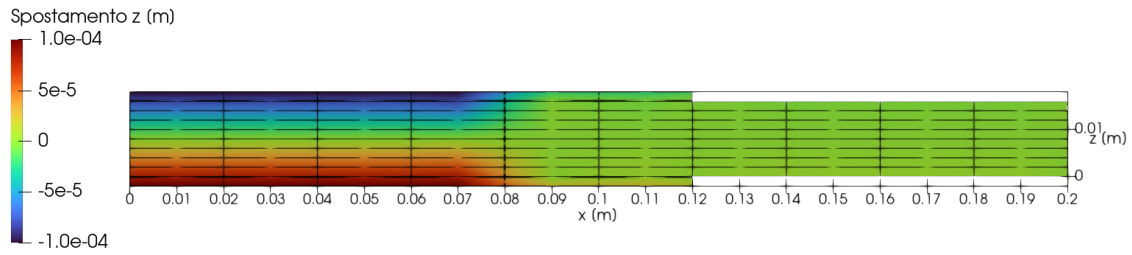


Figura 7.44: Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione passante patch con patch

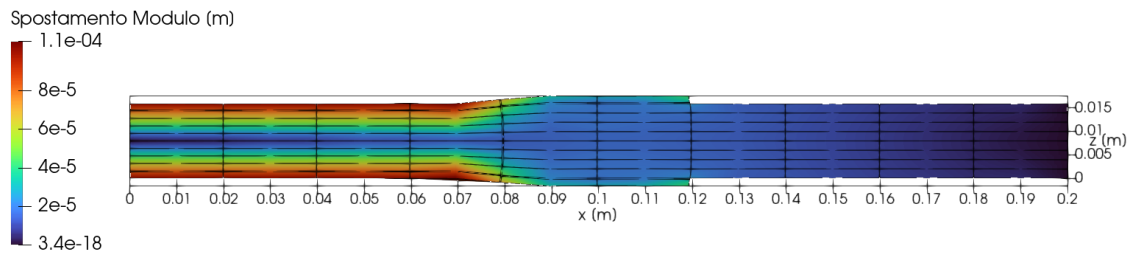


Figura 7.45: Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione passante patch con patch

Tratto 1

Gli andamenti delle deformazioni principali lungo il tratto 1 sono riportati nella figura 7.46. Si osserva che il comportamento della deformazione ε_{xx} (figura 7.46a) e della ε_{zz} (figura 7.46b) sono simmetrici rispetto al piano di mezzeria. Le deformazioni ε_{xz} (figura 7.46c) risultano molto piccole e con una simmetria centrale. In figura 7.47 sono riportati gli andamenti delle tensioni lungo il tratto 1. Si nota che la tensione σ_{xx} (figura 7.47a), negli strati con le fibre orientate in direzione y è molto negativa a indicare una compressione. Inoltre la differenza di tensione tra uno strato e l'altro è molto elevato, il che potrebbe portare a delaminazione. Le tensioni σ_{zz} (figura 7.47c) e le σ_{xz} (figura 7.47d) sono di minore intensità.

In tabella 7.10 sono riportate le tensioni massime in valore assoluto lungo il tratto 1.

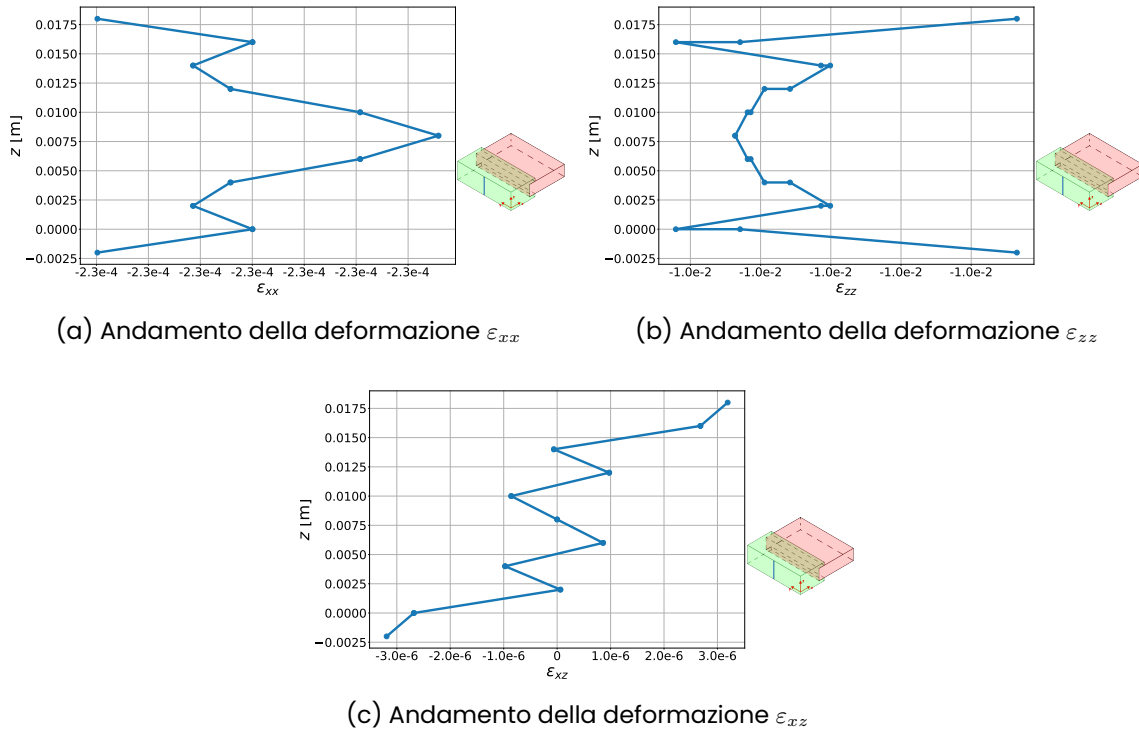


Figura 7.46: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch

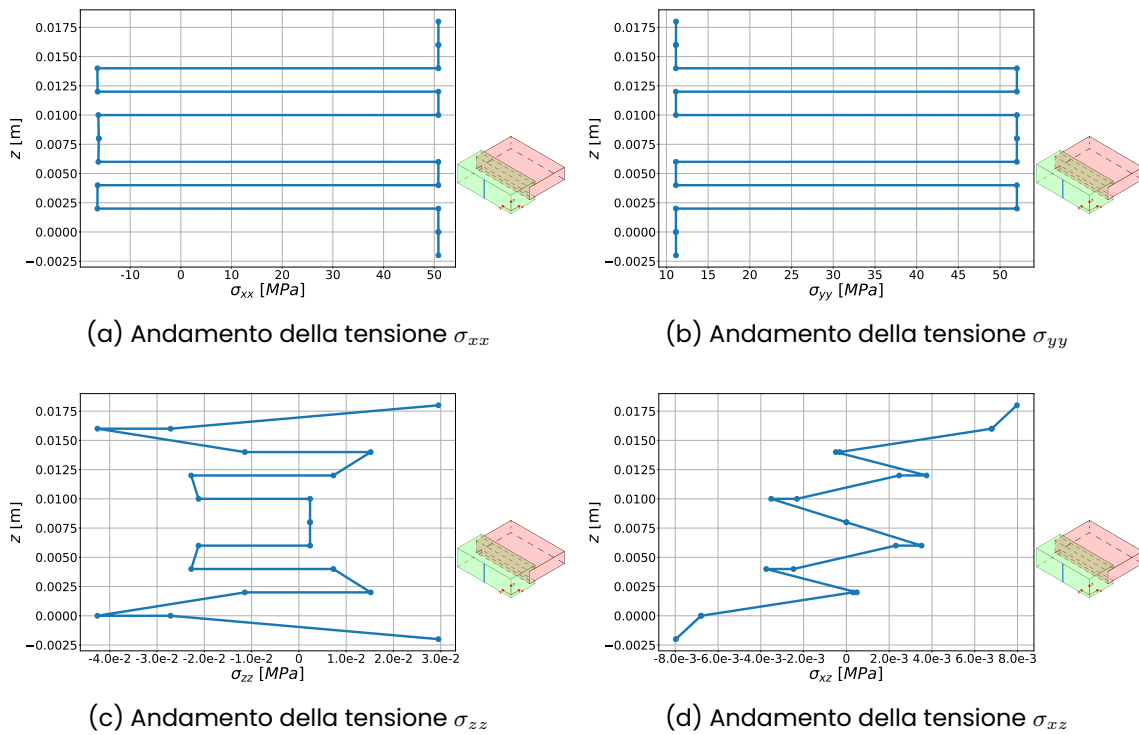


Figura 7.47: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch

σ_{xx}	50.83
σ_{yy}	52.02
σ_{zz}	0.0426
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	0.00797
σ_{yz}	~ 0

Tabella 7.10: Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch [MPa]

Tratto 2

In figura 7.48 è riportato l'andamento delle principali tensioni lungo il tratto 2. Si evidenziano tensioni σ_{xx} (figura 7.48a) e σ_{yy} (figura 7.48b) circa costanti lungo lo spessore della piastra, nella parte non sostituita, a meno dell'orientamento delle fibre. La σ_{zz} (figura 7.48c) e la σ_{xz} (figura 7.48d) sono trascurabili rispetto le due precedenti.

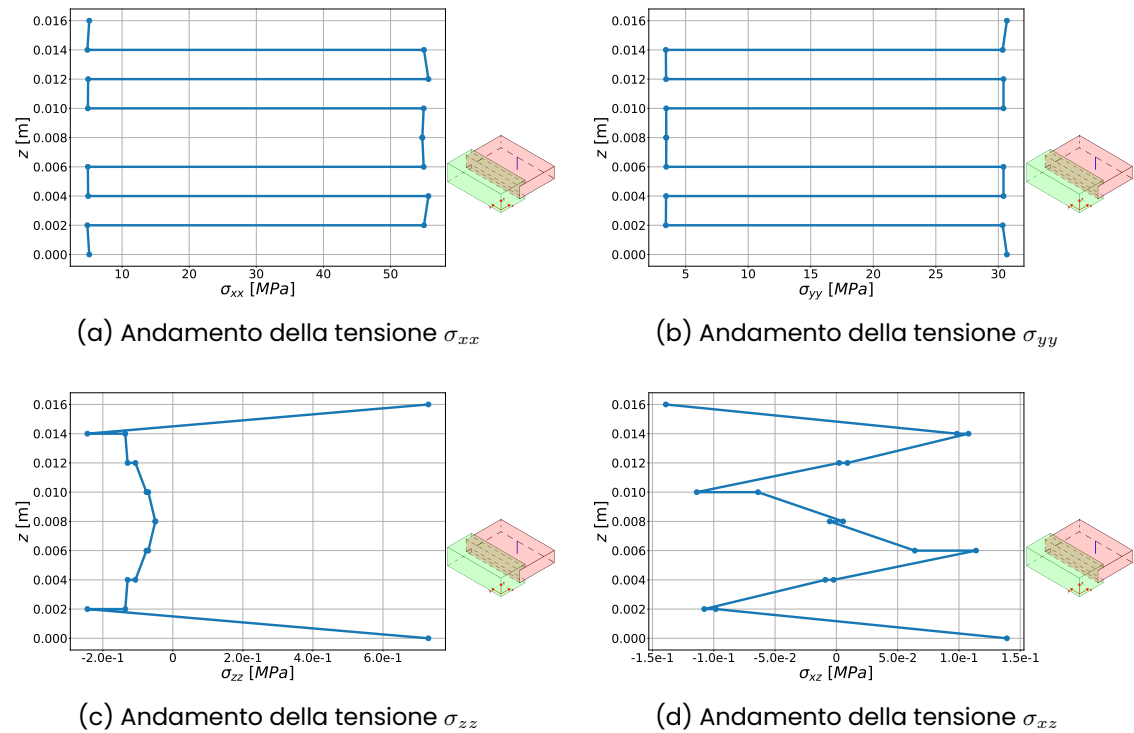
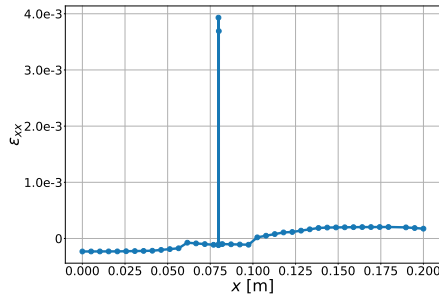


Figura 7.48: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch

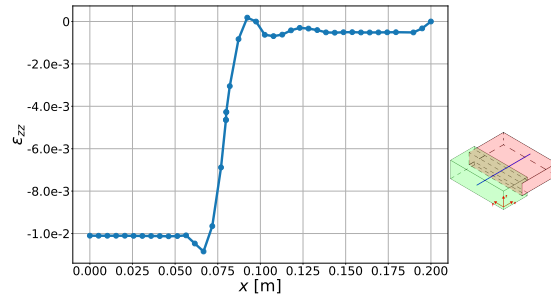
Tratto 3

In figura 7.49 sono raffigurati i grafici che rappresentano l'andamento delle deformazioni lungo il tratto 3. La ε_{xx} (figura 7.49a) è molto piccola, tranne che per un picco all'interno dell'incollaggio. Si osserva una deformazione in direzione z (figura 7.49b) nulla nella parte non curata e circa pari a -1×10^{-2} nella porzione di piastra sostituita.

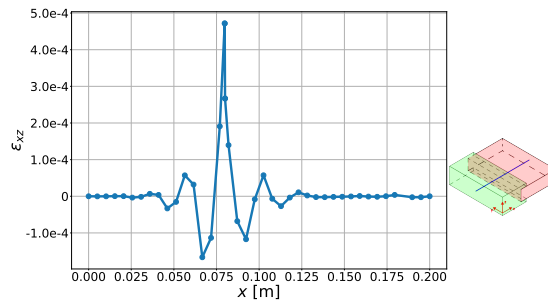
Il salto non avviene all'interno dell'incollaggio ma nel laminato adiacente ad esso. La deformazione ε_{xz} (figura 7.49c) è quasi nulla in tutto il tratto 3 escludendo un picco in corrispondenza dell'incollaggio. Si osservano dei fenomeni ondulatori probabilmente dovuti a una mesh troppo poco fitta.



(a) Andamento della deformazione ε_{xx}



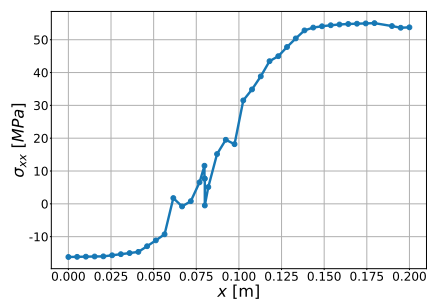
(b) Andamento della deformazione ε_{zz}



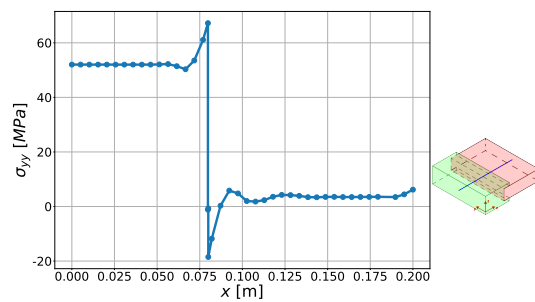
(c) Andamento della deformazione ε_{xz}

Figura 7.49: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch

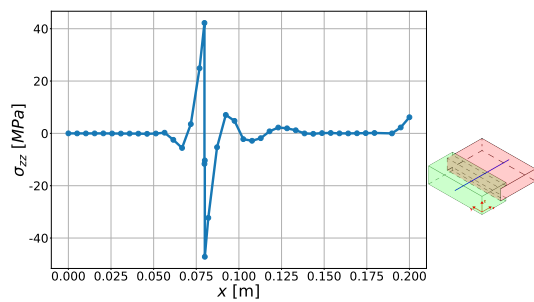
In figura 7.50 sono riportati gli andamenti delle tensioni lungo il tratto 3. Si osserva un passaggio graduale tra la parte sostituita e la parte originale per quanto riguarda la σ_{xx} (figura 7.50a). Lo stesso non si può dire per la σ_{yy} (figura 7.50b) dove si ha un gradino nel passaggio tra la parte curata e quella non sostituita. Le tensioni σ_{zz} (figura 7.50c) e σ_{xz} (figura 7.50d) sono circa nulle lungo tutto il tratto 3, tranne per dei picchi all'interno dell'incollaggio. Si osservano anche fenomeni ondulatori causati da una mesh probabilmente troppo rada.



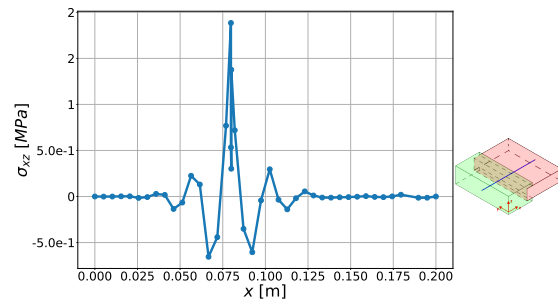
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.50: Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione passante dritta con patch

7.1.5 Confronto

In questa sezione si mettono a confronto i risultati precedentemente ottenuti per le riparazioni passanti. Per prima cosa si analizza lo spostamento in direzione z dei punti lungo il tratto 3, questo è riportato in figura 7.51. Si osserva innanzitutto che le riparazioni con geometria dritta, con e senza patch, sono simmetriche e di conseguenza non generano spostamenti in direzione z lungo il tratto 3. Si nota inoltre che la riparazione a scalini genera degli spostamenti maggiori nella parte riparata che hanno intensità doppia rispetto alla riparazione obliqua.

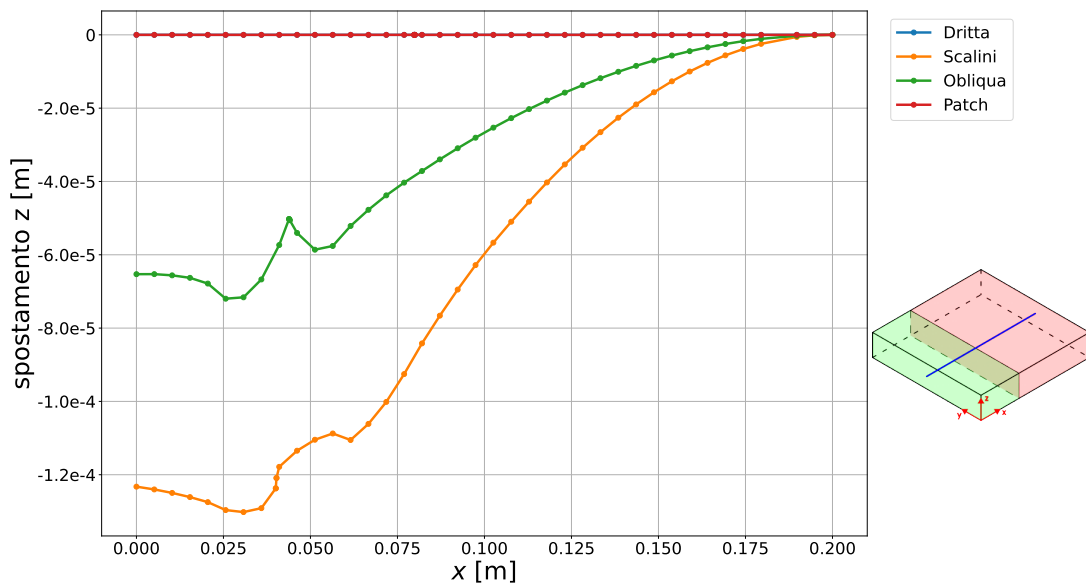


Figura 7.51: Spostamento in direzione z lungo il tratto 3

Tratto 1

In figura 7.52 si riporta il confronto tra gli andamenti delle tensioni σ_{xx} . Si osserva che la riparazione che genera meno tensioni all'interno della parte sostituita è quella dritta, mentre quella con le patch è quella che genera tensioni più alte.

Gli andamenti delle σ_{yy} , riportati in figura 7.53, sono equivalenti nei diversi modelli analizzati.

Anche le σ_{zz} (figura 7.54) hanno andamenti simili tranne che per la riparazione passante a scalini che presenta delle tensioni più elevate nella metà inferiore della piastra. Lo stesso si può dire per le σ_{xz} riportate in figura 7.55.

In tabella 7.11 si riportano i valori massimi di tensione, in valore assoluto, per le tensioni misurate lungo il tratto 1 con i diversi tipi di riparazione a confronto.

