



Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle scienze di Base

Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione
Industriale “DICMaPi”

Tesi di Dottorato di Ricerca

in

Ingegneria dei Materiali e delle Strutture - XXVIII Ciclo

**Strategie di ottimizzazione di giunti in materiale
composito a matrice termoplastica ottenuti
mediante Induction Welding**

Tutors:

Ch.mo Prof. Ing. Giuseppe Mensitieri

Prof. Ing. Antonio Gloria

Autore:

Dott. Ing. Francesco Galise

Coordinatore:

Ch.mo Prof. Ing. Giuseppe Mensitieri

Indice

Indice delle Figure	VIII
Indice delle Tabelle.....	XX
Sommario.....	XXII
1. Materiali compositi	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Materiali a matrice polimerica	1
1.3 Compositi a matrice termoindurente	3
1.4 Compositi a matrice termoplastica	4
2. Tecnologie di giunzione dei termoplastici	7
2.1 Introduzione	7
2.2 Processi di saldatura di materiali termoplastici	9
2.3 Steps fondamentali nella saldatura di plastiche e compositi	10
2.3.1 Preparazione delle superfici.....	10
2.3.2 Riscaldamento.....	11
2.3.3 Pressione	16
2.3.4 Diffusione intermolecolare	19
2.3.5 Raffreddamento	21
3. Saldatura a induzione elettromagnetica	23
3.1 Introduzione	23

3.2	Proprietà magnetica del materiale	23
3.2.1	Paramagnetismo	25
3.2.2	Magnetismo Cooperativo.....	25
3.2.3	Ferromagnetismo	26
3.2.4	Anti-ferromagnetismo e ferrimagnetismo	26
3.2.5	Domini	26
3.2.6	Isteresi magnetica	27
3.2.7	Influenza della temperatura.....	28
3.2.8	La rappresentazione di Frolich	29
3.3	Relazioni costitutive e concetti base.....	29
3.3.1	Equazioni di Maxwell	29
3.3.2	Equazioni costitutive	31
3.3.3	Le condizioni al contorno	33
3.3.4	Il vettore di Poynting.....	33
3.3.5	L'equazione di diffusione	34
3.3.6	Effetto pelle.....	36
3.3.7	Linearizzazione della permeabilità.....	37
3.3.8	Unità nei campi elettromagnetici	39
3.4	Trasferimento del calore	39
3.4.1	Modalità di trasferimento di calore	39
3.4.2	Conduzione	40
3.4.3	Convezione.....	40
3.4.4	Irraggiamento.....	41
3.4.5	L'equazione di conduzione del calore	42
3.5	Meccanismo di riscaldamento nei compositi termoplastici rinforzati con fibre di carbonio	43
3.5.1	Perdite per effetto Joule	44
3.5.2	Riscaldamento per perdite dielettriche	45
3.5.3	Riscaldamento causato dalle resistenze di contatto.....	46

3.5.4	Confronto tra perdite per effetto Joule e riscaldamento dei nodi	46
3.6	Effetto di bordo	47
4.	Simulazione numerica del processo	49
4.1	Introduzione	49
4.2	JMag Designer	49
4.3	Modellazione del fenomeno fisico	50
4.4	Modello di analisi delle perdite per effetto Joule	52
4.5	Modello dell'analisi termica	55
4.6	Prima sessione di simulazione	56
4.6.1	Processo di modellazione	57
4.6.2	Simulazione n. 1.1	59
4.6.3	Simulazione n. 1.2	61
4.6.4	Simulazione n. 1.3	63
4.6.5	Simulazione n. 1.4	64
4.7	Seconda sessione di simulazione	66
4.7.1	Simulazione n. 2.1	67
4.7.2	Simulazione n. 2.2	69
4.7.3	Simulazione n. 2.3	71
4.7.4	Simulazione n. 2.4	72
4.7.5	Simulazione n. 2.5	75
4.7.6	Simulazione n. 2.6	77
5.	Prima serie di sperimentazione	80
5.1	Introduzione	80

5.2	Descrizione attrezzatura	80
5.2.1	Macchina ad induzione Egma 30R	80
5.2.2	Pirometro ottico	83
5.2.3	Telecamera/Fotocamera termografica	85
5.2.4	Materiale utilizzato	86
5.2.5	Attrezzatura prove meccaniche	87
5.3	Prima sessione di prove sperimentali	87
5.3.1	Risultati della prima sessione di prove sperimentali	89
5.4	Confronto tra simulazione e sperimentazione	93
6.	Seconda serie di simulazioni	97
6.1	Introduzione	97
6.2	Processo di modellazione	99
6.3	Simulazioni	101
7.	Seconda serie di sperimentazione.....	108
7.1	Introduzione	108
7.2	Attrezzatura utilizzata	109
7.2.1	Fibre Ottiche.....	109
7.3	Seconda sessione di prove sperimentali.....	113
7.4	Prove di caratterizzazione meccanica	124
8.	Correlazione numerico sperimentale	136
8.1	Introduzione	136

8.2	Confronto numerico-sperimentale delle temperature.....	151
8.3	Risultati prove di Taglio.....	166
8.4	Analisi statistica dei risultati	169
8.4.1	Main Effect Plot.....	171
8.4.2	Interaction Plot	173
8.4.3	Multi-Vari Chart.....	176
Conclusione		196
Bibliografia		198
Ringraziamenti		199

Indice delle Figure

Figura 1.1: Schema di una catena polimerica	2
Figura 1.2: Catene Polimeriche	4
Figura 1.3: Diagramma tensione-deformazione per una resina termoindurente	4
Figura 1.4: Rappresentazione schematica della distinzione tra morfologia amorfa e semicristallina in polimeri termoplastici.....	5
Figura 1.5: Modulo di resistenza al taglio, per polimeri amorfi, semicristallini e reticolati. ...	6
Figura 2.1: Tecnologie di giunzione dei compositi termoplastici.....	7
Figura 2.2: Processi di saldatura dei compositi.....	9
Figura 2.3: Confronto tra perdite di calore per conduzione, convezione e irraggiamento ...	13
Figura 2.4: Diffusione termica per un polimero (sopra), composito on fibre di grafite in direzione trasversale (centro), e in direzione longitudinale (sotto)	14
Figura 2.5: Modello di un solido semi-infinito soggetto a un flusso di calore superficiale....	14
Figura 2.6: Modello di un solido semi-infinito soggetto a riscaldamento superficiale mediante fenomeno convettivo.....	15
Figura 2.7: Modello per una superficie semi-infinita soggetta ad una temperatura superficiale costante.....	16
Figura 2.8: Schema delle due superfici a contatto	17
Figura 2.9: Vista di una singola asperità	17
Figura 2.10: Modello di schiacciamento di una singola asperità	18
Figura 2.11: Diffusione intermolecolare attraverso l'interfaccia	19

Figura 2.12: Teoria dei tubi immaginari usata per descrivere i vincoli applicati alla diffusione delle catene.....	21
Figura 2.13: Difetto tipico della saldatura a gas caldo	22
Figura 3.1: Rappresentazione schematica l'allineamento dei momenti magnetici per diversi tipi di materiali	25
Figura 3.2: Curve di isteresi magnetica	27
Figura 3.3: Le perdite di calore dovute alle modalità convezione e irraggiamento. Le linee continue rappresentano le perdite di calore per irraggiamento con un valore di emissività che varia tra 0,1-0,8 e con un aumento di 0,1 per ogni linea. Le linee tratteggiate rappresentano la perdita di calore per convezione secondo l'Eq. (3.50).	41
Figura 3.4: Schema riepilogativo dei meccanismi di riscaldamento di un laminato "cross-ply"	44
Figura 3.5: Modello elettrico del riscaldamento dovuto alle perdite dielettriche	46
Figura 3.6: Modello del riscaldamento causato dalla resistenza di contatto	46
Figura 3.7: Effetto di bordo	48
Figura 4.1: Relazione tra fenomeno fisico e modello di analisi	51
Figura 4.2: Steps necessari per effettuare l'analisi	51
Figura 4.3: Schema circuito elettrico	53
Figura 4.4: Schema dell'impianto di saldatura.....	58
Figura 4.5: Induttore a panierino	59
Figura 4.6: Provini in CFRP	59
Figura 4.7: Supporto.....	59
Figura 4.8: Profilo di temperatura giunto n.1	60

Figura 4.9: Profilo di temperatura lungo lo spessore.....	61
Figura 4.10: Profilo di temperatura provino inferiore	61
Figura 4.11: Profilo di temperatura lungo lo spessore del giunto	62
Figura 4.12: Andamento della temperatura nel giunto	62
Figura 4.13: Profilo di temperatura lungo lo spessore del giunto	63
Figura 4.14: Profilo di temperatura all'interfaccia del giunto.....	64
Figura 4.15: Profilo di temperatura nel giunto	65
Figura 4.16: Distribuzione di temperatura nel giunto dopo 15 secondi	65
Figura 4.17: Profilo di temperatura nei provini	67
Figura 4.18: Temperatura nello spessore	68
Figura 4.19: Andamento temperatura all'interfaccia per gli ultimi 4 steps.....	68
Figura 4.20: Profilo di temperatura.....	69
Figura 4.21: Profilo di temperatura lungo lo spessore	70
Figura 4.22: Profilo di temperatura lungo l'interfaccia.....	70
Figura 4.23: Profilo di temperatura nel tempo	71
Figura 4.24: Andamento della temperatura lungo l'interfaccia.....	72
Figura 4.25: Profilo di temperatura.....	73
Figura 4.26: Profilo di temperatura lungo lo spessore del giunto	73
Figura 4.27: Temperatura all'interfaccia step 21-27	74
Figura 4.28: Distribuzione di temperatura nel provino.....	74
Figura 4.29: Profilo di temperatura provini	75

Figura 4.30: Profilo di temperatura lungo lo spessore	76
Figura 4.31: Profilo di temperatura lungo l'interfaccia.....	76
Figura 4.32: Profilo di temperatura nel provino	77
Figura 4.33: Temperatura lungo lo spessore	78
Figura 4.34: Temperatura all'interfaccia	78
Figura 4.35: Ultimi steps di calcolo	79
Figura 5.1: Generatore Egma 30R	81
Figura 5.2: Modalità di lavoro della macchina	82
Figura 5.3: Heating timer	82
Figura 5.4: Parametri operativi	82
Figura 5.5: Parametri di controllo per il processo automatico	83
Figura 5.6: Immagine termocamera Fluke Ti9:	85
Figura 5.7: Scheda Tecnica materiale utilizzato	86
Figura 5.8: Attrezzatura di prova utilizzata	89
Figura 5.9: Giunto 2.2.....	91
Figura 5.10: Giunto 2.3.....	91
Figura 5.11: Giunto 2.5.....	92
Figura 5.12: Giunto 2.6.....	93
Figura 5.13: Confronto Giunto 1.1	94
Figura 5.14: Confronto Giunto 1.3	94
Figura 5.15: Confronto giunto 1.5.....	94

Figura 5.16: Confronto Giunto 2.3	95
Figura 5.17: Confronto Giunto 2.6	96
Figura 5.18: Risultati prove di taglio	96
Figura 6.1: Schema dell'impianto di saldatura.....	100
Figura 6.2: Induttore	100
Figura 6.3: Provini in CFRP	100
Figura 6.4: Supporto.....	100
Figura 6.5: Soluzione Tipo	101
Figura 6.6: Linea di misura della temperatura	102
Figura 6.7: Simulazione 1.1.3	103
Figura 6.8: Simulazione 1.2.3	103
Figura 6.9: Simulazione 1.3.3	104
Figura 6.10: Simulazione 2.1.3	104
Figura 6.11: Simulazione 2.2.3	105
Figura 6.12: Simulazione 2.3.3	105
Figura 6.13: Simulazione 3.1.3	106
Figura 6.14: Simulazione 3.2.3	106
Figura 6.15: Simulazione 3.3.3	107
Figura 7.1: Provino strumentato con fibra ottica in mezzeria	108
Figura 7.2: Provino strumentato con fibra ottica laterale	109
Figura 7.3: Schema costruttivo e principio di funzionamento del probe Opsens OTG-F.....	111

Figura 7.4: Interrogatore TempSens a 2 canali ottici.....	111
Figura 7.5: Fibra ottica Opsens®	112
Figura 7.6: Tubicino in alluminio L = 20 mm, Diam. Int. = 200 μ m, Diam. Ext. = 400 μ m. ...	113
Figura 7.7: Serie 300V - 250°C - 10s - 20s - 30s.....	114
Figura 7.8: Serie 300V - 260°C - 10s - 20s - 30s.....	115
Figura 7.9: Serie 300V - 270°C - 10s - 20s - 30s.....	115
Figura 7.10: Serie 400V - 250°C - 10s - 20s - 30s.....	116
Figura 7.11: Serie 400V - 260°C - 10s - 20s - 30s.....	116
Figura 7.12: Serie 400V - 270°C - 10s - 20s - 30s.....	117
Figura 7.13: Serie 350V - 250°C - 10s - 20s - 30s.....	117
Figura 7.14: Serie 350V - 260°C - 10s - 20s - 30s.....	118
Figura 7.15: Serie 350V - 270°C - 10s - 20s - 30s.....	118
Figura 7.16: Serie con fibra ottica 300V - 250°C - 10s - 20s - 30s	119
Figura 7.17: Serie con fibra ottica 300V - 260°C - 10s - 20s - 30s	119
Figura 7.18: Serie con fibra ottica 300V - 270°C - 10s - 20s - 30s	120
Figura 7.19: Serie con fibra ottica 400V - 250°C - 10s - 20s - 30s	120
Figura 7.20: Serie con fibra ottica 400V - 260°C - 10s - 20s - 30s	121
Figura 7.21: Serie con fibra ottica 400V - 270°C - 10s - 20s - 30s	121
Figura 7.22: Serie con fibra ottica 350V - 250°C - 10s - 20s - 30s	122
Figura 7.23: Serie con fibra ottica 350V - 260°C - 10s - 20s - 30s	122
Figura 7.24: Serie con fibra ottica 350V - 270°C - 10s - 20s - 30s	123

Figura 7.25: Provino durante la prova di trazione	124
Figura 7.26: Serie 300V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati.....	126
Figura 7.27: Serie 300V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati.....	127
Figura 7.28: Serie 300V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati.....	127
Figura 7.29: Serie 400V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati.....	128
Figura 7.30: Serie 400V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati.....	128
Figura 7.31: Serie 400V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati.....	129
Figura 7.32: Serie 350V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati.....	129
Figura 7.33: Serie 350V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati.....	130
Figura 7.34: Serie 350V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati.....	130
Figura 7.35: Serie con fibra ottica 300V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati	131
Figura 7.36: Serie con fibra ottica 300V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati	131
Figura 7.37: Serie con fibra ottica 300V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati	132
Figura 7.38: Serie con fibra ottica 400V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati	132
Figura 7.39: Serie con fibra ottica 400V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati	133
Figura 7.40: Serie con fibra ottica 400V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati	133
Figura 7.41: Serie con fibra ottica 350V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati	134
Figura 7.42: Serie con fibra ottica 350V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati	134
Figura 7.43: Serie con fibra ottica 350V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati	135
Figura 8.1: Confronto Giunto 300V - 250°C - 10s.....	137
Figura 8.2: Confronto Giunto 300V - 250°C - 20s.....	137

Figura 8.3: Confronto Giunto 300V - 250°C - 30s.....	138
Figura 8.4: Confronto Giunto 300V - 260°C - 10s.....	138
Figura 8.5: Confronto Giunto 300V - 260°C - 20s.....	139
Figura 8.6: Confronto Giunto 300V - 260°C - 30s.....	139
Figura 8.7: Confronto Giunto 300V - 270°C - 10s.....	140
Figura 8.8: Confronto Giunto 300V - 270°C - 20s.....	140
Figura 8.9: Confronto Giunto 300V - 270°C - 30s.....	141
Figura 8.10: Confronto Giunto 400V - 250°C - 10s.....	141
Figura 8.11: Confronto Giunto 400V - 250°C - 20s.....	142
Figura 8.12: Confronto Giunto 400V - 250°C - 30s.....	142
Figura 8.13: Confronto Giunto 400V - 260°C - 10s.....	143
Figura 8.14: Confronto Giunto 400V - 260°C - 20s.....	143
Figura 8.15: Confronto Giunto 400V - 260°C - 30s.....	144
Figura 8.16: Confronto Giunto 400V - 270°C - 10s.....	144
Figura 8.17: Confronto Giunto 400V - 270°C - 20s.....	145
Figura 8.18: Confronto Giunto 400V - 270°C - 30s.....	145
Figura 8.19: Confronto Giunto 350V - 250°C - 10s.....	146
Figura 8.20: Confronto Giunto 350V - 250°C - 20s.....	146
Figura 8.21: Confronto Giunto 350V - 250°C - 30s.....	147
Figura 8.22: Confronto Giunto 350V - 260°C - 10s.....	147
Figura 8.23: Confronto Giunto 350V - 260°C - 20s.....	148

Figura 8.24: Confronto Giunto 350V - 260°C - 30s.....	148
Figura 8.25: Confronto Giunto 350V - 270°C - 10s.....	149
Figura 8.26: Confronto Giunto 350V - 270°C - 20s.....	149
Figura 8.27: Confronto Giunto 350V - 270°C - 30s.....	150
Figura 8.28: Temperatura Giunto 1.2.1	151
Figura 8.29: Temperatura Giunto 1.2.2	152
Figura 8.30: Temperatura Giunto 1.2.3	152
Figura 8.31: Temperatura Giunto 1.3.1	154
Figura 8.32: Temperatura Giunto 1.3.2	154
Figura 8.33: Temperatura Giunto 1.3.3	155
Figura 8.34: Temperatura Giunto 2.1.1	156
Figura 8.35: Temperatura Giunto 2.1.2	156
Figura 8.36: Temperatura Giunto 2.1.3	157
Figura 8.37: Temperatura Giunto 2.2.1	157
Figura 8.38: Temperatura Giunto 2.2.2	158
Figura 8.39: Temperatura Giunto 2.2.3	158
Figura 8.40: Temperatura Giunto 2.3.1	159
Figura 8.41: Temperatura Giunto 2.3.2	159
Figura 8.42: Temperatura Giunto 2.3.3	160
Figura 8.43: Temperatura Giunto 3.1.1	161
Figura 8.44: Temperatura Giunto 3.1.2	161

Figura 8.45: Temperatura Giunto 3.1.3	162
Figura 8.46: Temperatura Giunto 3.2.1	162
Figura 8.47: Temperatura Giunto 3.2.2	163
Figura 8.48: Temperatura Giunto 3.2.3	163
Figura 8.49: Temperatura Giunto 3.3.1	164
Figura 8.50: Temperatura Giunto 3.3.2	164
Figura 8.51: Temperatura Giunto 3.3.3	165
Figura 8.52: Esempio di misurazione effettuata con ImageJ	166
Figura 8.53: Istogramma dei valori di sforzo di taglio.....	170
Figura 8.54: Grafico degli effetti principali dei fattori Voltaggio, Temperatura e Tempo sulla risposta Stress	172
Figura 8.55: Interazione tra fattori Voltaggio, Temperatura e Tempo sulla risposta Stress	173
Figura 8.56: Interaction Plot illustrato	175
Figura 8.57: Multi-Vari Chart illustrato	177
Figura 8.58: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Voltaggio, Temperatura e Tempo	178
Figura 8.59: Influenza del Voltaggio sullo Stress.....	178
Figura 8.60: Influenza della Temperatura sullo Stress.....	179
Figura 8.61: Influenza del Tempo sullo Stress.....	179
Figura 8.62: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Voltaggio, Tempo e Temperatura	181
Figura 8.63: Influenza del Voltaggio sullo Stress.....	181

Figura 8.64: Influenza del Tempo sullo Stress.....	182
Figura 8.65: Influenza della Temperatura sullo Stress.....	182
Figura 8.66: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Temperatura, Voltaggio e Tempo	183
Figura 8.67: Influenza del Temperatura sullo Stress.....	184
Figura 8.68: Influenza del Voltaggio sullo Stress.....	184
Figura 8.69: Influenza del Tempo sullo Stress.....	185
Figura 8.70: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Temperatura, Tempo e Voltaggio	186
Figura 8.71: Influenza della Temperatura sullo Stress.....	186
Figura 8.72: Influenza del Tempo sullo Stress.....	187
Figura 8.73: Influenza del Voltaggio sullo Stress.....	187
Figura 8.74: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Tempo, Voltaggio e Temperatura	188
Figura 8.75: Influenza del Tempo sullo Stress.....	189
Figura 8.76: Influenza del Voltaggio sullo Stress.....	189
Figura 8.77: Influenza della Temperatura sullo Stress.....	190
Figura 8.78: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Tempo, Temperatura e Voltaggio	191
Figura 8.79: Influenza del Tempo sullo Stress.....	191
Figura 8.80: Influenza della Temperatura sullo Stress.....	192
Figura 8.81: Influenza del Voltaggio sullo Stress.....	192

Figura 8.82: Grafico 3D dello Stress in base a Voltaggio e Temperatura.....	193
Figura 8.83: Contour Plot di Temperatura e Tempo	194
Figura 8.84: Contour Plot di Voltaggio e Temperatura	195
Figura 8.85: Contour Plot di Voltaggio e Tempo	195

Indice delle Tabelle

Tabella 3.1: Grandezze fondamentali nell'elettromagnetismo	39
Tabella 4.1: Proprietà fisiche della bobina di rame	52
Tabella 4.2: Proprietà fisiche dei provini	53
Tabella 4.3: Proprietà fisiche del supporto	53
Tabella 4.4: Parametri della prima serie di simulazioni	57
Tabella 4.5: Riepilogo seconda serie di simulazioni	66
Tabella 5.1: Caratteristiche tecniche della macchina	83
Tabella 5.2: Parametri di saldatura	88
Tabella 5.3: Parametri di saldatura serie 2	88
Tabella 6.1: Riepilogo Livello-Fattore.....	98
Tabella 7.1: Resistenza a taglio dei giunti realizzati.....	125
Tabella 8.1: Valori delle misurazioni effettuate con ImageJ	167
Tabella 8.2: Sforzi ottenuti dai giunti testati e valor medio.....	168
Tabella 8.3: Tabella utilizzata in Minitab	169

Sommario

Un modo per migliorare l'emissione e l'efficienza degli autoveicoli è ridurre il peso, e per questo scopo si è pensato di sostituire i materiali metallici con i compositi.

La rapida crescita della domanda di tali materiali ha reso necessario lo studio di metodi di produzione più economici e veloci per la produzione di strutture composite.

Rispetto ai compositi termoindurenti, i compositi termoplastici riscuotono maggiore interesse da parte dell'industria automobilistica, non solo per le eccellenti proprietà meccaniche, ma anche poiché permettono di ridurre i tempi ciclo e i costi di struttura utilizzando tecnologie a basso costo, come la saldatura.

La saldatura mediante induzione elettromagnetica è stata considerata come una delle tecniche di saldatura più promettenti grazie al basso consumo energetico, semplicità di funzionamento e automazione.

Tuttavia, è necessaria una più profonda conoscenza di tale tipo di saldatura al fine di poterla utilizzare nell'industria *automotive*, e non solo.

Precedenti ricerche sulla saldatura ad induzione di materiali compositi termoplastici si sono focalizzati principalmente sulla comprensione dei meccanismi di saldatura, e sono stati utilizzati diversi metodi di prova per caratterizzare le prestazioni meccaniche dei giunti saldati.

Ci sono ancora alcune lacune nelle conoscenze attuali, in modo particolare rispetto ai principali parametri, quali la potenza in ingresso, la temperatura e il tempo di riscaldamento, ed infine su come la forma dell'induttore possa influenzare la qualità della saldatura.

Il lavoro di ricerca è stato finalizzato ad acquisire una conoscenza più profonda della saldatura ad induzione elettromagnetica di compositi termoplastici rinforzati con fibre di carbonio, attraverso un modello di calcolo che simulasse tale processo; a tal fine è stato utilizzato un software di simulazione multifisico (JMag).

Dapprima sono stati studiati ed analizzati i principi fisici alla base di tale tecnologia, con particolare attenzione alle leggi fisiche che regolamentano il magnetismo e il trasferimento di calore; analizzando inoltre i meccanismi di riscaldamento alla base dei materiali compositi a matrice termoplastica rinforzati con fibre di carbonio.

E' stata effettuata una prima campagna di simulazioni, seguita da una campagna di prove sperimentali al fine di effettuare un prima correlazione numerico-sperimentale e validare il modello matematico.

Dopo tale fase di studio e di messa a punto della metodologia e dei parametri si è pensato di approcciare la nuova fase di miglioramento, con una seconda campagna di simulazioni e prove sperimentali, utilizzando il DOE ovvero il Design Of Experiments.

Al fine di cogliere tutte le sfumature di un'applicazione per certi versi ancora sconosciuta, si è pensato di basare il piano di prove su n.3 fattori: il voltaggio (V), la temperatura (T) e il tempo di permanenza (t).

Una volta realizzati, i giunti sono stati testati secondo norma ASTM D5868 e i risultati delle prove di carico sono stati utilizzati come risposta all'interno dell'analisi statistica effettuata, con l'aiuto di un software (Minitab), al fine di valutare l'interazione dei diversi parametri tra loro per ottenere la configurazione che fornisse la migliore risposta meccanica.

Capitolo I

1. Materiali compositi

1.1 Introduzione

La nascita e lo sviluppo dei materiali composti è una diretta conseguenza dell'incessante ricerca da parte dell'industria meccanica, in generale, e di quella aerospaziale, in particolare, di materiali che uniscano elevate caratteristiche meccaniche, statiche e dinamiche, a un peso notevolmente ridotto.

Le più recenti tecnologie consentono l'utilizzo di vari tipi di fibre e di matrici che, combinate tra loro, realizzano componenti aventi una serie di proprietà eccezionali; ciò ha fatto in modo che questi materiali trovassero un largo impiego in ogni settore della produzione industriale. Il vantaggio principale che essi offrono rispetto ai materiali tradizionali consiste nel notevole incremento del rapporto resistenza-peso. A discapito dei rilevanti vantaggi suddetti, la diffusione di tali materiali è ancora penalizzata dagli elevati costi di fabbricazione e dal degrado delle proprietà meccaniche nel tempo.

1.2 Materiali a matrice polimerica

Per materiale composito s'intende un materiale formato da due o più elementi distinti, chimicamente differenti tra loro, dalla cui combinazione si ottiene un prodotto dalle proprietà chimico-fisiche differenti dai singoli elementi.

Un materiale composito è costituito essenzialmente da una fase continua, la matrice, nella quale è dispersa una fase discontinua, solitamente fibrosa.

La matrice ha lo scopo di proteggere le fibre, garantirne la coesione e di trasmettere loro il carico; per questo motivo deve essere caratterizzata da un'elevata resistenza all'abrasione, al calore e alla corrosione.

I materiali compositi possono essere classificati in base al tipo di matrice. In particolare, si hanno: compositi plastici, metallici e ceramici.

La scelta del tipo di matrice dipende dalla temperatura di esercizio dell'elemento. Infatti, è necessario che a tale temperatura la matrice del manufatto rimanga solida, senza rammollire, così da permettere che gli sforzi siano trasferiti alle fibre.

Secondo tale principio, alle temperature più basse (fino a 150°C circa) si potranno utilizzare compositi plastici (anche se con matrici poliammidiche è possibile arrivare anche a 350°C); per temperature che arrivino fino ai 1000°C, è possibile utilizzare compositi metallici a patto di impiegare fibre che supportino tali temperature. Le matrici metalliche non sono di particolare interesse industriale a causa delle difficoltà tecnologiche di fabbricazione e di possibili fenomeni di corrosione tra fibra e matrice all'aumentare della temperatura.

Laddove si superino i 1000°C, è opportuno impiegare compositi a matrice ceramica, i quali, seppure ancora poco utilizzati, sono caratterizzati da elevata durezza e resistenza a elevate temperature.

Alla luce di quanto in precedenza detto, il tipo di matrice più utilizzato è quella polimerica.

I materiali polimerici sono materiali che derivano dalla sintesi dei polimeri. La parola "polimero" deriva dalla combinazione delle parole greche "*poly*", che significa molti, e "*meros*", che significa parti.

Un polimero è una molecola filiforme e deriva dall'unione di unità molecolari più semplici, detti monomeri (Figura 1.1).

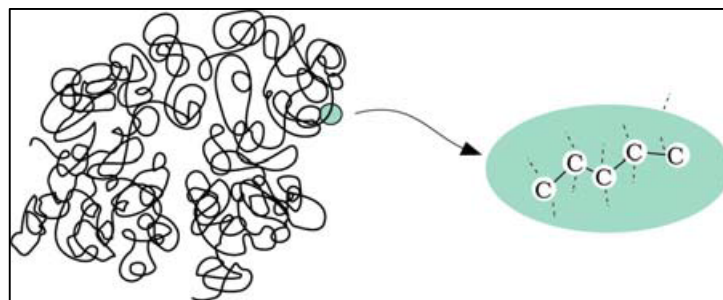


Figura 1.1: Schema di una catena polimerica

Allo stesso modo, un oligomero è una molecola formata da un esiguo numero di meri (tipicamente dieci). Per esempio, una macromolecola di polietilene.

E' inoltre possibile ottenere molecole che abbiano differenti legami tra gli atomi di carbonio sulla spina dorsale della catena (come doppi o tripli legami) oppure atomi o gruppi chimici invece di alcuni di carbonio.

I copolimeri sono composti da più di un gruppo di meri; ad esempio, le molecole di ABS contengono gruppi di meri di acrilonitrile, butadiene e stirene che legati tra di loro formano una molecola lunga; quindi, il numero e i tipi di polimeri sono quasi infiniti.

I materiali polimerici sono divisi in due grandi gruppi, in base al comportamento che presentano al variare della temperatura: termoindurenti e termoplastici.

- I termoindurenti, una volta sagomati mantengono la loro forma e la loro viscosità non diminuisce all'aumentare della temperatura.
- I termoplastici rispondono a un aumento della temperatura con una diminuzione di viscosità, e quindi con una maggiore fluidità, passando dallo stato vetroso a quello gommoso ed infine a quello fluido. Ciò permette di riformarli un numero teoricamente infinito di volte.

Le resine termoindurenti si combinano bene ai rinforzi e mostrano un'elevata resistenza, legata però a un allungamento a rottura relativamente basso.

D'altro canto, i termoplastici hanno il vantaggio di avere allungamenti a rottura più elevati, elevata tenacità a frattura e resistenza all'impatto.

1.3 Compositi a matrice termoindurente

Per un termoindurente, le lunghe catene di polimeri sono tenute insieme da legami chimici primari di "reticolazione" (Figura 1.2). Questi legami sono generalmente ottenuti tramite opportune reazioni chimiche condotte contemporaneamente o in seguito alla reazione di polimerizzazione e sono legami forti, che hanno la stessa energia di quelli presenti lungo la catena. Di conseguenza, il riscaldamento non può rompere tali legami senza che si danneggino i legami carbonio-carbonio della catena, ed è per questo che si ha un degrado irreversibile. I termoindurenti possono essere anche ottenuti da catene ramificate (Figura 1.2). Per la saldatura o "fusion bonding", è necessario consentire alle molecole di diffondersi attraverso l'interfaccia di saldatura senza degradazione, di conseguenza tale metodologia di giunzione non è applicabile ai termoindurenti, tranne che in rari casi, dove i legami di "reticolazione" possono essere rotti senza degradazione.

In Figura 1.3 è riportato l'andamento tipico del diagramma $\sigma - \epsilon$ relativo a questo tipo di compositi.

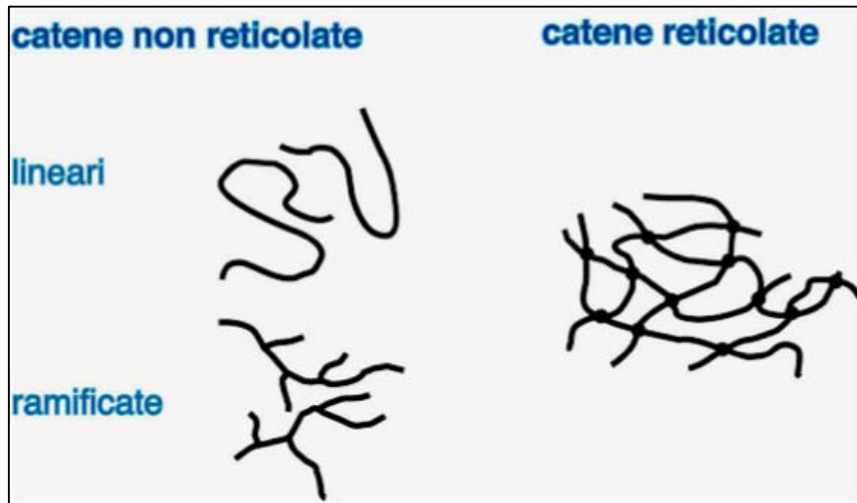


Figura 1.2: Catene Polimeriche

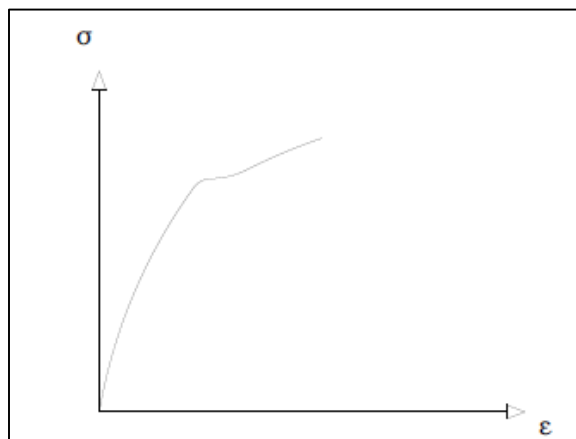


Figura 1.3: Diagramma tensione-deformazione per una resina termoindurente

1.4 Compositi a matrice termoplastica

I termoplastici sono costituiti da catene di polimeri tenute insieme da legami chimici deboli. Quindi, quando un termoplastico viene riscaldato, il debole legame tra le molecole si rompe e le molecole possono scivolare l'una sull'altra permettendo una nuova modellazione del polimero.

Questo permette alle molecole di termoplastico di scivolare le une sulle altre e di diffondersi attraverso l'interfaccia di saldatura, cosa che consente di eseguire la saldatura di tali materiali.

I termoplastici possono essere divisi in due gruppi: amorfi e semicristallini.

I termoplastici amorfi hanno lunghe molecole distribuite in maniera casuale.

I termoplastici semicristallini hanno lunghe molecole lineari formanti strutture molto ordinate e compatte a forma di cristalliti. Tuttavia queste molecole molto lunghe non possono formare strutture del tutto ordinate e questo comporta la presenza di regioni amorse all'interno del materiale, da qui il nome di semi-cristallini.

Nella Figura 1.4 è rappresentata schematicamente la distinzione tra morfologia amorfa e semicristallina.

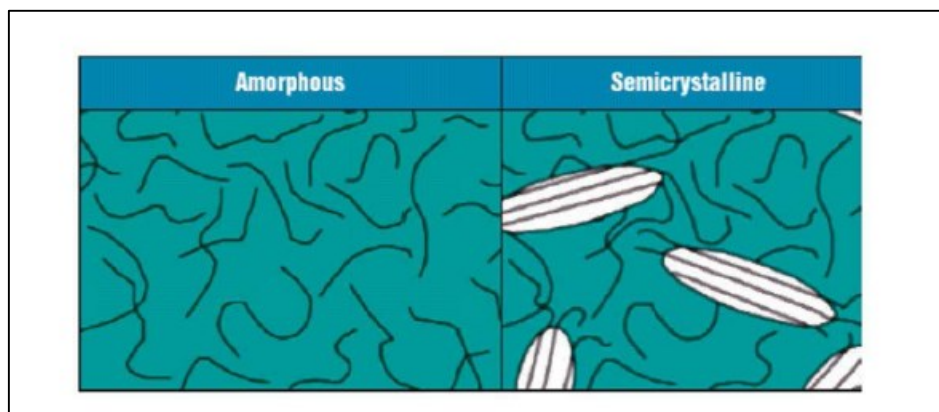


Figura 1.4: Rappresentazione schematica della distinzione tra morfologia amorfa e semicristallina in polimeri termoplastici

I polimeri amorfi sono caratterizzati da una temperatura di transizione vetrosa (T_g) alla quale, durante un processo di riscaldamento, la parte amorfa del polimero passa dalla fase vetrosa a quella gommosa; è tale comportamento che permette il rimodellamento del materiale.

Un polimero semi-cristallino, oltre ad avere una temperatura di transizione vetrosa, è caratterizzato anche dalla temperatura di fusione (T_m) che determina il punto di fusione dei cristallini. Quindi, molti polimeri semi-cristallini possono essere usati in applicazioni strutturali a temperature al di sopra di quella di transizione vetrosa, purché la temperatura sia mantenuta al di sotto della temperatura di fusione. Ad esempio, per l'HDPE la temperatura di transizione vetrosa è circa -120°C ma fornisce utili proprietà solide a temperature maggiori di 75°C . In Figura 1.5 si vede che il modulo di viscosità elastica di un polimero amorfo diminuisce rapidamente al di sopra di T_g . Per un semi-cristallino, il modulo di viscosità elastica diminuisce leggermente al di sopra di T_g , con una più rapida decadenza alla T_m .

Le proprietà meccaniche, chimiche e ottiche di tutti i polimeri possono cambiare molto grazie ad additivi mentre oltre ai rinforzi possono essere aggiunti plastificanti, ritardanti di fiamma o

coloranti. Questi elementi cambiano le proprietà chimiche, fisiche e meccaniche e possono avere un importante impatto sull'aspetto delle giunzioni.

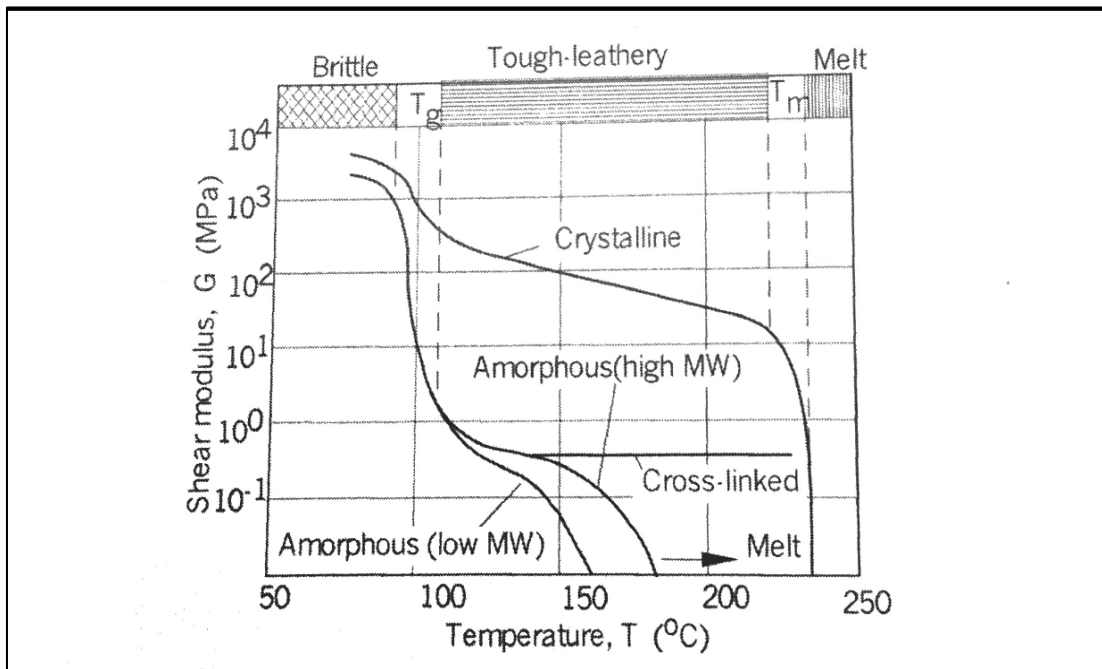


Figura 1.5: Modulo di resistenza al taglio, per polimeri amorfi, semicristallini e reticolati.

Capitolo II

2. Tecnologie di giunzione dei termoplastici

2.1 Introduzione

Le tecniche utilizzate per unire materiali termoplastici rientrano in tre categorie: fissaggio meccanico, incollaggio e saldatura (Figura 2.1).

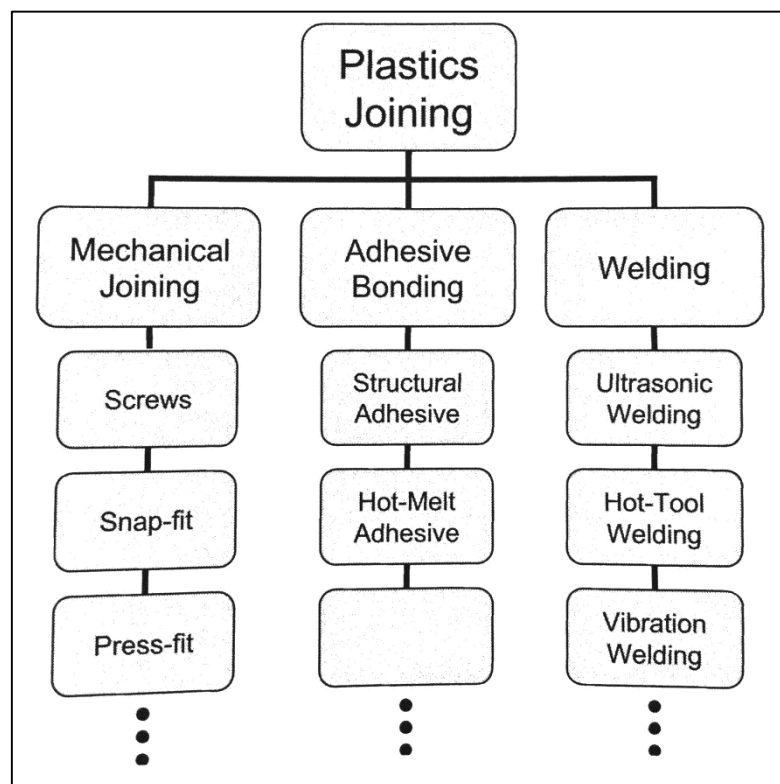


Figura 2.1: Tecnologie di giunzione dei compositi termoplastici

I problemi tipici che s'incontrano nell'utilizzare i giunti meccanici nelle strutture composite includono:

- Concentrazione di sforzo generata dalla presenza di fori.
- Delaminazione proveniente dall'usura localizzata, che avviene durante la perforazione.
- Espansione termica differente dei rivetti rispetto al composito
- Continuità elettrica nel composito, necessaria per la dispersione di energia nel caso di un colpo di fulmine su una struttura di un velivolo
- Possibile corrosione galvanica
- Peso supplementare del sistema di giunzione
- Tempi lunghi e necessità di manodopera per la foratura.

Il legame adesivo è pertanto preferibile alla giunzione meccanica per il collegamento continuo che evita elevate concentrazioni di sforzo indotte ai compositi dalla presenza di fori.

Tuttavia, vi è una vasta gamma di agenti inquinanti presenti sulle superfici del substrato, quali silicone, oli di macchinari, impronte digitali ed elementi del composito stesso che migrano sulla superficie e che devono essere eliminati, prima di effettuare la giunzione, tramite un trattamento superficiale che può anche servire a migliorare la bagnatura delle superfici, a modificare chimicamente la superficie e ad aumentare la rugosità superficiale (migliorando l'area di contatto).

La lunga preparazione superficiale rende il legame adesivo fortemente dipendente da manodopera specializzata. I trattamenti superficiali effettuati per il legame adesivo dipendono direttamente dalla resistenza e durezza dei giunti legati e sono generalmente difficili da controllare in un ambiente industriale.

Inoltre, la tendenza al riciclo esorta sempre più i fornitori a scegliere sistemi adesivi che siano riciclabili, come la maggior parte degli adesivi termoplastici, mentre esclude la maggior parte degli adesivi termoindurenti.

Una delle componenti chiave di questa tendenza è lo sviluppo di una tecnologia affidabile, economicamente conveniente e di facile automazione per la giunzione di materiali compositi o tra loro dissimili.

Alcuni ricercatori hanno proposto descrizioni interessanti delle tecnologie di giunzione per TPs o per i compositi polimerici. Nella seguente trattazione si esaminano gli sviluppi raggiunti nel processo di giunzione dei materiali termoplastici con rinforzo in fibra di carbonio (TPCs) evidenziando in particolare la tecnica di saldatura a induzione.

2.2 Processi di saldatura di materiali termoplastici

I processi di saldatura sono spesso classificati e identificati in base al metodo di riscaldamento utilizzato. Tutti i processi possono essere divisi in due categorie generali: riscaldamento interno o esterno (Figura 2.2).

I metodi di riscaldamento interno sono ulteriormente divisi in due categorie: riscaldamento meccanico interno ed elettromagnetico. I metodi di riscaldamento esterno sfruttano il fenomeno della convezione e/o conduzione per riscaldare la superficie da saldare. Questi processi includono: piatto caldo, gas caldo, estrusione, saldatura a induzione e per resistenza. Il riscaldamento elettromagnetico interno si basa sulla conversione dell'energia meccanica in energia termica attraverso l'attrito di superficie e l'attrito intermolecolare. Questi processi includono: ultrasuoni, vibrazione e saldatura per rotazione.

I metodi di riscaldamento interni si basano sull'assorbimento e sulla conversione delle radiazioni elettromagnetiche in calore. Questo processo include: infrarossi, laser, radio frequenze, e microonde.

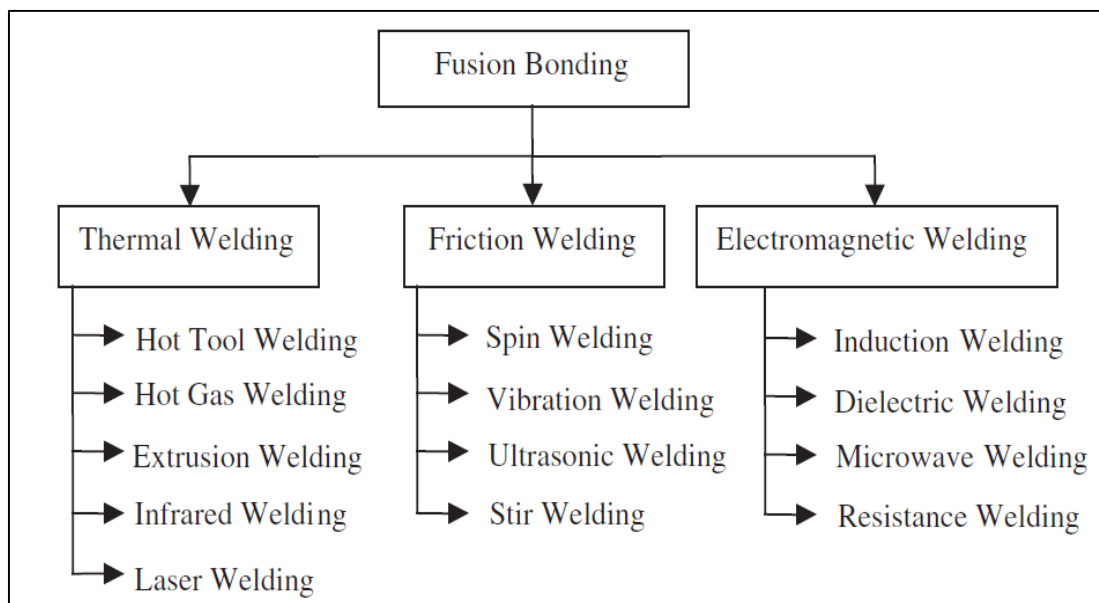


Figura 2.2: Processi di saldatura dei compositi.

2.3 Steps fondamentali nella saldatura di plastiche e compositi

La saldatura di termoplastici e compositi termoplastici è un processo di giunzione mediante riscaldamento, in grado di fondere (o rammollire) il polimero all'interfaccia (o la superficie di contatto). Talvolta, questo processo è anche conosciuto come "*fusion bonding*" poiché l'accumulo di forza sull'interfaccia è dovuto alla diffusione intermolecolare delle lunghe molecole di polimero attraverso quest'ultima. Anche se questa descrizione è semplicistica, cattura l'essenza del processo di saldatura dei termoplastici, composto di cinque differenti steps, che possono essere sequenziali o simultanei.

Il primo passaggio fondamentale è la preparazione delle superfici da saldare, in modo da assicurarsi che siano prive di contaminazioni. Una volta eseguita la pulizia delle superfici, c'è la fase di riscaldamento durante la quale le parti sono poste a contatto con la fonte di calore e si ha la fusione del polimero.

La terza fase è di applicazione della pressione, necessaria affinché le parti si uniscano tra loro; in alcuni processi di saldatura questa fase è eseguita contemporaneamente alla seconda, in altri, invece, è successiva.

Una volta che si è raggiunto un contatto sufficiente tra gli strati di polimero fuso delle due parti, inizia la fase di diffusione intermolecolare. Dopodiché, comincia la quinta e ultima fase di raffreddamento del polimero fuso.

Di seguito sono riportate nel dettaglio tutte le singole fasi in precedenza descritte.

2.3.1 Preparazione delle superfici

La preparazione delle superfici è la prima fase necessaria per preparare alla saldatura i materiali compositi termoplastici.

Tale fase è particolarmente importante quando si eseguono processi manuali o semiautomatici, poiché il livello di movimentazione manuale richiesto in questi processi aumenta la probabilità di contaminazione. Tipicamente, la preparazione della superficie comporta la lavorazione e/o la pulizia di quest'ultime. La lavorazione delle superfici è usata per assicurarsi che la superficie sia quadrata o che si inserisca da altre parti, o in alcuni casi potrebbe essere necessario realizzare una scanalatura o uno smusso come nel caso della saldatura con gas caldo.

Di solito, la pulizia è eseguita usando un solvente che sgrassi la superficie. Tuttavia, in casi estremi potrebbe essere necessario compiere una pulizia meccanica e/o chimica. Per esempio, potrebbe essere necessario eseguire un'abrasione superficiale seguita dall'utilizzo del solvente. In altri casi, potrebbe essere necessaria una lavorazione chimica, seguita dall'utilizzo di un solvente.

Tuttavia, quando devono essere preservate la struttura superficiale e le sue proprietà, i trattamenti meccanici e quelli chimici non sono possibili.

Nel caso di processi di saldatura automatici, la preparazione delle superfici è effettuata raramente. In questi casi, la maggiore fonte di contaminazione è il distaccante trasferito alla parte durante lo stampaggio. Quindi in questi casi, e in generale, la soluzione migliore è utilizzare uno strato di distaccante sullo stampo che non si trasferisca alle parti; ciò è risolto applicando uno strato di termoindurente sulla superficie dello stampo.

2.3.2 Riscaldamento

Ci sono molti modi per riscaldare i termoplastici e i compositi termoplastici ai fini della saldatura.

In tutti i processi di saldatura, solo la superficie vicino all'interfaccia di saldatura è riscaldata tanto da far fondere o rammollire il polimero perché:

- E' più efficiente il riscaldamento e la fusione di una piccola zona rispetto ad una più ampia
- E' più veloce fondere il polimero vicino l'area del giunto che aspettare di fondere per convezione o conduzione il polimero ovunque, poiché la plastica tende ad avere una conducibilità termica relativamente bassa.
- Fondere o rammollire il polimero renderebbero impossibile supportare la parte durante il riscaldamento evitando la deformazione. Per i materiali compositi avanzati con un elevato volume di fibre, un riscaldamento senza pressione può causare formazione di vuoti all'interno del composito (deconsolidamento)[1].

Inoltre, per le superfici di questi materiali il riscaldamento è molto più critico, specialmente quando il processo di saldatura necessita l'applicazione di una pressione durante il riscaldamento, in modo da evitare o minimizzare il potenziale di deconsolidamento.

Il riscaldamento è considerato di solito la fase più critica nel processo di saldatura perché questa non è possibile senza la formazione di un sottile strato di materiale fuso o rammollito su ciascuna parte.

Questo strato è necessario affinché il flusso sull'interfaccia riesca a raggiungere un contatto intimo e affinché siano possibili la diffusione intermolecolare e l'aggrovigliamento delle catene.

Come ci si potrebbe aspettare, la quantità di calore in entrata e la temperatura necessaria alla fusione e al rammollimento è differente per i polimeri amorfi e quelli semi-cristallini. Per i polimeri amorfi, è necessario superare la temperatura di transizione vetrosa in modo da favorire la diffusione; ma, se la temperatura di rammollimento del polimero è molto vicina alla temperatura di transizione vetrosa, allora la diffusione può richiedere molto tempo. Per ridurre il tempo necessario a eseguire il processo di saldatura, la temperatura raccomandata per il riscaldamento di gran parte dei termoplastici amorfi è di circa 100°C oltre la loro temperatura di transizione vetrosa.

Per i polimeri semi-cristallini, è necessario superare la temperatura di fusione; questo di solito richiede elevate quantità di energia in ingresso in modo da superare il calore latente di fusione. Per temperature al disotto di quella di fusione ma al disopra di quella di transizione vetrosa, molte molecole sono ancora legate in regioni cristalline e per questo la diffusione intermolecolare non è possibile. Per assicurarsi che il polimero fonda lungo tutta la superficie d'interfaccia, è necessario superare la temperatura di fusione di almeno 50°C.

La velocità di riscaldamento e il trasferimento di calore sono importanti poiché influiscono sulla velocità di saldatura e sullo spessore del materiale fuso o rammollito. In generale, i metodi di riscaldamento meccanico interno sono caratterizzati da un'elevata velocità di riscaldamento, ma un tempo di lavoro e uno spessore più basso.

I metodi di riscaldamento elettromagnetico mostrano un aumento intermedio della temperatura, e lo stesso vale per lo spessore e il tempo ciclo.

I metodi di riscaldamento esterni hanno generalmente una velocità di riscaldamento più bassa, un tempo ciclo più lungo e un maggiore spessore di saldatura.

Il trasferimento di calore durante la saldatura è anch'esso importante, in quanto incide sulla velocità di fusione e sulle dimensioni della zona saldata. In generale, il trasferimento di calore può avvenire per conduzione, convezione o irraggiamento. Come mostrato in maniera semplicistica nella Figura 2.3, la conduzione termica tra le parti è predominante rispetto al riscaldamento per convezione o irraggiamento con l'aria circostante.

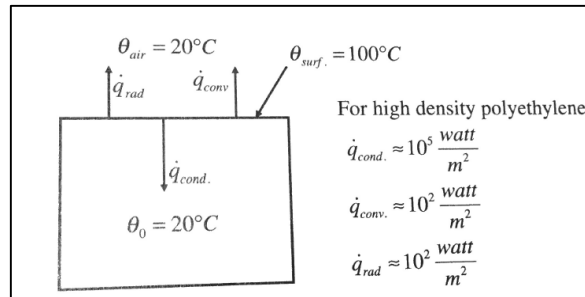


Figura 2.3: Confronto tra perdite di calore per conduzione, convezione e irraggiamento

Maggiore è la conducibilità delle fibre all'interno del composito, maggiore è la quantità di calore che si diffonde dalla superficie di saldatura verso l'interno.

Per ridurre le perdite per conduzione potrebbe essere utile porre un film di termoplastico sulla superficie del composito, favorendo l'isolamento termico.

I compositi termoplastici sono caratterizzati da una conducibilità termica anisotropa che complica ulteriormente il riscaldamento locale. La Figura 2.4 mostra la diffusione termica all'interno di un polimero, un composito con fibre in direzione trasversale e un composito con fibre in direzione longitudinale. A causa dell'elevata conducibilità termica delle fibre, la diffusione termica all'interno del composito con fibre longitudinali è dieci volte maggiore rispetto al solo polimero.

I materiali isotropi, riscaldati da una fonte di calore puntuale, mostrano contorni isotermici circolari. Invece, per i materiali anisotropi questi contorni sono ellittici in quanto la conducibilità termica lungo la direzione delle fibre è maggiore. Quindi, quando si saldano compositi avanzati, è possibile che alcune aree lontane dalla zona saldata si riscaldino fino a raggiungere una temperatura tale da fondere e probabilmente causare la degradazione del materiale in queste regioni.

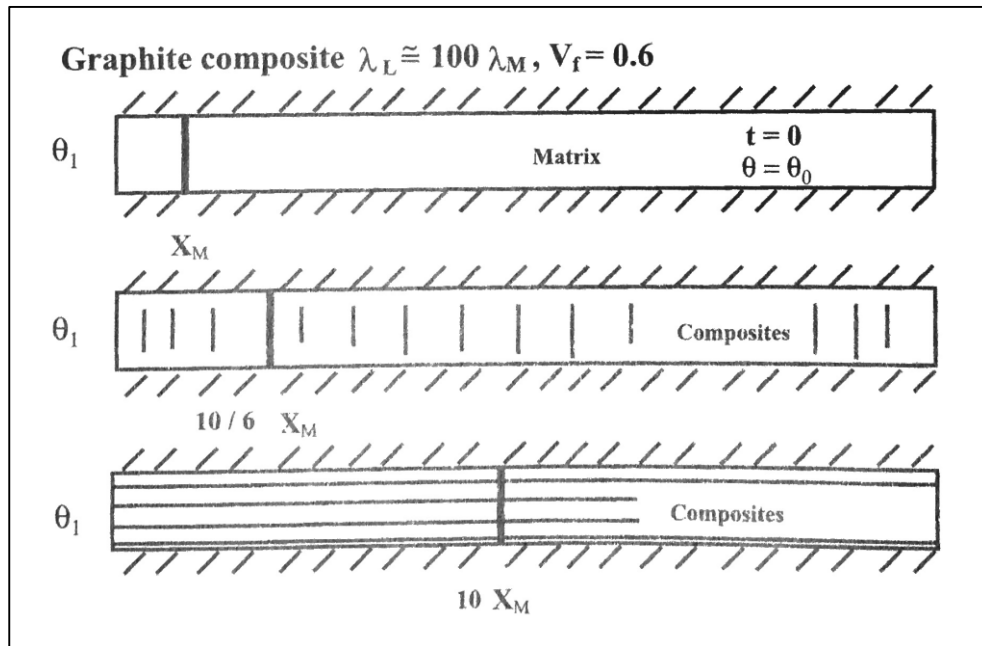


Figura 2.4: Diffusione termica per un polimero (sopra), composito on fibre di grafite in direzione trasversale (centro), e in direzione longitudinale (sotto)

I polimeri e molti compositi polimerici mostrano una conducibilità termica e una diffusività termica relativamente basse rispetto ai metalli o ai compositi altamente conduttivi quali i compositi con fibre di carbonio o grafite.

La conduzione del calore dalla superficie saldata verso l'interno avviene lentamente, permettendo la modellazione di molte parti come solidi semi-infiniti.

Come mostrato in Figura 2.5, un solido semi-infinito si estende dalla superficie all'infinito in tutte le altre direzioni. Inoltre, per molti processi di saldatura è possibile stimare la temperatura della superficie o del flusso di calore verso la superficie riscaldata. Una volta che sono stati determinati il flusso di calore o la temperatura della superficie per un dato processo, è possibile usare un modello di solido semi-infinito per calcolare la distribuzione di temperatura nella parte per alcuni semplici casi.

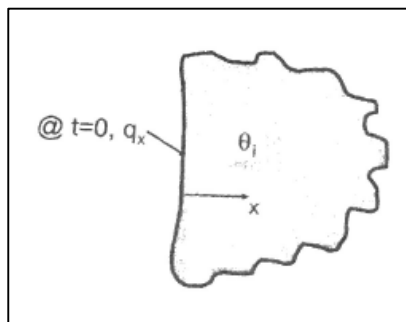


Figura 2.5: Modello di un solido semi-infinito soggetto a un flusso di calore superficiale

Si consideri un solido semi-infinito soggetto a un flusso di calore uniforme e costante che, come mostrato in figura 2.5, fluisca attraverso una superficie. In questo caso la distribuzione di temperatura nel solido è funzione della posizione e del tempo, secondo la seguente formula (2.1) [1]:

$$\theta(x, t) = \theta_i + \frac{2 \cdot q_0}{\lambda} \left[\sqrt{\frac{k \cdot t}{\pi}} \cdot e^{\left(\frac{x^2}{4 \cdot k \cdot t}\right)} - \frac{x}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{k \cdot t}}\right) \right] \quad (2.1)$$

Dove θ è la temperatura, x è la posizione, t il tempo, θ_i è la temperatura iniziale del solido, q_0 è il flusso di calore sulla superficie, λ è la conducibilità termica, κ è la diffusività termica, ed $\operatorname{erfc}(z)$ è l'errore complementare della funzione.

E' importante notare che l'errore di funzione complementare può essere calcolato usando la maggior parte dei fogli di calcolo (ad esempio Microsoft Excel®) o software matematici (ad esempio Matlab®). L'equazione 2.1 può essere usata per calcolare la distribuzione di temperatura per i diversi processi di saldatura quali: ultrasuoni, vibrazioni, induzione, resistenza, infrarossi, laser, radio frequenza, e microonde.

Nei casi della saldatura a estrusione e con gas caldo, dove è utilizzato un gas caldo per riscaldare e fondere la superficie delle parti, è importante tener conto del trasferimento di calore per convezione. In Figura 2.6 è mostrato un modello semi-infinito con la superficie riscaldata mediante convezione usando un fluido a elevate temperature.

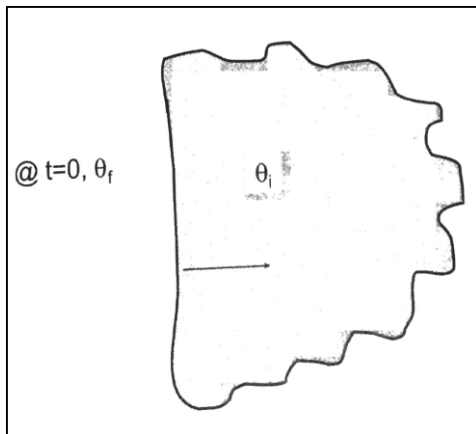


Figura 2.6: Modello di un solido semi-infinito soggetto a riscaldamento superficiale mediante fenomeno convettivo

Dove θ_f rappresenta la temperatura del fluido.

Per la saldatura a piatto caldo, la superficie della parte è mantenuta a temperatura costante durante il riscaldamento. In questo caso, la superficie del solido semi-infinito è mantenuta a temperatura costante come mostrato in Figura 2.7; dove θ_s è la temperatura della superficie.

Ci sono molti vantaggi nel calcolare la distribuzione di temperatura nelle parti durante la saldatura. Per molti processi è importante determinare lo spessore saldato; la microstruttura vicino la zona saldata e la temperatura di distribuzione possono essere usate per calcolare la misura della *heat-affected zone* e la morfologia che si è probabilmente sviluppata.

Per una precisione dimensionale, la distribuzione di temperatura può essere usata per calcolare il coefficiente di espansione termica e la distorsione finale nelle parti.

Per prestazioni a lungo termine delle parti si potrebbe usare la distribuzione di temperatura per calcolare lo stress termico e il valore delle tensioni residue all'interno della zona saldata.

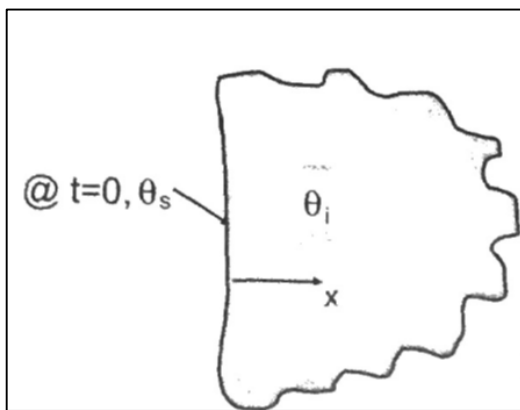


Figura 2.7: Modello per una superficie semi-infinita soggetta ad una temperatura superficiale costante

2.3.3 Pressione

Una volta stabilite le zone riscaldate, bisogna applicare una pressione affinché vi sia intimo contatto tra le parti. Questa fase si divide in due sotto-fasi: durante la prima sotto-fase, le asperità superficiali vengono deformate e si raggiunge il contatto intimo tra le parti; durante la seconda sotto-fase, uno strato di materiale fuso viene espulso fuori e qualsiasi gas intrappolato e polimero contaminato vengono allontanati dall'area del giunto.

Entrambe le fasi sono dominate dai "*squeezing flow mechanisms*". In alcuni casi, la pressione non è direttamente applicata durante la saldatura, piuttosto, l'espansione termica del materiale durante il riscaldamento provoca un aumento di pressione all'interfaccia.

Due superfici avvicinate non saranno ovunque in intimo contatto a causa della rugosità di ciascuna parte (Figura 2.8). Anche nel caso della superficie di un polimero fuso sono presenti delle asperità geometriche poiché la viscosità del polimero fuso è molto alta. Applicando una pressione attraverso l'interfaccia aumenta l'area di contatto. Per un solido elasto-plastico, aumentando la pressione si può causare una locale deformazione elastica e plastica delle

asperità superficiali, cosa che fa aumentare l'aria di contatto [1]. Per un liquido viscoso, come un polimero fuso, aumentando la pressione aumenterà anche l'area di contatto; inoltre, ci si aspetta anche una dipendenza dal tempo.

Per considerare la deformazione di un'asperità, è possibile espandere la superficie di contatto come mostrato in Figura 2.9. Per semplicità, questo modello assume che le singole asperità si deformino, in seguito all'applicazione di una forza, come un liquido Newtoniano schiacciato tra due piastre (Figura 2.10). Per ridurre il problema a due dimensioni, si assume che le parti e il liquido abbiano lunghezza maggiore rispetto all'altezza e alla profondità. Per un fluido Newtoniano con viscosità costante, soggetto ad una forza costante, la seguente relazione fornisce l'altezza risultante del fluido rispetto al tempo:

$$\frac{h}{h_0} = \left(1 + \frac{5 \cdot F \cdot t \cdot h_0^2}{4 \cdot \eta \cdot L \cdot b_0^3}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.2)$$

Dove $2h_0$ è l'altezza iniziale del fluido, $2h$ è l'altezza del fluido all'istante t , F è la forza di schiacciamento, η è la viscosità, $2L$ è la lunghezza del fluido e $2b_0$ è la larghezza iniziale del fluido.

Un termoplastico fuso ha lo stesso comportamento di un materiale viscoelastico.

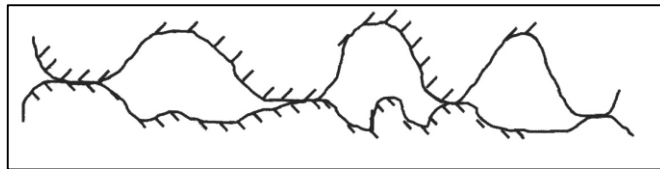


Figura 2.8: Schema delle due superfici a contatto

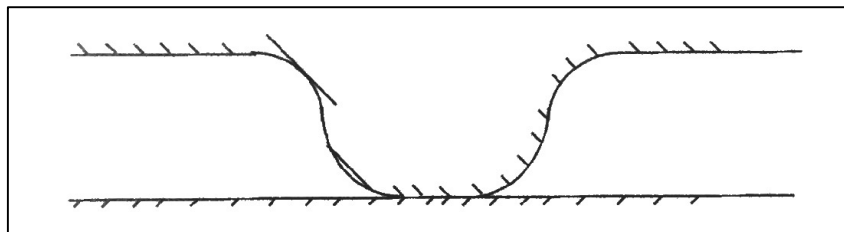


Figura 2.9: Vista di una singola asperità

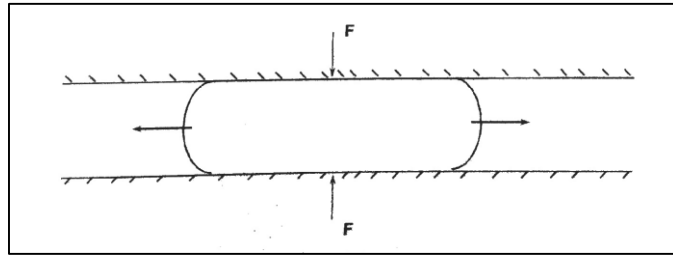


Figura 2.10: Modello di schiacciamento di una singola asperità

A elevate temperature – sopra la temperatura di fusione per i materiali semi-cristallini o sopra quella di transizione vetrosa per i termoplastici amorfi – il polimero può essere modellato come “a power law fluid” [1].

Dal principio di conservazione della massa, la larghezza del fluido è inversamente proporzionale alla sua altezza; in altre parole, all’aumentare del tempo l’altezza del fluido diminuisce e aumenta la sua larghezza.

La seconda sotto-fase è lo schiacciamento dello strato fuso tra le due parti. Quando parte dello strato fuso è schiacciato fuori, trascina con sé i gas intrappolati (tra le asperità deformate) e le impurità dalla regione di saldatura. Per semplificare il problema si assume che il polimero fuso può essere modellato come un liquido Newtoniano [1].

Durante la saldatura è preferibile che il fenomeno dello “squeeze flow” avvenga il prima possibile. Tuttavia, in alcuni casi, ci sono alcuni limiti fisici alla forza che può essere applicata; inoltre, a causa del rapido trasferimento di calore dalle zone più calde alle zone interne delle parti, ci sono limiti di tempo e temperatura.

Siccome l’alta temperatura potrebbe degradare il materiale termoplastico, è necessario massimizzare l’area di contatto e minimizzare la viscosità al variare della forza, della temperatura e del tempo.

Questo è particolarmente importante quando si considerano materiali compositi con elevati livelli di rinforzo.

Durante la saldatura, un elevato valore di viscosità può influenzare il grado d’intimo contatto e sostanzialmente il livello della saldatura.

Tuttavia, dal momento in cui il problema riguarda solo le asperità superficiali e lo strato fuso, la viscosità può essere diminuita inserendo un film di polimero sulla superficie, che si deforma più facilmente dei compositi, favorendo il contatto intimo tra le due parti.

Tale trattazione è solo una parziale descrizione del problema di raggiungere l’intimo contatto durante la saldatura di due termoplastici.

Ci si può aspettare di vedere enormi differenze di comportamento tra i termoplastici semi-cristallini e quelli amorfi. In sostanza, i materiali semi-cristallini fluiscono più facilmente, tenuto conto che la temperatura è maggiore di quella di fusione; mentre la fluidità dei polimeri amorfi dipende da come vengono riscaldati al di sopra della temperatura di transizione vetrosa.

2.3.4 Diffusione intermolecolare

Una volta raggiunto il contatto tra i polimeri con l'interfaccia, la diffusione intermolecolare e l'aggrovigliamento, è necessario completare il processo per ottenere una buona saldatura.

L'auto-coesione è il fenomeno che descrive la diffusione intermolecolare e l'aggrovigliamento delle catene attraverso l'interfaccia del polimero termoplastico formando un forte legame (Figura 2.11) [1].

Diversamente dall'incollaggio che si basa su energie superficiali (o legami chimici secondari tra materiali simili/dissimili), l'auto-coesione si basa sull'aggrovigliamento delle catene e su legami secondari per catene di polimeri di materiali simili.

In condizioni ideali, la diffusione è completa quando l'interfaccia non è più divisibile dalla massa.

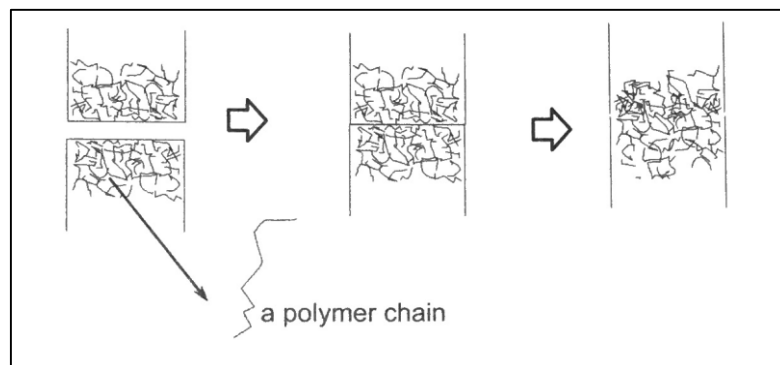


Figura 2.11: Diffusione intermolecolare attraverso l'interfaccia

Il processo di auto-coesione è molto spesso divisibile in cinque fasi:

1. Riordinamento superficiale
2. Avvicinamento delle superfici
3. Bagnante
4. Diffusione
5. Randomizzazione

Nella fusione, i primi tre punti possono essere considerati come parte della fase di pressione. Gli ultimi due punti, invece, fanno parte della fase di diffusione intermolecolare.

I movimenti delle catene di polimeri lineari individuali sono modellati in base alla “*reptation theory*” sviluppata da DeGennes [1]. Nel “*reptation model*”, una catena è chiusa in un tubo immaginario che rappresenta le costrizioni imposte dalle catene adiacenti. La catena è libera di muoversi come un serpente all’interno di un tubo, e non può lasciarlo se non alla fine (Figura 2.12).

Oltre un certo periodo, la catena può scivolare via dal tubo di origine. Il movimento delle parti finali delle catene al di fuori del tubo originale, si propaga verso il centro della catena fino a che tutta non fuoriesca dal tubo originale e si generi un nuovo tubo.

In realtà, dopo un certo lasso di tempo, si generano nuovi tubi, anche se alcuni di questi sono parzialmente formati dal tubo originale (Figura 2.12).

Il “*reptation model*” è governato da due valori di tempo: T_e , il tempo associato al contorcersi della catena nel tubo, e T_r , il tempo richiesto dalla catena per generare un nuovo tubo. Siccome, per l’auto-coesione, il movimento al di fuori del tubo è necessario, ma la formazione di un nuovo tubo non è richiesta, l’intervallo di tempo necessario alla auto-coesione è $T_e < t < T_r$. Inoltre, T_e è proporzionale al quadrato del peso delle molecole, mentre T_r è proporzionale al cubo del peso delle molecole.

Siccome il peso delle molecole è di solito molto elevato, $T_e \ll T_r$ e, per tutte le finalità pratiche, $t > T_e$ per $t > 0$.

Quindi, durante il range di tempo $0 < t < T_r$, è possibile riferirsi al percorso quadratico medio della lunghezza delle catene diffuse (l), la media delle distanze d’interpenetrazione (X) delle catene attraverso un’interfaccia (o addirittura un piano immaginario nella massa) [1]:

$$X^2 \propto l > \quad (2.3)$$

Durante i primi stadi della diffusione e randomizzazione ($t < T_r$), Kim and Wool [1] mostrano che l è proporzionale a $T^{1/2}$.

Per i polimeri amorfi, la diffusione intermolecolare può avere luogo a ogni temperatura pari o superiore a T_g . Questa teoria può essere anche applicata ai polimeri semi-cristallini, posto che i cristalli siano completamente fusi e le catene di polimeri si comportino come catene casuali; questo è possibile solo a una temperatura superiore a quella di fusione, che è di solito molto più alta di T_g . Per questo per i polimeri semi-cristallini a una temperatura superiore a T_m , la

diffusione intermolecolare è molto rapida ed è difficile da misurare. Al di sotto di T_m non c'è fusione o la diffusione intermolecolare avviene grazie ai cristalli che legano le molecole.

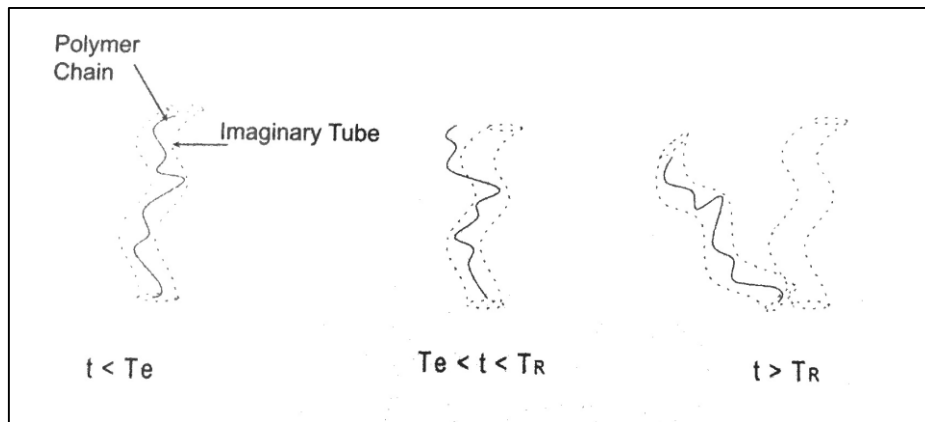


Figura 2.12: Teoria dei tubi immaginari usata per descrivere i vincoli applicati alla diffusione delle catene

2.3.5 Raffreddamento

L'ultima fase nel processo di saldatura è il raffreddamento e la solidificazione del provino giuntato. Durante questa fase finale le matrici semi-cristalline si ricristallizzano per ottenere la loro microstruttura finale, mentre i polimeri amorfi conservano l'orientamento molecolare in precedenza indotto. In più, gli stress termici residui e la distorsione rimangono in parte congelati.

Per i polimeri amorfi, la fase di pressione comporta un orientamento molecolare parallelo alla linea di saldatura, che si congela durante il raffreddamento. Per i polimeri semi-cristallini, la velocità di raffreddamento influenza la velocità di cristallizzazione e la formazione di sferuliti nei pressi della zona di saldatura.

La distorsione e la formazione di stress residuo occorrono anche durante il raffreddamento. Le superfici di riscaldamento delle parti comportano un riscaldamento localizzato e un'espansione termica, che è vincolata dalle sezioni di raffreddamento adiacenti. Durante il raffreddamento, le sezioni fuse o rammollite subiscono una contrazione termica, ma sono vincolate dalle sezioni di raffreddamento adiacenti nelle parti. Per esempio nella saldatura a gas caldo questo comporta una curvatura ben visibile come mostrato in Figura 2.13.

La grandezza della curvatura in questo caso può essere ridotta con un giunto a doppia V, dove il calore in ingresso al di sopra e al di sotto della zona da saldare è quasi lo stesso.

La formazione di stress residuo vicino la linea di saldatura è un altro degli effetti negativi della saldatura. Può ridurre la resistenza della saldatura, la resistenza a fatica e quella a frattura, e causare tensocorrosione.

Gli esperimenti e la determinazione teorica del livello di stress residuo causato dalla saldatura sono difficili a causa della natura viscoelastica del polimero e della complessità della misurazione dello stress residuo in generale.

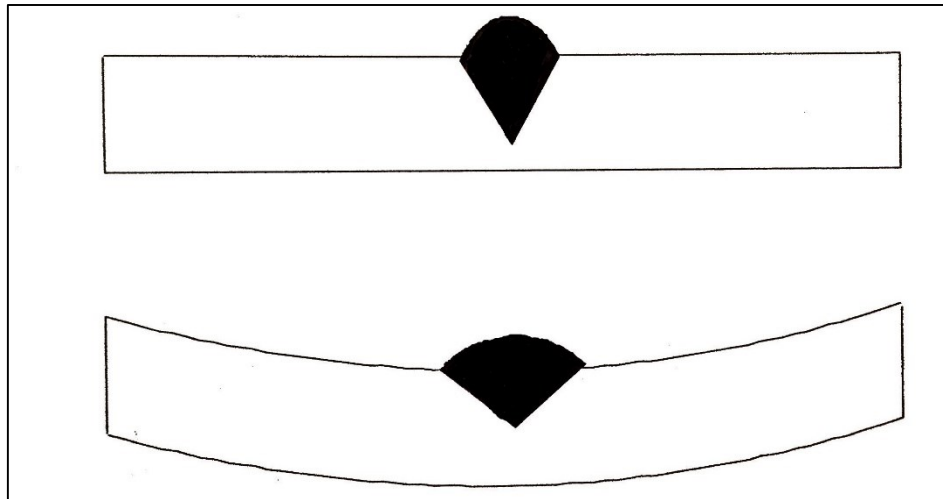


Figura 2.13: Difetto tipico della saldatura a gas caldo

Capitolo III

3. Saldatura a induzione elettromagnetica

3.1 Introduzione

Il riscaldamento per induzione è un processo di riscaldamento senza contatto usato per riscaldare un materiale elettricamente conduttivo attraverso l'induzione elettromagnetica.

In un sottile strato del pezzo da lavorare, generalmente chiamato effetto pelle, il campo elettromagnetico alternato genera una corrente parassita. Tale corrente parassita genera calore dovuto alle perdite per effetto ohmico ed è la principale fonte di calore in un processo di riscaldamento a induzione.

In un materiale ferromagnetico l'isteresi causa un ulteriore contributo alla generazione di calore, ma in quantità molto più piccola.

L'effetto pelle è definito come la profondità alla quale l'intensità di corrente diminuisce con un andamento esponenziale dalla superficie. La sua profondità dipende dalla conduttività elettrica del materiale, dalla frequenza del campo elettromagnetico applicato e dalle proprietà magnetiche del pezzo in lavorazione.

3.2 Proprietà magnetica del materiale

Ogni elettrone in un atomo ha un momento magnetico netto causato da due fonti, orbitante e di spin. La prima fonte è collegata al movimento orbitante di un elettrone attorno al suo nucleo che genera una corrente chiusa, e produce un campo magnetico molto piccolo con il suo momento attorno al proprio asse di rotazione.

Il secondo momento magnetico è provocato dalla rotazione dell'elettrone e può avere sia direzione positiva che negativa.

Così ogni elettrone in un atomo ha un momento magnetico orbitale e un momento magnetico di spin.