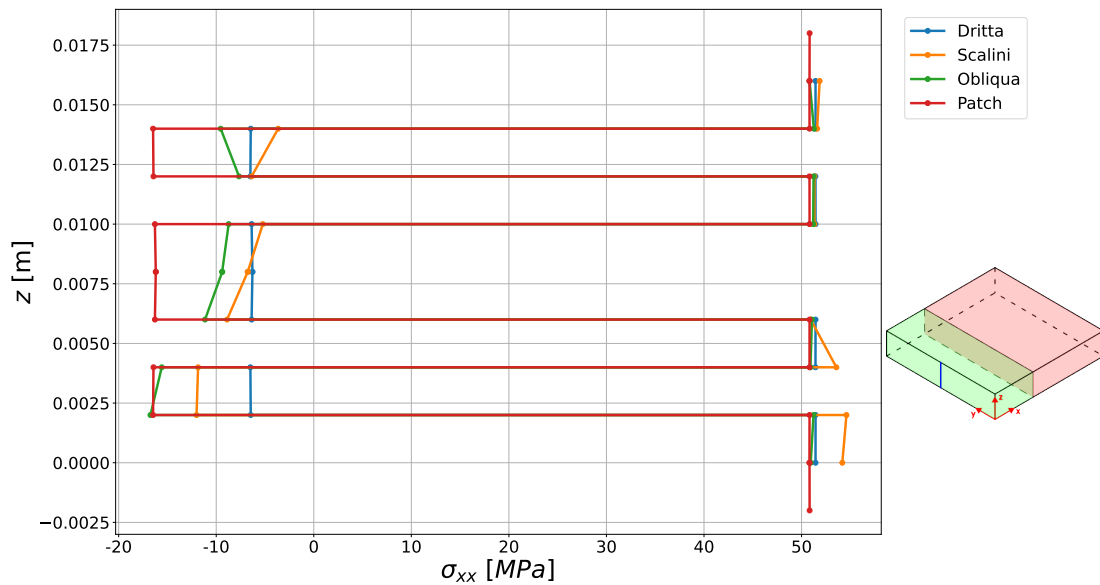


Figura 7.52: Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

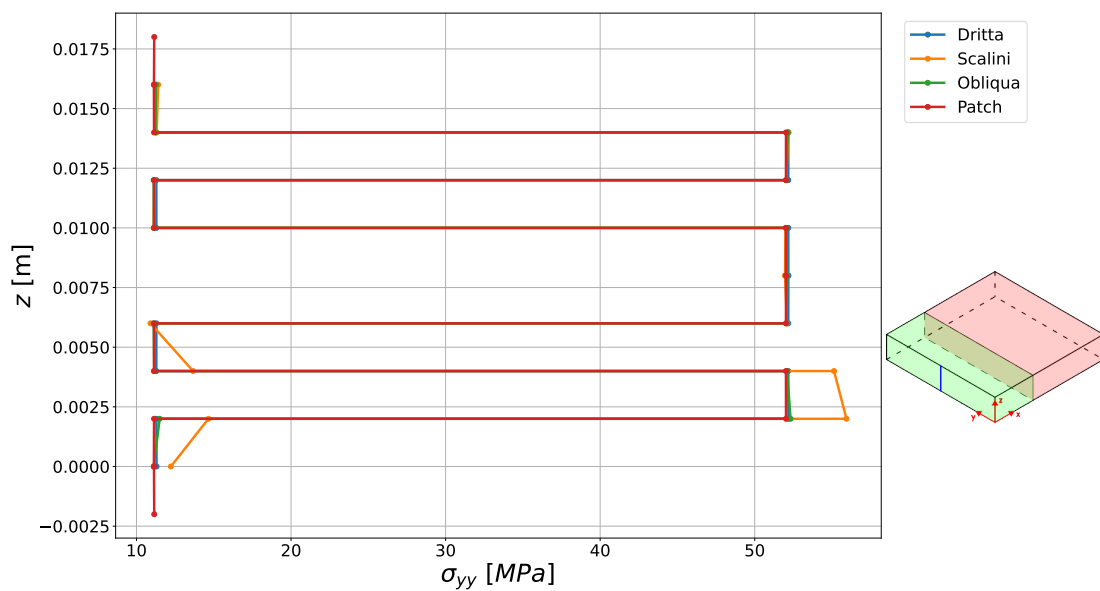


Figura 7.53: Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

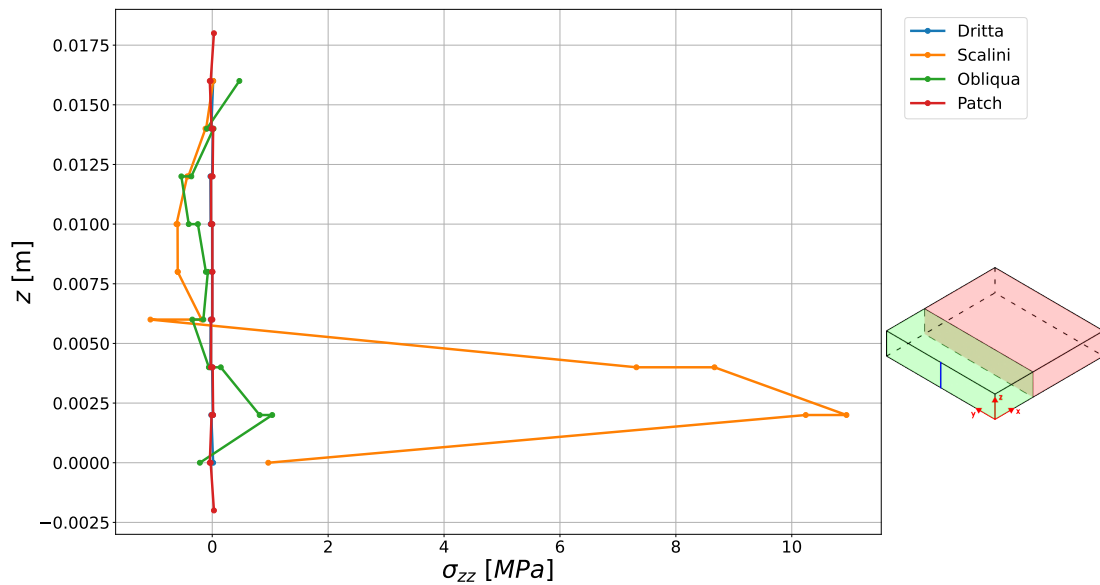


Figura 7.54: Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

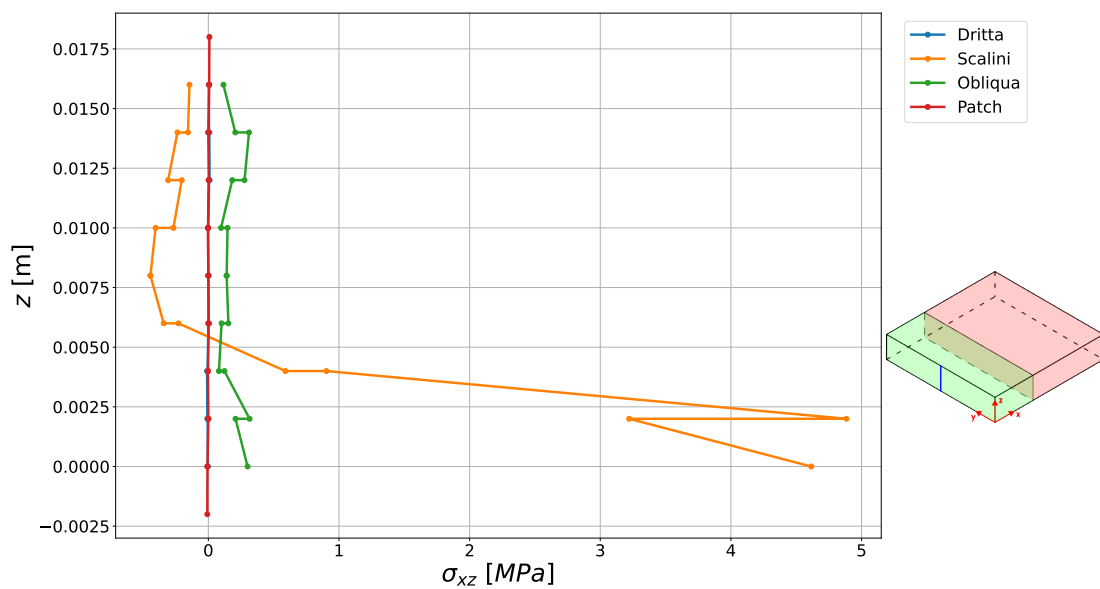


Figura 7.55: Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

	Riferimento	Dritta	Scalini	Inclinata	Patch
σ_{xx} [MPa]	61.88	51.44	54.56	55.81	50.83
σ_{yy} [MPa]	61.89	52.18	55.90	54.94	52.02
σ_{zz} [MPa]	0.392	0.0313	10.86	9.166	0.0426
σ_{xy} [MPa]	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0
σ_{xz} [MPa]	~ 0	0.009 43	4.861	2.395	0.007 97
σ_{yz} [MPa]	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0

Tabella 7.11: Confronto delle tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante

Tratto 2

Si confrontano ora i risultati ottenuti lungo il tratto 2, cioè all'interno del materiale non curato.

Dalla figura 7.56 si evince che la riparazione che genera tensioni σ_{xx} più basse nella parte non sostituita è la riparazione a scalini seguita da quella obliqua. La riparazione dritta con patch è quella che genera tensioni maggiori.

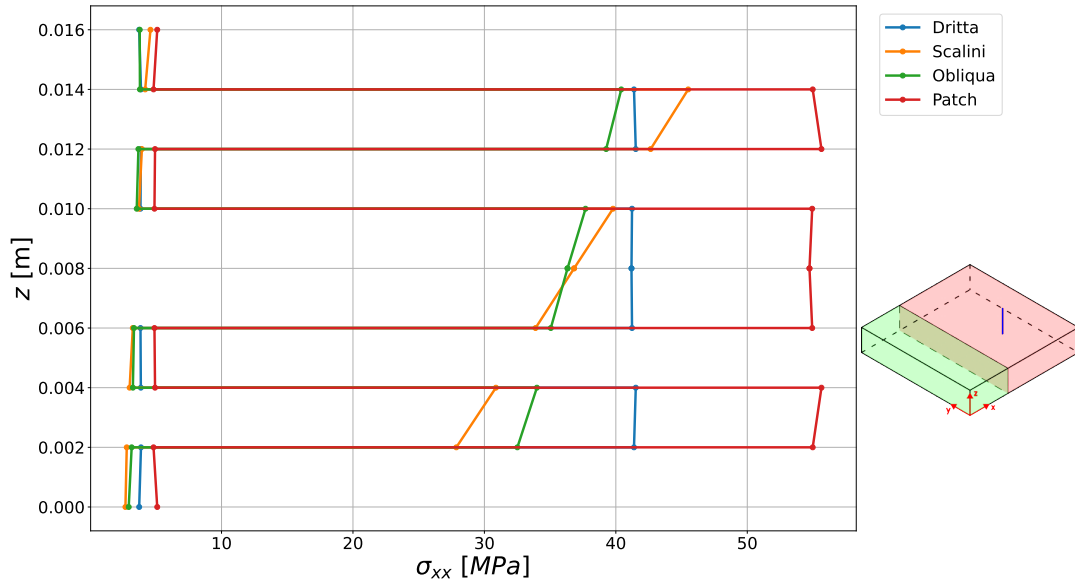


Figura 7.56: Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

Le σ_{yy} (figura 7.57) si equivalgono per i vari modelli analizzati.

Anche le σ_{zz} (figura 7.58) e le σ_{xz} (figura 7.59) si equivalgono per le diverse riparazioni. Solo la riparazione dritta con patch genera tensioni leggermente più alte.

Tratto 3

Si riportano ora a confronto i risultati di tensione ottenuti lungo il tratto 3.

Dalla figura 7.60 si osserva che le riparazioni a scalini e oblique generano le tensioni meno distanti in modulo tra la parte riparata e quella originale, tuttavia la riparazione a scalini fa sì che si crei un salto molto ampio (il più ampio) in corrispondenza dell'incollaggio. La riparazione dritta con patch è quella che genera la differenza di tensione maggiore tra la parte sostituita e quella non.

Le tensioni σ_{yy} , riportate in figura 7.61 si equivalgono abbastanza a meno della posizione dell'incollaggio.

Le σ_{zz} (figura 7.62) sono tutte molto basse, tranne che per dei picchi riscontrati in prossimità dell'incollaggio. Si nota che nella riparazione dritta, in quella a scalini e in quella dritta con patch i picchi raggiungono i 40 MPa e il dislivello supera gli 80 MPa. La riparazione obliqua invece ha un picco che raggiunge solo i 10 MPa.

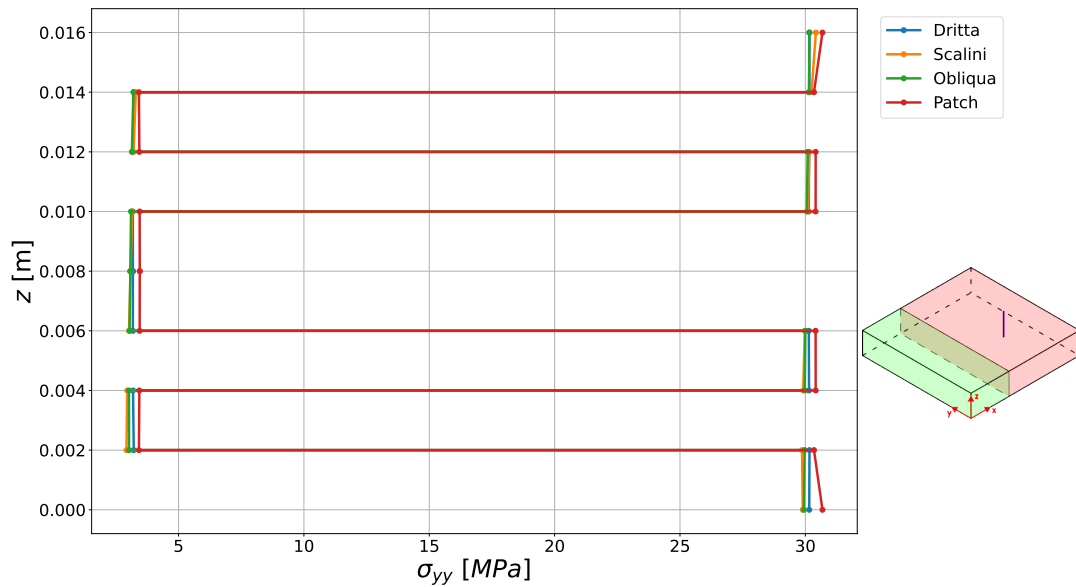


Figura 7.57: Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

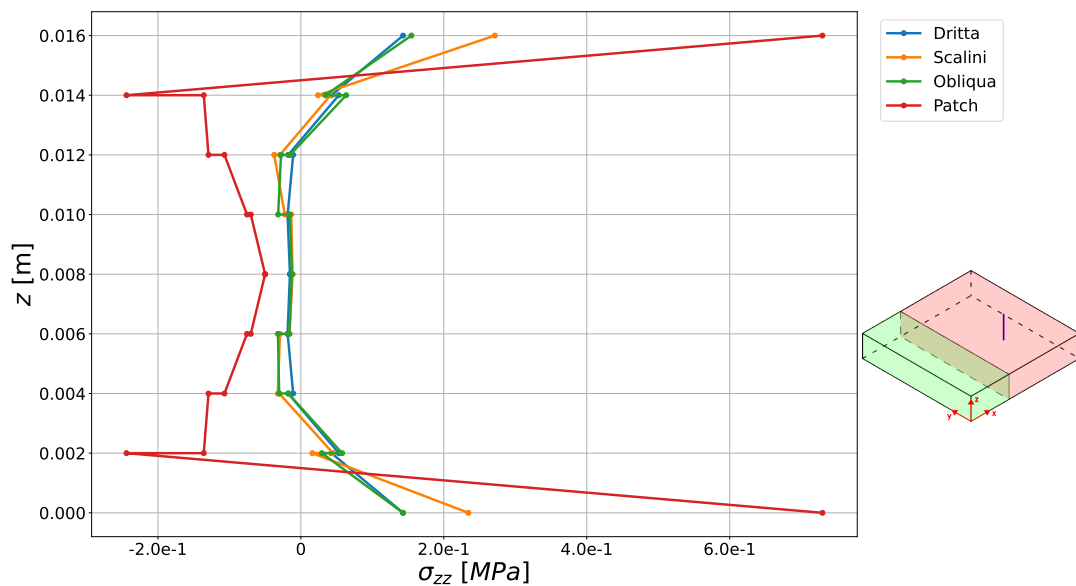


Figura 7.58: Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

Per quanto riguarda le σ_{xz} riportate in figura 7.63 si nota che le riparazioni dritte e quelle dritte con patch hanno picchi molto bassi in confronto a quella a scalini e a quella obliqua.

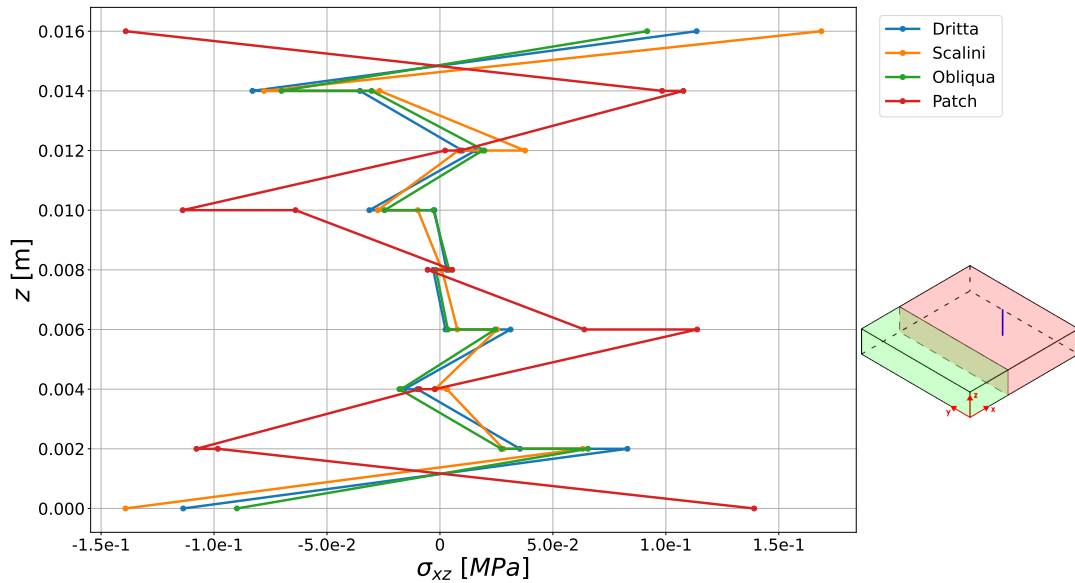


Figura 7.59: Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

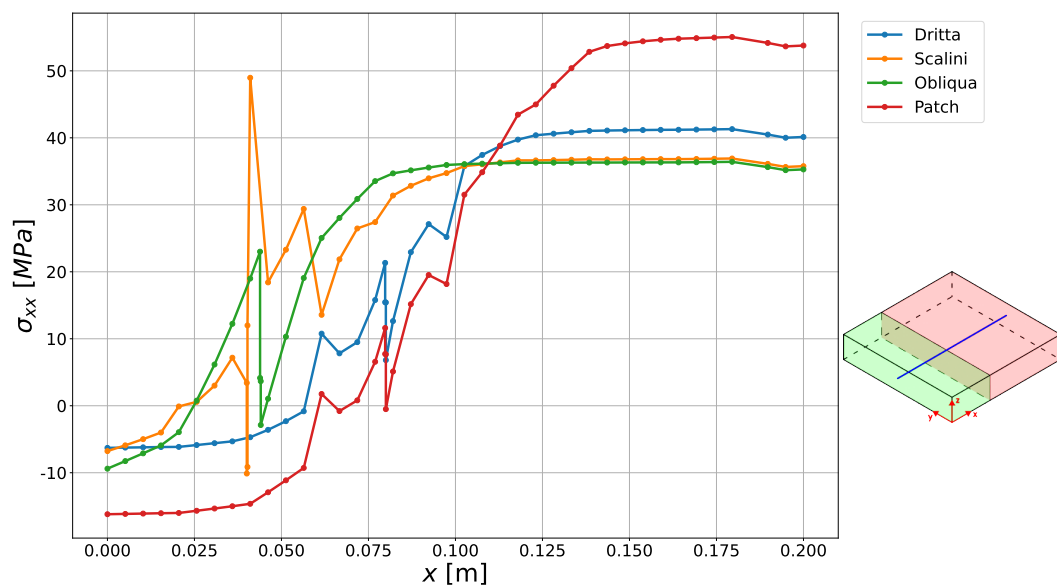


Figura 7.60: Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

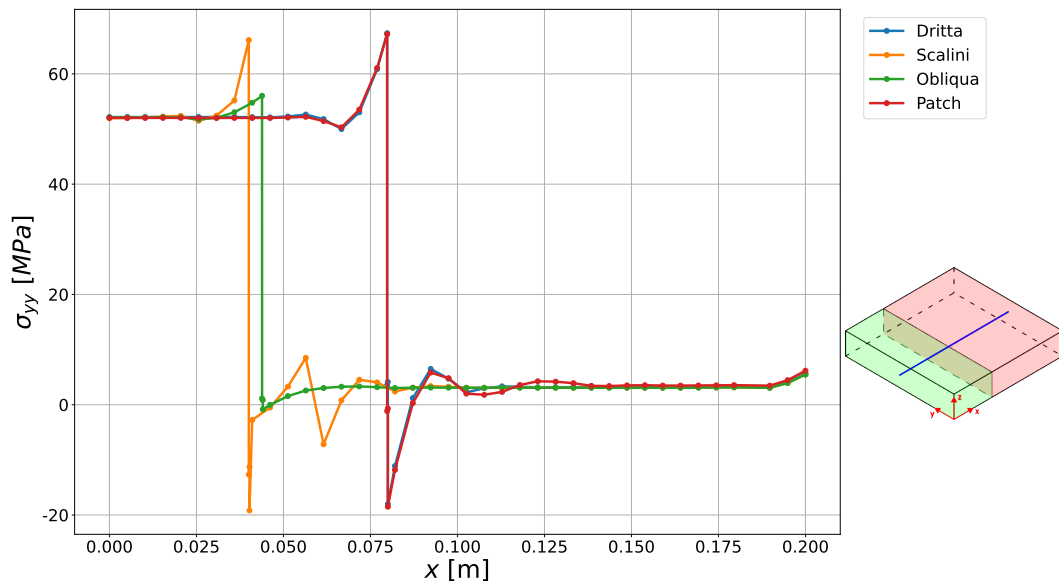


Figura 7.61: Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

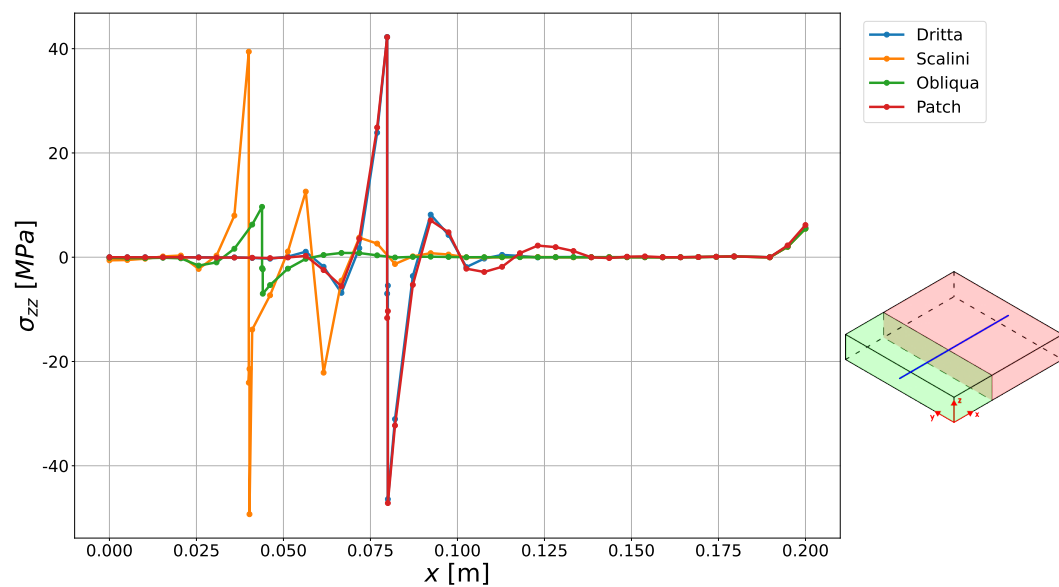


Figura 7.62: Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

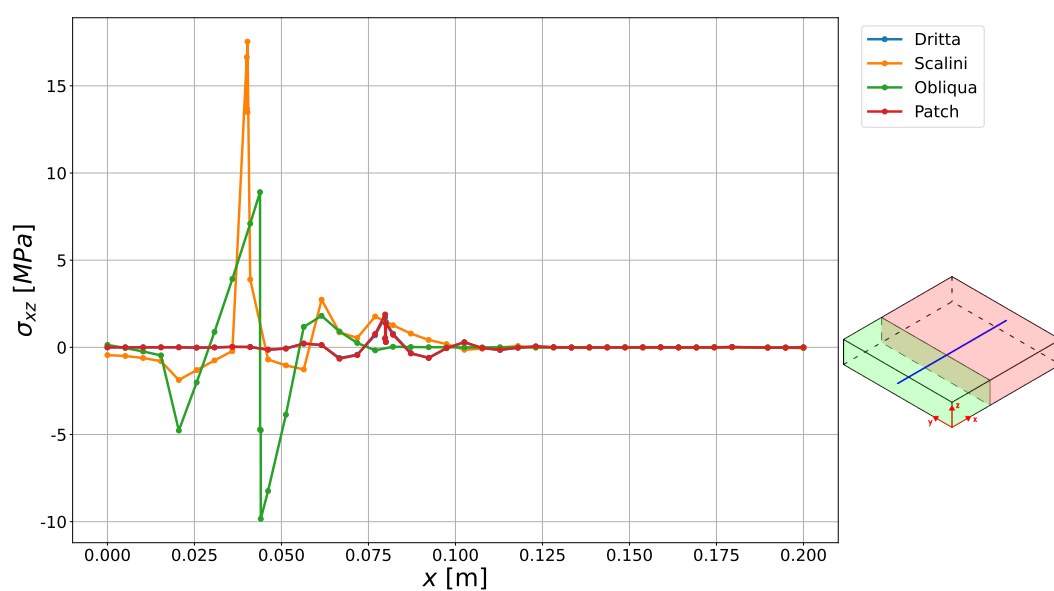


Figura 7.63: Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ delle piastre con riparazione passante a confronto

7.2 Riparazione superficiale

In questa sezione vengono analizzate diverse geometrie di riparazione, con la differenza rispetto alla sezione precedente che questa volta la sostituzione di materiale non avviene in tutti gli strati ma solo in quelli superficiali. La tecnica è la stessa rispetto al caso precedente, ovvero si va a curare solo una parte del componente, mentre alla restante parte vengono assegnate le proprietà fisse nel tempo prese dall'analisi della piastra di riferimento al termine del ciclo di cura che sono riportate nella tabella 6.2. Tra gli strati sostituiti e quelli originali è sempre presente uno strato di adesivo costituito da un materiale isotropo le cui proprietà sono riportate nella tabella 7.1. Il ciclo di cura utilizzato è lo stesso utilizzato nei casi precedenti ed è riportato in figura 7.1 e di conseguenza le proprietà del materiale finale sono riportate in tabella 7.2.

Nelle analisi sono stati graficati gli andamenti delle deformazioni e delle tensioni lungo tre tratti, riportati in figura 7.64. Più precisamente il tratto 1 è lungo l'asse z alle coordinate $(0, 0.1, z)$, il tratto 2 è lungo l'asse z alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ e il tratto 3 è lungo l'asse x alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$.

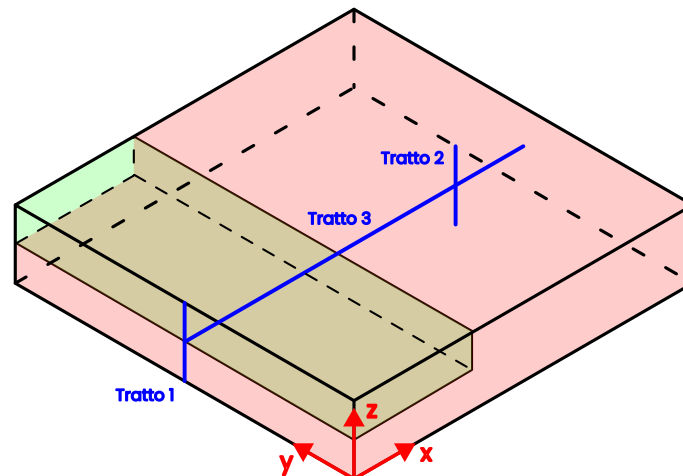


Figura 7.64: Tratti lungo i quali vengono graficate le deformazioni e le tensioni

7.2.1 Riparazione dritta

La prima geometria analizzata è il caso di una riparazione superficiale dritta. Questa ha la forma rappresentata in figura 7.65.

Il modello è riportato in figura 7.66, le cui dimensioni sono riportate in tabella 7.12.

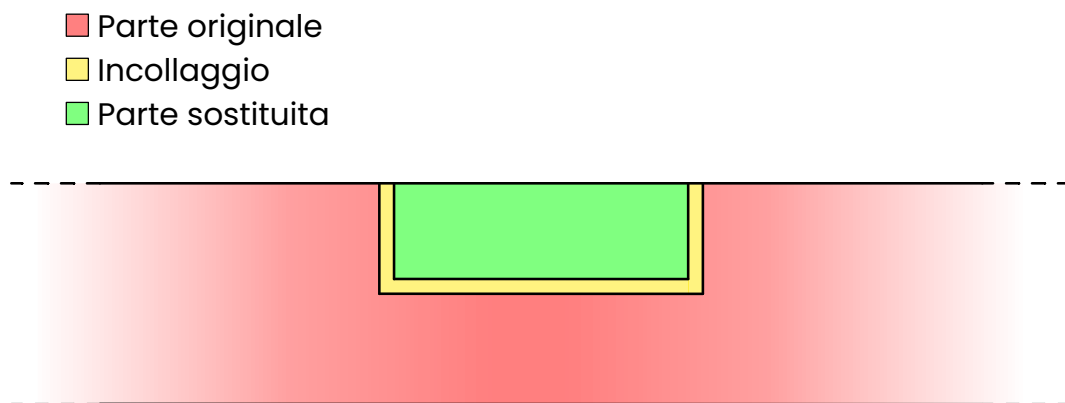


Figura 7.65: Riparazione superficiale dritta

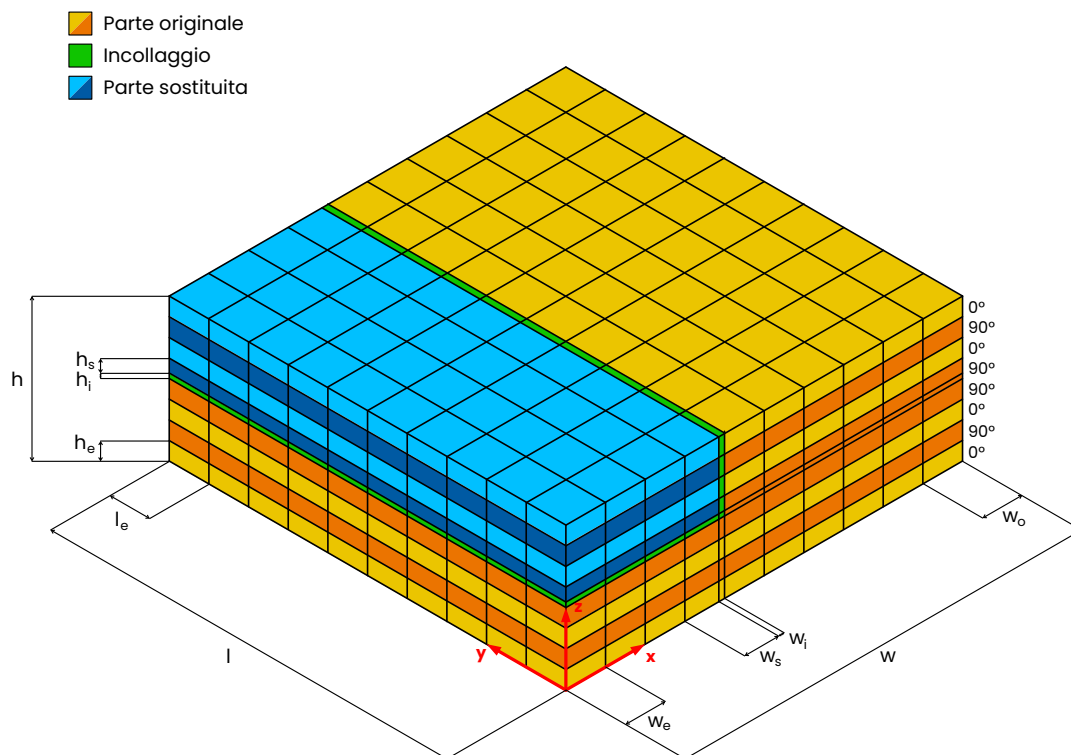


Figura 7.66: Modello della piastra con riparazione superficiale dritta in assonometria isometrica

h	1.6
h_e	0.2
h_i	0.02
h_s	0.18
l	20
l_e	2
w	20
w_e	2
w_s	1.98
w_i	0.02
w_o	2

Tabella 7.12: Dimensioni del modello con riparazione superficiale dritta [cm]

Risultati

Per prima cosa si riportano i campi di spostamento nelle varie direzioni della piastra al termine del ciclo di cura. Questi si possono osservare nelle figure da 7.67 a 7.69. Si nota una asimmetria degli spostamenti rispetto al piano di mezzeria tipica delle riparazioni superficiali. Questo comporta anche un incurvamento della porzione di piastra non curata. In figura 7.70 è riportato lo spostamento in direzione z lungo il tratto 3.

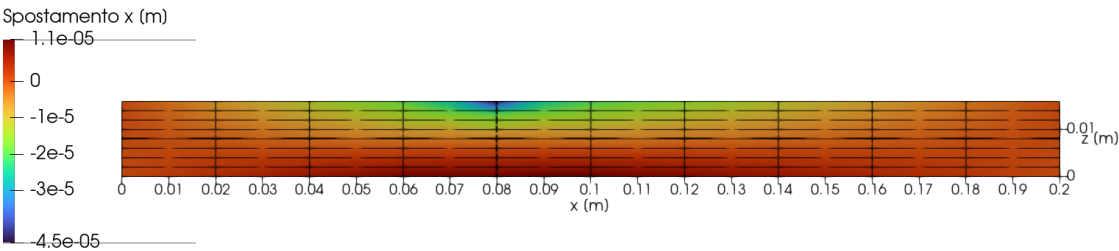


Figura 7.67: Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta

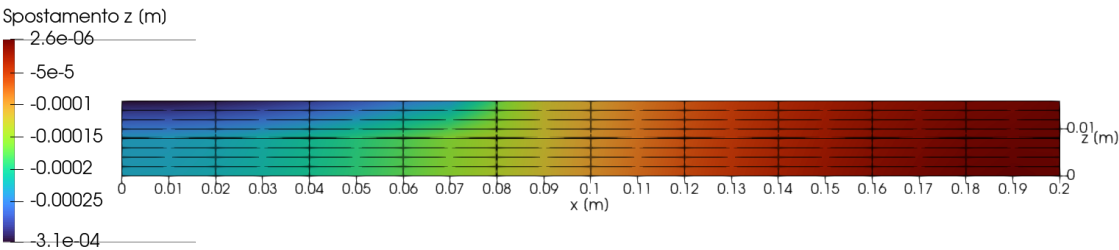


Figura 7.68: Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta

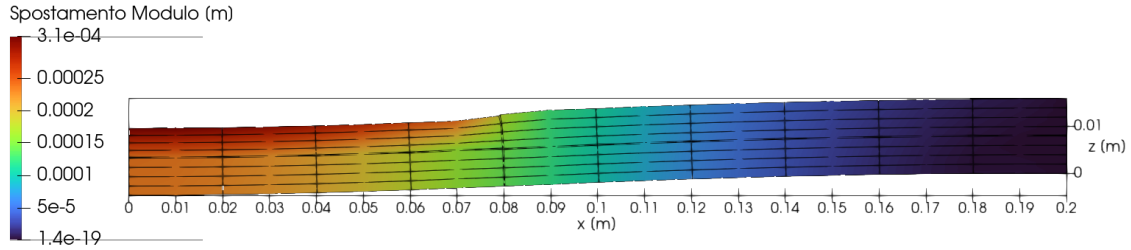


Figura 7.69: Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta

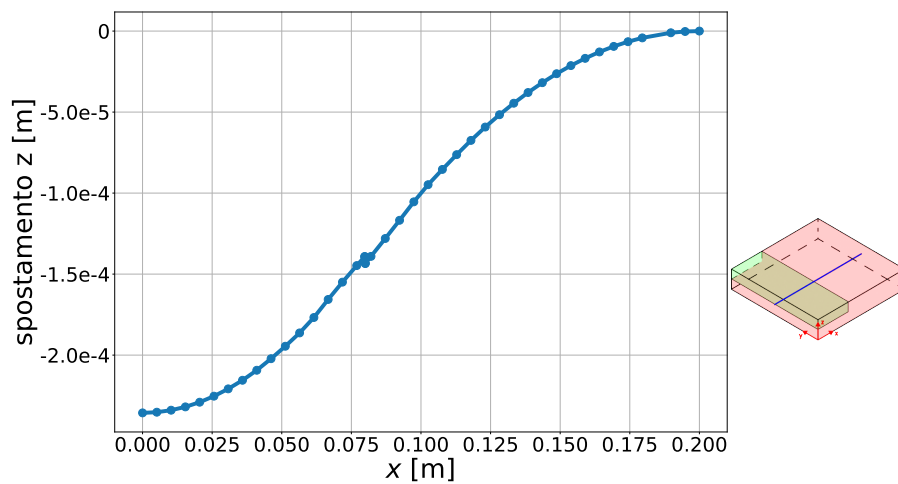


Figura 7.70: Spostamento in direzione z lungo il tratto 3

Tratto 1

In figura figura 7.71 sono rappresentati gli andamenti delle deformazioni in direzione x , z e le ε_{xz} lungo il tratto 1. Si nota che le ε_{xx} (figura 7.71a) hanno un andamento lineare. Le deformazioni in direzione z (figura 7.71b) hanno un comportamento costante nella parte sostituita e nella parte originale con un salto che avviene all'interfaccia tra la parte curata e l'incollaggio. Le ε_{xz} (figura 7.71c) sono trascurabili rispetto le precedenti. Gli andamenti delle tensioni principali lungo il tratto 1 sono riportati in figura 7.72. Si ha una tensione elevata in direzione x (figura 7.72a), in particolare si nota che nella parte curata (superiore), gli strati con orientamento delle fibre in direzione x sono sottoposti a una tensione circa costante e maggiore rispetto agli strati con fibre disposte in direzione y ; inoltre in questi ultimi la tensione che assume un valore negativo, quindi di compressione, tende ad aumentare mano a mano che ci si avvicina all'incollaggio, fino ad assumere un valore leggermente positivo all'interfaccia. Nella metà non curata è presente il comportamento opposto, ovvero gli strati con orientamento delle fibre in direzione x hanno valori di tensione minori rispetto a quelli con le fibre disposte in direzione y . In questi ultimi la tensione tende a diminuire mano a mano che ci si avvicina all'interfaccia.

La tensione in direzione y (figura 7.72b) assume valori costanti a meno dell'orientamento delle fibre con inversione di tendenza tra gli strati sostituiti e quelli originali. Le tensioni σ_{zz} (figura 7.72c) e σ_{xz} (figura 7.72d) sono trascurabili rispetto alle tensioni σ_{xx} e σ_{yy} .

In tabella 7.13 sono riportate le tensioni massime in valore assoluto misurate lungo il tratto 1.

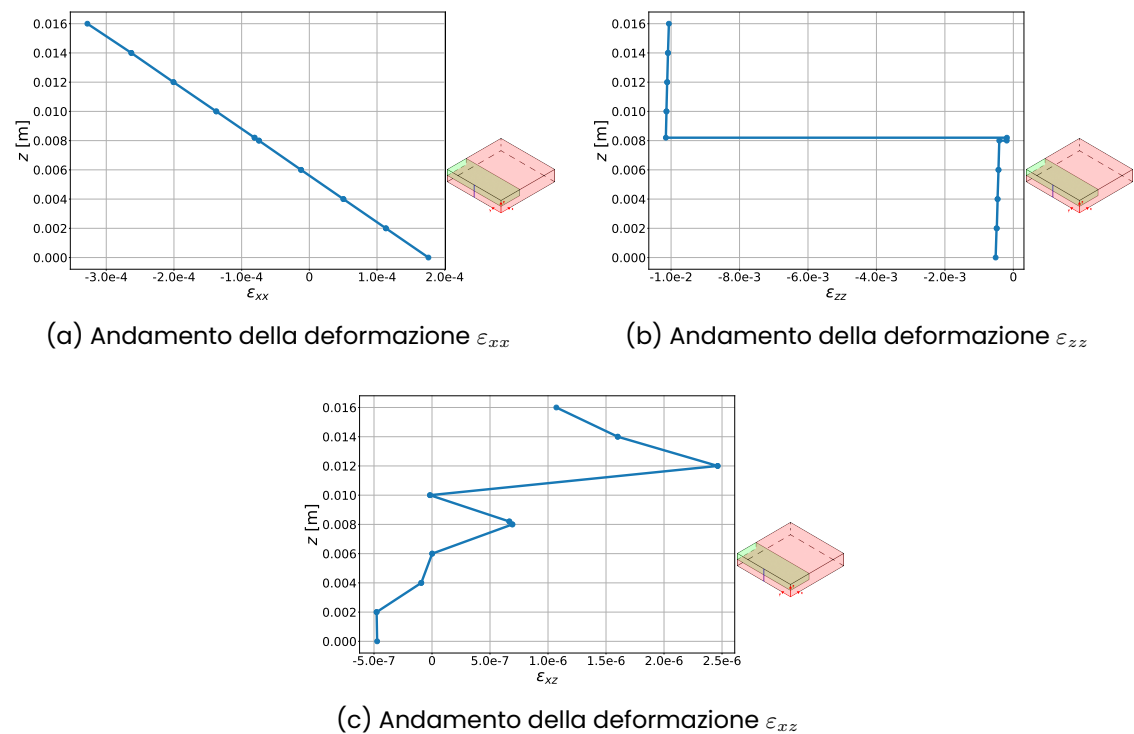


Figura 7.71: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta

σ_{xx}	51.48
σ_{yy}	52.19
σ_{zz}	0.0279
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	0.009 10
σ_{yz}	~ 0

Tabella 7.13: Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta [MPa]

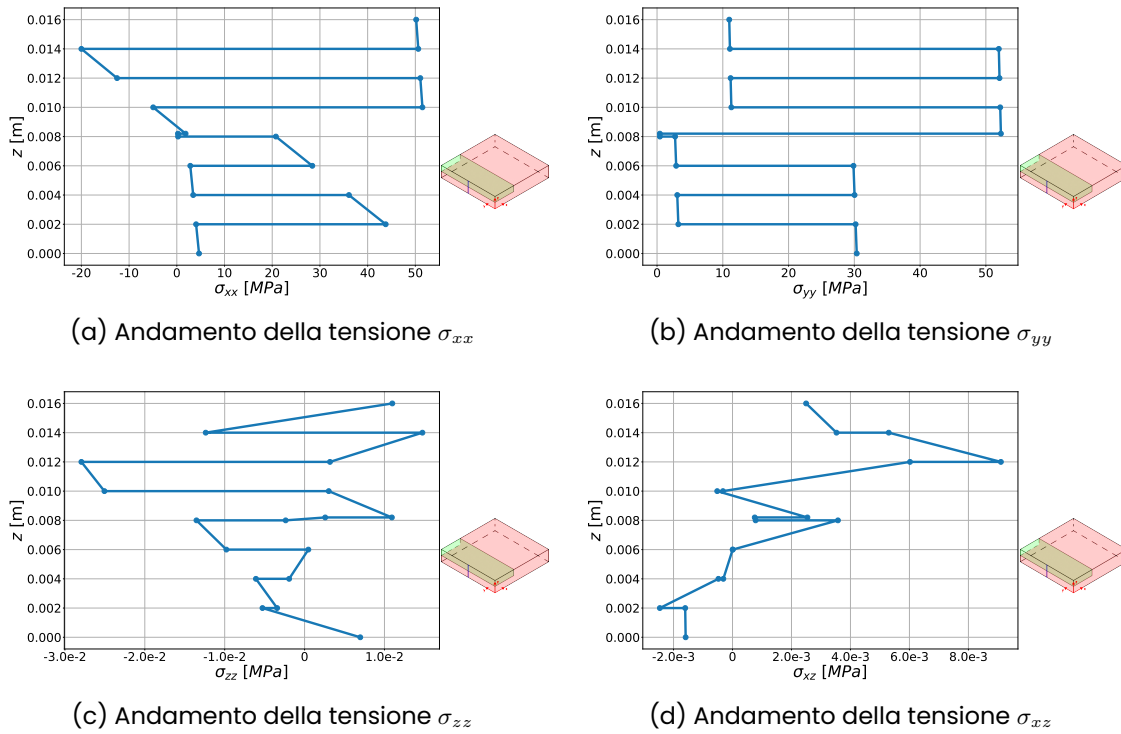


Figura 7.72: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta

Tratto 2

Si riportano in figura 7.73 gli andamenti delle tensioni principali lungo il tratto 2. Si nota che la tensione in direzione x (figura 7.73a) è bassa e circa costante negli strati con le fibre orientate in direzione x ; d'altra parte negli strati con le fibre orientate in direzione y la σ_{xx} ha un'intensità più rilevante e tende ad aumentare spostandosi negli strati superiori fino a superare i 50 MPa. La σ_{yy} , rappresentata in figura 7.73b ha un comportamento circa costante a meno dell'orientamento delle fibre. Le tensioni σ_{zz} (figura 7.73c) e σ_{xz} (figura 7.73d) si possono definire trascurabili rispetto alle due precedentemente analizzate.

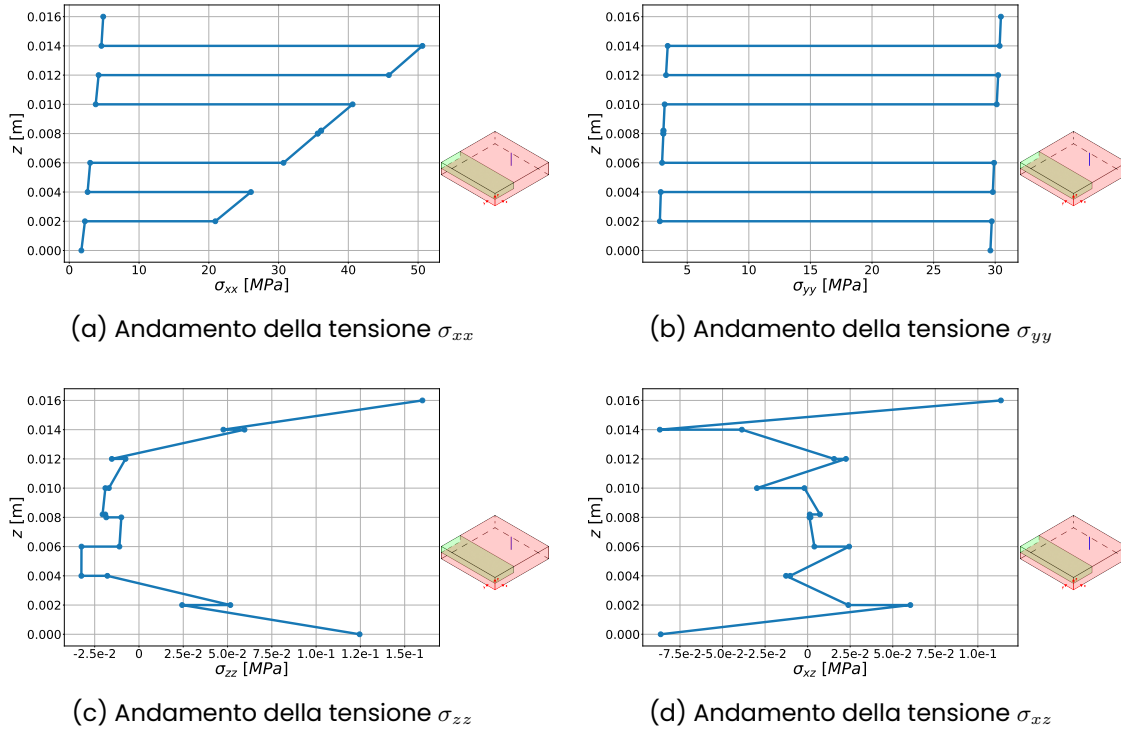


Figura 7.73: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta

Tratto 3

Si riportano ora gli andamenti delle deformazioni e delle tensioni lungo il tratto 3, rispettivamente nelle figure 7.74 e 7.75.

Le deformazioni ε_{xx} in figura 7.74a e ε_{xz} in figura 7.74c sono quasi nulle lungo tutto il componente tranne che per dei picchi nell'incollaggio. Per quanto riguarda la deformazione in direzione z , riportata in figura 7.74b si osserva che nella parte originale questa è quasi nulla, mentre assume valori negativi nella parte curata. Il passaggio è abbastanza graduale in prossimità dell'incollaggio.

La tensione σ_{xx} (figura 7.75a) è molto bassa nella parte curata e assume valori superiori ai 35 MPa nella parte originale. Il passaggio è abbastanza graduale con un piccolo picco all'interno dell'incollaggio. Il comportamento opposto lo si ha per quanto riguarda la σ_{yy} che infatti assume valori superiori ai 50 MPa nella parte curata e prossimi a 0 MPa nella parte originale. Il passaggio è costituito da un gradino. Le tensioni σ_{zz} (figura 7.75c) e σ_{xz} (figura 7.75d) sono pressoché nulle lungo il tratto 3 a meno di picchi anche molto elevati nell'incollaggio.