Dal modello atomico semplificato di Bohr, gli elettroni di un atomo si trovano in conchiglie, note come K, L, M, e orbitali (s, p, d), che sono in orbita intorno ad un nucleo. Ogni orbitale ha diversi stati energetici, composti da coppie di elettroni, con spin opposto che annulla ogni altro momento magnetico.

Questa cancellazione si ha anche per l'elettrone orbitante. Perciò, per gli atomi con orbitali di elettroni incompleti, si genereranno momenti magnetici netti.

Quando un campo magnetico esterno, \mathbf{H} , è applicato sul corpo, il momento magnetico nel materiale tende ad allinearsi con questo campo, con conseguente magnetizzazione \mathbf{M} del solido. Assumendo una relazione lineare tra il vettore di magnetizzazione e il campo magnetico è possibile scrivere [2]:

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} + \mathbf{M}_0 \quad (3.1)$$

dove χ_m è una quantità adimensionale chiamata suscettività magnetica. Essa è una misura della sensibilità (o suscettibilità) di un materiale ad un campo magnetico. \mathbf{M}_0 è un vettore fisso che non ha alcuna relazione funzionale con \mathbf{H} e si riferisce allo stato di magnetizzazione permanente.

Supponendo che la densità di flusso magnetico, \mathbf{B} , rappresenti l'intensità di campo interno a una sostanza sottoposta ad un campo magnetico esterno \mathbf{H} . Per definizione, la densità di flusso magnetico ed il campo magnetico sono collegati l'uno all'altro secondo la relazione

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.2)$$

Combinando le equazioni (3.1) e (3.2) si ottiene:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_0 = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_0 = \mu \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_0 \quad (3.3)$$

La quantità μ è nota come la permeabilità del materiale e μ_r è chiamata permeabilità relativa, e rappresenta il rapporto tra la permeabilità di un dato materiale e quello dello spazio libero, μ_0 . La permeabilità relativa di un materiale è quindi una misura di quanto facilmente un materiale può essere magnetizzato, o quanto meglio conduce flusso magnetico nello spazio libero.

3.2.1 Paramagnetismo

Per alcuni materiali solidi, gli atomi hanno un momento di dipolo permanente da cancellazione incompleta dello spin dell'elettrone e / o momenti magnetici orbitali.

Tuttavia, a causa dell'agitazione termica, gli atomi sono orientati casualmente e provocano un momento magnetico netto nullo del solido.

Applicando un campo esterno a tale materiale, gli atomi cominciano ad allinearsi, causando un valore di suscettibilità positivo, di solito variabile tra 10^{-5} e 10^{-2} . Esempi di materiali paramagnetici sono: alluminio, titanio e tungsteno.

A causa della loro bassa permeabilità relativa, μ_r , i materiali paramagnetici sono tutti trattati come non magnetici. In Figura 3.1 è mostrata un'illustrazione dell'orientamento di momenti magnetici in un materiale paramagnetico.

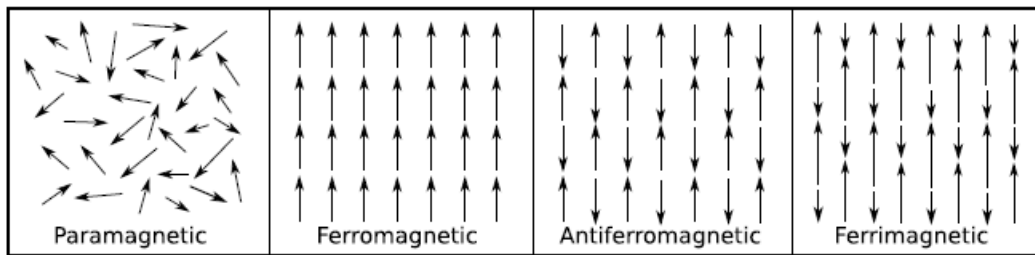


Figura 3.1: Rappresentazione schematica l'allineamento dei momenti magnetici per diversi tipi di materiali

3.2.2 Magnetismo Cooperativo

Vi è un certo numero di materiali con atomi che possiedono un momento magnetico permanente, come nei materiali paramagnetici, ma con la differenza che gli atomi cooperano tra di loro. Il ferromagnetismo, l'anti-ferromagnetismo e il ferrimagnetismo sono membri di questa famiglia. La Figura 3.1: **Rappresentazione schematica l'allineamento dei momenti magnetici per diversi tipi di materiali** mostra come i loro momenti magnetici sono allineati tra loro.

3.2.3 Ferromagnetismo

I materiali ferromagnetici hanno una magnetizzazione permanente anche in assenza di un campo magnetico, ed è dovuto allo stesso momento magnetico atomico netto come nel paramagnetismo ma che non si annulla.

Il momento magnetico orbitale fornisce un contributo ma è piccolo rispetto al momento di spin.

La differenza rispetto ad un materiale paramagnetico è che gli atomi non sono orientati in modo casuale; interagiscono l'uno con l'altro in domini. Ciò si traduce in una suscettibilità magnetica che è di diversi ordini di grandezza più grande rispetto ad un materiale paramagnetico. I valori di suscettibilità sono anche pari a 10^6 per materiali ferromagnetici quali cobalto, nichel e ferro (struttura CCC).

3.2.4 Anti-ferromagnetismo e ferrimagnetismo

I momenti magnetici di un atomo, in un materiale antiferromagnetico, sono antiparalleli agli atomi vicini, con conseguente magnetizzazione netta nulla. L'ossido di Nichel (NiO), l'ossido di manganese (MnO) e la lega ferro-manganese (FeMn) sono esempi di questo gruppo di materiali. Un materiale che possiede tali proprietà magnetiche reagisce come se fosse paramagnetico.

Il ferrimagnetismo è una combinazione di ferromagnetismo e anti-ferromagnetismo. Tuttavia, nei materiali ferromagnetici i momenti opposti hanno valori diversi, ciò comporta una magnetizzazione netta.

3.2.5 Domini

Un campo magnetico è una regione dove i momenti magnetici individuali degli atomi sono allineati con gli altri. Un materiale ferromagnetico o ferrimagnetico è composto da molti domini, che cambiano individualmente il loro allineamento. In un elemento policristallino i domini non corrispondono con i grani del materiale poiché ogni grano può essere formato da più di un dominio. L'intensità della magnetizzazione, M , per l'intero solido è di conseguenza il vettore somma della magnetizzazione per tutti i domini.

In un magnete permanente i domini rimangono allineati e il vettore somma non è pari a zero perfino in assenza di un campo magnetico. I materiali che possiedono questa proprietà sono chiamati materiali fortemente magnetici. Dall'altro lato, i materiali debolmente magnetici sono materiali che perdono memoria di una precedente magnetizzazione e possono quindi non essere magneti permanenti.

3.2.6 Isteresi magnetica

Quando un materiale ferromagnetico o ferrimagnetico è esposto a un campo magnetico esterno H , la relazione con la densità del flusso magnetico B potrebbe non essere lineare come nell'equazione 3.3. Un tipica curva di isteresi che mostra una relazione non lineare tra B e H può essere osservata in Figura 3.2.

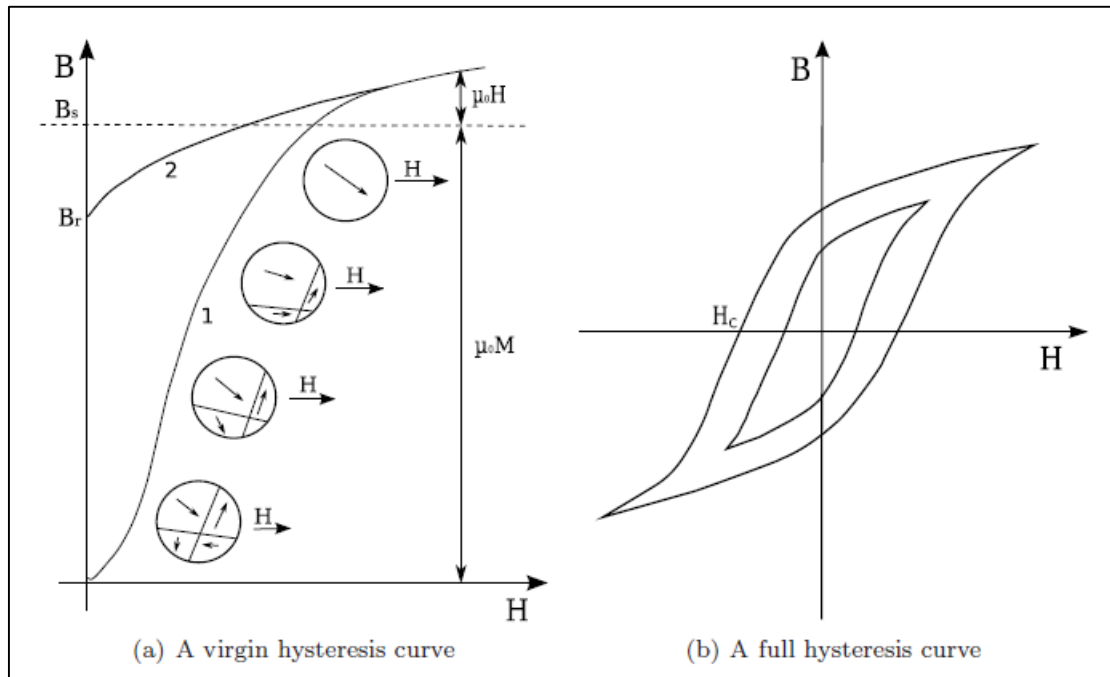


Figura 3.2: Curve di isteresi magnetica

Inizialmente, i domini negli elementi non magnetizzati hanno direzioni differenti. Quando viene applicato un campo magnetico esterno, i domini cominciano ad allinearsi nella stessa direzione del campo magnetico applicato; ciò causa la magnetizzazione dell'elemento. Questo processo di orientamento continuerà fino al punto di saturazione B_s , dove tutti i domini sono allineati. Una volta superato tale punto, la relazione tra il campo magnetico e il flusso magnetico non è più lineare.

Quando il campo magnetico si riduce, non seguirà la curva iniziale ma tornerà indietro come in Figura 3.2, tale fenomeno è definita isteresi magnetica.

Quando il campo magnetico è nullo, B non ritorna a zero ma sarà pari al valore del punto B_r . Questo punto è definito come densità di flusso rimanente o rimanenza; il materiale rimane magnetizzato in assenza di un campo esterno.

Per azzerare il flusso magnetico nell'elemento, bisogna applicare un campo magnetico d'intensità H_c in direzione opposta, come mostrato in Figura 3.2 (b), ed H_c è definita forza coercitiva.

La misura e la forza della curva d'isteresi sono d'importanza pratica. L'area al disotto della curva rappresenta l'energia persa per il ciclo di magnetizzazione il quale appare come il calore generato all'interno del corpo. Questo significa che un materiale altamente ferromagnetico può subire un riscaldamento dovuto a perdite per isteresi. Nonostante ciò, Rudnev e al. [2] afferma che nella maggior parte delle applicazioni di riscaldamento ad induzione, il calore per isteresi non supera il 7% del calore generato dalle correnti parassite.

3.2.7 Influenza della temperatura

Quando in un materiale ferromagnetico o ferrimagnetico la temperatura aumenta, la capacità di magnetizzare diminuisce. Questo è dovuto all'incremento dell'intensità delle vibrazioni termiche degli atomi, che tende a rendere casuale ogni momento magnetico comportando una diminuzione della magnetizzazione.

Il punto di saturazione B_s ha il suo massimo a 0 °C e decresce con l'aumentare della temperatura. Per ogni materiale c'è un valore di temperatura per il quale la capacità di magnetizzazione crolla repentinamente, e le caratteristiche magnetiche svaniscono, il materiale diventa paramagnetico. Questa temperatura è chiamata temperatura di Curie, T_c , sia per materiali ferromagnetici che per materiali ferrimagnetici; mentre per i materiali antiferromagnetici questa temperatura è chiamata temperatura di Neel [2].

La temperatura di Curie varia a seconda dei materiali; per esempio, per il ferro, il cobalto e il nichel è rispettivamente pari a 768, 1120 e 335 °C.

3.2.8 La rappresentazione di Frolich

C'è un numero di equazioni che può matematicamente descrivere la curva d'isteresi. Un esempio è la rappresentazione di Frolich [2]:

$$B = \frac{H}{\alpha + \beta ||H||} \quad (3.4)$$

Che rappresenta il giusto compromesso tra precisione e semplicità. Conoscendo come le variabili, α e β , variano con la temperatura, è possibile calcolare la curva di isteresi per differenti temperature.

3.3 Relazioni costitutive e concetti base

Nel processo elettro-tecnologico del riscaldamento mediante induzione, i fenomeni elettromagnetici sono alla base della generazione di calore e delle forze che si generano all'interno del pezzo che deve essere riscaldato.

Questo paragrafo descrive le equazioni di base e le loro semplificazioni che descrivono tali fenomeni elettromagnetici e che vengono usate nell'analisi FEM.

3.3.1 Equazioni di Maxwell

Le equazioni di Maxwell permettono di descrivere i fenomeni elettromagnetici, e, in particolare, permettono di determinare la distribuzione spaziale dei vettori del campo magnetico ed elettrico in base alla loro fonte, la densità di carica e il vettore densità di corrente. Tali equazioni sono composte dalle leggi di Faraday e di Ampere con l'estensione di Maxwell. Il termine di estensione è anche chiamato trasferimento di corrente. Le equazioni sono scritte di seguito:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{Legge di Ampere}) \quad (3.6)$$

Queste consistono di quattro differenti variabili di campo; l'intensità di campo elettrico \mathbf{E} , la densità di campo magnetico \mathbf{B} , l'intensità di campo magnetico \mathbf{H} e la densità di flusso elettrico \mathbf{D} .

L'equazione differenziale,

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.7)$$

esprime la conservazione di carica in ogni punto.

E' spesso indicata come l'equazione della continuità dove ρ è la densità di volume di carica libera e \mathbf{J} è la densità di corrente.

Altre due condizioni possono essere dedotte direttamente dalle equazioni di Maxwell.

La divergenza dell'equazione $\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

(3.5) implica:

$$\nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.8)$$

Dall'equazione 3.8 si evince che in ogni punto del campo la divergenza è costante. Se il campo almeno una volta si è azzerato, la costante deve essere pari a zero e il flusso di campo magnetico diventa solenoidale:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.9)$$

Che talvolta è definita legge di Gauss per il magnetismo.

Similmente, la divergenza dell'equazione 3.6, porta a:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (3.10)$$

E se si assume che il campo almeno una volta si sia annullato:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (\text{Legge di Gauss}) \quad (3.11)$$

Che è conosciuta anche come legge di Gauss. L'equazione 3.9 e la 3.11 sono frequentemente incluse come una parte delle equazioni di Maxwell.

Tra queste cinque equazioni che sono incluse in quelle di Maxwell, solo tre sono indipendenti. Possono essere considerate indipendenti le equazioni 3.5, 3.6, e 3.7 oppure le equazioni 3.5, 3.6 e 3.11. Le altre due equazioni possono essere derivate da queste tre, e sono di conseguenza chiamate ausiliarie o equazioni dipendenti.

3.3.2 Equazioni costitutive

La relazione tra il flusso magnetico e l'intensità di campo è data dall'equazione 3.3. Una relazione simile può essere formulata attraverso il flusso di campo elettrico e l'intensità di campo.

Quindi,

$$\mathbf{D} = \epsilon_0(1 + \chi_e)\mathbf{E} = \epsilon_0\epsilon_r\mathbf{E} = \epsilon\mathbf{E} \quad (3.12)$$

E l'equazione 3.13

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} = \mu_0\mu_r\mathbf{H} = \mu\mathbf{H} \quad (3.13)$$

dove ϵ rappresenta la permittività del dielettrico e χ_e la suscettibilità elettrica del materiale. In un materiale conduttore, la permittività è generalmente pari a 1. I valori costanti di permeabilità e permittività dello spazio libero sono conosciuti: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ e $\epsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ e sono collegati alla velocità della luce nello spazio libero:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (3.14)$$

Esiste inoltre una relazione tra la densità di corrente e di campo elettrico:

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (\text{Legge di Ohm}) \quad (3.15)$$

Dove σ è la conducibilità del materiale. Questa rappresenta il continuo della legge di Ohm.

Se il mezzo è omogeneo, allora l'equazione 3.11 può essere scritta come:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.16)$$

Combinando l'equazione di continuità, equazione 3.7, e la legge di Ohm, equazione 3.15, possiamo scrivere:

$$\nabla \cdot \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

E con l'equazione 3.16:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sigma \frac{\rho}{\epsilon} = 0 \quad (3.18)$$

La densità di carica per ogni istante di tempo è quindi:

$$\rho = \rho_0 e^{-t/\tau} \quad (3.19)$$

dove $\tau = \epsilon/\sigma$ rappresenta la relazione del mezzo e ρ_0 è eguale alla densità di carica al tempo $t=0$. La distribuzione di carica iniziale mostrerà un decadimento esponenziale con un tempo pari al tempo di rilassamento. La conducibilità tipica per un metallo è dell'ordine di 10^6 Siemens/m con una permittività ϵ di 10^{-11} As/Vm. Conseguentemente τ ha un ordine di grandezza pari a 10^{-17} s, ciò comporta che le cariche spariranno da un punto interno del corpo del metallo e appariranno sulla superficie quasi istantaneamente.

Anche per un conduttore così povero come l'acqua distillata, il tempo di rilassamento non è superiore a 10^{-6} s [2]. Anche ad alte frequenze nessuna carica sarà accumulata all'interno del conduttore e la 3.7 può quindi essere approssimata come

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3.20)$$

Ciò consente un'importante semplificazione della legge circuitale di Ampere con l'estensione di Maxwell. Si supponga un campo armonico con frequenza angolare ω , l'equazione (3.6) fornirà quindi l'intensità di corrente e di spostamento come \mathbf{J} e $\omega \epsilon / \sigma$, cioè 1 e $\omega \tau$. Pertanto, è ragionevole presumere che la corrente di spostamento sia trascurabile in un conduttore anche per alte frequenze e la 3.6 può essere scritta come [6],

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.21)$$

Questa importante semplificazione permette di ricavare l'equazione di diffusione dei campi elettromagnetici.

3.3.3 Le condizioni al contorno

In base alle proprietà elettriche e magnetiche, i campi elettromagnetici possono essere discontinui o continui su ciascun lato di un'interfaccia comune tra due materiali diversi.

All'interfaccia tra due mezzi il campo deve soddisfare la seguente condizione:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0 \quad (3.22a)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho \quad (3.22b)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_s \quad (3.22c)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0 \quad (3.22d)$$

in cui la normale uscente, \mathbf{n} , è diretta dall'elemento 2 all'elemento 1. Le condizioni al contorno possono anche essere formulate come segue:

- Le componenti tangenziali del campo elettrico sono continue in tutta l'interfaccia del mezzo 1 e 2.
- La componente normale del flusso elettrico è discontinuo attraverso l'interfaccia degli elementi con intensità pari a ρ . Si noti che per un elemento elettricamente conduttivo, $\rho = 0$.
- Le componenti tangenziali del campo magnetico sono discontinue tra i due mezzi, hanno inoltre intensità \mathbf{J}_s . Nel caso di una corrente superficiale pari a zero, come nei mezzi con conducibilità finita, la componente tangenziale è continua [2].
- La componente normale della densità di flusso magnetico è continua attraverso l'interfaccia dei due elementi.

3.3.4 Il vettore di Poynting

Il teorema di Poynting è una relazione tra il tasso di variazione di energia immagazzinata nei campi e il flusso di energia [2]. Moltiplicando la legge di Faraday, la 3.5 e la legge di Ampere, e ignorando la corrente di spostamento, la 3.6, con il campo elettrico e il campo magnetico rispettivamente, e sottraendoli l'uno dall'altro si ottiene:

$$\oint_s (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} dA = - \int_v \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dv - \int_v \sigma E^2 dv \quad (3.23)$$

La quantità $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ è nota come il vettore di Poynting \mathbf{P} in $\text{W} \cdot \text{m}^2$. Il teorema di Poynting stabilisce che la somma della perdita ohmica e la potenza assorbita dal campo magnetico nel volume è uguale alla potenza in ingresso nel corpo [2].

È comune per rappresentare una variazione armonica nel tempo come funzione complessa, moltiplicato per il fattore $e^{i\omega t}$. Il vettore di Poynting complesso può pertanto essere scritto come

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \quad (3.24)$$

dove (\mathbf{H}^*) è il complesso coniugato del campo magnetico. L'equazione 3.23 ha allora forma complessa

$$\oint_s \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} = -j2\omega \int_v \frac{1}{4} \mu_0 \mu_r |\mathbf{H}|^2 dv - \int_v \frac{1}{2} \sigma E^2 dv \quad (3.25)$$

La parte reale della 3.25 determina l'energia dissipata in calore (perdite ohmiche) nel volume v e la parte immaginaria, uguale 2ω volte la media valori di energia magnetica. La corrente della parte reale è nota come corrente parassita ed è la principale fonte di calore per il riscaldamento ad induzione.

3.3.5 L'equazione di diffusione

Per descrivere un campo vettoriale completamente, sia la divergenza sia il rotore devono essere univocamente definiti; poiché la densità di flusso magnetico soddisfa una divergenza nulla a condizione che:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.26)$$

dove \mathbf{A} è il potenziale vettore magnetico. Dalle equazioni di Maxwell è noto che:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{A}) = -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.27)$$

Oppure

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.28)$$

Perché $\nabla \times (\nabla \phi) = 0$, una soluzione della 3.28 è:

$$\mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (3.29)$$

Il segno negativo davanti $\nabla \phi$ è per definizione. Moltiplicando il campo elettrico per σ :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \phi = - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{J}_s \quad (3.30)$$

dove \mathbf{J}_s rappresenta la densità di corrente nella bobina di induzione [2]. Dalla 3.21:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \mathbf{B} = \mathbf{J} \quad (3.31)$$

Sostituendo con le 3.26 e 3.30 si ottiene

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = -\mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu \mathbf{J}_s \quad (3.32)$$

per un elemento omogeneo, isotropo indipendente dall' intensità di campo. Applicando a \mathbf{A} la condizione di Coulomb $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$,

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad (3.33)$$

che è chiamata equazione di diffusione. L'equazione può anche essere espressa nella stessa forma ma per diversi vettori; invece di \mathbf{A} scriviamo $\mathbf{J}, \mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{B}$. Nel caso del potenziale del vettore magnetico, esso non può essere collegato a nessun fenomeno fisicamente osservabile dell'induzione elettromagnetica, come le correnti parassite, la tensione indotta, l'impedenza della bobina, l'induttanza ecc. [2]. Se la corrente di eccitazione è sinusoidale, ed anche le correnti parassite, il campo elettromagnetico armonico può essere introdotto nella 3.33 e si ha:

$$i\omega \sigma \mathbf{A} - \frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad (3.34)$$

Va notato che in un materiale ferromagnetico l'approssimazione armonica non è più valida. Ciò è dovuto alla dipendenza della permeabilità relativa μ_r dal tempo, che rende le correnti parassite non sinusoidali.

3.3.6 Effetto pelle

Le equazioni di Maxwell possono essere espresse come due equazioni differenziali del secondo ordine

in \mathbf{E} e \mathbf{H} solamente. Si supponga che il materiale sia lineare, isotropo, omogeneo e libero da cariche ($\rho=0$).

Si inizia considerando il rotore delle equazioni 3.5 e 3.6

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial(\nabla \times \mathbf{H})}{\partial t} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{E} \quad (3.35)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{H} \quad (3.36)$$

Inoltre, assumendo soluzioni armoniche e considerando la relazione:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{a} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{a}) - \nabla^2 \mathbf{a} \quad (3.37)$$

è utilizzata con le proprietà $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ e $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$. Questi steps portano a due equazioni d'onda omogenee del secondo ordine;

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \quad (3.38a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \gamma^2 \mathbf{H} = 0 \quad (3.38b)$$

dove $\gamma^2 = i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)$ e γ è definita come la costante di propagazione dell'elemento. Tale costante di propagazione può essere definita come:

$$\gamma = \alpha + i\beta = i\omega \sqrt{\mu\varepsilon \left(1 - \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon} \right)} \quad (3.39)$$

La soluzione dell'equazione (3.38b) è, se rappresenta un'onda di propagazione elettrica uniforme lungo la direzione positiva z ,

$$E_x(z, t) = \text{Re} [E_0 e^{-\alpha z} e^{-i\beta z} e^{i\omega t}] = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (3.40)$$

Di conseguenza, se un'onda elettrica o magnetica viaggia in un mezzo conduttivo, il suo valore di ampiezza inizia ad attenuarsi secondo il fattore $e^{-\alpha z}$. Il fattore α è perciò chiamato “costante di attenuazione”, con unità di misura Np/m (Neper/metro).

Un buon conduttore è, per definizione tale, se $\sigma \gg \epsilon\omega$; l'equazione 3.39 può essere semplificata a:

$$\gamma = \sqrt{i} \sqrt{\mu\sigma\omega} = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \sqrt{\mu 2\pi f \sigma} = (1+i) \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3.41)$$

L'effetto pelle è definito come la distanza per cui l'ampiezza di un'onda piana diminuisce di un fattore pari a $e^{-1} = 0,368$. Così diventa:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3.42)$$

Pertanto, quando le onde elettromagnetiche raggiungono la superficie di un elemento conduttore, una corrente inizierà a fluire all'interno della superficie e diminuirà esponenzialmente verso l'interno del materiale. La corrente totale in un conduttore è data da [2],

$$I = \int_{-\infty}^0 J dy = \frac{J_s}{\alpha} = \frac{J_s \delta}{\sqrt{2}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \quad (3.43)$$

Che è pari al valore efficace della densità di corrente superficiale che fluisce uniformemente in uno spessore pari a δ con un ritardo di fase della corrente pari a 45° .

Tuttavia, è importante ricordare che il campo elettromagnetico è presente al di sotto dell'effetto pelle.

3.3.7 Linearizzazione della permeabilità

Nei materiali non lineari l'equazione 3.34 non è più valida. Questo è dovuto alla dipendenza dal tempo della permeabilità relativa μ_r , che rende le correnti parassite non sinusoidali. Ci sono due possibilità per superare questo inconveniente: introdurre un valore di permeabilità complesso, o imporre una permeabilità costante. E' possibile approssimare il materiale non lineare con un materiale lineare fittizio che ha un valore di permeabilità relativa sconosciuto

ma costante μ_r^f . Questo valore di permeabilità è legato alla non lineare curva caratteristica B-H in ogni punto (vedere Figura 3.2).

La condizione è che il materiale lineare fittizio deve avere le stesse perdite di densità di calore del materiale non lineare in ogni punto e può essere utilizzato per ricavare la permeabilità relativa fittizia come:

$$\mu_{ri}^f = \frac{w_{1i} + w_{2i}}{\mu_0 * (H_{mi}^f)^2} \quad (3.44)$$

dove w_{1i} e w_{2i} rappresentano la densità della co-energia magnetica del materiale. w_{1i} dipende dalla curva B-H reale e w_{2i} è legato al valore medio della pendenza dB/dH durante un quarto di periodo T. H_{mi}^f Rappresenta la massima intensità di campo magnetico per una funzione sinusoidale nel materiale fittizio. La densità di co-energia magnetica può essere calcolata come:

$$w_{1i} = \frac{H_{mi}^f}{\beta} - \frac{\alpha}{\beta^2} \ln \frac{\alpha + \beta H_{mi}^f}{\alpha} \quad (3.45)$$

$$w_{2i} = \frac{1}{2} \frac{(H_{mi}^f)^2}{\alpha + \beta H_{mi}^f} \quad (3.46)$$

dando una sovra e sottostima delle perdite di calore.

Poiché sia la relativa permeabilità del materiale fittizio, μ_r^f , sia l'intensità del campo magnetico, H_{mi}^f , sono sconosciute, è necessario effettuare un processo iterativo.

Nella prima fase

$$\mu_r^f = \frac{1}{\mu_0 \alpha} \quad (3.47)$$

In tutte le fasi successive μ_r^f sarà calcolato in base alla 3.44.

La formulazione è basata sulla rappresentazione di Frolich della curva lineare B-H.

3.3.8 Unità nei campi elettromagnetici

Dopo la scoperta di Maxwell, un nuovo sistema di unità è stato proposto da Giorgi nel 1901 al AEI, in quanto era chiaro che le misurazioni elettriche non potevano essere espresse mediante le tre unità fondamentali, quali lunghezza, massa e tempo. Il nuovo sistema di riferimento considera unità fondamentale il metro, il chilogrammo e il secondo e una quarta unità, di qualsiasi grandezza elettrica appartenente al sistema pratico, quale coulomb, ampere, o ohm. Dalle equazioni di campo, è allora possibile esprimere le unità di ogni quantità di campo secondo queste quattro unità fondamentali.

Nella Tabella 3.1 sono riportate le unità SI e le loro relative unità, le quantità più comuni dell'elettromagnetismo sono riportate in grassetto.

Table 1: Basic quantities in electromagnetism.			
Derived quantity	Symbol	SI unit	SI base unit
Electric field intensity	E	V/m	$\text{m kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$
Electric flux density	D	C/m ²	$\text{m}^{-2} \text{s A}$
Magnetic field intensity	H	A/m	$\text{m}^{-1} \text{A}$
Magnetic flux density	B	T	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$
Current Density	J	A/m ²	$\text{m}^{-2} \text{A}$
Magnetic flux	ϕ	Wb	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$
Permeability	μ	H/m	$\text{m kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$
Permittivity	ε	F/m	$\text{m}^{-3} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$
Volume charge density	ρ	C/m ³	$\text{m}^{-3} \text{s A}$
Conductivity	σ	S/m	$\text{m}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2$
Resistivity	ρ_c	Ωm	$\text{m}^3 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$

Tabella 3.1: Grandezze fondamentali nell'elettromagnetismo

3.4 Trasferimento del calore

3.4.1 Modalità di trasferimento di calore

Ci sono tre modalità di trasferimento del calore, conduzione, convezione e irraggiamento. Il trasferimento di calore per conduzione avviene all'interno del solido e mentre le altre due modalità intervengono nelle condizioni al contorno.

3.4.2 Conduzione

La legge costitutiva empirica per la conduzione di calore si chiama "legge di Fourier di conduzione di calore" ed è scritta come:

$$q_{\text{cond}} = -k \nabla T \quad (3.48)$$

dove k è la conducibilità termica, T è la temperatura e q_{cond} è il flusso di calore trasferito per conduzione. La conducibilità è generalmente una funzione della temperatura.

Di solito è più semplice ottenere una distribuzione di temperatura uniforme all'interno del pezzo se la conducibilità termica è elevata.

3.4.3 Convezione

Il calore è trasferito per convezione dalla superficie del pezzo verso l'ambiente, fluidi o gas e può essere espressa come:

$$q_{\text{conv}} = h(T_s - T_\infty)^\alpha \quad (3.49)$$

dove h è il coefficiente di trasferimento di calore superficiale per convezione, T_s è la temperatura superficiale, T_∞ è la temperatura ambiente e q_{conv} è la densità di flusso di calore scambiato per convezione.

Il valore del coefficiente di pellicola dipende principalmente dalle proprietà termiche dei legami del gas circostante, dalla sua viscosità e la velocità del gas. In molte applicazioni di riscaldamento a induzione, il pezzo si muove ad alta velocità (ad esempio, riscaldamento con disco rotante, riscaldamento con filo, ecc). Di conseguenza, la convezione può essere considerata forzata; la quantità di calore scambiato per convezione può essere uguale o superiore alle perdite di calore per irraggiamento. Per un pezzo all'aperto una buona approssimazione è [2]:

$$q_{\text{conv}} = 1.54 (T_s - T_\infty)^{1.33} \quad (3.50)$$

tale valore è messo a confronto con le perdite di calore dovute all'irraggiamento in Fig. 3.3.

3.4.4 Irraggiamento

La perdita di calore trasferita dal pezzo caldo a causa di radiazioni elettromagnetiche è definita irraggiamento. L'equazione che descrive tale fenomeno è data da:

$$q_{\text{irr}} = \sigma \epsilon [(T_s)^4 - (T_\infty)^4] \quad (3.51)$$

dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) e ϵ è l'emissività della superficie. L'emissività è definita come il rapporto del calore emesso dalla superficie e dal calore emesso da un corpo nero. T_s è la temperatura superficiale e T_∞ è la temperatura ambiente espressa in Kelvin.

Poiché le perdite di calore per irraggiamento sono proporzionali alla quarta potenza della temperatura, queste superano le perdite per convezione forzata ad elevate temperature, soprattutto se il valore di emissività è maggiore di 0,3, come si vede in Figura 3.3. Si noti che il valore dell'emissività può variare per uno stesso materiale; come nel caso del rame dove è pari a 0,3 per una superficie lucidata, e a 0,70 per una superficie molto ossidata [2].

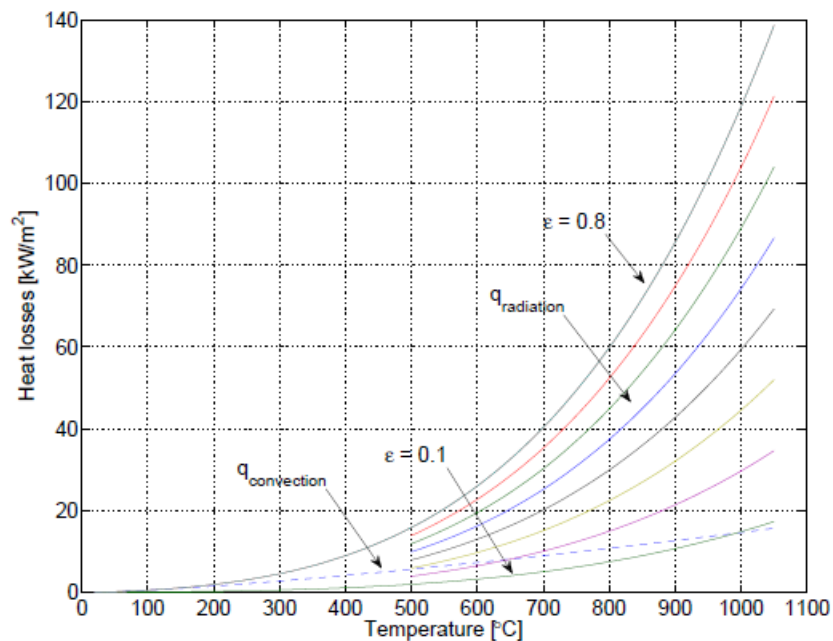


Figura 3.3: Le perdite di calore dovute alle modalità convezione e irraggiamento. Le linee continue rappresentano le perdite di calore per irraggiamento con un valore di emissività che varia tra 0,1-0,8 e con un aumento di 0,1 per ogni linea. Le linee tratteggiate rappresentano la perdita di calore per convezione secondo l'Eq. (3.50).

3.4.5 L'equazione di conduzione del calore

La distribuzione di temperatura in un mezzo è governata dall'equazione [2]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (3.52)$$

dove ρ è la densità, c è la capacità termica specifica, k è la conducibilità termica e Q l'energia generata nel materiale per unità di volume e di tempo. L'equazione di trasferimento di calore determina la distribuzione di temperatura in un mezzo come una funzione dello spazio e del tempo. Una volta che la distribuzione della temperatura è nota, il flusso di calore all'interno del corpo o sulla superficie può essere calcolato dall'eq. 3.48.

La soluzione dell'equazione della conduzione di calore richiede l'imposizione delle condizioni iniziali e al contorno. La condizione al contorno può essere scritta, nota la temperatura al contorno, come un flusso imposto usando il confine di irraggiamento e convezione. La condizione di flusso è legata al confine tramite la relazione:

$$q_n = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.53)$$

Dove n è la della normale esterna alla superficie e q_n è la costante di flusso data da:

$$q_n = h(T_s - T_\infty)^\alpha + \sigma \varepsilon [T_s^4 - T_\infty^4] \quad (3.54)$$

se vi sono sia convezione che irraggiamento sul contorno.

Supponendo che la temperatura sulla superficie del materiale sia variabile con legge sinusoidale, si può dimostrare che l'ampiezza della variazione sarà minore con l'aumento della profondità e con un certo ritardo, ossia un angolo di fase.

Se si aumenta la frequenza della variazione di temperatura, l'attenuazione e l'angolo di fase aumentano; è lo stesso fenomeno che si ha nel caso di onde elettromagnetiche, ma con un'altra scala temporale.

Anche se l'equazione di diffusione, eq. (3.34), ha le stesse proprietà dell'equazione della conduzione di calore, eq. (3.52), le scale temporali sono diverse. Le correnti armoniche applicate ad un apparecchio di riscaldamento ad induzione hanno di solito frequenza che varia dai 50 Hz ai 70 KHz. Pertanto, l'uso dell'eq. (3.34) è possibile in ogni incremento di tempo, in

quanto nell'analisi termica la scala temporale del problema elettromagnetico è molto più breve.

3.5 Meccanismo di riscaldamento nei compositi termoplastici rinforzati con fibre di carbonio

A causa della complessa struttura dei materiali compositi, l'attenzione è concentrata sui meccanismi di generazione del calore all'interno di un composito a matrice termoplastica rinforzato con fibre di carbonio.

I materiali termoplastici rinforzati con fibre di carbonio possono essere riscaldati per induzione senza che sia necessario l'utilizzo di alcun materiale addizionale, poiché le fibre di carbonio sono elettricamente conduttive.

Come menzionato in precedenza, affinché si inducano delle correnti parassite all'interno del pezzo da lavorare è necessario che sia presente un circuito elettrico chiuso. L'energia di riscaldamento E , secondo la legge di Joule, è data da:

$$E=I^2 \cdot R t \quad (3.55)$$

dove con I è indicata la corrente, R è la resistenza e t il tempo di esposizione al campo magnetico.

Il grado di riscaldamento dipende dalla frequenza e dall'intensità delle correnti parassite e dalla resistenza elettrica, ed inoltre dalle caratteristiche termiche, elettriche e magnetiche del materiale.

I primi a studiare i principi del riscaldamento ad induzione elettromagnetica dei materiali termoplastici rinforzati con fibre di carbonio, furono Miller e Fink [3], che però trovarono ragioni opposte circa i meccanismi di generazione del calore.

Miller ha dimostrato che le correnti parassite indotte nel pezzo in lavorazione formano un circuito che è un'immagine speculare dell'induttore. Una conseguenza di ciò è che la corrente produce un proprio campo magnetico che è capace di annullare il campo magnetico nelle regioni più profonde del materiale [3].

L'estensione di tale annullamento dipende dall'intensità della corrente indotta sulla superficie più vicina all'induttore. La corrente può solo muoversi lungo un campo elettrico conduttivo, o

lungo le fibre conduttive. Nei tessuti si è avuta un'immagine molto più simile all'induttore a ciò è probabilmente dovuto all'alta incidenza del contratto elettrico all'interno del tessuto. Sono stati identificati tre meccanismi di riscaldamento:

- Perdite per effetto Joule
- Perdite dielettriche
- Resistenza di contatto

Questi tre meccanismi si differenziano l'uno dall'altro in base a dove si sviluppa il riscaldamento all'interno del pezzo in lavorazione, e sono riassunti graficamente in Figura 3.4.

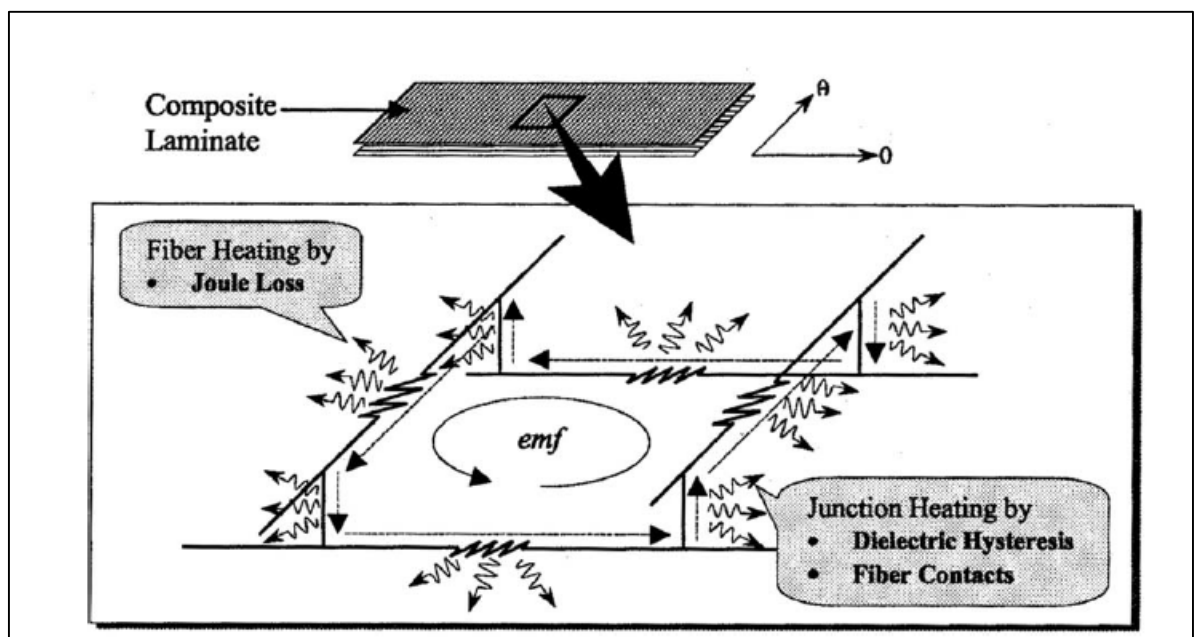


Figura 3.4: Schema riepilogativo dei meccanismi di riscaldamento di un laminato "cross-ply"

3.5.1 Perdite per effetto Joule

Il riscaldamento delle fibre è il risultato delle perdite per effetto Joule dovute alla resistenza interna delle fibre e dipende quindi, dalla lunghezza delle fibre, dalla resistività e dalla sezione. Tramite alcuni studi, è stato possibile vedere come la matrice fornisca un contributo minimo al riscaldamento e che quindi è predominante il riscaldamento delle fibre.

Tuttavia, affinché si verifichi tale fenomeno, è necessario che ci sia una resistenza di contatto bassa tra le fibre perpendicolari, che si verifica quando c'è un intimo contatto tra queste;

inoltre, come mostrato in Figura 3.4, è fondamentale l'esistenza di percorsi chiusi per le fibre, infatti laminati unidirezionali non possono essere riscaldati per induzione elettromagnetica.

3.5.2 Riscaldamento per perdite dielettriche

Il riscaldamento dei nodi per perdite dielettriche è stato osservato notando che applicando un campo elettrico alternato, si crea una differenza di potenziale tra le fibre, che, essendo separate da un sottile strato di matrice, si comportano come un condensatore.

Il riscaldamento dielettrico si verifica a causa del movimento delle cariche e la rotazione delle molecole attraverso le fibre. L'influenza dell'intersezione delle fibre sul riscaldamento è stato studiato da Fink [3]. Il riscaldamento dielettrico può essere modellato come un circuito conduttivo con una resistenza e una capacità in parallelo (Figura 3.5: **Modello elettrico del riscaldamento dovuto alle perdite dielettriche**).

La resistenza tra le fibre può essere calcolata [3]:

$$R_{dh} = \frac{h}{\omega \epsilon_0 k d_f^2 \tan \delta} \quad (3.56)$$

dove h rappresenta la distanza tra le fibre, ϵ_0 la permittività del vuoto, k e δ rappresentano, rispettivamente, la costante dielettrica e il fattore di dissipazione del polimero, mentre d_f è il diametro della fibra. In base a ciò si è concluso che per massimizzare l'effetto del riscaldamento dielettrico dei laminati "*cross-ply*" o "*angle-ply*", lo spessore dello strato sopra e sotto l'interfaccia e la frazione volumetrica delle fibre deve essere massimizzata, mentre il diametro e lo spessore della resina tra gli strati devono essere minimizzati [3]. Come ulteriore dimostrazione di tale meccanismo di riscaldamento, Fink ha osservato che polimeri diversi si riscaldano in modo diverso e questa differenza è dovuta alle proprietà dielettriche del polimero.

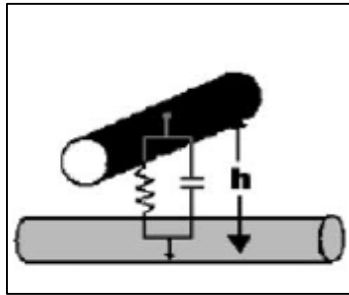


Figura 3.5: Modello elettrico del riscaldamento dovuto alle perdite dielettriche

3.5.3 Riscaldamento causato dalle resistenze di contatto

L'ultimo meccanismo di riscaldamento si presenta quando vi è intimo contatto tra le fibre (Figura 3.6: **Modello del riscaldamento causato dalla resistenza di contatto**). Nel caso di un più alto volume di fibre, il riscaldamento a causa della resistenza di contatto diventa predominante e dipende dal valore della resistenza di contatto dei nodi e dalla caduta di potenziale attraverso questi [3].

Come conseguenza del contatto, la resistenza ai nodi, che genera calore, è fortemente dipendente dalla temperatura e dalla pressione. Tuttavia non è necessario un contatto diretto tra le fibre, ma basta che la distanza tra le fibre sia abbastanza piccola da consentire il passaggio degli elettroni attraverso questo spessore.



Figura 3.6: Modello del riscaldamento causato dalla resistenza di contatto

3.5.4 Confronto tra perdite per effetto Joule e riscaldamento dei nodi

Sebbene siano stati condotti molti studi volti a capire quale meccanismo di riscaldamento sia predominante, è molto probabile che ciò dipenda da diversi parametri.

In alcuni studi si è dimostrato che il riscaldamento delle fibre è prevalente solo in caso in cui la resistenza di contatto delle fibre sia molto bassa. Ciò non dipende solo dal tipo di fibre che si stanno riscaldando, ma anche dalla struttura del pezzo in lavorazione. Per i pre-preg e i

“*cross-ply*” è predominante il riscaldamento dei nodi in quanto la resistenza di contatto è molto elevata.

Per i tessuti è predominante il riscaldamento delle fibre a causa di una zona più ampia di contatto tra queste e quindi una bassa resistenza di contatto.

Inoltre, i paramenti di processo possono incidere sui meccanismi di riscaldamento. Quando un pezzo si riscalda, la viscosità della matrice diminuisce e, applicando la giusta pressione, si verifica lo “*squeezing*” della matrice; ciò comporta un maggior contatto tra le fibre e quindi prevale il riscaldamento di quest’ultime.

3.6 Effetto di bordo

Uno dei principali problemi associati alla saldatura ad induzione è l’effetto derivante dalla geometria della zona di saldatura, denominato “effetto di bordo”.

Questo cosiddetto effetto di bordo deriva dalla vicinanza dell’induttore ad un bordo del pezzo. Ad esempio, se si considera una semplice bobina circolare, le correnti parassite indotte nel pezzo hanno anch’esse un andamento circolare. **La****Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**Figura 3.7 (i) mostra il percorso delle correnti parassite prodotte da tale bobina e il relativo profilo di temperatura corrispondente attraverso la linea A-A, per un pezzo che è più grande della bobina.

Ai bordi, e specialmente agli angoli, vi è una grande area che permette alle correnti parassite di fluire. Questo si traduce in basse densità di corrente in queste regioni, con conseguente minor quantità di calore generata, come mostrato dal profilo temperatura più bassa ai bordi del pezzo [23].

Se la dimensione del pezzo è ridotta, come mostrato in Figura. 7 (ii) e (iii) le correnti sono in grado di seguire la forma della bobina; al fine di creare percorsi ad anello chiuso, le correnti parassite sono quindi costretti a viaggiare lungo il bordo del laminato nella zona più vicina alla bobina [23]. In queste regioni si avrà una più alta densità di corrente e di conseguenza temperature più elevate.

Di conseguenza, come indicato dai profili di temperatura, le temperature più alte si presentano sul bordo del pezzo; tale effetto è difficile da eliminare e sono stati molti sforzi per ridurre al minimo gli effetti di bordo, o per evitarli del tutto. Il metodo più semplice e più comune è utilizzare modelli per prevedere dove più verificharsi un eccessivo riscaldamento dei bordi.

Possono essere fatte modifiche al design della bobina per contrastare questo effetto.

Un altro metodo studiato, volto ad evitare tale effetto di bordo risiede nell'utilizzo di materiali suscettori posti sulla linea di saldatura. Il processo prevede il re-indirizzamento dei percorsi di flusso a correnti parassite nei suscettori di rete metallica.

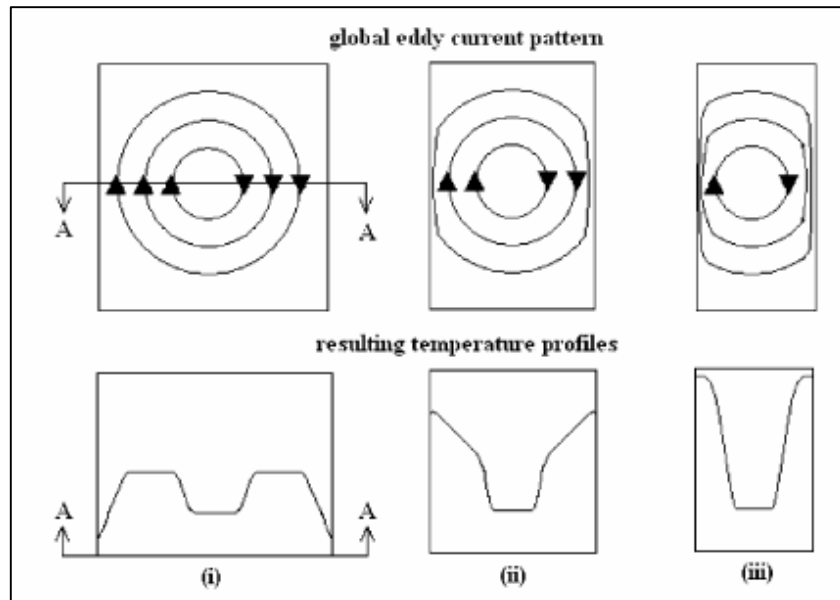


Figura 3.7: Effetto di bordo

Capitolo IV

4. Simulazione numerica del processo

4.1 Introduzione

Come evidenziato nei capitoli precedenti, nella saldatura ad induzione elettromagnetica di materiali compositi, a matrice termoplastica, un ruolo fondamentale è svolto dai parametri di processo, quali frequenza, potenza del generatore, distanza tra l'avvolgimento induttore ed il laminato, geometria della bobina e disposizione delle fibre di carbonio all'interno del laminato, la quale ha influenza sulla velocità di riscaldamento e sulla distribuzione del calore.

In seguito di tali valutazioni si è deciso di proseguire, in tale lavoro, con una preliminare simulazione FEM del processo di riscaldamento per induzione dei provini da giuntare, in modo da riuscire ad acquisire la giusta sensibilità dei parametri di saldatura, che saranno poi verificati dalla successiva fase di sperimentazione.

Le fasi di sperimentazione avranno lo scopo di verificare l'intero lavoro di calcolo svolto ed essere un punto di partenza per la sperimentazione della saldatura a induzione di termoplastici.

Il software scelto per la simulazione del processo di riscaldamento è stato JMag Designer.

4.2 JMag Designer

JMAG-Designer è un software di simulazione per lo sviluppo e la progettazione di dispositivi elettronici. JMag è stato rilasciato per la prima volta nel 1983 come strumento di supporto alla progettazione di dispositivi quali motori, attuatori, componenti di circuiti e antenne.

JMAG incorpora la simulazione tecnologica a un'analisi accurata di un ampio range di fenomeni.

JMAG ha un'interfaccia capace di collegare software di terze parti e alcune delle funzioni di analisi possono essere eseguite dalla maggior parte dei sistemi CAD e CAE.

JMAG è in grado di analizzare e quantificare fenomeni che sono osservabili solo durante la sperimentazione. I modelli virtuali permettono di studiare a fondo i fenomeni e esplorare con maggiori dettagli la progettazione. I test virtuali possono eliminare problemi di progettazione all'origine della produzione e permettono di ridurre notevolmente i costi di sperimentazione.

4.3 Modellazione del fenomeno fisico

Il software divide il fenomeno fisico in due analisi: nel modello di analisi delle perdite per effetto joule, si esegue un'analisi del campo magnetico per comprendere il fenomeno causato dalle correnti indotte e il campo magnetico generatosi nei provini nel momento in cui una corrente fluisce attraverso l'induttore. Un'analisi del campo magnetico basata sul metodo degli elementi finiti (FEM) è utile quando bisogna considerare le correnti parassite prodotte dall'effetto pelle. Di seguito, nel modello per l'analisi della temperatura, si esegue un'analisi termica per studiare la generazione del calore che si produce all'interno dei provini; tale generazione di calore si basa sui risultati dell'analisi magnetica.

La relazione tra il fenomeno fisico e il modello d'analisi è mostrata nella figura seguente (Figura 4.1).

Gli steps necessari per ottenere i risultati dell'analisi sono mostrati in Figura 4.2.

Dapprima si crea un modello per ciascun'analisi, quindi nel caso in esame sono stati creati due modelli, uno per l'analisi del campo magnetico e una per l'analisi termica.

Si esegue un'analisi accoppiata: i risultati dell'analisi termica mostrano la temperatura raggiunta o il processo di riscaldamento nei provini mentre, tramite i risultati dell'analisi magnetica, è possibile risalire alle cause dell'innalzamento della temperatura dalla conferma del campo magnetico e delle correnti parassite generate.

Di seguito sono riportati i passaggi effettuati per la realizzazione del modello di analisi.

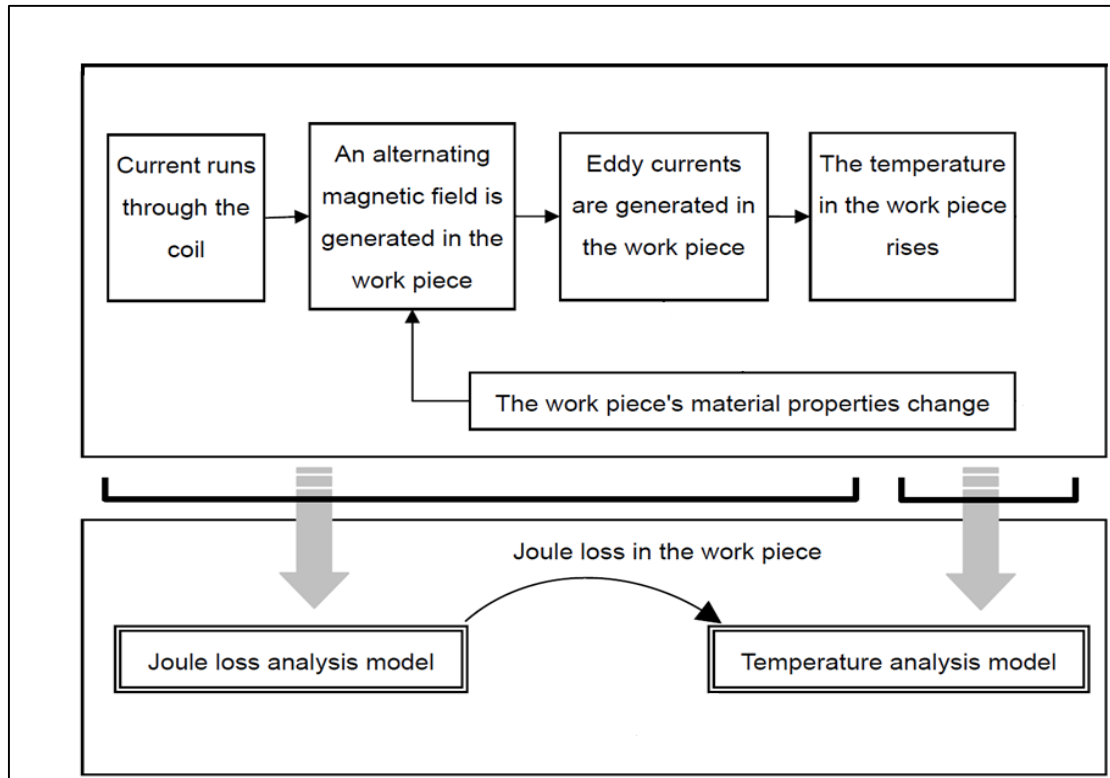


Figura 4.1: Relazione tra fenomeno fisico e modello di analisi

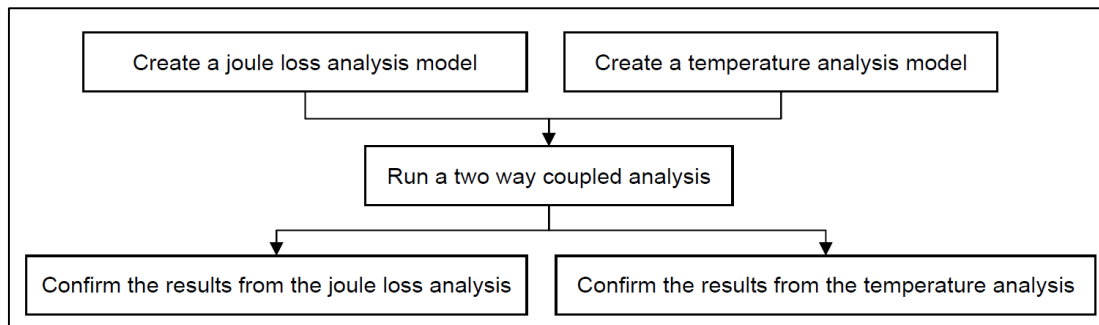


Figura 4.2: Steps necessari per effettuare l'analisi

4.4 Modello di analisi delle perdite per effetto Joule

L'obiettivo di quest'analisi è di ottenere una distribuzione delle perdite per effetto Joule dei provini, che saranno poi usate come fonte di calore nell'analisi del riscaldamento ad induzione ad alta frequenza.

Il software permette cinque diversi tipi di analisi del campo magnetico:

- Analisi statica (3D, 2D, AX)
- Analisi transitoria (3D, 2D, AX)
- Analisi di frequenza (3D, 2D, AX)
- Analisi di sezione (3D, 2D)
- Iron loss analysis (3D, 2D, AX)

Il tipo di analisi è determinato dall'obiettivo della simulazione. In questo caso, la perdita media per un periodo di alimentazione è ottenuta utilizzando un'analisi del campo magnetico, e quindi tali risultati sono usati come fonte di calore nell'analisi termica poiché la costante di tempo per l'analisi termica è molto superiore alla costante di tempo per l'analisi del campo magnetico.

Si esegue un'analisi della risposta in frequenza poiché la forma d'onda della corrente di alimentazione e della tensione, e del campo magnetico nel circuito è sinusoidale.

Una volta scelto il tipo di analisi, bisogna impostare le proprietà dei materiali di tutti i componenti.

In particolare il software richiede le proprietà magnetiche, elettriche e termiche per ogni componente. I valori impostati sono riportati nelle tabelle seguenti:

Parametro	Valore
Heat capacity at constant pressure (C)	385(J/Kg*K)
Temperatura di riferimento	20 (°C)
Permittività relativa (ϵ_r)	1
Conducibilità termica (k)	400[W/m*K]
Permeabilità (μ_r)	1
Resistività	1.72×10^{-8} [ohm*m]
Densità (ρ)	8700[Kg/m ³]
Conducibilità elettrica	5.998×10^7 [S/m]

Tabella 4.1: Proprietà fisiche della bobina di rame

Parametro	Valore
Heat capacity at costant pressure (C)	1000(J/Kg*K)
Temperatura di riferimento	20 (°C)
Permittività relativa (ϵ_r)	1
Conducibilità termica (k)	3.5 [W/m*K]
Permeabilità (μ_r)	1
Conducibilità elettrica	2×10^5 [ohm*m]
Densità (ρ)	1.43[g/m ³]

Tabella 4.2: Proprietà fisiche dei provini

Parametro	Valore
Heat capacity at costant pressure (C)	1460(J/Kg*K)
Temperatura di riferimento	20 (°C)
Permittività relativa (ϵ_r)	1
Conducibilità termica (k)	0.19 [W/m*K]
Permeabilità (μ_r)	1
Conducibilità elettrica	0 [ohm*m]
Densità (ρ)	1.2[g/m ³]

Tabella 4.3: Proprietà fisiche del supporto

Il passaggio successivo è stato quello di creare un modello del circuito elettrico, che simulasse il generatore della macchina a induzione.

Il modello del circuito è stato simulato organizzando, e poi connettendo, gli elementi del circuito. L'analisi del circuito è eseguita simultaneamente con l'analisi del campo magnetico.

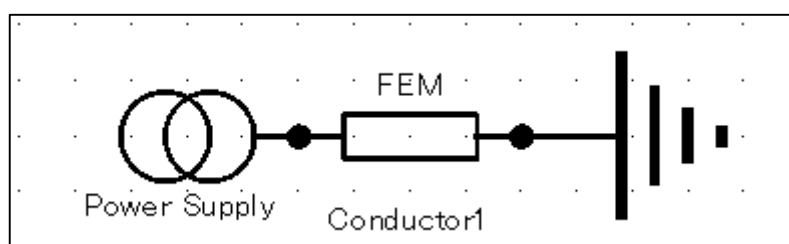


Figura 4.3: Schema circuito elettrico

Per quest'analisi è stato utilizzato l'elemento "Power Supply Current" in quanto simula una corrente sinusoidale che scorre all'interno dell'induttore.

L'elemento "FEM Conductor" è utilizzato quando bisogna considerare la corrente di distribuzione in un conduttore. Il conduttore è collegato al circuito mediante tal elemento. La resistenza del conduttore FEM è determinata dalla geometria del modello e dalla conducibilità elettrica, quindi non bisogna impostare altri parametri.

Il terzo elemento del circuito è rappresentato dalla "messa a terra", la terra è connessa al lato opposto del conduttore FEM. Per la messa a terra non è necessario stabilire alcun parametro. Una volta creato il modello del circuito elettrico, bisogna impostare le condizioni al contorno per l'analisi del riscaldamento a induzione; tali condizioni sono:

- Contorni di simmetria
- Conduttore FEM
- Controllo di Frequenza
- Analisi accoppiata
- Parametri di circuito

La condizione al contorno di simmetria è utilizzata per specificare la distribuzione del campo magnetico all'interno dell'induttore. Il campo magnetico fluisce parallelamente e la corrente perpendicolarmente alla faccia in cui è impostata tale condizione.

La condizione "FEM Conductor" si ricollega all'elemento nel circuito. Quando l'ampiezza è positiva, la corrente fluisce dalla faccia d'ingresso a quella di uscita; quando è negativa fluisce al contrario.

Il controllo della frequenza è utilizzato per specificare il valore della frequenza utilizzato nell'analisi. Il numero di valori utilizzato è specificato dal numero di "steps". La frequenza dell'induttore in questo caso, è pari a 145 KHz, ed è costante, per cui il numero di steps è pari a uno.

Per eseguire sia un'analisi del campo magnetico che un'analisi termica, bisogna selezionare [Coupling with Thermal Analysis].

Impostate le condizioni al contorno, si è passati alla generazione della mesh per i diversi elementi.

Inoltre, la mesh deve essere generata tenendo conto dell'effetto pelle per eseguire un'accurata analisi del campo magnetico.

In un'analisi FEM, la mesh deve essere generata nella regione dell'aria con dimensioni determinata dalla severità di saturazione. In quest'analisi la scala della regione aria è impostata a 2.5 volte la mesh del modello per meglio capire come il campo magnetico si distribuisce nell'aria.

Se la mesh nella regione aria è generata selezionando la casella di controllo [Create Air Region], la condizione di simmetria di confine è impostata automaticamente sul piano esterno della regione dell'aria, in questo modo si ipotizza che il campo magnetico non sia presente al di fuori di tale area.

4.5 Modello dell'analisi termica

Una volta impostata l'analisi del campo magnetico, si è passati all'analisi termica. La geometria del modello nell'analisi termica può essere semplificata eliminando le parti che non incidono sulla distribuzione della temperatura, come l'aria.

L'analisi viene eseguita efficientemente anche con un modello semplificato in quanto si riduce il tempo di calcolo.

In questa analisi non viene considerato il trasferimento di calore dall'induttore ai provini, in quanto il calore è generato solamente dalla correnti parassite interne ai provini.

Anche in questo caso, il software propone diversi tipi di analisi termica:

- Analisi stazionaria (3D)
- Analisi transitoria (3D)

Il tipo di analisi è determinato dal risultato che si vuole ottenere: una temperatura costante (analisi stazionaria) oppure un profilo di temperatura (analisi transitoria).

In questo caso si è scelta un'analisi termica transitoria in modo tale da ottenere la variazione di temperatura all'interno dei provini al variare del tempo.

Scelto il tipo di analisi, bisogna imporre le condizioni al contorno:

- Contorni di trasferimento del calore
- Temperatura iniziale
- Sorgente di calore
- Numero di steps di controllo
- Analisi accoppiata

Le condizioni al contorno per il trasferimento del calore devono essere specificate in modo tale da simulare il trasferimento di calore tra gli oggetti; in particolare sono state selezionate tutte le facce dei due provini, in modo da considerare il calore trasferito da provino a provino, tra provino e supporto ed anche quello disperso nell'aria.

Inoltre bisogna assegnare un valore anche al coefficiente di scambio termico, pari a $14 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Il coefficiente di scambio termico con l'aria varia con l'obiettivo dell'analisi e con l'ambiente.

Il software richiede che sia impostata anche la temperatura iniziale di tutti gli elementi, pari a 26°C .

Il passo successivo è stato quello di impostare come sorgente di calore i due provini. Nel pannello di controllo di tale condizione bisogna spuntare la casella [Coupling], in quanto stiamo effettuando un'analisi accoppiata con l'analisi del campo magnetico.

La precisione dell'analisi e la convergenza delle interazioni non lineari può essere migliorata riducendo l'intervallo di tempo. Infatti, se il tempo di intervallo è troppo corto, il numero di steps aumenta, e il tempo necessario all'analisi aumenta; tuttavia un numero elevato di steps può aumentare notevolmente il tempo di calcolo. Quindi, per le simulazioni effettuate, si è cercato un giusto compromesso tra tempo di calcolo e precisione dell'analisi.

Per quanto riguarda la generazione della mesh, sono stati utilizzati gli stessi valori dell'analisi del campo magnetico, l'unica differenza è che in questo caso è stata cancellata la regione dell'aria.

Una volta impostati tutti i parametri è possibile lanciare l'analisi e valutare i risultati ottenuti.

4.6 Prima sessione di simulazione

La prima sessione di simulazione è stata condotta al fine di realizzare un modello FEM che simulasse il comportamento dei provini in un processo di riscaldamento per induzione elettromagnetica.

Poiché la fase di sperimentazione è stata realizzata con un generatore a frequenza costante, i parametri che sono stati fatti variare nelle simulazioni sono stati: il voltaggio ed il tempo di permanenza, al fine di comprendere l'effetto dei diversi valori di voltaggio sull'andamento della temperatura durante la fase di riscaldamento.

In particolare, i valori di voltaggio impostati sono:

1. $V_{\text{coil1}} = 200 \text{ [A]}$
2. $V_{\text{coil2}} = 250 \text{ [A]}$
3. $V_{\text{coil3}} = 300 \text{ [A]}$

Mentre i valori di tempo sono:

1. $T_1 = 15 \text{ [s]}$
2. $T_2 = 20 \text{ [s]}$
3. $T_3 = 25 \text{ [s]}$

Pertanto combinando questi possibili valori di corrente e tempo, la prima sessione di simulazioni è stata articolata nelle seguenti 6 prove.

Simulazione	Tempo [s]	Voltaggio [V]
1.1	20	200
1.2	25	200
1.3	25	250
1.4	15	300

Tabella 4.4: Parametri della prima serie di simulazioni

4.6.1 Processo di modellazione

Per la realizzazione della geometria si è proceduto utilizzando un software CAD esterno, quale SolidWorks.

La modellazione è stata condotta riproducendo in ambiente CAD gli elementi principali che costituiscono l'attrezzatura quali: l'induttore, il supporto e i due provini da giuntare (Figura 4.4).

In Figura 4.5 è riportato l'induttore, le cui dimensioni sono:

- Diametro esterno = 53 mm;

- Diametro interno = 20 mm;
- Diametro esterno tubi = 4,5 mm;
- Diametro interno tubi = 2,5 mm;
- Lunghezza = 100 mm.

Le dimensioni dei provini (Figura 4.6) sono:

- Lunghezza = 70 mm;
- Larghezza = 20 mm;
- Spessore = 3 mm.

Il supporto (Figura 4.7) ha invece dimensioni pari a:

- Lunghezza = 100 mm;
- Larghezza = 100 mm;
- Spessore = 10 mm.

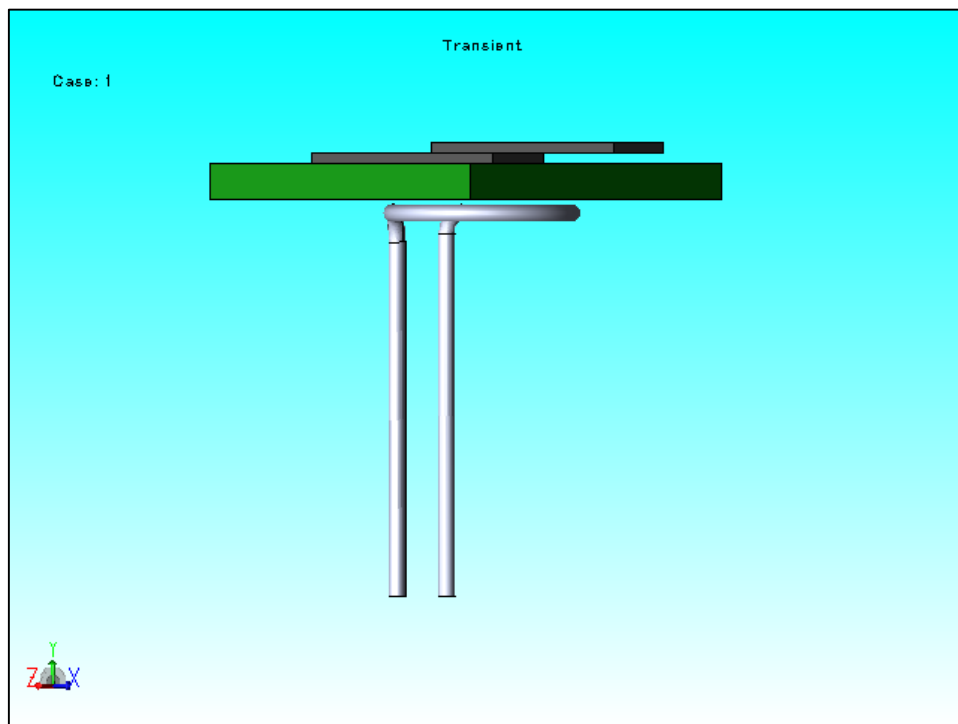


Figura 4.4: Schema dell'impianto di saldatura

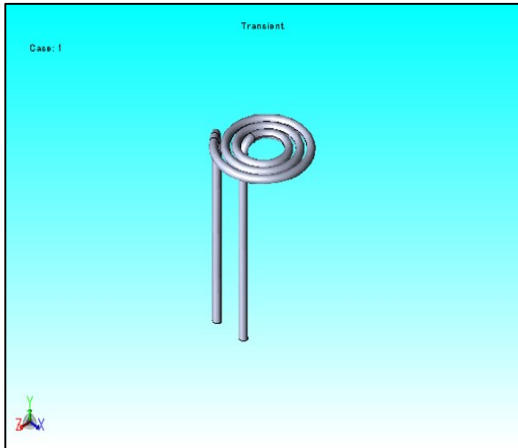


Figura 4.5: Induttore a paniere

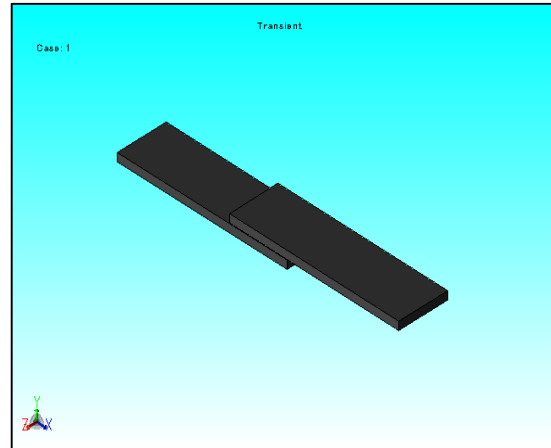


Figura 4.6: Provini in CFRP

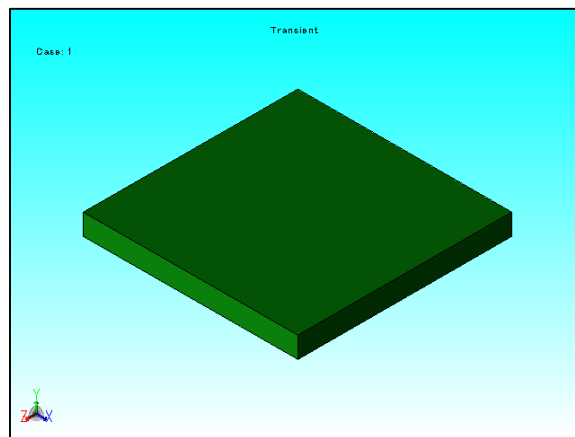


Figura 4.7: Supporto

Ripetendo per ciascuna delle prime quattro simulazioni gli steps discussi precedentemente e andando a variare per ciascuna prova i corrispondenti valori di corrente e tempo, si riportano di seguito i risultati ottenuti da questo primo ciclo di simulazioni.

4.6.2 Simulazione n. 1.1

La simulazione del giunto 1 è stata eseguita impostando un valore di tensione pari a 200 [V], corrispondente ad corrente pari a 12,5 [A] e per un tempo di permanenza di 20 secondi. In particolare il calcolo è stato effettuando impostando 8 steps da 2,5 secondi l'uno.

La simulazione effettuata fornisce come output il valore di temperatura massima raggiunta, pari a circa 250°C, come mostrato in Figura 4.8.

Inoltre, è possibile estrapolare il ciclo di temperatura lungo lo spessore del giunto in funzione del tempo, il cui risultato è riportato nella Figura 4.9.

La differenza di pendenza delle curve, al variare dello spessore, è indice del fatto che vi è uno scambio termico per conduzione tra il provino e il supporto in poliuretano su cui è appoggiato. Difatti, tale differenza di pendenza permane anche all'aumentare della temperatura.

Dal risultato di questa prima simulazione, risulta evidente che la forma dell'induttore incida notevolmente sulla distribuzione della temperatura all'interno dei provini e, dalla Figura 4.10, si può notare come la zona riscaldata sia un'immagine speculare della forma dell'induttore.

Infatti, anche dai grafici precedenti, appare evidente come il riscaldamento dei provini non sia uniforme, bensì si verifica un riscaldamento maggiore sui bordi dei provini, mentre il cuore della zona di saldatura rimane a temperature notevolmente inferiori, come mostrato anche dalla Figura 4.10.

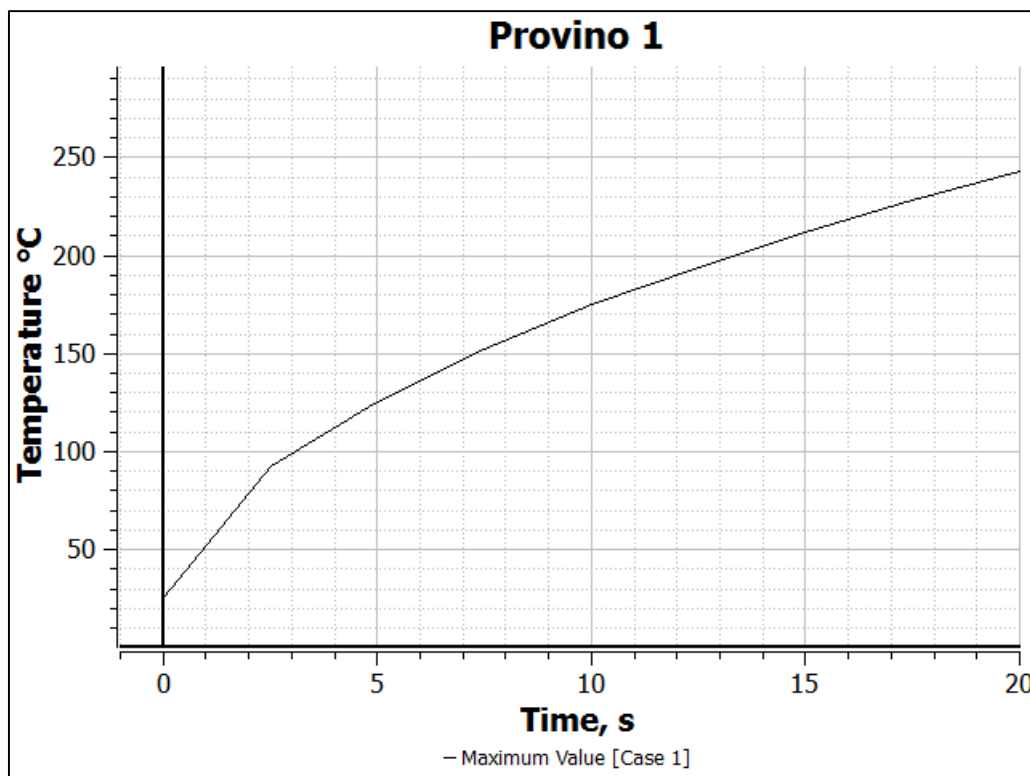


Figura 4.8: Profilo di temperatura giunto n.1

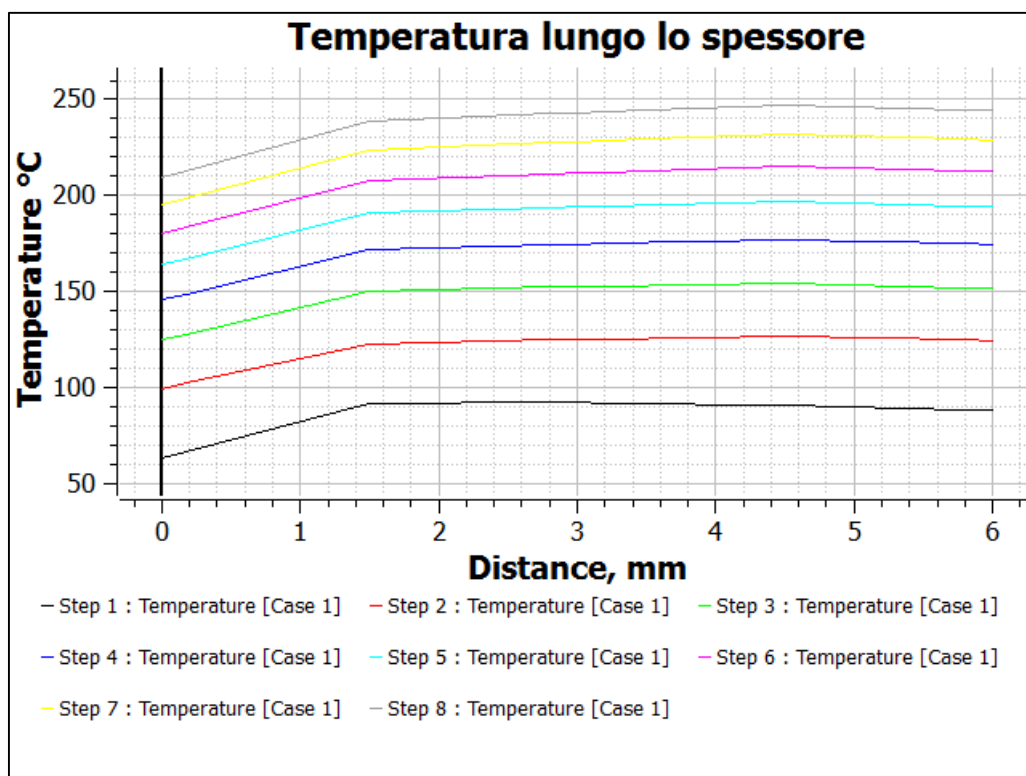


Figura 4.9: Profilo di temperatura lungo lo spessore

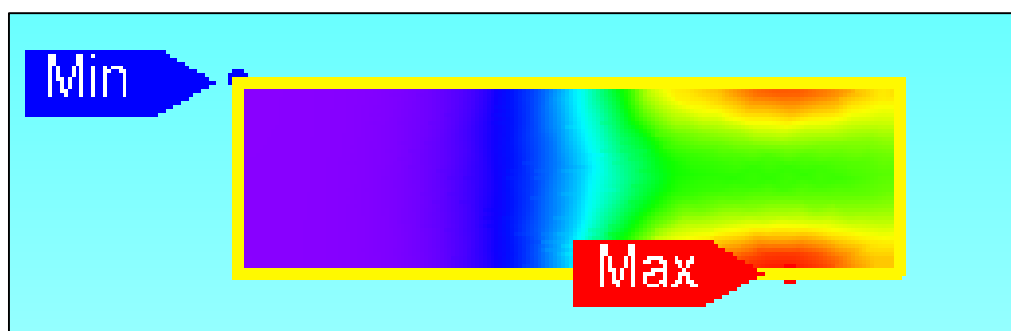


Figura 4.10: Profilo di temperatura provino inferiore

4.6.3 Simulazione n. 1.2

Anche in questo caso il valore di corrente è rimasto invariato, mentre è aumentato il tempo di prova, stavolta pari a 25 secondi (10 steps da 2,5 secondi l'uno).

Come per le altre due simulazioni è stato estrapolato un grafico che mostra l'andamento della temperatura nello spessore del giunto (Figura 4.11), e un grafico che riporta il valore della temperatura massima all'interno dei provini, pari a 270 °C (Figura 4.12).

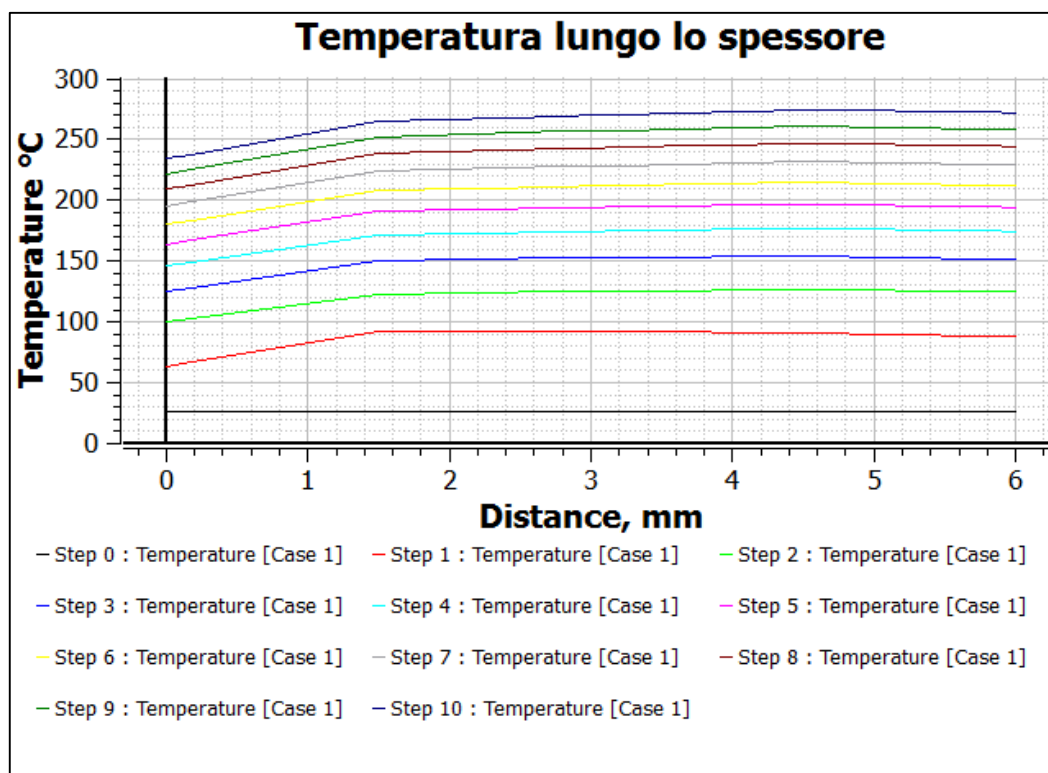


Figura 4.11: Profilo di temperatura lungo lo spessore del giunto

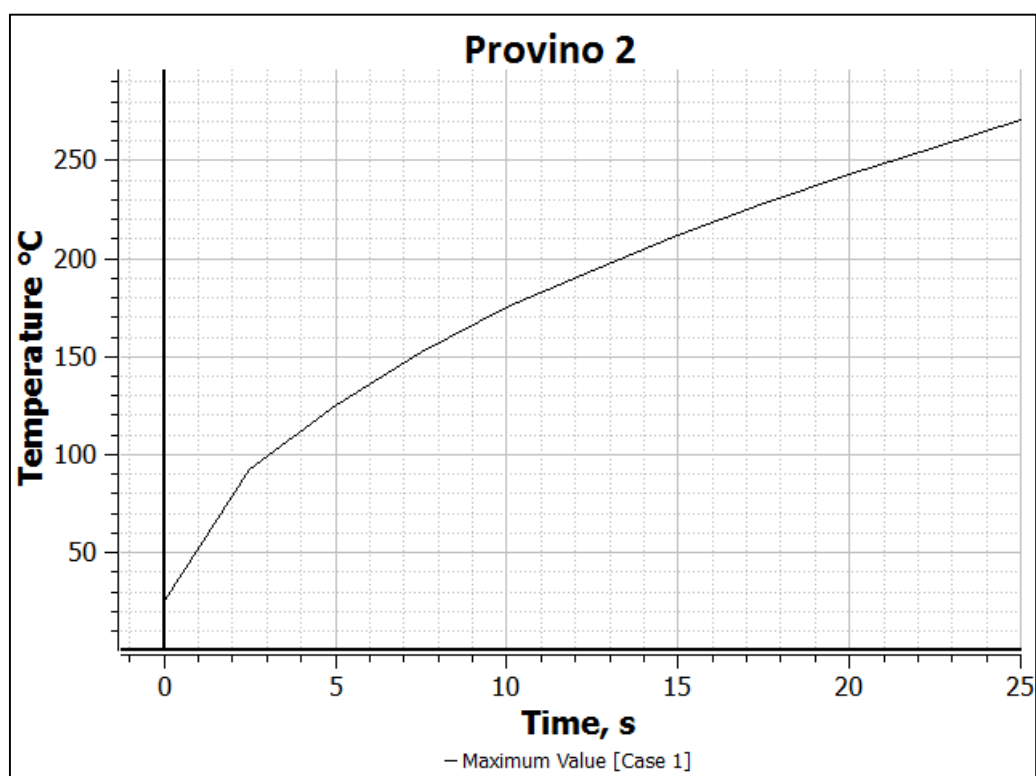


Figura 4.12: Andamento della temperatura nel giunto

4.6.4 Simulazione n. 1.3

In questa terza simulazione i provini sono stati sottoposti ad un valore di tensione più alto, pari a 250 [V], corrispondente ad una corrente di 17 [A] e per un tempo di 25 secondi. La simulazione è stata effettuata imponendo 10 steps da 2,5 secondi l'uno.

Il grafico in Figura 4.13 riporta l'andamento della temperatura lungo lo spessore del giunto.

In particolare è possibile notare che la temperatura massima raggiunta dal provino è pari a 275°C.

Dal grafico in Figura 4.14 appare evidente, anche in questo caso come la zona più interna del giunto non abbia raggiunto la stessa temperatura dei bordi dei provini.

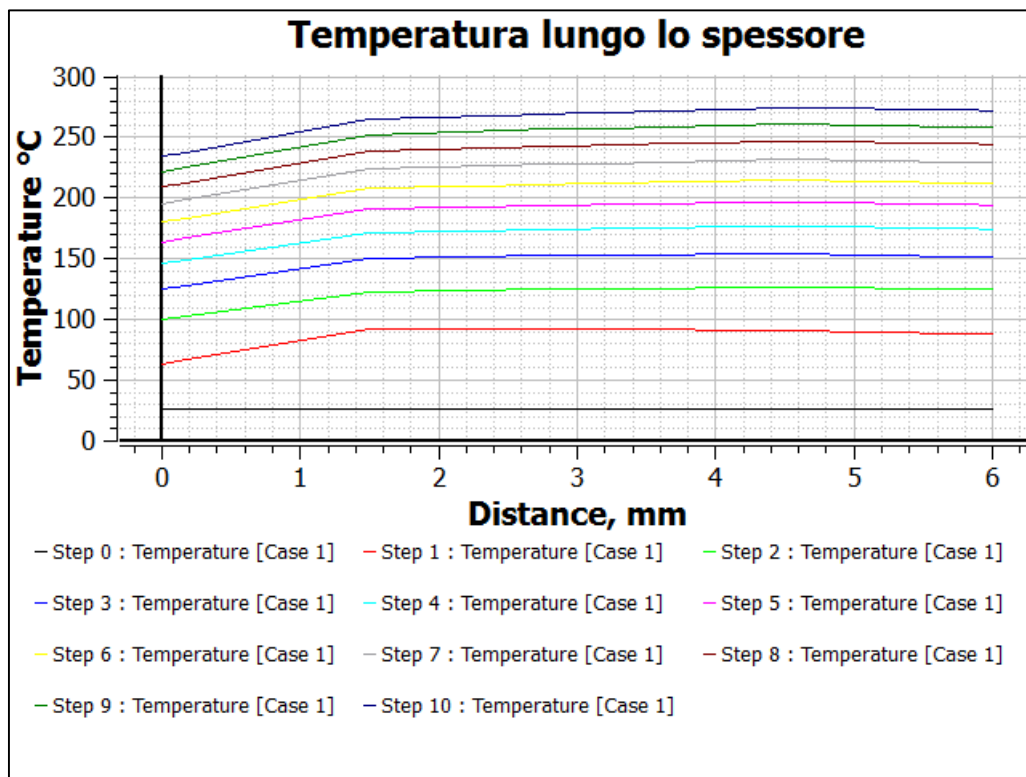


Figura 4.13: Profilo di temperatura lungo lo spessore del giunto

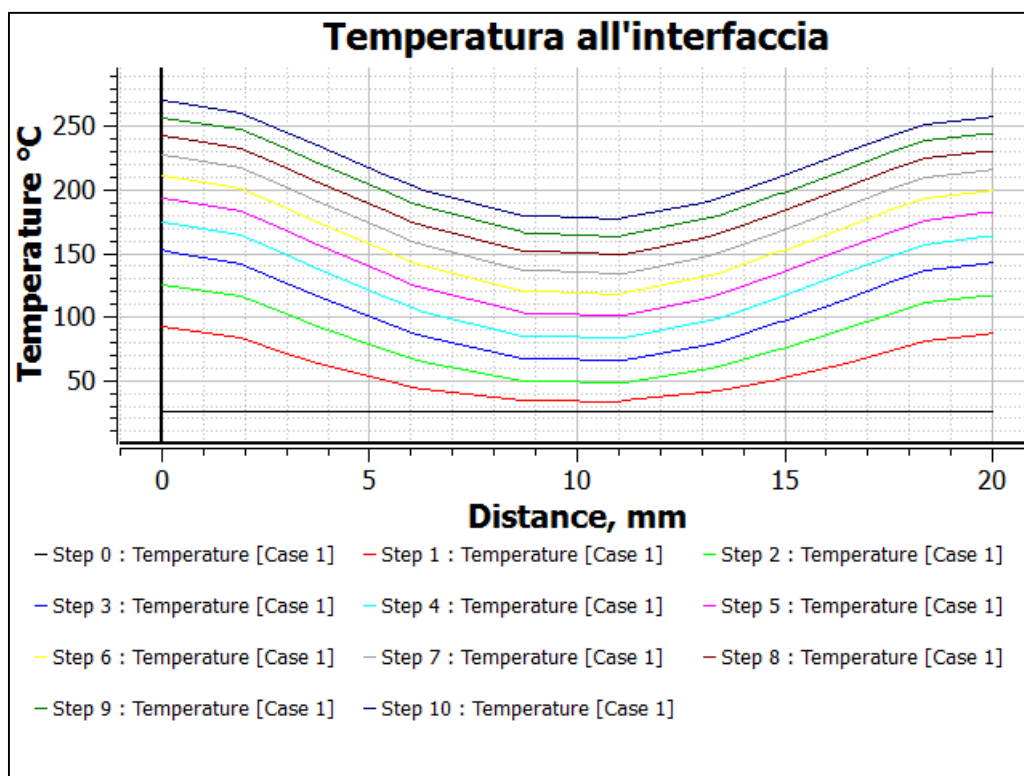


Figura 4.14: Profilo di temperatura all'interfaccia del giunto

4.6.5 Simulazione n. 1.4

Per la quarta, ed ultima simulazione, di questa prima sessione il valore della tensione impostato è pari a 300 [V], corrispondente ad una corrente di 20,2 [A], mentre il tempo di simulazione è pari a 15 secondi, con 6 steps da 2,5 secondi l'uno.

L'andamento della temperatura all'interno dei provini è mostrato in Figura 4.15, si evince inoltre che la temperatura massima raggiunta è pari a 300 °C.

Dalla Figura 4.16 è possibile notare la distribuzione della temperatura all'interno del giunto, e risulta ancora più evidente come la forma dell'induttore incida sul riscaldamento asimmetrico, come già notato dalle simulazioni precedenti.

Il riscaldamento asimmetrico è evidente anche dal grafico seguente in cui viene mostrato l'andamento della temperatura all'interno del provino, al variare del tempo, in questo caso la simulazione è stata eseguita considerando 6 steps da 2,5 secondi l'uno.

Da tale grafico è possibile notare il ΔT lungo l'interfaccia di giunzione; mentre sul bordo del provino si raggiungono i 300°C, nel centro della giunzione la temperatura arriva a 160°C.

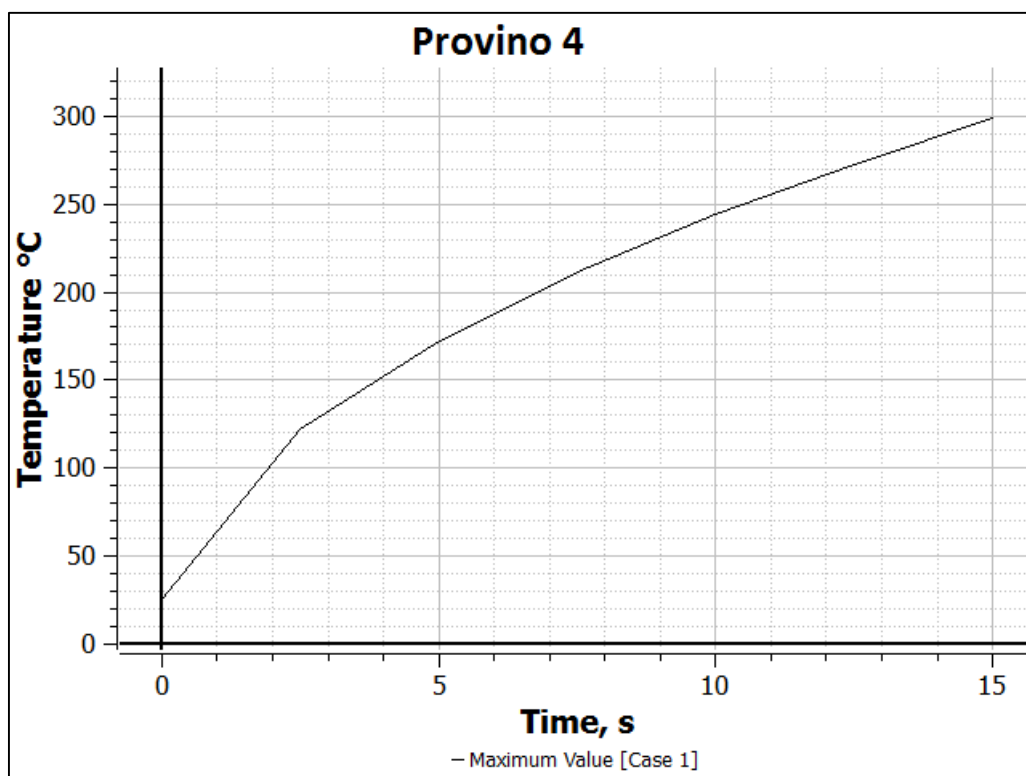


Figura 4.15: Profilo di temperatura nel giunto

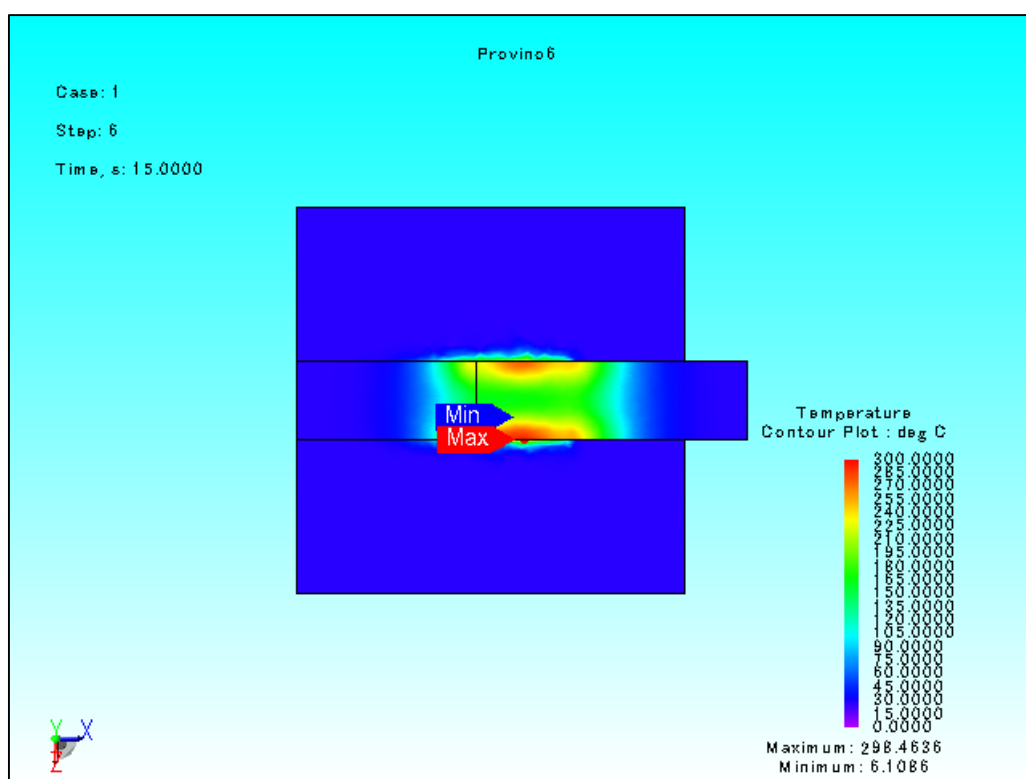


Figura 4.16: Distribuzione di temperatura nel giunto dopo 15 secondi

4.7 Seconda sessione di simulazione

In questa seconda serie di simulazioni, a fronte dei risultati ottenuti dalla precedente, si è ritenuto opportuno effettuare un controllo della temperatura raggiunta dai provini. Sfruttando infatti la possibilità che offre la macchina di prova usata, è possibile impostare il valore di temperatura massima che si desidera far raggiungere ai provini, e mantenerla costante per un certo lasso di tempo.

In Tabella 4.5 è riportato un riepilogo dei parametri impostati per eseguire questa nuova serie di simulazioni.

Simulazione	Voltaggio [V]	Temperatura max [°C]	Tempo di permanenza [s]
2.1	100	260	15
2.2	150	260	10
2.3	150	260	15
2.4	150	260	20
2.5	200	255	10
2.6	200	260	10

Tabella 4.5: Riepilogo seconda serie di simulazioni

4.7.1 Simulazione n. 2.1

Per questo giunto si sono variati i valori di corrente ed il tempo di permanenza a 260°C, in particolare: il valore di tensione impostato è pari a 100 [V], corrispondente al 5% della potenza, per un tempo di permanenza a 260°C di 15 secondi.

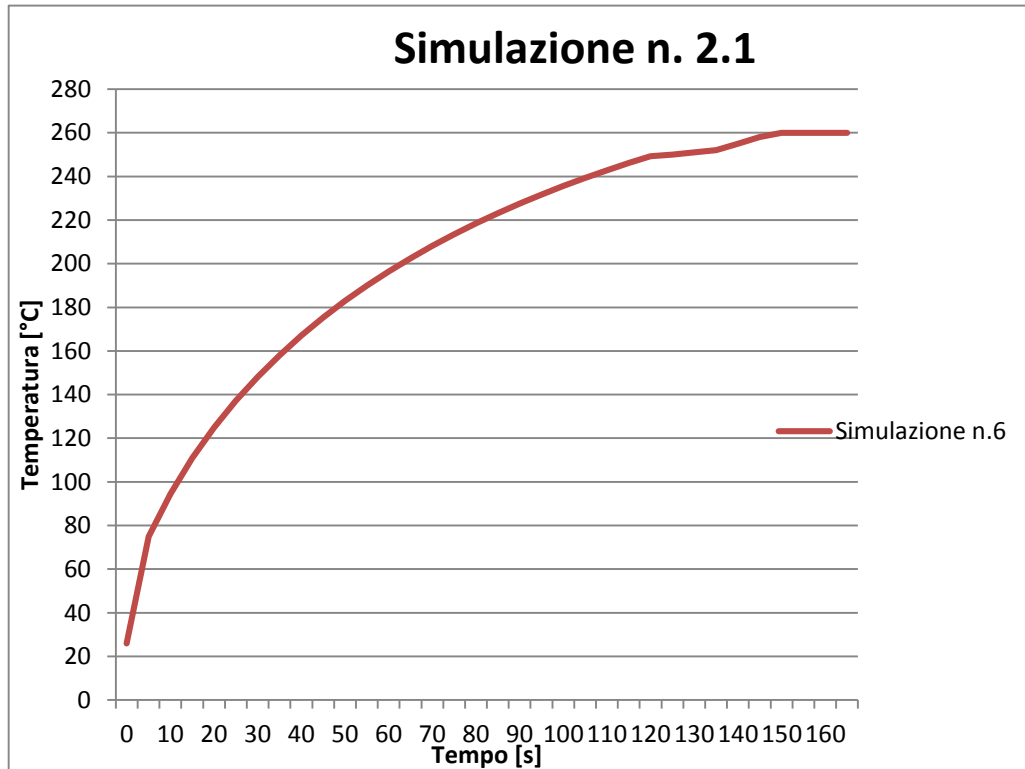


Figura 4.17: Profilo di temperatura nei provini

La simulazione è stata effettuata imponendo 33 steps da 5 secondi l'uno.

Di seguito, in Figura 4.18 è mostrato l'andamento della temperatura "step by step", ed anche in questo caso è ancora una volta evidente la differenza di pendenza delle curve lungo spessore.

Nel grafico in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportato l'andamento della temperatura lungo l'interfaccia del giunto, solo per gli ultimi 4 steps della simulazione, in modo tale da mettere meglio in evidenza come, grazie al mantenimento della temperatura costante per 15 secondi, si favorisca il fenomeno di trasferimento di calore per conduzione, con conseguente diminuzione del ΔT tra interno ed esterno della superficie di saldatura.

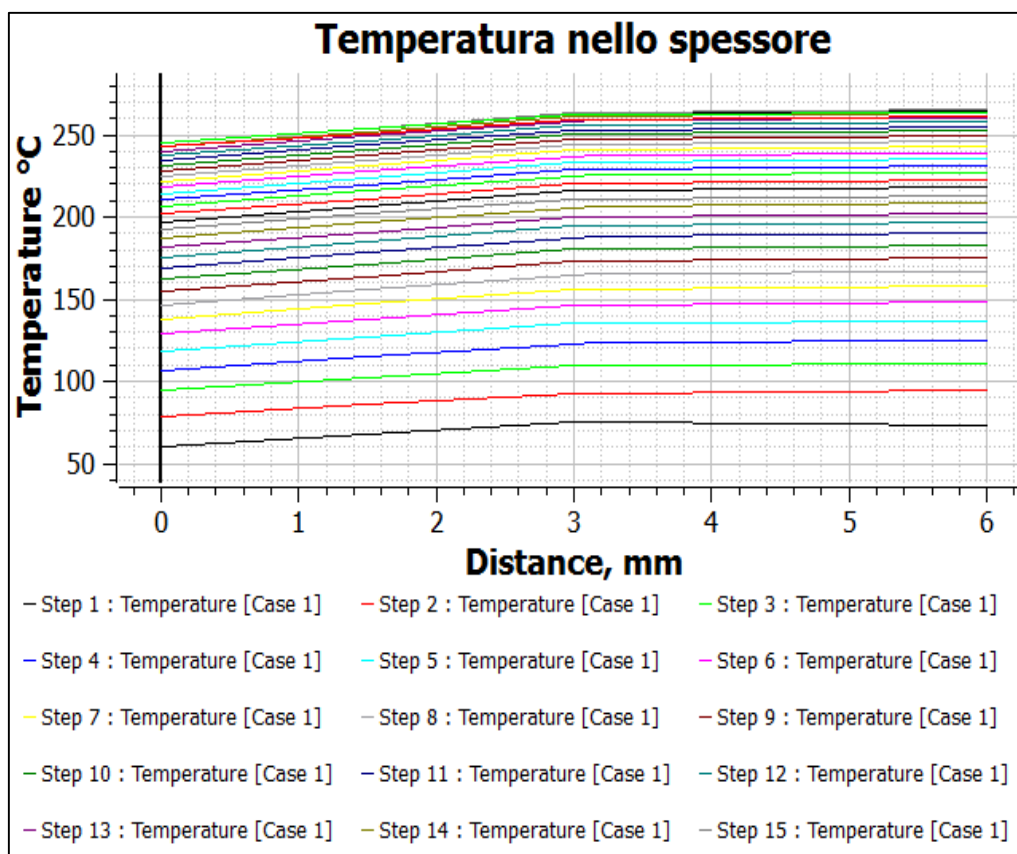


Figura 4.18: Temperatura nello spessore

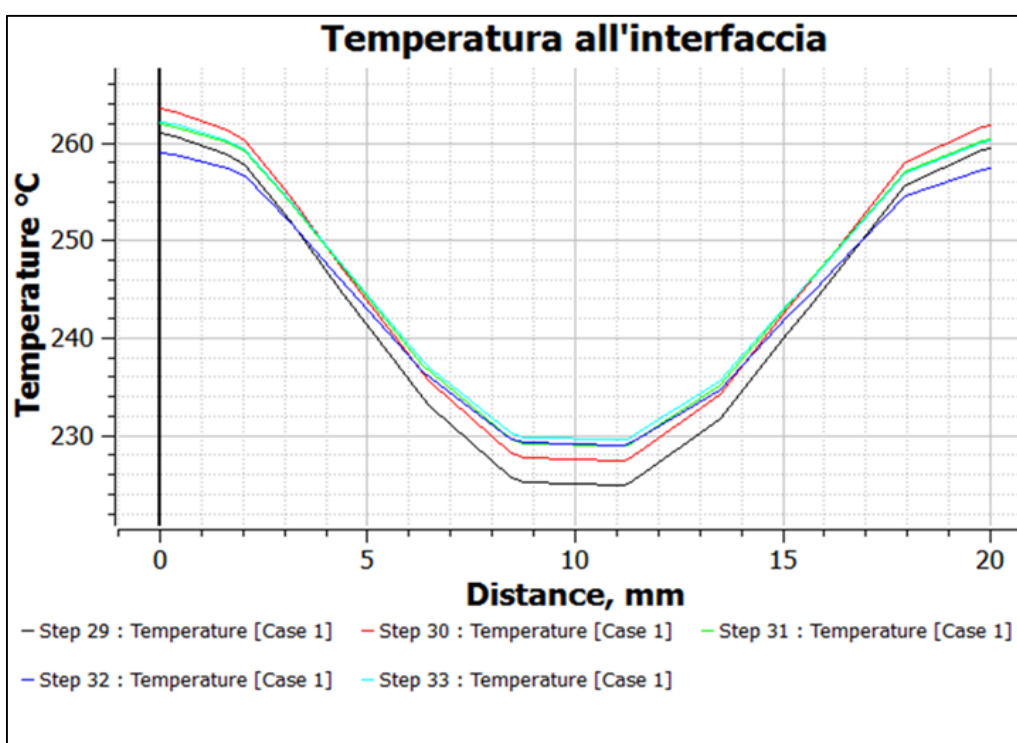


Figura 4.19: Andamento temperatura all'interfaccia per gli ultimi 4 steps

4.7.2 Simulazione n. 2.2

In questa simulazione si è pensato di ridurre il valore di tensione pari a 150 [V], pari al 10% della potenza, mantenendo inalterati sia la temperatura massima (260°C) che il tempo di permanenza (10 [s]).

La distribuzione di temperatura è riportata in Figura 4.20.

Come nei casi precedenti si riportano i diagrammi della temperatura lungo lo spessore (Figura 4.21) e lungo l'interfaccia di saldatura (Figura 4.22).

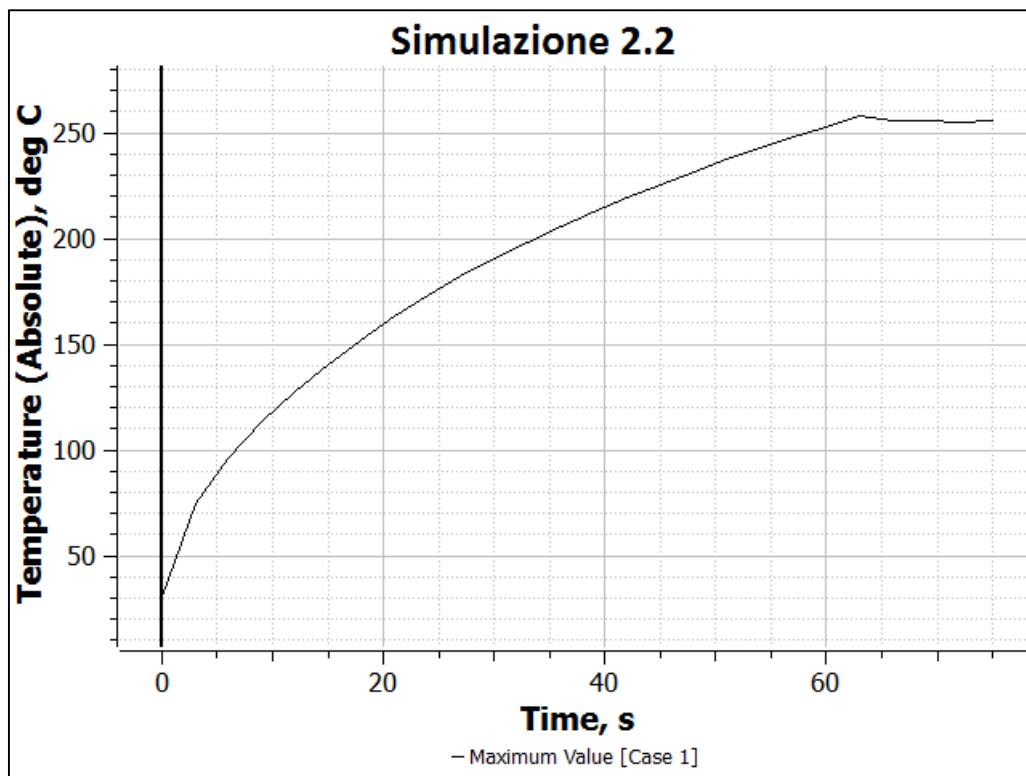


Figura 4.20: Profilo di temperatura

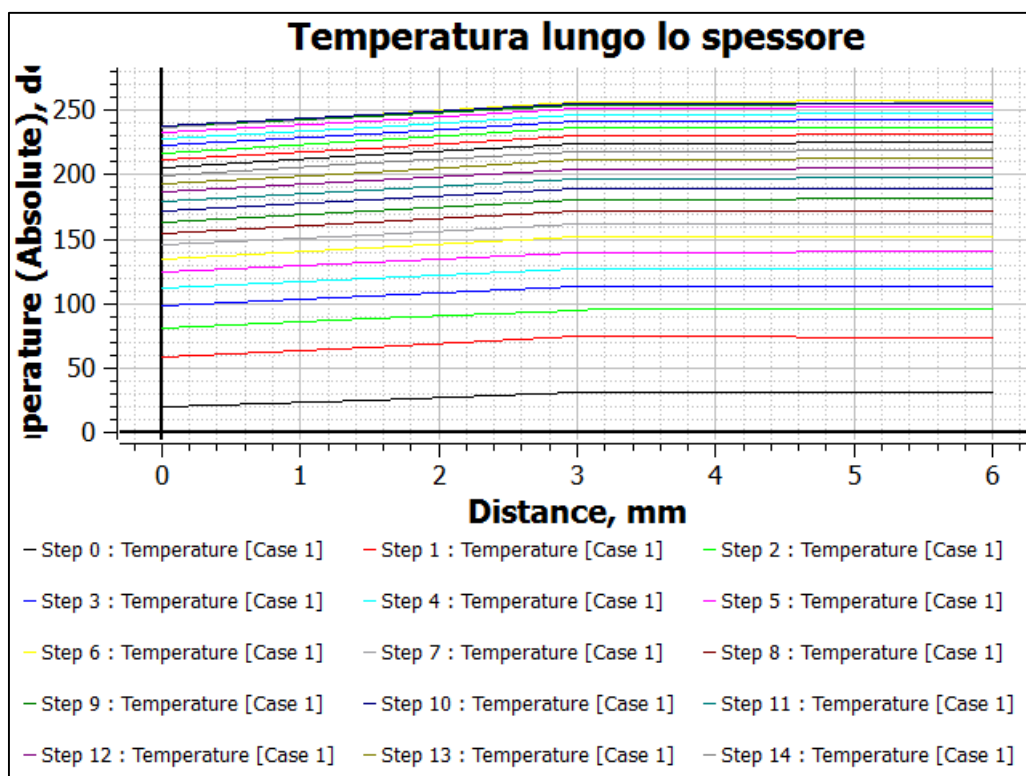


Figura 4.21: Profilo di temperatura lungo lo spessore

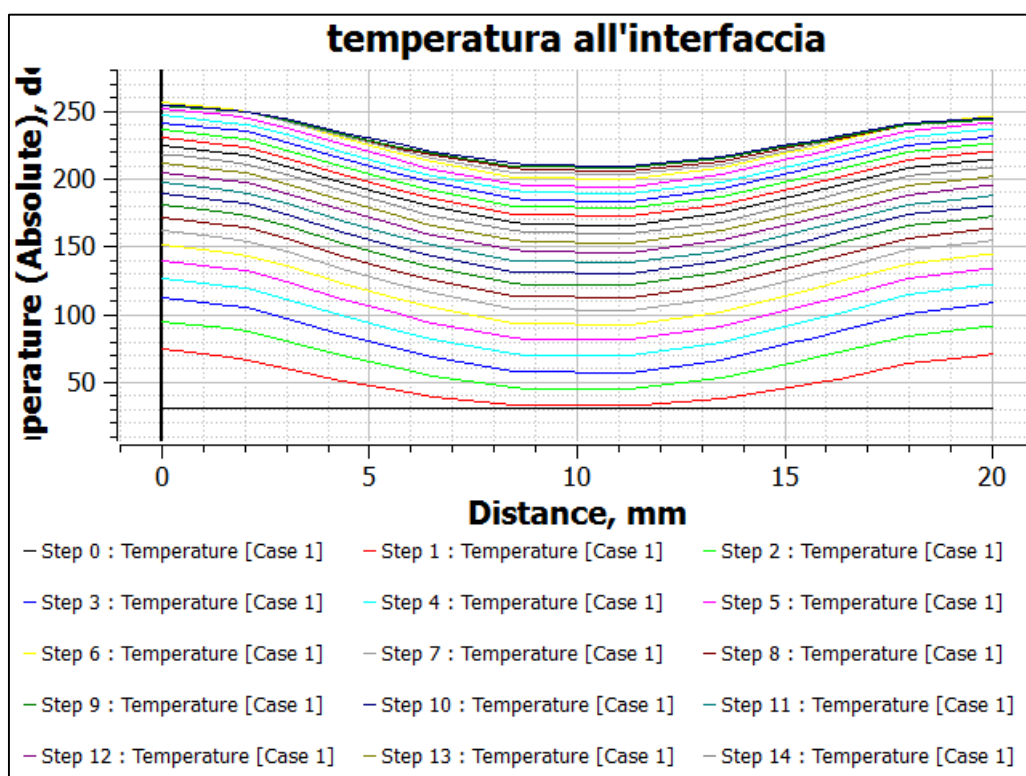


Figura 4.22: Profilo di temperatura lungo l'interfaccia

4.7.3 Simulazione n. 2.3

In questo caso, rispetto al caso precedente, tutti i valori di temperatura e corrente sono rimasti invariati, ciò che è stato fatto variare è il tempo di permanenza, stavolta pari a 15 secondi.

In Figura 4.23 è riportata un immagine dell'andamento della temperatura in dipendenza dal tempo all'interno del provino.

In questa simulazione sono stati imposti 25 steps da 3 secondi l'uno.

Dal grafico in Figura 4.24, dove è mostrata la variazione di temperatura lungo l'interfaccia, è possibile notare come, aumentando il tempo di permanenza a 260°C a 15 secondi, il ΔT tra i bordi dei provini e il cuore della zona da saldare si riduca. Per meglio comprendere tale fenomeno sono riportati solo gli ultimi steps (20-25).

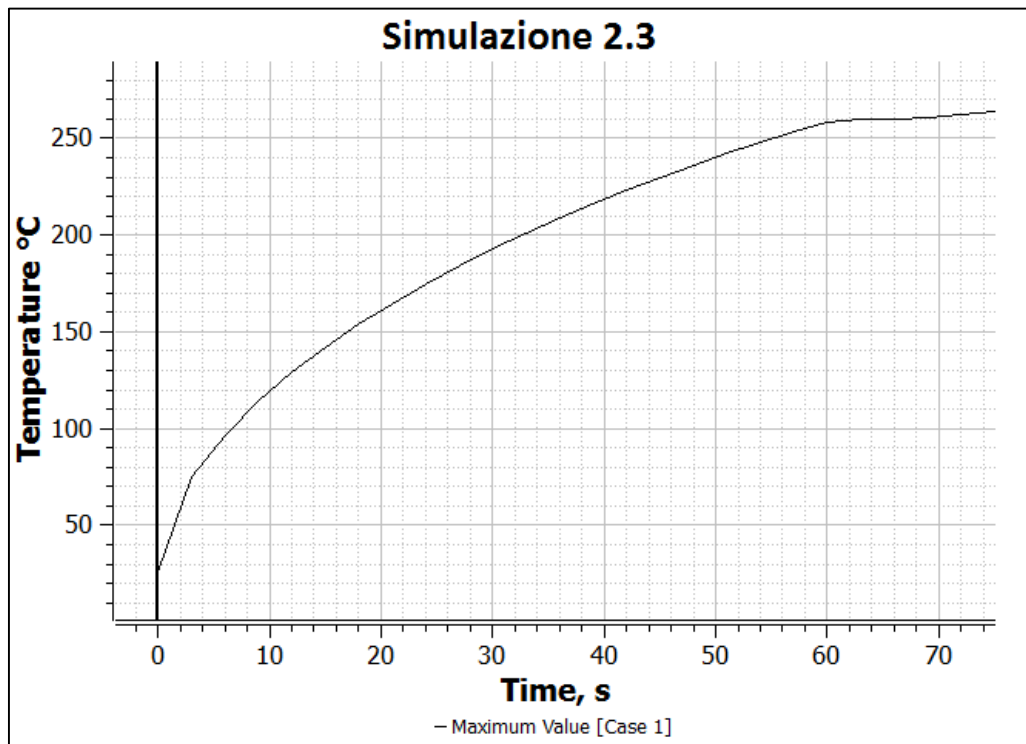


Figura 4.23: Profilo di temperatura nel tempo

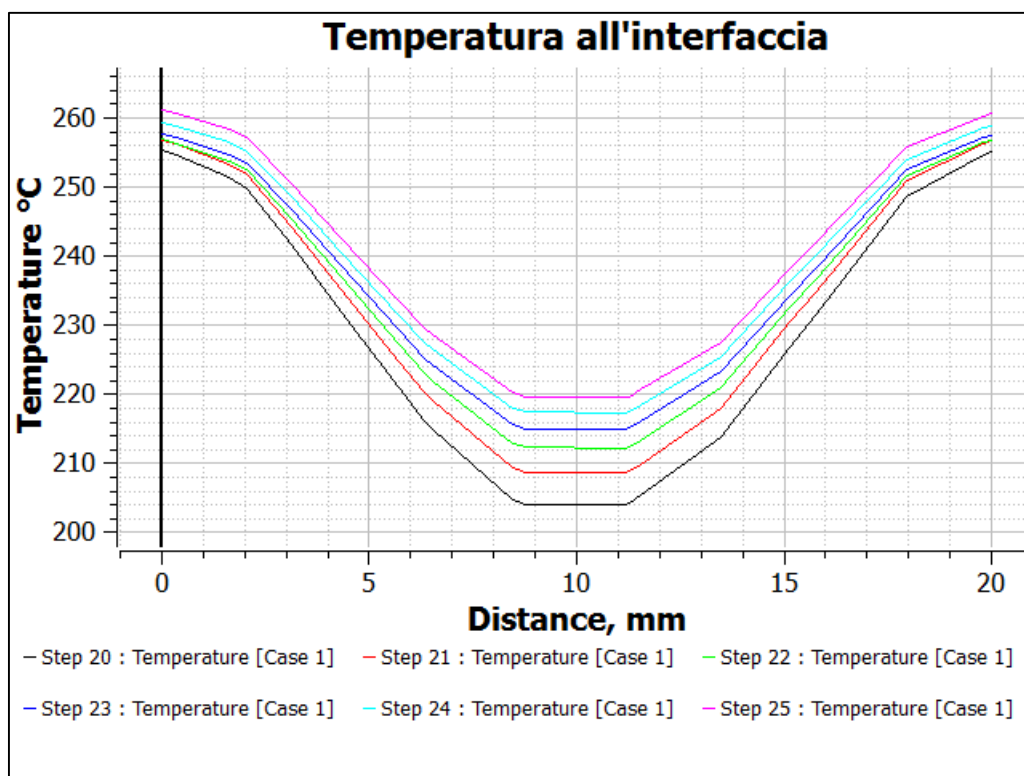


Figura 4.24: Andamento della temperatura lungo l'interfaccia

4.7.4 Simulazione n. 2.4

In questo caso il valore di tensione è stato impostato di nuovo a 150 [V], la temperatura massima è rimasta pari a 260°C, mentre il tempo di permanenza è stato portato a 20 secondi. L'andamento della temperatura è quello mostrato in Figura 4.25.

Mentre dal grafico in Figura 4.26 è possibile vedere come la temperatura varia, in 27 steps di 3 secondi, lungo lo spessore del giunto.

Dal diagramma in Figura 4.27 è inoltre possibile osservare come, grazie al fatto che la temperatura viene mantenuta costante per 20 secondi, si riesce a ridurre la differenza di temperatura tra i bordi esterni dei provini e il centro dello spessore.

Appare quindi ancora più chiaro che, effettuando un mantenimento della temperatura, si favorisce il fenomeno di conduzione del calore all'interno della zona da saldare.

Tale fenomeno è ancora più accentuato rispetto al caso precedente dove il tempo di mantenimento è stato posto pari a 15 secondi.

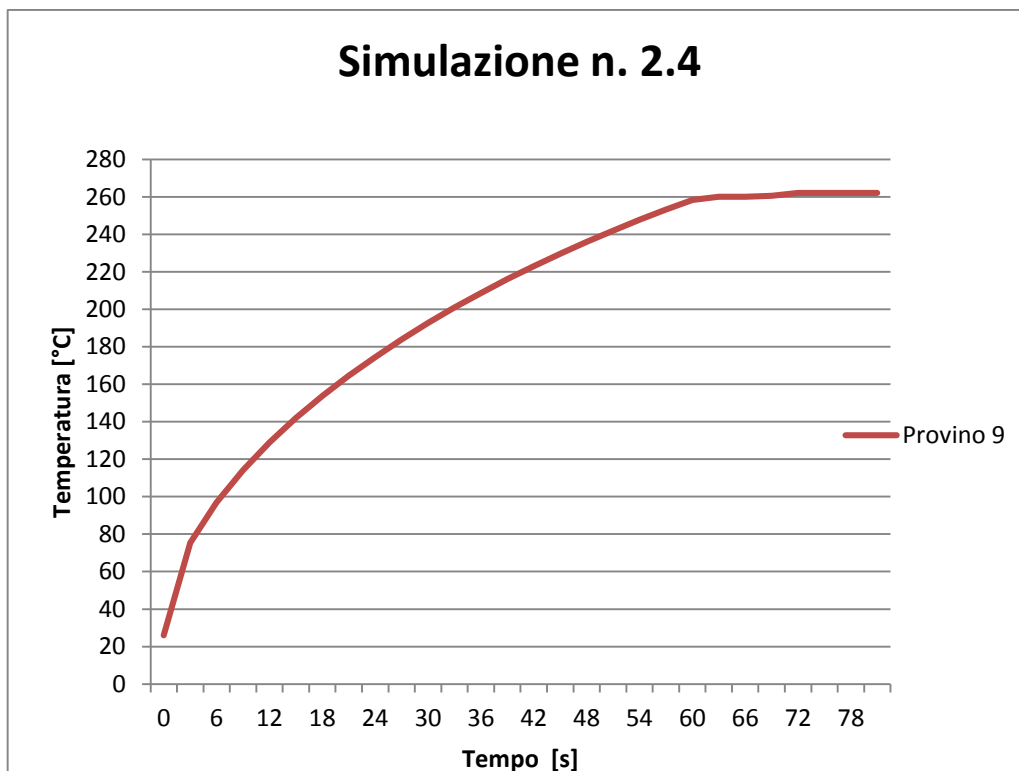


Figura 4.25: Profilo di temperatura

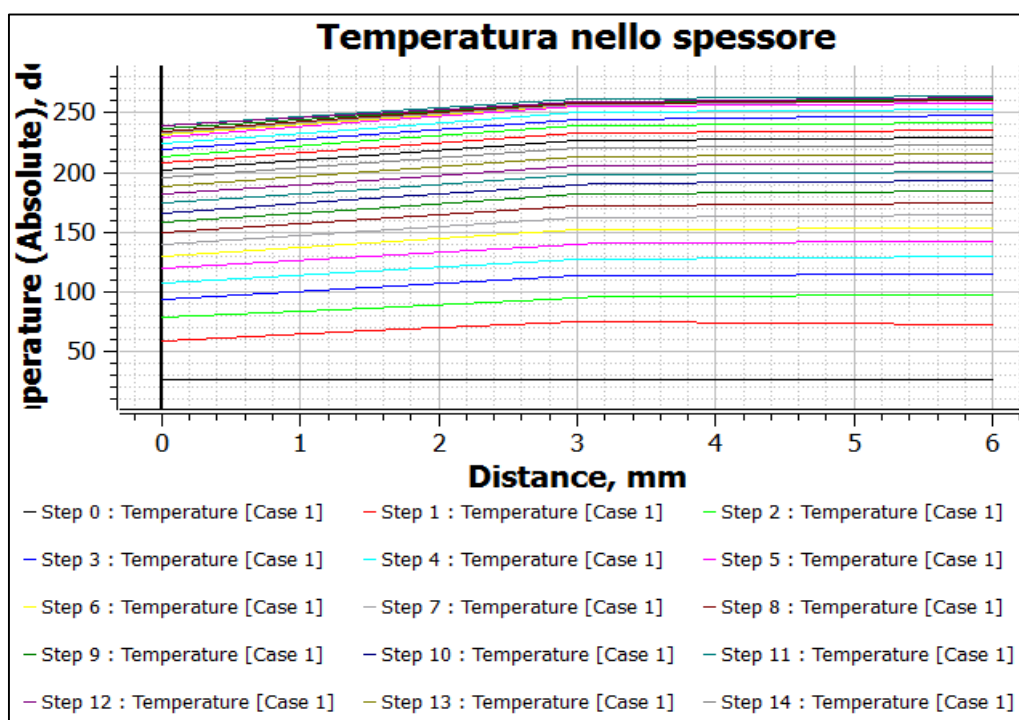


Figura 4.26: Profilo di temperatura lungo lo spessore del giunto

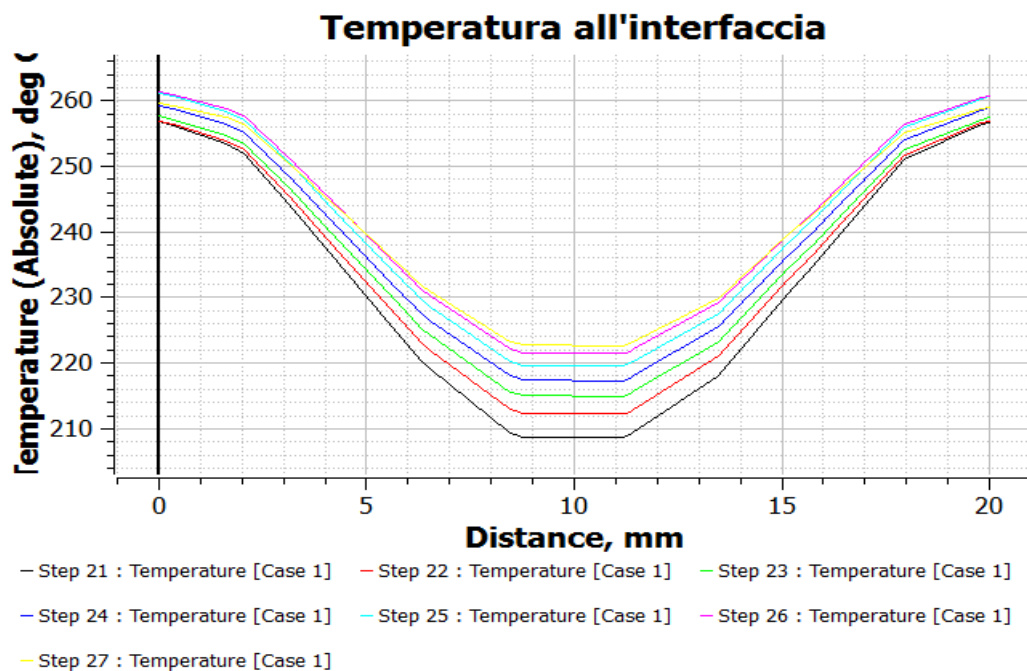


Figura 4.27: Temperatura all'interfaccia step 21-27

Quindi aumentando il tempo di mantenimento si riesce a raggiungere una distribuzione di temperatura all'interno del giunto più uniforme.

Dalla immagine seguente è possibile osservare meglio quanto precedentemente descritto:

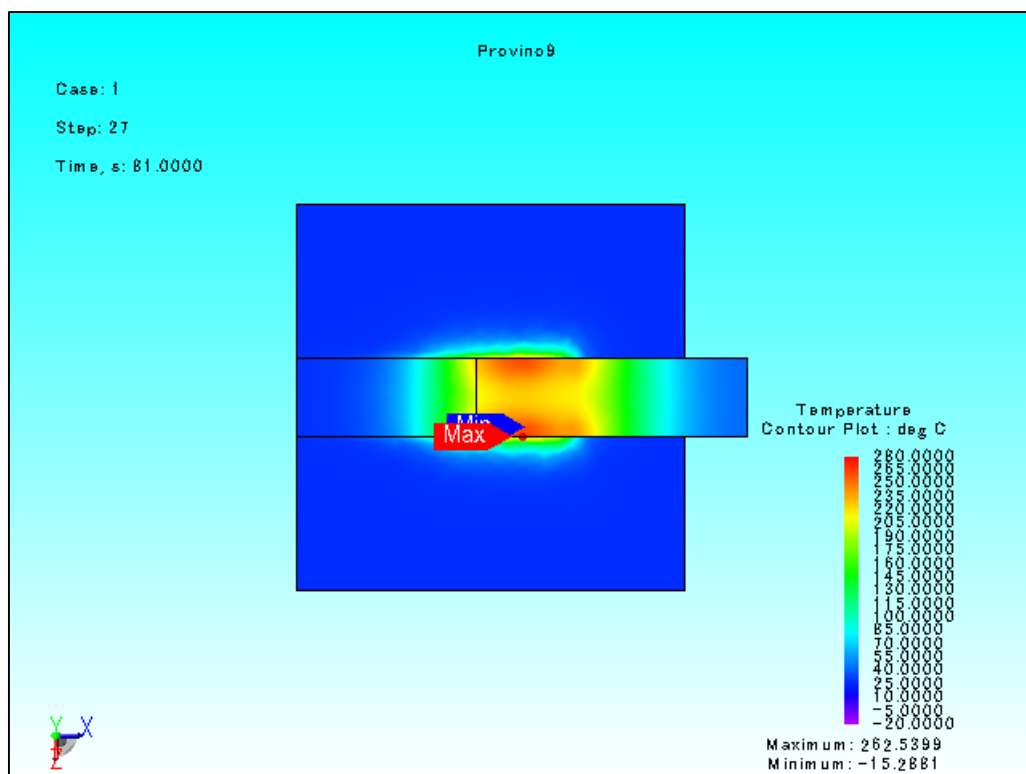


Figura 4.28: Distribuzione di temperatura nel provino

4.7.5 Simulazione n. 2.5

In tale simulazione si è applicato un voltaggio pari a 200 [V], pari al 15% della potenza della macchina, e si è fatto in modo che i provini raggiungessero i 250°C, e tale valore rimanesse costante per 10 secondi.

L'andamento della temperatura finale è quello riportato nella Figura 4.29.

Mentre il grafico in Figura 4.30 mostra l'andamento della temperatura all'interno dello spessore del giunto, per 7 steps da 10 secondi l'uno.

Le rette indicano che è presente un trasferimento di calore sul supporto per conduzione per cui vi è sempre la stessa pendenza anche aumentando la temperatura.

Dal grafico in Figura 4.31 è possibile notare come grazie al controllo di temperatura la differenza di temperatura lungo l'interfaccia di giunzione tende ad appiattirsi.

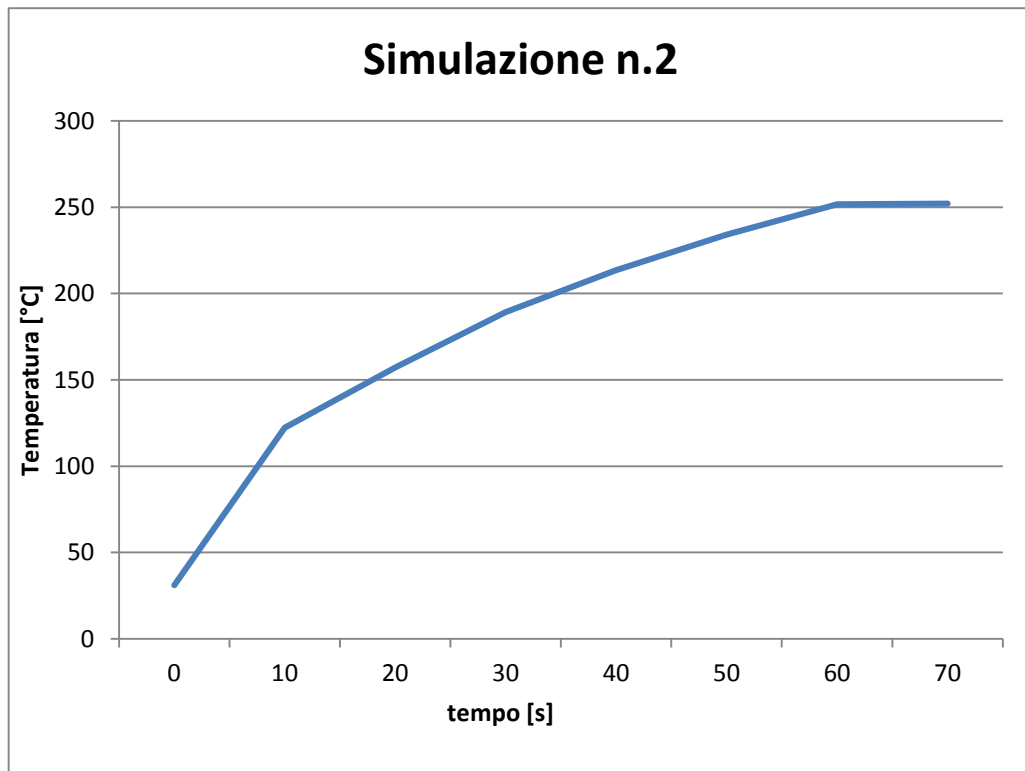


Figura 4.29: Profilo di temperatura provini

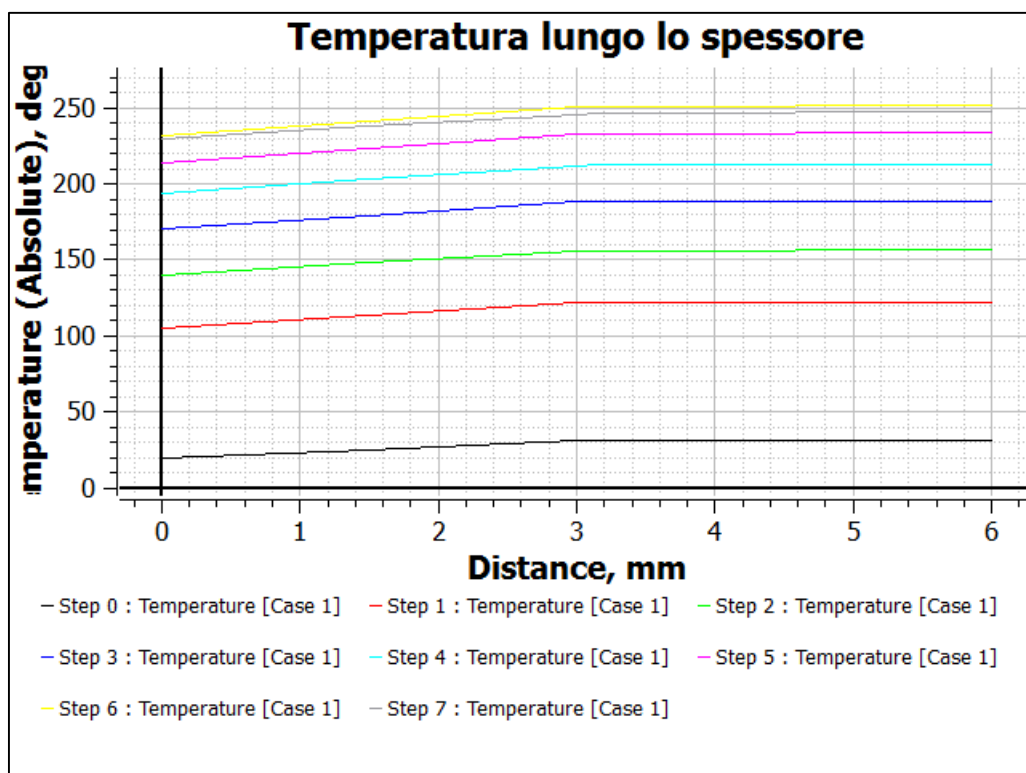


Figura 4.30: Profilo di temperatura lungo lo spessore

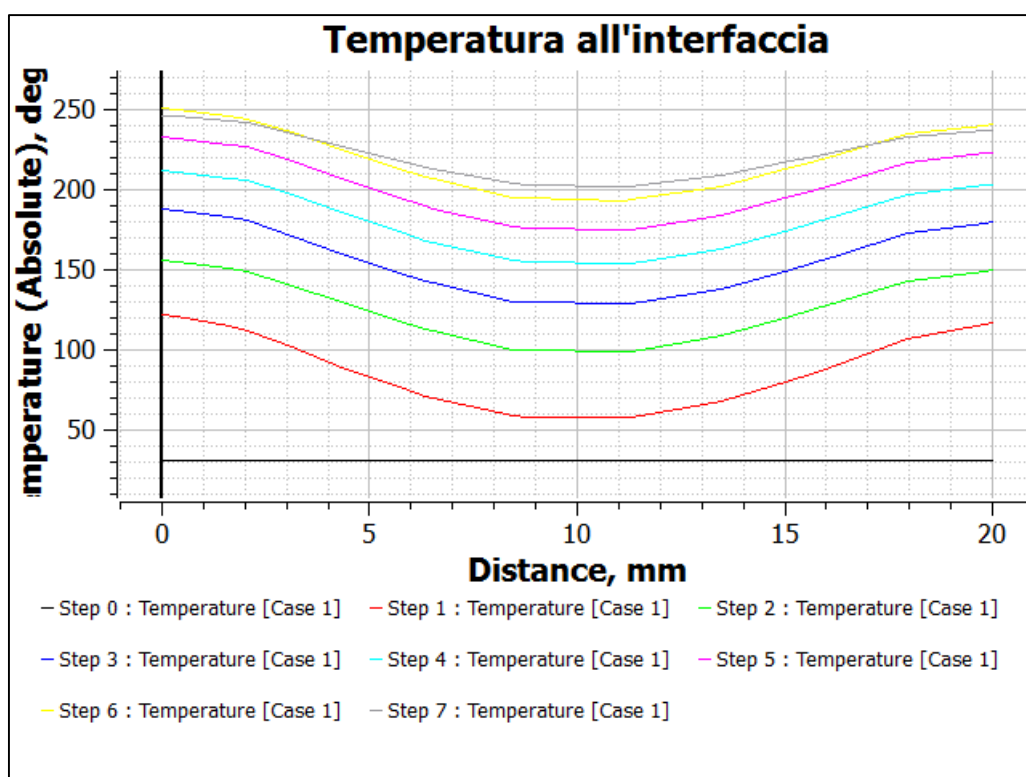


Figura 4.31: Profilo di temperatura lungo l'interfaccia

4.7.6 Simulazione n. 2.6

In questa simulazione si è impostato un valore della tensione pari a 200 [V], corrispondente al 15% della potenza della macchina, il valore di temperatura massimo è stato fissato a 260°C e il tempo di permanenza è stato lasciato inalterato rispetto al caso precedente (10 [s]). Inoltre, per alleggerire il calcolo sono stati impostati 25 steps da 3 secondi l'uno.

Il profilo di temperatura nel punto più caldo è riportato in Figura 4.32.

Mentre l'andamento della temperatura lungo lo spessore del giunto è mostrato in Figura 4.33. Anche in questo caso, come nei precedenti si evince chiaramente che la presenza del supporto è causa di dispersione termica per conduzione e ciò comporta la differenza di pendenza delle curve, a mano a mano che ci si sposta lungo lo spessore del giunto.

Dal grafico in Figura 4.34, ancora una volta, appare chiaro che tramite il controllo di temperatura, si ha una diminuzione della differenza di temperatura tra bordi esterni e parte interna del giunto.

Di seguito, in Figura 4.35 sono riportati solo gli ultimi steps, in modo da vedere meglio quanto spiegato precedentemente.

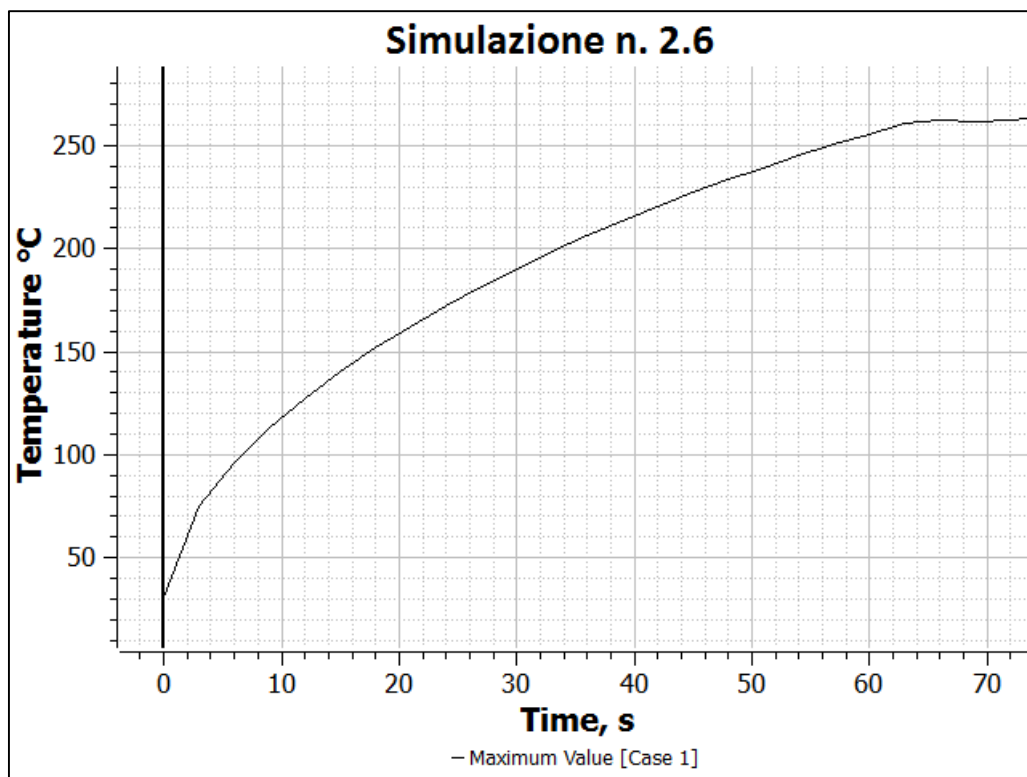


Figura 4.32: Profilo di temperatura nel provino

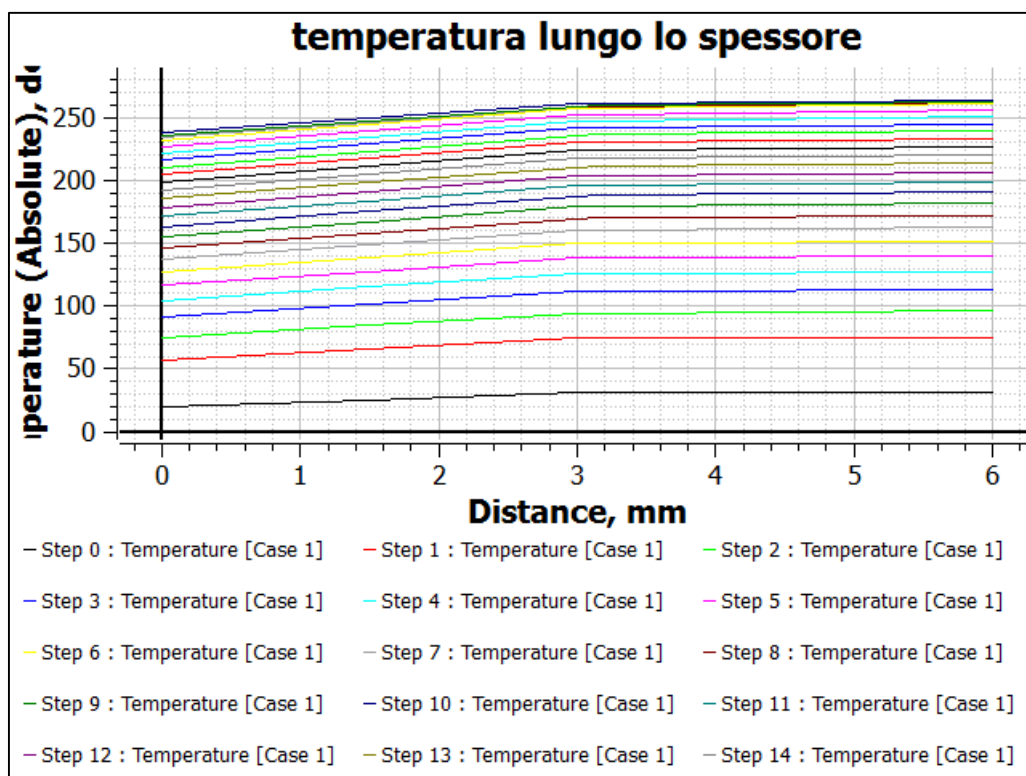


Figura 4.33: Temperatura lungo lo spessore

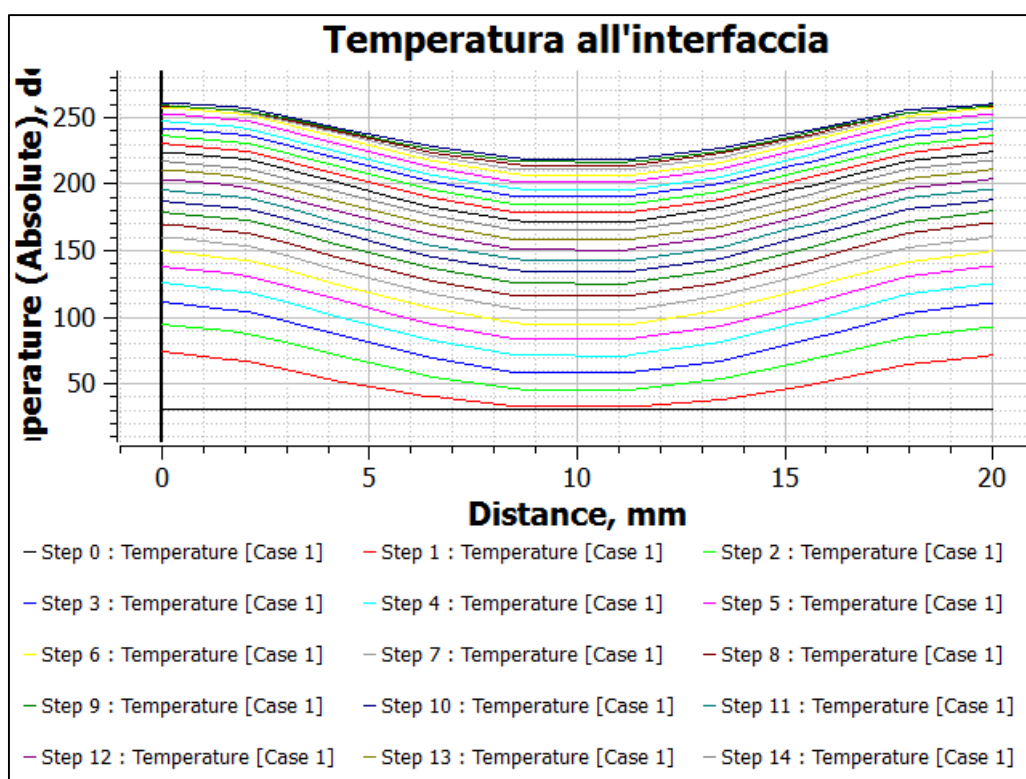


Figura 4.34: Temperatura all'interfaccia

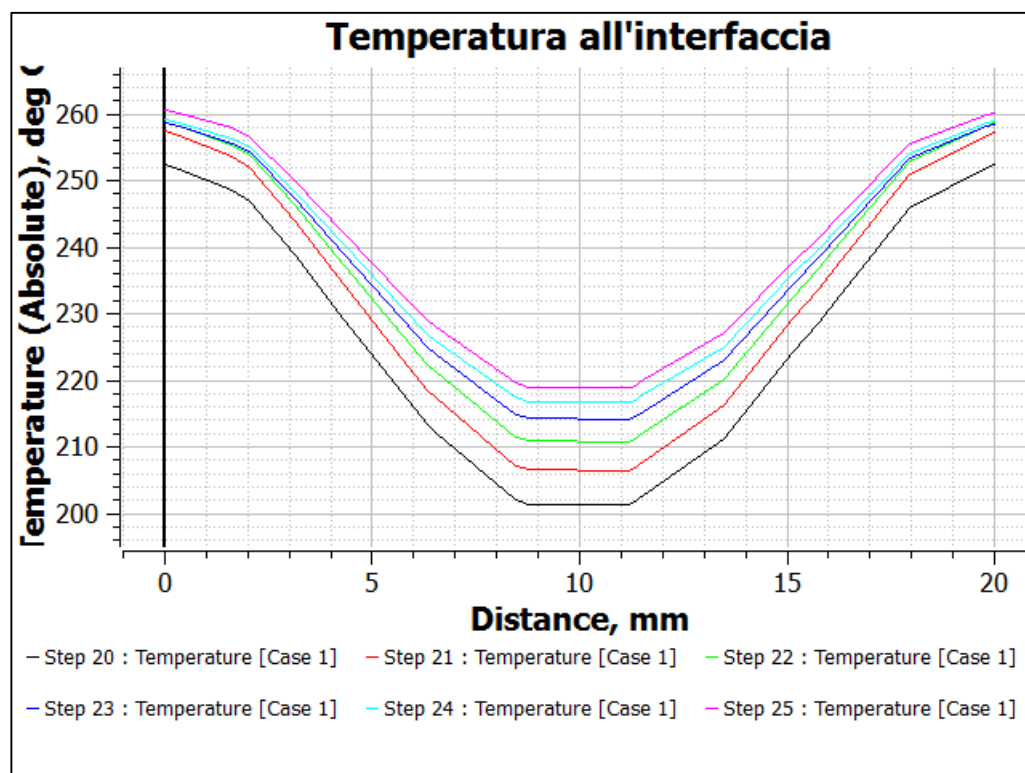


Figura 4.35: Ultimi steps di calcolo

Capitolo V

5. Prima serie di sperimentazione

5.1 Introduzione

Con lo scopo di verificare la validità del modello FEM con cui si è simulato il processo di riscaldamento per induzione elettromagnetica, è stata realizzata una prima sessione di prove sperimentali con l'intento di dimostrare appunto l'esattezza del comportamento previsto.

5.2 Descrizione attrezzatura

Si elencano di seguito attrezzature e strumenti utilizzati per l'esecuzione e per l'analisi dei dati della prova.

5.2.1 Macchina ad induzione Egma 30R

Egma 30R è un riscaldatore ad induzione, la sua funzione è quella di riscaldare il materiale, sfruttando il principio delle perdite che si hanno in un materiale conduttore quand'è immerso in un campo magnetico.

Il generatore è totalmente statico, ovvero non vi sono motori od altri apparecchi in movimento, ed il campo magnetico viene generato da un circuito elettronico detto inverter. Alimentando con l'inverter una bobina o induttore, otteniamo il campo magnetico necessario al nostro lavoro, è quindi sufficiente porre il pezzo all'interno dell'induttore, per ottenere il suo riscaldamento.

L'apparecchiatura è composta da due parti: l'armadio dove hanno sede le circuiterie di alimentazione e di controllo, e la testa di riscaldamento dove si trova la parte di potenza ed a cui viene connesso l'induttore.

Date le potenze in gioco e le conseguenti perdite nei vari circuiti, la macchina necessita di un raffreddamento ad acqua, di cui è dotato il modello 30R. Infatti nell'armadio è inserito un gruppo frigorifero completo di serbatoio e di pompa per la circolazione dell'acqua di raffreddamento. In questo modo sarà sempre presente nel circuito idraulico del riscaldatore la giusta quantità di acqua alla giusta temperatura e non vi sarà bisogno di connessioni idrauliche esterne all'Egma 30R stesso.

In Figura 5.1 è riportata un'illustrazione del macchinario utilizzato:



Figura 5.1: Generatore Egma 30R

Il pannello di controllo della macchina permette di selezionare le funzioni e di leggere i parametri operativi della Egma.

Il pannello è diviso in cinque sezioni, che descriviamo di seguito.

Le selezioni possibili sono:

Local/remote – permette di scegliere la modalità di lavoro della macchina.

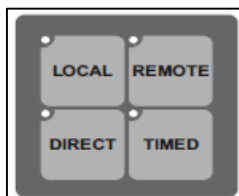


Figura 5.2: Modalità di lavoro della macchina

Quando si trova in posizione LOCAL la macchina viene attivata dal commutatore ON/OFF. Quando si trova in posizione REMOTE è necessario un controllo esterno collegato alla macchina mediante l'apposito connettore.

TIMED/Direct – quando la macchina si trova in modalità Direct il riscaldamento è attivato posizionando su On il commutatore e termina quando il commutatore viene riportato in posizione OFF.

In modalità TIMED il riscaldamento è attivato come in Direct, ma termina dopo il tempo impostato nella sezione HEATING TIMER, descritto di seguito.



Figura 5.3: Heating timer

Imposta la durata del riscaldamento in modalità TIMED.

E' possibile impostare minuti, secondi e decimi di secondi.

Premendo il pulsante SET il display dei minuti lampeggia, in questa condizione è possibile

impostarne il valore utilizzando i tasti freccia, premendo nuovamente SET sarà possibile impostare le decine di secondi e così a seguire per secondi e decimi, premendo per la quinta volta SET il display smetterà di lampeggiare e risulterà attiva la nuova impostazione.

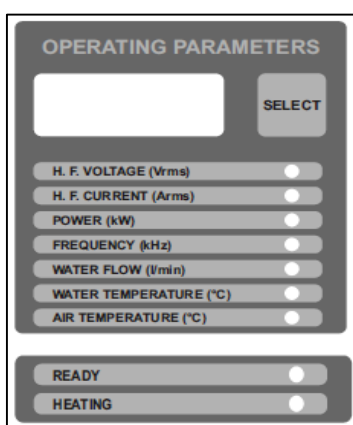


Figura 5.4: Parametri operativi

Questo display visualizza i parametri operativi della macchina. È possibile selezionare il parametro da visualizzare premendo il tasto SELECT, il led corrispondente si accenderà e il display visualizzerà il valore selezionato con l'unità di misura indicata vicino al nome.

Quando la spia READY è accesa la macchina è alimentata ma non è presente alcuna tensione in uscita.

Quando la spia HEATING è accesa il generatore sta scaldando, ed è presente alta tensione sulla bobina di riscaldamento.

Il pannello in Figura 5.5 permette di impostare i parametri per il controllo automatico del processo.



Figura 5.5: Parametri di controllo per il processo automatico

Nella Tabella 5.1 seguente sono riportate le caratteristiche tecniche della macchina:

Massima potenza di uscita	30 kW
Tensione massima sul carico	500 Veff
Frequenza di lavoro	Da 30 a 300 kHz
Regolazione di potenza	Da 20 a 100%
Pressione acustica	Inferiore a 70 dB
Dimensioni esterne	710x1000x1650 mm
Peso totale	300 Kg

Tabella 5.1: Caratteristiche tecniche della macchina

5.2.2 Pirometro ottico

Fra i vari strumenti di rilevazione della temperatura – quali termometri a liquido, a solido, termocoppie, termoresistenze, termoresistori, ecc.– il pirometro ottico a radiazione infrarossa è sicuramente uno dei più utilizzati in quanto consente di rilevare la temperatura di un elemento, senza però entrare in contatto con lo stesso.

In particolare, un pirometro ottico è uno strumento in grado di rilevare l'energia emessa da un corpo caldo. Ai fini della misura, interessa solo la parte di tale energia che si trova nel campo degli infrarossi. La radiazione infrarossa viene letta da un opportuno obiettivo, e convogliata ad un elemento a essa sensibile, disposto sul piano focale dell'obiettivo stesso.

Per utilizzare tale strumento correttamente è necessario sapere che le misure all'infrarosso della temperatura sono governate da alcune importanti leggi fisiche e in particolare dalla legge

di Stefan - per la quale l'emissione totale di energia di un corpo è direttamente proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta Eq. (5.1)

$$E_t = kT^4 \quad (5.1)$$

e dalla legge di Boltzmann, che delimita il campo di validità della precedente al solo "corpo nero".

Il "corpo nero" è un particolare tipo di corpo che assorbe tutte le radiazioni ricevute, indipendentemente dalla loro lunghezza d'onda.

Il "corpo nero", oltre ad essere un perfetto assorbitore di energia, è pure un perfetto emettitore della stessa, se ne deduce che in natura esistono soltanto corpi che assorbono meno energia di quella assorbita da un corpo nero. Pertanto, il rapporto tra l'energia emessa da un corpo naturale e quella emessa invece dall'emettitore perfetto, viene definito Emissività, che avrà sempre valori compresi sempre tra 0 e 1.

L'emissività è funzione sia della temperatura, che della lunghezza d'onda. Conoscendo l'emissività di un materiale è possibile ricavare la temperatura dello stesso, mediante delle formule interne al pirometro.

Nel caso in esame, poiché non era già nota in partenza l'emissività del materiale dei provini da giuntare, questa è stata ricavata grazie all'utilizzo di termocoppie.

Il pirometro ottico in dotazione dell'apparecchiatura ha uno spot di 3 mm di diametro se posizionato a 100 mm dal pezzo in misura. Per ottenere una misura affidabile della temperatura occorre eseguire le seguenti operazioni:

- Posizionare il pirometro a 100 mm dal pezzo da scaldare
- Guardare nell'obbiettivo posto nella parte posteriore dello strumento, si vede un cerchio corrispondente allo spot
- Mettere a fuoco l'oggetto da scaldare ruotando la ghiera dell'obbiettivo
- Puntare lo strumento al centro del punto di graffatura del pezzo.

Al fine di ottenere una lettura della temperatura corretta è necessario che la lente frontale del pirometro sia mantenuta pulita.

5.2.3 Telecamera/Fotocamera termografica

Un classico sistema termografico comprende, una telecamera, l'unità display e la scheda di acquisizione, il cui compito è quello di digitalizzare i dati e di registrare le immagini sulle periferiche desiderate, con un computer che gestisce tutte le operazioni di misura.

La telecamera capta la radiazione emessa dall'oggetto e la converte in segnale elettrico che, preamplificato, viene trasmesso all'unità di display, e questa inviato alla scheda di acquisizione.

L'immagine visualizzata sul monitor mostra la superficie del provino in cui le diverse colorazioni indicano le temperature raggiunte.

Nella seconda fase di sperimentazione si è utilizzata una fotocamera termografica Fluke Ti9 (Figura 5.6)



Figura 5.6: Immagine termocamera Fluke Ti9:

Ponendo la fotocamera ad una certa distanza dal provino, essa non risulta influenzata dal campo magnetico, inoltre consente di avere una mappatura termica della superficie.

Una volta effettuata l'acquisizione dell'immagine è possibile, con l'utilizzo di un apposito software, SmartView 3.7, fornito dallo stesso produttore della fotocamera, estrapolare tali immagini nel formato preferito e studiarle al fine di una opportuna valutazione del fenomeno.

5.2.4 Materiale utilizzato


Il materiale utilizzato è un laminato composito TEPEX®; costituito da una resina Poliammide 6.6 con il 50% in peso di fibre di carbonio, twill 2x2.


Tale materiale può essere utilizzato a temperature da -30 ° C fino a 130 ° C costantemente.

La PA6.6 è nota per la sua elevata durezza, rigidità, resistenza all'abrasione, al calore e resistenza chimica. Questo materiale ha elevate proprietà meccanica e ottima resistenza a fatica.