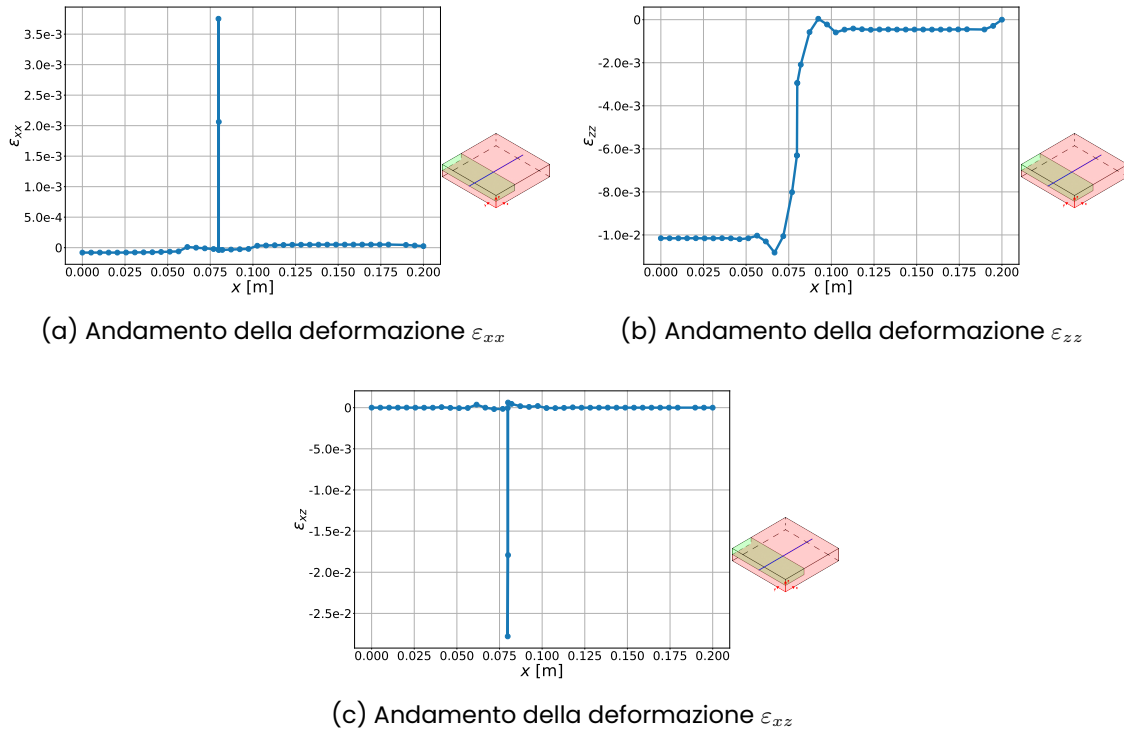


Figura 7.74: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta

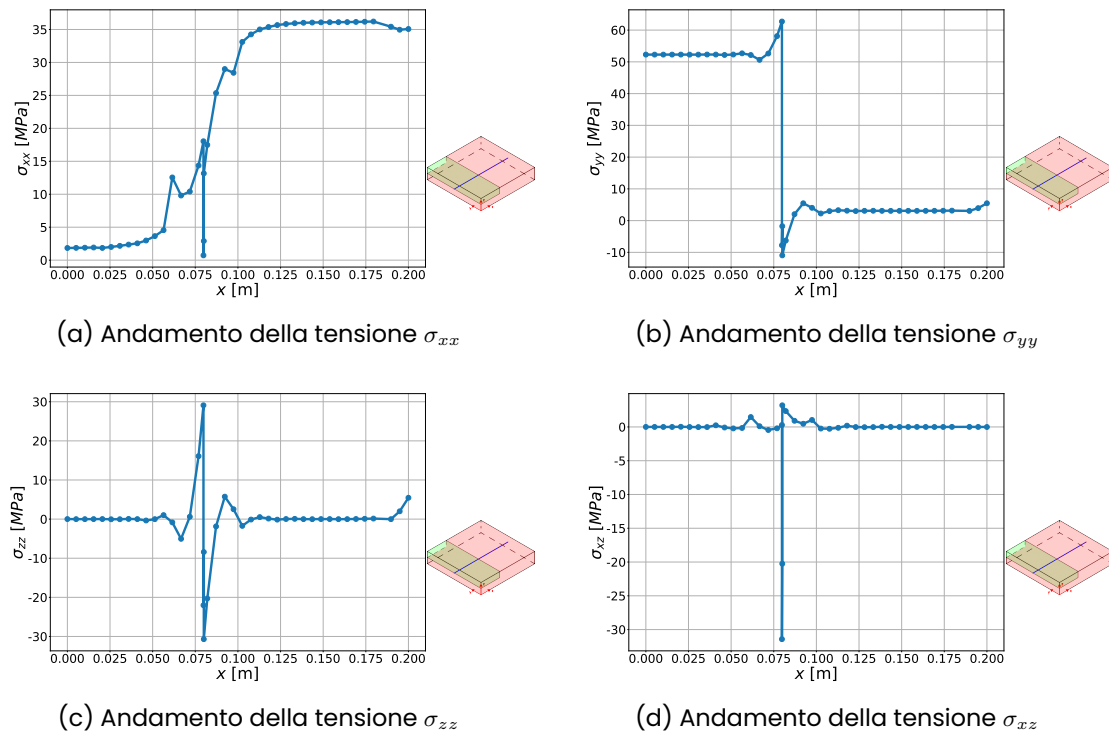


Figura 7.75: Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione superficiale dritta

7.2.2 Riparazione a scalini

Ora viene analizzata una soluzione superficiale a scalini, come quella riportata in figura 7.76.

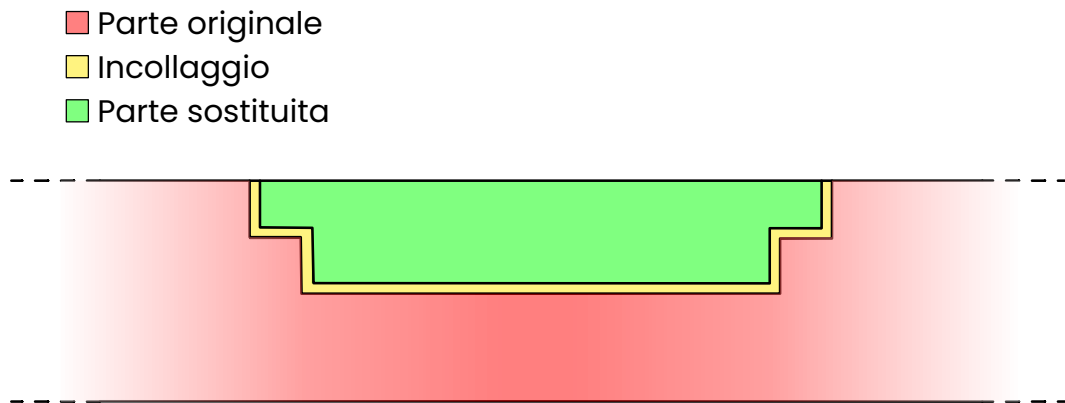


Figura 7.76: Riparazione superficiale a scalini

Il modello realizzato è rappresentato in figura 7.77 e le sue dimensioni sono riportate in tabella 7.14.

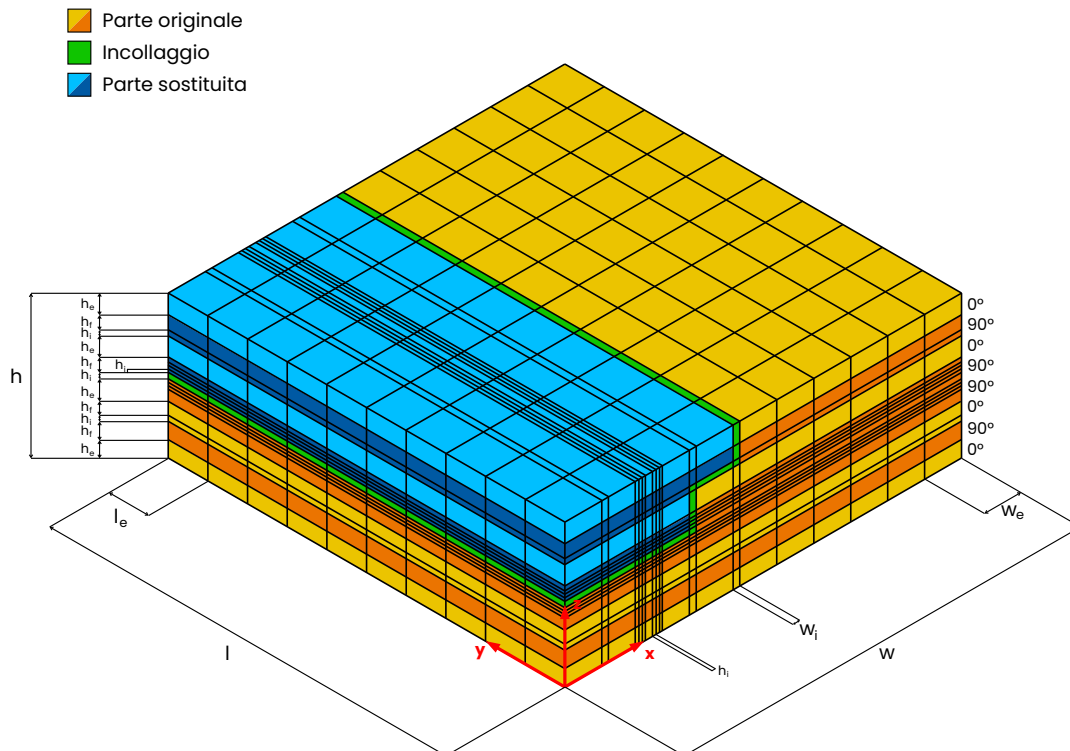


Figura 7.77: Modello della piastra con riparazione superficiale a scalini in assonometria isometrica

h	1.6
h_e	0.2
h_i	0.02
h_f	0.18
l	20
l_e	2
w	20
w_e	1.92
w_i	0.02

Tabella 7.14: Dimensioni del modello con riparazione superficiale a scalini [cm]

Risultati

Nelle figure da 7.78 a 7.80 si riportano i campi di spostamento della piastra analizzata. Si osserva che gli spostamenti di maggiore intensità avvengono in direzione z e a causa della forte asimmetria della riparazione si ha un incurvamento indotto nella parte originale. In figura 7.81 è riportato lo spostamento in direzione z lungo il tratto 3.

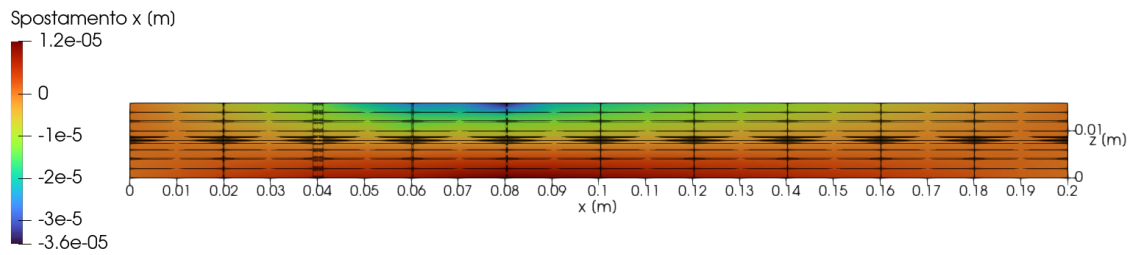


Figura 7.78: Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale a scalini

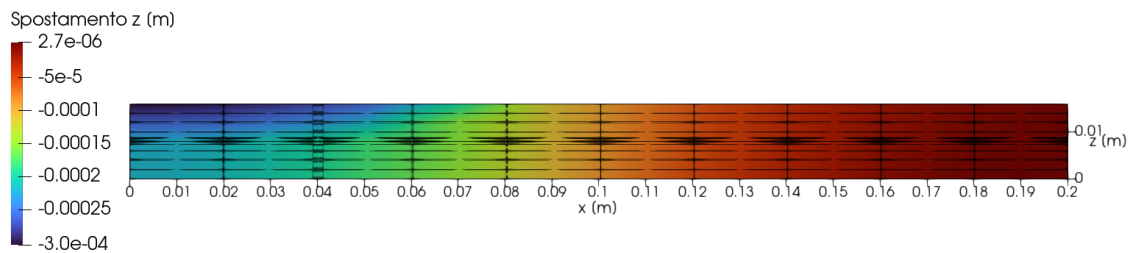


Figura 7.79: Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale a scalini

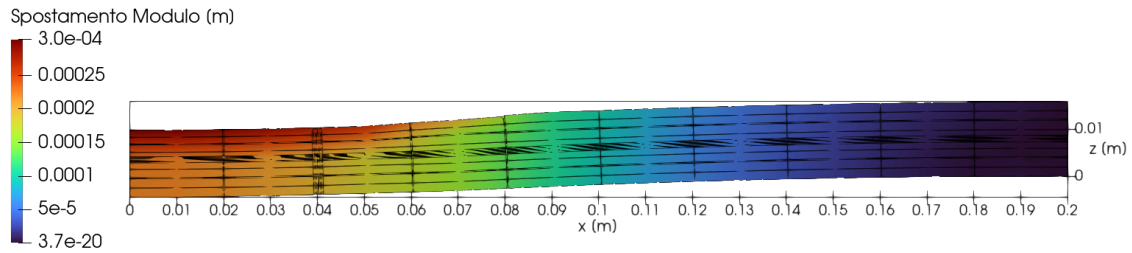


Figura 7.80: Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale a scalini

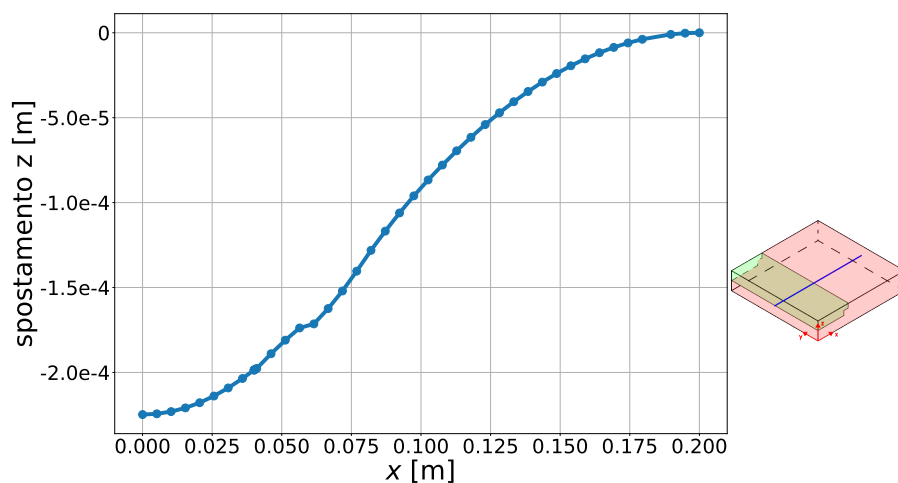


Figura 7.81: Spostamento in direzione z lungo il tratto 3

Tratto 1

In figura 7.82 si possono osservare l'andamento delle deformazioni indotte dal ciclo di cura nel tratto 1. Si nota che la deformazione in direzione x (figura 7.82a) ha un andamento lineare, quella in direzione z (figura 7.82b) assume due valori costanti, uno nella parte curata e uno nella parte inferiore. Per quanto riguarda le ε_{xz} , queste sono trascurabili.

In figura 7.83 sono riportati gli andamenti delle tensioni principali lungo il tratto 1. Si hanno tensioni elevate in direzione x (figura 7.83a), in particolare per quanto riguarda la parte curata sono presenti tensioni che superano i 50 MPa negli strati con le fibre disposte in direzione x . Gli strati che invece hanno le fibre disposte in direzione y hanno valori di tensioni negativi che raggiungono i -20 MPa. Muovendosi verso l'incollaggio queste tensioni tendono a diminuire in valore assoluto. Nella parte non curata si ha il comportamento opposto, ovvero gli strati con fibre disposte in direzione x presentano tensioni molto basse, mentre quelli con le fibre disposte in direzione y hanno valori di tensione più alti, ma che tendono a diminuire muovendosi verso l'incollaggio.

La tensione in direzione y , in figura 7.83b, assume valori costanti all'interno di ogni singolo strato, ma questi cambiano a seconda dell'orientamento delle fibre o se ci si trova

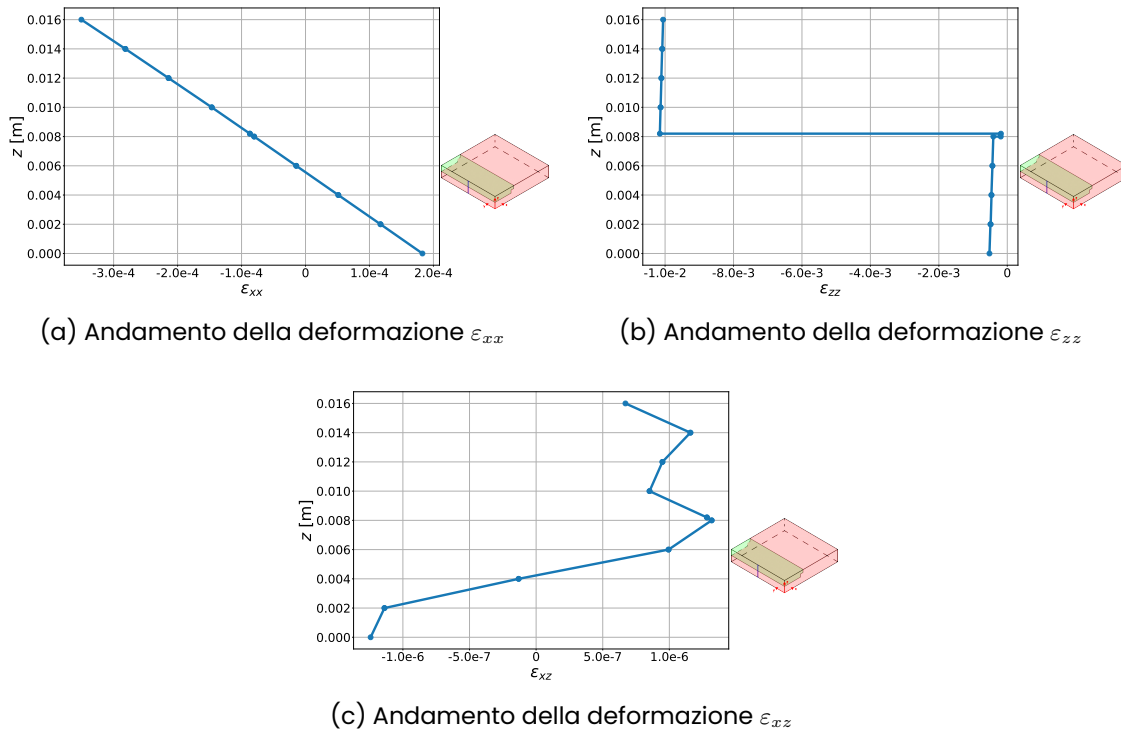


Figura 7.82: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini

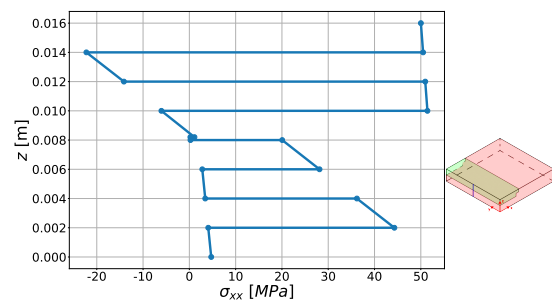
nella parte curata o in quella non sostituita.

Le tensioni σ_{zz} e σ_{xz} riportate rispettivamente nelle figure 7.83c e 7.83d si possono considerare trascurabili.

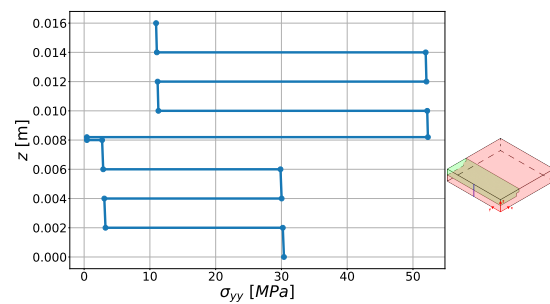
In tabella 7.15 si riportano le tensioni massime in valore assoluto lungo il tratto 1.

σ_{xx}	51.43
σ_{yy}	52.28
σ_{zz}	0.0516
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	0.0198
σ_{yz}	~ 0

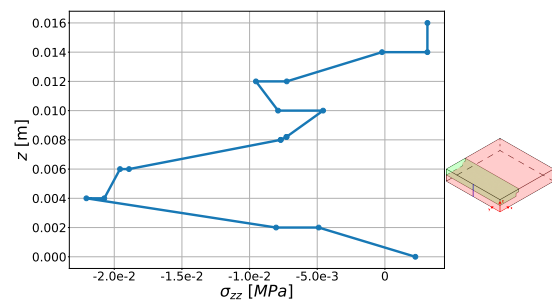
Tabella 7.15: Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini [MPa]



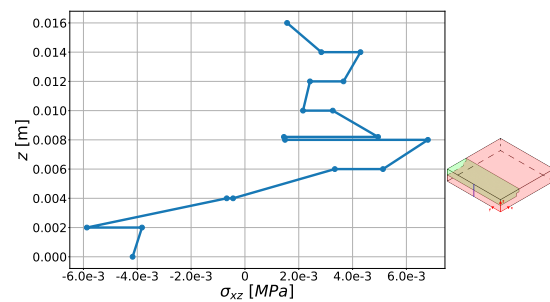
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}

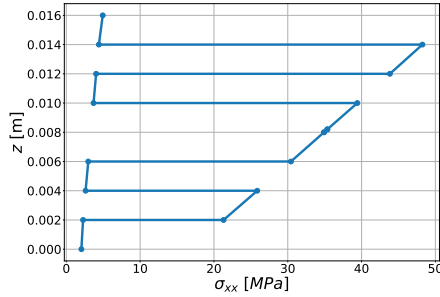


(d) Andamento della tensione σ_{xz}

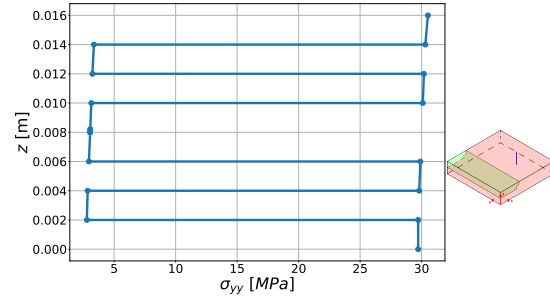
Figura 7.83: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini

Tratto 2

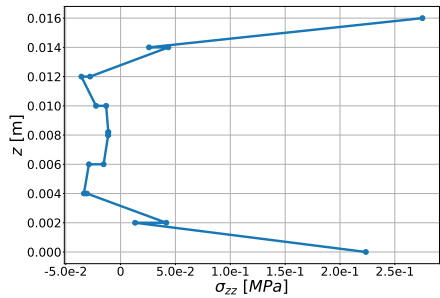
Si riportano in figura 7.84 gli andamenti delle tensioni indotte lungo il tratto 2. Si osserva che la tensione σ_{xx} assume valori piccoli negli strati con le fibre disposte in direzione x e valori elevati negli strati con le fibre disposte in direzione y . La tensione σ_{yy} , riportata in figura 7.84b, assume valori costanti gli strati a meno dell'orientamento delle fibre. La tensione σ_{zz} , mostrata in figura 7.84c, si può considerare trascurabile come anche la tensione σ_{xz} , riportata in figura 7.84d.



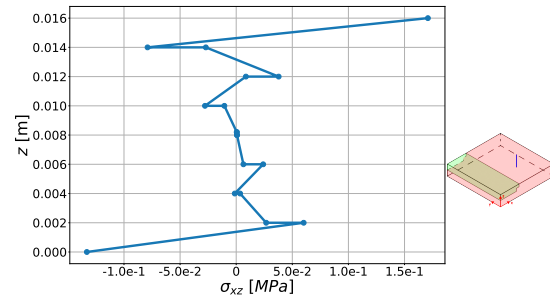
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.84: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini

Tratto 3

Gli andamenti delle deformazioni lungo il tratto 3 sono riportati in figura 7.85. Si osserva un andamento delle deformazioni ε_{xx} e ε_{xz} come atteso, ma con dei picchi aggiuntivi, probabilmente dovuti al fatto che ci si trova al confine tra la parte curata e l'incollaggio. Di conseguenza lo stesso fenomeno lo si può osservare nelle tensioni riportate in figura 7.86, in particolare negli andamenti delle tensioni σ_{xx} e σ_{xz} , riportate nelle figure 7.86a e 7.86d.

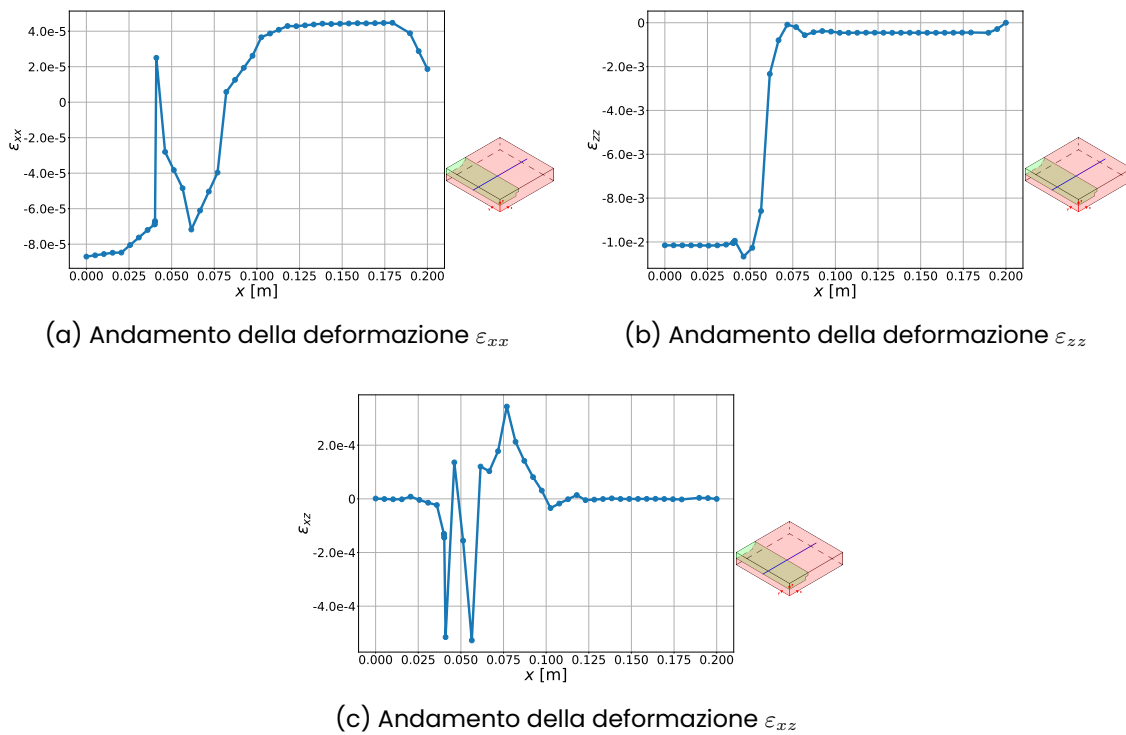


Figura 7.85: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini

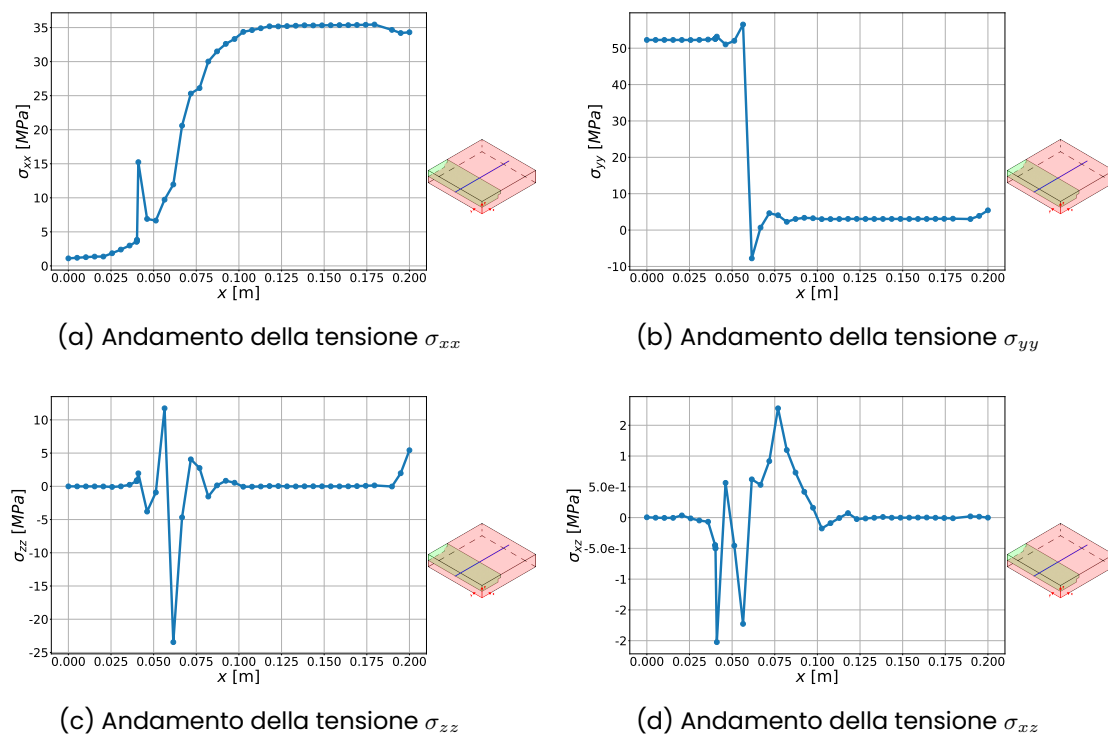


Figura 7.86: Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione superficiale a scalini

c

7.2.3 Riparazione inclinata

Ora si analizza una riparazione superficiale inclinata, come quella riportata in figura 7.87.

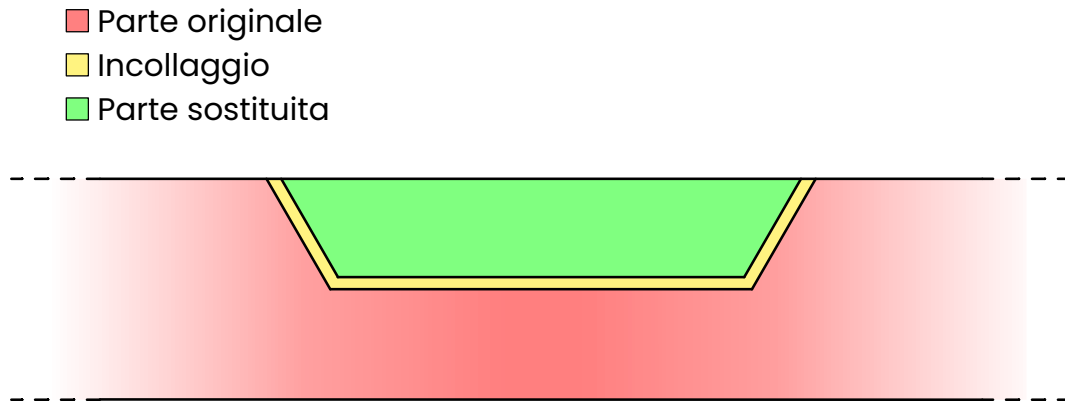


Figura 7.87: Riparazione superficiale inclinata

Il modello creato è riportato in figura 7.88. Le dimensioni del modello sono riportate in tabella 7.16.

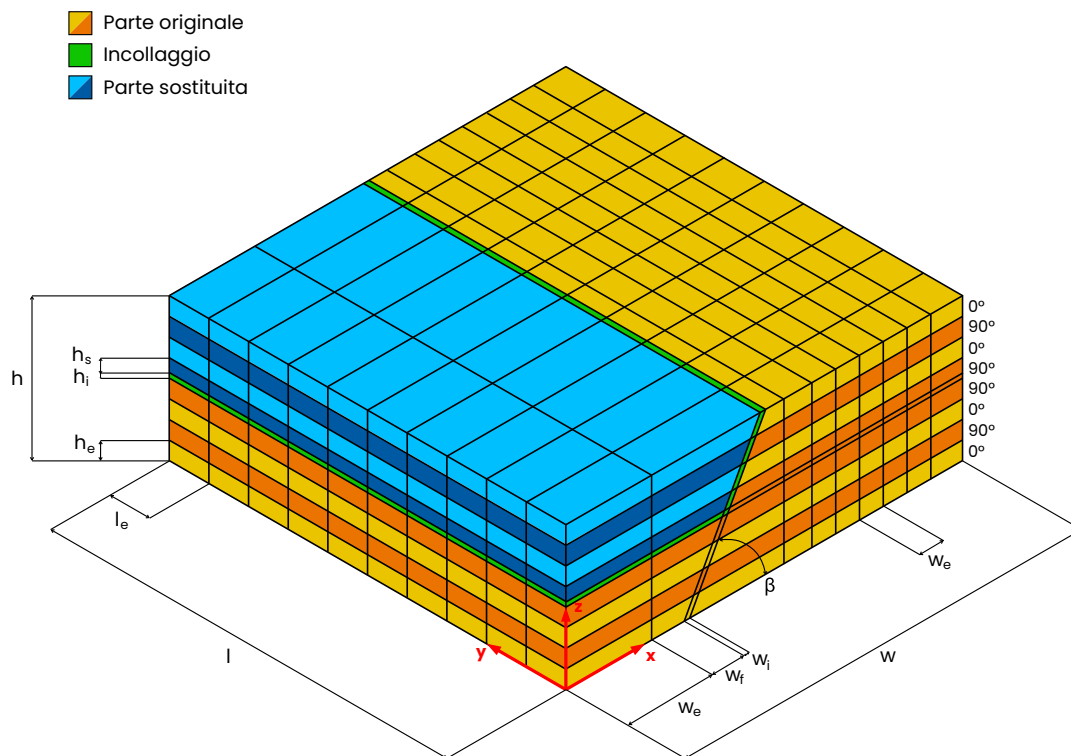


Figura 7.88: Modello della piastra con riparazione superficiale inclinata in assonometria isometrica

h [cm]	1.6
h_e [cm]	0.2
h_i [cm]	0.02
h_s [cm]	0.18
l [cm]	20
l_e [cm]	2
w [cm]	20
w_e [cm]	2
w_f [cm]	1
w_i [cm]	0.02
β	30°

Tabella 7.16: Dimensioni del modello con riparazione superficiale a inclinata

Risultati

Nelle figure da 7.89 a 7.91 sono riportati i campi di spostamento in direzione x e z e la deformata in scala 20:1 della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale inclinata. Si osservano spostamenti in direzione x piccoli, che raggiungono il valore massimo in corrispondenza dell'incollaggio sulla faccia superiore. Gli spostamenti in direzione z sono invece maggiori e raggiungono il valore massimo in corrispondenza del centro della piastra, come atteso. La deformata complessiva mostra un andamento simile a quello della piastra con riparazione superficiale a scalini, con un inarcamento della parte non curata. In figura 7.92 è riportato lo spostamento in direzione z lungo il tratto 3.

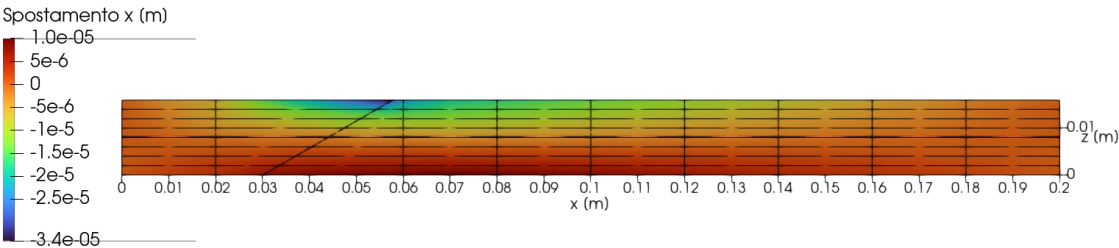


Figura 7.89: Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale inclinata

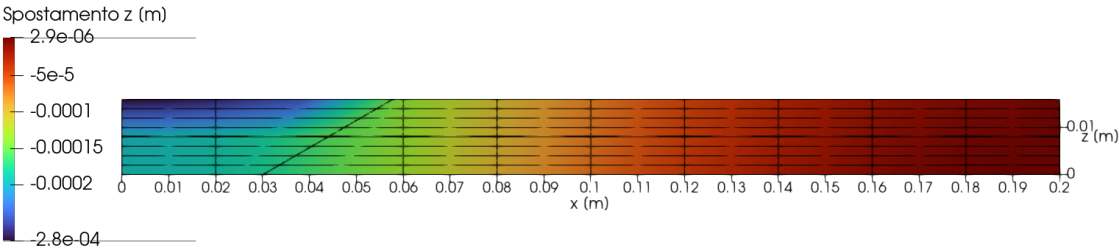


Figura 7.90: Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale inclinata

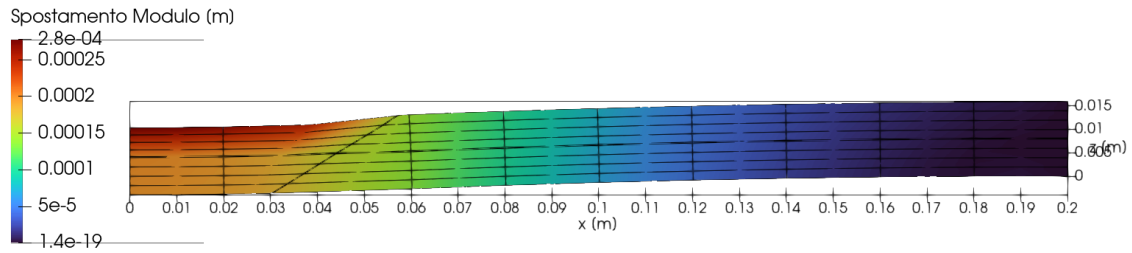


Figura 7.91: Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale inclinata

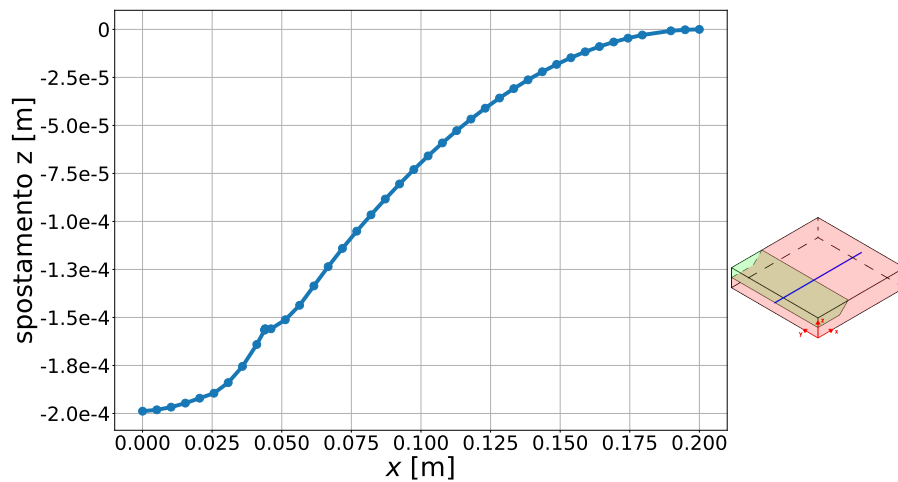


Figura 7.92: Spostamento in direzione z lungo il tratto 3

Tratto 1

In figura 7.93 sono riportati gli andamenti delle deformazioni lungo il tratto 1 della piastra con riparazione superficiale inclinata. Si osserva che la deformazione ε_{xx} (figura 7.93a) ha un andamento quasi lineare. La deformazione ε_{zz} (figura 7.93b) ha un andamento costante, ma assume due valori diversi nella parte curata e nella parte originale. La deformazione ε_{xz} (figura 7.93c) si può definire trascurabile. L'andamento delle tensioni lungo il tratto 1 sono riportate in figura 7.94. Si nota che le σ_{xx} e le σ_{yy} riportate nelle figure 7.94a e 7.94b presentano gli stessi comportamenti che sono stati analizzati nelle due geometrie di riparazione precedenti. Anche in questo caso le tensioni σ_{zz} e σ_{xz} riportate nelle figure 7.94c e 7.94d, sono trascurabili. I valori massimi in valore assoluto delle tensioni sono riportati in tabella 7.17.

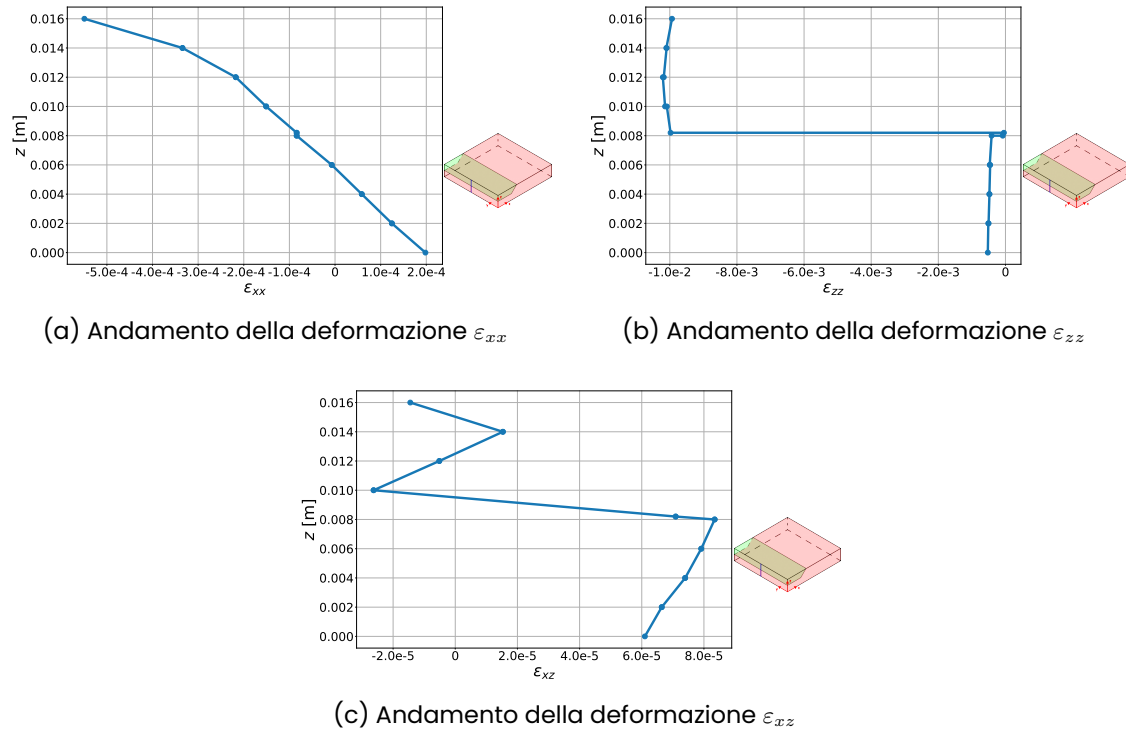


Figura 7.93: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata

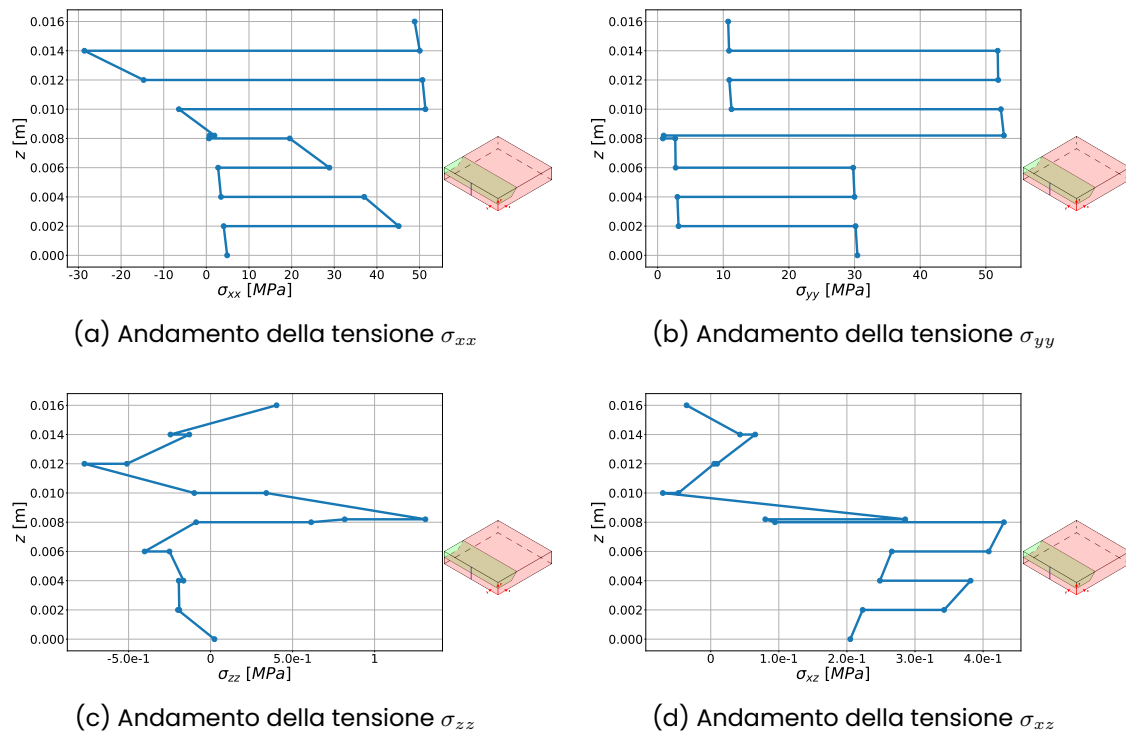


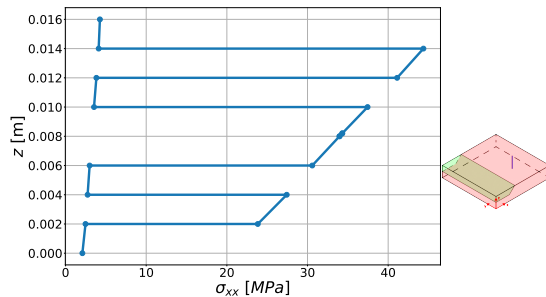
Figura 7.94: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata

σ_{xx}	51.38
σ_{yy}	52.75
σ_{zz}	1.310
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	0.430
σ_{yz}	~ 0

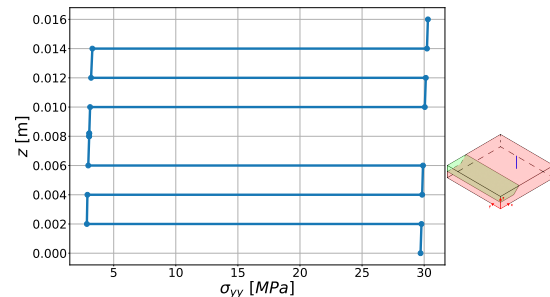
Tabella 7.17: Deformazioni e tensioni massime in valore assoluto lungo lo spessore alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale obliqua [MPa]

Tratto 2

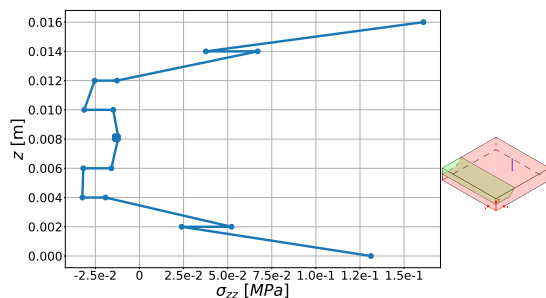
Si riportano in figura 7.95 gli andamenti delle tensioni lungo il tratto 2. La σ_{xx} , riportata in figura 7.95a assume valori piccoli negli strati con le fibre orientate in direzione x e valori maggiori negli strati con le fibre orientate in direzione y , superando i 40 MPa. Inoltre in questi ultimi strati si ha un andamento lineare che fa sì che le tensioni negli strati superiori siano più alte. La σ_{yy} , riportata in figura 7.95b, assume valori circa costanti negli strati a meno dell'orientamento delle fibre. Assume valori più grandi negli strati in cui le fibre sono orientate in direzione y . La σ_{zz} , riportata in figura 7.95c, e la σ_{xz} , riportata in figura 7.95d, sono trascurabili.