I principali campi di applicazione sono nel settore automobilistico e per grandi parti strutturali.

Nella figura seguente è riportata la scheda tecnica fornita dal produttore.





Material Data Sheet

Tepex® optilite 201-C200(x)/45%
Carbon – PA 6.6 Consolidated Composite Laminate

	Property	Method ISO	Units	Longitudinal	Transverse
Material	Reinforcement	Fibres Fabric Area weight Yarn Weight rate	g/m ² tex %	carbon twill 2/2 200 3k 50	3k 50
	Polymer	Polymer		PA6.6	
	Laminate	Density Fibre content Thickness per layer	g/cm ³ % vol. mm	1.43 45 0.25	
Mechanical	Tensile	Modulus Strength Elongation Poisson's ratio	527-4/5 527-4/5 527-4/5 527-4/5	GPa MPa %	53.0 785 2.1 0.07
	Flexural	Modulus Ultimate stress*	178 178	GPa MPa	45.5 760
	Charpy impact strength unnotched	23°C -30°C	179/1eU	kJ/m ² kJ/m ²	110 150
Thermal	Melting Temperature Glass transition temperature Heat deflection temperature Coefficient of thermal expansion	per DSC per DSC 1.80 MPa -30°C to 23°C 23°C to 80°C	3146 3146 75-1/2 ASTM E831	°C °C °C E-6 1/K	260 70 255 -
	Relative temperature index	20.000 h	IEC 216/1	°C	130

* 3-Point loading, span-to-depth ratio 16 to 1

Figura 5.7: Scheda Tecnica materiale utilizzato

5.2.5 Attrezzatura prove meccaniche

In seguito alla valutazione di altri studi effettuati sul riscaldamento mediante induzione elettromagnetica di CFRP, che adottavano la norma D2344 per la caratterizzazione meccanica dei provini realizzati, si è deciso di eseguire i test sui materiali secondo ASTM D5868.

La decisione di utilizzare la D5868 è dovuta al fatto che nel caso della D2344 il carico che si ricava contiene anche la componente di flessione dovuta alla modalità di esecuzione della prova.

Questo metodo di prova permette di misurare le caratteristiche dei legami di adesivi per l'adesione fibra-plastica rinforzata per sé e per i metalli.

Il metodo è applicabile a qualsiasi tipo di materiale fibro-rinforzato ed è destinato a completare il metodo di prova D1002 ed estendere l'applicazione a giunti a sovrapposizione singola di plastiche (FRP) rinforzati con fibre.

Tale metodo è, inoltre, utile per effettuare un'analisi comparativa della resistenza al taglio di giunti realizzati da diversi tipi di materiali FRP.

I valori indicati in unità pollici e libbre devono essere considerati come standard.

5.3 Prima sessione di prove sperimentali

Le prove sperimentali effettuate hanno tentato di mettere in luce quanti più aspetti possibili relativi al riscaldamento per induzione elettromagnetica di un composito a matrice termoplastica con fibre di carbonio.

Le prove realizzate sono esattamente le stesse di quelle simulate in JMAG. Pertanto si riporta la seguente tabella:

Provino	Tempo	Voltaggio[V]
1.1	20	200
1.2	25	200
1.3	25	200
1.4	25	250
1.5	15	300

Tabella 5.2: Parametri di saldatura

Simulazione	Voltaggio [V]	Temperatura max [°C]	Tempo di permanenza [s]
2.1	100	260	15
2.2	150	260	10
2.3	150	260	15
2.4	150	260	20
2.5	200	250	10
2.6	200	260	10

Tabella 5.3: Parametri di saldatura serie 2

Nella figura seguente è mostrata l'attrezzatura utilizzata.

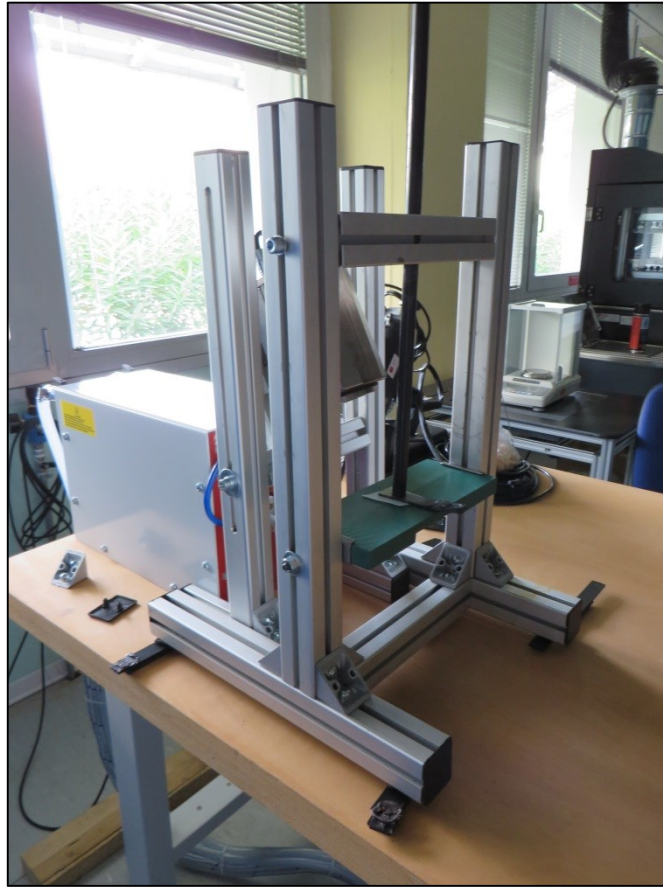


Figura 5.8: Attrezzatura di prova utilizzata

5.3.1 Risultati della prima sessione di prove sperimentali

Di seguito vengono riportati i risultati di questa prima sessione di prove sperimentali.

Le prove, come anche già descritto in precedenza, sono state divise in due serie di prove: una prima serie dove non è stato effettuato il controllo di temperatura, ed una seconda serie dove invece si è pensato di eseguirlo, in modo da cercare di uniformare la zona riscaldata.

Giunto n.1.1

Il primo giunto, come anche mostrato nella tabella 5.2, è stato realizzato imponendo un valore di tensione del generatore pari a 200V, per un tempo di riscaldamento pari a 20 secondi.

La temperatura finale raggiunta dal provino, mostrata sul display della macchina, è pari a circa 260°C.

Una volta eseguita la giunzione, si è misurato lo spessore del giunto, pari a circa 7 mm.

Giunto n.1.2

Anche in questa seconda prova i parametri di macchina sono rimasti invariati, mentre è aumentato il tempo di riscaldamento, passando dai 20 [s] della prova precedente, a 25 [s].

La temperatura massima raggiunta dal giunto è pari a circa 270°C.

Lo spessore, invece è pari a 6.45 mm.

Giunto n.1.3

Per questa terza prova, si è pensato di aumentare la pressione agente sui provini nella zona di *overlap*; in particolare, si è passati da una pressione di 3,68 kPa ad una di 5,31 kPa.

Conseguentemente all'aumento di pressione, si è verificato una diminuzione dello spessore finale del giunto: passando da 6,45 mm, del caso precedente, a 6,35 mm. L'aumento di pressione non ha però influito sulla temperatura finale del giunto, comunque pari a 260°.

Giunto n.1.4

Nella realizzazione di questo quarto giunto, sono stati variati i parametri di macchina, in particolare si è impostata una tensione pari a 250V, per un tempo di riscaldamento di 25 secondi, ed è stata applicata una pressione di 5,31 kPa.

In questo caso la temperatura finale letta dal pirometro all'interfaccia tra i due provini è pari a circa 300°.

Lo spessore del giunto è pari a 6,43 mm.

Giunto n.1.5

Per il quinto, ed ultimo, giunto realizzato in questa serie di sperimentazione, sono stati ancora una volta variati i parametri di macchina, applicando un voltaggio pari a 300V, ed il tempo di riscaldamento, pari a 15 [s]; mentre è rimasta invariata la pressione applicata, 5,31 kPa.

La temperatura massima raggiunta all'interfaccia tra i due provini, è ancora una volta pari a circa 300°, mentre lo spessore del giunto si è ridotto a 6,40 mm.

Giunto n.2.1

In questo caso il valore della tensione imposto è pari a 100 [V], e i provini sono stati portati alla temperatura di 260°C e si è mantenuto tale valore costante per 15 secondi.

Giunto n. 2.2

Per la realizzazione di questo giunto si è aumentata la potenza erogata dalla macchina, aumentando il voltaggio ad un valore pari a 150 [V]. Come nel caso precedente, una volta raggiunti i 260°C, è stato effettuato un mantenimento di 10 secondi.



Figura 5.9: Giunto 2.2

Giunto n.2.3

Rispetto al caso precedente i parametri di macchina sono rimasti invariati, è stato però prolungato il tempo di permanenza a 260°C, stavolta pari a 15 secondi.



Figura 5.10: Giunto 2.3

Giunto n.2.4

Per questo quarto giunto sono stati imposti i seguenti parametri di macchina: una tensione di 150 [V].

Anche in questo caso è stato effettuato un mantenimento di temperatura a 260 °C per 15 [s], è stata però variata la pressione agente sulla zona da saldare, infatti si è esercitata una pressione pari a 55,16 kPa.

Giunto n.2.5

Per il quinto giunto, si è passati ad una tensione di 200 [V]. Anche in questo caso è stato effettuato un controllo di temperatura a 250°C per 10 secondi, ma con una pressione applicata pari a 55,16 kPa.



Figura 5.11: Giunto 2.5

Giunto n.2.6

In questo ultimo giunto i parametri di macchina, come la pressione, sono rimasti invariati rispetto al caso precedente, mentre è stata aumentata la temperatura, 260°C per un tempo di permanenza pari a 10 secondi.

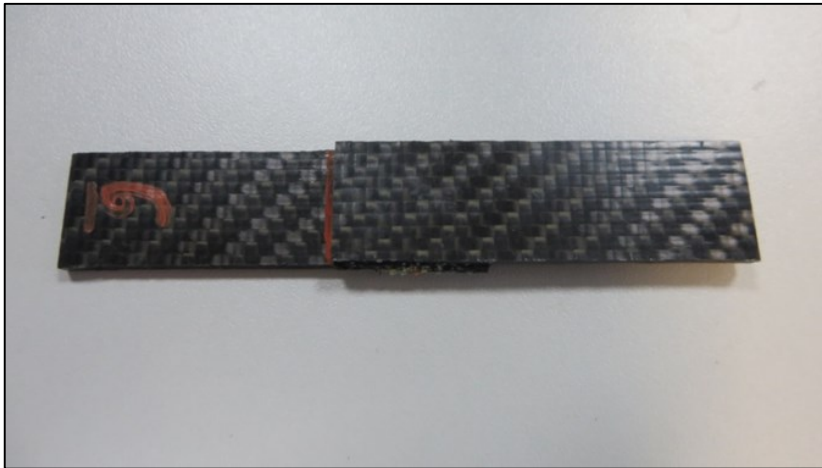


Figura 5.12: Giunto 2.6

5.4 Confronto tra simulazione e sperimentazione

Il modello di simulazione si è rivelato abbastanza valido, fornendo valori di temperatura quasi coincidenti con quelli riscontrati durante la fase di sperimentazione.

Per meglio comprendere il comportamento del materiale durante il riscaldamento per induzione elettromagnetica, di seguito viene riportato un confronto tra le prove simulate e quelle di sperimentazione realizzate con gli stessi parametri, tra le più significative.

E' possibile inoltre confrontare ciascun giunto realizzato con la simulazione effettuata tramite JMAG.

Una volta realizzati, i giunti sono stati testati a trazione in modo da valutare il carico di taglio massimo, e da studiare la superficie interna.

Dalla Figura 5.13 precedente appare evidente che, come ci si aspetta dalla simulazione, il riscaldamento all'interno del giunto non è simmetrico.

Si può infatti notare, anche dal confronto tra le immagini della simulazioni e quella del giunto realizzato, come effettivamente la zona effettivamente riscaldata, e quindi saldata, è prossima ai bordi, mentre la parte più interna non ha subito alcun riscaldamento.

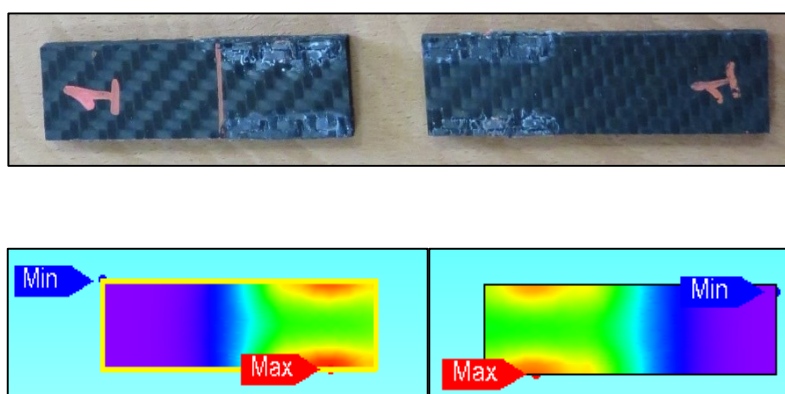


Figura 5.13: Confronto Giunto 1.1

In Figura 5.14 è riportato il confronto tra la prova sperimentale e quella numerica del giunto 1.3. Anche in questo caso, si ha una conferma del comportamento previsto dalla simulazione. Per questo giunto, come precedentemente detto è stato aumentato a 25 secondi e infatti la zona riscaldata è maggiore rispetto al caso precedente.

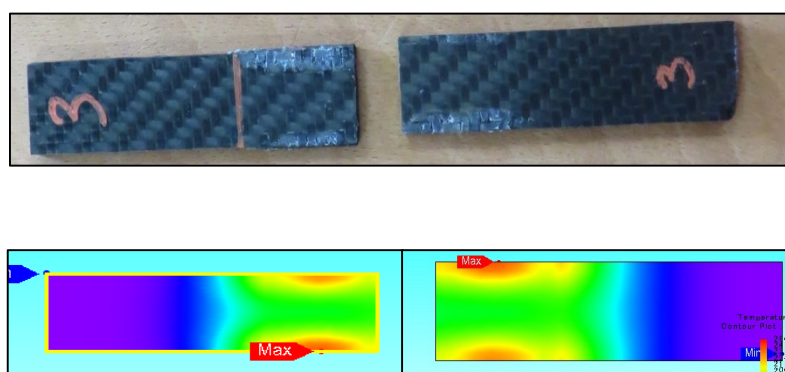


Figura 5.14: Confronto Giunto 1.3

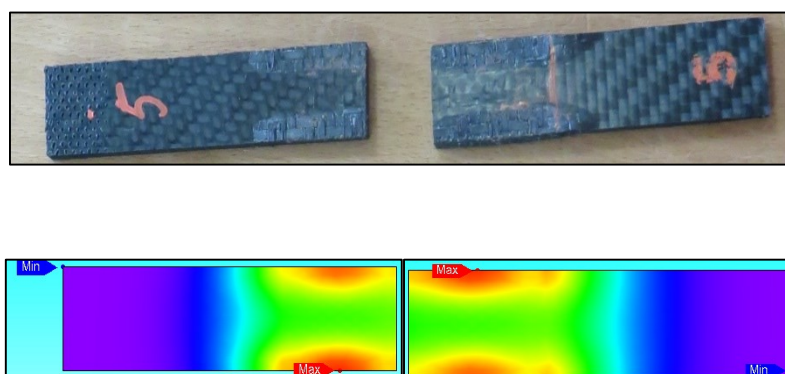


Figura 5.15: Confronto giunto 1.5

Come nei casi precedenti, anche in Figura 5.15 si può notare come il riscaldamento sia stato asimmetrico, confermando ancora una volta quanto previsto dal calcolo. In questo caso però, rispetto ai precedenti è stata aumentata il valore di tensione ai capi dell'induttore, passando dai 200V dei casi precedenti, ad un valore di 250V.

Tale aumento di tensione ha permesso il raggiungimento di temperature più alte e quindi una maggiore compenetrazione di materiale tra i due provini, con un aumento dell'aria effettivamente riscaldata dall'induzione elettromagnetica.

Confrontando l'immagine del provino reale e quella della simulazione appare evidente come l'andamento della temperatura sia quasi coincidente.

Di seguito viene riportato il confronto numerico-sperimentale delle prove effettuate eseguendo il controllo di temperatura.

In Figura 5.16 è riportato il giunto 2.3 realizzato applicando un voltaggio pari a 150 [V], e il provino ha raggiunto una temperatura di 260 °C mantenuta costante per 15 secondi; dal confronto tra le due immagini, appare evidente come il provino di sinistra, quello più vicino al supporto si sia riscaldato maggiormente, ed anche in questo caso la simulazione sembra abbastanza fedele ai risultati ottenuti dalle prove sperimentali.

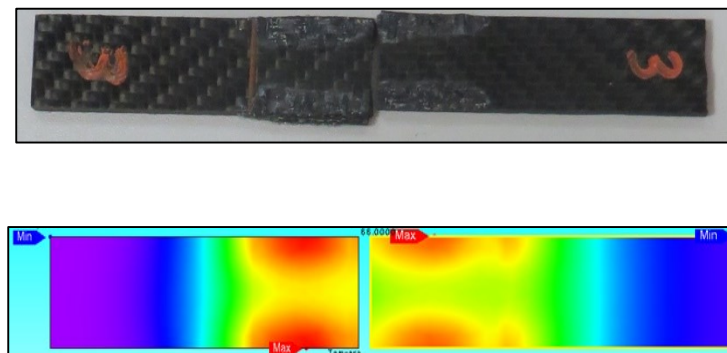


Figura 5.16: Confronto Giunto 2.3

Di seguito è riportato il confronto per il giunto 2.6; in questo caso è stata aumentata la pressione agente sul giunto, passando da un valore pari a 3,68 kPa ad un valore di 55,16 kPa. Analizzando la superficie dei provini, si nota che la maggior pressione ha permesso una maggior conduzione del calore verso l'interno, aumentando la superficie effettivamente riscaldata (cerchio rosso), con conseguente aumento della resistenza al taglio del giunto.

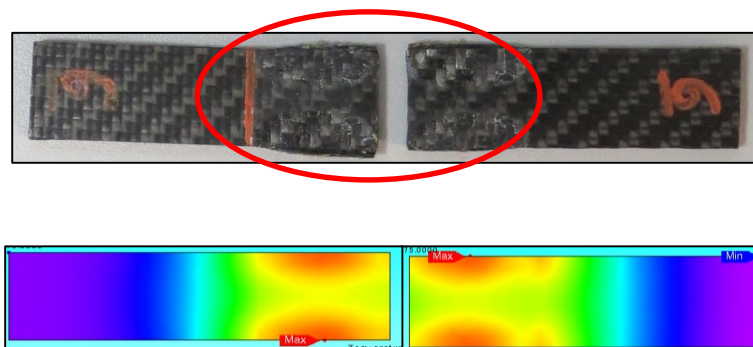


Figura 5.17: Confronto Giunto 2.6

Nel grafico seguente sono riportati i risultati delle prove di trazione eseguite.

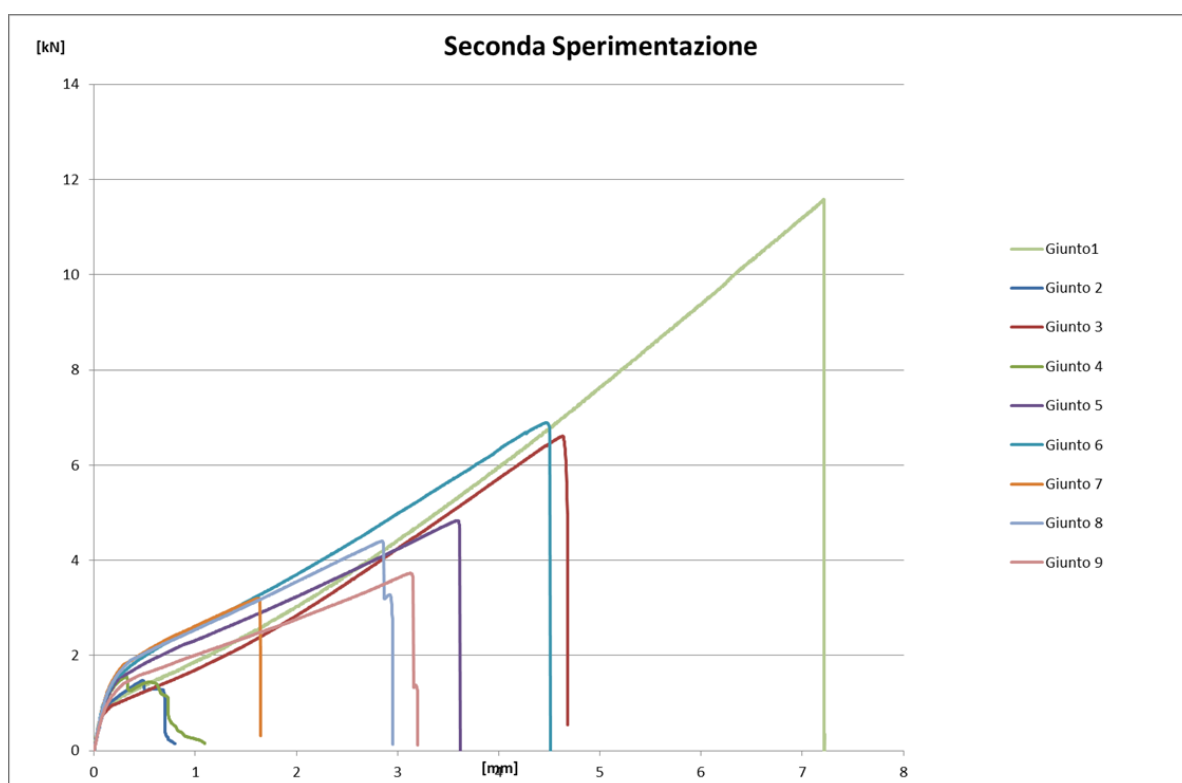


Figura 5.18: Risultati prove di taglio

Capitolo VI

6. Seconda serie di simulazioni

6.1 Introduzione

La prima fase del lavoro, discussa nei capitoli precedenti è stata condotta al fine di definire un modello agli elementi finiti con cui riuscire a simulare il riscaldamento mediante induzione elettromagnetica di un composito termoplastico fibro-rinforzato in carbonio.

Dopo tale fase di studio e di messa a punto della metodologia e dei parametri si è pensato di approcciare la nuova fase di miglioramento utilizzando il DOE ovvero il Design Of Experiments cioè una tecnica statistica che permette di progettare in maniera intelligente gli esperimenti e di individuare i fattori che influenzano la caratteristica in analisi. Esistono all'interno del mondo DOE numerose tecniche semplificate tese alla riduzione del numero di prove cercando di mantenere un'attendibilità dei risultati ottenuti, tenendo presente che inevitabilmente si introduce nell'analisi un'approssimazione che si cerca di mantenere sotto controllo.

In questo lavoro, avendo sufficiente materiale a disposizione e cercando di cogliere tutte le sfumature di un'applicazione per certi versi ancora sconosciuta, si è pensato di costruire un piano di prove basato su n.3 fattori: il voltaggio (V), la temperatura (T) rilevata dal pirometro e mantenuta costante, il tempo di permanenza (t) alla temperatura T impostata precedentemente; mentre ognuno di questi 3 fattori è rappresentato da n.3 livelli ovvero 3 valori di riferimento. Si ottiene, seppur in minimi termini, un piano fattoriale completo di 3 fattori con 3 livelli ognuno ovvero un piano di prove sperimentali di $3 \times 3 = 27$ prove alternando consecutivamente ognuno dei livelli definiti. Su ognuno dei 27 provini è stata usata una codifica che tiene conto della seguente tabella:

<div>Fattore</div> <div>Livello</div>	Voltaggio (Volt)	Temperatura (°C)	Tempo (secondi)
1	300	250	10
2	400	260	20
3	350	270	30

Tabella 6.1: Riepilogo Livello-Fattore

Quindi, ad esempio, la combinazione 1.1.1 scritta sul provino vorrà dire che è stato realizzato il giunto saldato con i seguenti parametri: 300 V di voltaggio, 250 °C di temperatura impostata al pirometro e 10 secondi di durata di riscaldamento a temperatura costante. La voce contrassegnata col numero 2 per quanto riguarda la tensione applicata dalla macchina ad induzione è più grande di quella posta al numero 3 non per qualche motivazione specifica bensì semplicemente perché in prima battuta il valore 400 V doveva essere intermedio ma in corso d'opera non si è riusciti a raggiungere il valore di 500 V perché la macchina non riusciva a mantenere tale valore per motivi di sicurezza ed andava in blocco. Il valore 400 V è diventato così il valore più grande tra quelli impostati per il fattore Voltaggio anche se codificato ad un livello inferiore. Vedremo successivamente che l'analisi statistica ha riportato alla normalità la serie di livelli dal valore più piccolo al più grande per una maggiore comprensione del fenomeno. Per il fattore Temperatura si è partiti dalla T_m del materiale utilizzato (vedi scheda tecnica riportata precedentemente) che è pari a 260 °C e ponendo questo come livello centrale ovvero al centro della serie di valori da testare con il minimo pari a 250°C e il massimo pari a 270 °C. Per il fattore Tempo in base a esperienze consolidate sono stati considerati i livelli cioè i valori 10, 20 e 30 secondi.

Uno dei risultati della prima sessione di prove è stato la non uniformità del campo di temperatura ottenuto dall'utilizzo dell'induttore a paniere, nonostante la presenza di un campo magnetico piano.

Al fine di minimizzare tale riscaldamento non uniforme dei bordi dei provini si è pensato di utilizzare un nuovo induttore, resosi necessario anche a causa della nuova dimensioni dei

provini adottati, conforme alla norma ASTM D5868, utilizzata per valutarne la resistenza al taglio.

6.2 Processo di modellazione

Come per le simulazioni precedenti, la realizzazione della geometria è stata effettuata utilizzando un software CAD esterno, quale SolidWorks.

In particolare sono stati modellati, ancora una volta, gli elementi principali che costituiscono l'attrezzatura quali: l'induttore, il supporto e i due provini da giuntare (Figura 6.1).

In Figura 6.2 è riportato l'induttore, le cui dimensioni sono:

- Diametro esterno tubi = 4,5 mm;
- Diametro interno tubi = 2,5 mm;

Le dimensioni dei provini (Figura 6.3) sono:

- Lunghezza = 100 mm;
- Larghezza = 25 mm;
- Spessore = 2 mm.

Il supporto (Figura 4.7) ha invece dimensioni pari a:

- Lunghezza = 100 mm;
- Larghezza = 100 mm;
- Spessore = 10 mm.

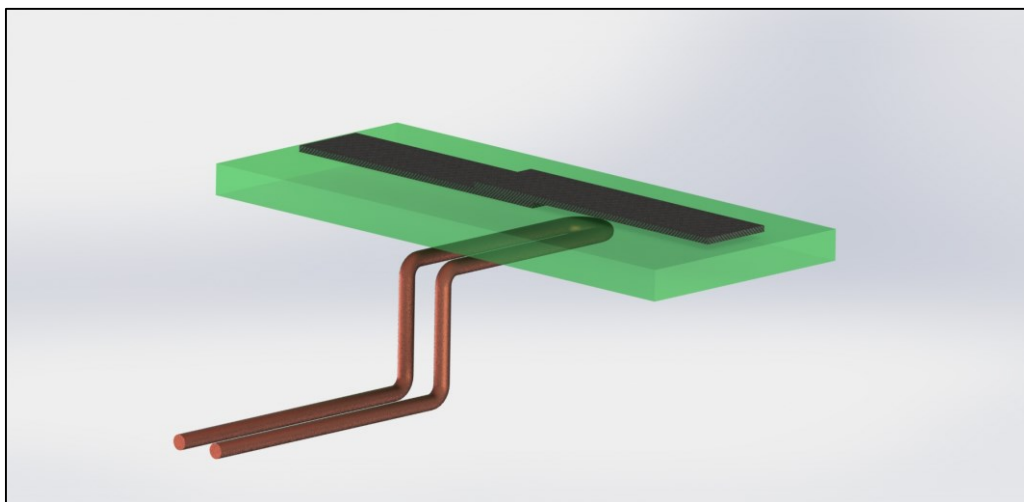


Figura 6.1: Schema dell'impianto di saldatura

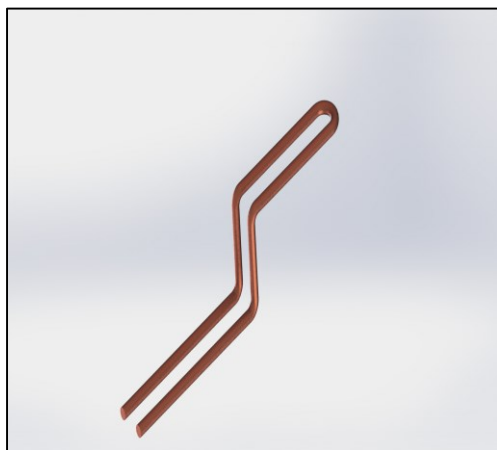


Figura 6.2: Induttore

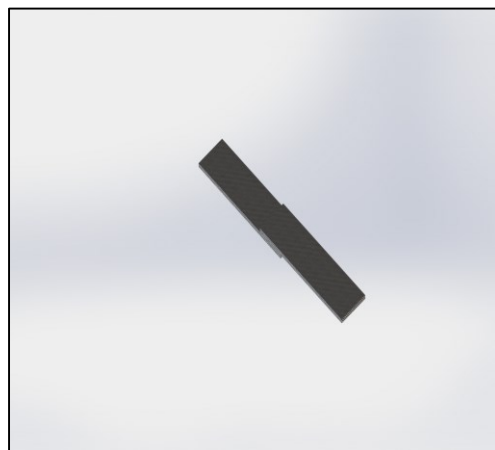


Figura 6.3: Provini in CFRP

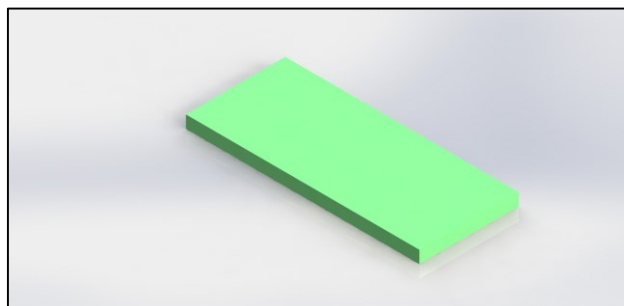


Figura 6.4: Supporto

6.3 Simulazioni

Per ognuna delle seguenti simulazioni sono stati eseguiti gli steps delle simulazioni precedenti.

Le variabili assegnate in ciascuna delle 9 simulazioni sono:

- Voltaggio;
- Tempo di permanenza;

Rimangono invece invariati:

- Temperatura iniziale $T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Frequenza dell'induttore = 238 kHz;

Prima di lanciare la simulazione e plottarne i risultati, è necessario impostare il tipo ed il passo dell'analisi.

Per il modulo elettromagnetico, si è impostata un'analisi statica; mentre per il modulo termico, l'analisi impostata è di tipo transitorio e lineare.

Per quanto riguarda il passo, per meglio campionare l'andamento della temperatura, le simulazioni sono state eseguite in steps da 1,4 secondi l'uno, stessa frequenza con cui le fibre ottiche utilizzate monitorano la temperatura.

Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate come una mappa cromatica in cui le zone a temperatura maggiore sono in rosso.

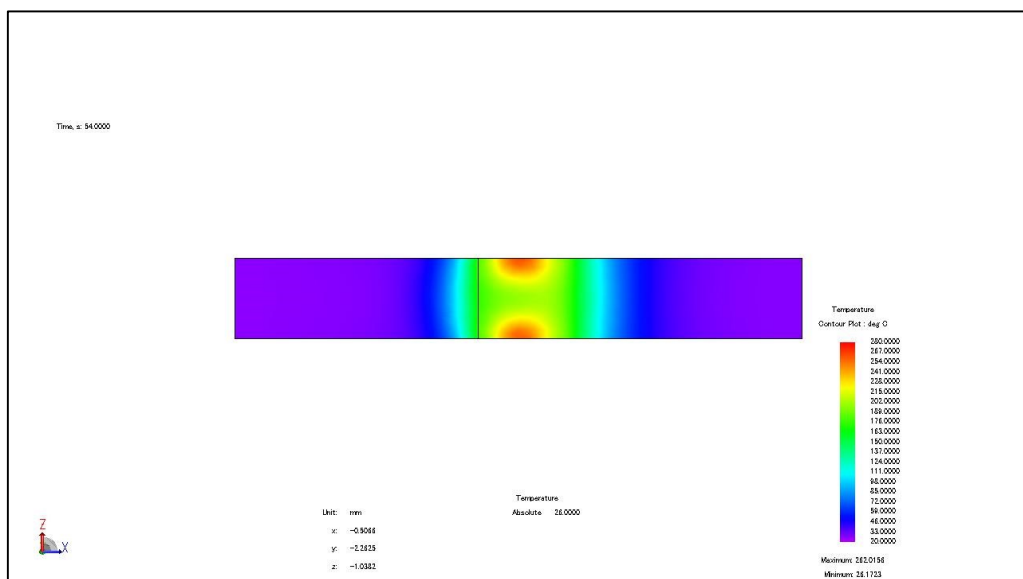


Figura 6.5: Soluzione Tipo

Di seguito sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate l'andamento della temperatura all'interfaccia della zona di saldatura, lungo lo spessore della zona di sovrapposizione, come riportato in Figura 6.6: **Linea di misura della temperatura**.

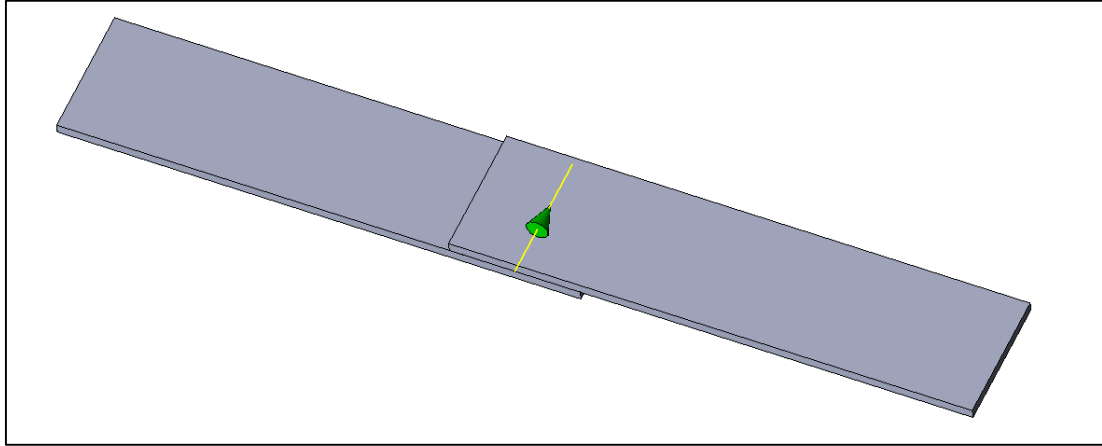


Figura 6.6: Linea di misura della temperatura

Nei diagrammi da Figura 6.7: **Simulazione 1.1.3** a Figura 6.15: **Simulazione 3.3.3** sono evidenziati con diversi simboli le curve della temperatura dopo 10, 20 e 30 secondi dall'inizio del controllo:

- $\Delta = 10$ s;
- X = 20 s;
- O = 30 s.

Quindi è possibile notare come a parità di temperatura sulle estremità dei provini, la temperatura della zona più interna della sovrapposizione aumenta passando da circa 100 °C di differenza a 60°.

Da tali grafici risulta ancora più evidente l'effetto bordo causato dalla geometria dell'induttore, che causa un surriscaldamento dei bordi dei provini, mentre il cuore della zona di saldatura rimane a temperature molto più basse, che non arrivano a temperatura di fusione. Su tale effetto gioca un ruolo fondamentale il valore del voltaggio; difatti mettendo a confronto la figura con la temperatura della zona più interna è maggiore nel caso delle simulazioni con voltaggio pari a 350 V (serie 3) che quelle con voltaggio 400 V (serie 2).

Inoltre aumentando la temperatura esterna, quindi passando da 250 a 270 °C, ancora una volta la temperatura interna aumenta.

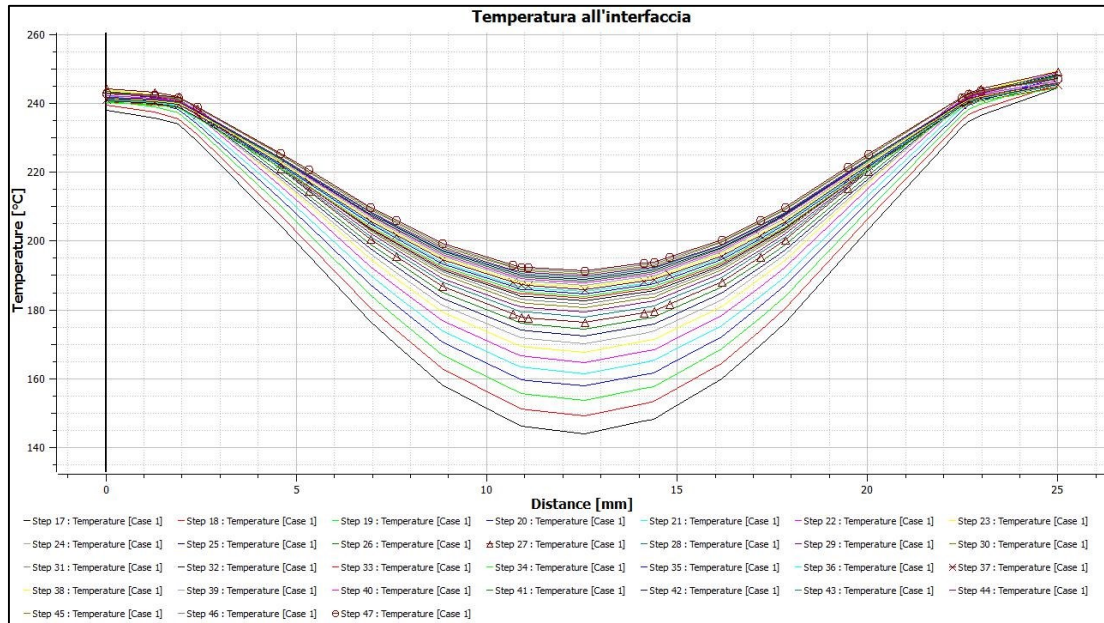


Figura 6.7: Simulazione 1.1.3

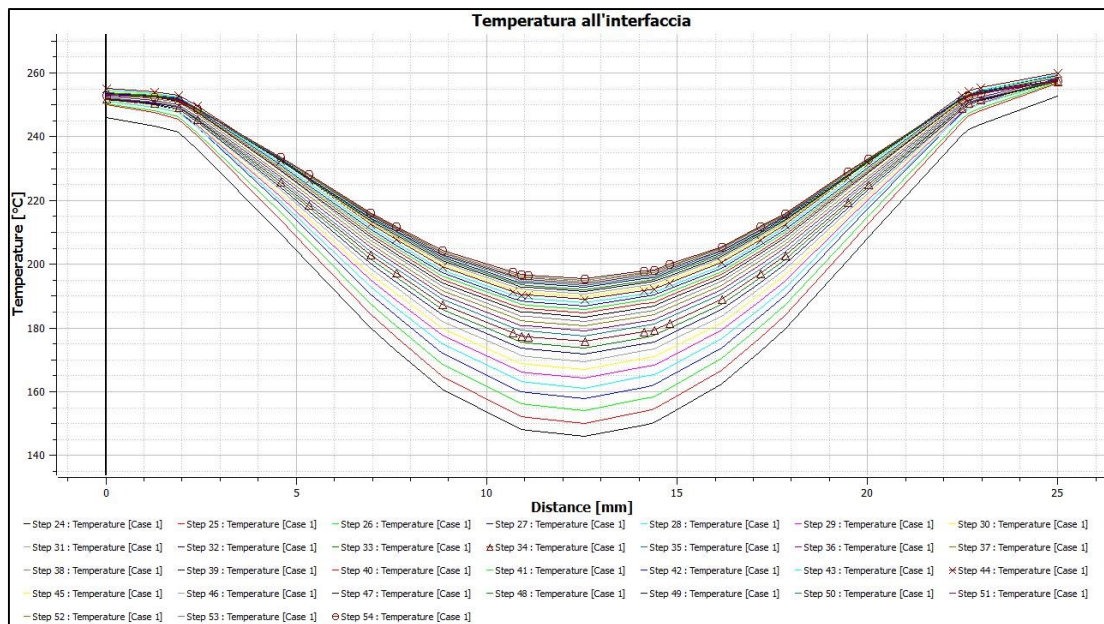


Figura 6.8: Simulazione 1.2.3

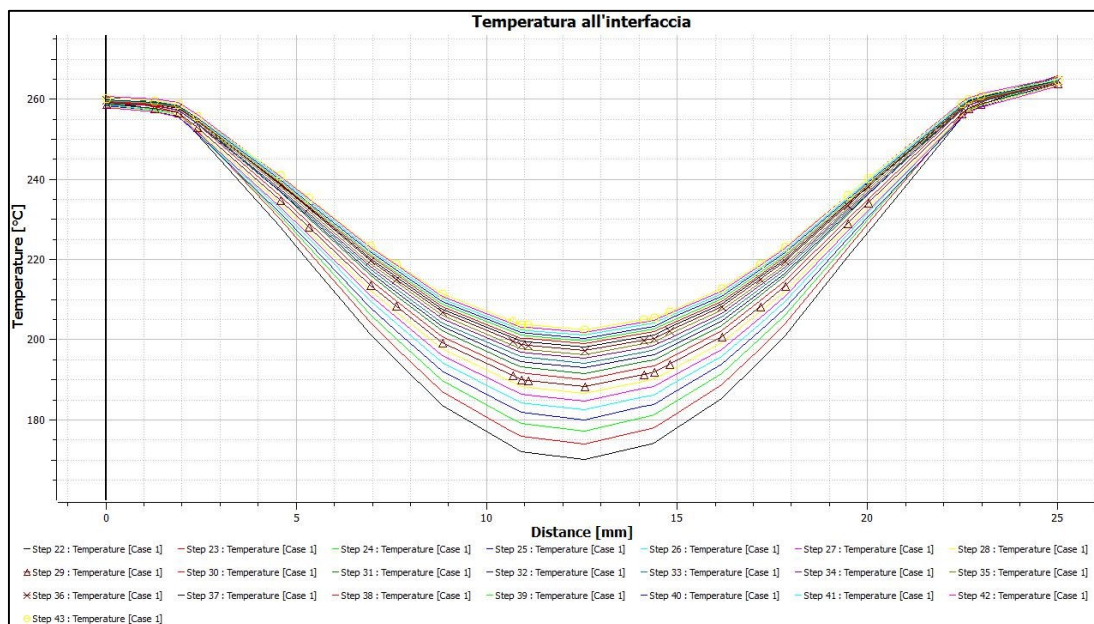


Figura 6.9: Simulazione 1.3.3

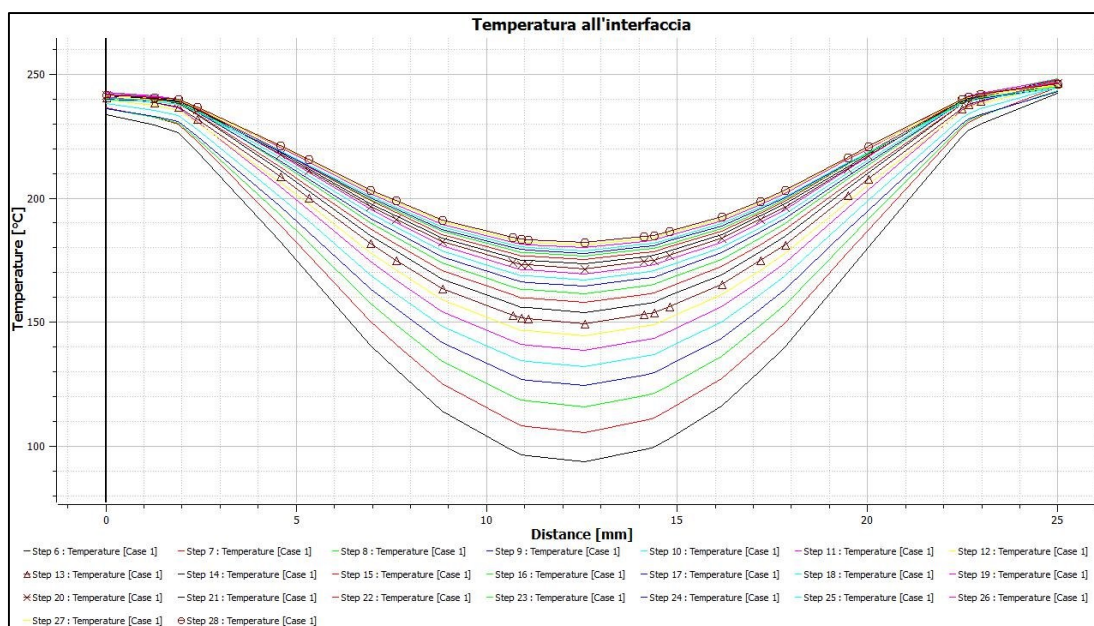


Figura 6.10: Simulazione 2.1.3

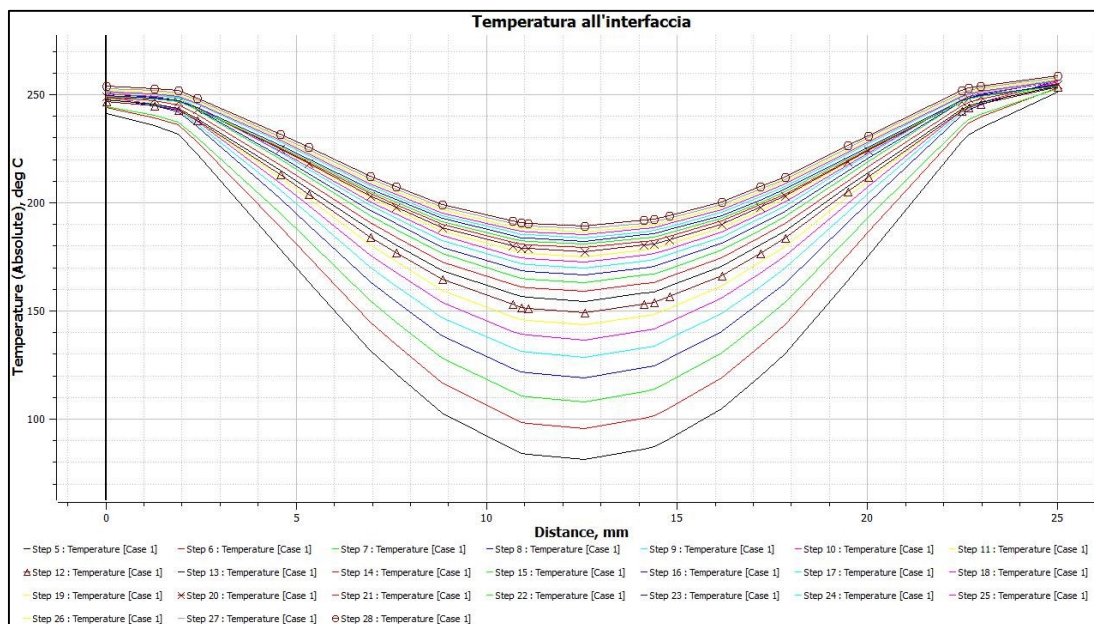


Figura 6.11: Simulazione 2.2.3

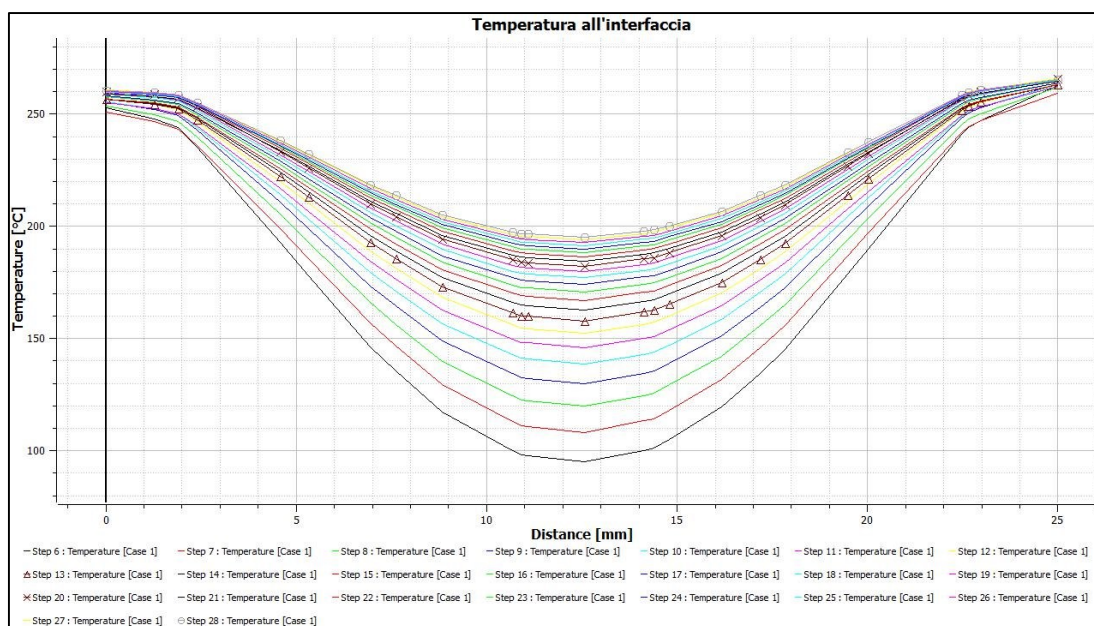


Figura 6.12: Simulazione 2.3.3

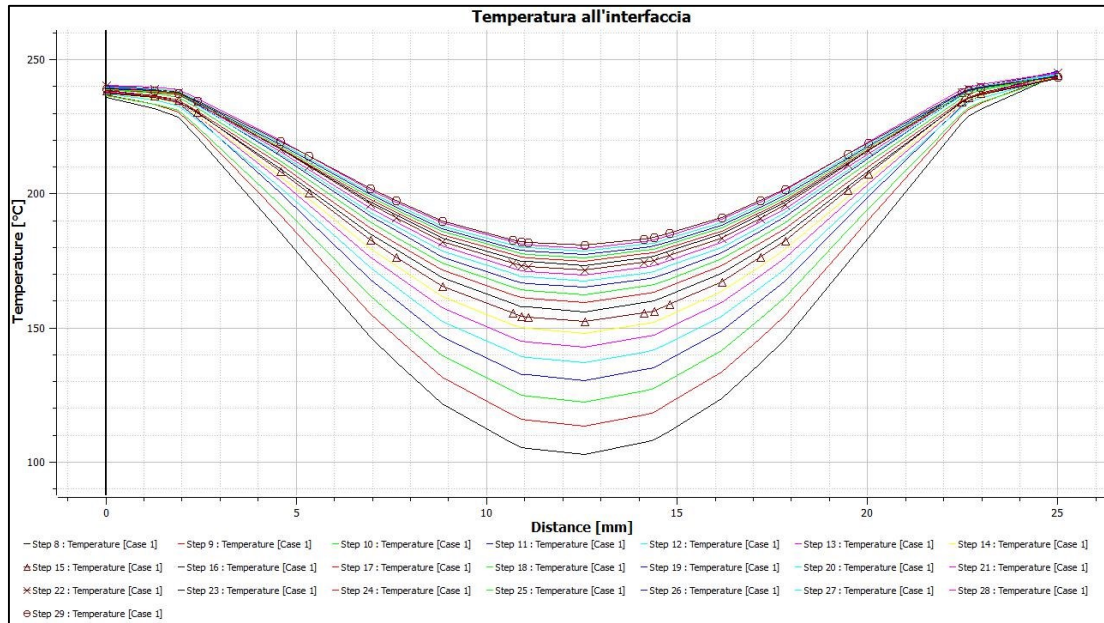


Figura 6.13: Simulazione 3.1.3

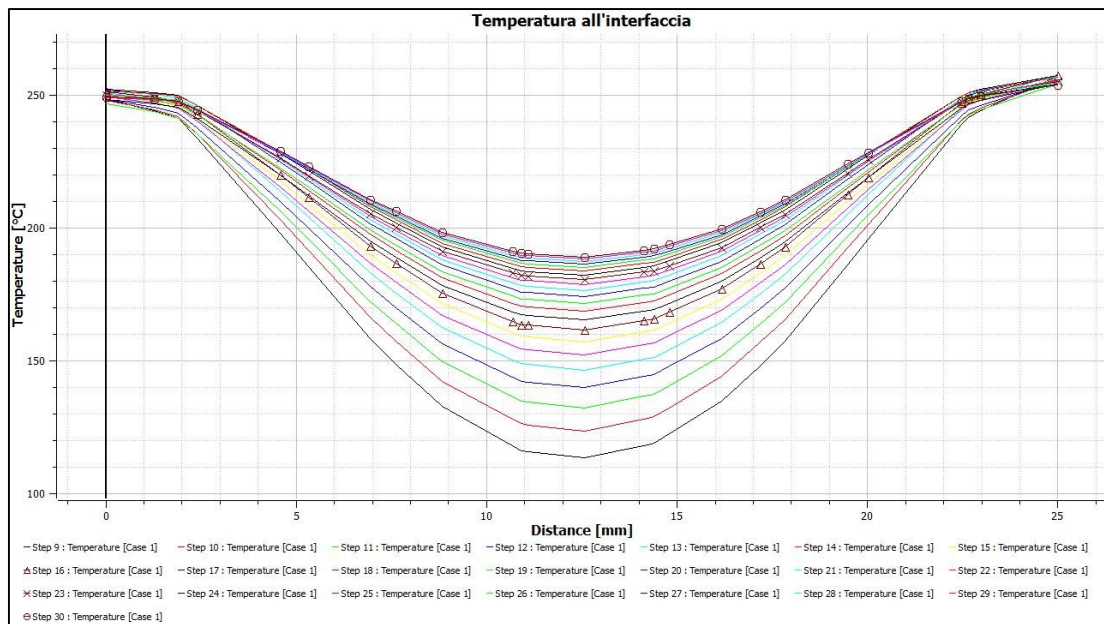


Figura 6.14: Simulazione 3.2.3

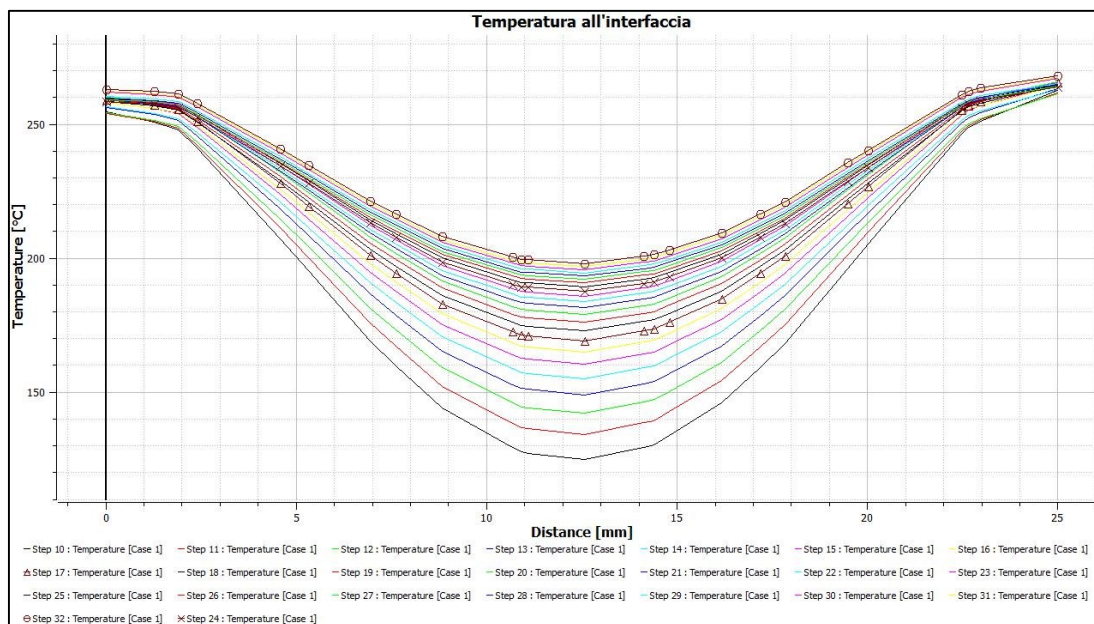


Figura 6.15: Simulazione 3.3.3

Capitolo VII

7. Seconda serie di sperimentazione

7.1 Introduzione

Sulla base dei precedenti ragionamenti è stata pensata una seconda serie di prove con la stessa metodologia ma con qualcosa in più: la possibilità di effettuare una misurazione della temperatura con un altro strumento ovvero con la fibra ottica. Nello specifico si è utilizzato un lettore di fibre ottiche a due canali cioè che può effettuare la misurare della temperatura in due punti diversi. La prima fibra è stata posta in corrispondenza della mezzeria del giunto laddove si sovrappongono i substrati, in posizione simmetricamente opposta al punto dove viene misurata la temperatura col pirometro in modo tale da effettuare un confronto tra la fibra ottica e il pirometro stesso. La seconda fibra è stata posta sempre in corrispondenza della mezzeria del giunto laddove si sovrappongono i substrati ma lungo il piano di mezzeria longitudinale in modo tale da effettuare un confronto tra la temperatura misurata sperimentalmente dalla fibra stessa e quella ricavata dal calcolo attraverso il software. Le fibre ottiche intervengono rafforzando la correlazione numerico sperimentale tra le temperature misurate dal pirometro e quelle ricavate dal calcolo.

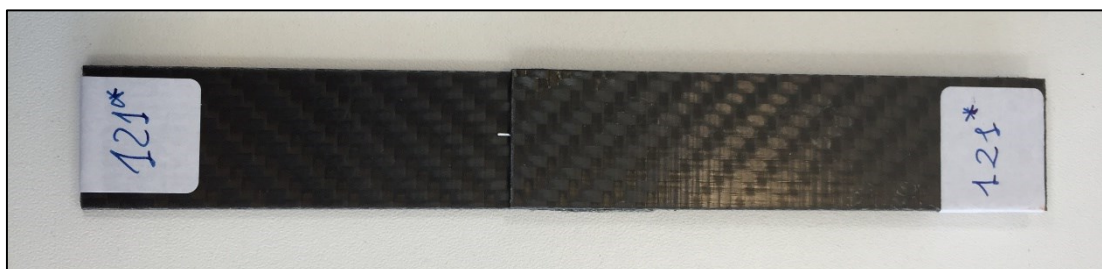


Figura 7.1: Provino strumentato con fibra ottica in mezzeria



Figura 7.2: Provino strumentato con fibra ottica laterale

Questa seconda serie di giunti segue la stessa numerazione di quella precedente senza le fibre ma con a di un asterisco (*). Di seguito i 27 giunti realizzati, dal codice 1.1.1 a quello 3.3.3 ovvero dalla configurazione 300 V, 250 °C e 10 secondi a quella 400 v, 270 °C e 30 secondi, raggruppati a tre a tre in base alla durata del processo di riscaldamento a temperatura costante cioè per 10 s, 20 s e 30 s, con la presenza delle fibre ottiche.

7.2 Attrezzatura utilizzata

7.2.1 Fibre Ottiche

Il monitoraggio della temperatura, in presenza di forti campi elettromagnetici, pone problemi di natura tecnologica dal momento che tutta la sensoristica che prevede una trasduzione elettronica non può essere utilizzata. Tuttavia esistono sensori e sistemi di misura immuni alle interferenze elettromagnetiche che possono essere utilizzati per lo scopo.

Un aspetto fondamentale è stata la progettazione, realizzazione e testing della protezione per permettere il riutilizzo delle fibre. La soluzione adottata deve consentire quanto segue:

- L’inserimento dei sensori commerciali selezionati all’interno della zona da giuntare;
- Il posizionamento del punto sensibile quanto più possibile in prossimità alla posizione nominale desiderata;
- Il recupero semplice delle sonde termiche in fibra onde garantirne il riutilizzo.

Tutto ciò garantirà il corretto monitoraggio del profilo termico nel materiale durante il processo di riscaldamento mediante induzione a RF, e renderà possibile il molteplici utilizzo delle sonde dato che queste non entreranno mai in contatto con il materiale quando questo è in fase “melt”.

La scelta dei sensori in fibra ottica, oltre che per le prestazioni di risoluzione (0.1°C) ed accuratezza (variabile in base al sistema di lettura), è suffragata dal metodo di riscaldamento

adottato; il sistema infatti è basato su un induttore alimentato da elevata corrente elettrica a frequenza superiore al centinaio di kHz (circa 280 kHz). Questa genera dunque un campo elettromagnetico che renderebbe inutilizzabile qualsiasi sensore in cui circola corrente elettrica e dunque la scelta di quelli in fibra ottica, ovvero costituiti da materiale dielettrico e quindi completamente immuni ai suddetti campi, diventa praticamente naturale, per non dire obbligata. Il segnale che si propaga all'interno del "core" della fibra ottica è una radiazione elettromagnetica a frequenze ottiche, dunque nulla di assimilabile ad una corrente elettrica; ovviamente gli specifici sensori da scegliere non dovranno contemplare parti costituenti in metallo onde non inficiare la validità della scelta effettuata.

Si è avuto a disposizione un sistema di misura della Opsens® basato sull'interrogatore TempSens®, capace di interrogare i sensori tipo OTG-F come probe di temperatura. Il sensore tipo OTG-F è schematizzato nella seguente Figura 7.3, che riporta lo schema costruttivo ed il principio di funzionamento. In estrema sintesi la luce generata dallo strumento TempSens® è iniettata nella fibra ottica alla cui estremità libera (da cui l'architettura detta "probe di tip") è realizzata una serie di tre strati, la cui geometria e le cui caratteristiche ottiche (caratteristiche dei materiali impiegati) producono variazioni in parametri caratteristici della radiazione incidente, che convergono in un unico parametro variabile (legato inoltre allo spessore dello strato centrale – cristallo birifrangente sensibile alla temperatura) correlato appunto alla variazione della temperatura.

Tale variazione è poi percepita e decodificata dallo strumento che dunque fornisce in uscita, sia a display che su un PC dotato del relativo software di gestione e logging (SoftSens®), direttamente la temperatura assoluta sperimentata dalle sonde ad esso collegate. Il sistema di interrogazione, tuttavia, non è in grado di leggere 3 sensori contemporaneamente, avendo solo due ingressi ottici ai quali è possibile connettere una singola fibra dotata di un unico sensore alla sua estremità (Figura 7.4).

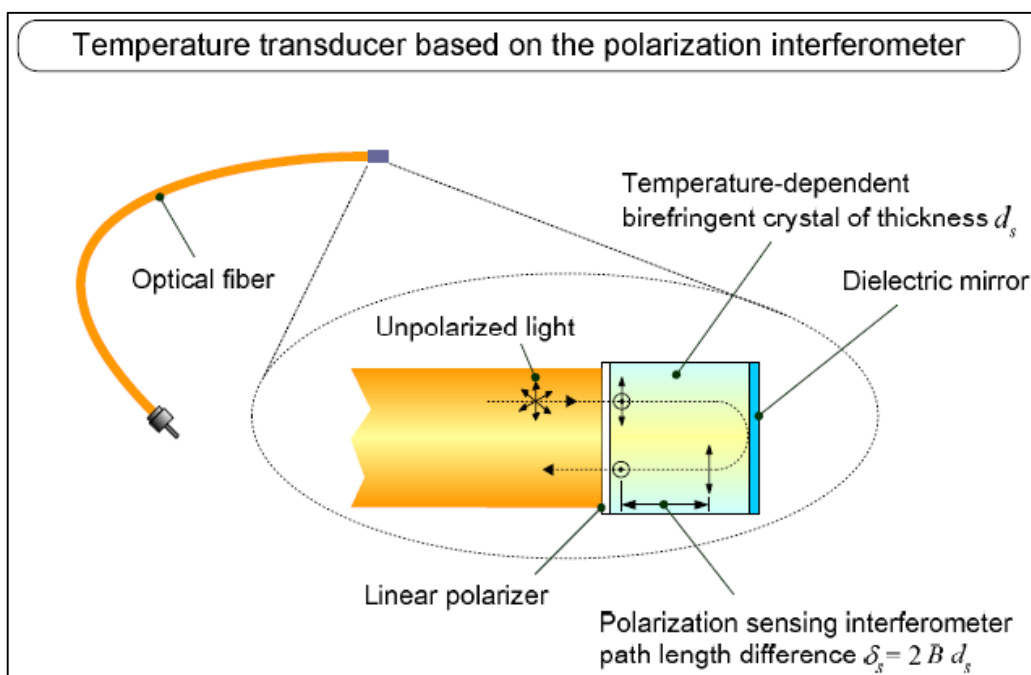


Figura 7.3: Schema costruttivo e principio di funzionamento del probe Opsens OTG-F.



Figura 7.4: Interrogatore TempSens a 2 canali ottici.



Figura 7.5: Fibra ottica Opsens®

Allo scopo di poter riutilizzare i sensori si è reso necessario predisporre un sistema che creasse una sorta di protezione agli stessi rispetto al materiale termoplastico, in fase di fusione.

Oltre a scontate considerazioni di carattere geometrico sussisteva l'esigenza di utilizzare materiali non ferromagnetici, a loro volta sensibili al campo elettromagnetico. Si è pensato di utilizzare dei tubicini di alluminio (materiale definito amagnetico, dunque compatibile con il metodo di riscaldamento ad induzione) da inglobare nell'adesivo e nei quali far poi scorrere le singole fibre sensorizzate. L'alluminio presenta inoltre adeguate caratteristiche termomeccaniche: il modulo elastico è tale da conferire a tubicini molto sottili sufficiente consistenza tale da consentirne un agevole maneggiamento nelle fasi di inserimento; è capace di lavorare ben oltre i 300°C costituendo il limite superiore di specifica in questa applicazione. Una considerazione a parte va fatta in merito alla conducibilità termica. Essendo un metallo è ovviamente un buon conduttore termico; questo da una parte garantisce un corretto campionamento della temperatura nel punto desiderato, ma dall'altra apre alla possibilità di alterare significativamente la distribuzione termica oggetto delle misure, creando una sorta di "ponte termico" trasversale all'interno del materiale termoplastico. In realtà ci si aspetta che in virtù del sottilissimo spessore di parete dei tubicini (100 μm) è lecito ipotizzare una scarsa

influenza. Naturalmente questo aspetto sarà oggetto di verifica tramite l'analisi dei risultati sperimentali di cui si relaziona nel seguito.

Come alternativa si è valutato l'utilizzo di tubicini in PTFE, soluzione poi scartata per la scarsa rigidità (a parità di dimensioni), ma soprattutto per i notevoli limiti in termini di range termico operativo.

La fibra ottica recante il probe Opsens® ha diametro esterno pari a circa 160 μm ; il diametro interno dei tubicini è quindi stato fissato a 200 μm , mentre quello esterno a 400 μm , allo scopo di essere meno intrusivi possibile rispetto. La lunghezza è fissata intorno ai 20 mm, in modo da fuoriuscire di poco dalla zona da saldare, soprattutto per quanto riguarda la misurazione del punto interno Figura 7.1. Nella seguente Figura 7.6, un campione di tubicino in alluminio.

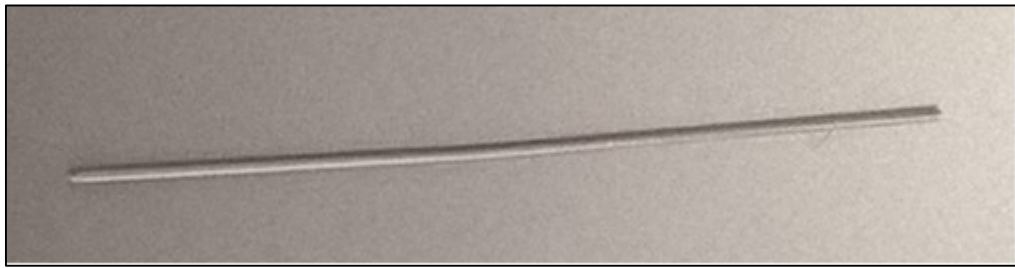


Figura 7.6: Tubicino in alluminio L = 20 mm, Diam. Int. = 200 μm , Diam. Ext. = 400 μm .

7.3 Seconda sessione di prove sperimentali

Una volta effettuate le simulazioni e dopo aver strumentato i provini con le fibre, si è passati ad eseguire le prove sperimentali, impostando i valori che si sono discussi in precedenza.

Il parametro impostato come risposta per misurare la bontà della saldatura è ancora una volta la lap-shear stress ovvero la tensione al taglio del giunto nella prova realizzata secondo la normativa ASTM D5868. I substrati, infatti, sono delle dimensioni consigliate dalla normativa precedente e sono stati saldati secondo una sovrapposizione single-lap (25x25 mm). Studiare la saldatura attraverso la sua resistenza a taglio cioè testare a rottura il provino permette, non solo di misurare la prestazione meccanica della saldatura, ma anche di verificare a posteriori come in realtà si è unito il giunto durante il processo di saldatura e stabilire una correlazione numerico-sperimentale tra il software ed il fenomeno fisico reale. Questa procedura ha dato ottimi risultati in fase di studio preliminare, come riportato nei precedenti capitoli, e adesso la si ripropone con il supporto della metodologia statistica. Di seguito i 27 giunti realizzati, dal

codice 1.1.1 a quello 3.3.3 ovvero dalla configurazione 300 V, 250 °C e 10 secondi a quella 400 v, 270 °C e 30 secondi, raggruppati a tre a tre in base alla durata del processo di riscaldamento a temperatura costante cioè per 10 s, 20 s e 30 s.



Figura 7.7: Serie 300V - 250°C - 10s - 20s - 30s



Figura 7.8: Serie 300V - 260°C - 10s - 20s - 30s



Figura 7.9: Serie 300V - 270°C - 10s - 20s - 30s

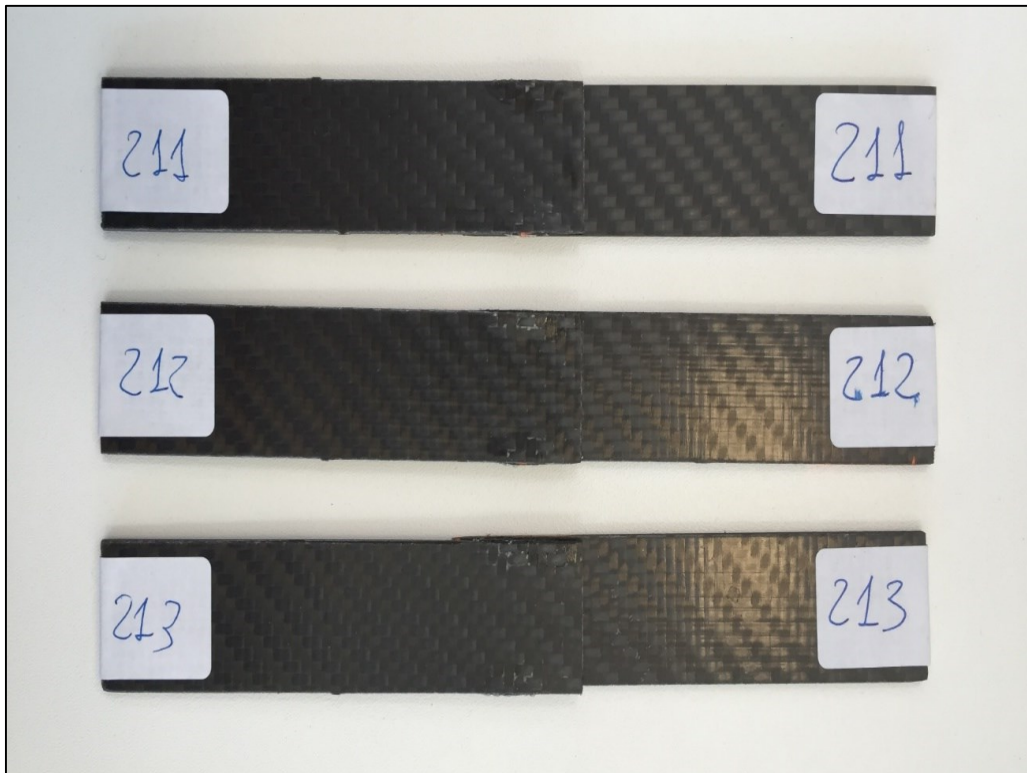


Figura 7.10: Serie 400V - 250°C - 10s - 20s - 30s



Figura 7.11: Serie 400V - 260°C - 10s - 20s - 30s

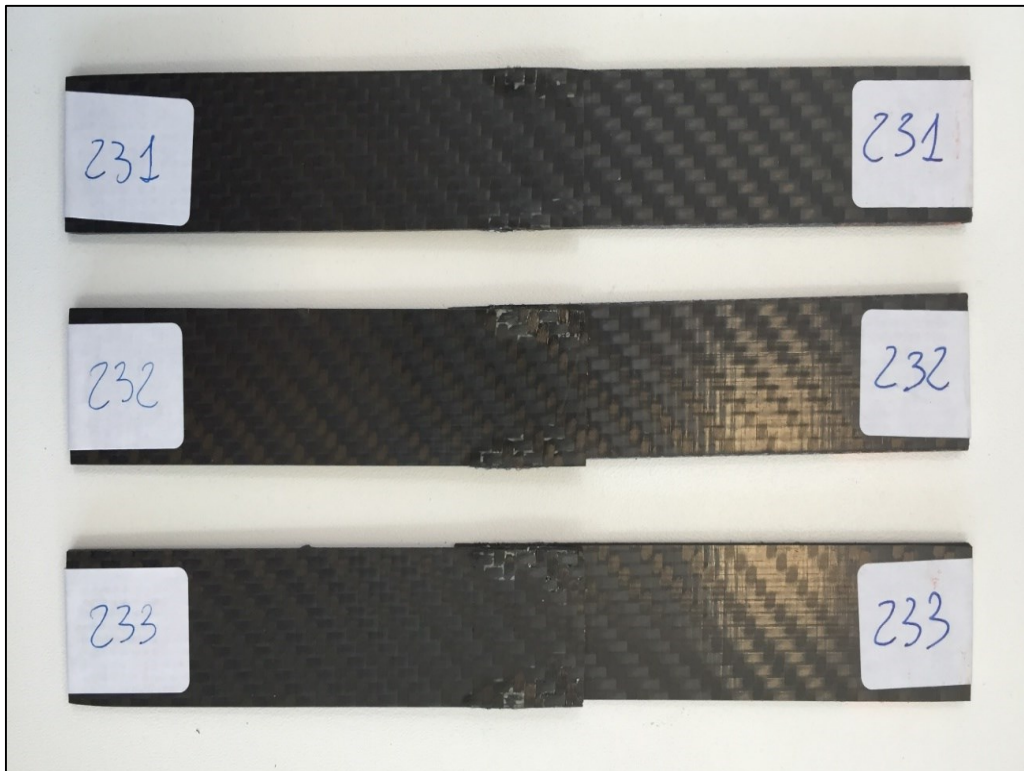


Figura 7.12: Serie 400V - 270°C - 10s - 20s - 30s

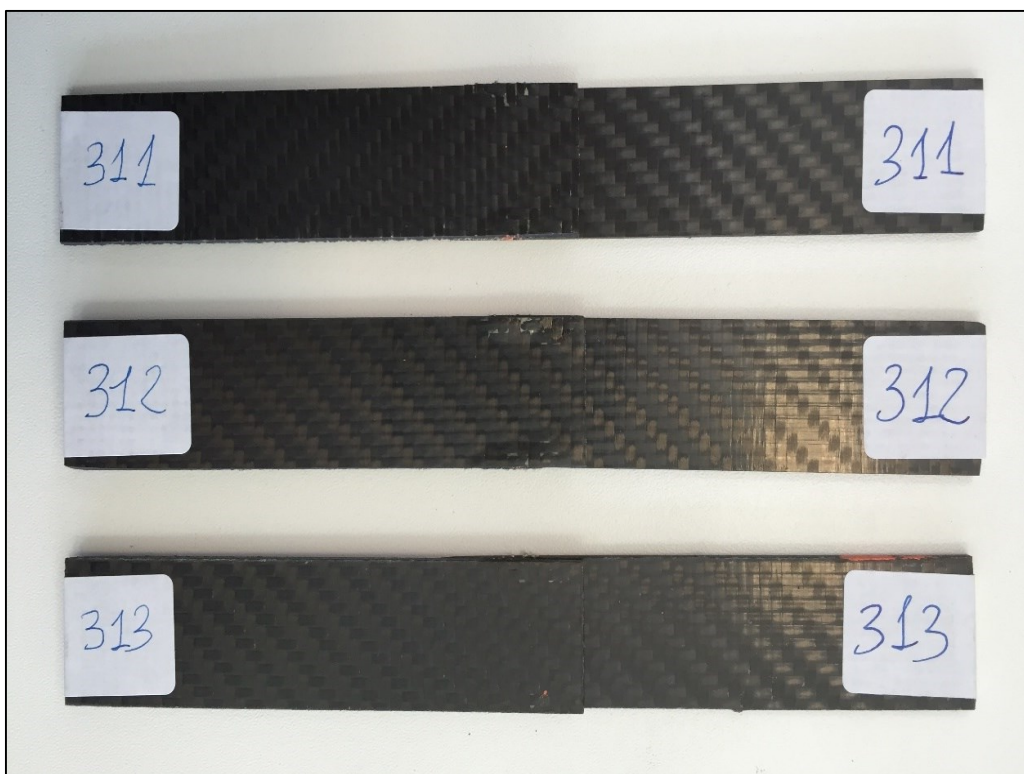


Figura 7.13: Serie 350V - 250°C - 10s - 20s - 30s



Figura 7.14: Serie 350V - 260°C - 10s - 20s - 30s



Figura 7.15: Serie 350V - 270°C - 10s - 20s - 30s

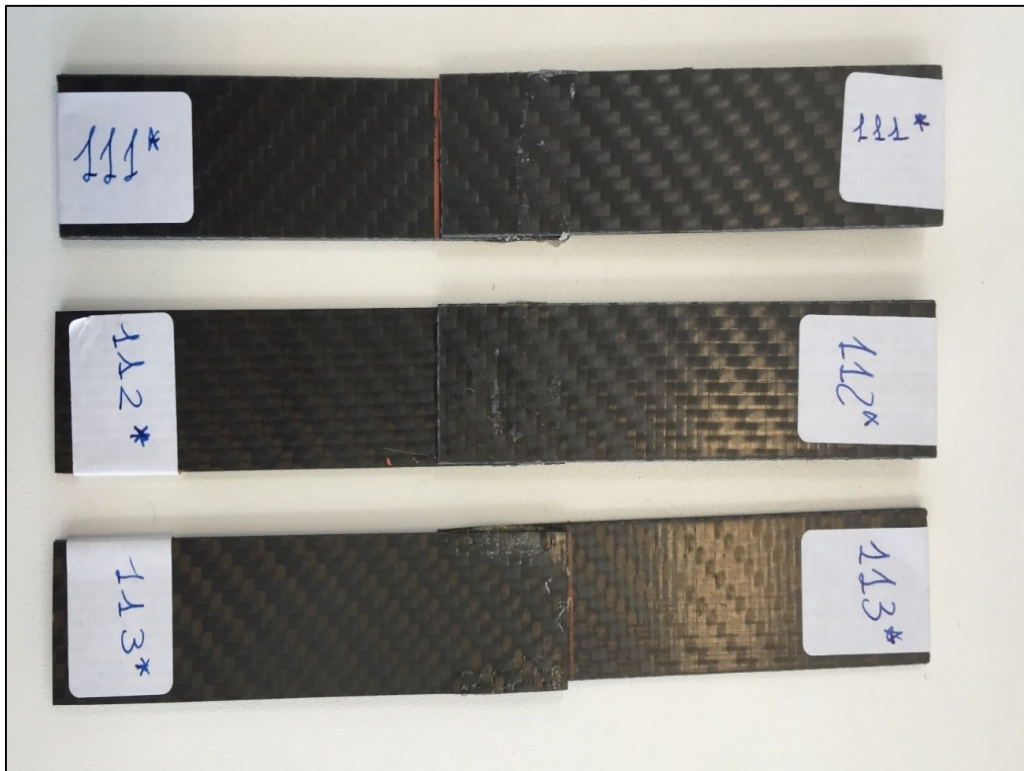


Figura 7.16: Serie con fibra ottica 300V - 250°C - 10s - 20s - 30s



Figura 7.17: Serie con fibra ottica 300V - 260°C - 10s - 20s - 30s

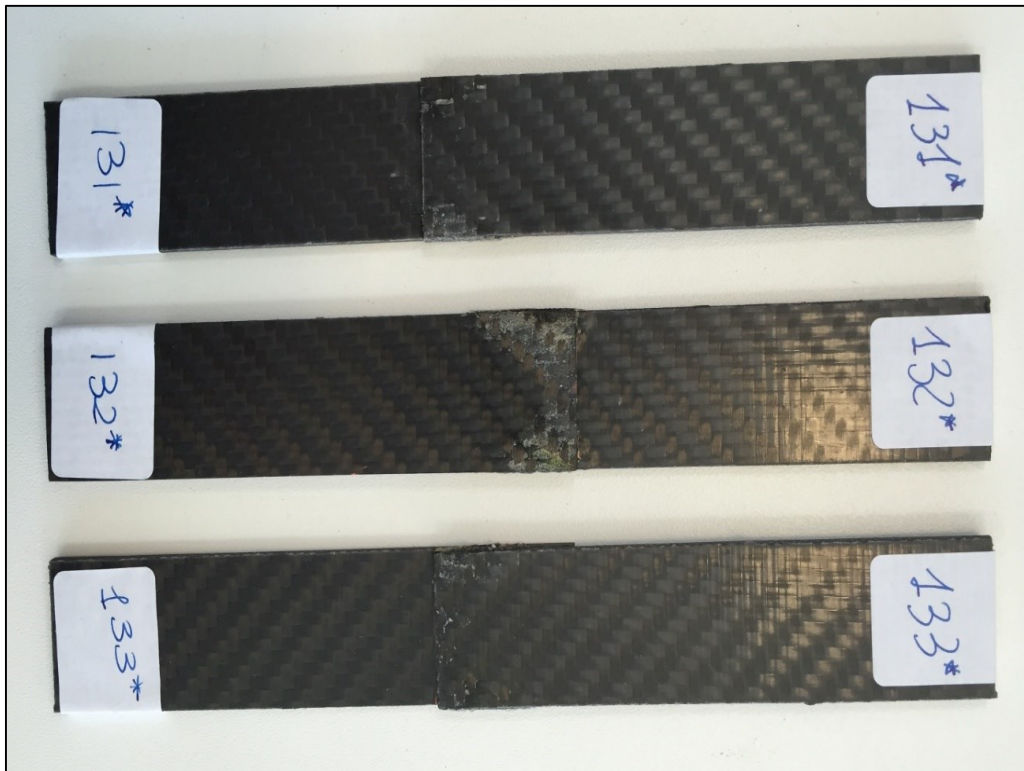


Figura 7.18: Serie con fibra ottica 300V - 270°C - 10s - 20s - 30s

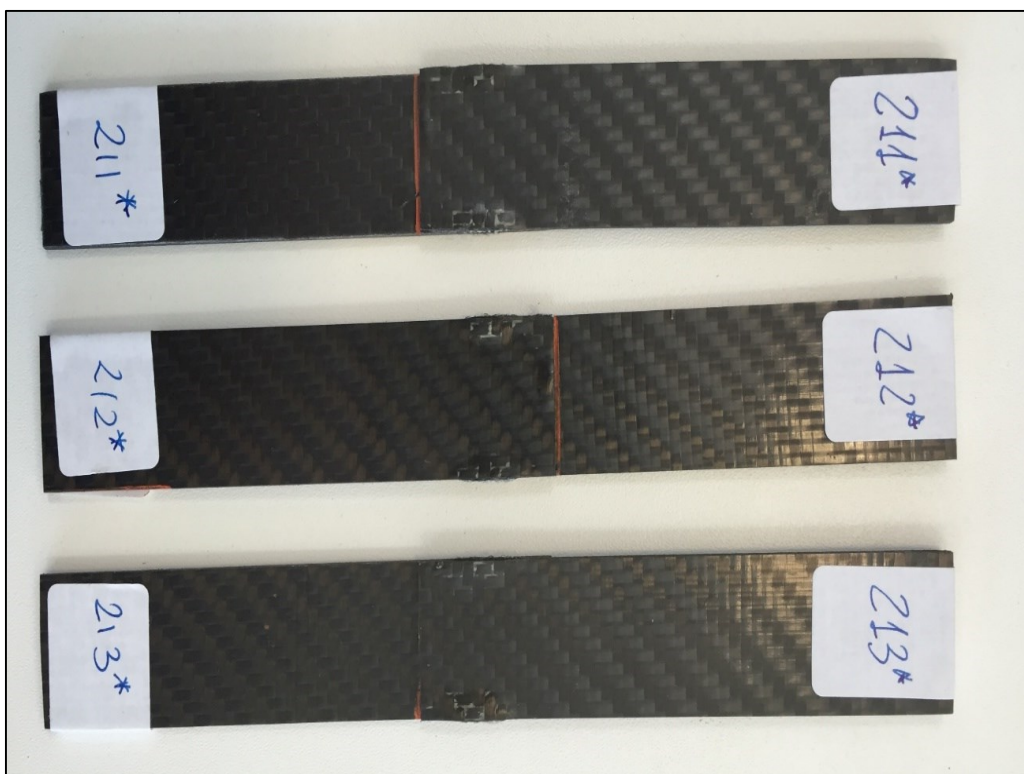


Figura 7.19: Serie con fibra ottica 400V - 250°C - 10s - 20s - 30s

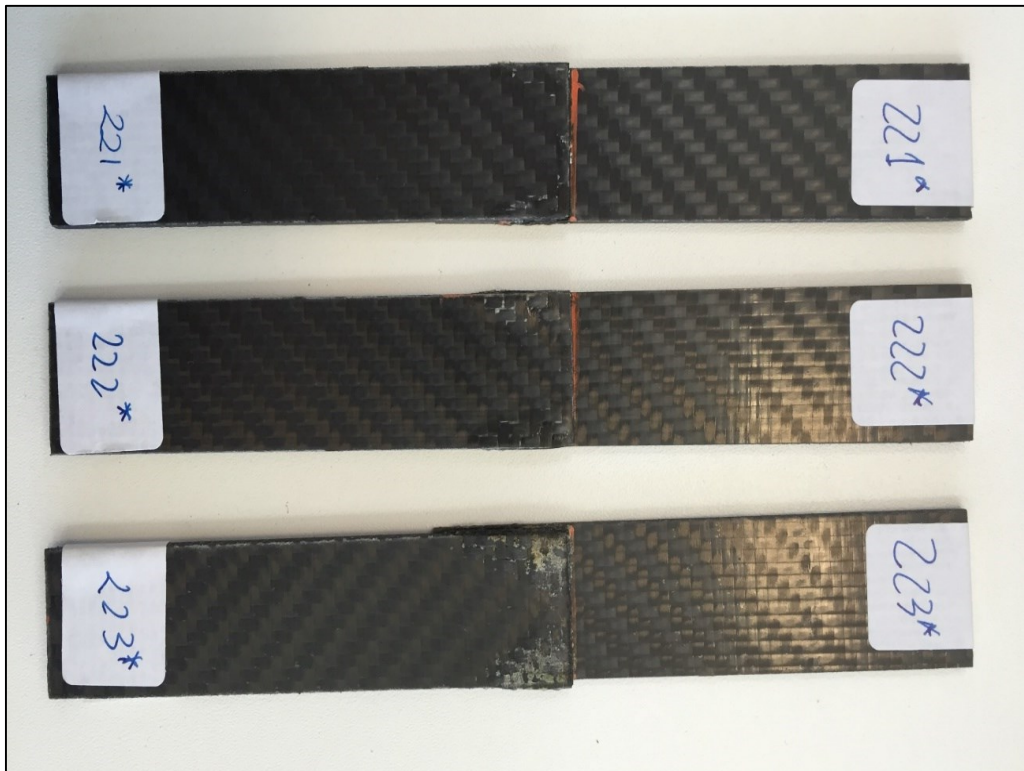


Figura 7.20: Serie con fibra ottica 400V - 260°C - 10s - 20s - 30s



Figura 7.21: Serie con fibra ottica 400V - 270°C - 10s - 20s - 30s

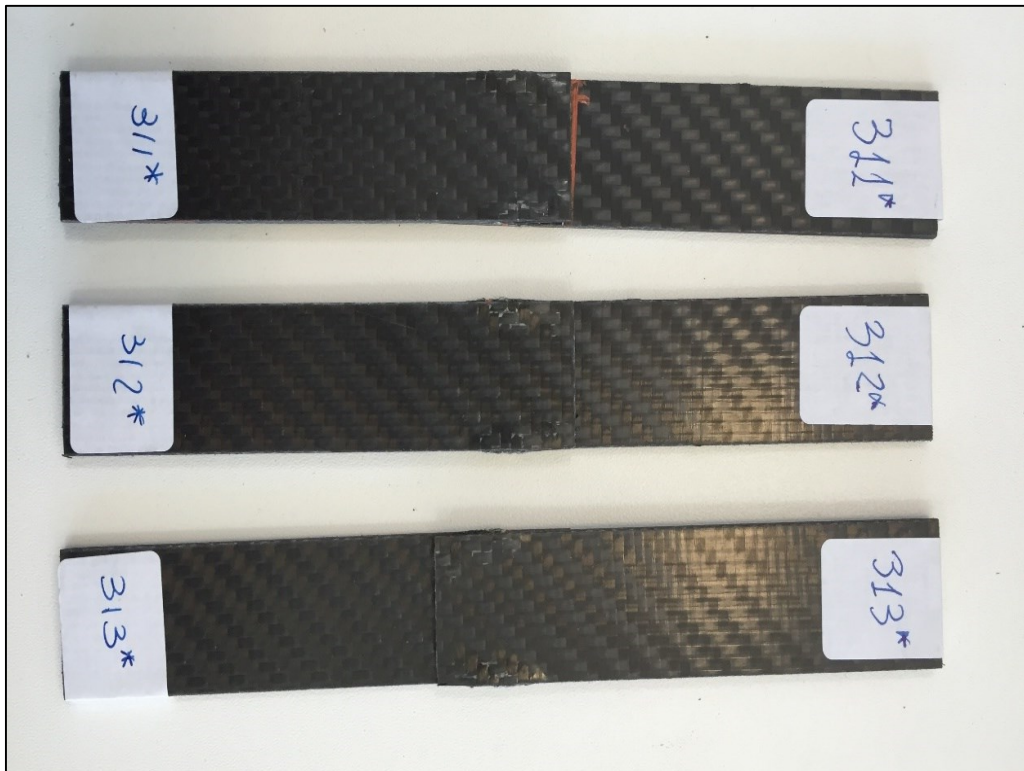


Figura 7.22: Serie con fibra ottica 350V - 250°C - 10s - 20s - 30s

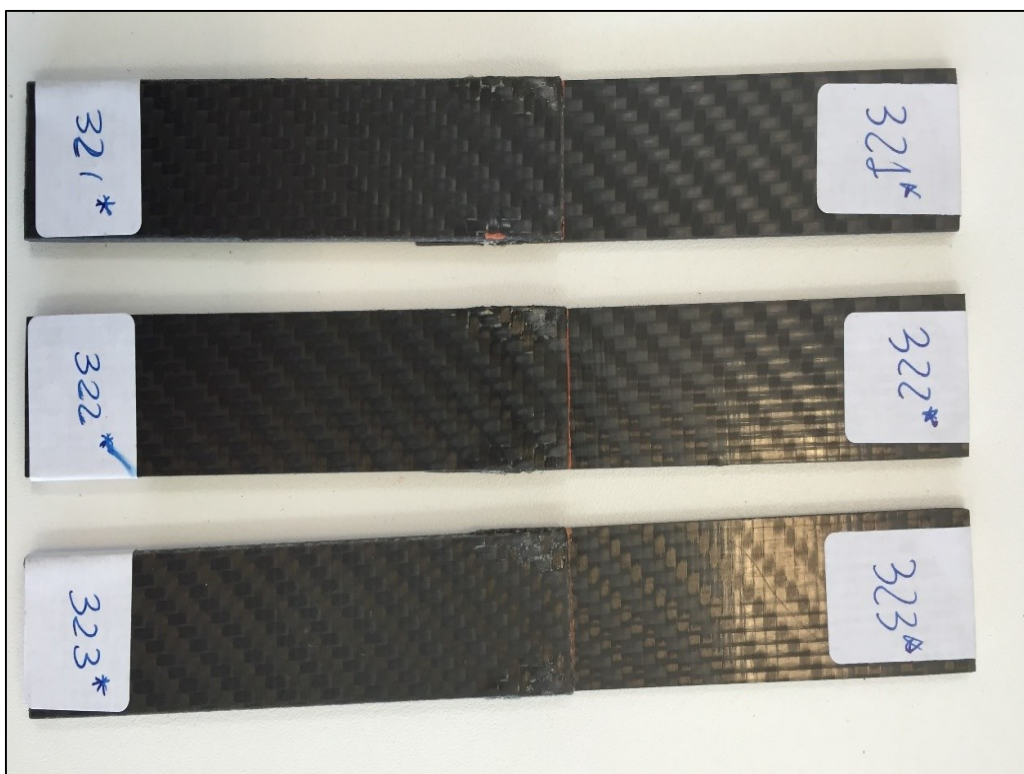


Figura 7.23: Serie con fibra ottica 350V - 260°C - 10s - 20s - 30s



Figura 7.24: Serie con fibra ottica 350V - 270°C - 10s - 20s - 30s

7.4 Prove di caratterizzazione meccanica

Dopo la realizzazione di due serie da 27 giunti ognuna, con e senza fibre ottiche, per un totale di 54 giunti, si è provveduto alla caratterizzazione meccanica grazie all'utilizzo di dinamometro MTS con ganasce manuali e cella di carico da 100 kN.

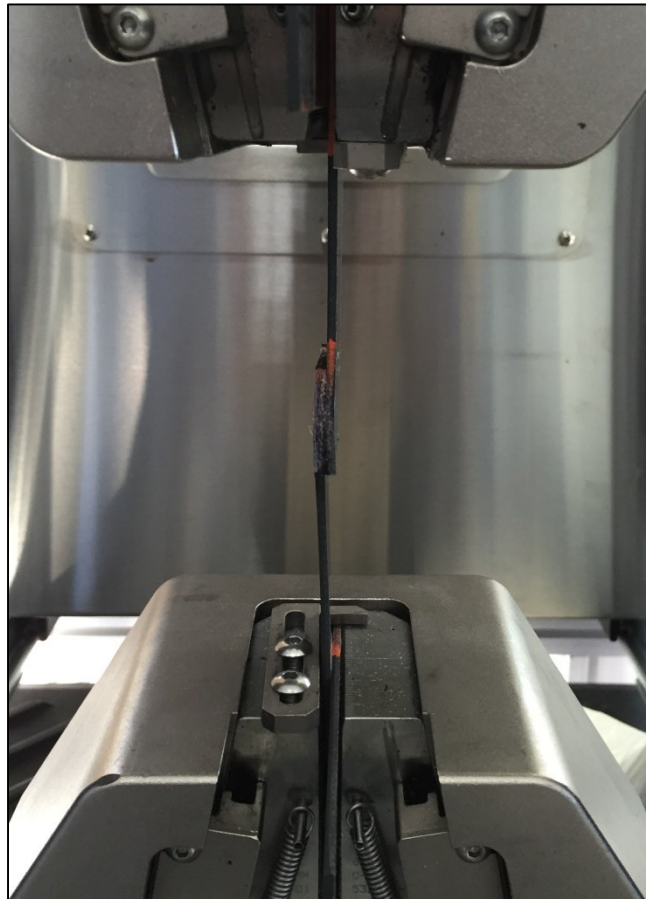


Figura 7.25: Provino durante la prova di trazione

Nel seguito ci sono le serie di giunti testati raggruppati secondo le medesime rappresentazioni dei giunti saldati, sia per quelli con fibra che per quelli senza. I carichi di rottura sono riassunti nella seguente tabella:

Tipologia	Carico serie 1 (kN)	Carico serie 2 con fibra ottica (kN)
1.1.1	0.45	0.50
1.1.2	0.56	0.80
1.1.3	0.92	2.96
1.2.1	0.40	6.02
1.2.2	0.42	3.08
1.2.3	1.61	5.00
1.3.1	3.51	3.79
1.3.2	2.52	8.54
1.3.3	1.82	4.16
2.1.1	0.69	0.72
2.1.2	1.31	0.40
2.1.3	1.77	0.50
2.2.1	1.11	2.10
2.2.2	0.47	2.80
2.2.3	0.94	9.11
2.3.1	1.68	1.89
2.3.2	1.72	2.75
2.3.3	1.82	2.66
3.1.1	0.55	0.53
3.1.2	0.40	0.40
3.1.3	1.37	1.70
3.2.1	1.47	2.39
3.2.2	3.34	2.61
3.2.3	0.99	3.91
3.3.1	3.76	7.66
3.3.2	5.06	6.85
3.3.3	6.33	8.72

Tabella 7.1: Resistenza a taglio dei giunti realizzati

Una volta testati i giunti è possibile verificare la reale zona saldata, analizzando e confrontando il comportamento dei parametri individuati nelle configurazioni scelte, infatti è possibile analizzare la vera zona di saldatura realizzata dal momento che le facce a contatto sono state poste entrambe verso l'alto e vicine l'una all'altra.

In fase di progettazione delle prove sperimentali il focus è stato individuare i parametri più importanti della saldatura e la relazione tra questi; per cui, nella scelta delle tipologie di giunti da realizzare, è stata data preferenza alla realizzazione di più combinazioni possibili piuttosto che alla precisione dei risultati saldando più giunti con meno alternative. Generalmente le norme internazionali quali le ASTM stabiliscono un numero di provini da testare per ogni lotto di produzione in numero almeno di 5 in modo tale da osservare in modo continuativo il

fenomeno e mediare in maniera certa i risultati ottenuti. In questo caso, costituendo giunti ottenuti da substrati sagomati da un materiale proveniente da lotto unico, si è scelto di realizzare 2 giunti fisici per configurazione di parametri da confrontare col risultato virtuale e ricorre a successivi strumenti per l'omogeneizzazione dei risultati ottenuti.

Di seguito sono rappresentate tutte le serie di giunti testati, raggruppati in numero di 3 come in precedenza.

Le fotografie sono state schiarite per rendere più visibile la parte centrale saldata. Si nota che in alcuni casi la zona saldata ha un andamento irregolare rispetto a quello che ci si aspetta, in altri, la zona giuntata ha un'estensione maggiore rispetto alle forme normalmente ottenute o perché il giunto è stato inizialmente mal posizionato rispetto all'induttore sottostante o perché si è spostato successivamente durante la fase di riscaldamento.

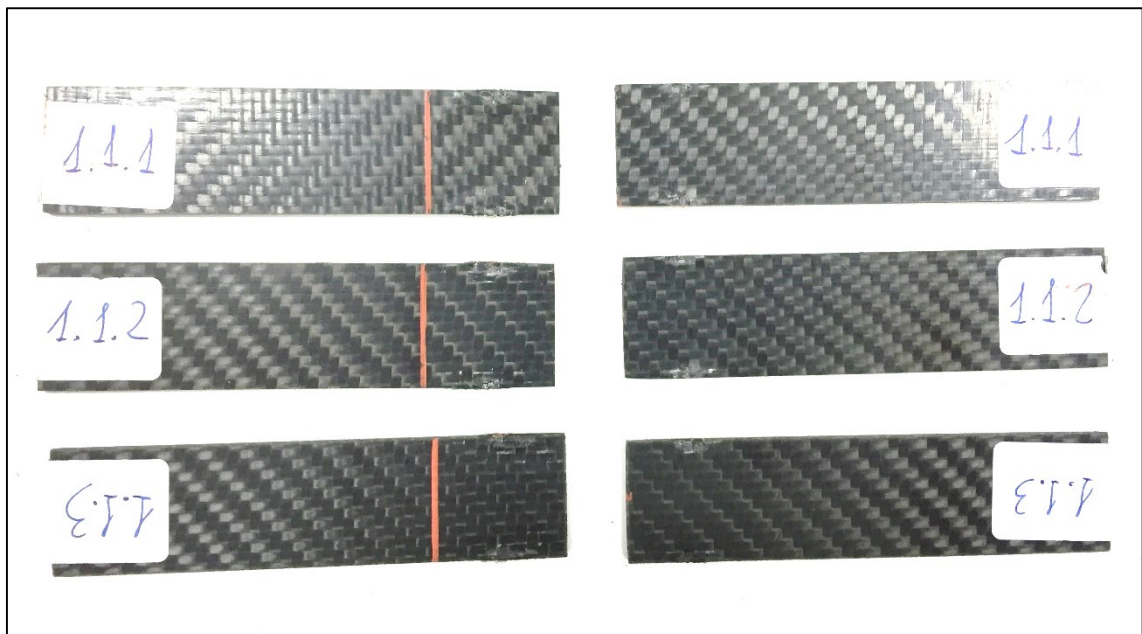


Figura 7.26: Serie 300V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati

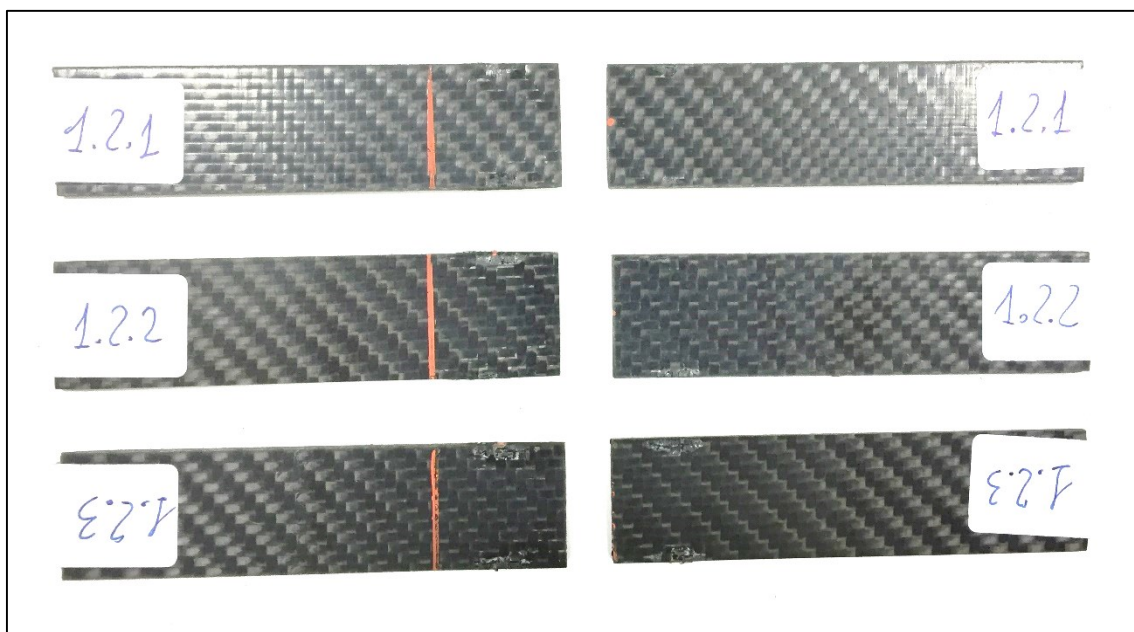


Figura 7.27: Serie 300V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati

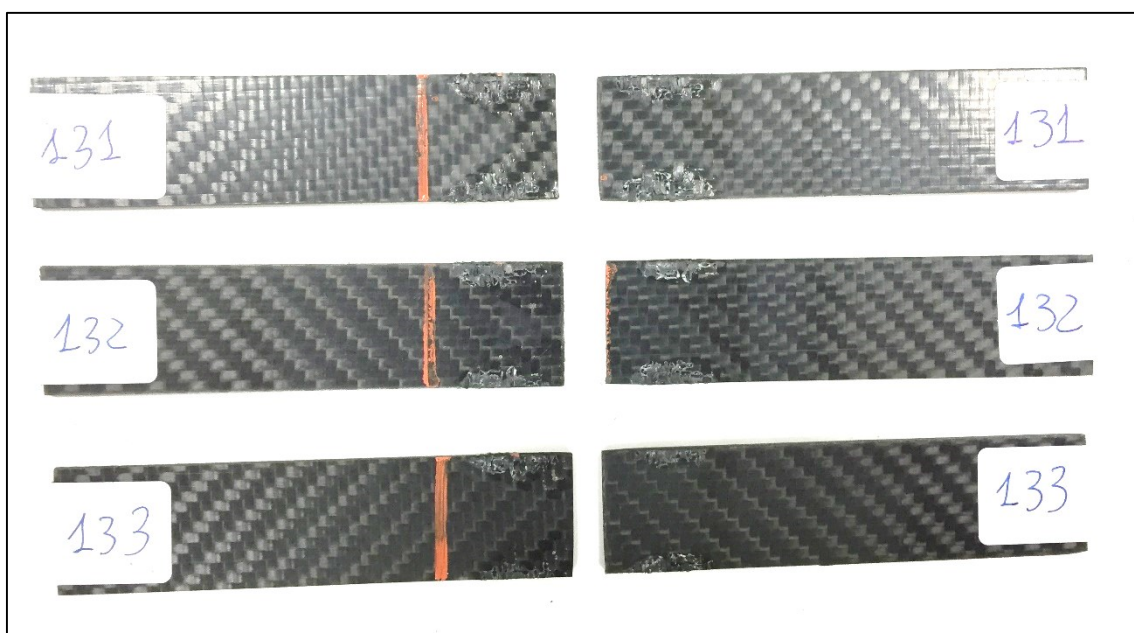


Figura 7.28: Serie 300V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati

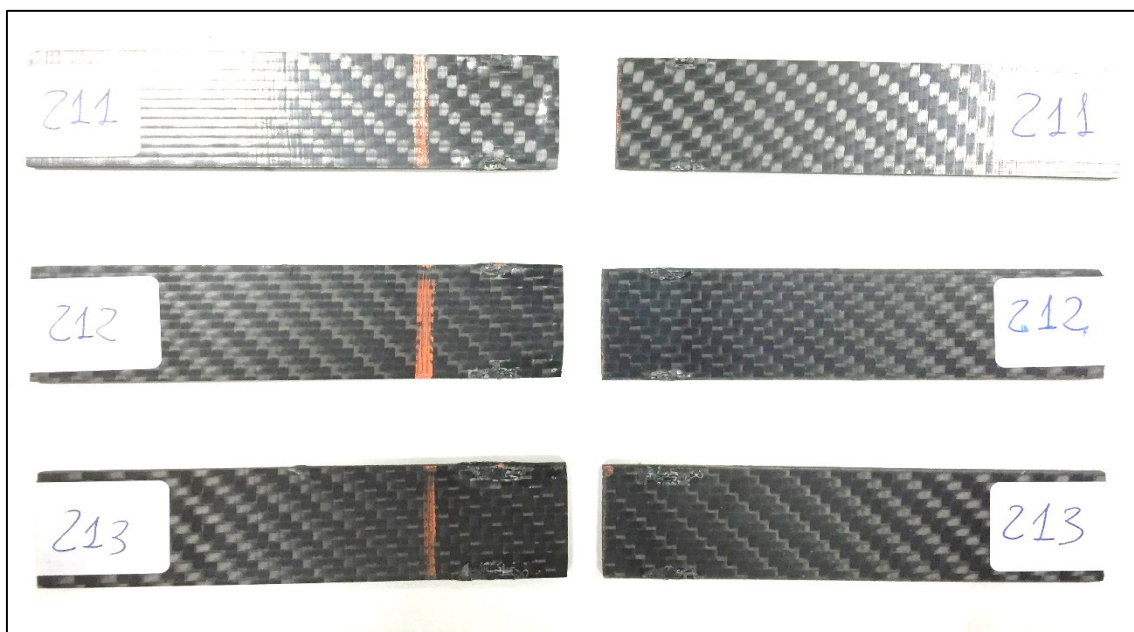


Figura 7.29: Serie 400V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati

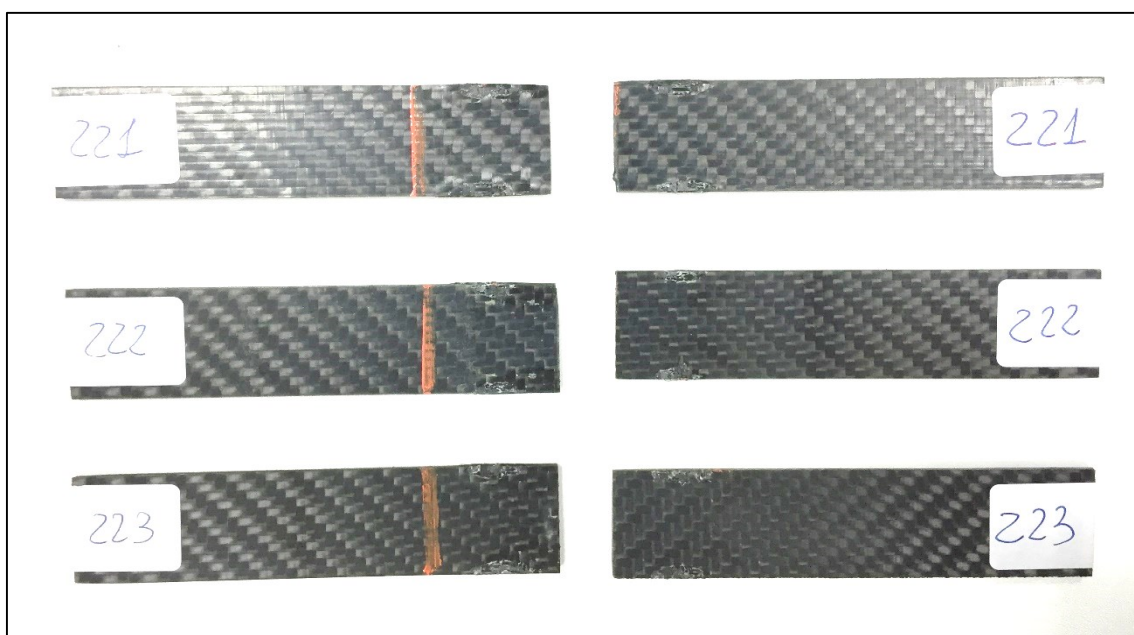


Figura 7.30: Serie 400V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati

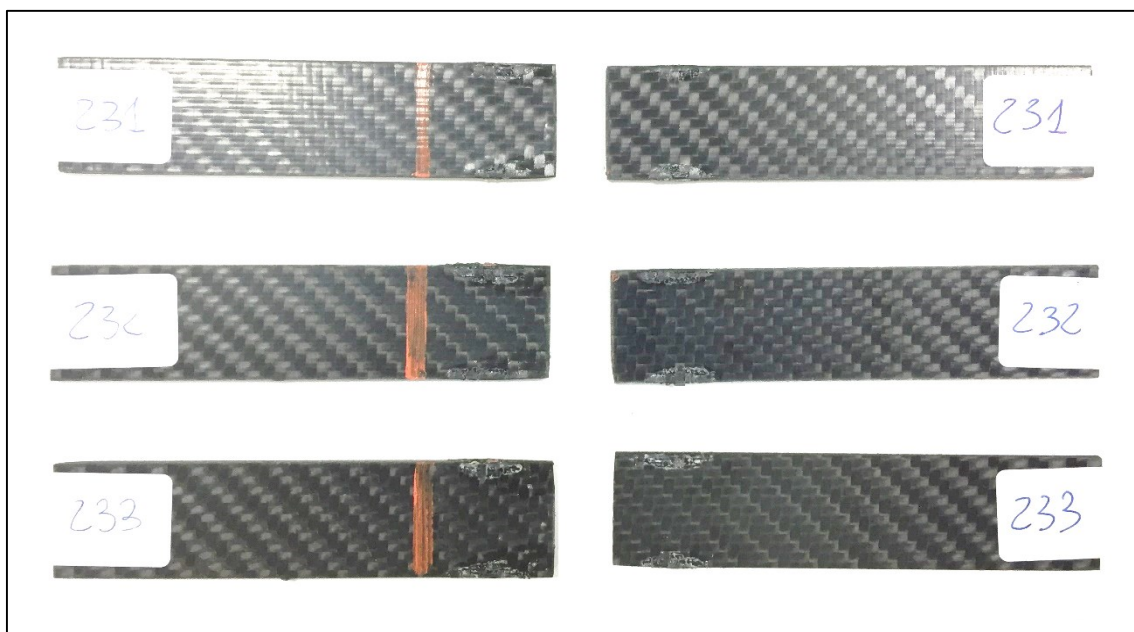


Figura 7.31: Serie 400V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati

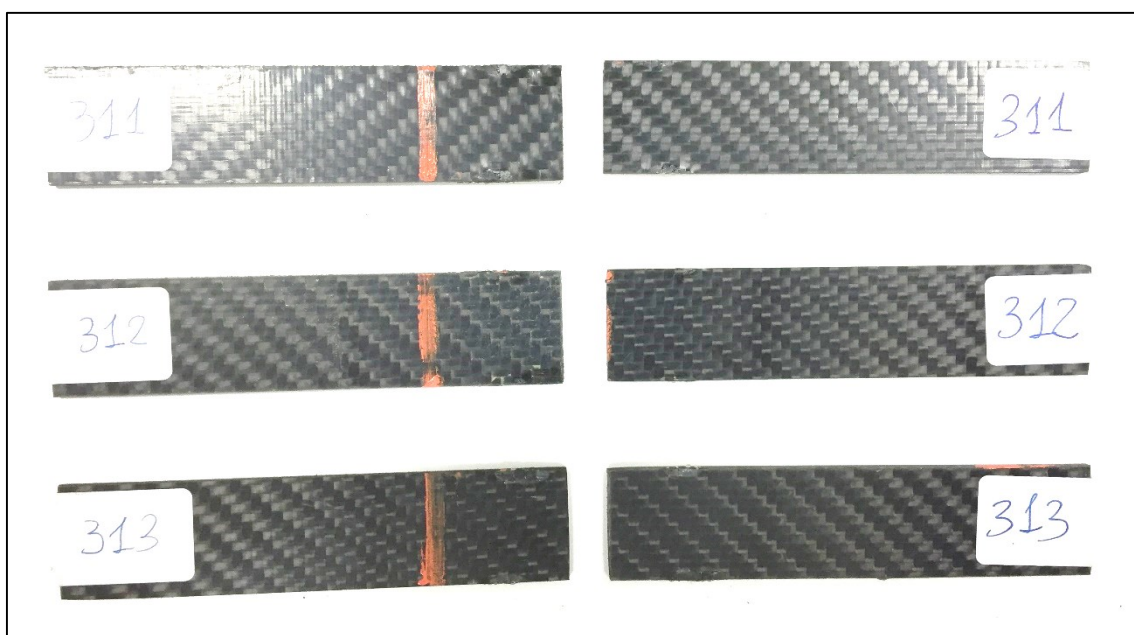


Figura 7.32: Serie 350V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati

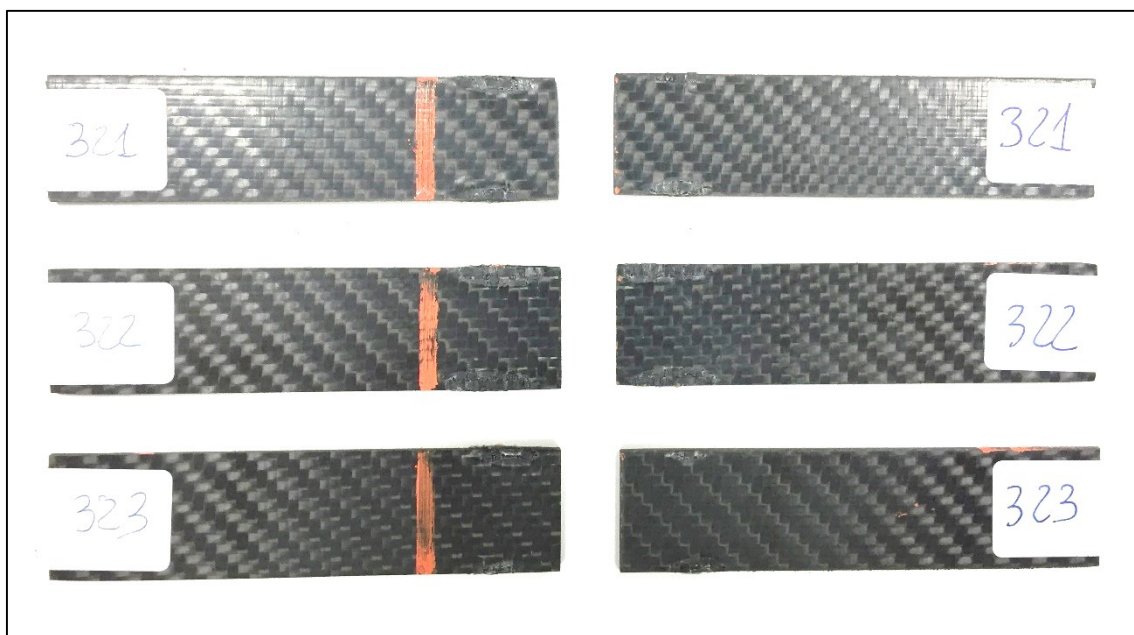


Figura 7.33: Serie 350V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati

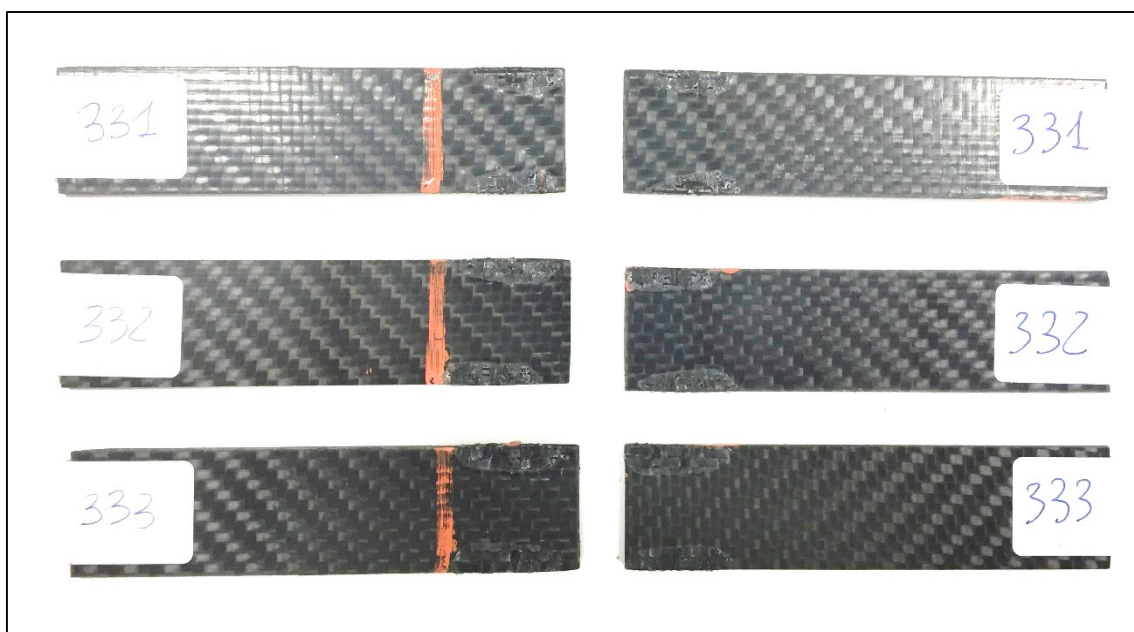


Figura 7.34: Serie 350V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati

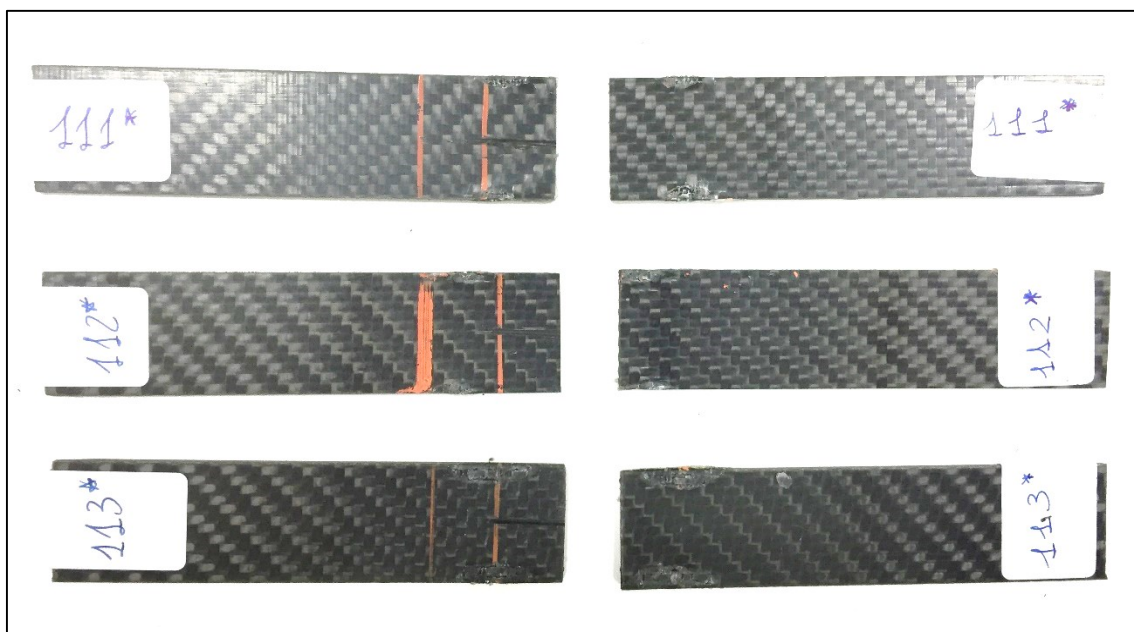


Figura 7.35: Serie con fibra ottica 300V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati

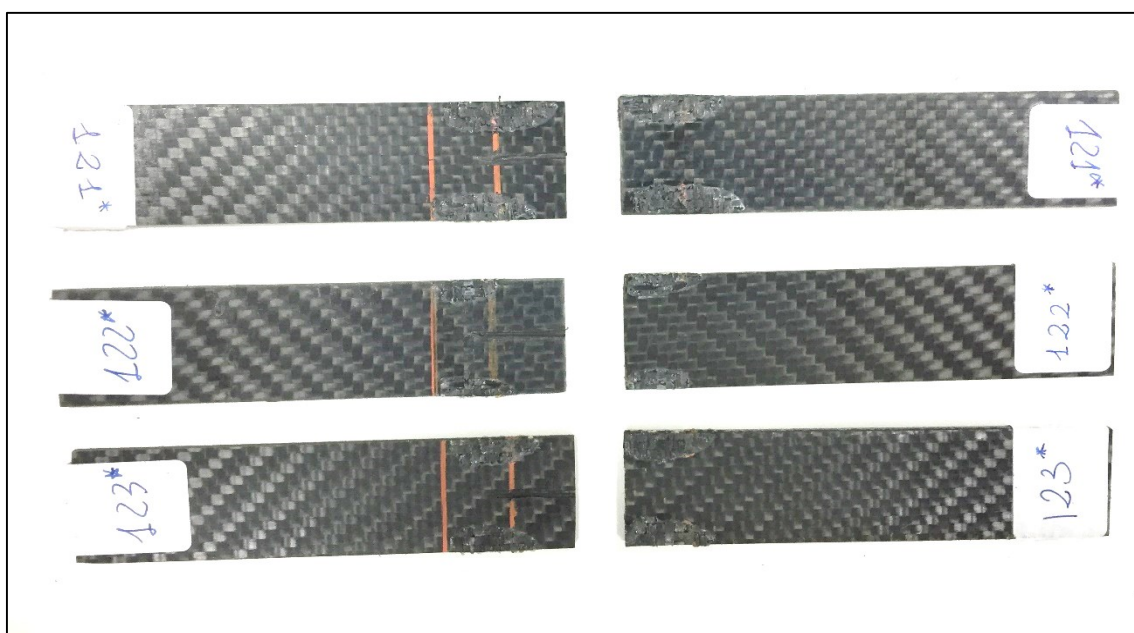


Figura 7.36: Serie con fibra ottica 300V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati

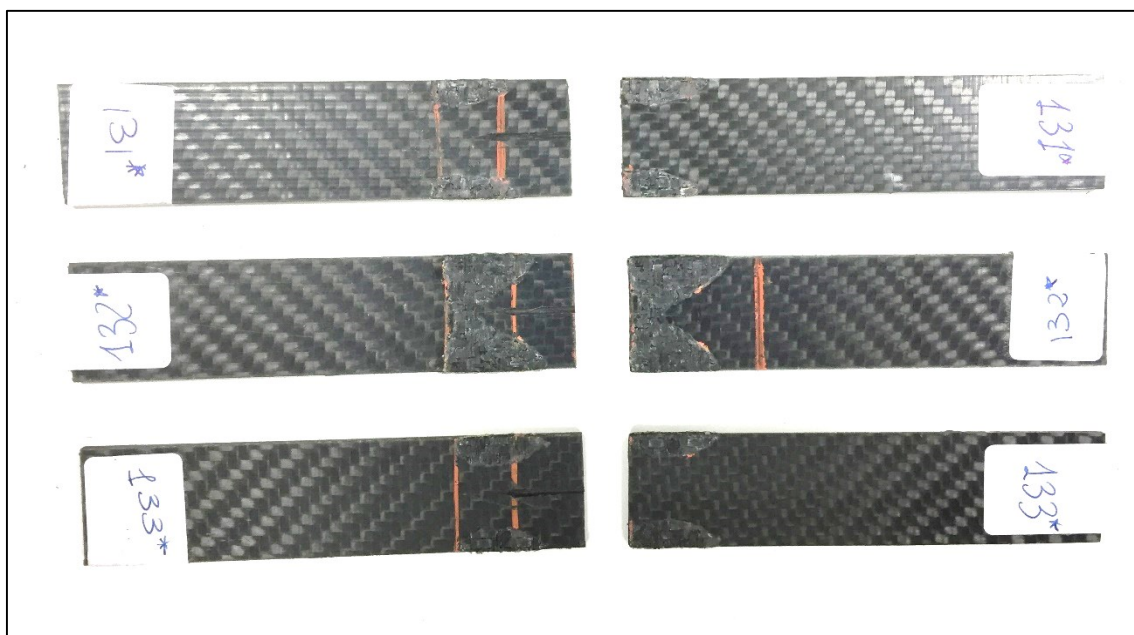


Figura 7.37: Serie con fibra ottica 300V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati

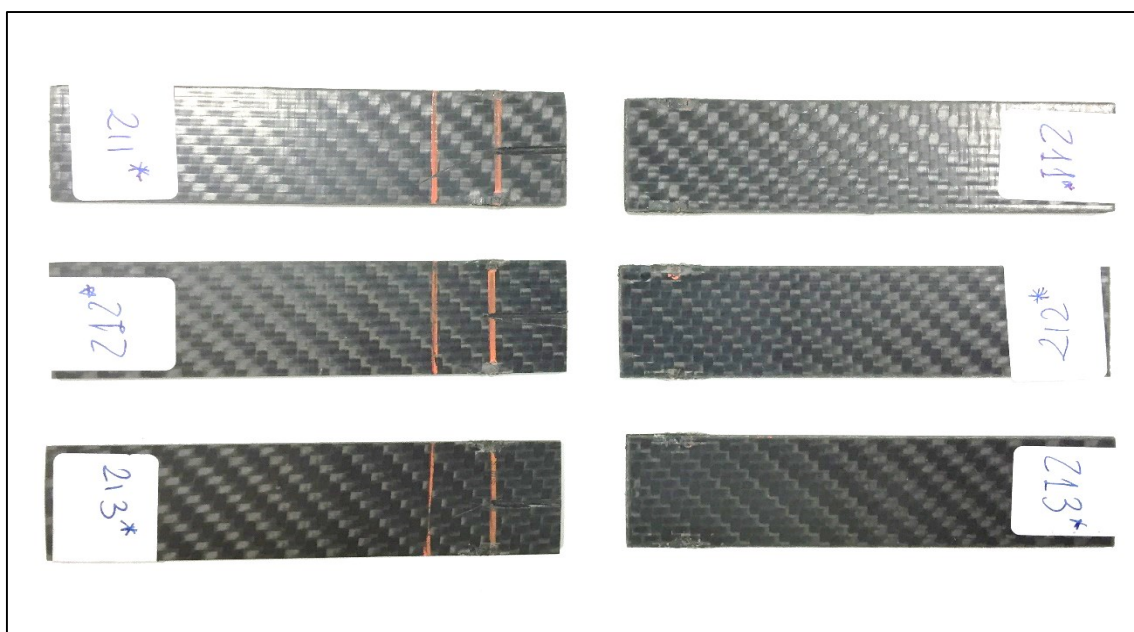


Figura 7.38: Serie con fibra ottica 400V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati

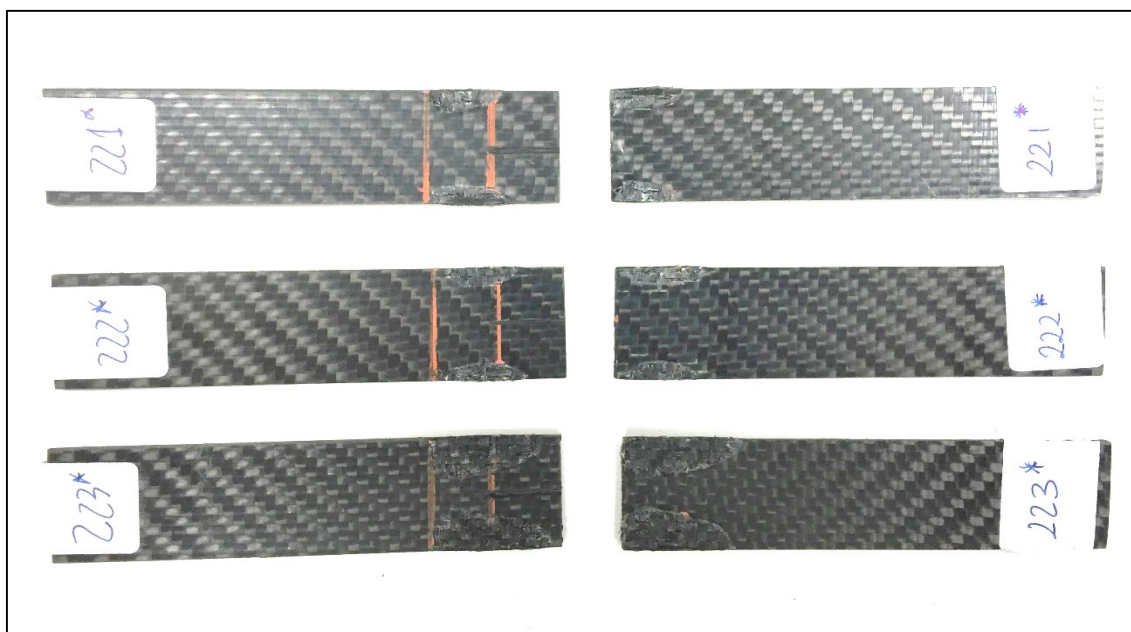


Figura 7.39: Serie con fibra ottica 400V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati

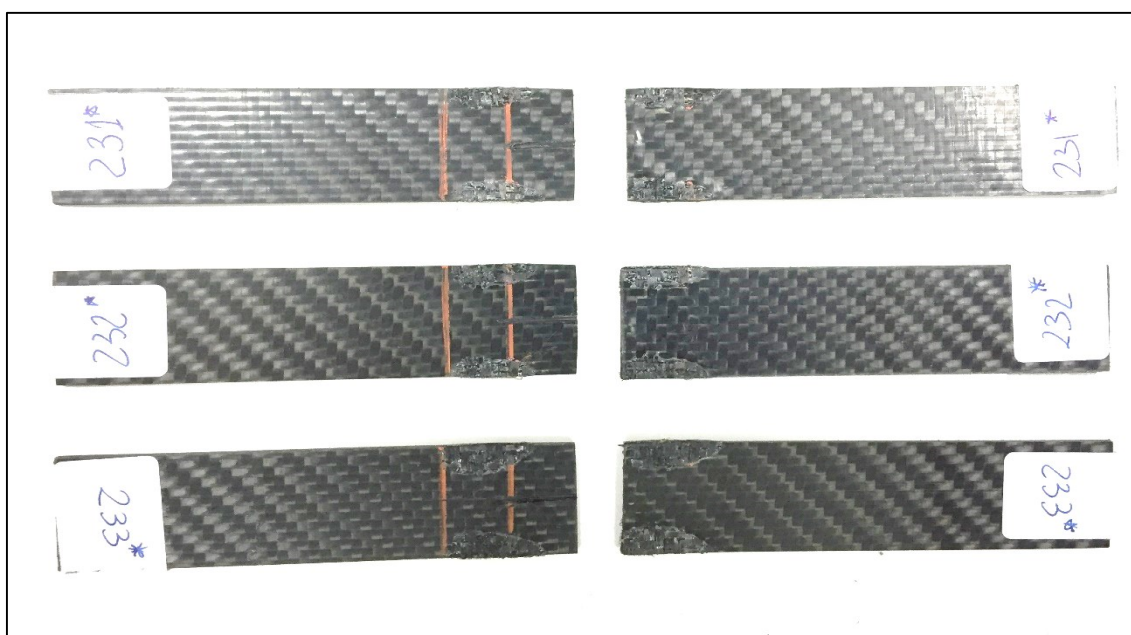


Figura 7.40: Serie con fibra ottica 400V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati

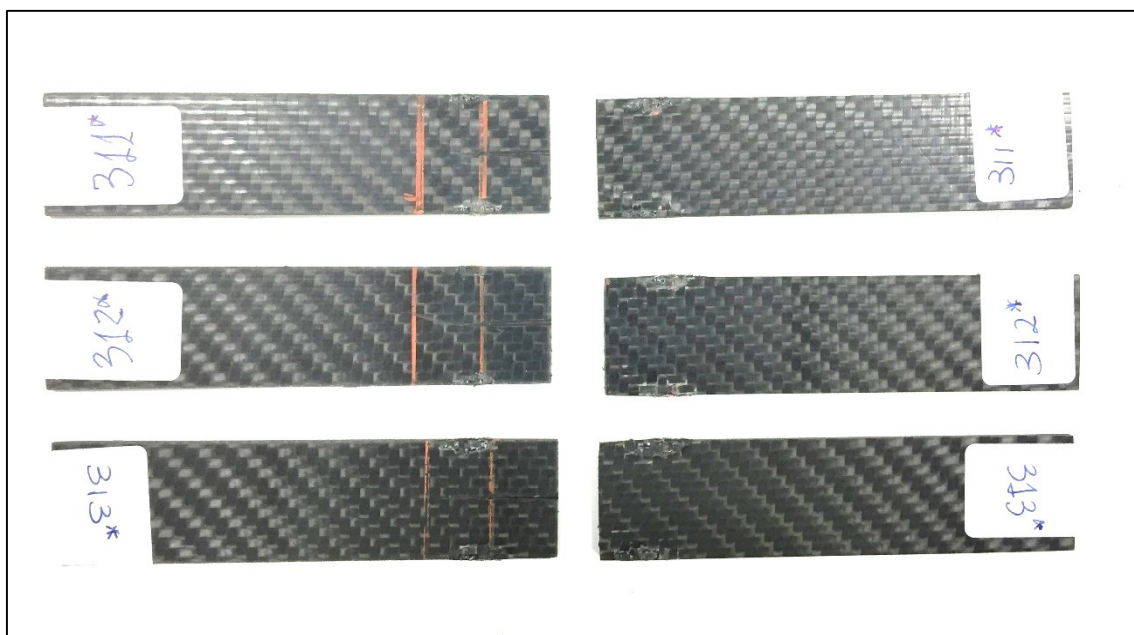


Figura 7.41: Serie con fibra ottica 350V - 250°C - 10s - 20s - 30s testati

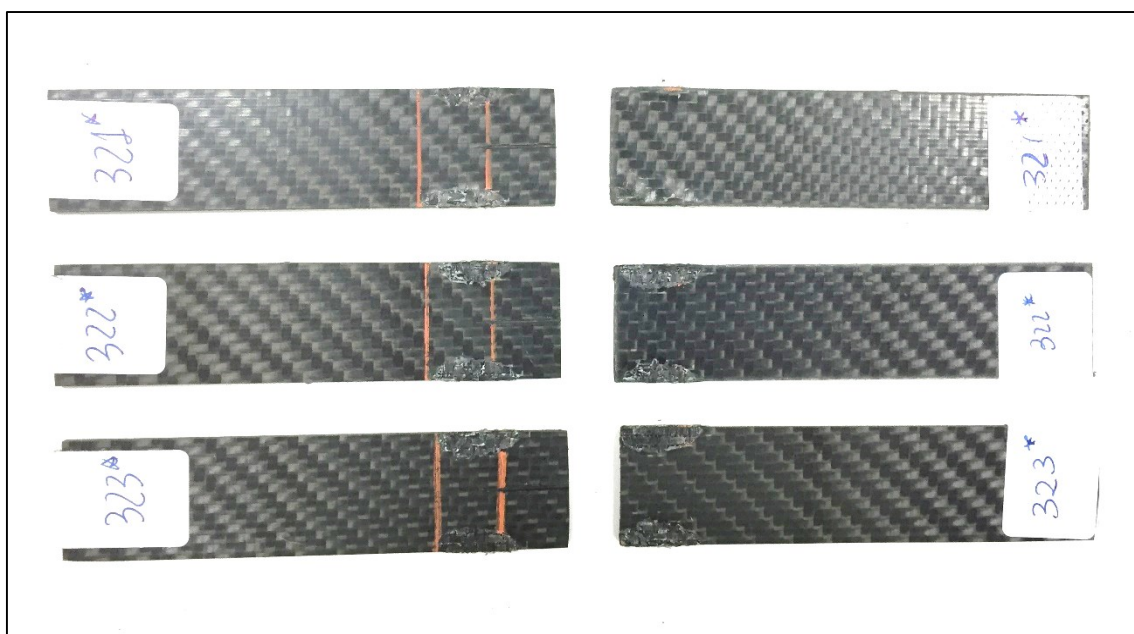


Figura 7.42: Serie con fibra ottica 350V - 260°C - 10s - 20s - 30s testati

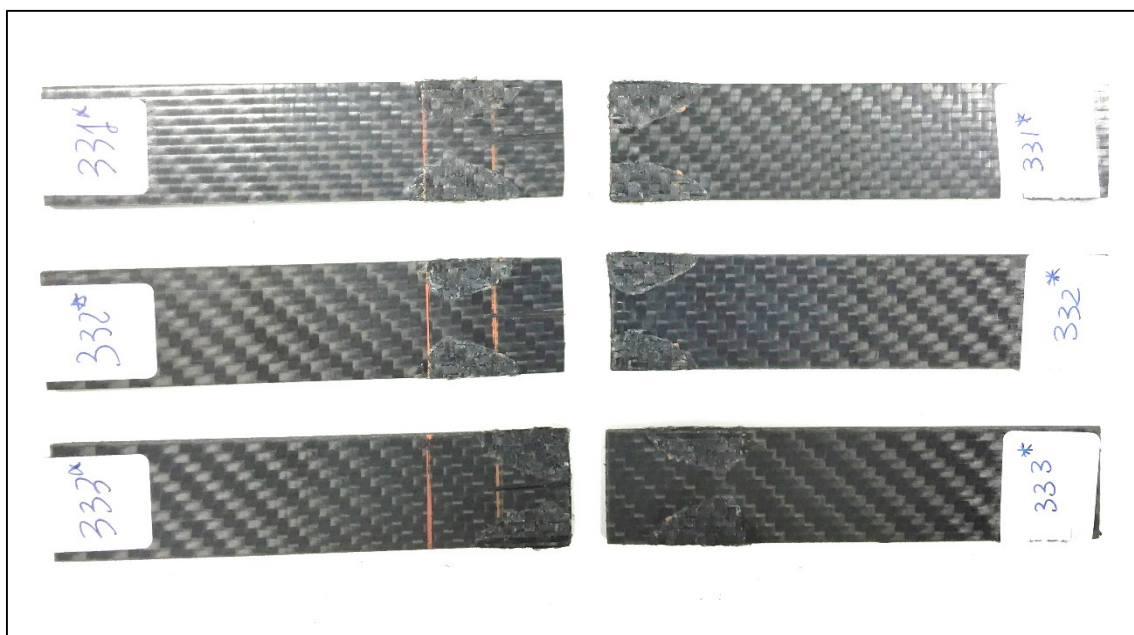


Figura 7.43: Serie con fibra ottica 350V - 270°C - 10s - 20s - 30s testati

Capitolo VIII

8. Correlazione numerico sperimentale

8.1 Introduzione

Di seguito sono messi a confronto i giunti testati, sia quelli senza fibra che con fibra, e il risultato del calcolo, sempre a parità di configurazione. Si può notare come anche il nuovo induttore che era stato pensato per ridurre l'effetto di bordo e favorire un riscaldamento più omogeneo non ha sortito gli effetti sperati per cui l'effetto si è ridotto ma è sempre predominante. Si conferma, tuttavia, una buona correlazione tra risultato sperimentale e numerico per le aree interessate dal riscaldamento in quanto il software e i parametri immessi garantiscono una chiara simulazione del fenomeno.