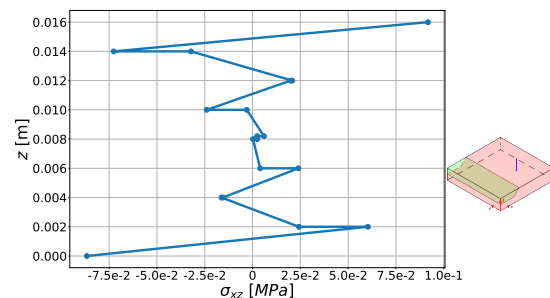
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}

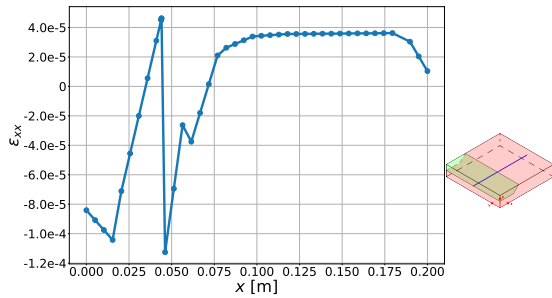


(d) Andamento della tensione σ_{xz}

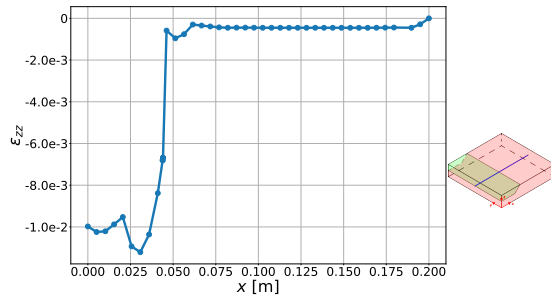
Figura 7.95: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata

Tratto 3

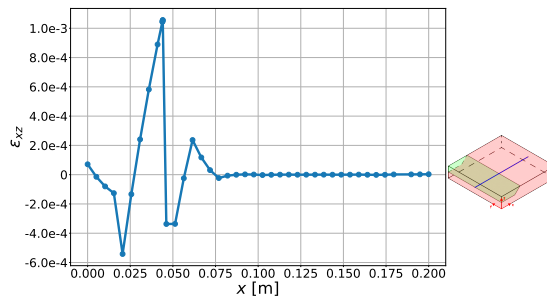
In figura 7.96 sono riportati gli andamenti delle deformazioni lungo il tratto 3. Come nel caso della riparazione superficiale a scalini si osservano picchi aggiuntivi nei casi della ε_{xx} e della ε_{xz} , probabilmente dovuti alla prossimità dei punti in cui si sono letti i valori con l'interfaccia tra il materiale di riparazione e l'incollaggio. Come conseguenza di questo fenomeno lo si può osservare anche nell'andamento delle tensioni, riportate in figura 7.97, in particolare nella σ_{xx} e nella σ_{xz} riportate nelle figure 7.97a e 7.97d.



(a) Andamento della deformazione ε_{xx}

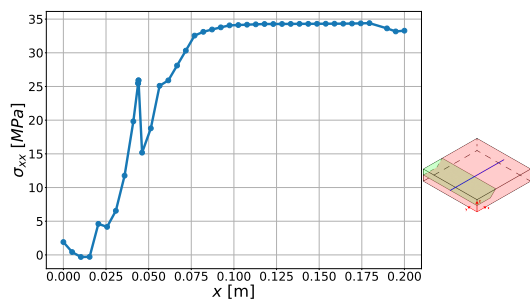


(b) Andamento della deformazione ε_{zz}

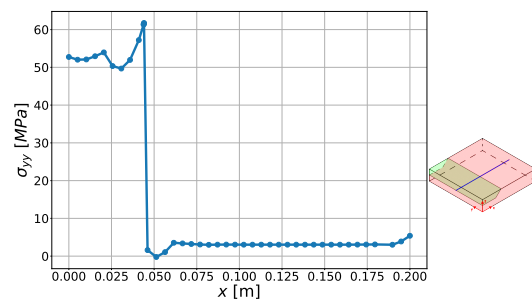


(c) Andamento della deformazione ε_{xz}

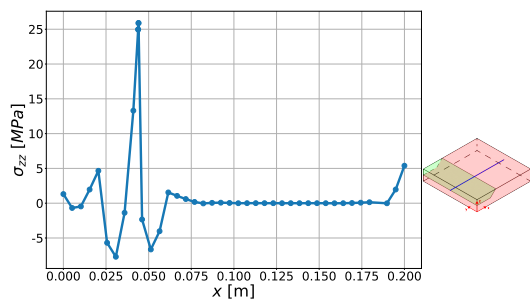
Figura 7.96: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata



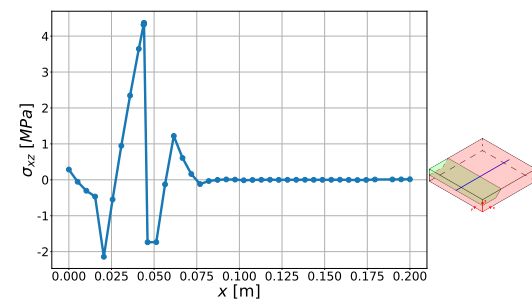
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.97: Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione superficiale inclinata

7.2.4 Riparazione con patch

L'ultimo caso analizzato è quello con riparazione superficiale dritta con patch, riportato in figura 7.98.

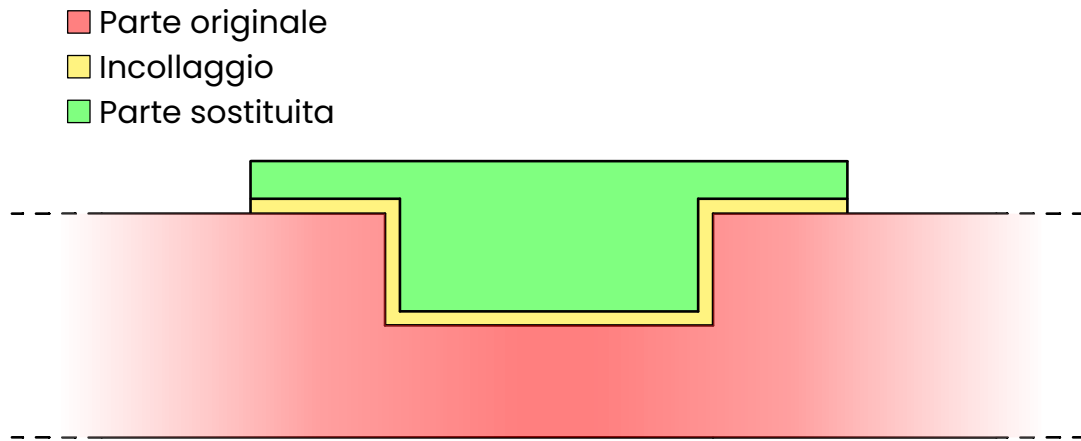


Figura 7.98: Riparazione superficiale dritta con patch

Il modello creato è riportato in figura 7.99 e le sue dimensioni sono riportate in tabella 7.18.

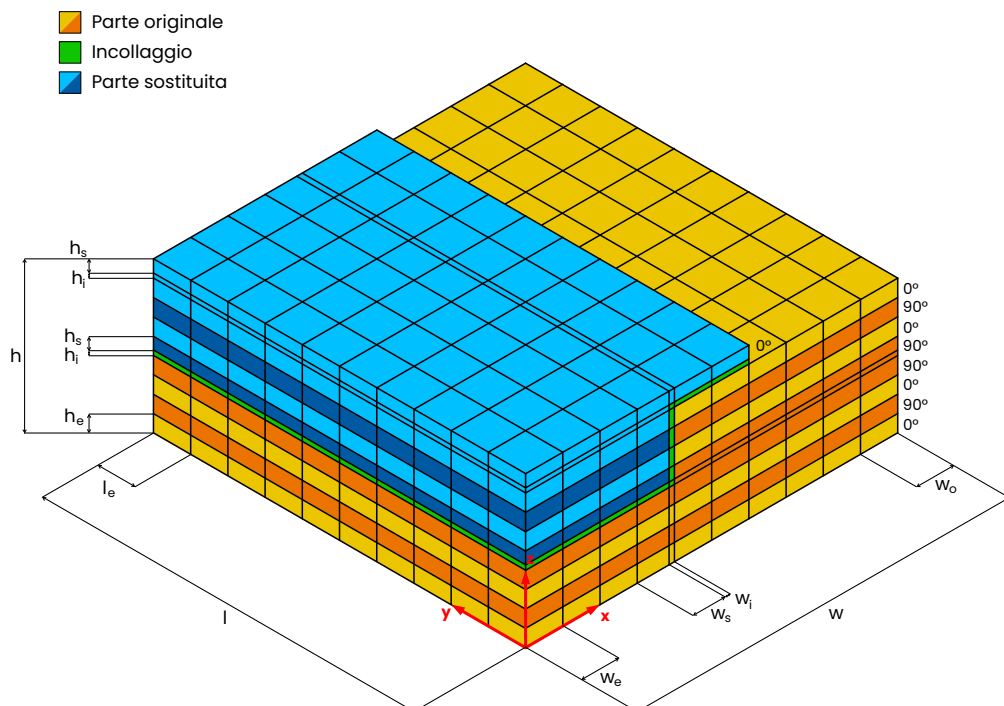


Figura 7.99: Modello della piastra con riparazione superficiale dritta con patch in assonometria isometrica

h	1.8
h_e	0.2
h_i	0.02
h_s	0.18
l	20
l_e	2
w	20
w_e	2
w_i	0.02
w_s	1.98
w_o	2

Tabella 7.18: Dimensioni del modello con riparazione superficiale dritta con patch [cm]

Risultati

Nelle figure da 7.100 a 7.102 sono riportati i campi di spostamento in direzione x e z e la deformata con scala 20:1 della piastra con riparazione superficiale dritta con patch. Si osserva che gli spostamenti in direzione x sono molto piccoli e si concentrano nella parte di patch che si sovrappone alla porzione di piastra non curata. Gli spostamenti in direzione z hanno maggiore intensità e assumono i valori più alti nel centro della riparazione (cioè in prossimità del piano di simmetria della riparazione). La deformata mostra come la piastra subisca una forte curvatura, la maggiore vista fino ad ora.

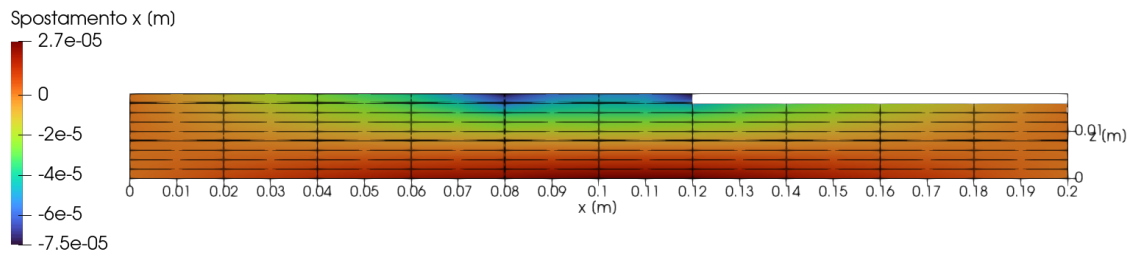


Figura 7.100: Campo di spostamento in direzione x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta con patch

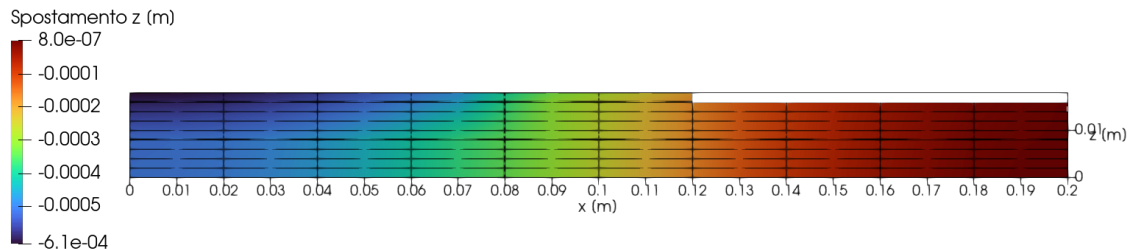


Figura 7.101: Campo di spostamento in direzione z della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta con patch

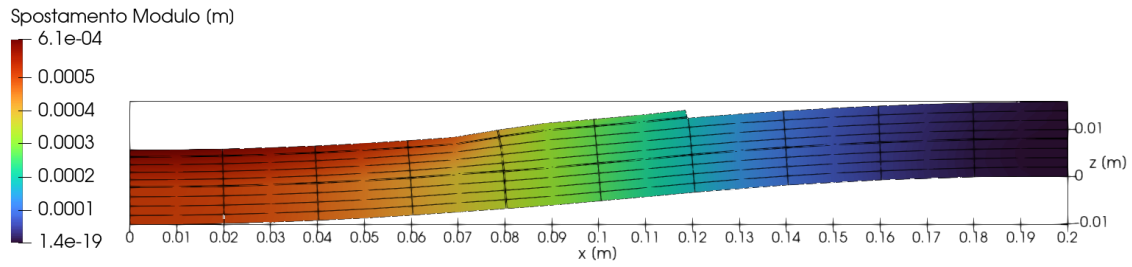


Figura 7.102: Deformata 20x della parte di piastra analizzata con riparazione superficiale dritta con patch

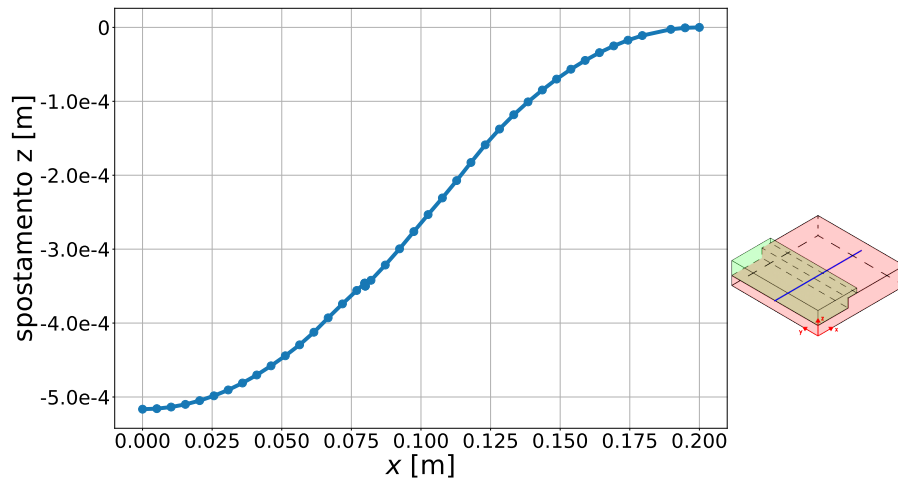


Figura 7.103: Spostamento in direzione z lungo il tratto 3

Tratto 1

Si riportano in figura 7.104 gli andamenti delle deformazioni lungo il tratto 1. La ε_{xx} , riportata in figura 7.104a, assume un andamento lineare. La deformazione in direzione z , ε_{zz} , riportata in figura 7.104b, presenta un andamento quasi costante che cambia valore tra la parte curata e la parte non sostituita. La deformazione di taglio ε_{xz} , riportata in figura 7.104c, assume valori molto piccoli in tutto il tratto 1. Gli andamenti delle tensioni principali sono riportati in figura 7.105. La σ_{xx} , riportata in figura 7.105a, e la σ_{yy} , riportata in figura 7.105b, assumono un comportamento simile a quello dei casi visti in precedenza. Le σ_{zz} , riportate in figura 7.105c, e le σ_{xz} , riportate in figura 7.105d, si possono considerare trascurabili.

I valori massimi in valore assoluto delle tensioni principali sono riportati in tabella 7.19.

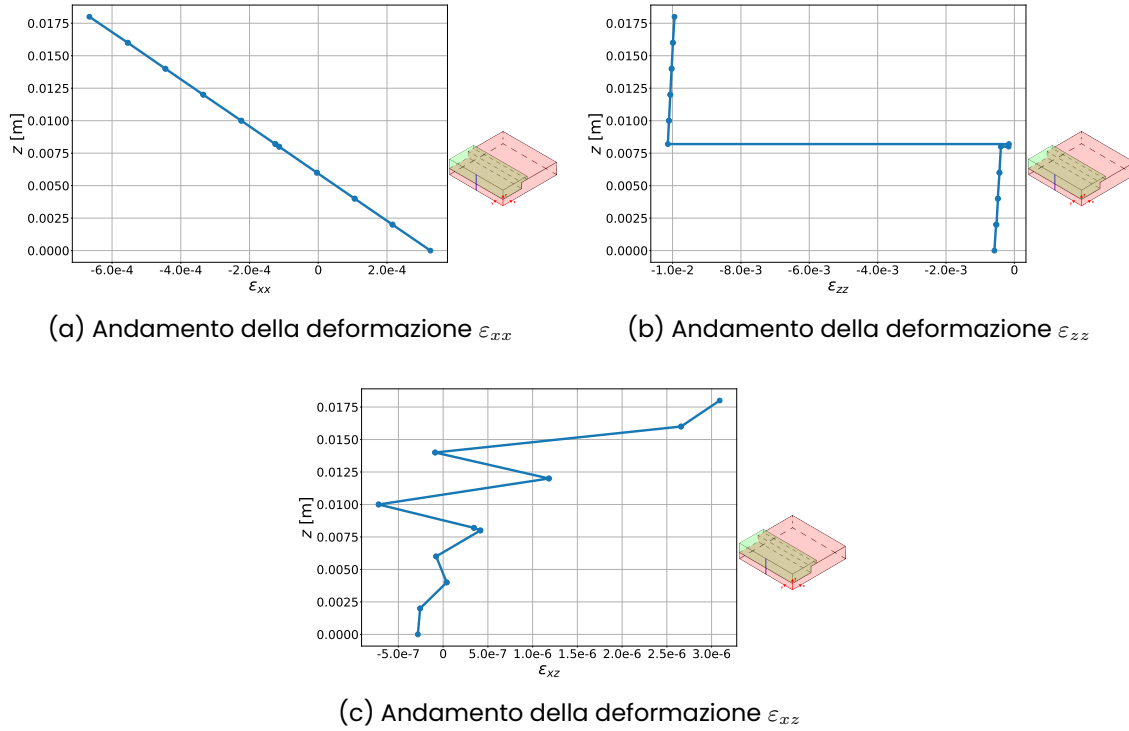


Figura 7.104: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch

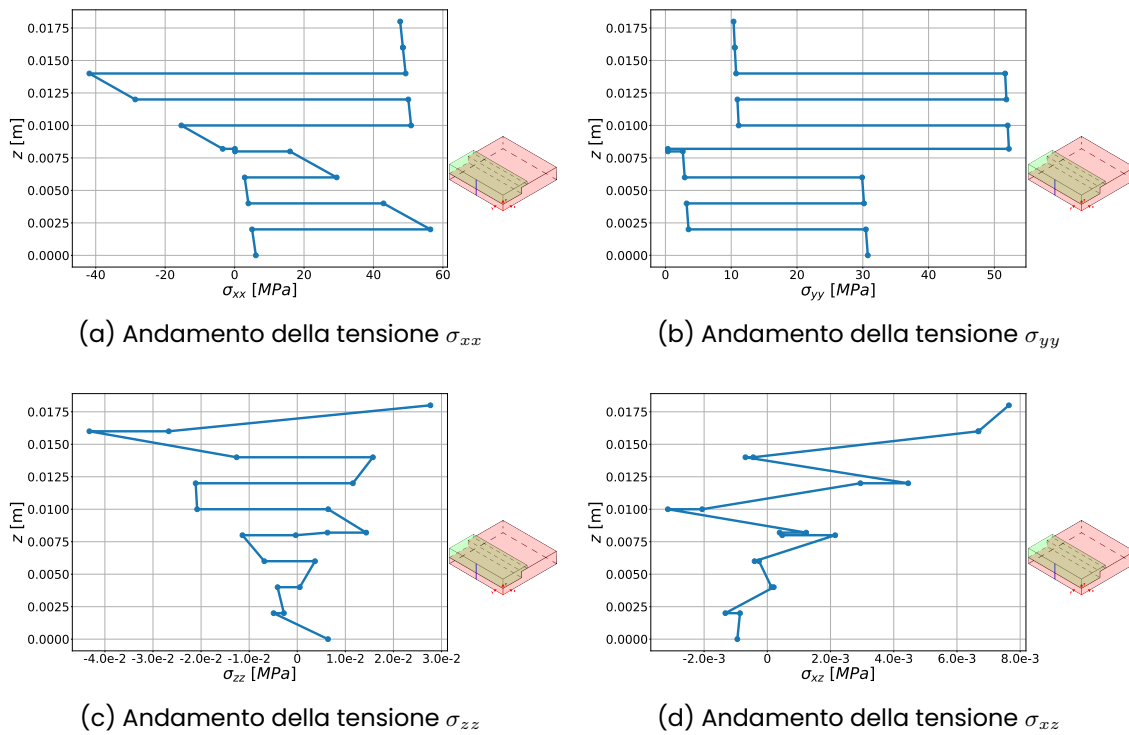


Figura 7.105: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch

σ_{xx}	56.41
σ_{yy}	52.21
σ_{zz}	0.0432
σ_{xy}	~ 0
σ_{xz}	0.007 64
σ_{yz}	~ 0

Tabella 7.19: Tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch [MPa]

Tratto 2

Si riportano in figura 7.106 gli andamenti delle tensioni lungo il tratto 2. Si osserva che la tensione in direzione x , riportate in figura 7.106a, assume un andamento lineare a meno dell'orientamento delle fibre. Questa tensione tende ad aumentare negli strati superiori, mentre si avvicina molto a 0 MPa negli strati inferiori. La tensione in direzione y (figura 7.106b) ha un andamento quasi costante, a meno dell'orientamento delle fibre, con valori più alti negli strati in cui le fibre sono orientate in direzione x . La tensione in direzione z (figura 7.106c) e la tensione di taglio σ_{xz} (figura 7.106d) si possono considerare trascurabili.

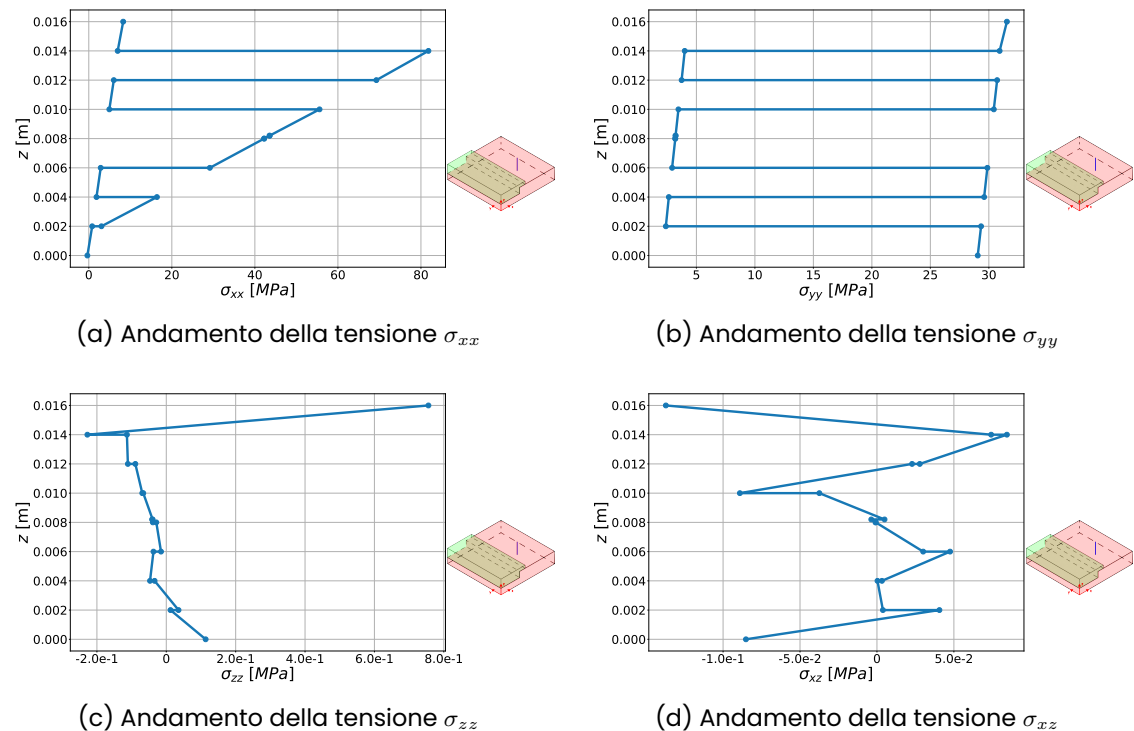


Figura 7.106: Andamento delle tensioni alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch

Tratto 3

In figura 7.107 sono riportati gli andamenti delle deformazioni lungo il tratto 3. La ε_{xx} , riportata in figura 7.107a, e la ε_{xz} , riportata in figura 7.107c, assumono valori molto piccoli, prossimi allo 0, a eccezione di un picco presente nell'incollaggio. La deformazione in direzione z , ε_{zz} , riportata in figura 7.107b, assume valori molto piccoli nella parte originale e un valore costante (circa -1×10^{-2}) nella parte curata. Il passaggio è graduale nella prossimità dell'incollaggio anche se per cogliere meglio questo fenomeno bisognerebbe diminuire la taglia della mesh.