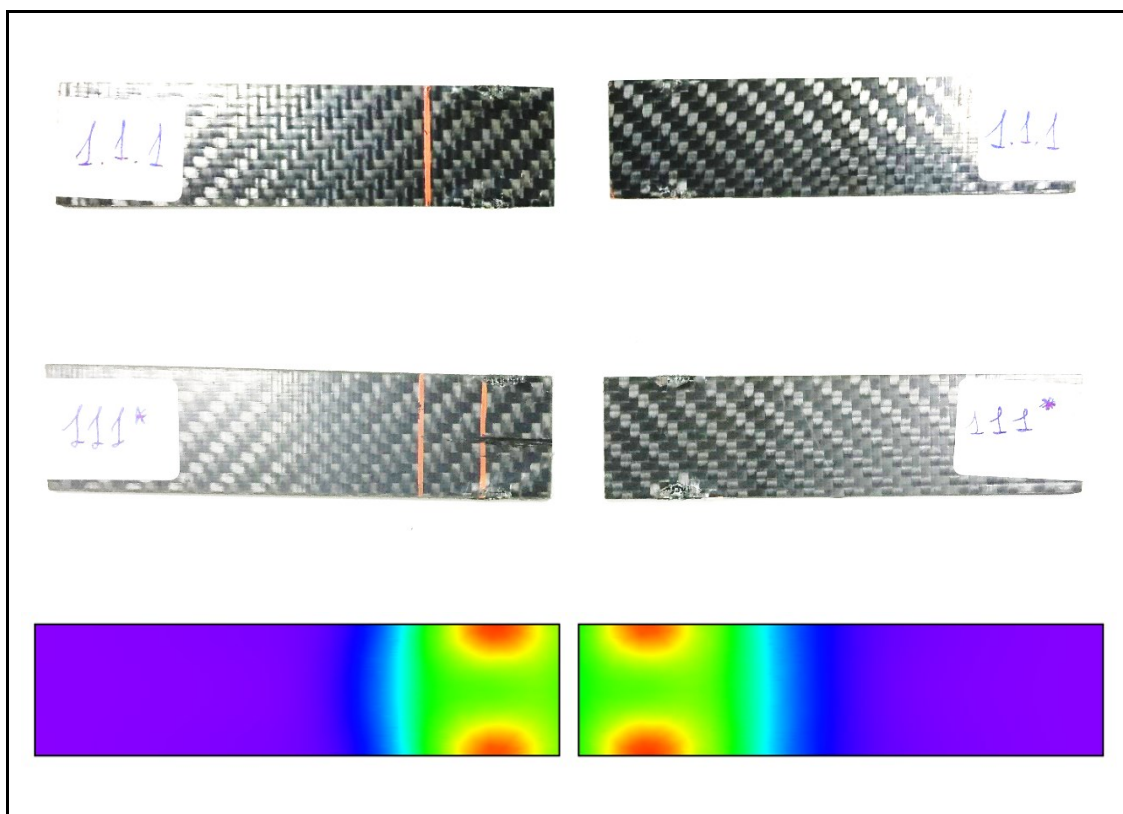


Figura 8.1: Confronto Giunto 300V - 250°C - 10s

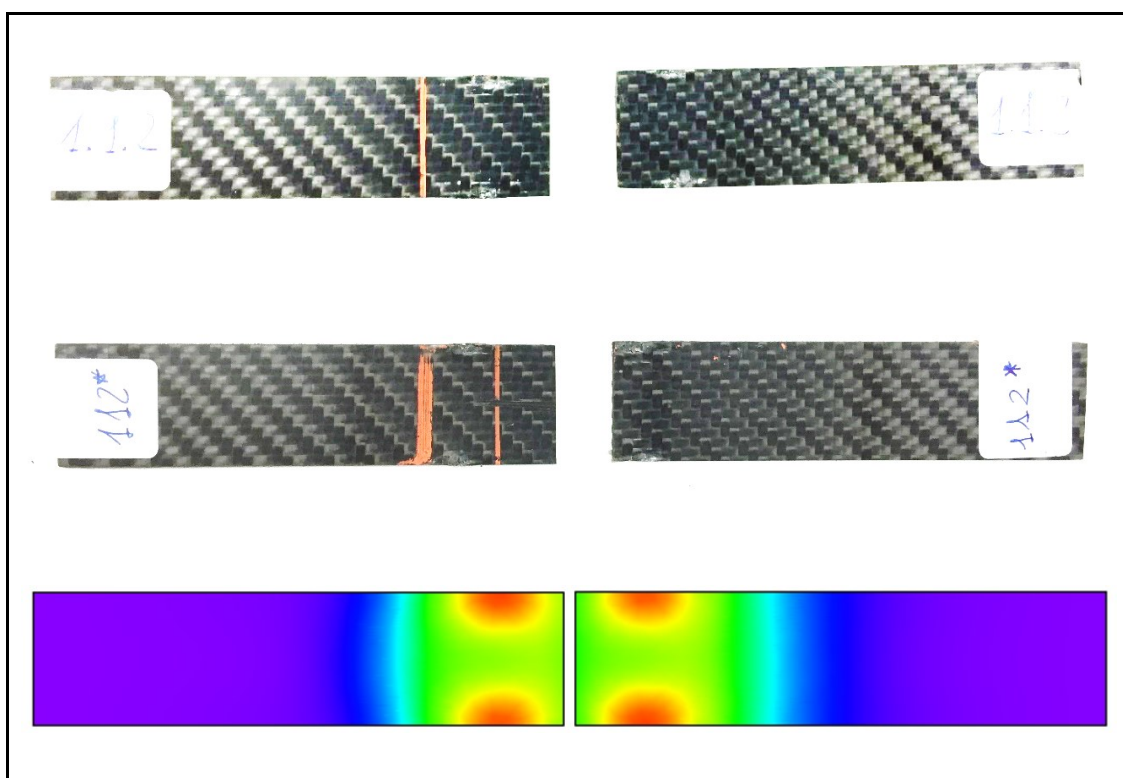


Figura 8.2: Confronto Giunto 300V - 250°C - 20s

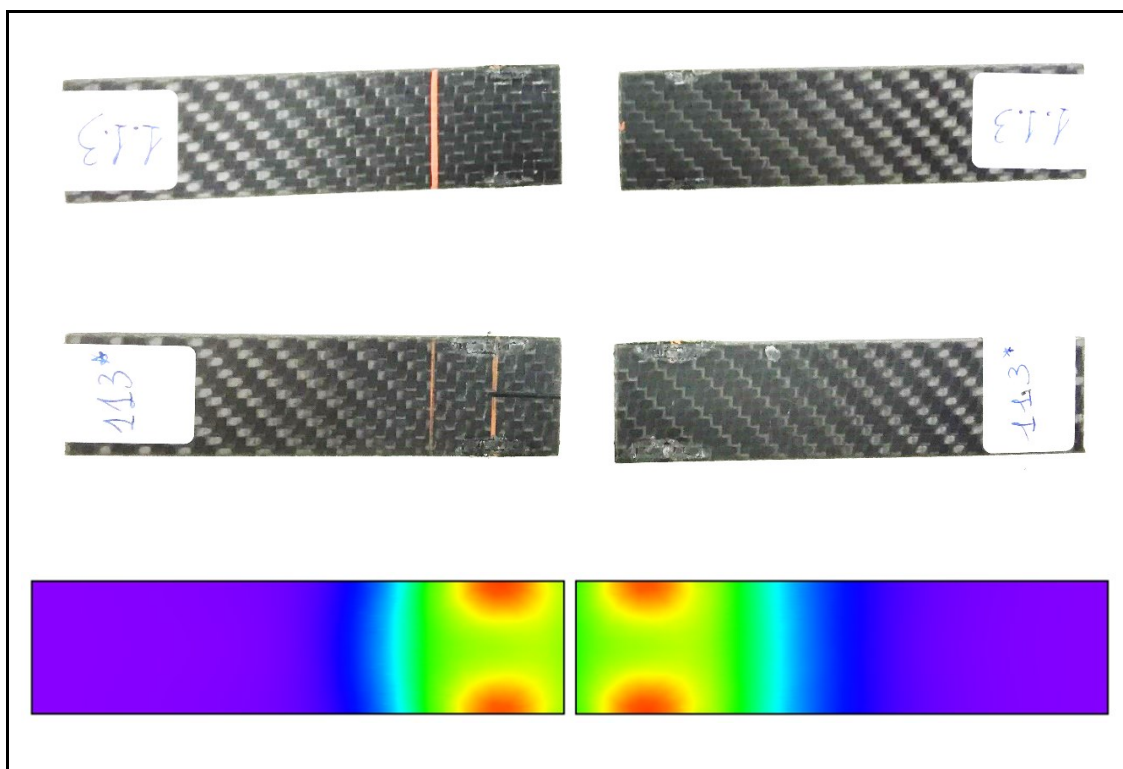


Figura 8.3: Confronto Giunto 300V - 250°C - 30s

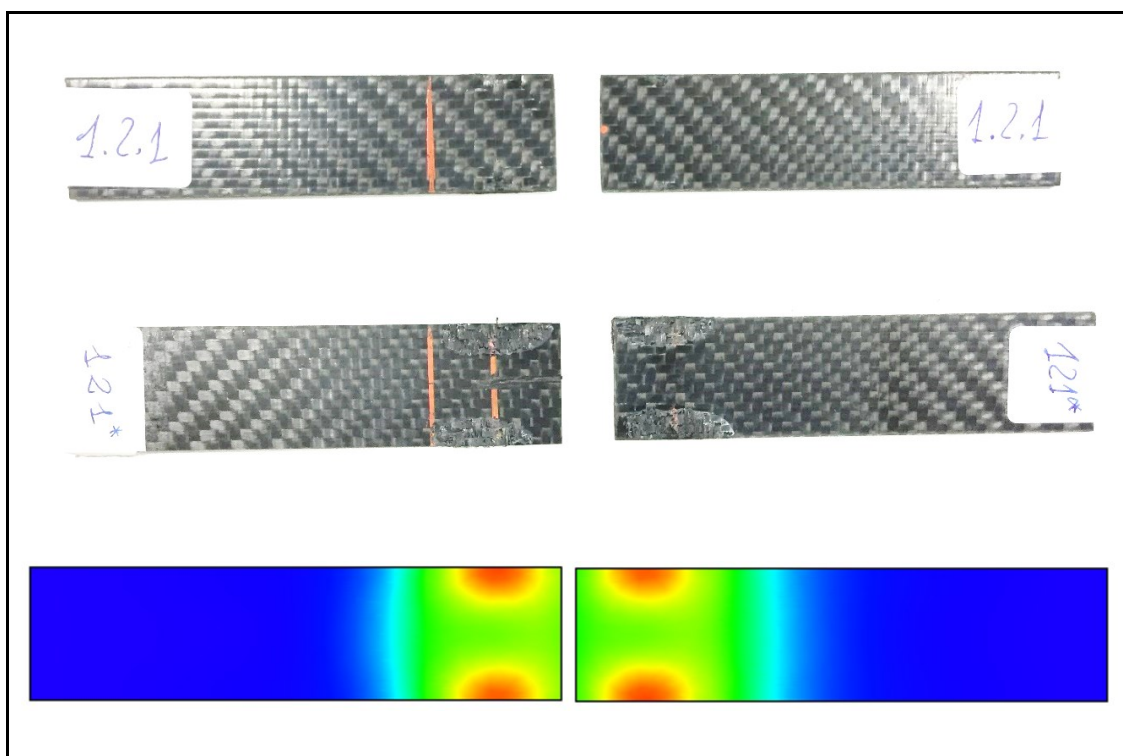


Figura 8.4: Confronto Giunto 300V - 260°C - 10s

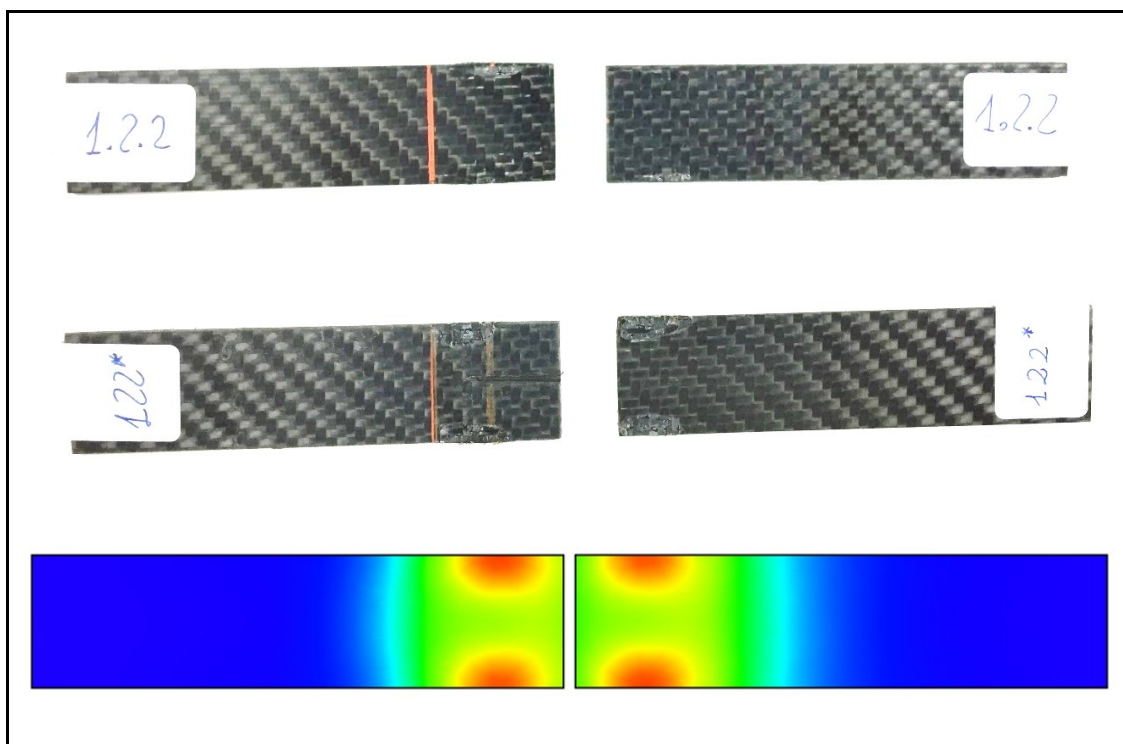


Figura 8.5: Confronto Giunto 300V - 260°C - 20s

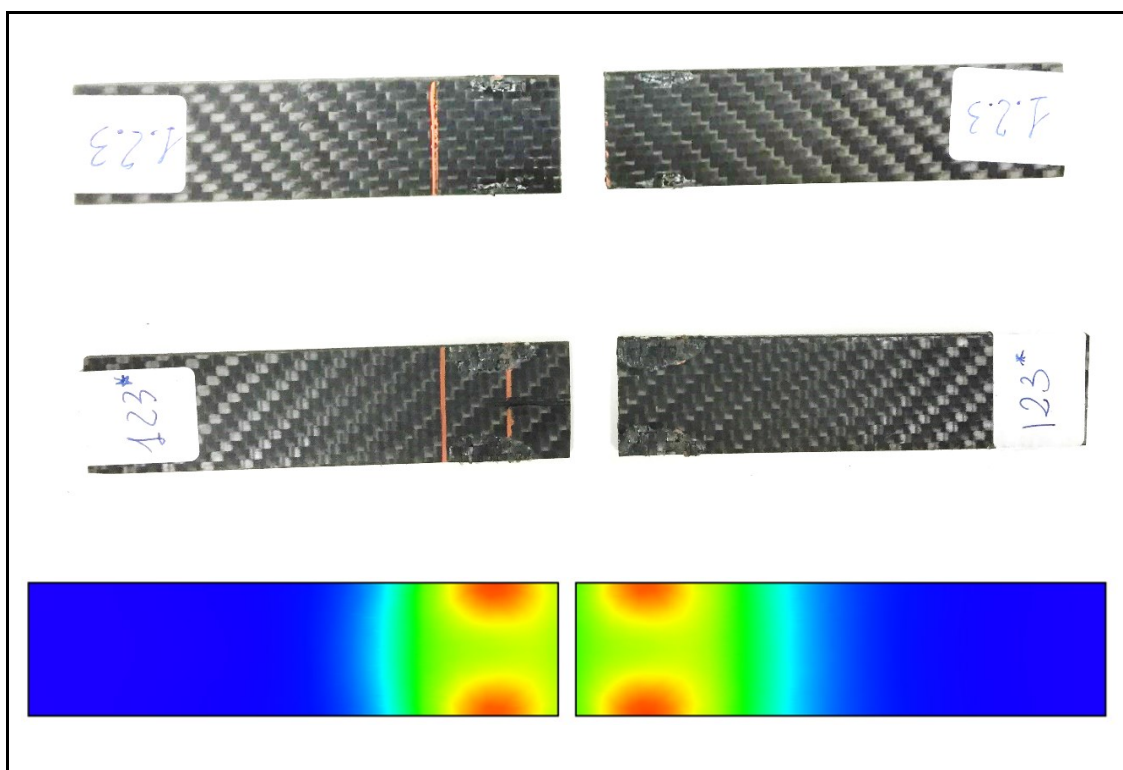


Figura 8.6: Confronto Giunto 300V - 260°C - 30s

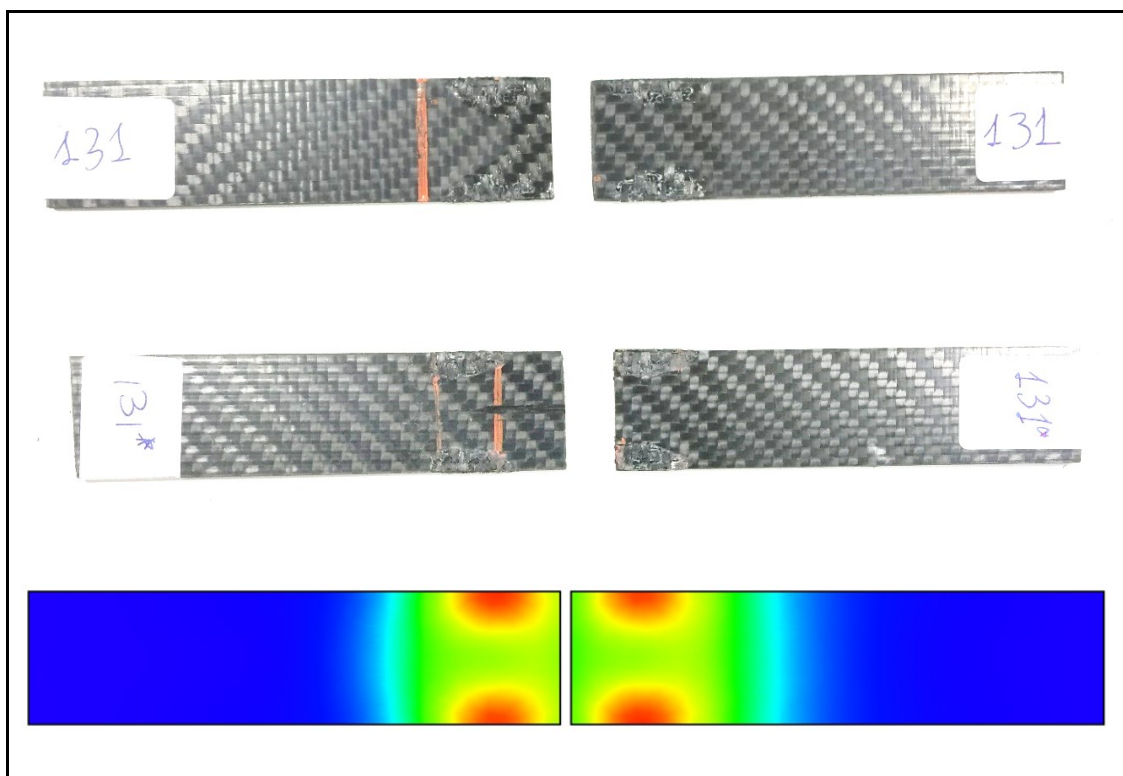


Figura 8.7: Confronto Giunto 300V - 270°C - 10s

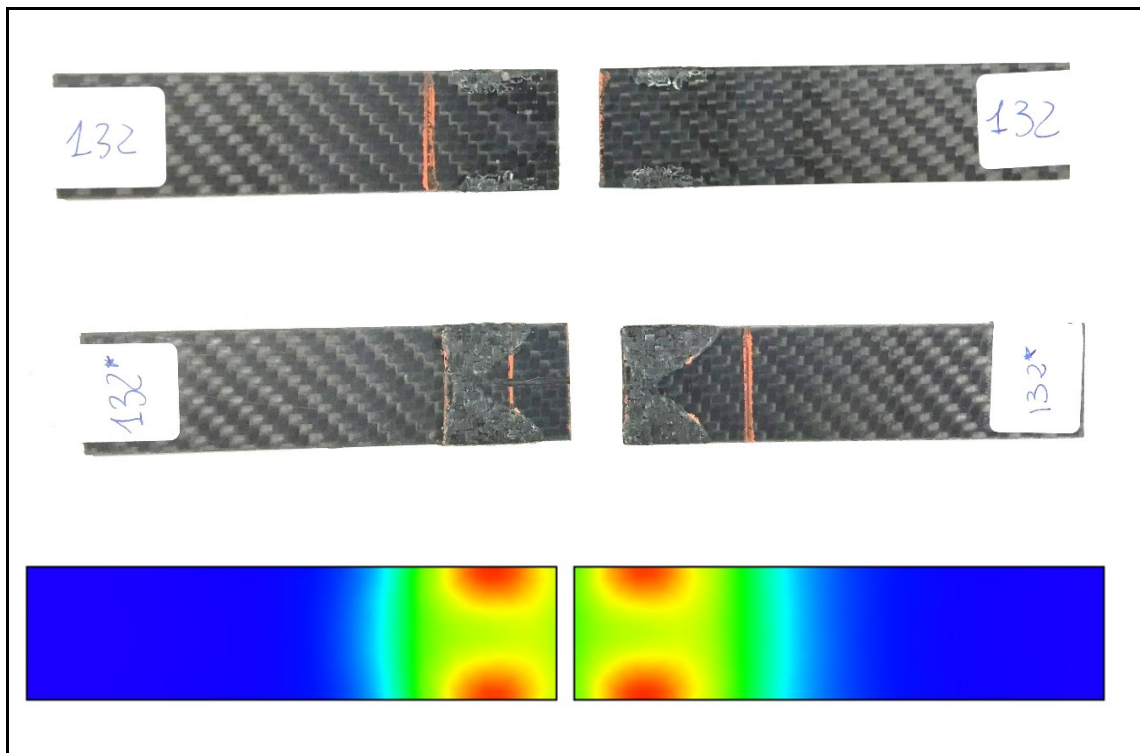


Figura 8.8: Confronto Giunto 300V - 270°C - 20s

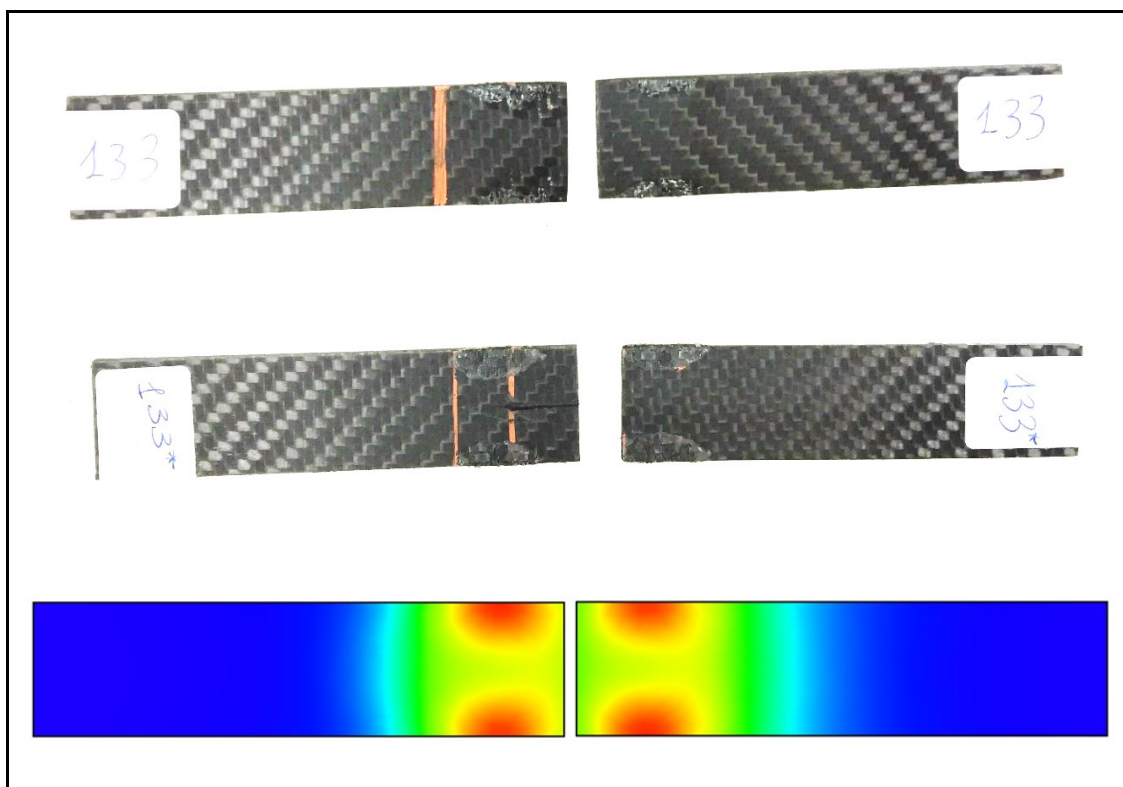


Figura 8.9: Confronto Giunto 300V - 270°C - 30s

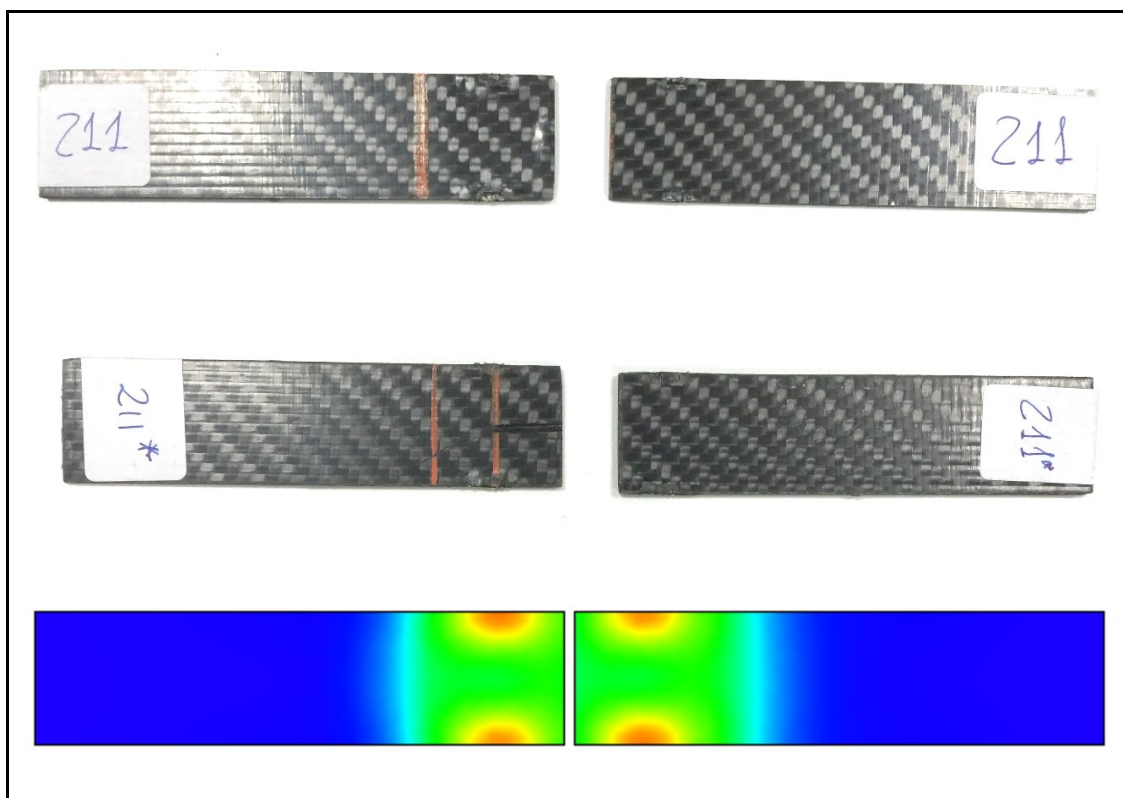


Figura 8.10: Confronto Giunto 400V - 250°C - 10s

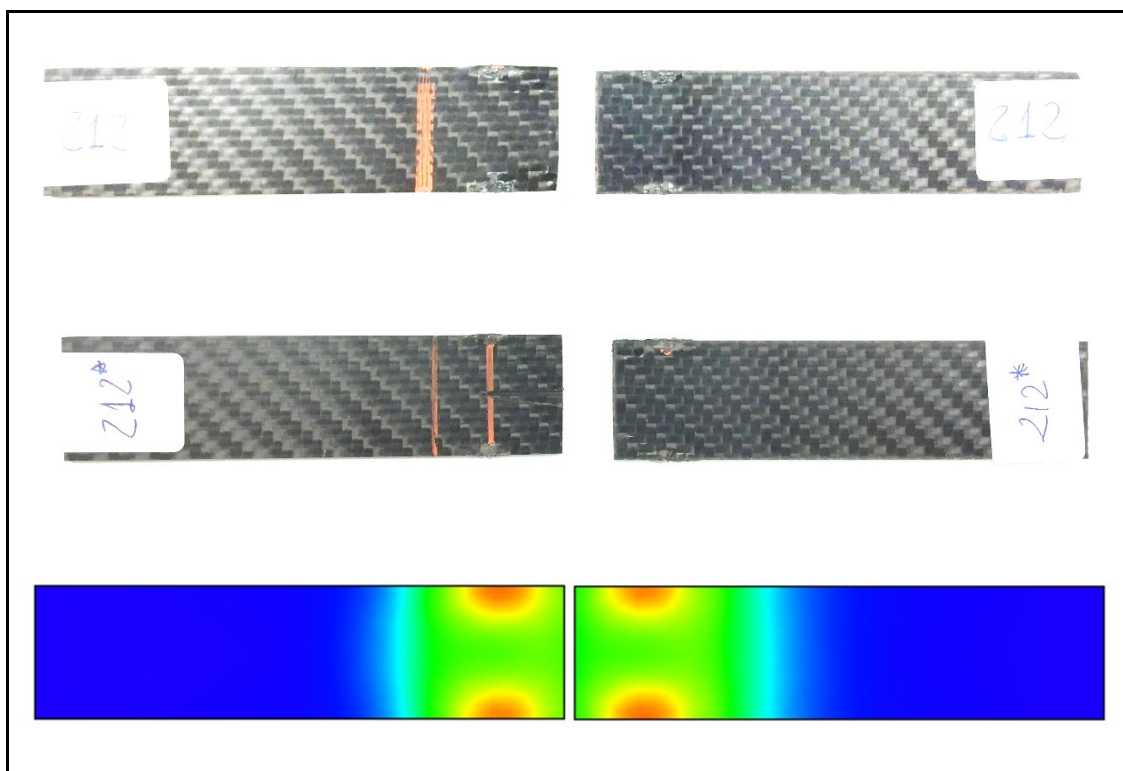


Figura 8.11: Confronto Giunto 400V - 250°C - 20s

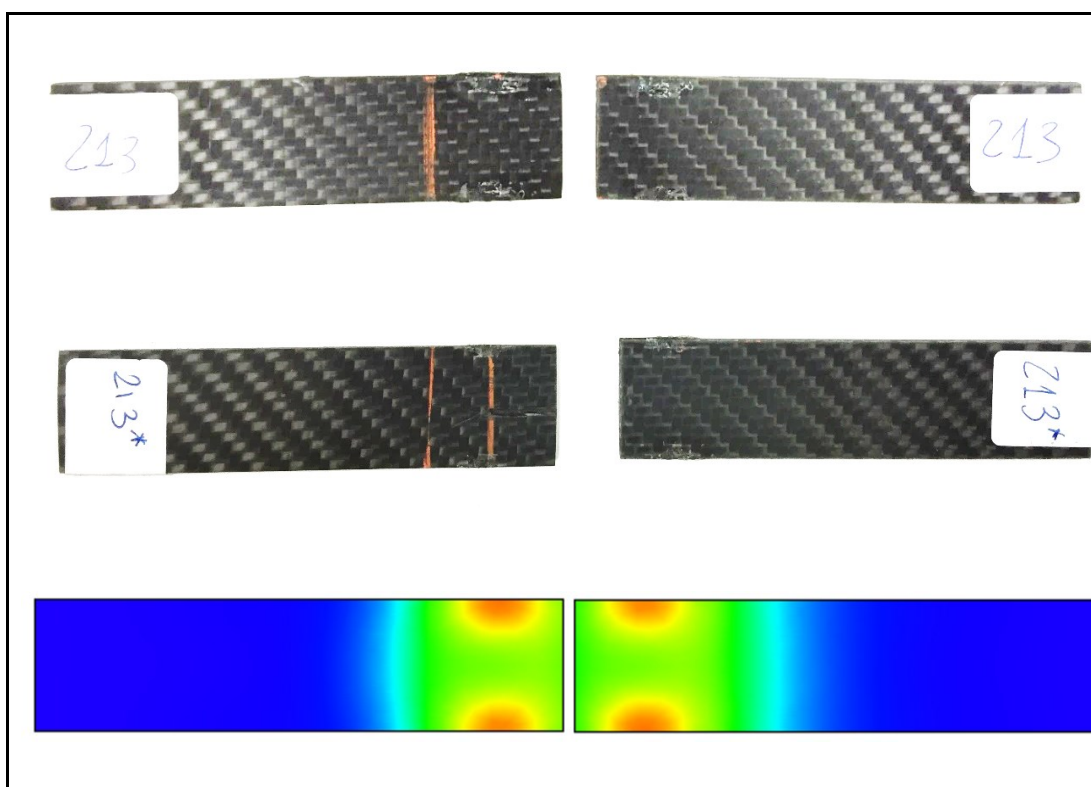


Figura 8.12: Confronto Giunto 400V - 250°C - 30s

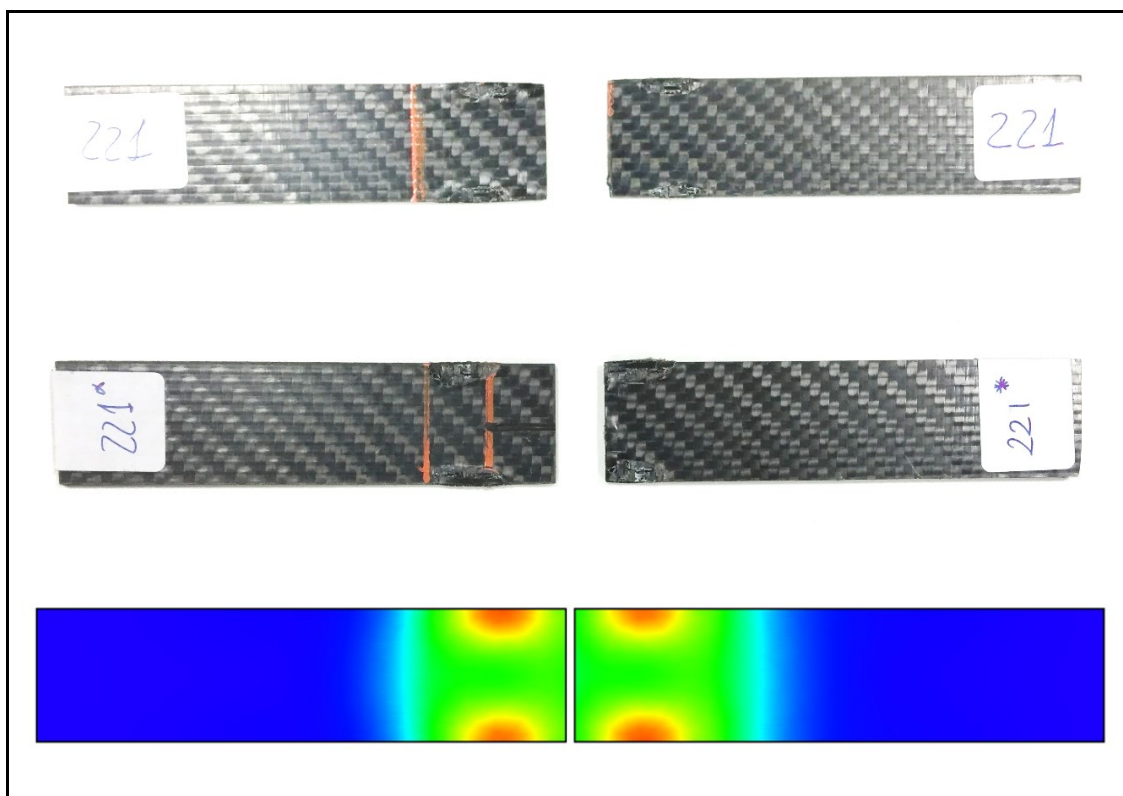


Figura 8.13: Confronto Giunto 400V - 260°C - 10s

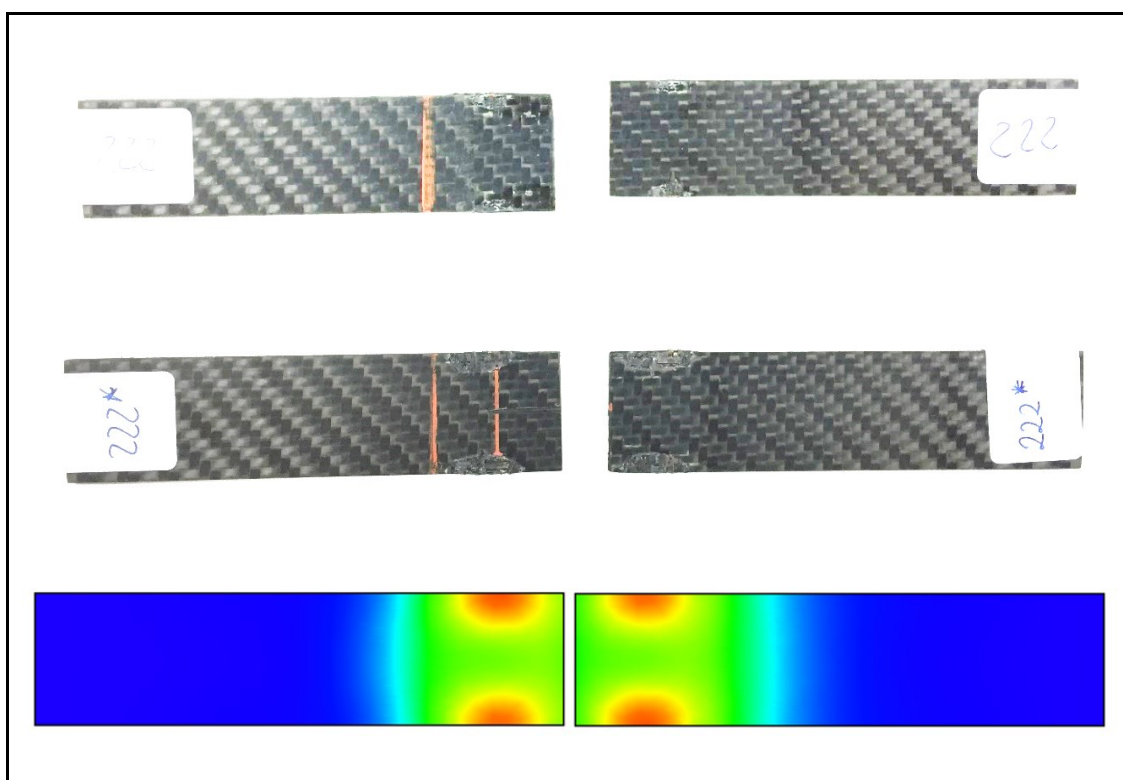


Figura 8.14: Confronto Giunto 400V - 260°C - 20s

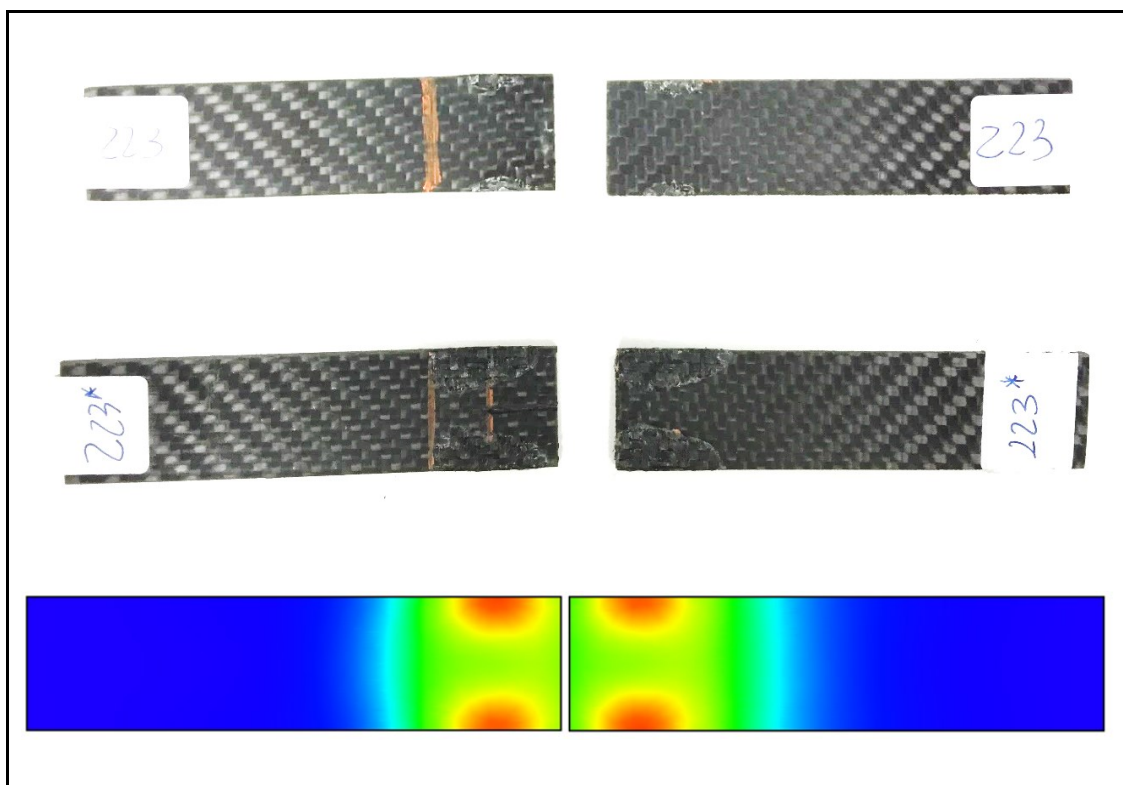


Figura 8.15: Confronto Giunto 400V - 260°C - 30s

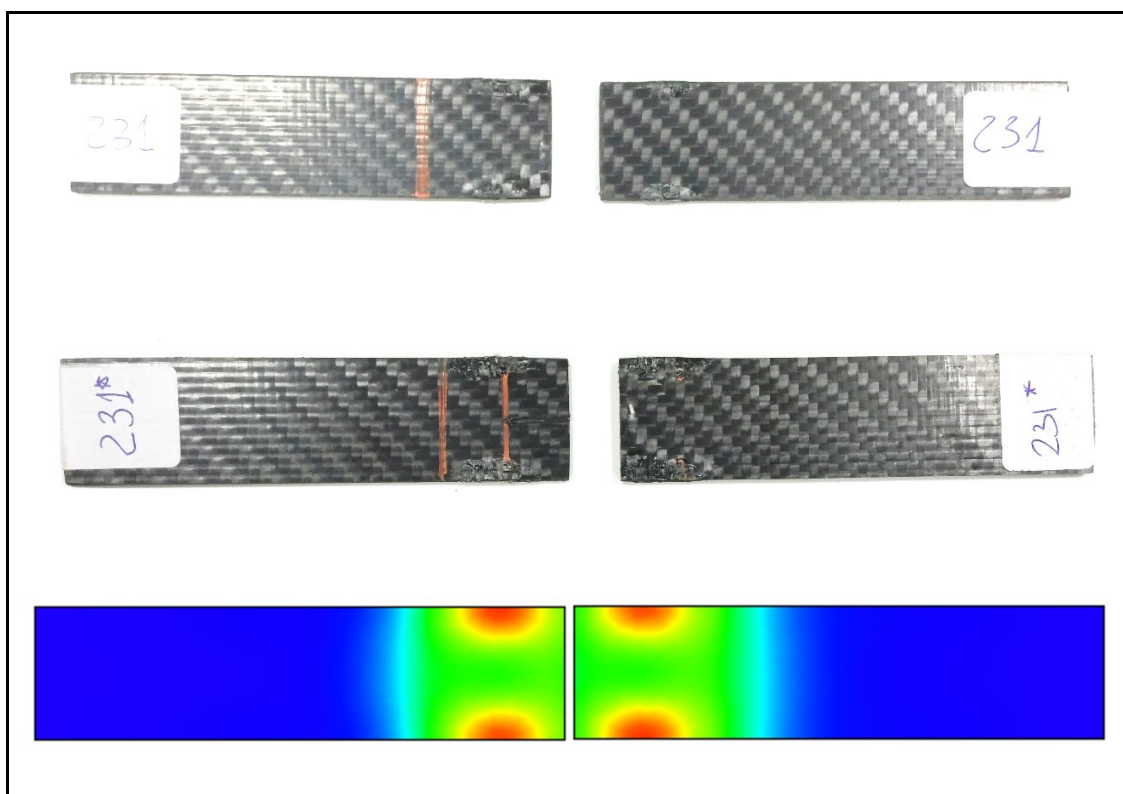


Figura 8.16: Confronto Giunto 400V - 270°C - 10s

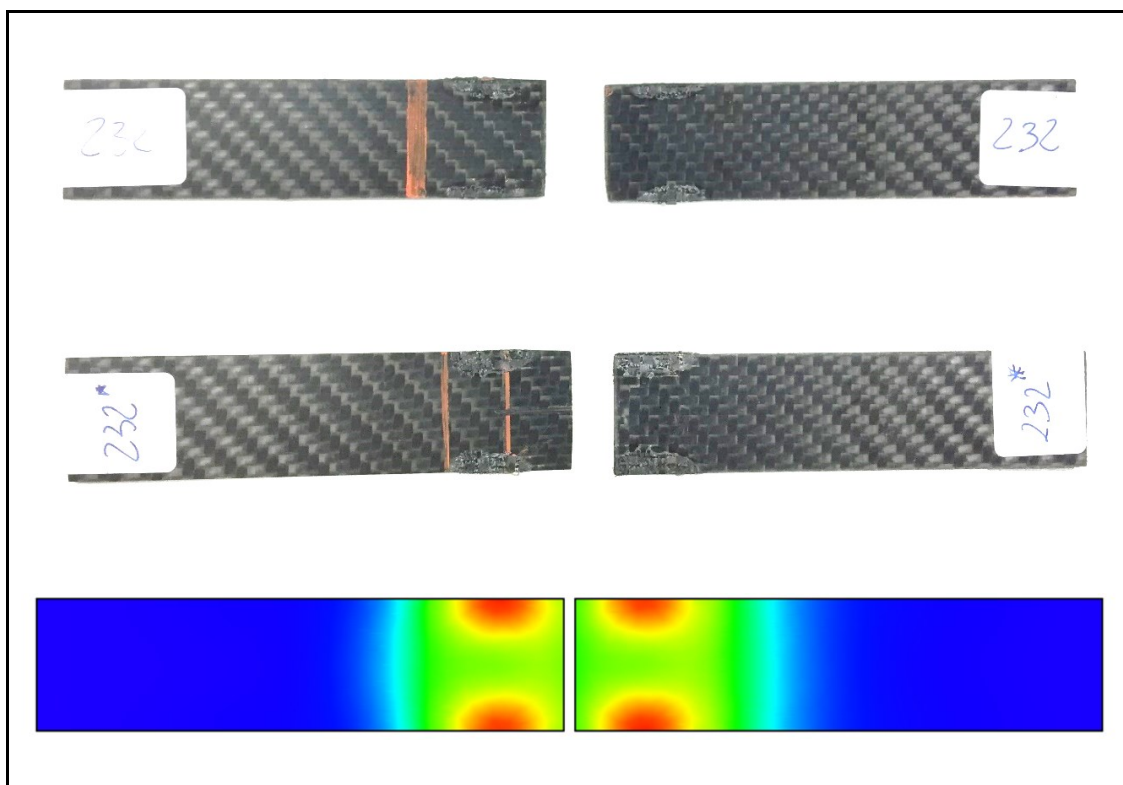


Figura 8.17: Confronto Giunto 400V - 270°C - 20s

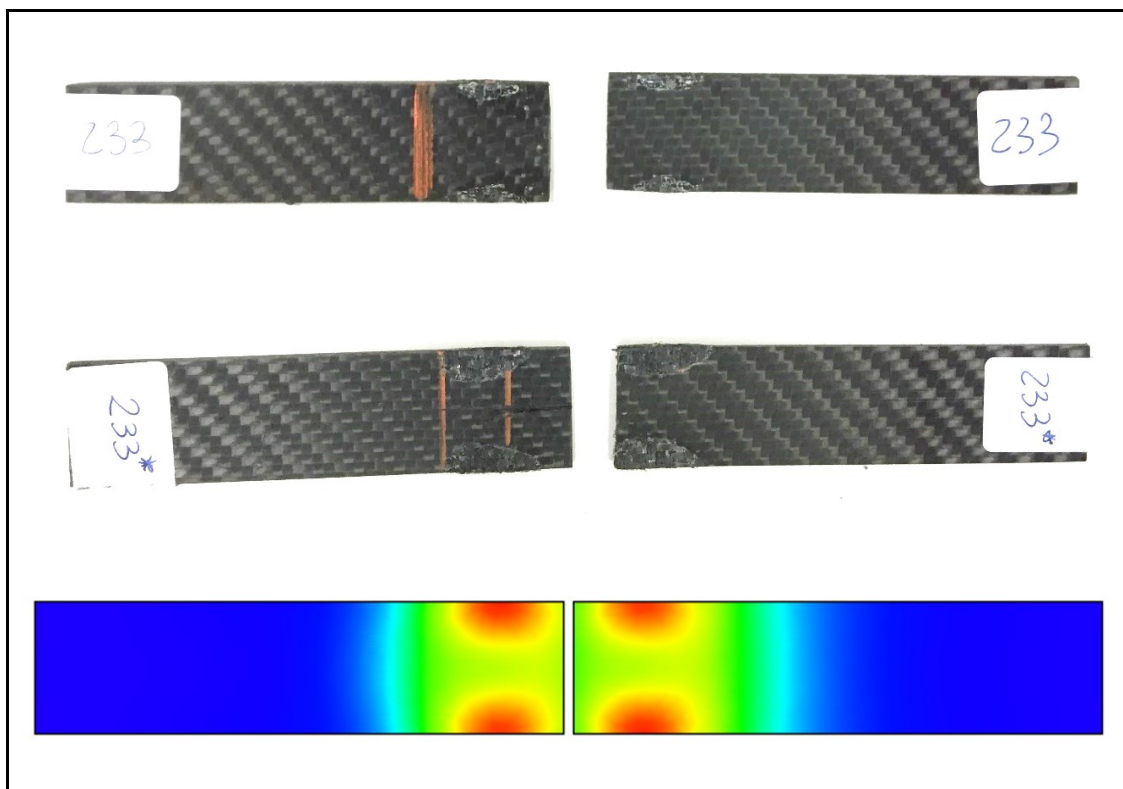


Figura 8.18: Confronto Giunto 400V - 270°C - 30s

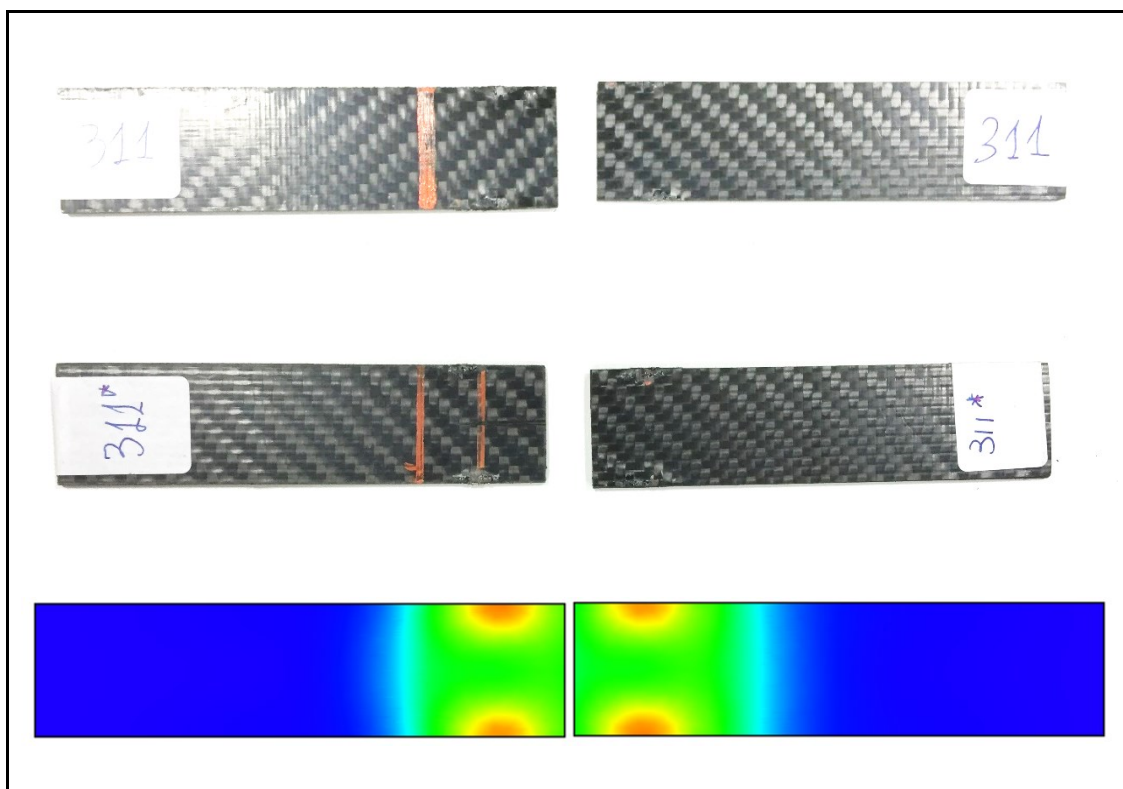


Figura 8.19: Confronto Giunto 350V - 250°C - 10s

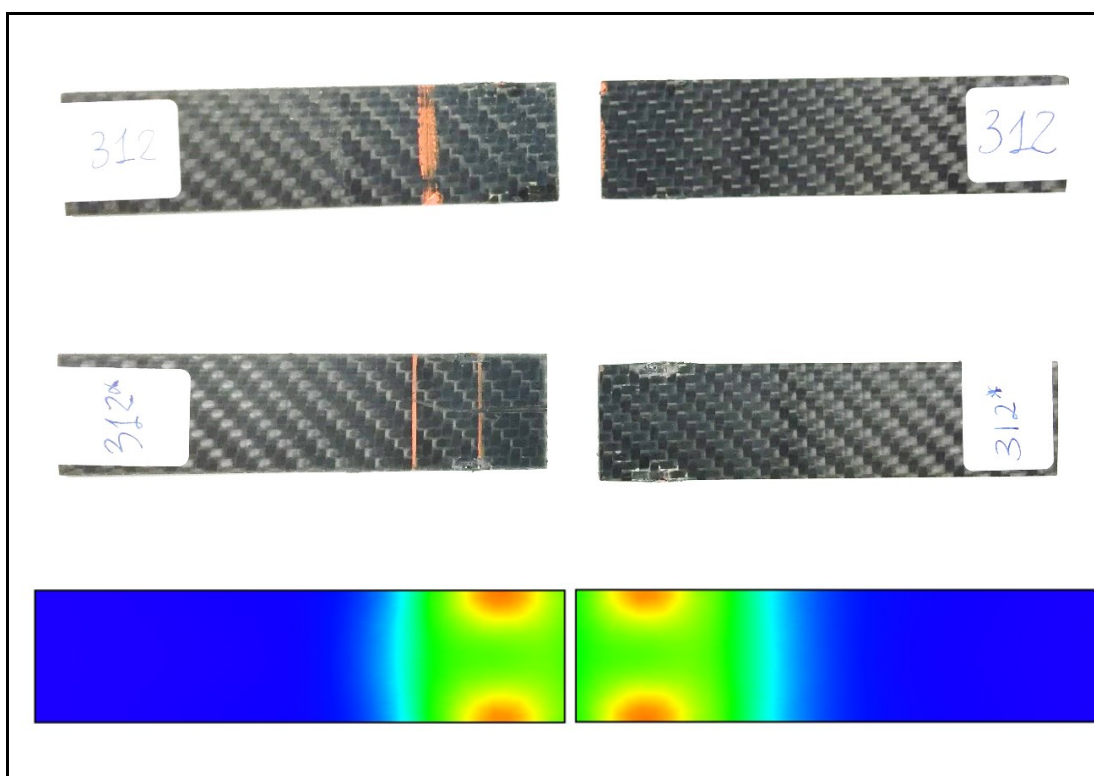


Figura 8.20: Confronto Giunto 350V - 250°C - 20s

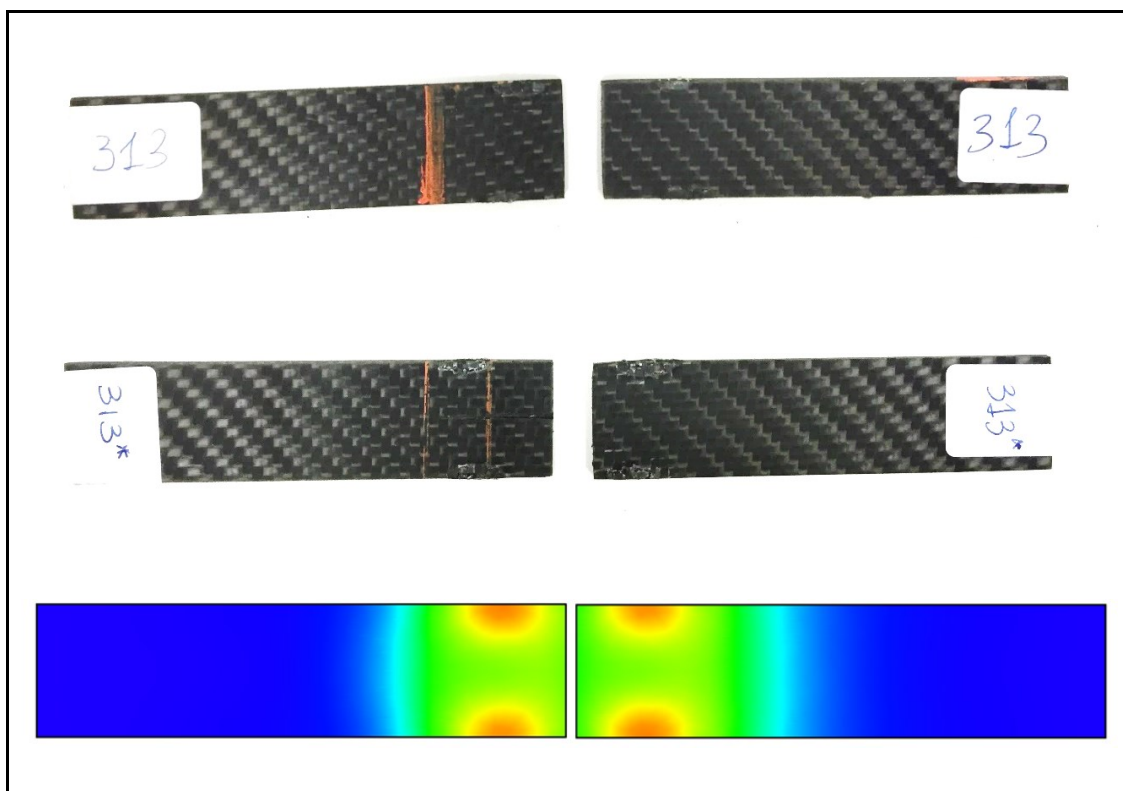


Figura 8.21: Confronto Giunto 350V - 250°C - 30s

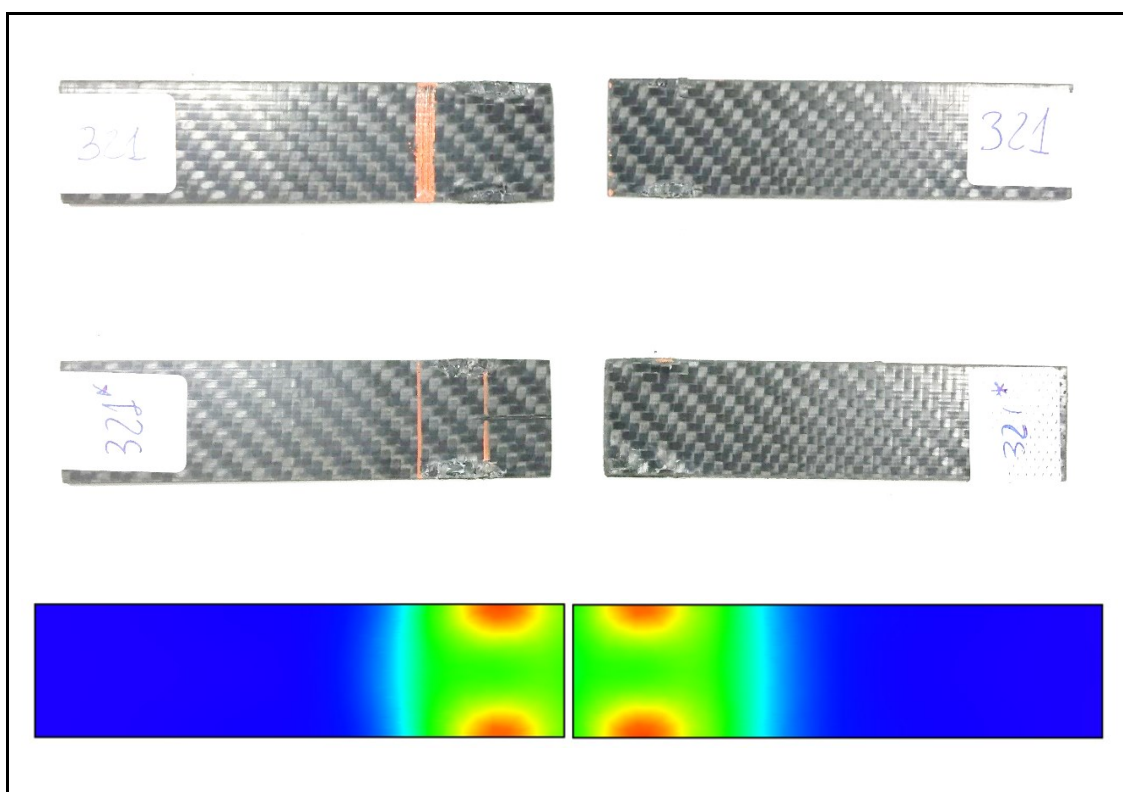


Figura 8.22: Confronto Giunto 350V - 260°C - 10s

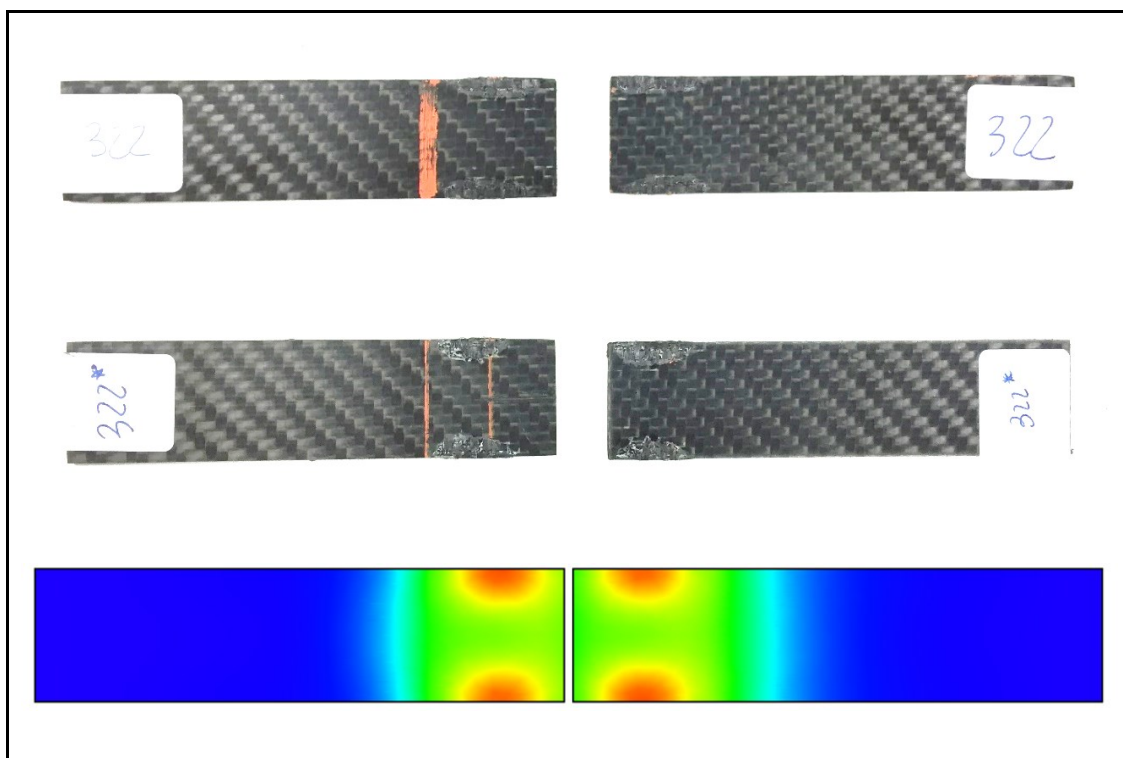


Figura 8.23: Confronto Giunto 350V - 260°C - 20s

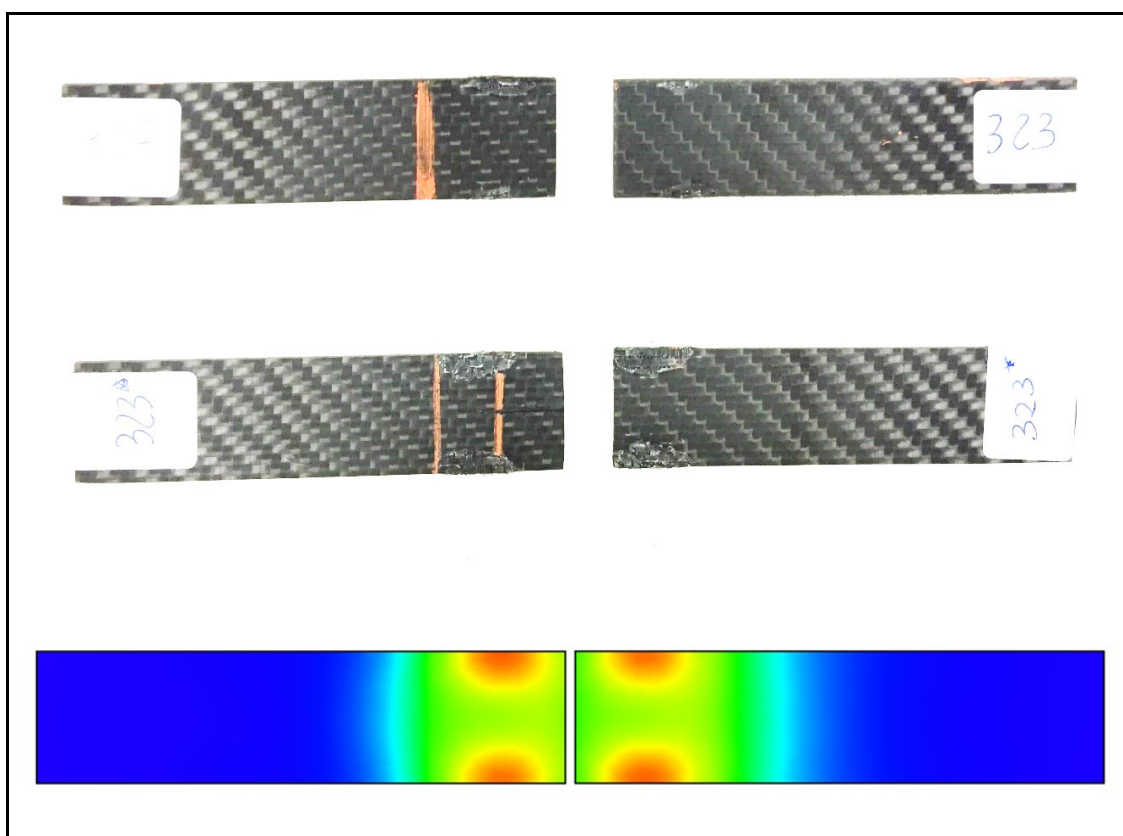


Figura 8.24: Confronto Giunto 350V - 260°C - 30s

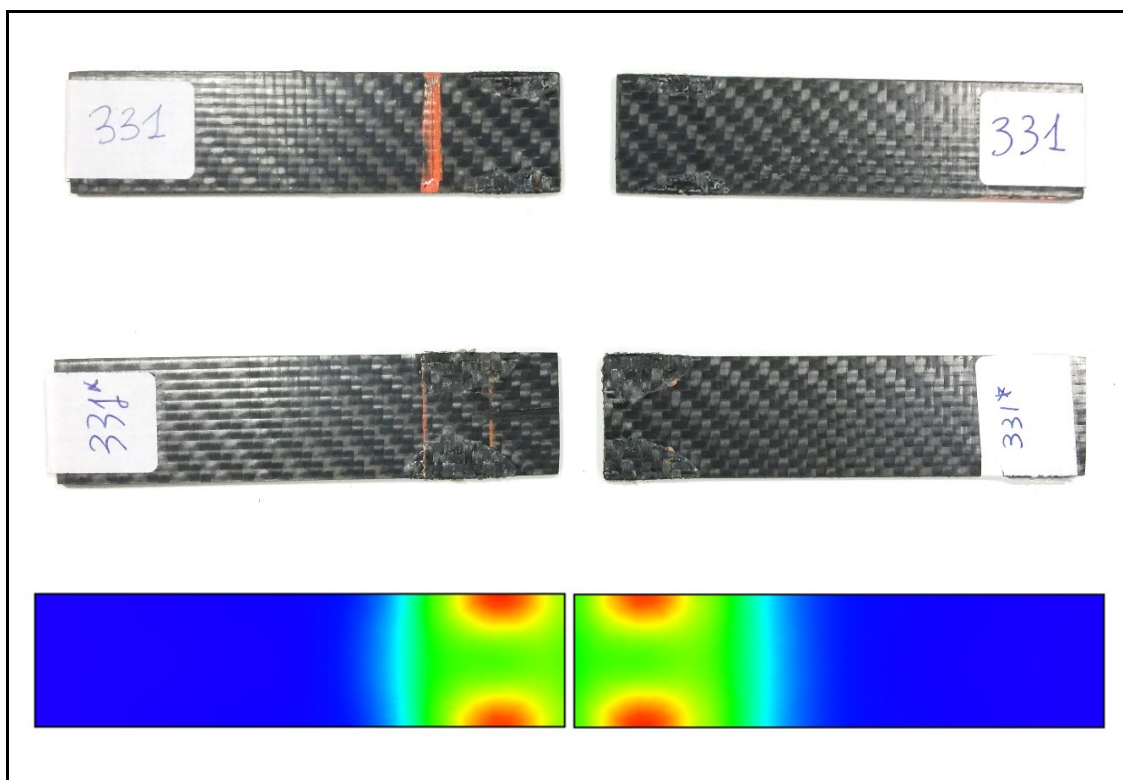


Figura 8.25: Confronto Giunto 350V - 270°C - 10s

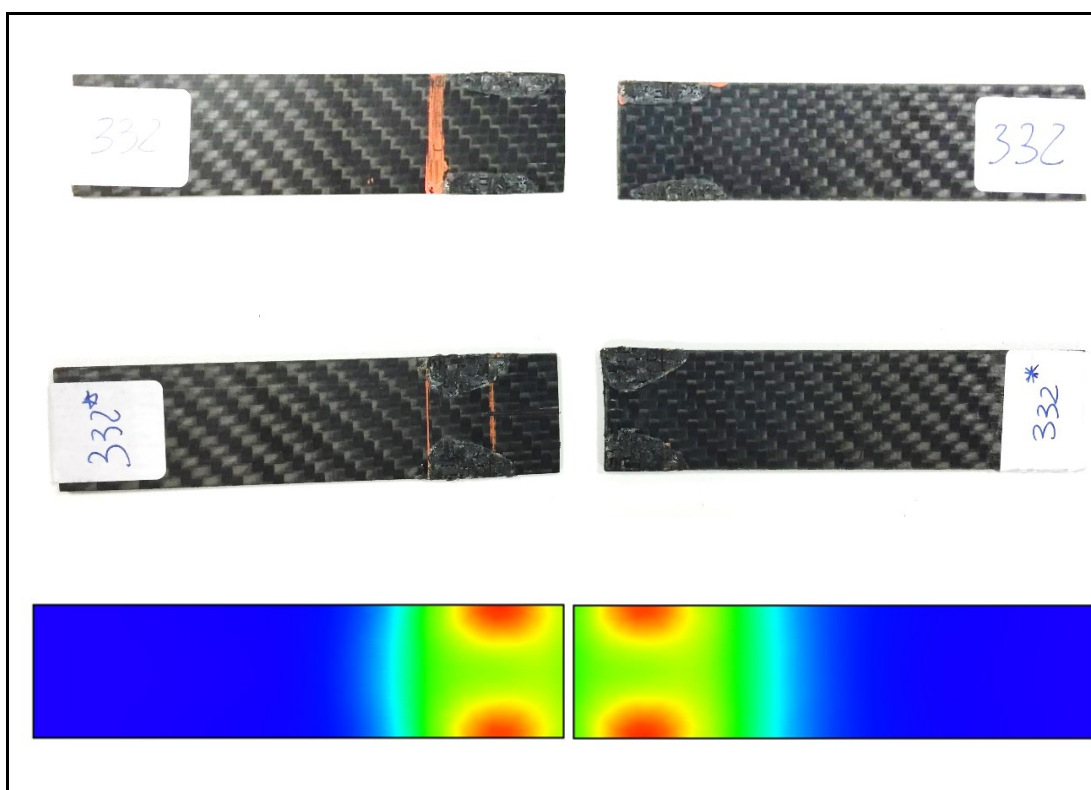


Figura 8.26: Confronto Giunto 350V - 270°C - 20s

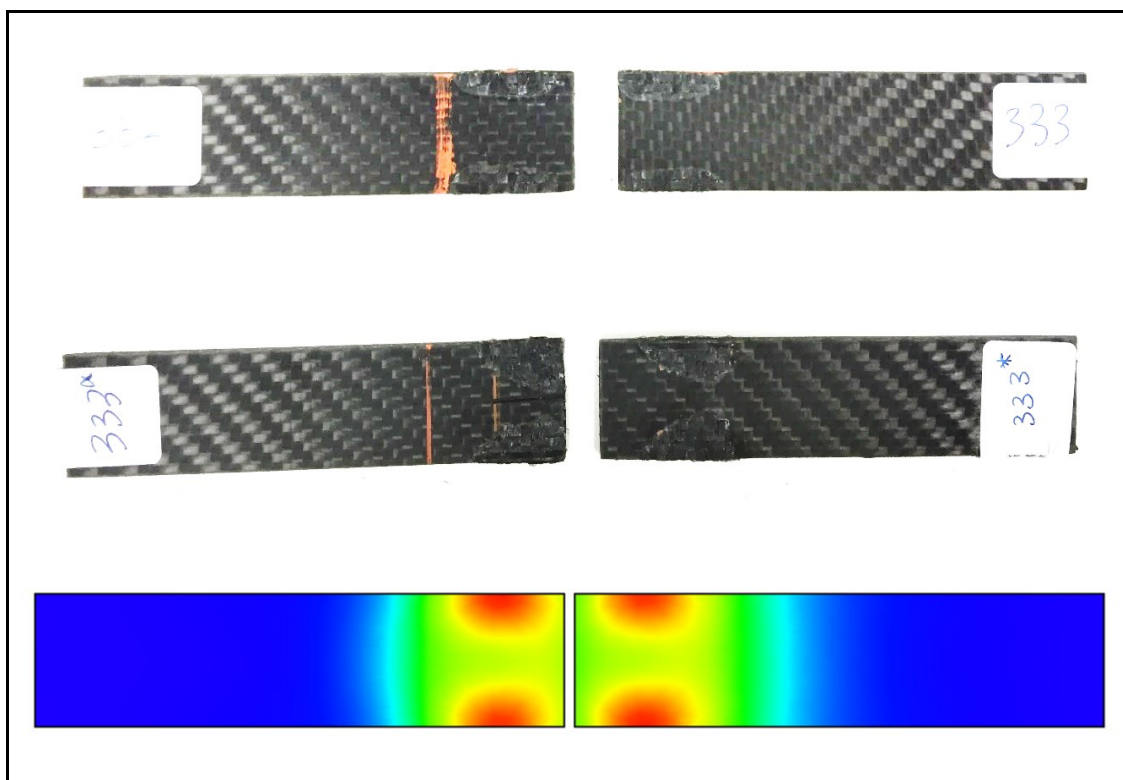


Figura 8.27: Confronto Giunto 350V - 270°C - 30s

8.2 Confronto numerico-sperimentale delle temperature

Di seguito sono riportati i grafici di sintesi dei risultati conseguiti in questo secondo ciclo di sperimentazione.

Un riscontro più significativo può essere effettuato confrontando i cicli di temperatura.

Nei grafici seguenti, sono riportati i cicli di temperatura ottenuti dalle simulazioni realizzate, raffrontati con quelli misurati mediante l'utilizzo del pirometro e delle fibre ottiche.

Come già dimostrato dalle immagini precedenti, la temperatura letta dalla fibra esterna è maggiore di quella letta dalla fibra interna, a conferma del riscaldamento non uniforme, dovuto all'effetto di bordo, già spiegato nei capitoli precedenti.

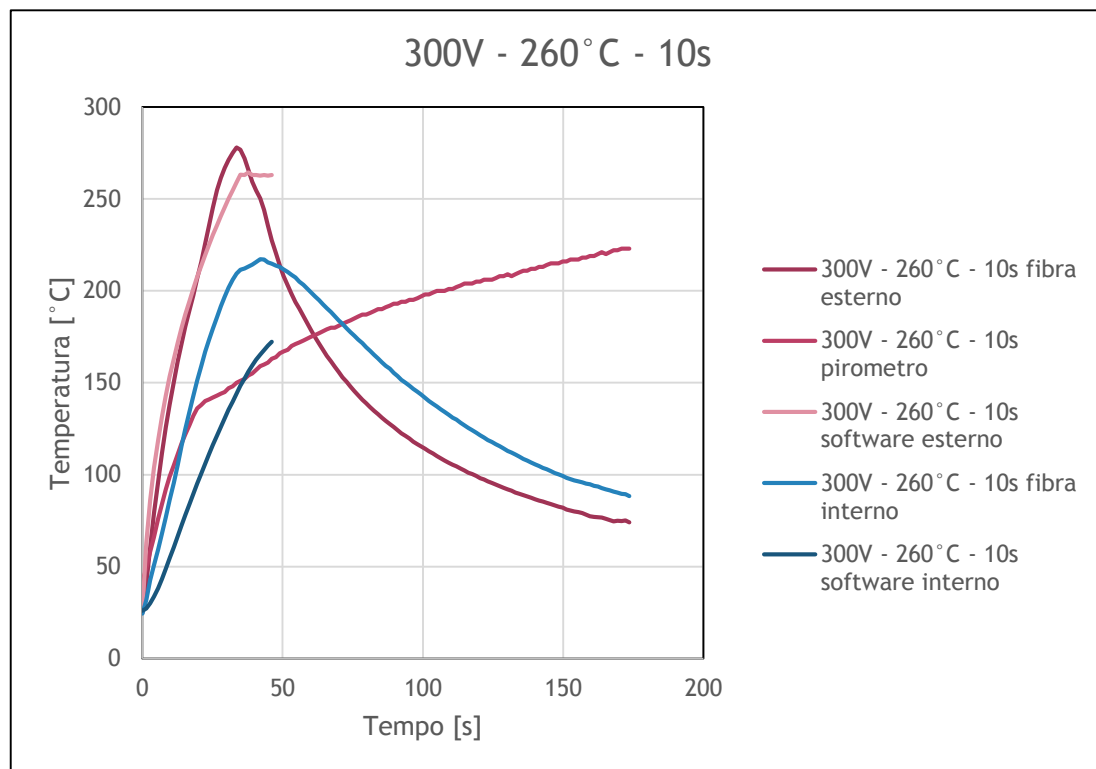


Figura 8.28: Temperatura Giunto 1.2.1

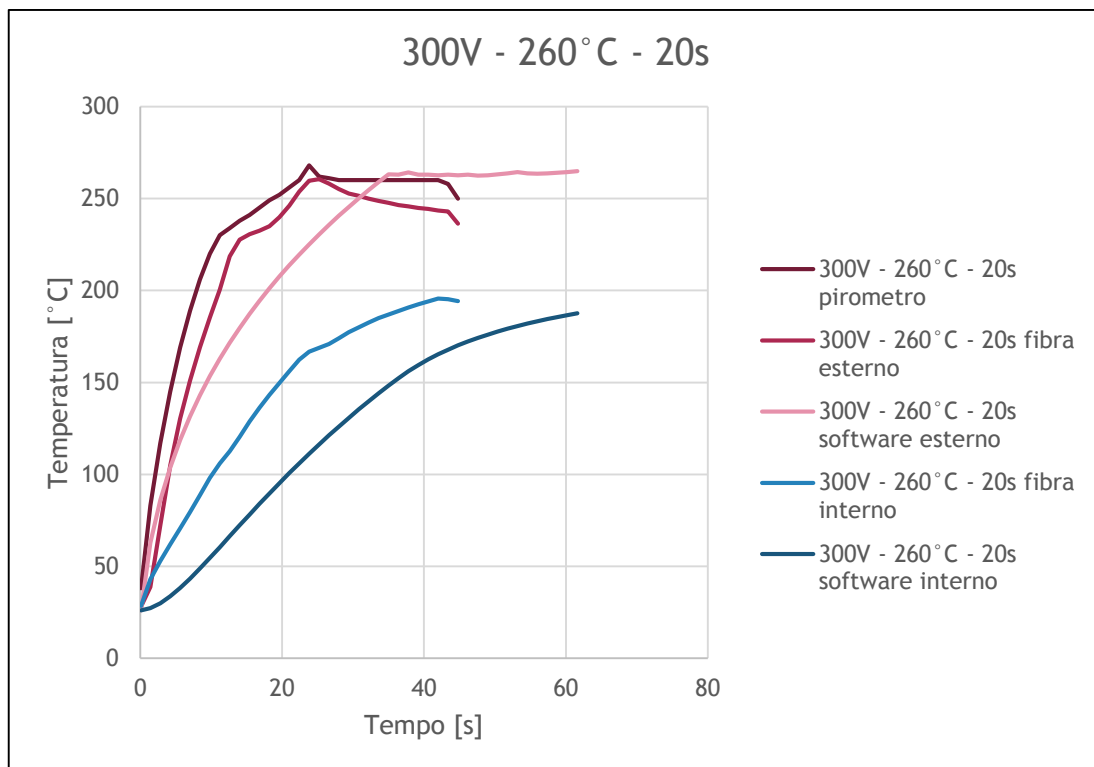


Figura 8.29: Temperatura Giunto 1.2.2

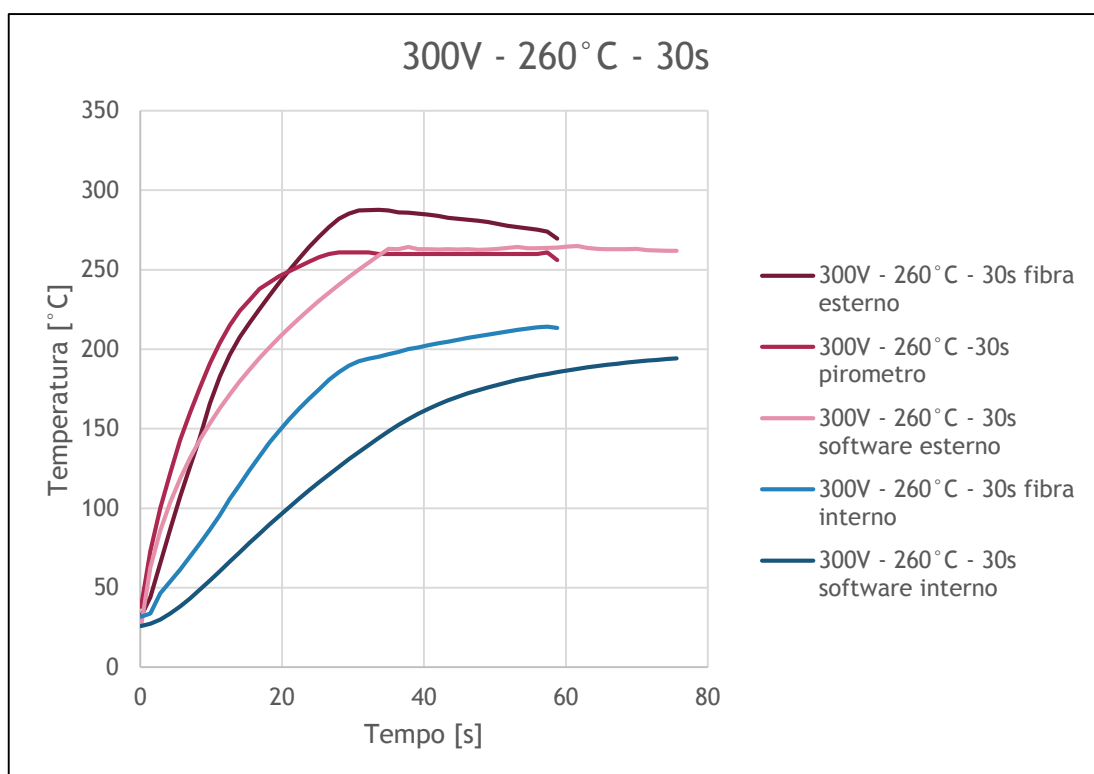


Figura 8.30: Temperatura Giunto 1.2.3

Dalle figure seguenti è possibile notare come la temperatura letta dal pirometro sia maggiore rispetto a quella letta dalla fibra fino a che le due curve non si intersecano ad un valore di temperatura pari a 260°C, dove e la temperatura letta dalla fibra risulta essere maggiore di quella letta dal pirometro.

Tale fenomeno è dovuto alla presenza del tubicino di alluminio inserito al fine di proteggere la fibra per successivi riutilizzi.

Confrontando invece l'andamento della temperatura riportata dal software con quello della fibra e del pirometro, si può notare come l'andamento sia confrontabile con quello del pirometro e come i valori siano prossimi a quelli misurati dalla fibra ottica.

Per quanto riguarda l'andamento della temperatura misurata all'interno del giunto, sia mediante software che mediante pirometro, si può notare come l'errore commesso dal software sia di pochi gradi rispetto alla misura effettuata dalla fibra.

La differenza delle temperatura di partenza tra fibra e software dipende dal fatto che avendo effettuato le prove in serie, è plausibile ipotizzare che si sia verificato un riscaldamento del supporto che ha influito sulla temperatura iniziale dei provini; mentre la temperatura iniziale impostata nel software è sempre pari a 26 °C.

Inoltre, come ipotizzato già precedentemente, l'utilizzo del tubicino di alluminio, potrebbe aver alterato la misurazione della temperatura letta dalla fibra a causa della differente conducibilità termica dell'alluminio, che si è comportato, quindi, da "ponte termico".

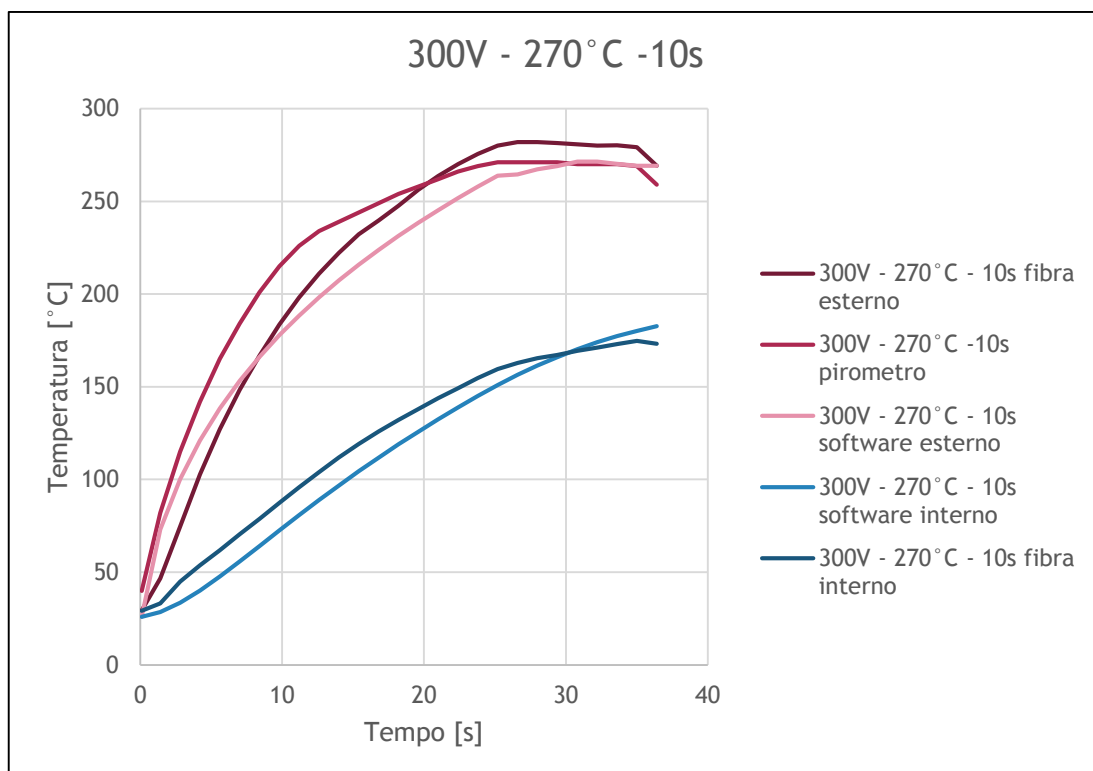


Figura 8.31: Temperatura Giunto 1.3.1

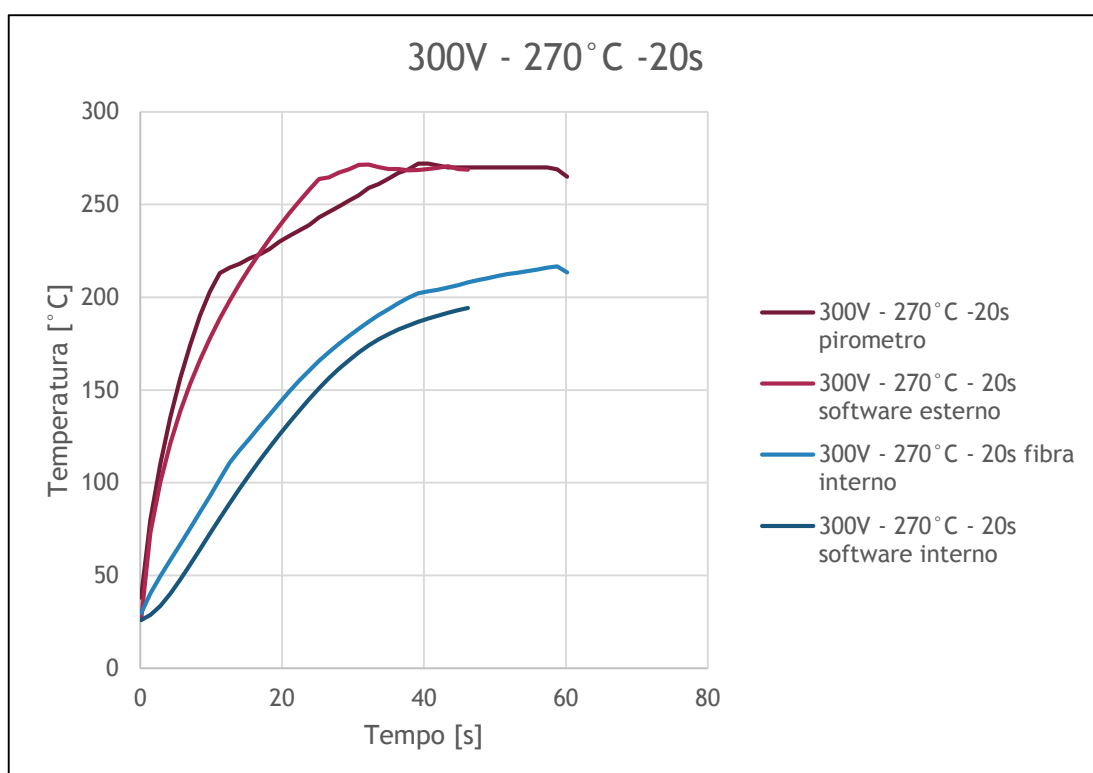


Figura 8.32: Temperatura Giunto 1.3.2

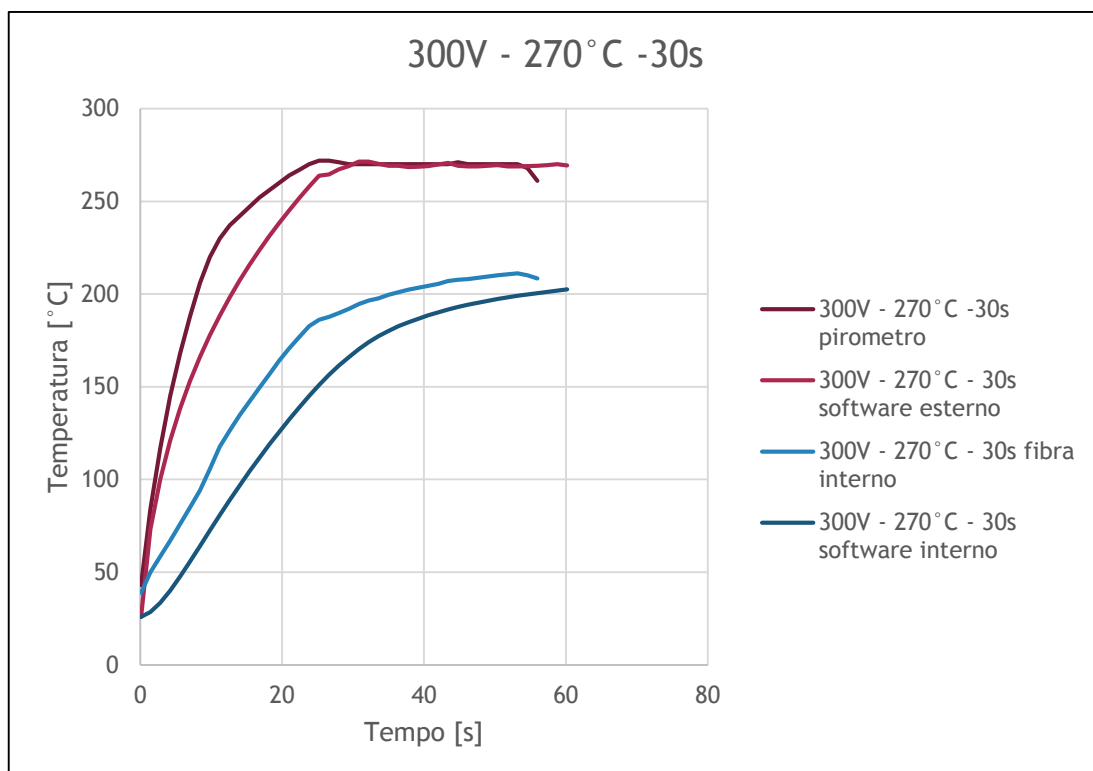


Figura 8.33: Temperatura Giunto 1.3.3

Nei grafici da Figura 8.34 a Figura 8.42 seguenti sono riportati gli andamenti della temperatura per un valore di voltaggio pari a 400V; purtroppo non è stato possibile utilizzare una seconda fibra sul punto esterno, mentre è stata usata solamente per monitorare il profilo di temperatura del punto interno.

Anche in questa serie di prove il profilo di temperatura letto dal pirometro è quasi coincidente con quello previsto dal software, sia per il punto esterno che quello interno.

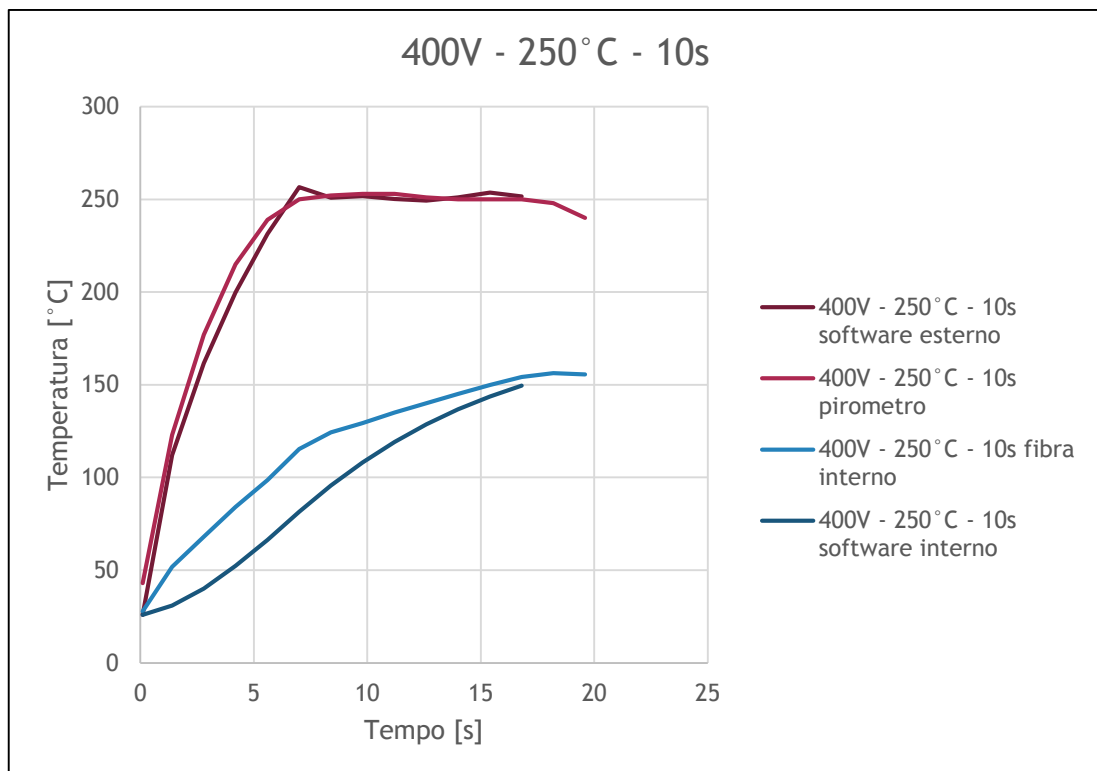


Figura 8.34: Temperatura Giunto 2.1.1

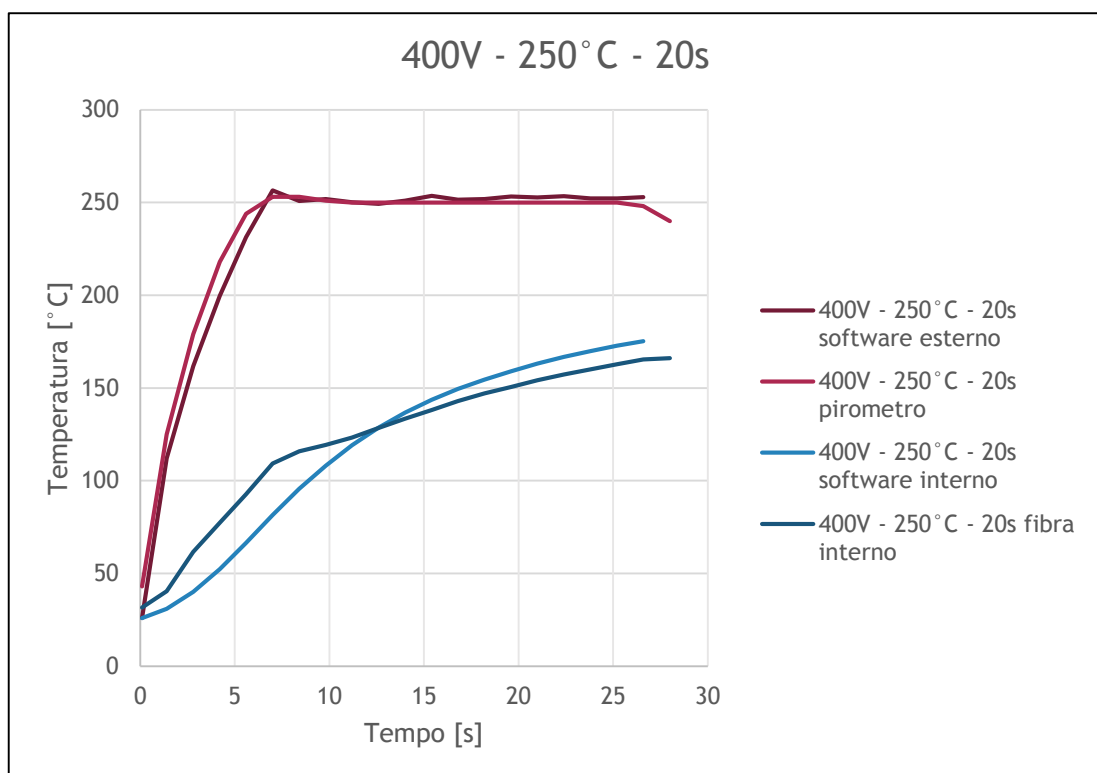


Figura 8.35: Temperatura Giunto 2.1.2

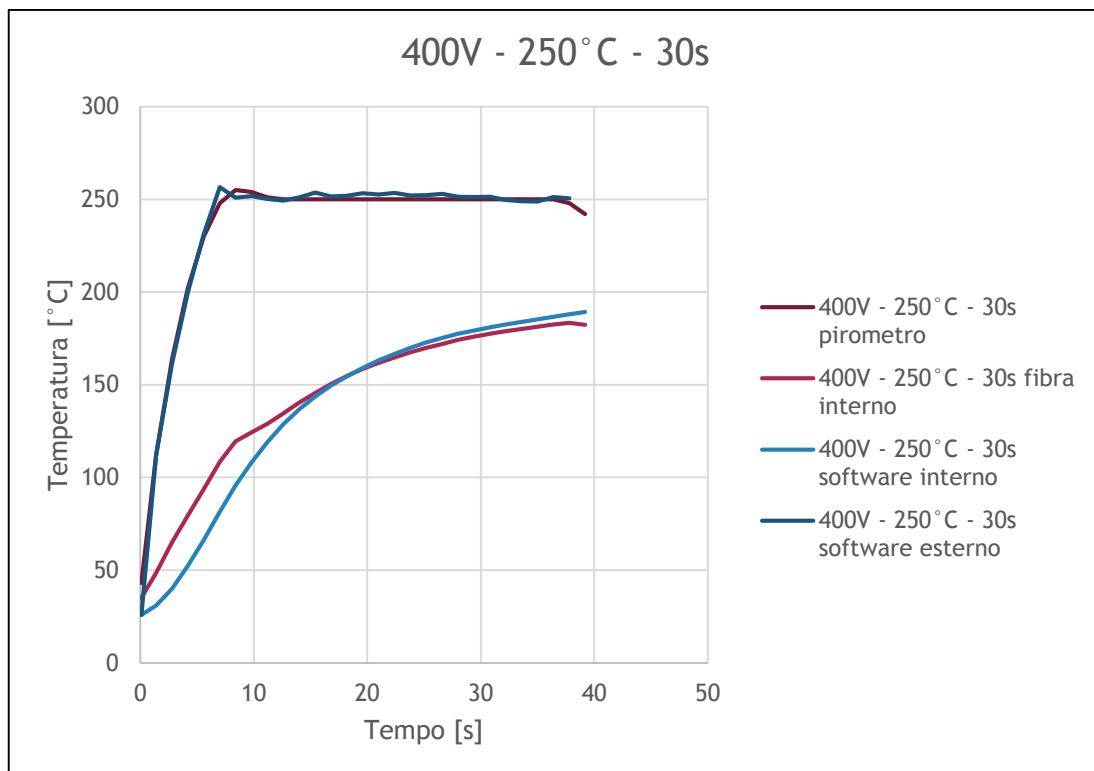


Figura 8.36: Temperatura Giunto 2.1.3

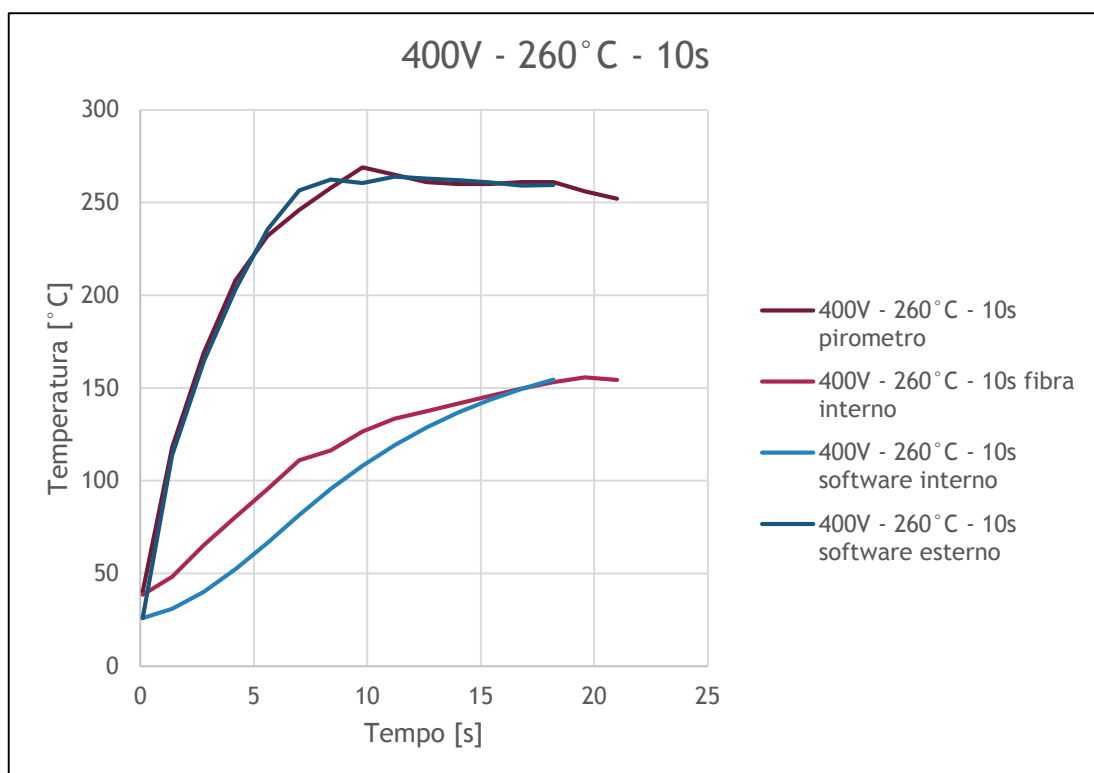


Figura 8.37: Temperatura Giunto 2.2.1

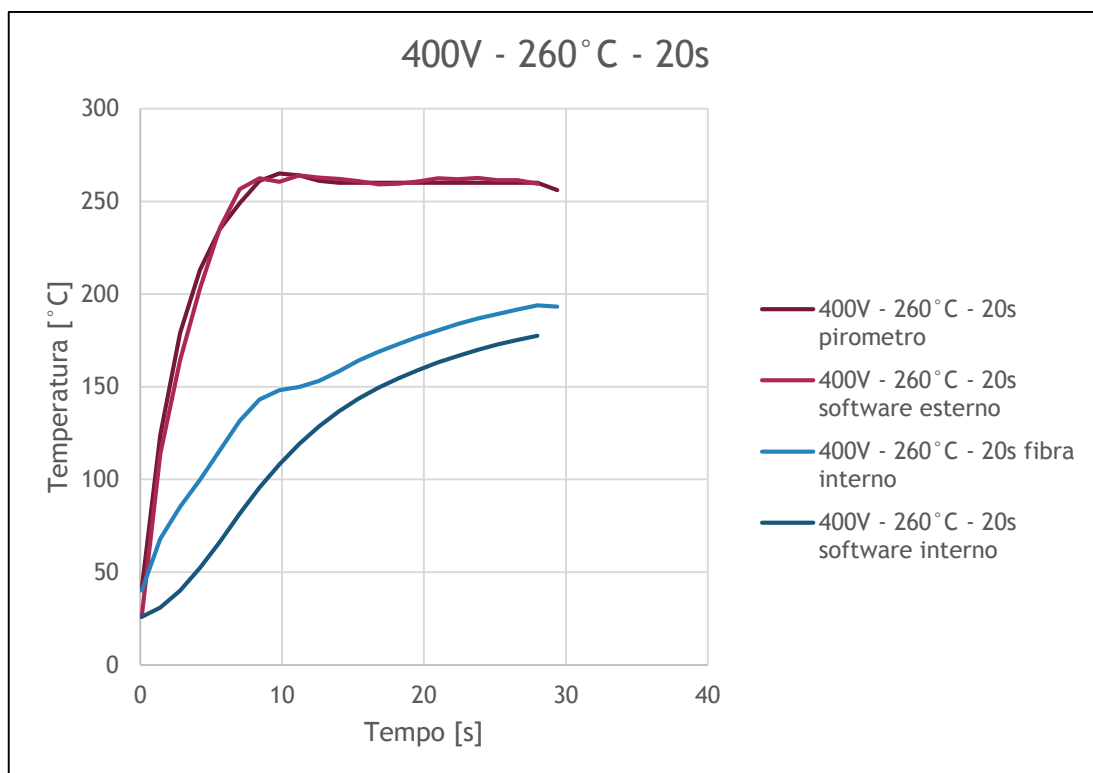


Figura 8.38: Temperatura Giunto 2.2.2

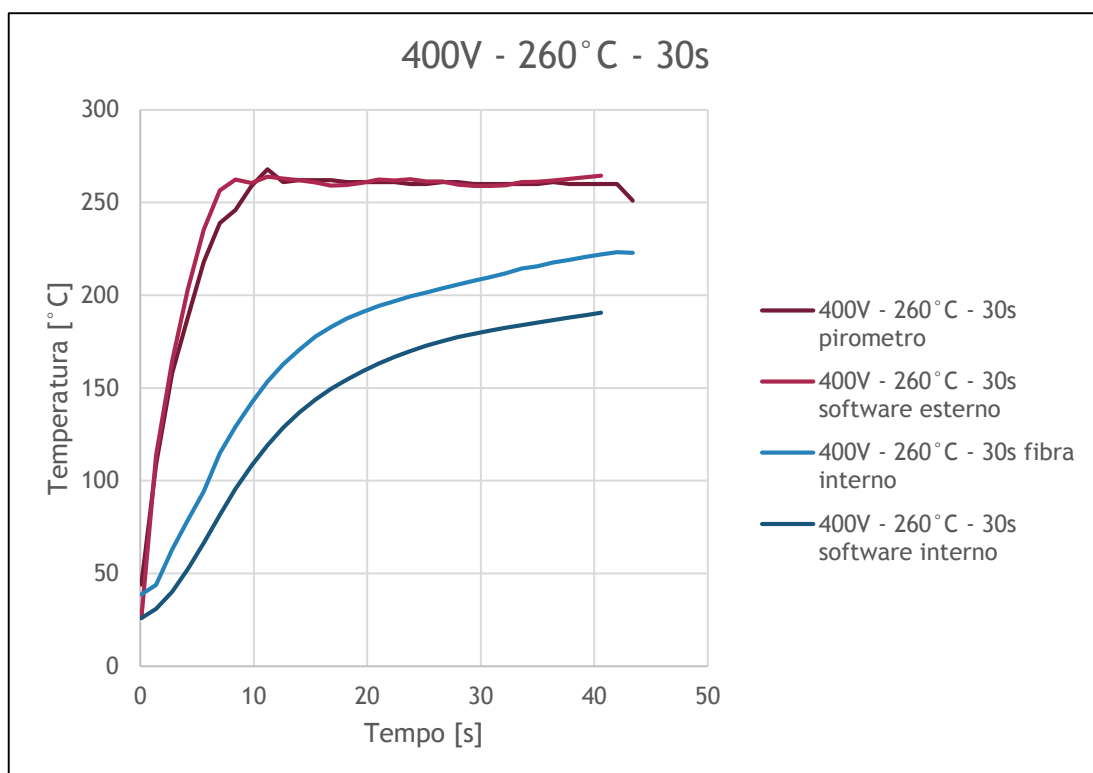


Figura 8.39: Temperatura Giunto 2.2.3

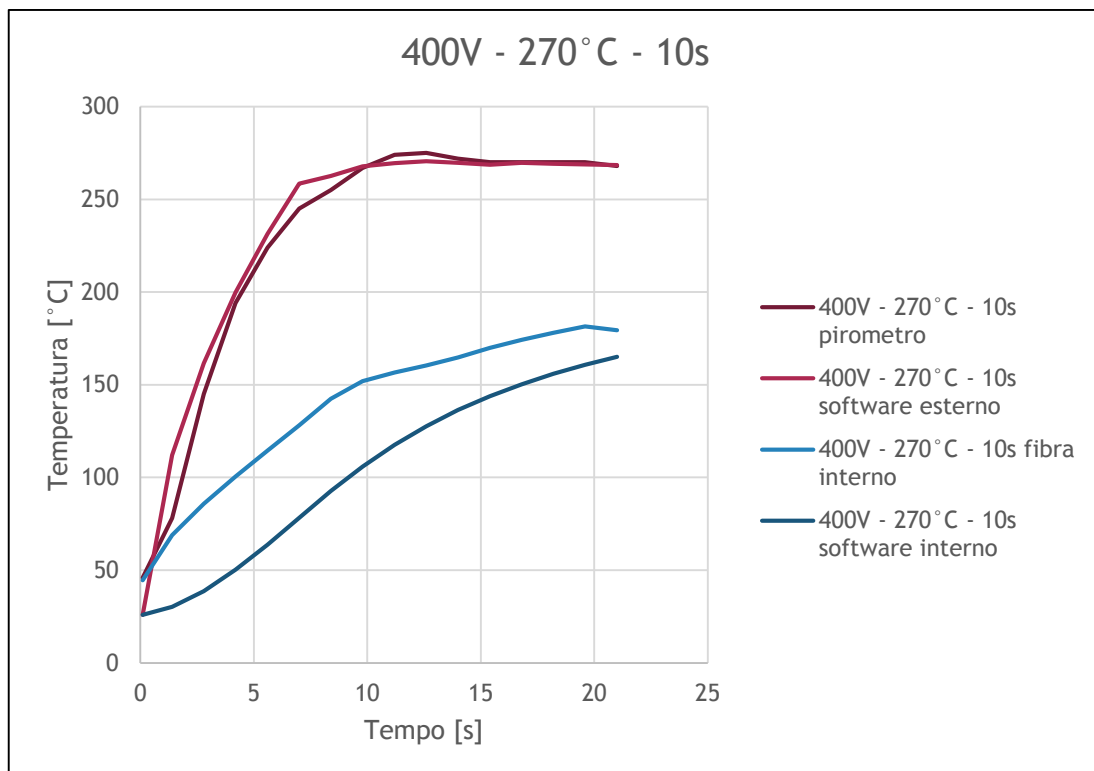


Figura 8.40: Temperatura Giunto 2.3.1

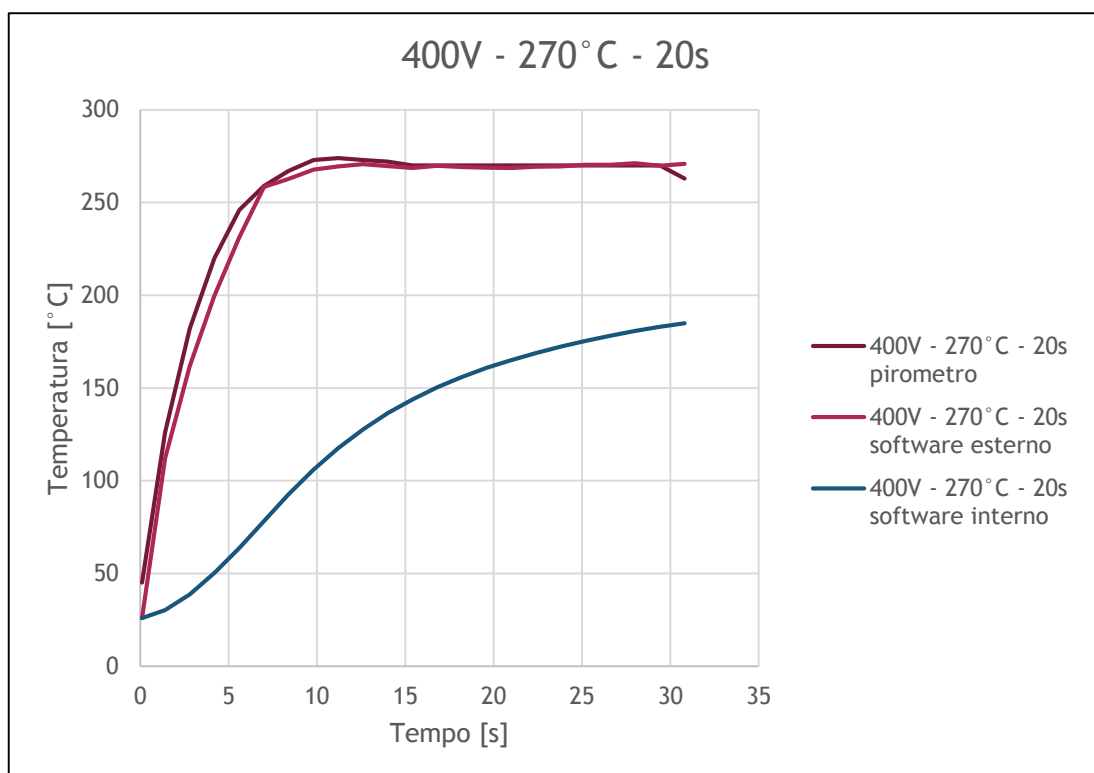


Figura 8.41: Temperatura Giunto 2.3.2

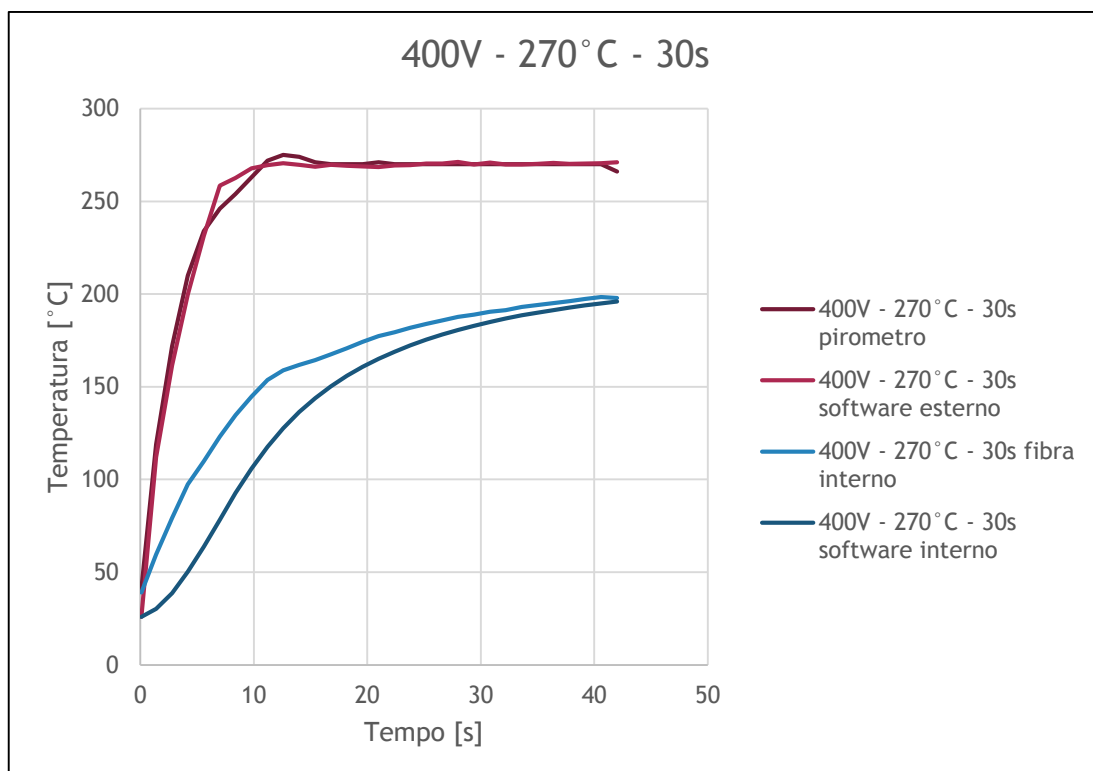


Figura 8.42: Temperatura Giunto 2.3.3

In questa ultima serie di prove da Figura 8.43 a Figura 8.51, si può ancora una volta notare come l'andamento di temperatura previsto dal software coincida con quello misurato dal pirometro, sul punto esterno, e dalla fibra sul punto interno.

Come è possibile notare il software mostra lo stesso andamento della temperatura misurata dal pirometro, sia in termini di pendenza della curva, sia del tempo necessario per raggiungere il valore di temperatura impostato.

Dai diagrammi seguenti che da quelli precedenti è possibile notare come effettuando il controllo di temperatura mentre la temperatura esterna rimane costante, la temperatura del punto interno aumenta, a dimostrazione del fatto che effettuare il controllo di temperatura permette di migliorare la distribuzione di calore all'interno del giunto.

Difatti, l'effetto del controllo di temperatura è ancora più evidente, prendendo ad esempio i grafici in Figura 8.43 e Figura 8.45, passando da 10 a 30 secondi, a parità di tensione e temperatura esterna, la temperatura del punto interno passa da 152°C a 180 °C.

Tale aumento di temperatura del punto interno all'aumentare del tempo di permanenza si verifica per ogni valore di tensione e temperatura massima impostata, ed è ipotizzata dal software e confermata dalla lettura della fibra ottica posizionata.

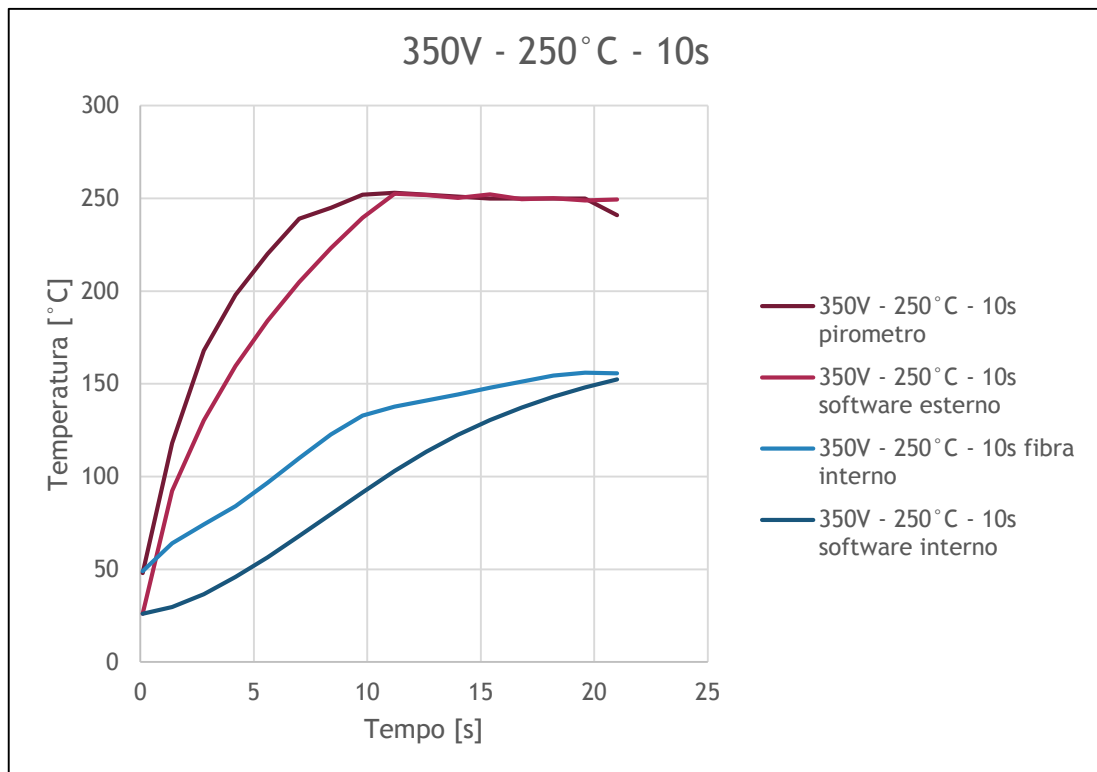


Figura 8.43: Temperatura Giunto 3.1.1

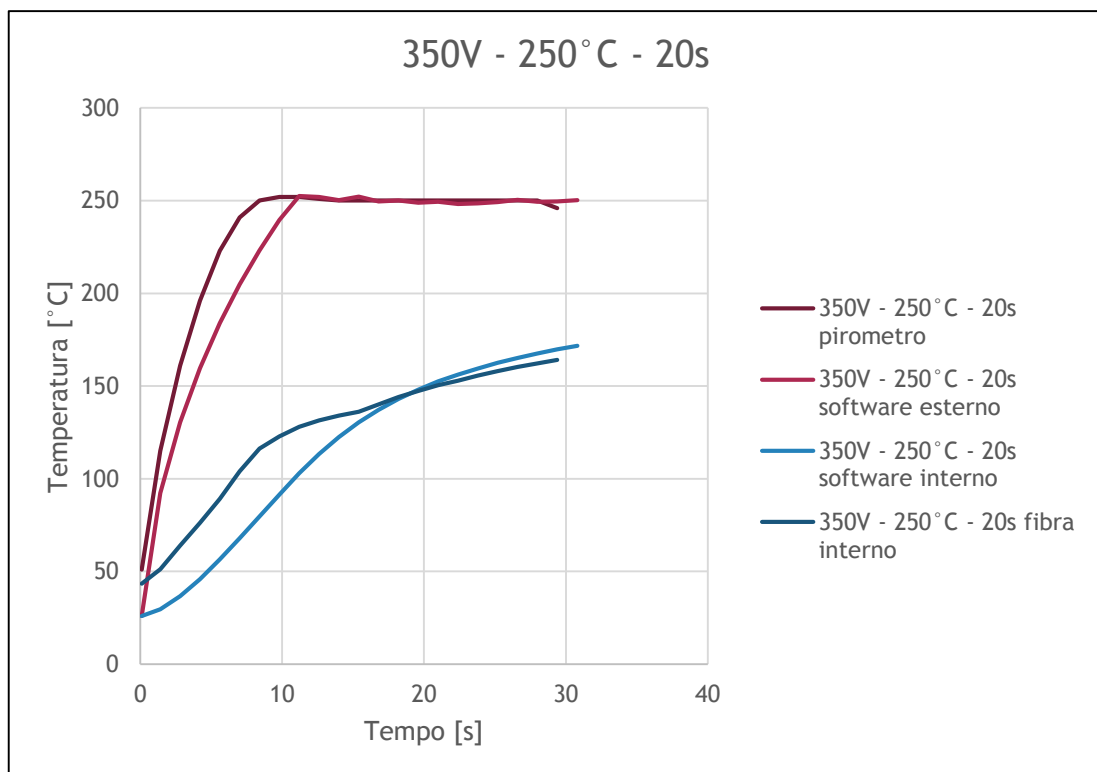


Figura 8.44: Temperatura Giunto 3.1.2

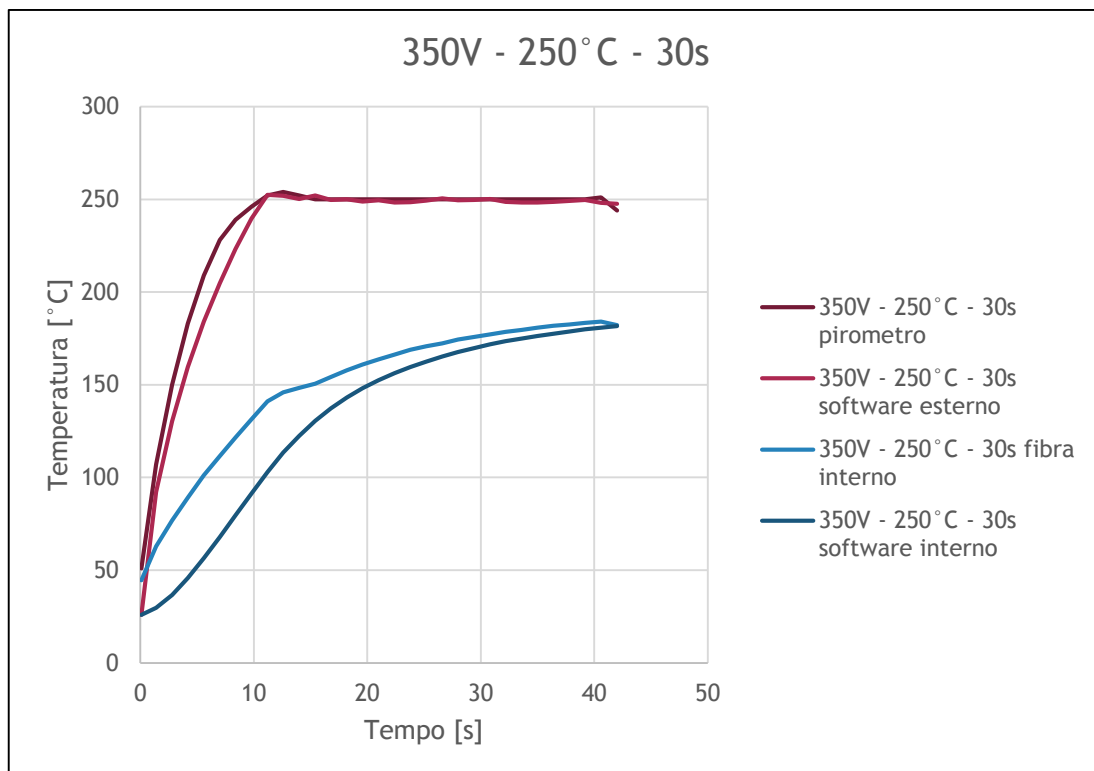


Figura 8.45: Temperatura Giunto 3.1.3

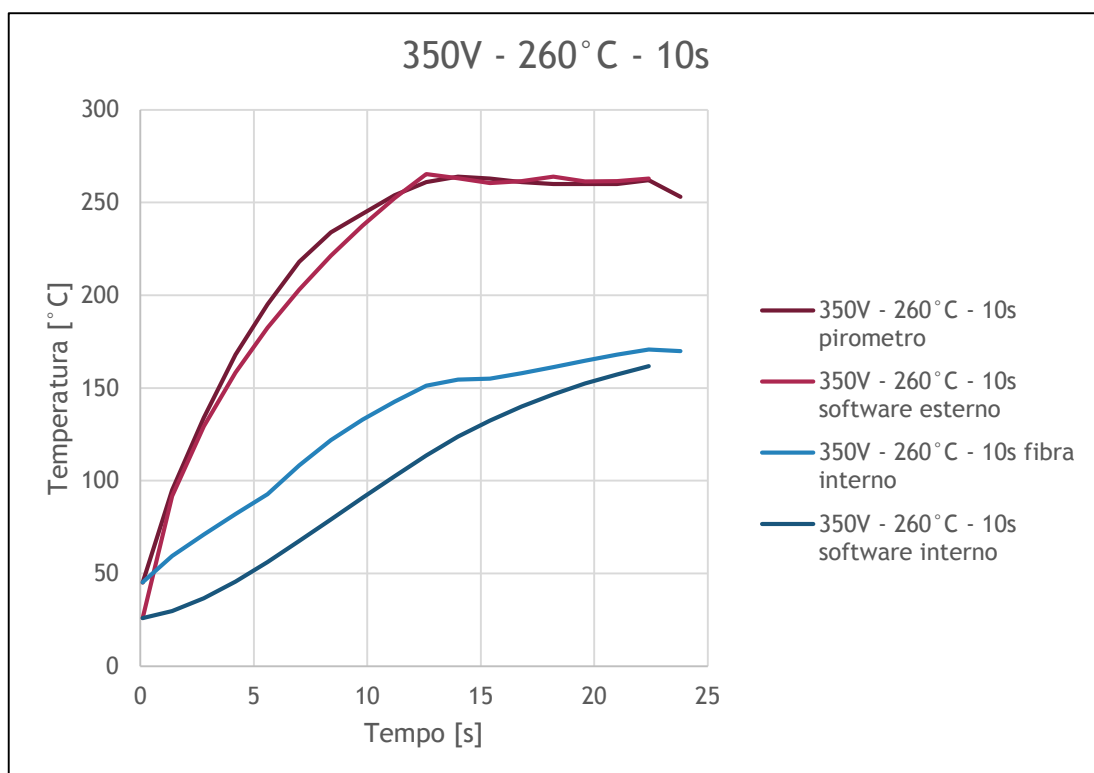


Figura 8.46: Temperatura Giunto 3.2.1

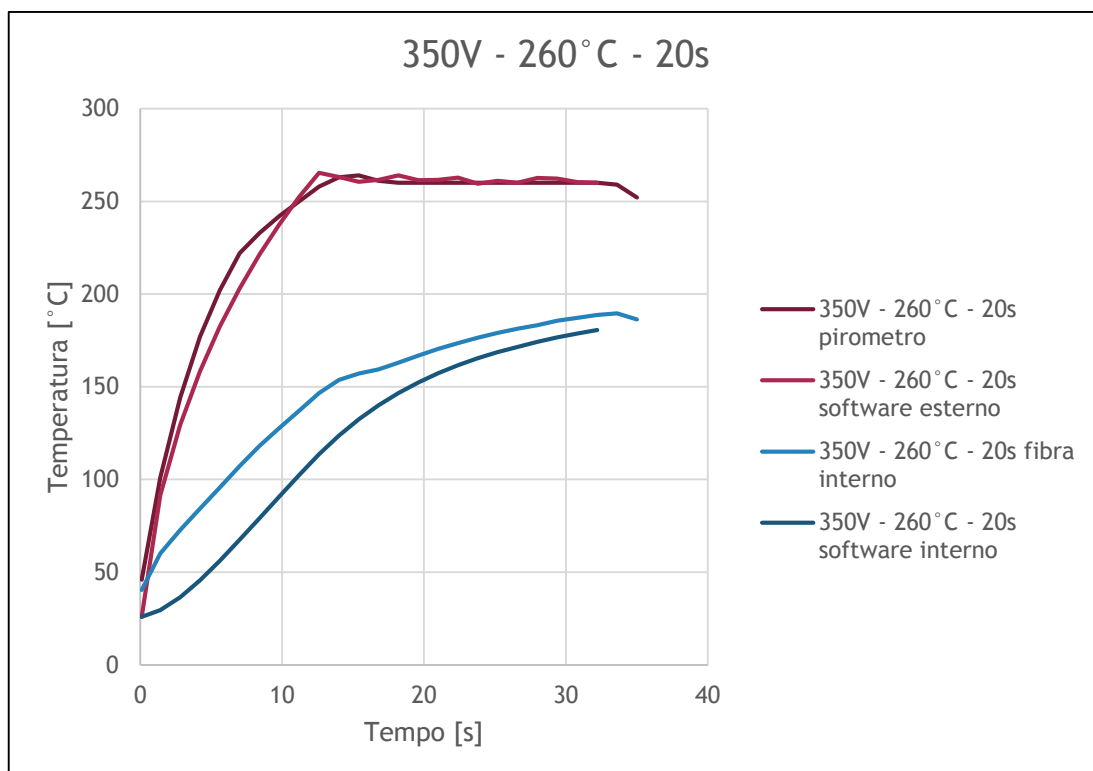


Figura 8.47: Temperatura Giunto 3.2.2

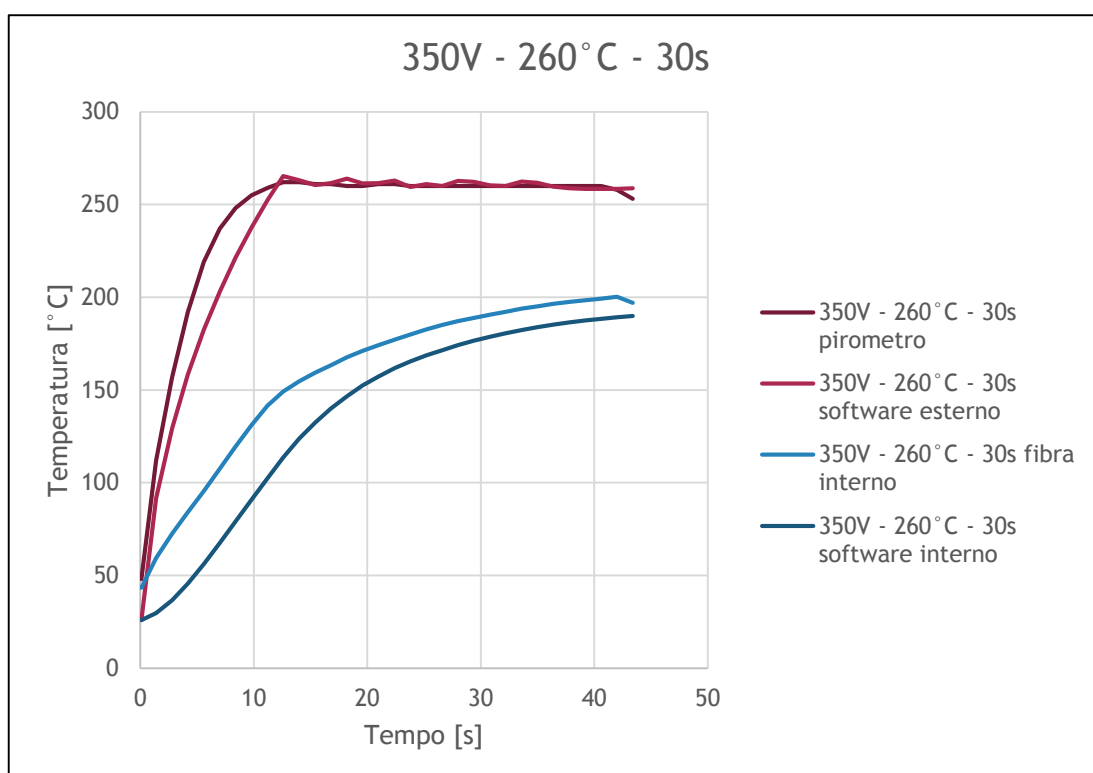


Figura 8.48: Temperatura Giunto 3.2.3

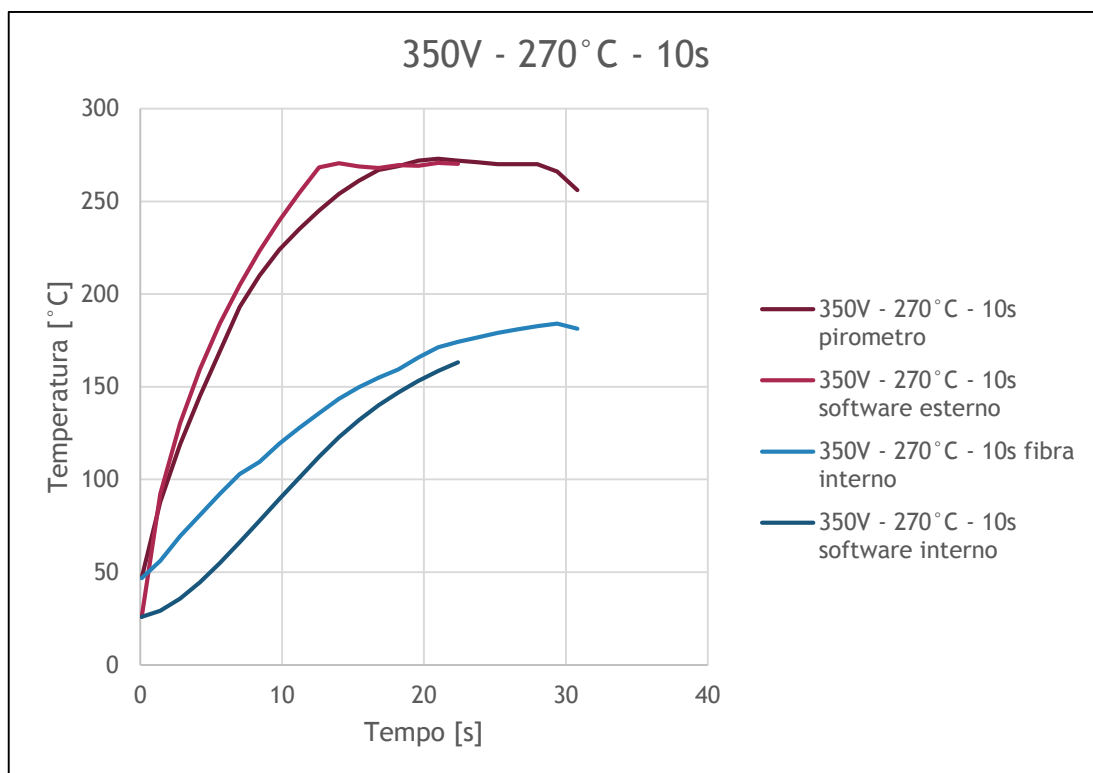


Figura 8.49: Temperatura Giunto 3.3.1

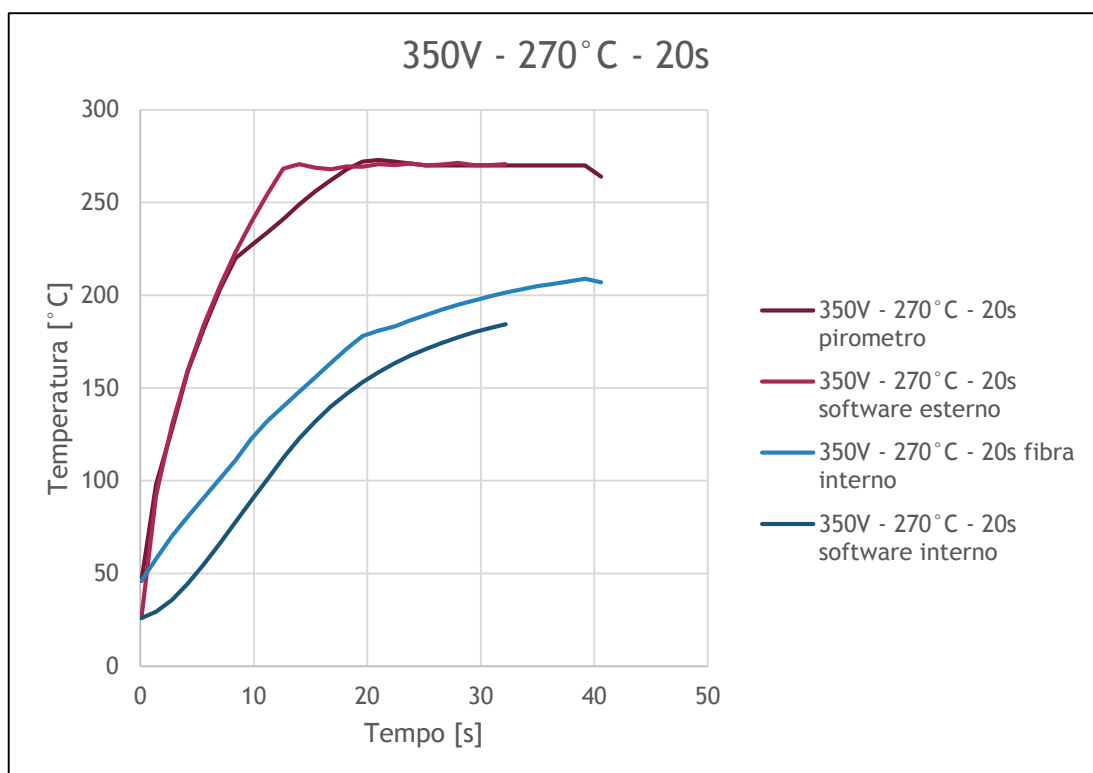


Figura 8.50: Temperatura Giunto 3.3.2

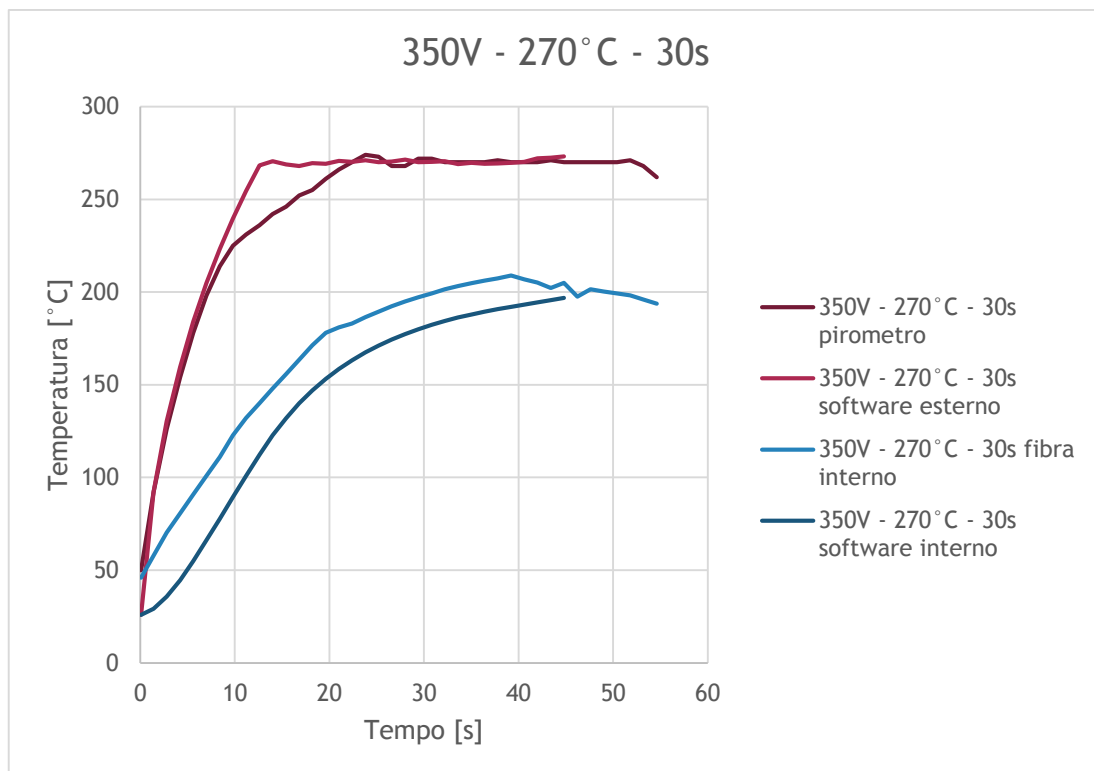


Figura 8.51: Temperatura Giunto 3.3.3

8.3 Risultati prove di Taglio

Prima di procedere allo studio dei parametri è necessario procedere alla omogeneizzazione dei risultati ottenuti dalla prova di taglio, tenendo presente che in alcuni casi l'area effettivamente saldata è diversa tra provino e provino a parità di configurazione e maggiore da quella prospettata in fase di progetto. Bisogna tener conto dell'area giuntata dividendo per questa la resistenza a taglio dei giunti ed ottenendo lo sforzo di taglio. Per misurare l'area ottenuta durante la realizzazione dei giunti si è fatto ricorso al programma ImageJ.



Figura 8.52: Esempio di misurazione effettuata con ImageJ

Questo software permette di rilevare le aree selezionate e, una volta calibrato, di misurarle fornendo la loro estensione in mm². Queste misurazioni sono state eseguite per tutti i giunti dopo di che è stato possibile ottenere lo sforzo di taglio da tutti i carichi rilevati dalla prova di trazione.

Di seguito una tabella con le misurazioni:

Tipologia	Area effettiva carico serie 1 (mm ²)	Area effettiva carico serie 2 con fibra ottica (mm ²)
1.1.1	50	70
1.1.2	60	70
1.1.3	70	120
1.2.1	60	300
1.2.2	60	140
1.2.3	100	210
1.3.1	220	180
1.3.2	180	320
1.3.3	140	240
2.1.1	90	60
2.1.2	110	60
2.1.3	130	60
2.2.1	110	140
2.2.2	60	170
2.2.3	90	320
2.3.1	120	160
2.3.2	120	170
2.3.3	130	200
3.1.1	60	70
3.1.2	60	70
3.1.3	100	90
3.2.1	100	120
3.2.2	180	130
3.2.3	90	190
3.3.1	200	270
3.3.2	230	240
3.3.3	260	290

Tabella 8.1: Valori delle misurazioni effettuate con ImageJ

Alla luce di questa trasformazione che ha tenuto conto delle diverse aree saldate realizzate, i valori risultanti dai test di taglio appaiono più omogenei. Normalizzare i carichi a rottura ottenuti con le aree effettive ha permesso di meglio confrontare i risultati delle prove sperimentali tra le varie configurazioni di giunti ottenuti riducendo se non proprio annullando i vari errori insiti in ogni test come, ad esempio, l'errore dovuto al posizionamento del provino

da saldare rispetto all'induttore e concentrando l'analisi sulle variabili principali della saldatura ad induzione e le interazioni tra queste.

Tipologia	Sforzo serie 1 (MPa)	Sforzo serie 2 con fibra ottica (MPa)	Sforzo medio (MPa)
1.1.1	9.00	7.14	8.07
1.1.2	9.27	11.37	10.32
1.1.3	13.20	24.69	18.95
1.2.1	6.70	20.06	13.38
1.2.2	6.98	21.99	14.49
1.2.3	16.09	23.81	19.95
1.3.1	15.95	21.07	18.51
1.3.2	14.01	26.68	20.35
1.3.3	12.98	17.32	15.15
2.1.1	7.68	11.97	9.82
2.1.2	11.87	6.67	9.27
2.1.3	13.65	8.38	11.01
2.2.1	10.13	15.03	12.58
2.2.2	7.80	16.45	12.12
2.2.3	10.48	28.47	19.47
2.3.1	13.99	11.78	12.89
2.3.2	14.35	16.20	15.28
2.3.3	14.02	13.32	13.67
3.1.1	9.18	7.63	11.00
3.1.2	6.70	5.71	6.21
3.1.3	13.68	18.84	16.26
3.2.1	14.68	19.88	17.28
3.2.2	18.57	20.05	19.31
3.2.3	10.98	20.58	15.78
3.3.1	18.82	28.37	23.60
3.3.2	22.01	28.56	25.28
3.3.3	24.36	30.08	27.22

Tabella 8.2: Sforzi ottenuti dai giunti testati e valor medio

I valori ottenuti sono confrontabili con gli sforzi al taglio ottenuti dai migliori adesivi strutturali, prospettando un concreto utilizzo della saldatura tra compositi termoplastici a fibra di carbonio.

8.4 Analisi statistica dei risultati

Finalmente si può procedere all'analisi dei dati ottenuti. Si è utilizzato un programma di natura statistica già adoperato in precedenza per progettare i test sperimentali: il Minitab.

StdOrder	Voltaggio	Temperatura	Tempo	Stress
1	300	250	10	8.07
2	300	250	20	10.32
3	300	250	30	18.95
4	300	260	10	13.38
5	300	260	20	14.49
6	300	260	30	19.95
7	300	270	10	18.51
8	300	270	20	20.35
9	300	270	30	15.15
10	350	250	10	11.00
11	350	250	20	6.21
12	350	250	30	16.26
13	350	260	10	17.28
14	350	260	20	19.31
15	350	260	30	15.78
16	350	270	10	23.60
17	350	270	20	25.28
18	350	270	30	27.22
19	400	250	10	9.82
20	400	250	20	9.27
21	400	250	30	11.01
22	400	260	10	12.58
23	400	260	20	12.12
24	400	260	30	19.47
25	400	270	10	12.89
26	400	270	20	15.28
27	400	270	30	13.67

Tabella 8.3: Tabella utilizzata in Minitab

La prima rappresentazione è semplicemente un grafico a barre verticali che tiene conto di tutti i valori medi degli sforzi ottenuti dalle prove di taglio sui giunti saldati. L'Interval Plot è particolarmente utile per confrontare i gruppi di fattori e i valori assunti da questi e dalla risposta utilizzata per misurare il fenomeno in analisi.

Si vede a prima vista che mediamente gli sforzi hanno un andamento crescente sia nel tempo (10s, 20s e 30 secondi) che con l'aumentare della temperatura (250°C, 260°C e 270°C) mentre per il voltaggio i valori più grandi si hanno per il valore intermedio rispetto al range utilizzato (300V, 350V e 400V).

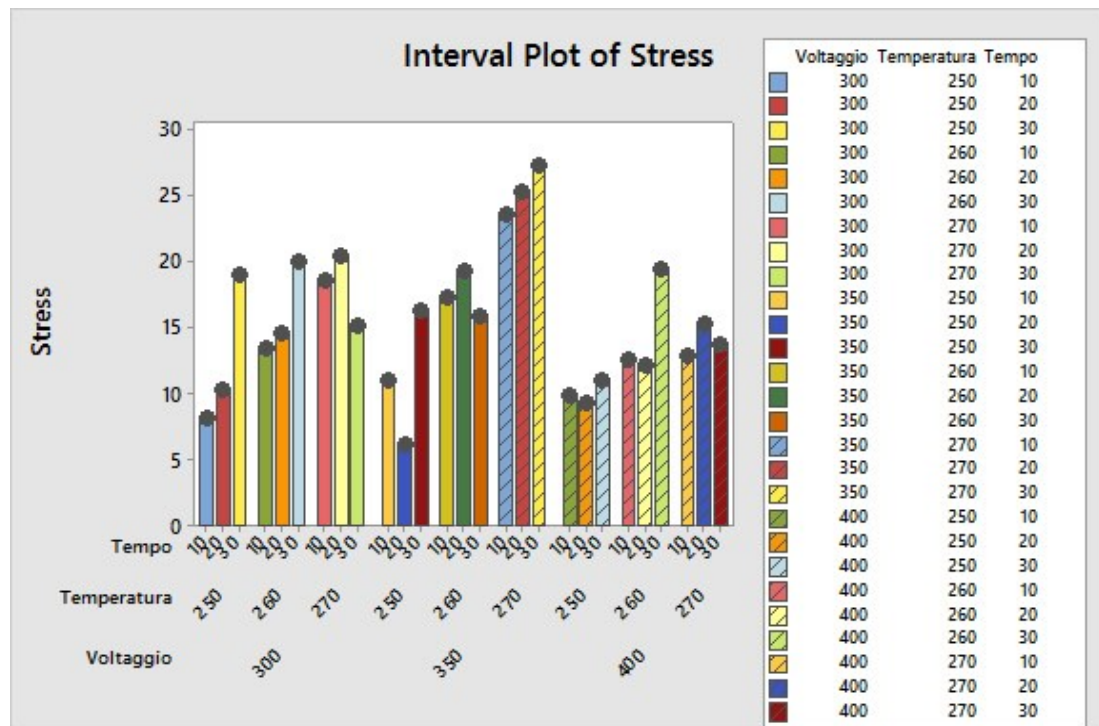


Figura 8.53: Istogramma dei valori di sforzo di taglio

8.4.1 Main Effect Plot

Il Main Effects Plot fornisce per ogni fattore l'andamento della risposta ovvero l'influenza del fattore sulla risposta e la forza relativa tra questi. Minitab traccia per ogni valore del fattore il valore medio in termini della risposta cioè della caratteristica che abbiamo individuato per misurare la bontà del nostro processo, in questo caso la saldatura ad induzione.

Tutti i valori medi dei fattori sono uniti tramite una linea retta: quando la linea è orizzontale (parallela all'asse X) allora non vi è alcun effetto principale, ogni livello della variabile influisce sulla risposta allo stesso modo e la media di risposta è la stessa per tutti i livelli.

Quando la linea non è orizzontale (parallela al asse X) allora è presente un effetto principale e diversi livelli della variabile categorica influenzano la risposta in modo diverso.

Maggiore è la differenza nella posizione verticale dei punti tracciati (più la linea non è parallela alla asse X), maggiore è la portata dell'effetto principale. Per una migliore comprensione sono state disegnate delle linee tratteggiate che uniscono i valori estremi e danno l'idea della pendenza risultante delle linee spezzate.

Il grafico seguente evidenzia come tutti e tre i fattori individuati: il voltaggio, la temperatura e il tempo di permanenza della fase di riscaldamento, hanno una forte influenza sulla saldatura ad induzione anche se tra questi quello che ha la più grande influenza è la temperatura.

Nello specifico il voltaggio presenta un andamento parabolico con concavità verso il basso e massimo per il valore di 350V. Spostandoci oltre questo valore e andando verso i 400V si ha un rapido decremento dello sforzo per cui non conviene procedere aumentando oltre una certa soglia il voltaggio per avere una saldatura migliore.

L'andamento della risposta, al variare del voltaggio, mostra un valore di circa 15.5 MPa per un valore di 300 V, sale fino a raggiungere il suo massimo per 350 V (pari a circa 18 MPa) e decresce fino ai circa 13 MPa dei 400 V; cioè presenta un andamento decrescente di sforzo di taglio man mano che aumenta il voltaggio stesso; si parla in questo caso di influenza negativa.

Ultima considerazione relativa al voltaggio e alla scelta dei parametri in generale: l'aver scelto l'intervallo 300V – 350V – 400V ha permesso di individuare il valore di voltaggio per cui si ottiene il massimo valore per lo sforzo di taglio; difatti, scegliere 2 livelli anziché 3 e, quindi, solo l'intervallo 300V – 400V avrebbe consentito di individuare lo stesso l'influenza negativa del voltaggio nei confronti dello sforzo di taglio ma non avrebbe permesso di individuare il valore massimo per lo sforzo, perdendo capacità di analisi.

La temperatura, invece, nel passare da 250°C a 270°C riesce ad incidere sullo sforzo a taglio del giunto incrementando il suo valore da 11 MPa a 19 MPa, cioè si rientra nel caso di influenza

positiva. Sempre riguardo la temperatura si evidenzia che l'andamento è crescente in modo lineare e questo è assolutamente aderente al fenomeno fisico nel senso che più aumenta la temperatura più c'è introduzione di calore nel giunto e, quindi, rammollimento della matrice con fusione dei substrati.

Il tempo, infine, presenta sì un andamento crescente all'aumentare dei secondi di utilizzo della macchina ma la variazione dello sforzo è minore che nel caso della temperatura ovvero il tempo ha meno effetto sul parametro (la cosiddetta "risposta" in gergo statistico) definito per misurare la saldatura ad induzione: lo sforzo di taglio denominato "Stress".

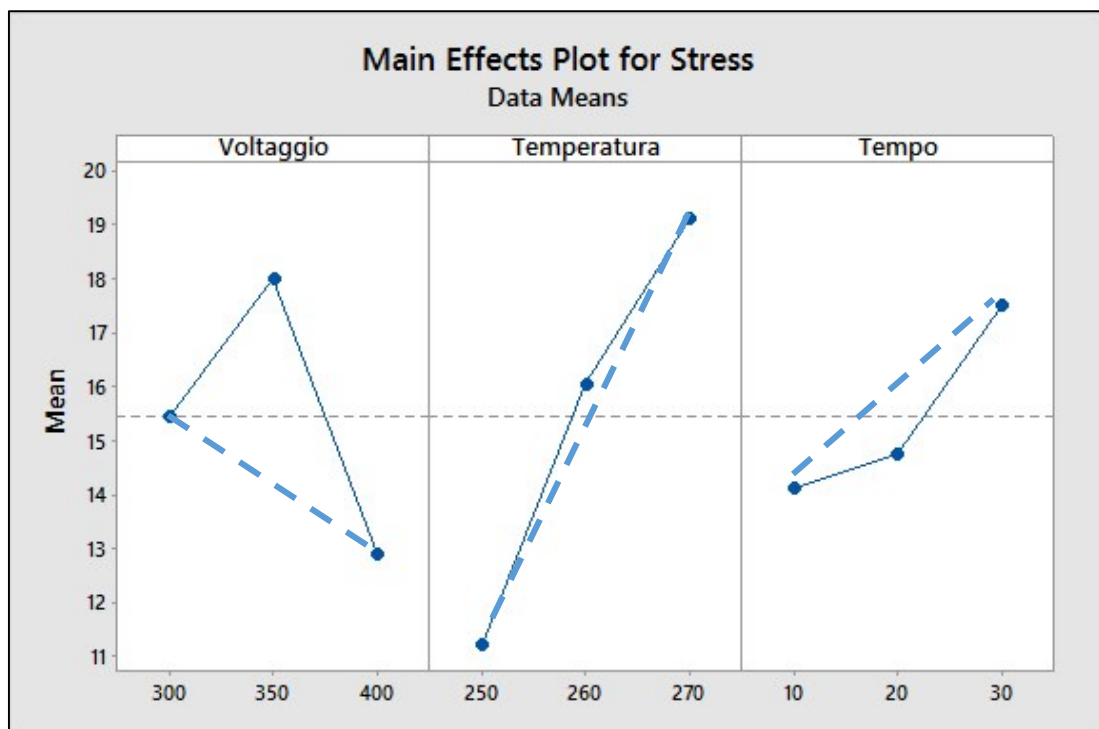


Figura 8.54: Grafico degli effetti principali dei fattori Voltaggio, Temperatura e Tempo sulla risposta Stress

8.4.2 Interaction Plot

Entrando più a fondo nell'analisi bisogna studiare le interazioni dei fattori tra di loro, avendo sempre come parametro di misura la risposta individuata nel presente lavoro cioè lo sforzo di taglio. Il Minitab mette a disposizione l'Interaction Plot, come in figura seguente.

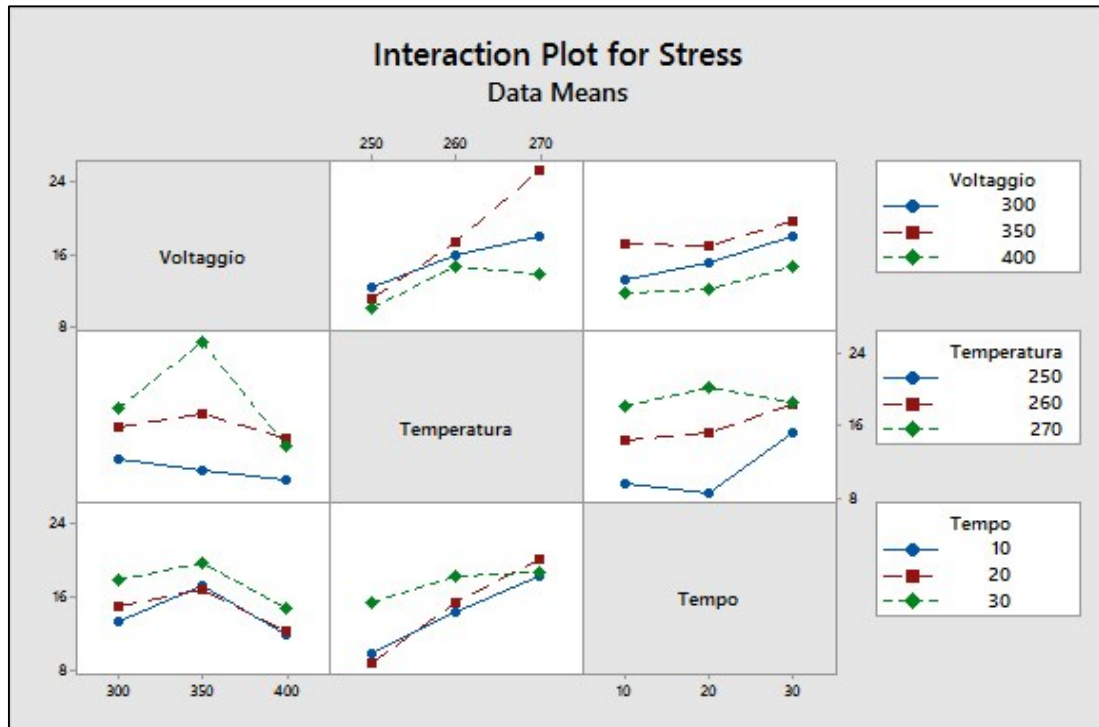


Figura 8.55: Interazione tra fattori Voltaggio, Temperatura e Tempo sulla risposta Stress

L'Interaction Plot crea un unico grafico di interazione per due fattori, o una matrice di grafici di interazione per tre o più fattori.

Un diagramma di interazione è un grafico che interseca ogni livello di un fattore con il livello di un secondo fattore mantenuto costante.

L'Interaction Plot è utile per valutare la presenza di interazione tra due o più fattori nei confronti della risposta al fenomeno in analisi.

Il diagramma segue le stesse logiche del Main Effects Plot, spingendosi sulle interazioni del primo ordine tra i fattori, cioè studiando gli effetti sullo sforzo di taglio generato dalla interazione del Voltaggio con la Temperatura e il Tempo, della Temperatura con il Voltaggio e il Tempo, del Tempo con il Voltaggio e la Temperatura.

L'interazione è presente quando la risposta ad un livello di un fattore dipende dal livello di altri fattori. Le linee parallele in un grafico di interazione indicano nessuna interazione mentre

maggiore è la pendenza delle linee rispetto a quelle parallele, maggiore è il grado di interazione tra i fattori. Per utilizzare l'Interaction Plot, i dati devono essere disponibili per tutte le combinazioni di livelli, come si è fatto in questo lavoro; ancora una volta si dimostra l'efficacia di una progettazione mirata degli esperimenti al fine di evidenziare le interazioni tra variabili per il fenomeno in esame.

Tale approccio mirato è stato garantito dall'utilizzo del DOE e dall'uso del programma Minitab. Confrontando a questo punto le pendenze delle linee è possibile confrontare la grandezza relativa degli effetti.

Nella Figura 8.56 è riportato lo stesso grafico con un aiuto per la migliore comprensione: i riquadri di colori diversi sono relativi alla legenda inclusa nel riquadro stesso, le frecce indicano di volta in volta le ascisse dei singoli diagrammi e le ordinate sono sempre rappresentate dalla risposta Stress, cioè dallo sforzo di taglio ottenuto dalle prove sperimentali.

Ad esempio, nella prima riga si studiano le interazioni del voltaggio con la temperatura (primo riquadro) ed il tempo (secondo riquadro); nella seconda riga le interazioni della temperatura con il voltaggio (primo riquadro) ed il tempo (secondo riquadro); infine, nella terza riga quelle tra tempo e voltaggio (primo riquadro) e tra tempo e temperatura (secondo riquadro).

Ultimo dettaglio prima di procedere all'analisi: l'Interaction Plot studia le interazioni tra fattori ma fornisce anche conferme sull'importanza dei fattori stessi nei confronti del fenomeno in oggetto cioè lavora in aggiunta rispetto al Main Effects Plot confermando gli effetti diretti dei fattori sulla risposta.

Analizzando la prima riga si vede che tra il voltaggio e la temperatura vi è una debole interazione, peraltro negativa, mentre tra il voltaggio e il tempo di permanenza l'interazione è ancora più debole della precedente e continua ad essere negativa. L'interazione negativa deve essere considerata, almeno in prima istanza, come non additività degli effetti dei fattori; cioè i due fattori che si stanno confrontando, operando insieme, non mostrano effetti migliorativi nei confronti dello sforzo di taglio.

Per quanto riguarda, invece, l'importanza dei parametri, si può affermare che il principale effetto del voltaggio nei confronti della saldatura ad induzione di ottiene per un valore di 350V mentre in generale mantiene un basso profilo influenzando scarsamente lo sforzo di taglio.

Passando alla temperatura e al tempo si conferma l'importanza di questi parametri con un maggior peso della temperatura nei confronti del tempo.

Quanto visibile in questi primi due diagrammi è coerente con quanto osservato nei vari esperimenti sia preliminarmente che in questa sessione di prove: il voltaggio è il valore

generato dalla macchina ad induzione ed è la prima variabile immessa nel processo mentre la temperatura è la diretta conseguenza di tale immissione e regola il fenomeno all'interno del materiale stesso; si è osservato cioè che per avere una buona resistenza al taglio del giunto una volta definito il voltaggio è importante che si raggiunga almeno la temperatura giusta per avviare il processo ottimizzando il risultato finale agendo sul tempo di permanenza della fase di riscaldamento. Aumentando il voltaggio in generale si ha una diminuzione dello sforzo di taglio del giunto.

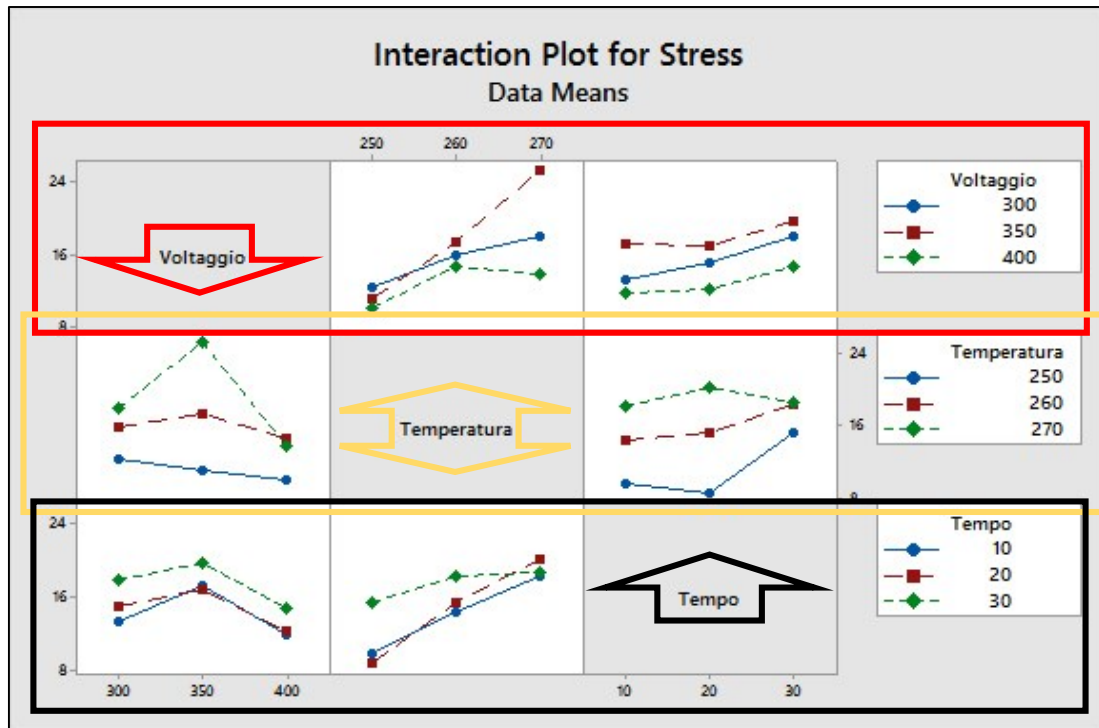


Figura 8.56: Interaction Plot illustrato

Passando all'analisi della seconda riga dal primo riquadro, si può notare come vi sia una forte interazione tra temperatura e voltaggio ma solo nel caso che il processo di saldatura operi a 270°C mentre l'interazione a temperatura più basse è nulla. Circa l'influenza dei parametri sulla risposta il primo riquadro ci conferma l'importanza, seppur minima e negativa, del voltaggio nei confronti dello stress di taglio mentre la temperatura risulta il fattore più influente in assoluto. Il secondo riquadro conferma l'esistenza di interazione tra temperatura e tempo mentre gli effetti principali sullo sforzo sono molto evidenti per la temperatura e molto meno per il tempo eccetto il caso in cui la temperatura è pari a 250°C. Infine nella terza riga è possibile studiare le interazioni tra tempo e voltaggio e tra tempo e temperatura. Nel primo riquadro si vede la scarsa, quasi assente, interazione tra tempo e voltaggio mentre nel secondo l'interazione tra tempo e temperatura esiste ed è forte.

Circa gli effetti principali il voltaggio si presenta nuovamente come un parametro debolmente e negativamente influente nei confronti della saldatura ad induzione; la temperatura, invece, si mostra essere ancora il parametro più influente per la realizzazione di una buona giunzione; il tempo, infine, è influente principalmente per valori non superiori ai 20s.

8.4.3 Multi-Vari Chart

Continuando nell'analisi dell'influenza dei fattori Voltaggio, Temperatura e Tempo nei confronti dello Stress e tra essi stessi, si ricorre all'ultima serie di grafici che scendono nel dettaglio di tali relazioni: il Multi-Vari Chart.

Ricordiamo nuovamente che un'interazione tra fattori avviene quando la variazione sulla risposta (sullo Stress cioè sullo sforzo di taglio) dal passaggio da un livello ad un altro dello stesso fattore dipende dal livello di un secondo fattore.

Il grafico mostra le medie a ogni livello del fattore e per ogni fattore. Ad esempio, in un grafico a tre fattori (fattore A, fattore B e fattore C, ciascuno con tre livelli cioè tre valori medi) si ha la seguente simbologia:

- Ogni pannello rappresenta un livello del fattore C (il Tempo). I diamanti verdi rappresentano le medie per ciascun livello del fattore. La linea continua verde collega le medie di ogni livello del fattore C.
- Ogni pannello è diviso in sezioni che corrispondono a ciascun livello del fattore B (la Temperatura). I quadrati rossi rappresentano le medie per ciascun livello del fattore. La linea rossa tratteggiata collega le medie di ogni livello del fattore B.
- Ogni sezione di un pannello ha una serie di simboli che corrispondono a ciascun livello del fattore A (il Voltaggio). I diversi simboli rappresentano ciascun livello del terzo fattore. La linea continua blu collega le medie di ogni livello del fattore A.

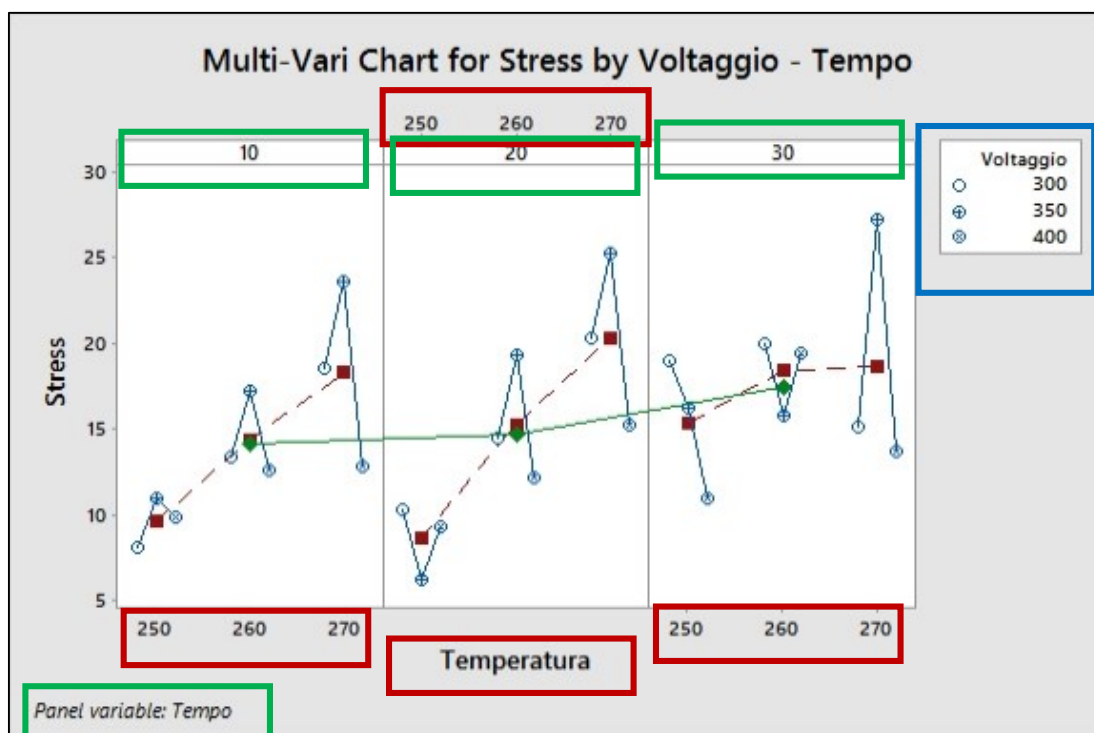


Figura 8.57: Multi-Vari Chart illustrato

Di seguito saranno riportati 6 grafici Multi-Vari ed ognuno di questo sarà ripetuto 3 volte, per quanti sono i nostri fattori (Voltaggio, Temperatura e Tempo), evidenziando i dati significativi per i parametri in oggetto. Sarà come analizzare più a fondo i 6 riquadri dell'Interaction Plot in precedenza, alla ricerca di ulteriori considerazioni per una migliore comprensione del fenomeno.

I grafici vanno letti sempre secondo la stessa logica, verificando a primo impatto le influenze dei fattori Voltaggio, Temperatura e Tempo sullo Stress (lo sforzo di taglio) in base alle altezze delle linee che rappresentano gli andamenti delle varie variabili. La didascalia delle immagini supporterà l'informazione che si vuole estrarre dal grafico.

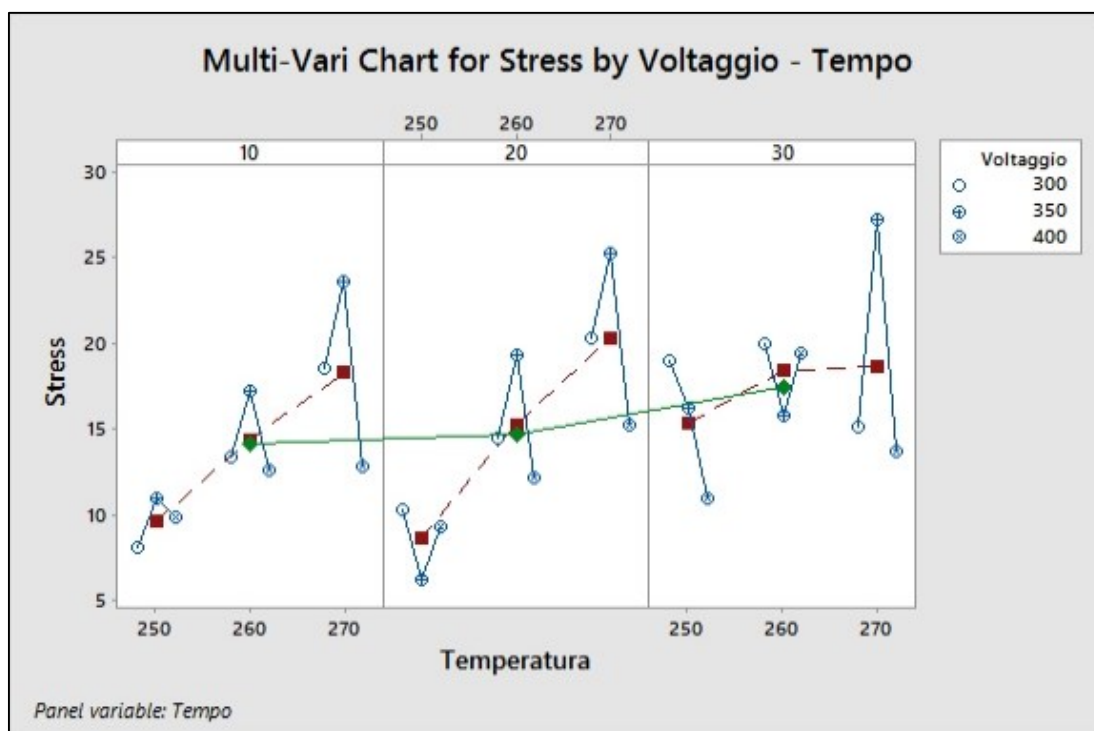


Figura 8.58: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Voltaggio, Temperatura e Tempo

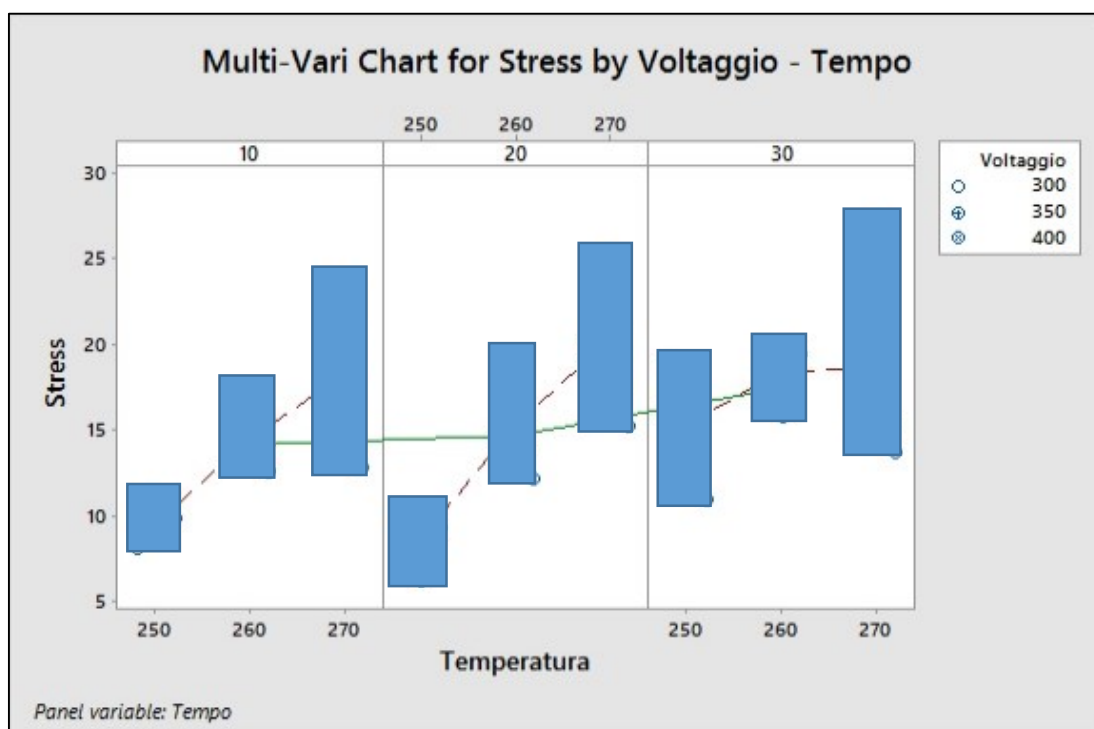


Figura 8.59: Influenza del Voltaggio sullo Stress

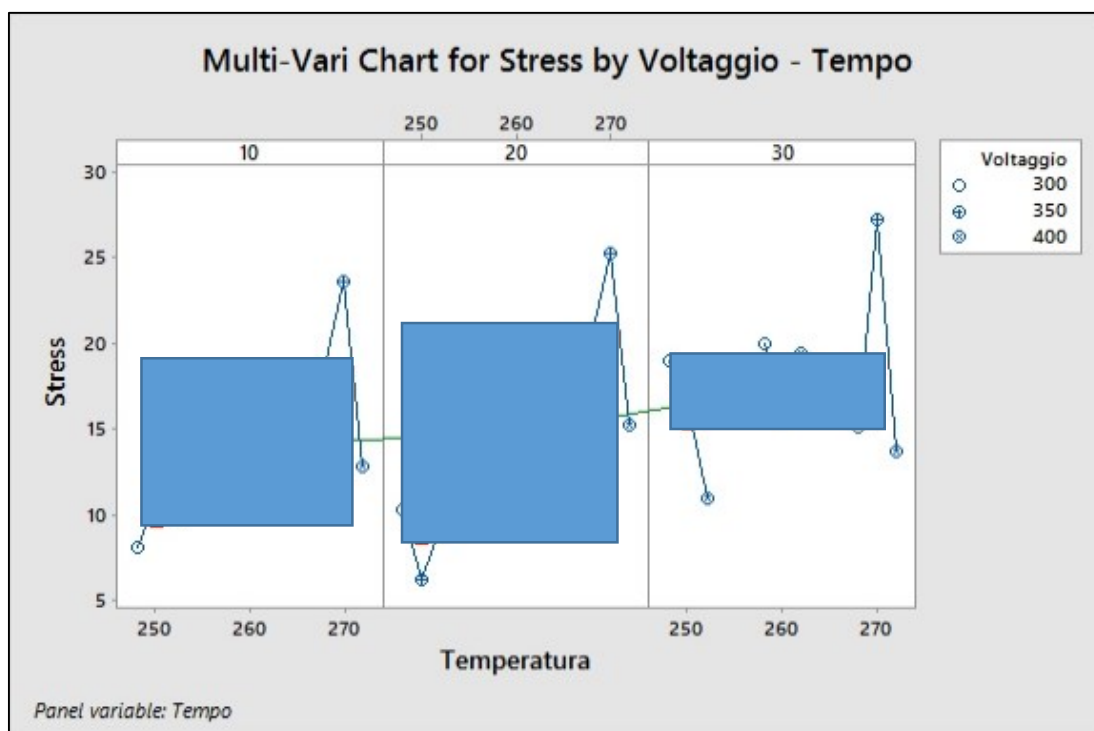


Figura 8.60: Influenza della Temperatura sullo Stress

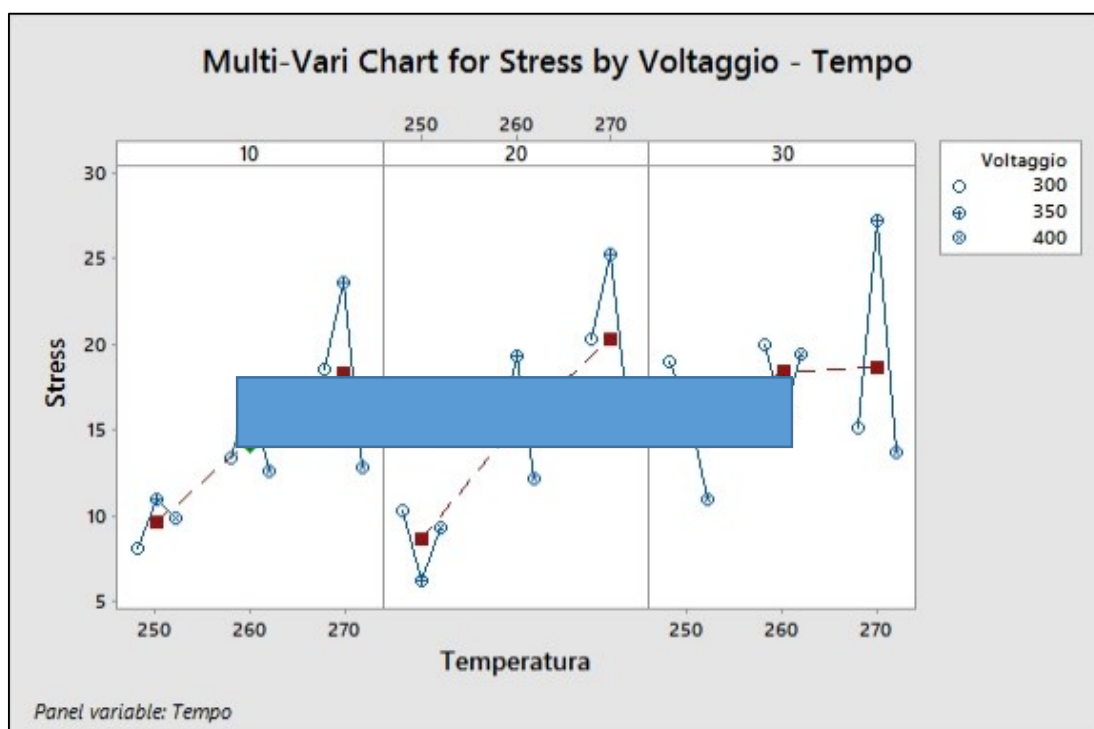


Figura 8.61: Influenza del Tempo sullo Stress

Come si vede dalla Figura 8.72 alla Figura 8.74 nella Multi-Vari Chart sono state evidenziate con dei riquadri trasparenti le influenze delle varie grandezze prese in esame (i fattori: il Voltaggio, la Temperatura ed il Tempo). Tale importanza è percepibile ad occhio graficamente semplicemente osservando le altezze dei riquadri ovvero di quanto la grandezza in analisi (il “fattore” in termini statistici) influenzi la grandezza che vogliamo studiare (la “risposta” in termini statistici).