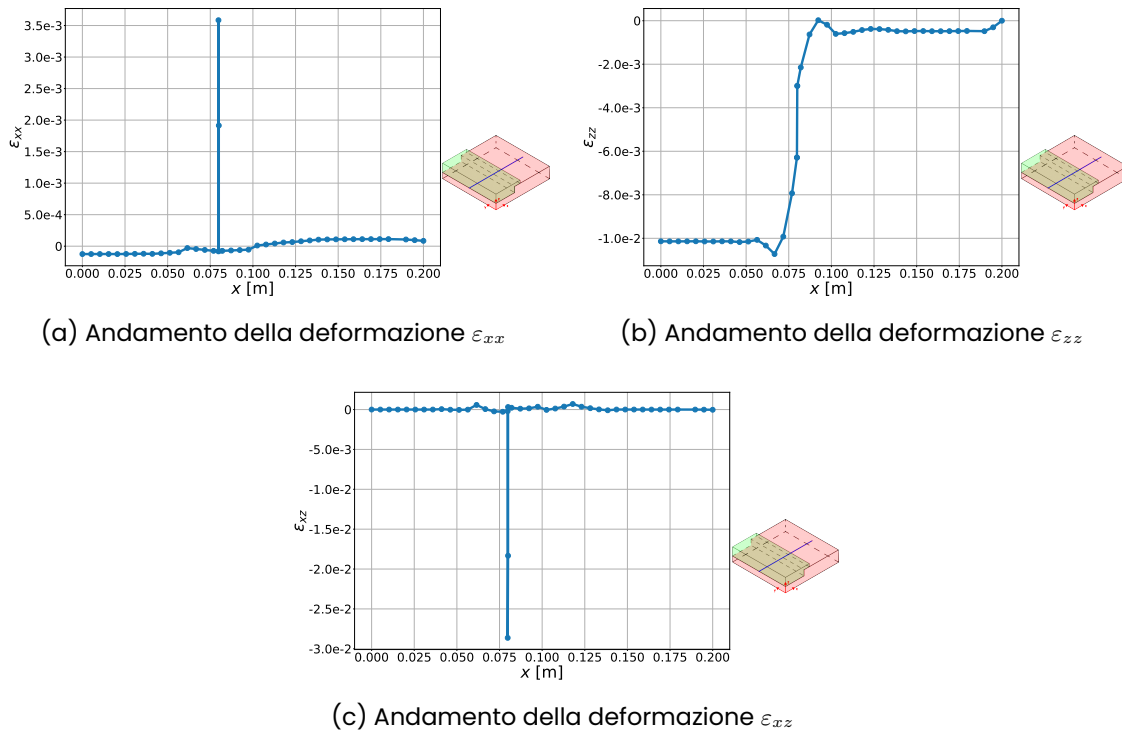
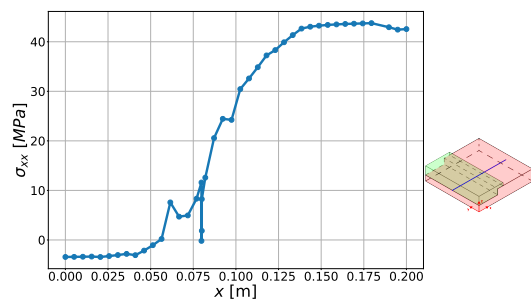
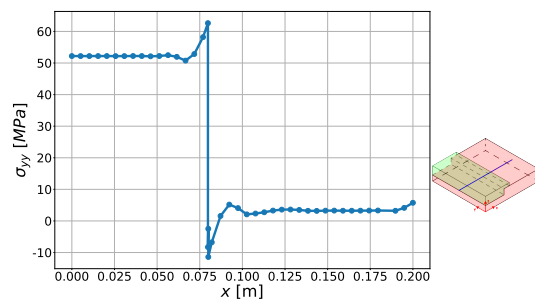


Figura 7.107: Andamento delle deformazioni alle coordinate $(0, 0.1, z)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch

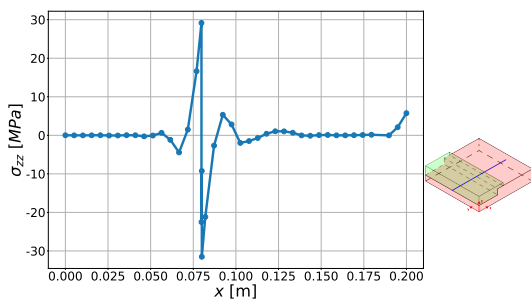
L'andamento delle tensioni principali lungo il tratto 3 è riportato in figura 7.108. La σ_{xx} , riportata in figura 7.108a, Assume valori piccoli e negativi nella parte di piastra curata e passa a valori positivi superiori ai 40 MPa nella parte non sostituita. Inoltre è presente un leggero picco nell'incollaggio che porta la tensione σ_{xx} a 0 MPa. La σ_{yy} , riportata in figura 7.108b, assume valori più alti nella parte di piastra curata (superiori a 50 MPa) e valori più bassi nella parte non sostituita. Il salto è costituito da un gradino con un picco che supera i 60 MPa da una parte e i -10 MPa dall'altra. La σ_{zz} , riportata in figura 7.108c, e la σ_{xz} , riportata in figura 7.108d, soni praticamente nulle, ma presentano un picco nell'incollaggio.



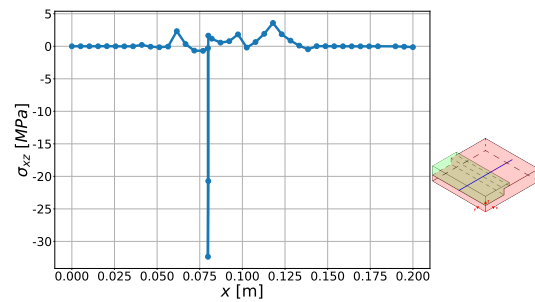
(a) Andamento della tensione σ_{xx}



(b) Andamento della tensione σ_{yy}



(c) Andamento della tensione σ_{zz}



(d) Andamento della tensione σ_{xz}

Figura 7.108: Andamento delle tensioni alle coordinate $(x, 0.1, 0.008)$ della piastra con riparazione superficiale dritta con patch

7.2.5 Confronto

In questa sezione si riporta un confronto tra le analisi di piastre con riparazione superficiale effettuate con i diversi tipi di geometria di riparazione.

In figura 7.109 si riporta l'andamento dello spostamento in direzione z lungo il tratto 3. Si osserva che in questo caso tutte le geometrie, avendo la riparazione solo da una parte del piano di mezzeria, generano degli spostamenti in z . Le riparazioni dritte, a scalini e oblique generano spostamenti confrontabili, tuttavia la riparazione con geometria dritta con patch genera spostamenti aventi intensità anche doppia rispetto alle altre 3, probabilmente dovuto al fatto che la patch costituisce maggior materiale da curare e quindi si genera uno spostamento maggiore.

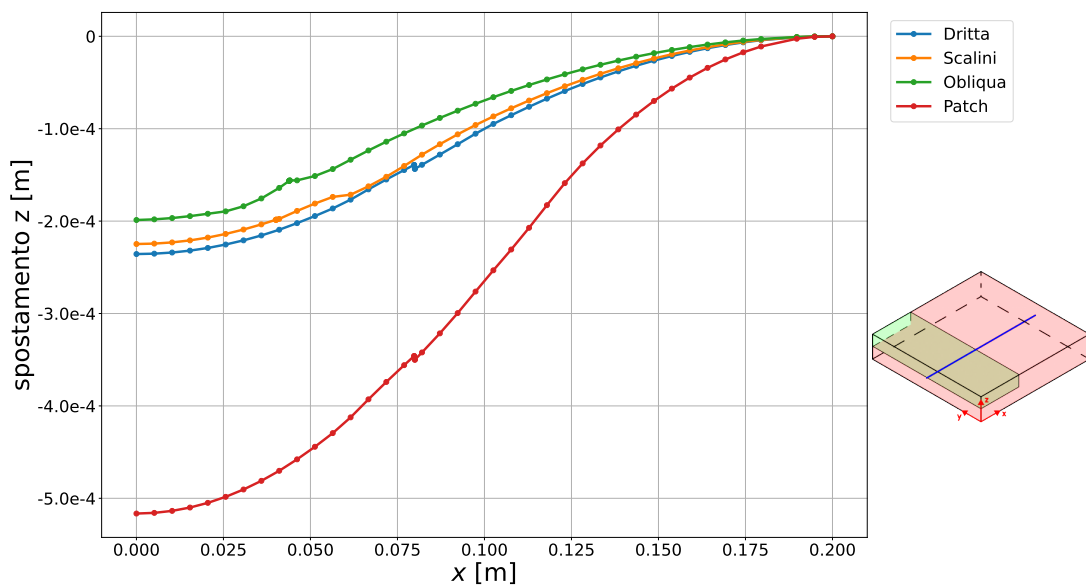


Figura 7.109: Spostamento in direzione z lungo il tratto 3

Tratto 1

Si analizzano ora gli andamenti delle tensioni lungo il tratto 1.

In figura 7.110 si osserva σ_{xx} , in particolare si nota che tutte le geometrie generano un andamento molto simile di tensione con intensità differenti. La geometria dritta è quella che genera le tensioni più basse, seguita dalla geometria con scalini e da quella obliqua. La geometria con patch è quella che genera le tensioni più alte.

La tensione σ_{yy} è riportata in figura 7.111 e si nota che gli andamenti sono molto simili tra loro.

Le σ_{zz} (figura 7.112) sono molto piccole. Solo la riparazione obliqua generano tensioni un pochino più alte che in alcuni punti superano 1 MPa d'intensità. Le tensioni di taglio σ_{xz} sono riportate in figura 7.113 e si nota che tutte le geometrie generano tensioni molto basse, solo la geometria inclinata genera tensioni di taglio più alte che, tuttavia, rimangono trascurabili.

Nella tabella 7.20 si riportano i valori massimi in valore assoluto delle tensioni per ogni geometria di riparazione superficiale.

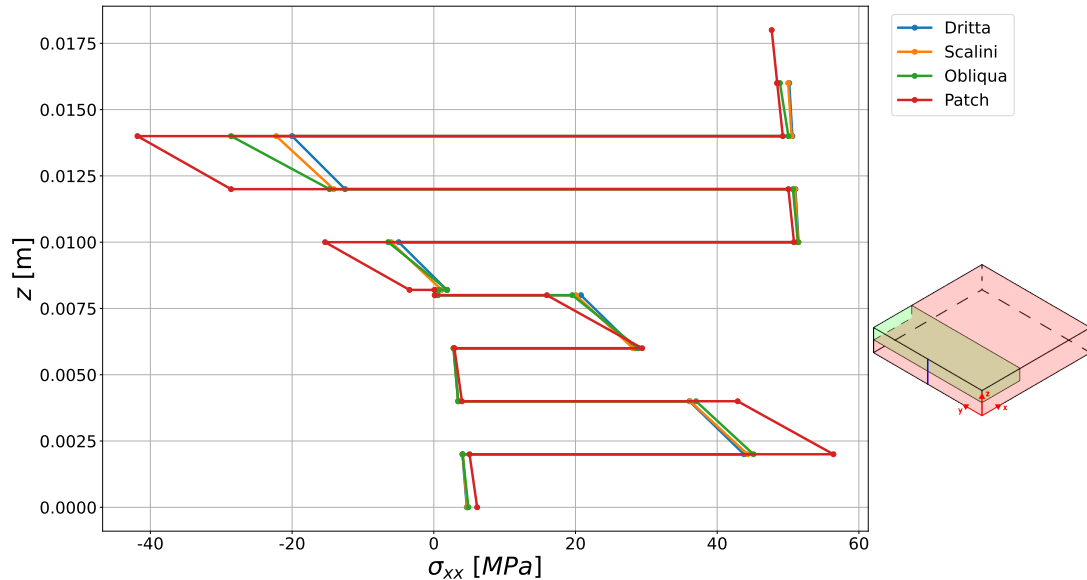


Figura 7.110: Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

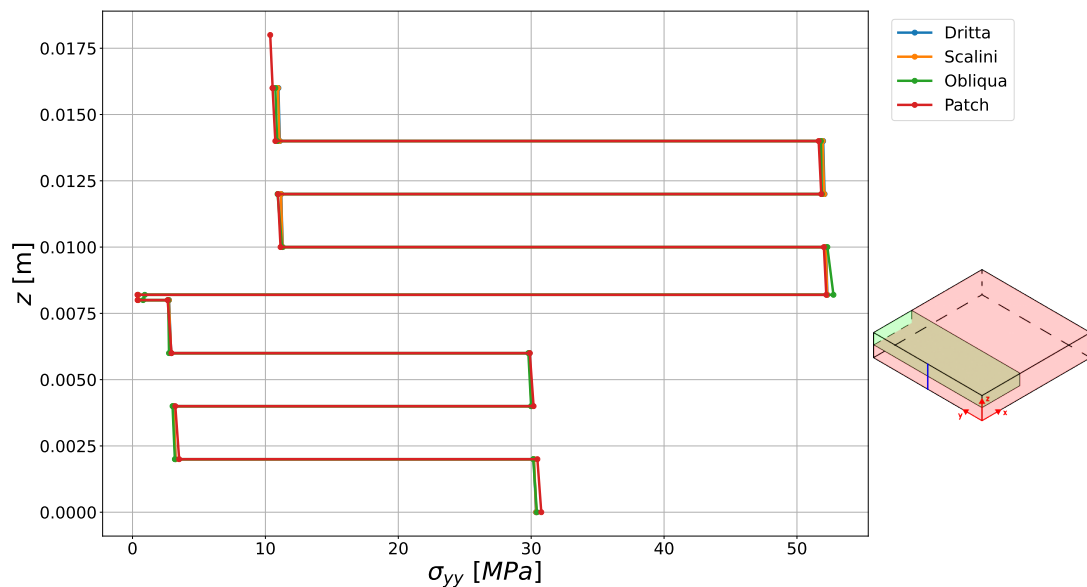


Figura 7.111: Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

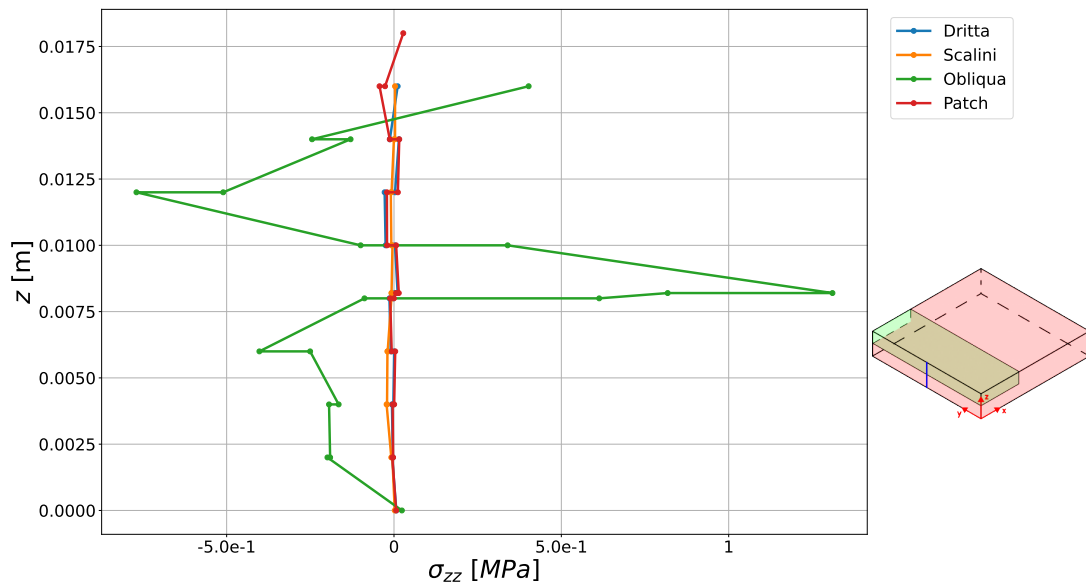


Figura 7.112: Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

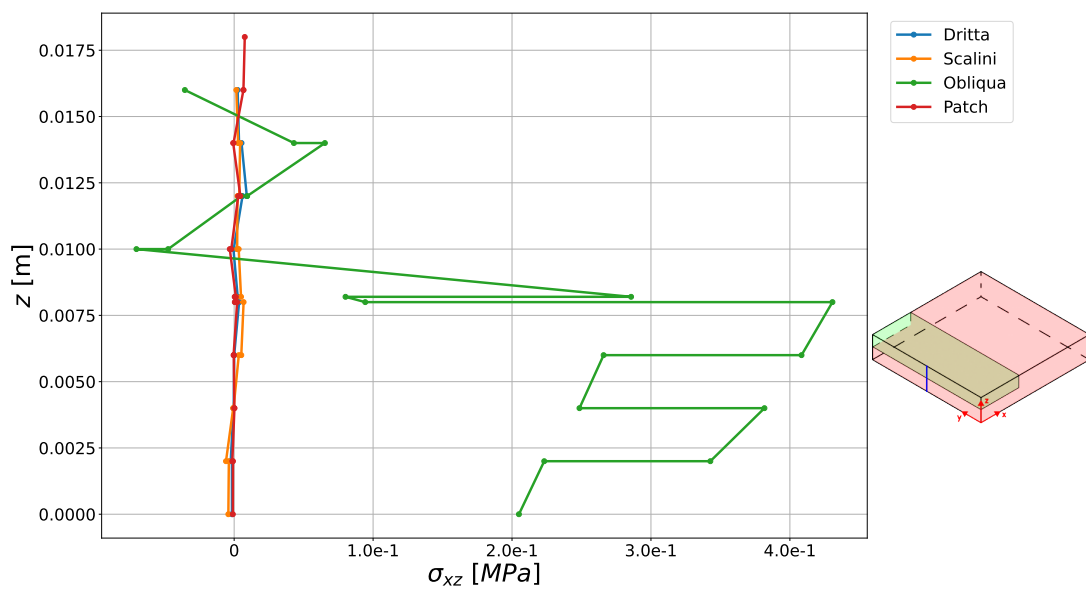


Figura 7.113: Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

	Riferimento	Dritta	Scalini	Inclinata	Patch
σ_{xx} [MPa]	61.88	51.48	51.43	51.38	56.41
σ_{yy} [MPa]	61.89	52.19	52.28	52.75	52.21
σ_{zz} [MPa]	0.392	0.0279	0.0516	1.310	0.0432
σ_{xy} [MPa]	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0
σ_{xz} [MPa]	~ 0	0.009 10	0.0198	0.430	0.007 64
σ_{yz} [MPa]	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0

Tabella 7.20: Confronto delle tensioni massime in valore assoluto alle coordinate $(0, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale

Tratto 2

Si riportano ora gli andamenti delle tensioni lungo il tratto 2.

Le tensioni σ_{xx} sono riportate in figura 7.114 e si nota che gli andamenti sono molto simili tra loro, per quanto riguarda le prime tre geometrie analizzate. La geometria con patch genera le tensioni più alte.

Le tensioni σ_{yy} , riportate in figura 7.115, sono molto simili tra loro. anche le tensioni σ_{zz} (figura 7.116) sono molto simili nelle varie geometrie; solo la riparazione con patch genera tensioni un po' più alte. Le tensioni di taglio σ_{xz} (figura 7.117) sono molto piccole in tutte le geometrie.