Risulta evidente che nel caso selezionato il voltaggio e la temperatura hanno grande influenza nei confronti del lap-shear stress ovvero nel nostro parametro individuato per misurare la bontà della saldatura.

Scendendo nel dettaglio, partendo dal grafico del voltaggio, si vede che l’influenza del voltaggio è predominante solo nel caso della temperatura di 270 °C mentre tra le temperature le influenze maggiori si rilevano nel caso di 10s e 20 secondi.

Il tempo, infine, ha poca influenza sulla saldatura e fino a 20s non sortisce effetto. Bisogna anche osservare, sempre in riferimento al voltaggio, come l’importanza di questo derivi dalla presenza di un valore massimo nell’intervallo selezionato cioè che il voltaggio parte da un certo valore di sforzo, cresce fino ad un massimo e poi subisce un veloce decremento del valore di sforzo per cui è necessario prestare molta attenzione nella gestione di questo parametro.

Diversa è l’importanza, positiva in assoluto, della temperatura che nell’ampio riquadro evidenziato mostra sempre un andamento crescente, senza cadute di sforzo di taglio.

Nel seguito ci sono le rappresentazioni dello stesso Multi-Vari Chart per tutte le altre configurazioni, costruendo sempre i riquadri al fine di evidenziare le importanze relative dei vari fattori.

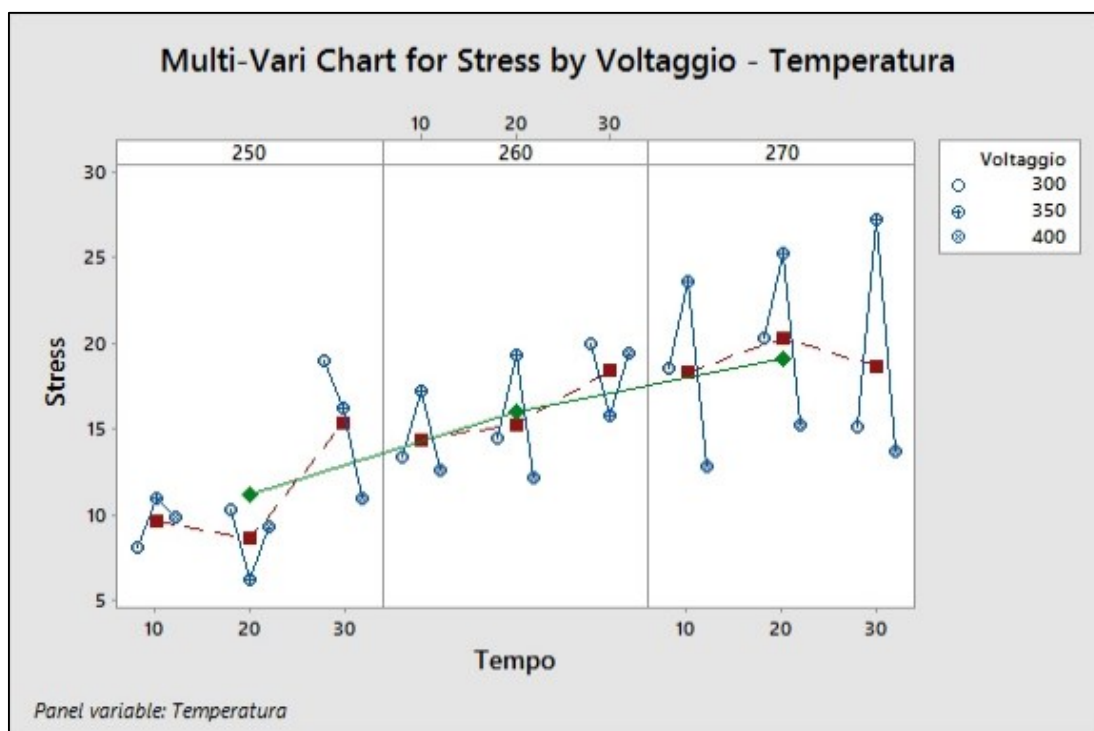


Figura 8.62: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Voltaggio, Tempo e Temperatura

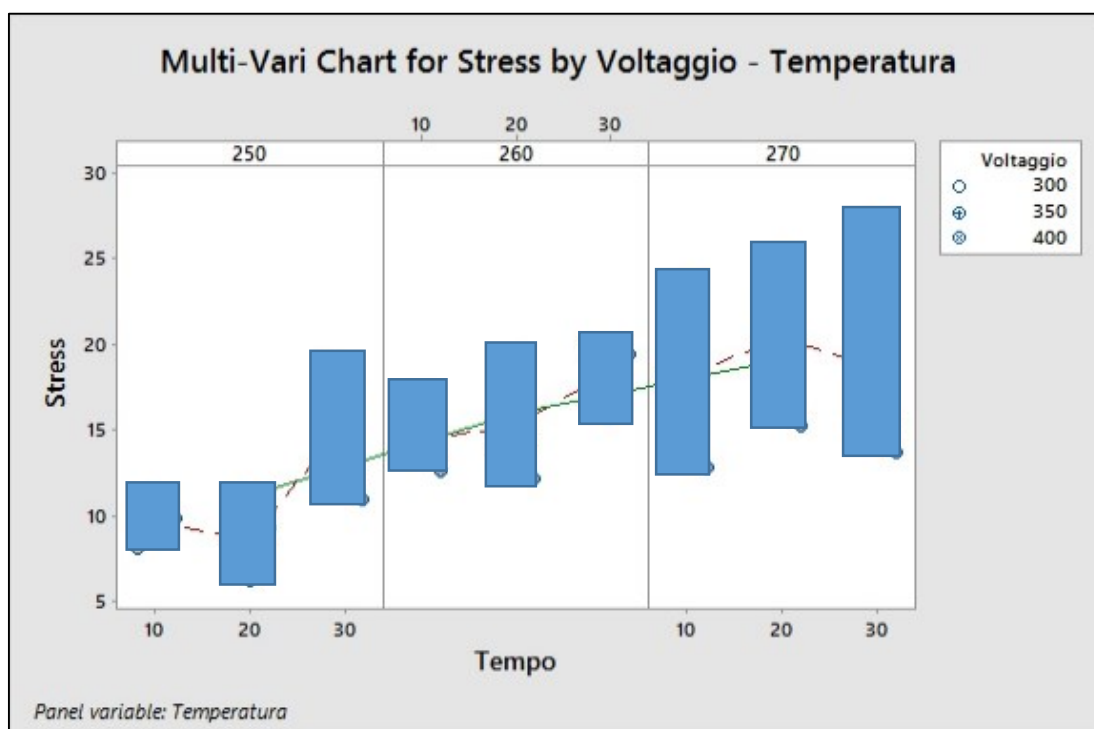


Figura 8.63: Influenza del Voltaggio sullo Stress

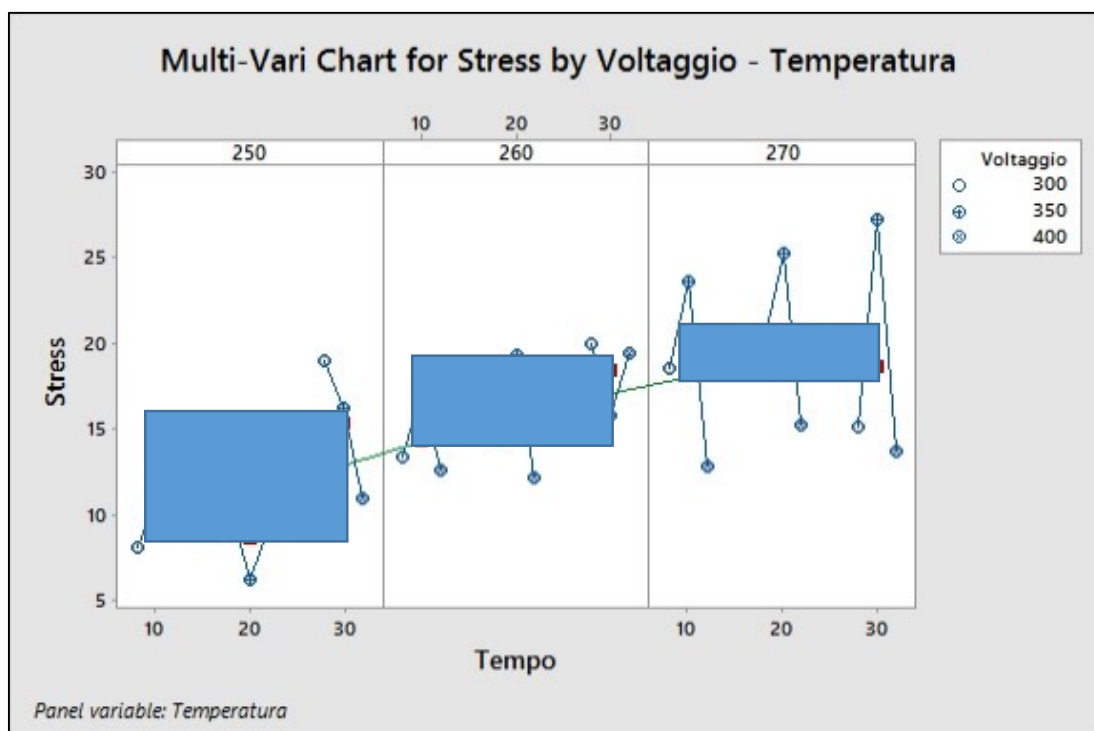


Figura 8.64: Influenza del Tempo sullo Stress

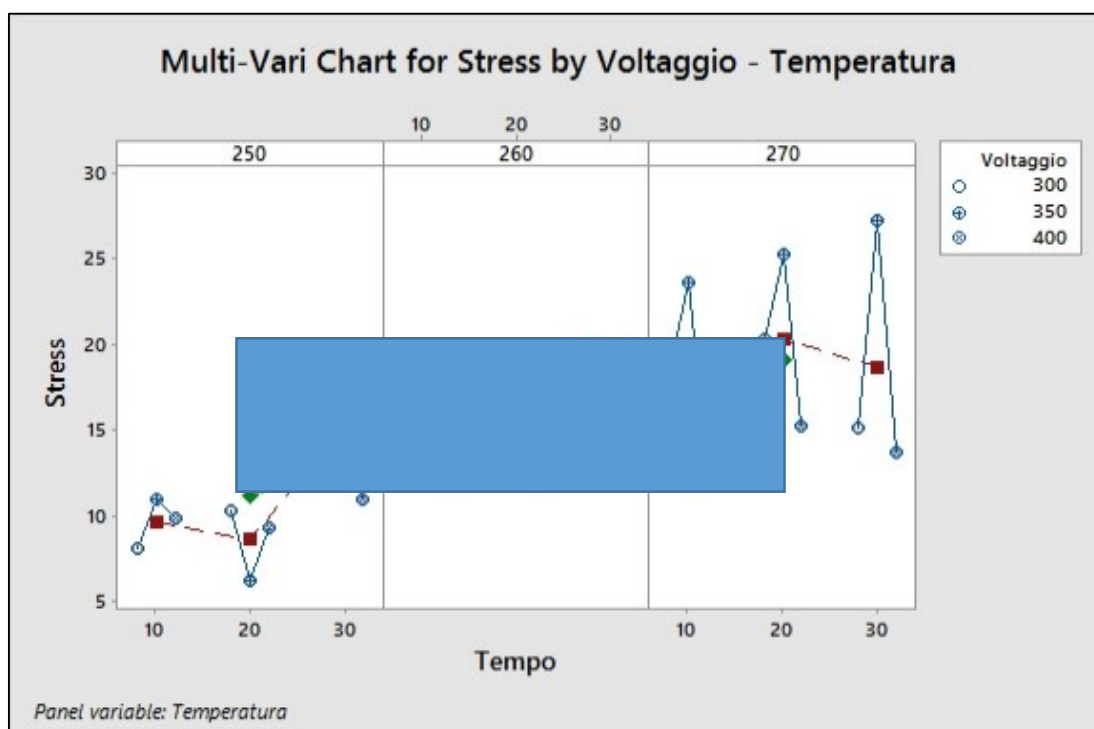


Figura 8.65: Influenza della Temperatura sullo Stress

Anche secondo questa visualizzazione il voltaggio e la temperatura svolgono un ruolo fondamentale. Nello specifico si conferma che il voltaggio è il fattore più importante per la temperatura di 270 °C e all'interno di questo box il massimo lap-shear stress si presenta per il tempo di 30 secondi. Ricorrono ancora le stesse considerazioni fatte per il Multi-Vari precedente ovvero bisogna saper individuare il valore che garantisce il maggiore sforzo di taglio altrimenti è bene ripiegare sulla temperatura di 260°C che permette una minore resistenza ma poco sensibile al tempo.

Nella schematizzazione centrale si può notare come il tempo sia importante per la temperatura di 250 °C nel senso che più tempo riscaldamento ad una temperatura impostata di 250 °C più aumento la resistenza del giunto, tuttavia lo sforzo di taglio si presenta più alto e con meno fluttuazioni per il valore di 260°C.

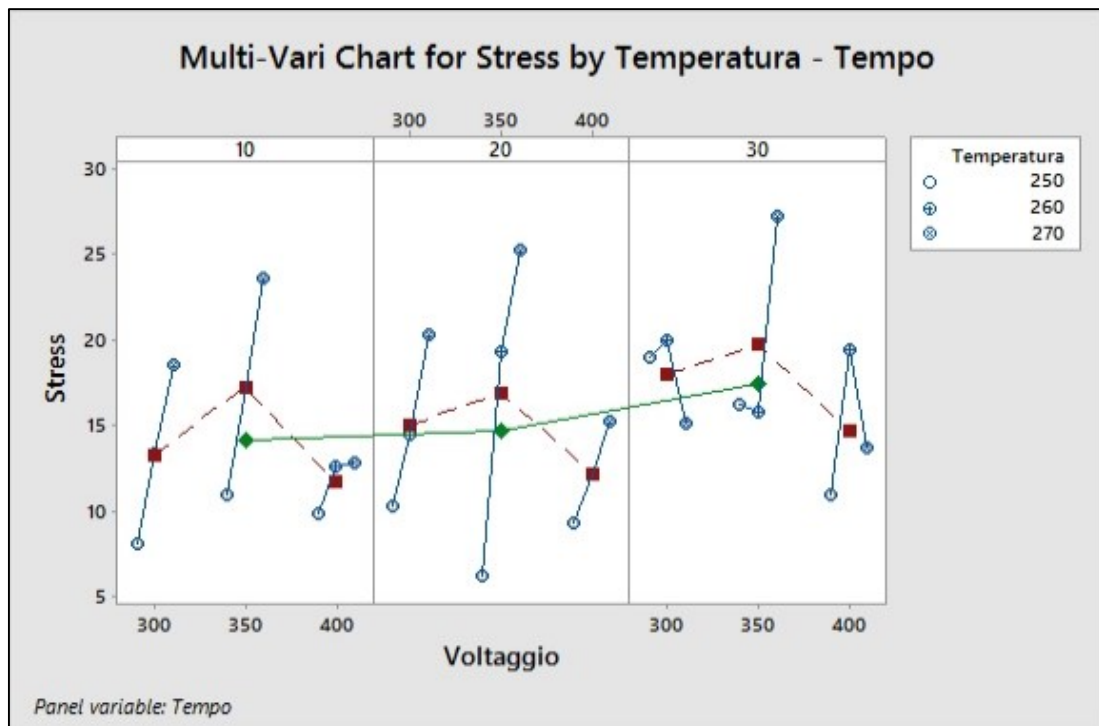


Figura 8.66: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Temperatura, Voltaggio e Tempo

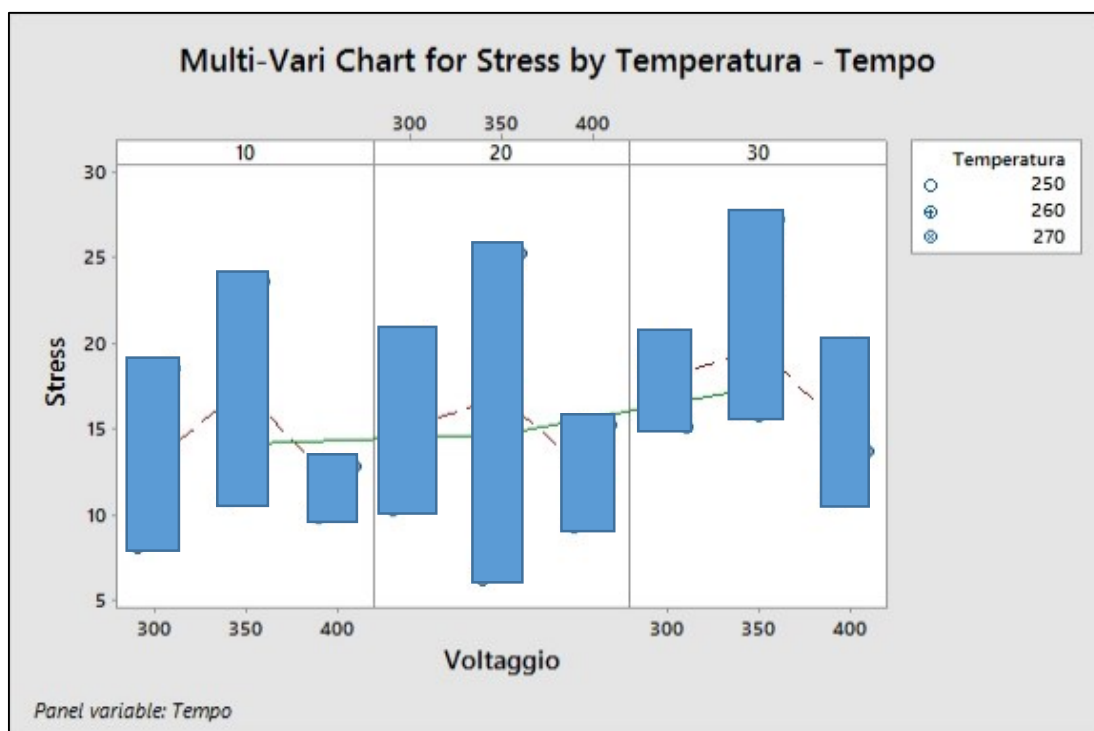


Figura 8.67: Influenza del Temperatura sullo Stress

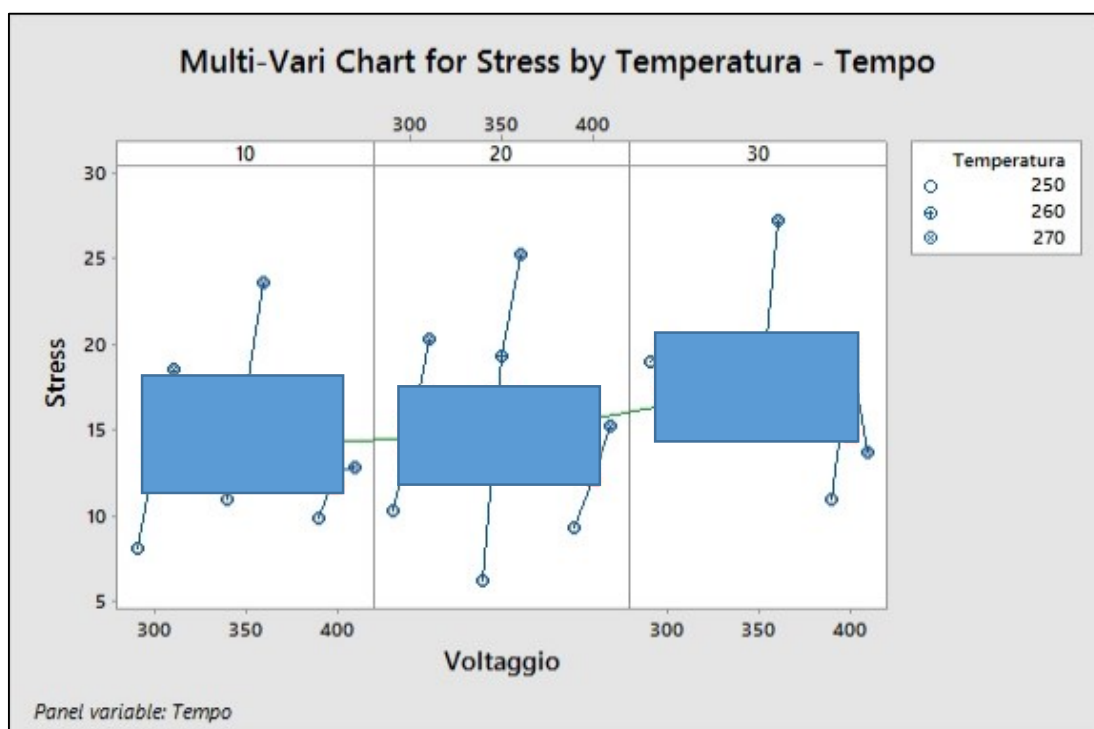


Figura 8.68: Influenza del Voltaggio sullo Stress

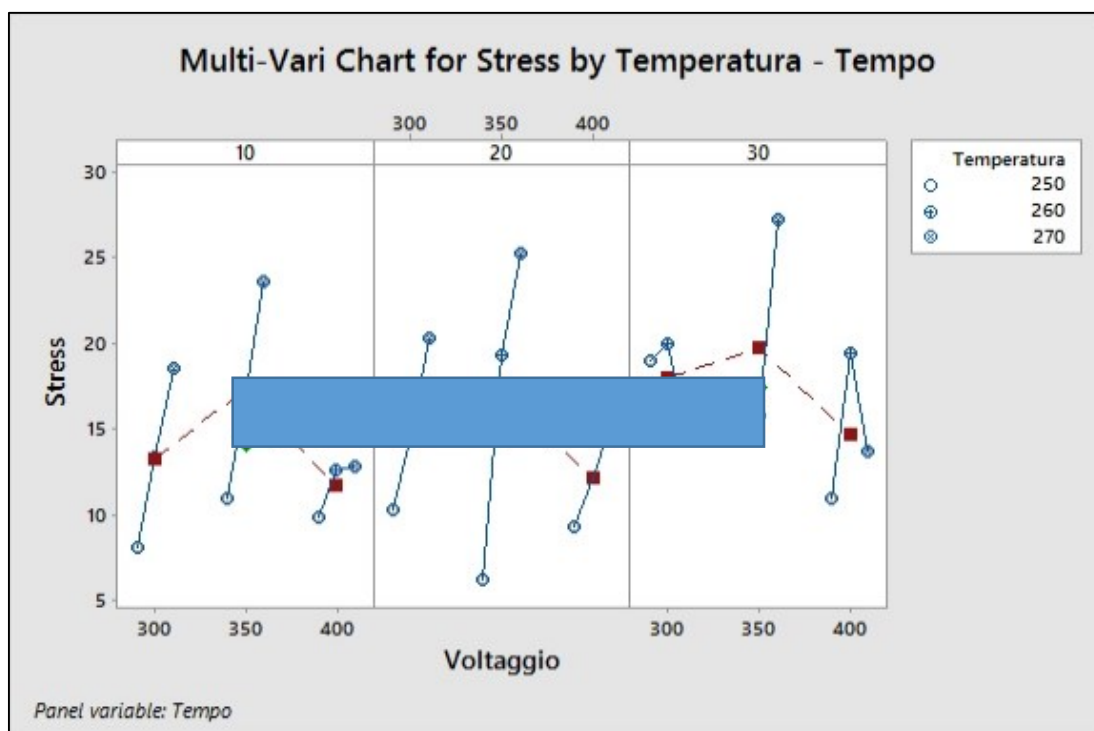


Figura 8.69: Influenza del Tempo sullo Stress

Si conferma ulteriormente l'influenza dei fattori Vtaggio e Temperatura nei confronti dello Stress ma l'occasione di ulteriori rappresentazioni consente di specificare nel dettaglio le interazioni. Per le temperature si evidenzia che i migliori incrementi di resistenza si hanno per il valore di 350 V e per 20 secondi di tempo di riscaldamento. Man mano che poi si aumenta la temperatura, partendo dai 250 °C ed arrivando ai 270 °C, si ha una maggiore resistenza al taglio. Si nota ancora come al variare del vtaggio l'effetto della temperatura può essere peggiorativo per cui è fondamentale poter disporre di strumenti predittivi per una corretta gestione del fenomeno.

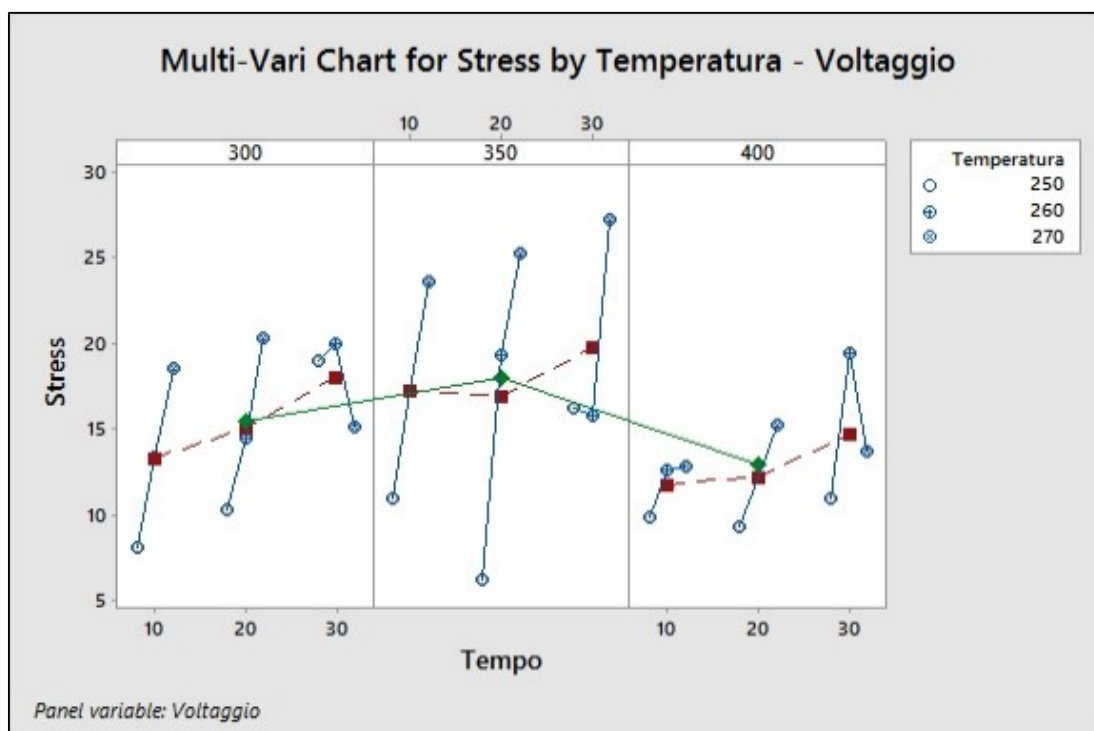


Figura 8.70: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Temperatura, Tempo e Voltaggio

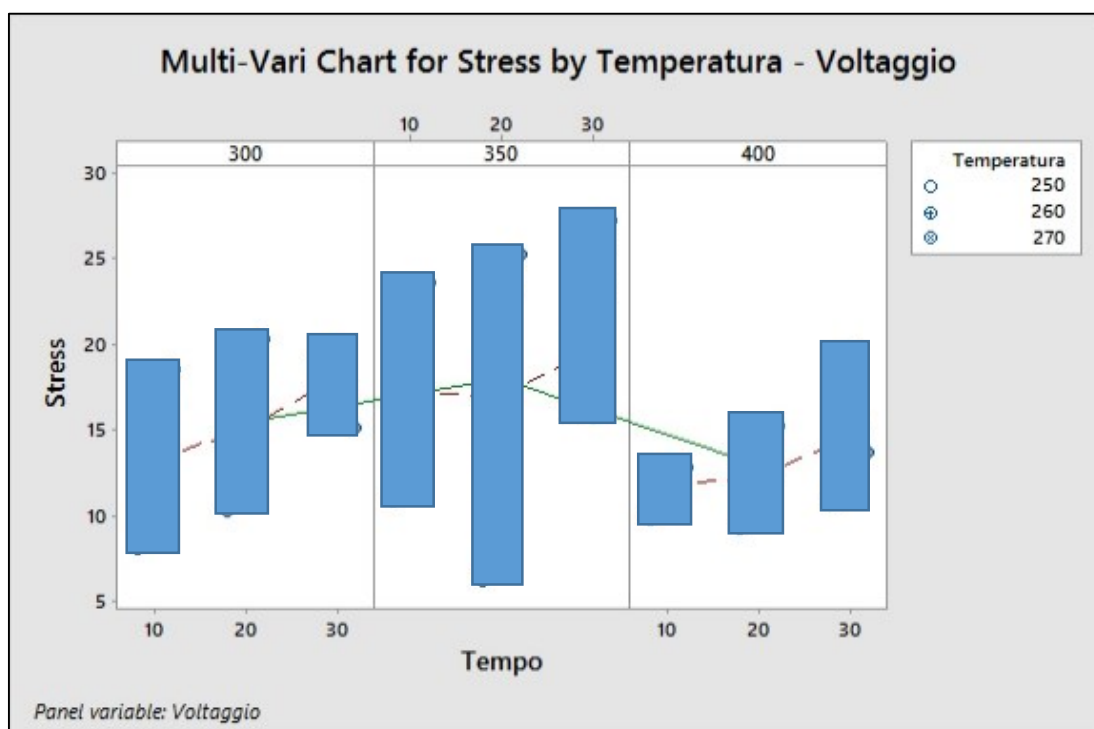


Figura 8.71: Influenza della Temperatura sullo Stress

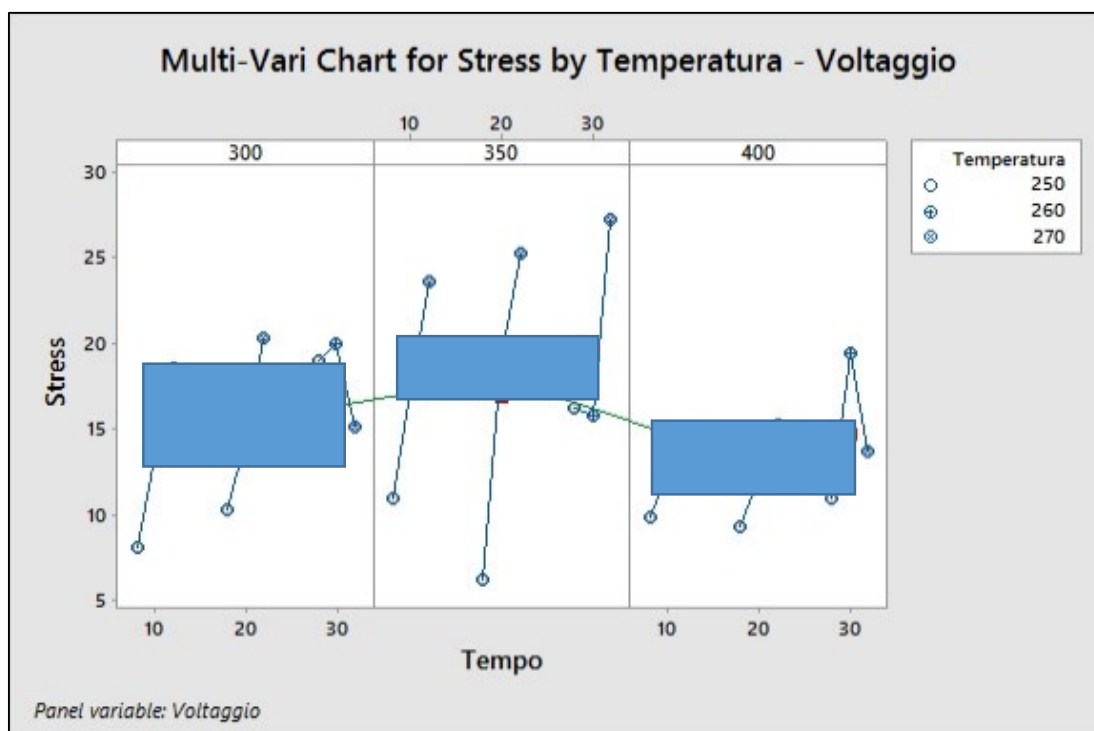


Figura 8.72: Influenza del Tempo sullo Stress

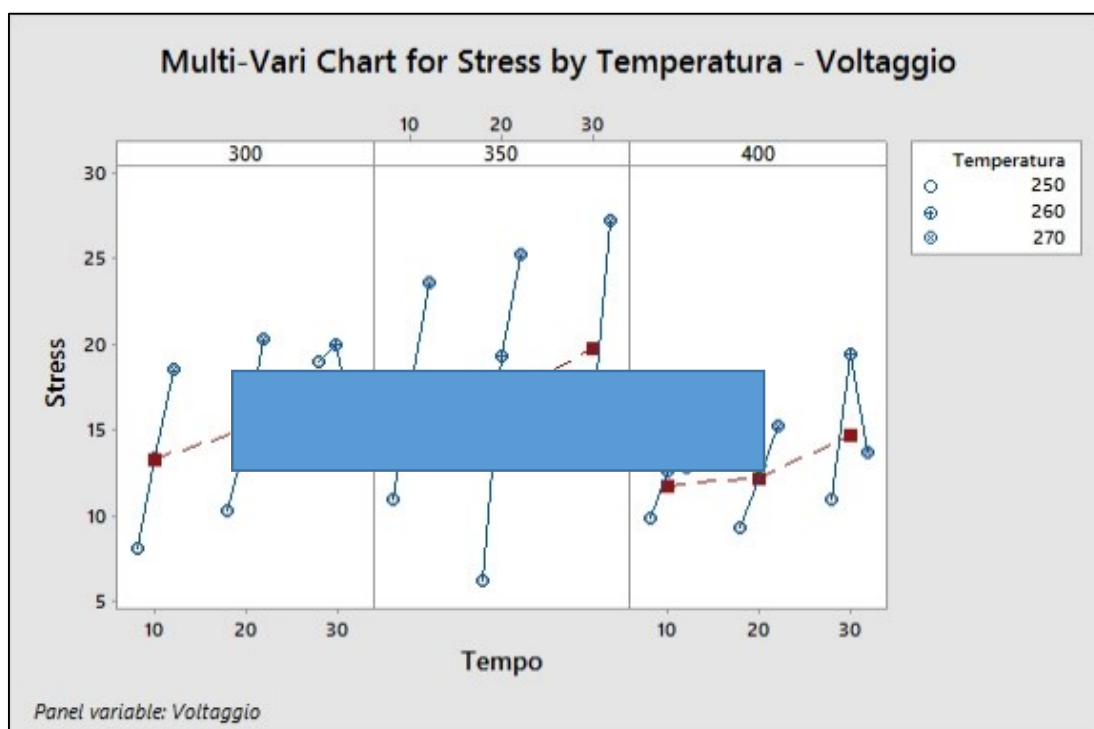


Figura 8.73: Influenza del Voltaggio sullo Stress

La temperatura riscuote sempre la maggiore influenza soprattutto nel caso di 300V e 350V, e con maggior peso nel caso di 350V e 20 secondi. I grafici fanno anche emergere come ad alti voltaggi (400V in questo caso) il materiale dimostra poca capacità di assorbire calore nel tempo per cui la saldatura si dimostra poco sensibile ad un aumento del tempo di riscaldamento.

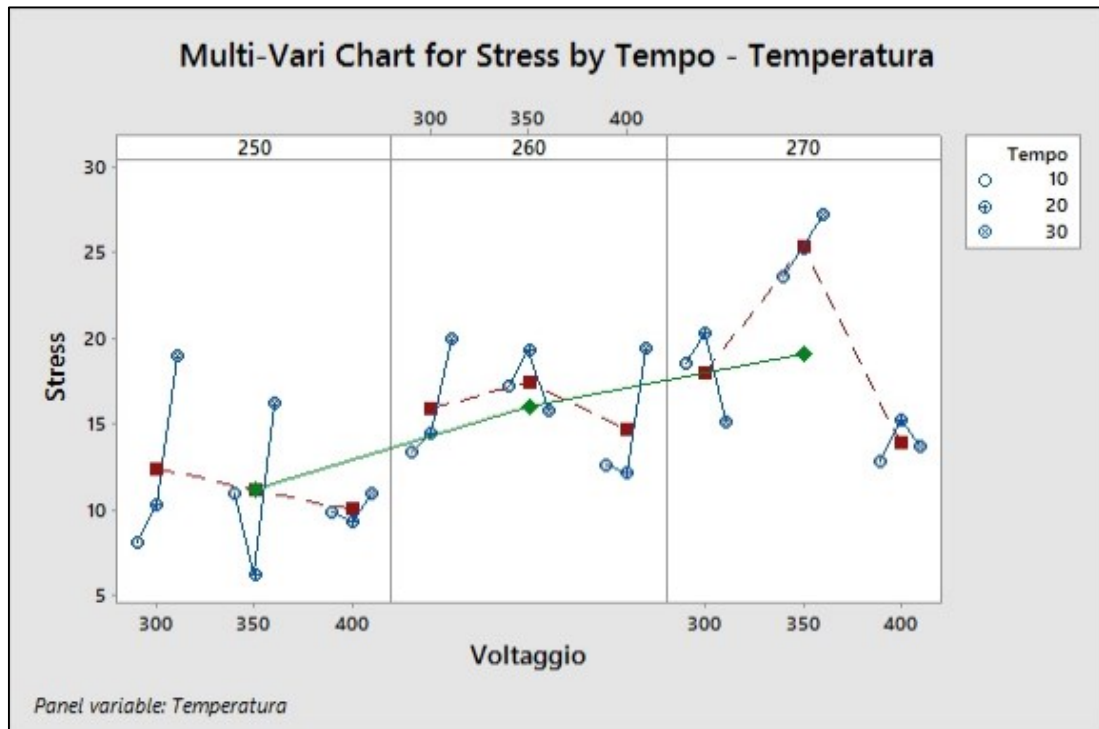


Figura 8.74: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Tempo, Voltaggio e Temperatura

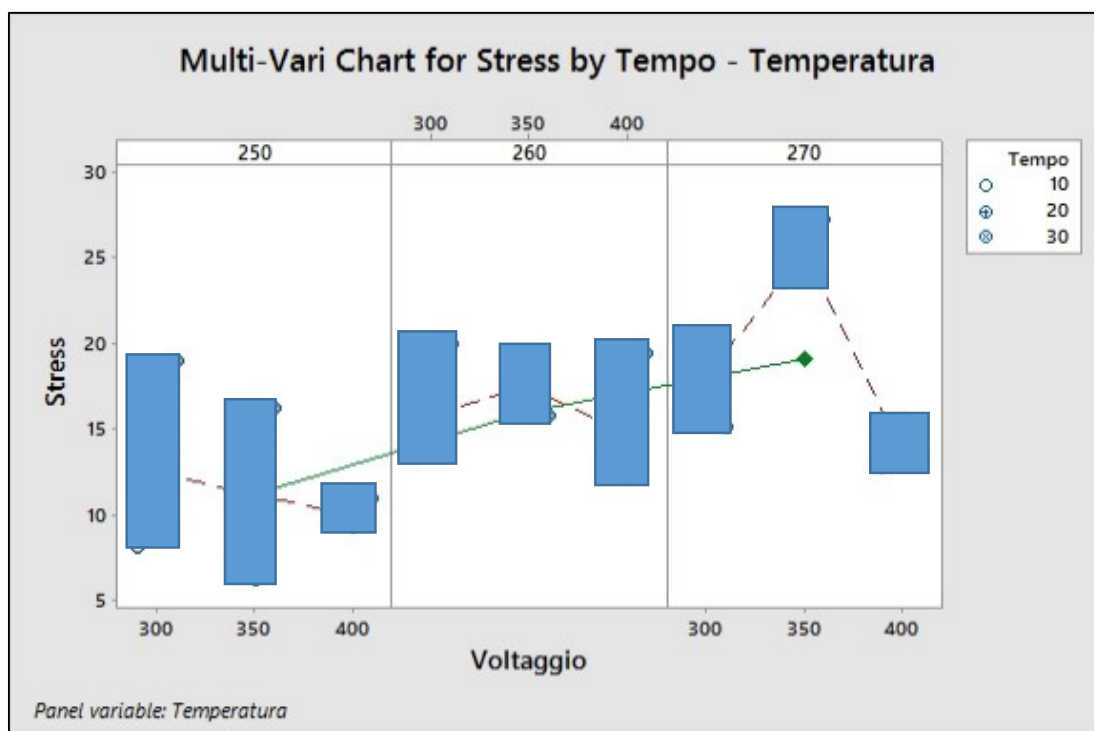


Figura 8.75: Influenza del Tempo sullo Stress

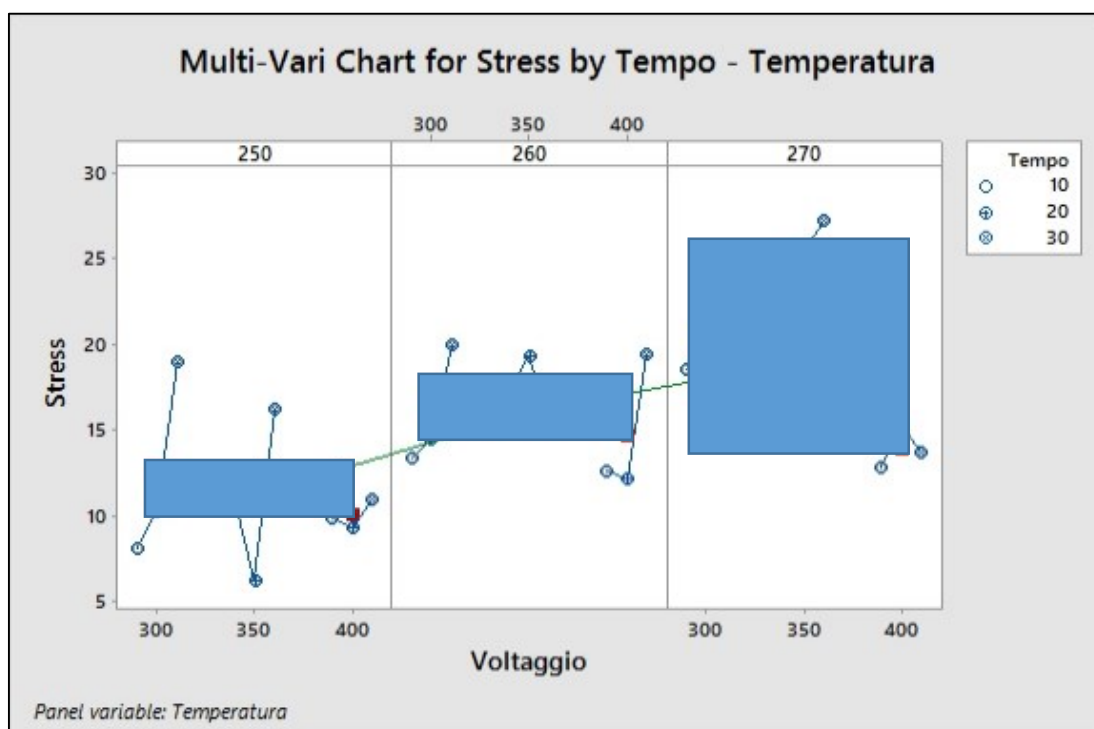


Figura 8.76: Influenza del Vtaggio sullo Stress

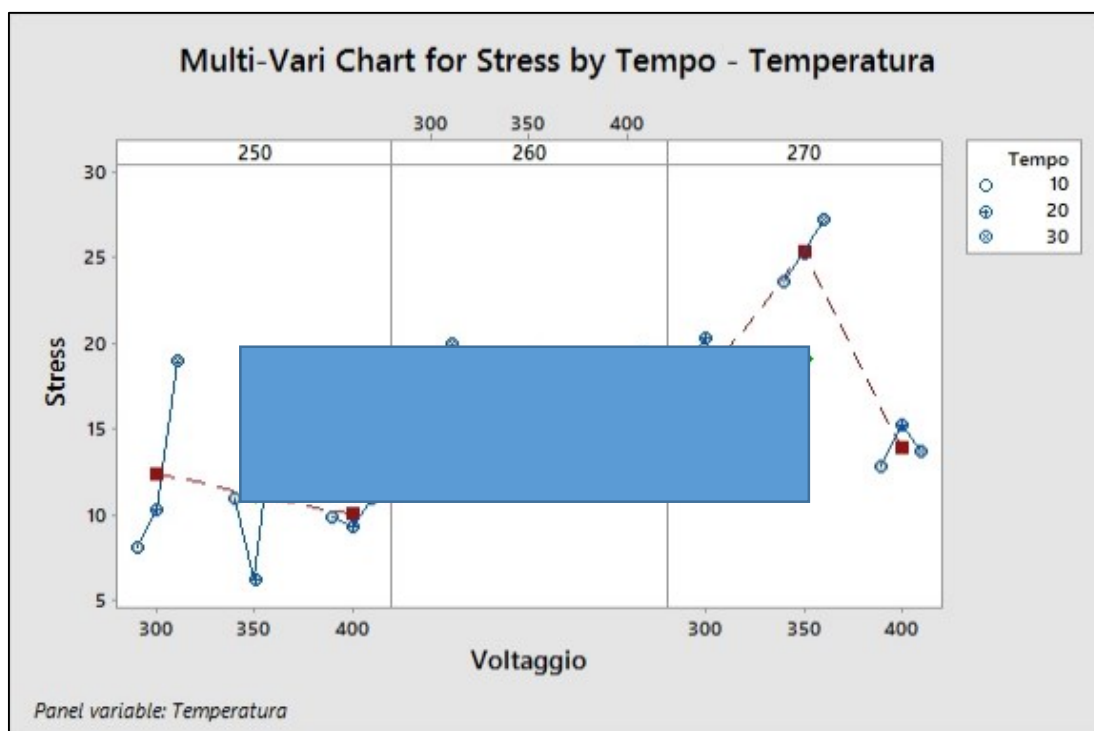


Figura 8.77: Influenza della Temperatura sullo Stress

Il voltaggio ha molta influenza soprattutto nel caso nel caso di temperatura di 270 °C anche se per il valore di 260°C si garantisce una buona resistenza a prescindere dal tempo, considerato il livellamento dei riquadri, e dal voltaggio, considerato che il relativo riquadro ha una piccola escursione. Bisogna stare attenti a non eccedere nel somministrare energia al campione se si lavora ad alte temperature in quanto far durare il processo di più equivale a ridurre la prestazione meccanica del giunto.

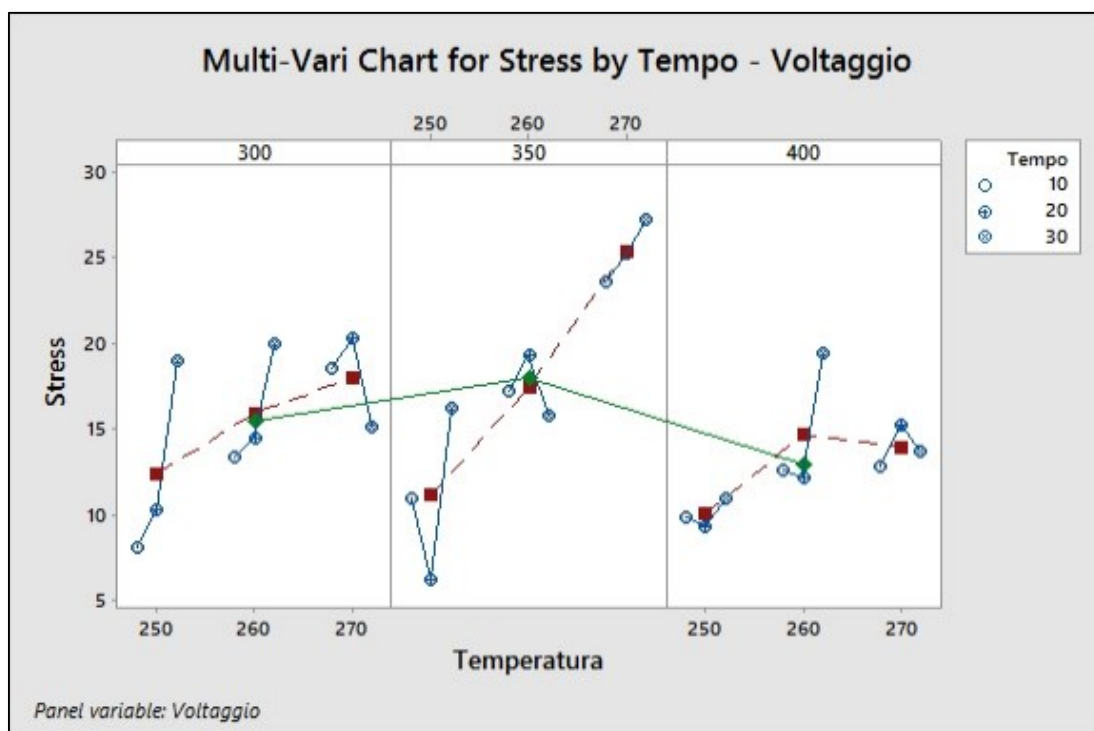


Figura 8.78: Multi-Vari Chart per lo Stress in funzione di Tempo, Temperatura e Voltaggio

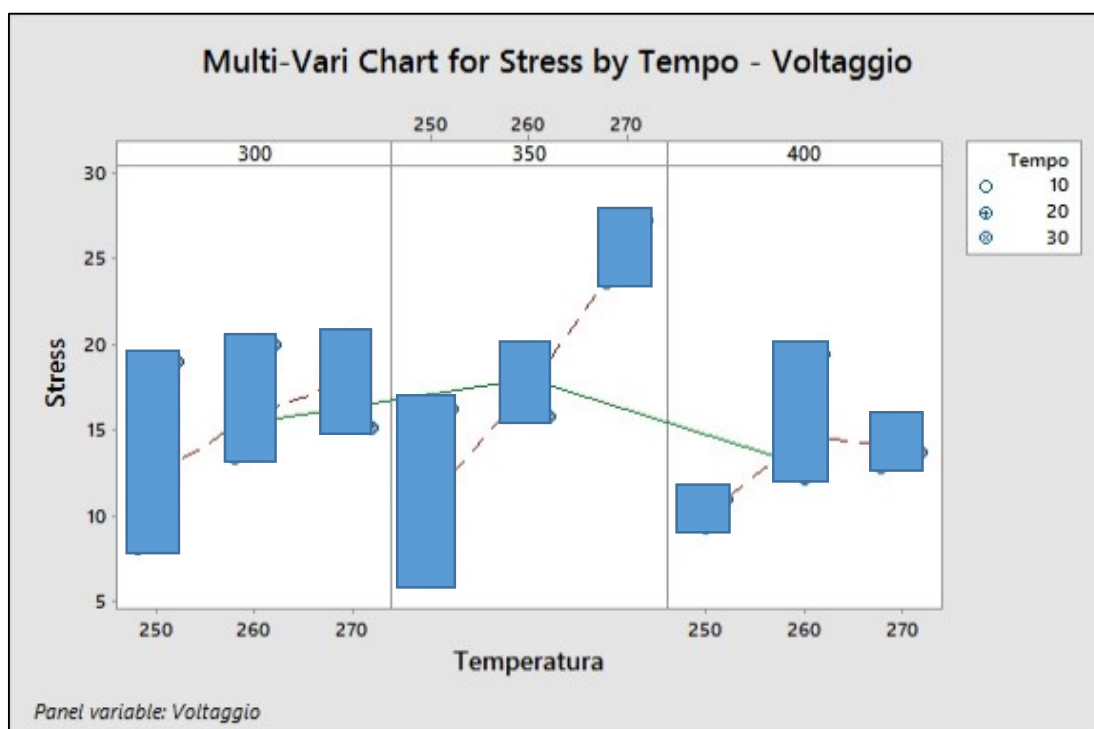


Figura 8.79: Influenza del Tempo sullo Stress

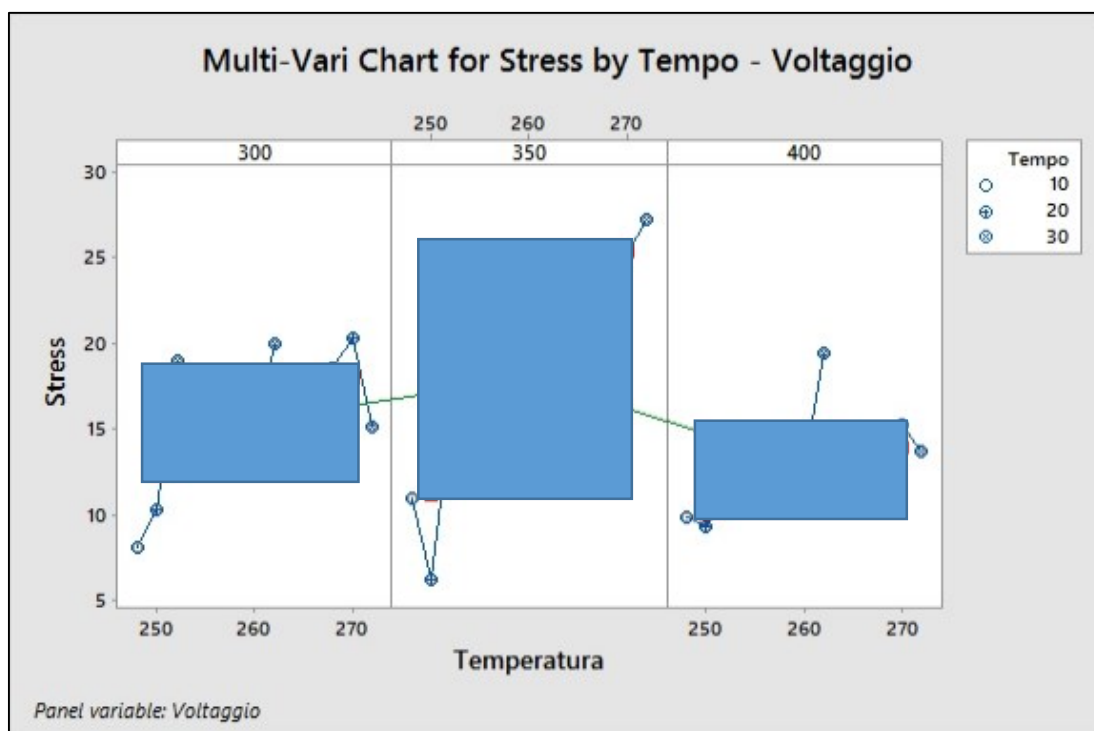


Figura 8.80: Influenza della Temperatura sullo Stress

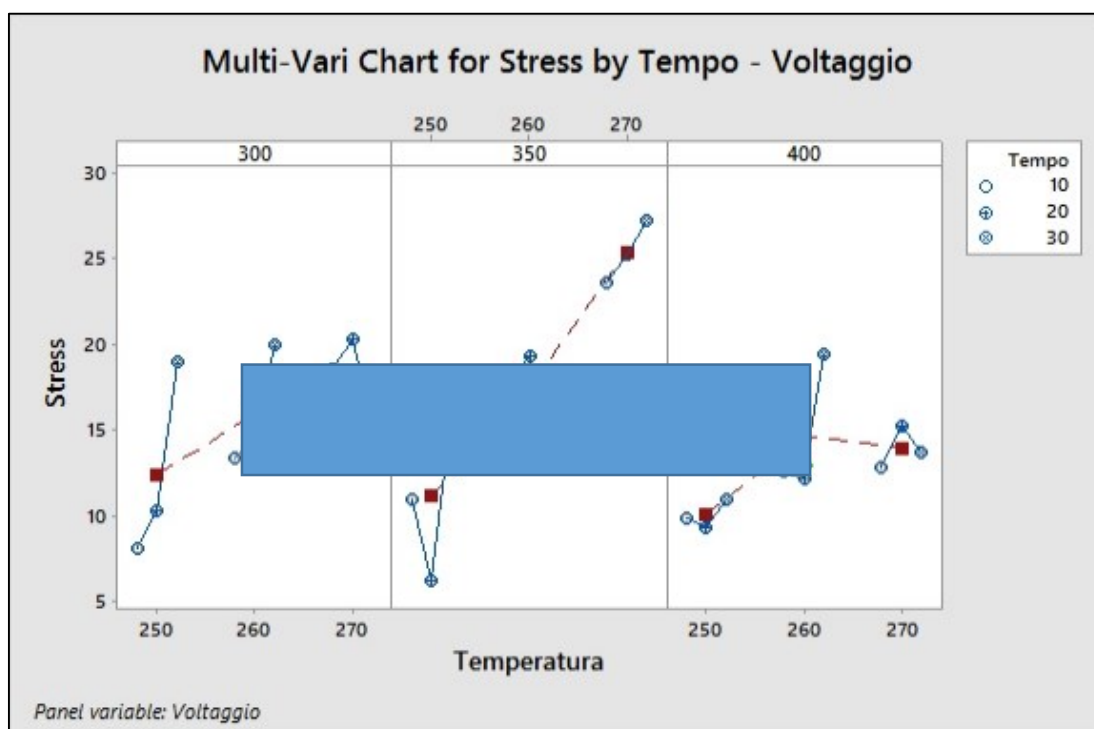


Figura 8.81: Influenza del Voltaggio sullo Stress

In questa ultima serie di grafici si può confermare come il tempo rimane efficace nell'aumento di resistenza solo se si lavora con bassi voltaggi e a basse temperature. In questo caso far durare più a lungo il processo di riscaldamento garantisce un miglioramento delle performances.

Nel dettaglio la temperatura è predominante nel caso di un voltaggio pari a 350V per cui nel passaggio da 260°C a 270°C si ha un aumento della prestazione meccanica.

Gli ultimi grafici di questo lavoro si spingono nel cercare di dare una continuità ai vari livelli dei fattori che sono stati considerati cioè cercano di rendere disponibile, almeno graficamente, la previsione di poter lavorare con valori continui dei parametri esaminati anziché discontinui. Il Surface Plot esamina le relazioni tra due fattori e la risposta del fenomeno creando una superficie tridimensionale. In questo caso si è scelto il voltaggio e la temperatura come parametri principali.

La visione di una superficie 3D fornisce immediatamente come la combinazione di parametri che garantisca la migliore resistenza al taglio, ovvero la migliore saldatura, sia quella costituita da 350 V, 270°C e 30 s.

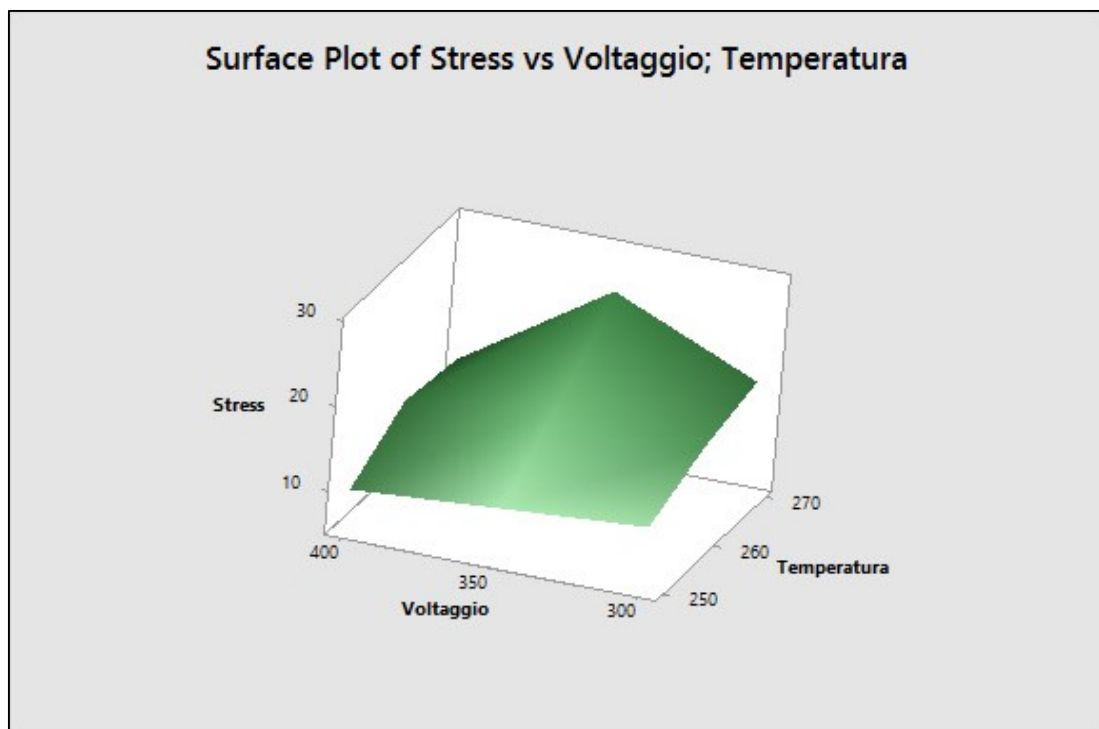


Figura 8.82: Grafico 3D dello Stress in base a Voltaggio e Temperatura

Una rappresentazione in piano di questa superficie 3D è rappresentata dal Contour Plot che consente di esplorare la potenziale relazione tra le variabili sul piano. Un grafico di contorno

è come una carta topografica in cui assi X, Y e Z valori vengono tracciati al posto di longitudine, latitudine e altitudine.

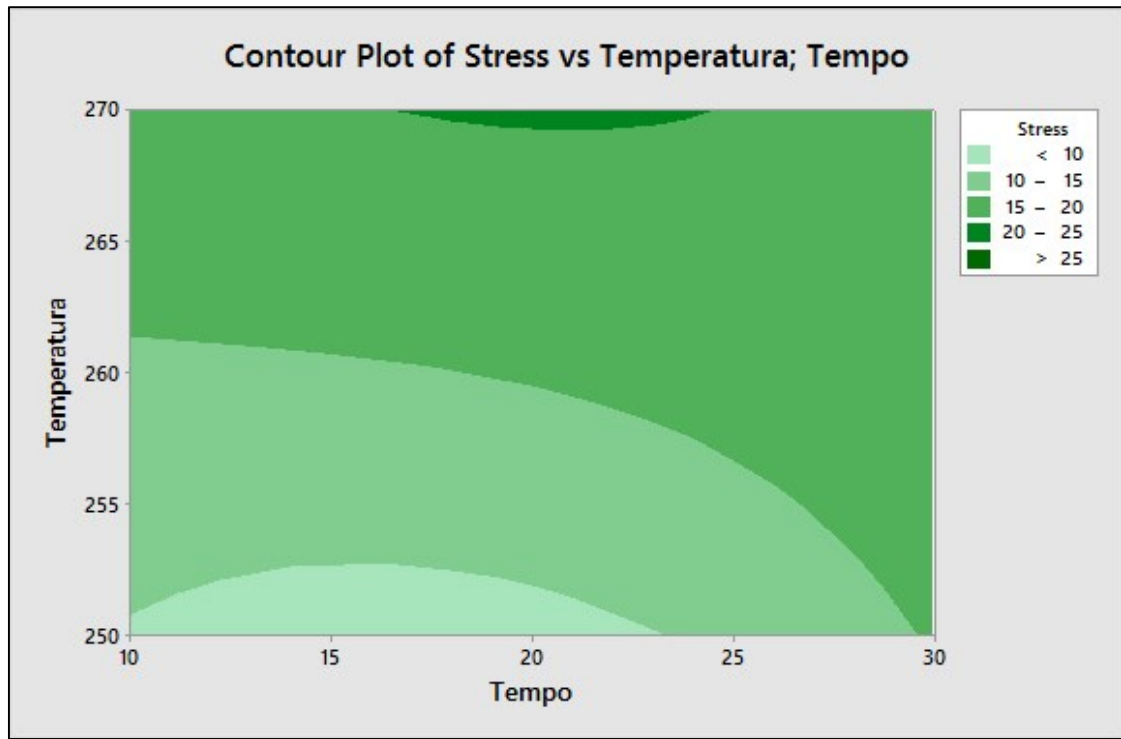


Figura 8.83: Contour Plot di Temperatura e Tempo

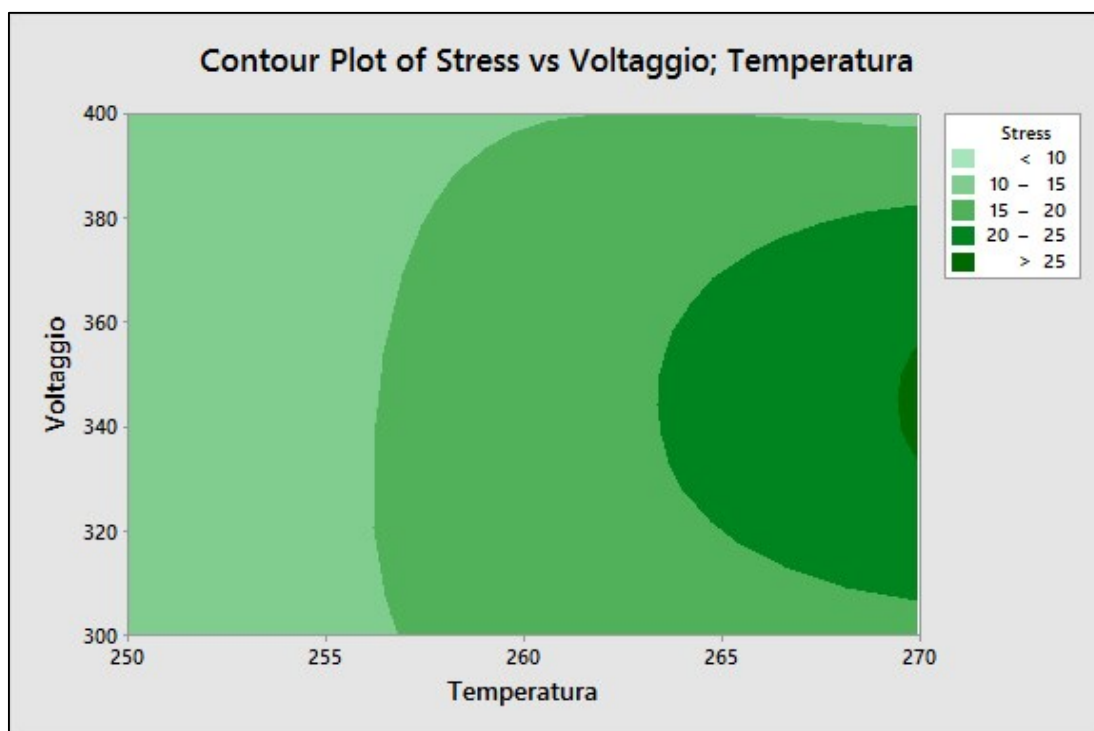


Figura 8.84: Contour Plot di Voltaggio e Temperatura

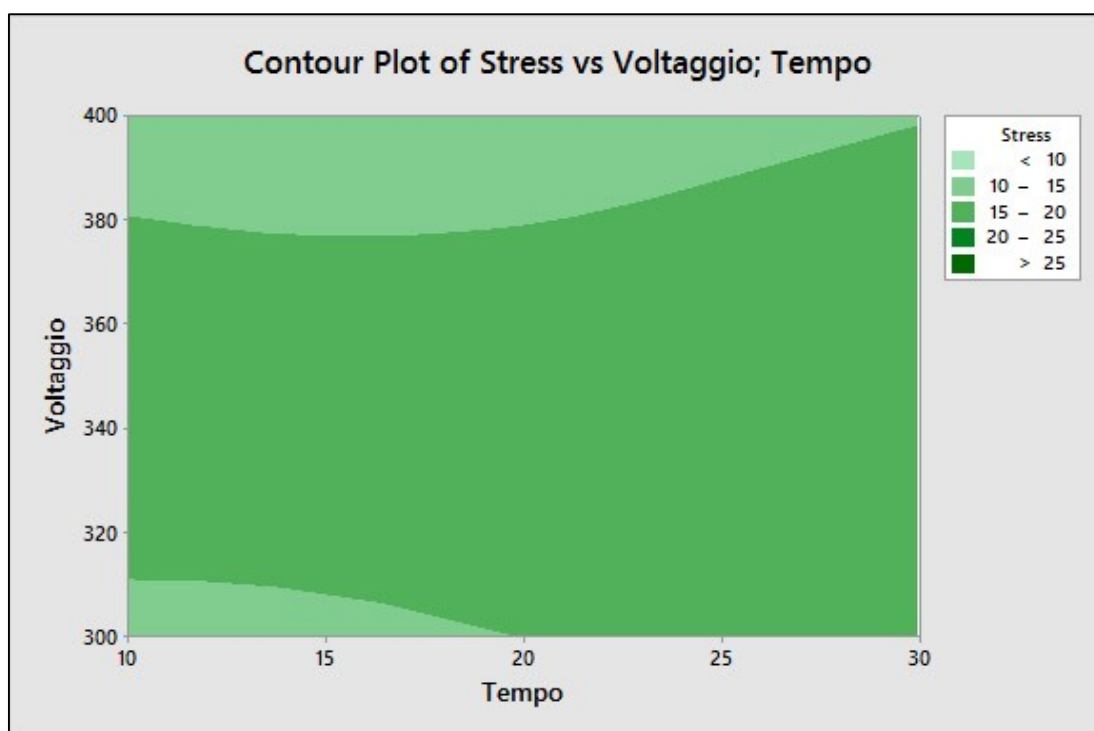


Figura 8.85: Contour Plot di Voltaggio e Tempo

Conclusione

Il presente lavoro si è occupato dell'ottimizzazione della tecnologia di saldatura di compositi termoplastici, rinforzati con fibre di carbonio, mediante induzione elettromagnetica.

Mediante la simulazione del processo di riscaldamento per induzione dei provini si è cercato di acquisire la giusta sensibilità dei parametri di processo ottimali.

Con la fase di sperimentazione è stato avvalorato l'intero lavoro condotto con la simulazione. Effettuando, infatti, un confronto fra le prove simulate e quelle di sperimentazione realizzate con gli stessi parametri di processo, sia la simulazione che la sperimentazione hanno mostrato che:

- La saldatura dei compositi termoplastici attraverso induzione elettromagnetica è un processo molto complesso che presuppone l'accoppiamento di un duplice problema: il fenomeno elettromagnetico ed il fenomeno termico.
- I parametri per una buona saldatura, esteticamente bella ma allo stesso tempo performante meccanicamente, sono molteplici e con molteplici interazioni.

Con questo lavoro si è cercato di mettere ordine nella conoscenza del fenomeno, cercando di sfruttare la disponibilità di software di difficile comprensione, al fine di eseguire in modalità virtuale saldature di giunti in materiale composito a fibra di carbonio, la cui realizzazione materiale è molto dispendiosa dal punto di vista economico.

Il software individuato ha dato ottimi risultati di correlazione della temperatura permettendo di prevedere la bontà della saldatura, verificata a posteriori tramite prove di caratterizzazione meccanica; difatti confrontando i risultati delle prove sperimentali è emerso che i giunti con le caratteristiche meccaniche migliori erano quelli che mostravano una distribuzione di temperatura più uniforme e più estesa anche dal risultato delle simulazioni.

Uno dei risultati principali che si è ottenuto è la messa a punto di una nuova metodologia di prova, secondo norma ASTM D5668, tesa a verificare la bontà del calcolo predittivo impostato; in contrapposizione a quanto fatto in altri studi, dove ci si è basati sulla norma di prova ASTM D2344.

L'utilizzo di un approccio statistico ha permesso di effettuare un'analisi di sensibilità sui parametri (voltaggio, temperatura e tempo) e l'interazione tra di essi. Difatti, mentre temperatura e tempo influiscono in maniera direttamente proporzionale sulla bontà della

saldatura, il voltaggio presenta un andamento parabolico con concavità verso il basso per cui è fondamentale individuare il corretto valore che ottimizzi lo sforzo di taglio.

Alla luce di tale analisi di sensibilità è emerso che, anche per possibili lavori futuri, bisogna lavorare su temperature poco maggiori della T_m del materiale (5-10%), dato ricavabile dalla scheda tecnica e con tempi di permanenza maggiori al fine di omogeneizzare la distribuzione della temperatura nella zona di sovrapposizione.

Con tale studio si è posto l'incipit per la realizzazione di giunti in materiale composito termoplastico, con i futuri lavori sarà possibile porre l'attenzione su ulteriori parametri di processo quali: frequenza, pressione e distanza tra induttore e materiale.

Bibliografia

1. V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker, New York, 2003
2. Handbook of Plastics Joining A Practical Guide, Plastics Design Library, 1997
3. P. A. Davidson, An Introduction to Magnetohydrodynamics, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
4. A.C. Metaxas, Foundations of Electroheat. A Unified Approach, JohnWiley & Sons, Chichester, 1996
5. Anahi Pereira da Costa, Edson Cocchieri Botelho, A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications. J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, 2012
6. Matthews, F. L., Kilty, P. P. F., and Godwin, E.W. A review of the strength of joints in fiber-reinforced plastics: adhesively bonded joints. Composites, 1982
7. Ageorges, Fusion bonding of polymer composites: from basic mechanisms to process optimisation, Springer, 2002
8. Ageorges, Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastics matrix composites: a review, Composites: Part A, Vol 32, 2001
9. Bersee, An investigation on the strain distribution of resistance welded thermoplastic composite joints, American Institute of Aeronautics and Astronautics , 2012
10. Ali Yousefpour, Mehdi Hojjati and Jean-Pierre Immarigeon, Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2004 17
11. Adams, R. D. and Wake, W. C. Structural adhesive joints in engineering, 1984
12. M D Banea¹ and L F M da Silva, Adhesively bonded joints in composite materials: an overview Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications 2009

Ringraziamenti

Il momento dei ringraziamenti è il più gratificante di ogni lavoro di tesi, dove l'autore può esprimere tutta la riconoscenza verso chi lo ha sostenuto durante il percorso. Personalmente ero già convinto che ogni cosa, soprattutto se difficile, va fatta col sostegno di un gruppo, di chi condivide i tuoi obiettivi, di chi poi ti diventa amico se non lo era già prima. Lo sono ancor di più adesso alla fine di un percorso lungo e ostico ma per questo stimolante ed ambizioso per cui sono tante le persone che voglio e devo ringraziare, in rigoroso ordine temporale.

I miei genitori, Gaetano e Rosa, che non si sono meravigliati della mia "voglia di studiare" ed hanno voluto pagarmi tutte le rette di iscrizioni, come fatto già per la laurea. A loro devo tutta la mia formazione, umana e professionale, splendido esempio in tutta la loro vita di libertà e questa non ha prezzo.

I miei figli Christian e Davide, se avessero saputo che sarei stato ancora più lontano da loro oltre il tempo già dedicato al lavoro dipendente forse mi avrebbero bloccato da subito. Soprattutto nell'ultimo anno sono stato completamente assente mai hanno dato prova di grandissima maturità nonostante la tenera età. Loro sono il mio fiero futuro.

Giuseppe Mensitieri, detto Peppe, la sua autorevolezza spaventa, la sua conoscenza meraviglia, la sua curiosità affascina salvo poi capire conoscendolo che è un instancabile studioso di un pragmatismo unico, tra i pochi ad usare ancora un telefonino a tasti. Ho imparato tantissimo da lui e gli ho giurato fedeltà assoluta; senza di lui tutto questo non sarebbe potuto nascere.

Antonio Gloria, inarrestabile. C'è sempre, dappertutto. Ti meravigli come una persona così giovane possa avere tanta esperienza e aver spaziato su così tanti interessi e continua, continua... Non ha bisogno dei miei auguri perché sono certo che tra poco riuscirà a trovare quella che è scritta già nel suo cognome e sono certo che nessuno si potrà meravigliare.

Barbara Palmieri, detta B. i. P. (la "i" sta per ingegnere), ingegnere lo è davvero. Ti stupisci al suo cospetto, dolce nei modi ma allo stesso tempo determinata nei fatti, veloce ma nel contempo profonda nei ragionamenti. Ha condiviso questo tema di ricerca da tesista appena un anno fa e adesso lo sta portando avanti da dottoranda. Senza di lei tutto questo lavoro non si sarebbe potuto concludere. Andrà lontano e spero mi porti con sé nella professione come nella vita.