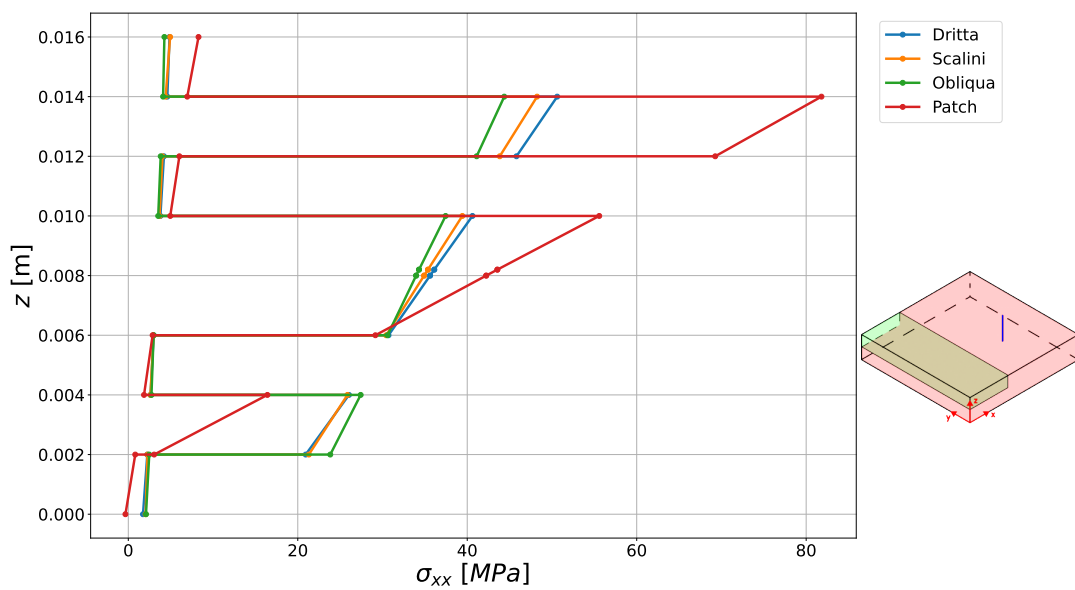


Figura 7.114: Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

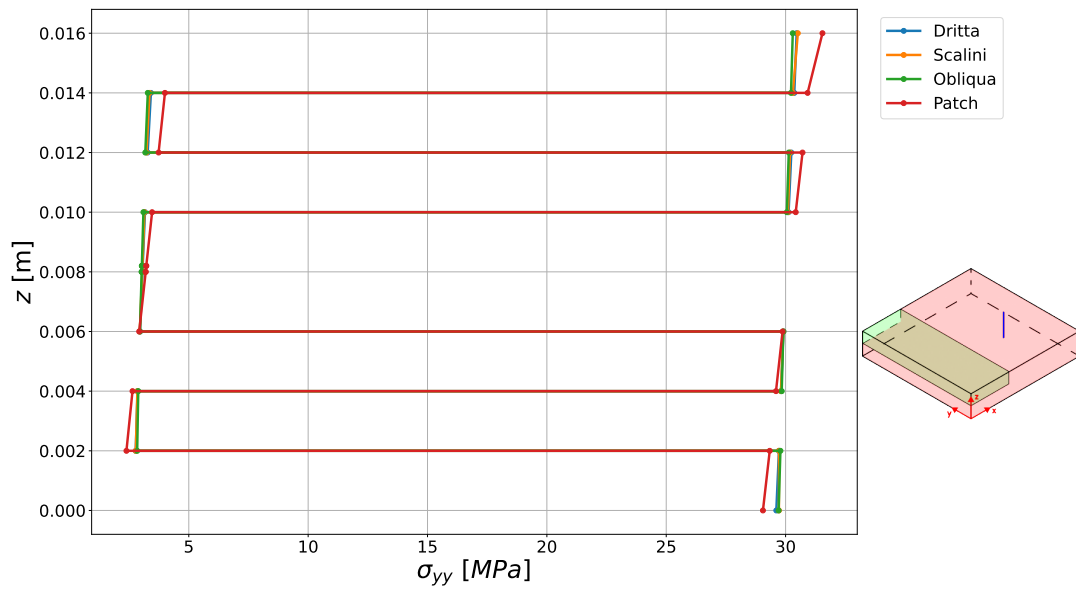


Figura 7.115: Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

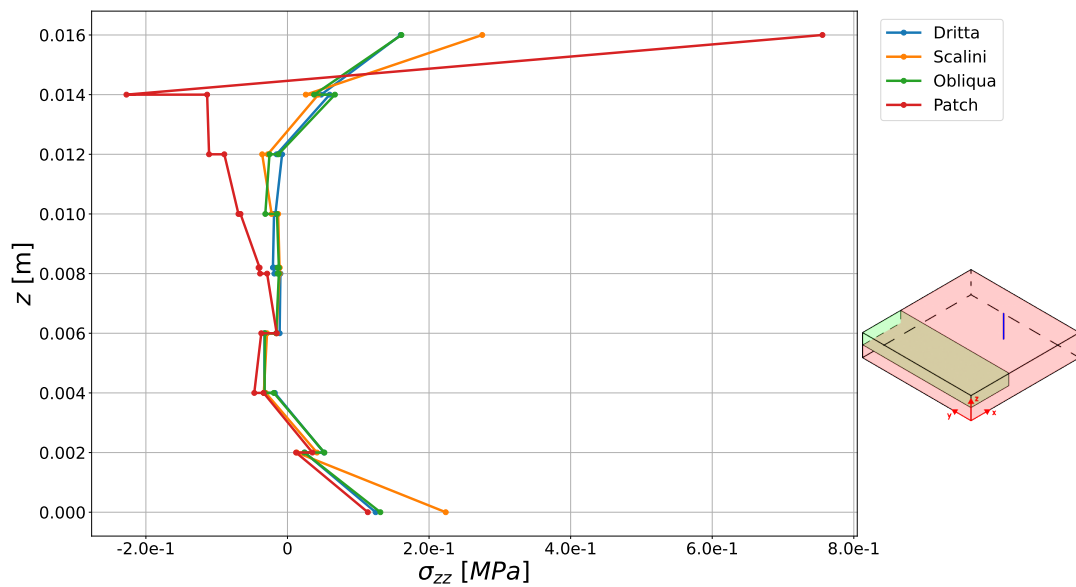


Figura 7.116: Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

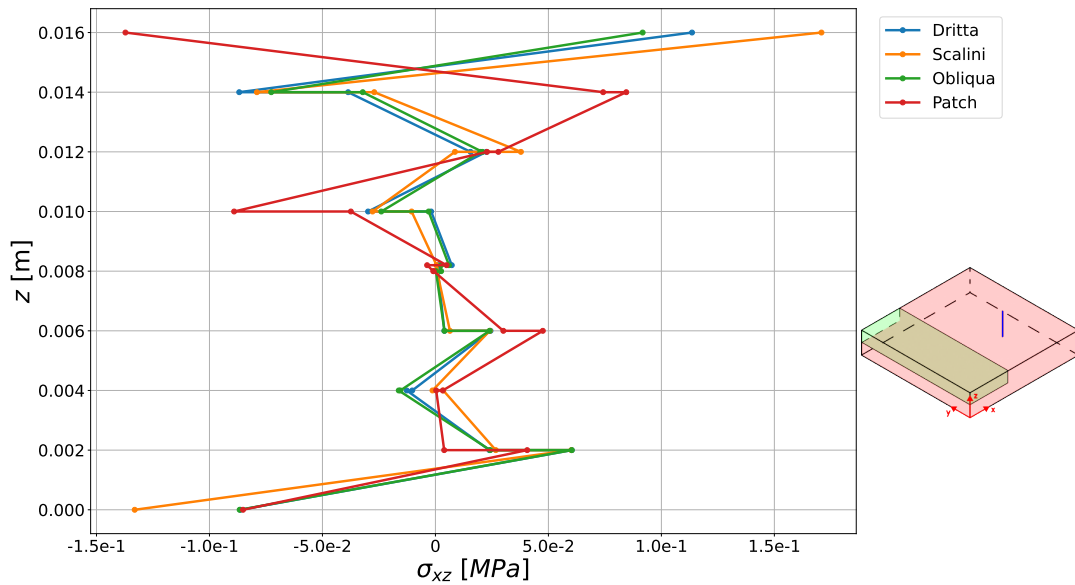


Figura 7.117: Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(0.16, 0.1, z)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

Tratto 3

Si analizzano ora gli andamenti delle tensioni lungo il tratto 3. Le σ_{xx} sono riportate in figura 7.118. Tutte le geometrie analizzate assumono valori molto bassi nella parte curata, la riparazione con patch genera tensioni negative, e tensioni più alte nella parte non curata. La riparazione con patch genera il dislivello maggiore passando da valori negativi a valori superiori a 40 MPa. La tensione in direzione y , riportata in figura 7.119, assume più o meno lo stesso andamento nelle varie geometrie analizzate, cambia solo il punto dell'incollaggio. L'andamento della tensione per la geometria dritta è praticamente sovrapponibile a quella con patch. La σ_{zz} , riportata in figura 7.120, e la σ_{xz} , riportata in figura 7.121, assumono sempre valori trascurabili; sono inoltre presenti dei picchi in corrispondenza del punto di incollaggio tra materiale originale e materiale sostituito.

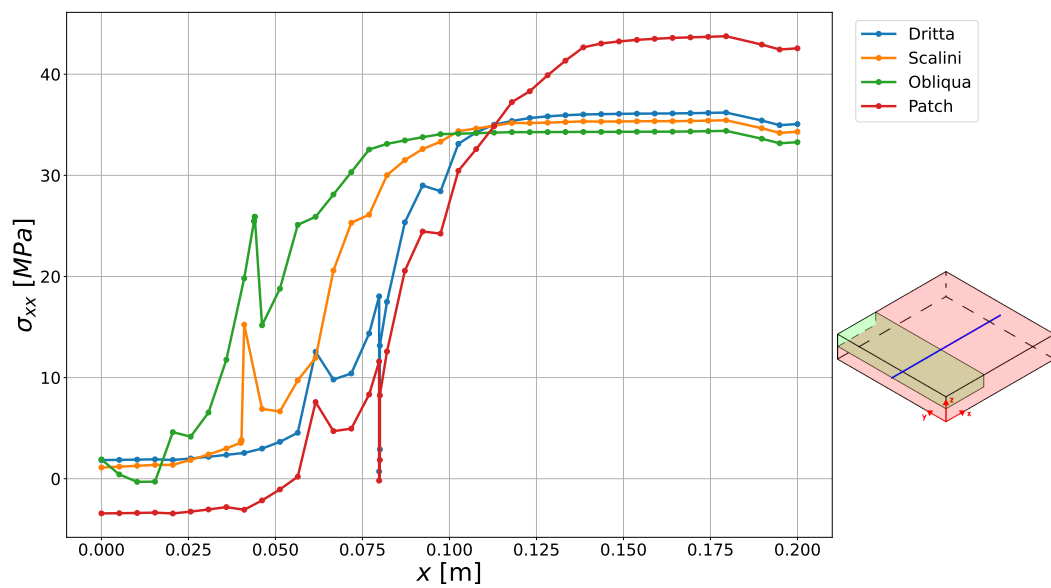


Figura 7.118: Andamento della tensione σ_{xx} alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

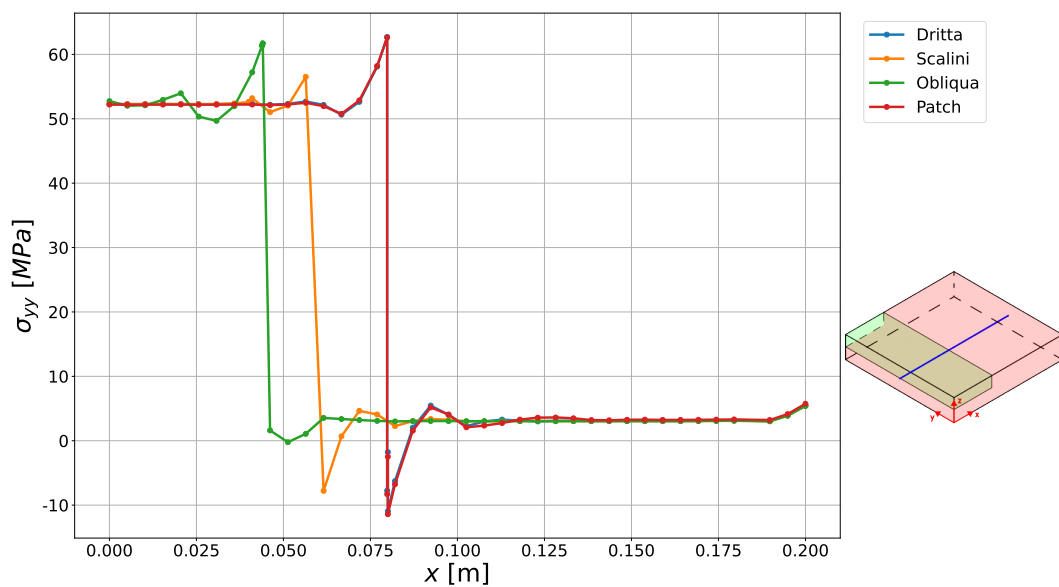


Figura 7.119: Andamento della tensione σ_{yy} alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

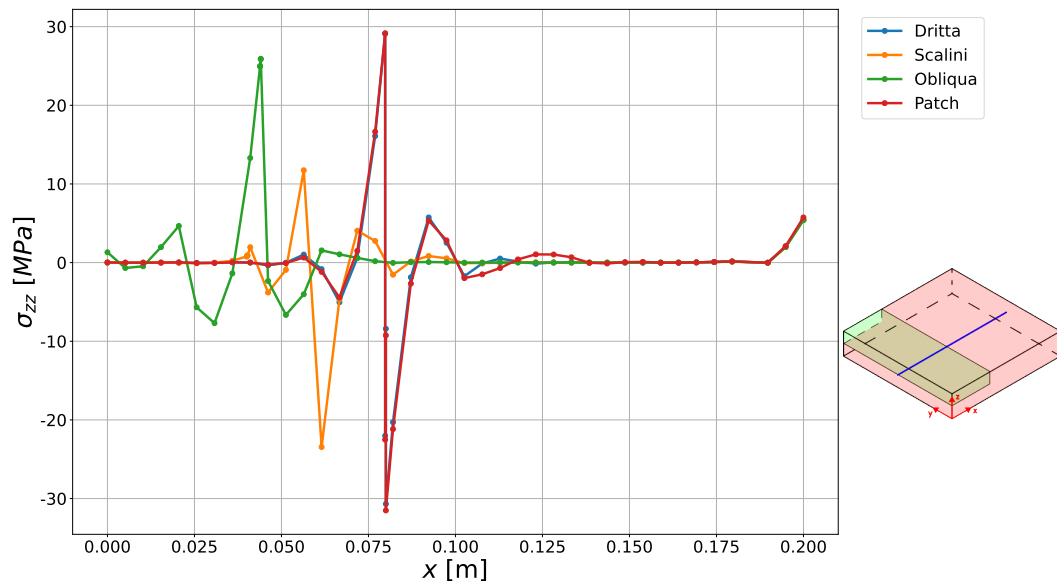


Figura 7.120: Andamento della tensione σ_{zz} alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

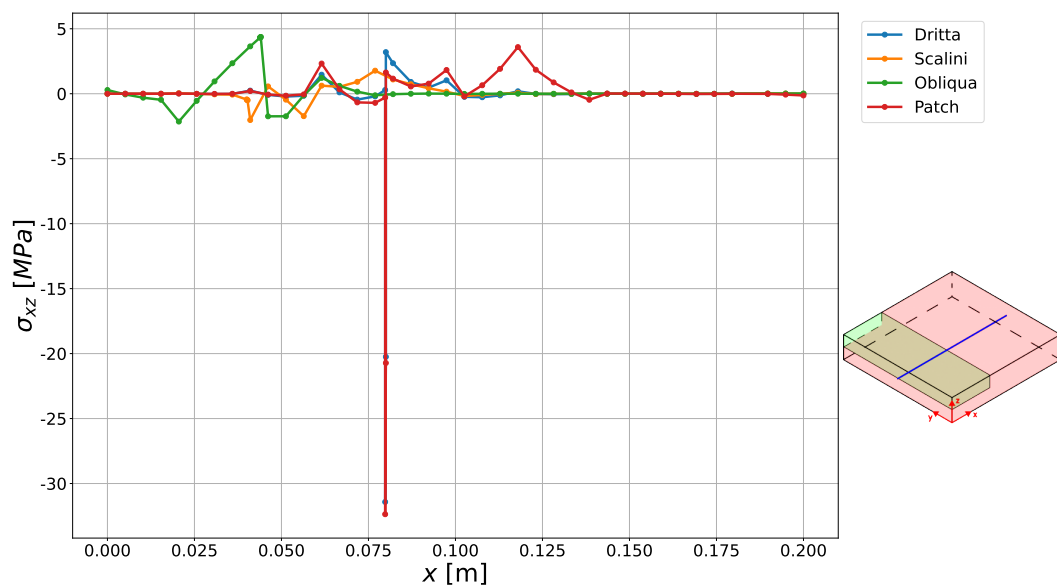


Figura 7.121: Andamento della tensione σ_{xz} alle coordinate $(x, 0.1, 0.0082)$ delle piastre con riparazione superficiale a confronto

Capitolo 8

Conclusioni

L'indagine condotta nell'ambito di questo lavoro di tesi aveva come obiettivo primario la modellazione e l'analisi dettagliata delle deformazioni e delle tensioni indotte all'interno di una piastra in materiale composito dal processo di curing (polimerizzazione) di una riparazione. La metodologia adottata si è concentrata su un approccio bidimensionale, nonostante la formulazione dei modelli fosse definita nello spazio tridimensionale. Questo è stato possibile grazie all'assunzione di geometrie costanti nella direzione y , il che ha permesso di trascurare, in questa fase preliminare, gli effetti tridimensionali completi e gli accoppiamenti fuori dal piano.

Nello specifico, la ricerca ha messo a confronto due approcci distinti di riparazione. Il primo, una riparazione passante, prevedeva la sostituzione totale degli strati del laminato danneggiato. Il secondo, una riparazione superficiale o parziale, coinvolgeva la sostituzione di solo una frazione degli strati.

Un risultato di notevole interesse, emerso da entrambi gli scenari, riguarda l'impatto delle geometrie asimmetriche sul comportamento strutturale dell'intera piastra. Si è chiaramente osservato come il processo di curing, caratterizzato da un ritiro volumetrico della resina, generi flessioni significative non solo nella zona riparata, ma che si propagano all'intera piastra, coinvolgendo anche la parte del laminato non sottoposta a curing. Tale effetto si è manifestato con particolare evidenza in tutte le riparazioni superficiali, essendo per definizione asimmetriche rispetto al piano medio della piastra. Questo fenomeno di accoppiamento termo-meccanico e di flessione indotta dal processo di riparazione rappresenta un fattore critico che deve essere tenuto in stretta considerazione in fase di progettazione e selezione della tipologia di riparazione da applicare in un contesto industriale.

Si può affermare che ciascuna delle geometrie di giunzione analizzate presenta un peculiare compromesso tra vantaggi e svantaggi in termini di distribuzione dello stato tensionale residuo. Per esempio, l'adozione di profili di riparazione che massimizzano la superficie di incollaggio è risultata efficace nel ridurre le componenti di tensione nella direzione longitudinale σ_{xx} all'interfaccia. Tuttavia, la geometria del problema, in particolare la discontinuità e l'angolo di inclinazione della giunzione, favoriscono la concentrazione di elevate tensioni di taglio interlaminare (σ_{xz}) proprio all'interfaccia tra il materiale sostitutivo e la parte originale pre-curata.

In termini generali, i risultati ottenuti sono in linea qualitativa con le attese fisiche e

meccaniche. L'analisi ha confermato la manifestazione di una strizione nella parte curata, attribuibile al ritiro della resina, la flessione nei casi di riparazione asimmetrica e una diminuzione delle proprietà meccaniche del materiale riparato. Quest'ultima è attesa a causa dell'utilizzo di un ciclo di cura che raggiunge temperature massime inferiori rispetto al ciclo di produzione iniziale, comportando una riduzione del grado di cura finale.

Nonostante l'efficacia del modello nel catturare i fenomeni fondamentali, si riconoscono alcuni limiti intrinseci del lavoro svolto. In primo luogo, la taglia della mesh adottata, dettata da vincoli computazionali, non ha consentito di visualizzare con la massima accuratezza le tensioni, in particolare nella zona critica dell'interfaccia di incollaggio. In secondo luogo, è stata adottata l'ipotesi semplificativa che le proprietà meccaniche del materiale pre-curato (originale) e dell'adesivo di incollaggio rimanessero costanti nel tempo e con la temperatura durante il ciclo di curing della riparazione. Nella realtà fisica, questi materiali subiscono delle variazioni, potendo manifestare un degradamento termico-chimico della resina pre-esistente con un conseguente peggioramento delle proprietà fisiche e meccaniche locali del materiale.

Per superare i limiti sopra elencati e migliorare l'accuratezza e la completezza della modellazione, si delineano le seguenti direzioni per ricerche future:

1. Raffinamento della discretizzazione: Sarà indispensabile aumentare la taglia della mesh, in particolare nelle regioni di alta discontinuità (le interfacce di riparazione), per ottenere una migliore risoluzione numerica dello stato tensionale e delle sue concentrazioni.
2. Modellazione evolutiva del materiale originale: È necessario modificare le proprietà del materiale non sostituito e dell'adesivo in funzione della temperatura e del tempo durante il ciclo di cura della riparazione. Questo approccio consentirebbe di includere gli effetti del thermal exposure e di un potenziale aging o degradation del materiale originale.
3. Transizione all'approccio tridimensionale: Sarebbe altamente auspicabile passare a una modellazione pienamente tridimensionale (3D). Ciò permetterebbe di visualizzare gli effetti della riparazione in tutte le direzioni, inclusi gli eventuali accoppiamenti di tensione/deformazione fuori piano, che l'approccio 2D ha necessariamente trascurato.
4. Ottimizzazione del ciclo di cura: Sarà estremamente interessante variare parametri chiave del ciclo di cura, quali la temperatura massima, il tempo per il quale viene mantenuta o la velocità di variazione della temperatura dell'aria. L'obiettivo sarebbe quello di ottimizzare questi parametri per trovare un regime operativo che riduca al minimo le tensioni residue generate, bilanciando al contempo il raggiungimento di un grado di cura adeguato.

In sintesi, il presente lavoro di tesi offre un contributo fondamentale per una migliore comprensione dei complessi fenomeni termo-meccanici che si manifestano nella riparazione di materiali compositi avanzati e pone le basi metodologiche e di analisi per ulteriori e necessari sviluppi futuri nel campo.

Bibliografia

- [1] S. Barlocchetti, "Boeing, fine 2022 con consegne in ripresa," Jan. 2023. [Online]. Available: <https://www.panorama.it/tempo-libero/tecnologia/boeing-dati-2022-ripresa>
- [2] "Compositi nell'industria aeronautica." [Online]. Available: https://www.appropedia.org/Composites_in_the_Aircraft_Industry/it
- [3] "Aviation Maintenance Technician Handbook," Tech. Rep., 2023. [Online]. Available: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/FAA-H-8083-31B_Aviation_Maintenance_Technician_Handbook.pdf
- [4] A. Brasington, C. Sacco, J. Halbritter, R. Wehbe, and R. Harik, "Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward," *Composites Part C: Open Access*, vol. 6, p. 100182, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666682021000773>
- [5] E. Zappino and M. Santori, "01PERMT - Tecnologie aerospaziali: Autoclave," Politecnico di Torino, 2025.
- [6] —, "01PERMT - Tecnologie aerospaziali: Termochimica," Politecnico di Torino, 2025.
- [7] C. Badini, *Materiali compositi per l'ingegneria*, 2013.
- [8] V. Giurgiutiu, "Stress, Vibration, and Wave Analysis in Aerospace Composites," in *Stress, Vibration, and Wave Analysis in Aerospace Composites*, V. Giurgiutiu, Ed. Academic Press, 2022, pp. 1–27. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128133088000065>
- [9] E. Zappino, "01PERMT - Tecnologie aerospaziali: Processi produttivi," Politecnico di Torino, 2025.
- [10] P. Ciriscioli and G. Springer, *Smart autoclave cure of composites*. Technomic, 1990.
- [11] SZ, "Il processo in autoclave in Bucci Composites." [Online]. Available: <https://www.bucci-industries.com/it/al/N/processo-in-autoclave>
- [12] S. Mohammadi, M. Yousefi, and M. Khazaei, "A review on composite patch repairs and the most important parameters affecting its efficiency and durability," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 40, no. 1–2, pp. 3–15, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0731684420941602>

- [13] C. N. Duong and C. H. Wang, Eds., *Composite repair: theory and design*. Amsterdam Boston: Elsevier, 2010.
- [14] "DIMEAS - MUL2 (MULTilayered structures and MULTifield analyses)." [Online]. Available: https://www.dimeas.polito.it/la_ricerca/gruppi/mul2_multilayered_structures_and_multifield_analyses
- [15] E. Zappino, N. Zobeiry, M. Petrolo, R. Vaziri, E. Carrera, and A. Poursartip, "Analysis of process-induced deformations and residual stresses in curved composite parts considering transverse shear stress and thickness stretching," *Composite Structures*, vol. 241, p. 112057, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822319337043>
- [16] E. Carrera, M. Cinefra, E. Zappino, and M. Petrolo, *Finite Element Analysis of Structures Through Unified Formulation*, 1st ed. Wiley, Aug. 2014. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118536643>
- [17] M. Petrolo, "Advanced aeroelastic models for the analysis of lifting surfaces made of composite materials," Ph.D. dissertation, Politecnico di Torino, 2011.
- [18] E. Oñate, *Structural Analysis with the Finite Element Method Linear Statics*, ser. Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences, E. Oñate, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-8743-1>
- [19] E. Carrera and M. Cinefra, *Fondamenti di meccanica strutturale per Allievi Ingegneri Aerospaziali*, seconda ed. CLUT.
- [20] K. Surana and S. Nguyen, "Two-dimensional curved beam element with higher-order hierarchical transverse approximation for laminated composites," *Computers & Structures*, vol. 36, no. 3, pp. 499–511, Jan. 1990. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0045794990902849>
- [21] E. Carrera, M. Filippi, P. Mahato, and A. Pagani, "Accurate static response of single- and multi-cell laminated box beams," *Composite Structures*, vol. 136, pp. 372–383, Feb. 2016. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822315009526>
- [22] E. Carrera, E. Zappino, and G. Li, "Finite element models with node-dependent kinematics for the analysis of composite beam structures," *Composites Part B: Engineering*, vol. 132, pp. 35–48, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836817304985>
- [23] A. Johnston, R. Vaziri, and A. Poursartip, "A Plane Strain Model for Process-Induced Deformation of Laminated Composite Structures," *Journal of Composite Materials*, vol. 35, no. 16, pp. 1435–1469, Aug. 2001. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1106/YXEA-5MH9-76J5-BACK>
- [24] P. Beaumont, C. Soutis, and A. Hodzic, *Structural Integrity and Durability of Advanced Composites*. Woodhead Publishing Limited, 2015. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20140014694>

- [25] Y. Kepir, A. Günöz, and M. Kara, "Repairing of damaged composite materials and self-healing composites," *Turkish Journal of Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 149–155, Apr. 2022, publisher: Turkish Journal of Engineering. [Online]. Available: <http://dergipark.org.tr/en/doi/10.31127/tuje.866955>
- [26] R. Jones, A. Baker, N. Matthews, and V. Champagne, *Aircraft sustainment and repair*. Elsevier, 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081005408099878>