



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI
Scuola di Dottorato di Ingegneria Civile e Architettura

Dottorato in Ingegneria Strutturale

XXIII CICLO

Prove Non Distruttive sui Materiali
Avanzati per Applicazioni
Strutturali

Dottorando

Nicoletta Trulli

Febbraio 2011



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

***Scuola di Dottorato di Ingegneria Civile e
Architettura***

Direttore: Prof. Ing. Gaetano Ranieri

Dottorato in Ingegneria Strutturale

Coordinatore: Prof. Ing. Barbara De Nicolò

XXIII CICLO

***Prove Non Distruttive sui Materiali
Avanzati per Applicazioni Strutturali***

Dottorando: Nicoletta Trulli

Tutor: Prof. Ing. Zaira Odoni

SSD : ICAR 09: Tecnica delle Costruzioni

Febbraio 2011

Ringraziamenti

A conclusione di questo percorso, sento il desiderio di ringraziare tutte le persone che mi hanno sostenuto con la loro competenza ed il loro appoggio morale durante il progetto di ricerca oggetto del presente lavoro. Voglio ringraziare le persone che anche nei momenti di sconforto hanno mostrato una comprensione totale, aiutandomi e collaborando su tutti i fronti.

Un ringraziamento va a tutti i professori, ricercatori, dottorandi, collaboratori e tecnici di laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Infrastrutturale e Geomatica dell'Università di Cagliari che non si sono mai tirati indietro quando mi serviva un aiuto, un consiglio o qualsiasi cosa, dimostrando al di là dell'aspetto lavorativo una disponibilità umana che in molti casi si è trasformata in amicizia.

Un ringraziamento particolare va alla Prof.ssa Zaira Odoni e alla Prof.ssa Barbara De Nicolo per la disponibilità e la fiducia accordatami costantemente, all'Ing. Giovanna Concu per la continua collaborazione su ogni aspetto delle mie ricerche e all'Ing. Carlo Piga per il supporto ed i suggerimenti datimi in questi anni.

Un ringraziamento doveroso è rivolto alla UNICAL di Cagliari e alla Ruredil Spa per aver reso possibile la realizzazione dell'intero progetto. Non finirò mai di ringraziare la mia famiglia che mi è sempre stata vicina e mi ha incoraggiato a raggiungere questo traguardo.

Indice

Ringraziamenti

Introduzione	1
1. Descrizione dei provini	7
1.1. Realizzazione dei provini in calcestruzzo	7
1.1.1. Travetti Serie A	8
1.1.2. Travetti Serie B	10
1.1.3. Travetti Serie C	11
1.2. Numerazione dei travetti	12
1.3. Rinforzo dei travetti	13
1.3.1. Rinforzo dei travetti con la rete in FRP	14
1.3.2. Rinforzo dei travetti con la lamina in FRP	17
1.3.3. Rinforzo dei travetti con la rete in PBO	19
2. Prove Ultrasoniche	22
2.1. Introduzione	22
2.2. Prove ultrasoniche sui travetti non rinforzati	27
2.2.1. Prove UT sui travetti della Serie A	28
Risultati dell'applicazione della DTT	28
Risultati dell'applicazione della STT	30
2.2.2. Prove UT sui travetti della Serie B	34
Risultati dell'applicazione della DTT	34
Risultati dell'applicazione della STT	36
2.2.3. Prove UT sui travetti della Serie C	40
Risultati dell'applicazione della DTT	40
Risultati dell'applicazione della STT	42
2.2.4. Discussione dei risultati	45
2.2.5. Ampiezza del segnale dei provini non rinforzati	47
2.3. Prove Ultrasoniche sui travetti rinforzati	48
2.3.1. Prove UT sui travetti rinforzati con la rete in FRP	48
2.3.1.1. Travetti Serie A	48
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	49
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	51
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	52
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	54

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	56
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	57
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	59
2.3.1.2. Travetti Serie B	60
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	60
2.3.1.3. Travetti Serie C	62
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	62
2.3.2. Prove UT sui travetti rinforzati con la lamina in FRP	63
2.3.2.1. Travetti Serie A	63
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	64
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	66
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	67
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	68
Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	70
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	71
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	73
2.3.2.2. Travetti Serie B	74
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	74
2.3.2.3. Travetti Serie C	76
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	76
2.3.3. Prove UT sui travetti rinforzati con la rete in PBO	77
2.3.3.1. Travetti Serie A	78
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	78
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	80
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	81
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	82
Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	84
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	85
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza	

Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	86
2.3.3.2. Travetti Serie B	88
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza	
Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	88
2.3.3.3. Travetti Serie C	89
Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza	
Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT	90
2.4. Considerazioni	91
3. Prove Termografiche	92
3.1. Introduzione	92
Radiazione del corpo nero	94
La legge di Planck sull'irraggiamento	95
La legge di Wien	95
La legge di Stefan-Boltzmann	95
3.2. Tecnica di analisi termografica	97
3.3. Termocamera	98
Emissività	99
Temperatura ambientale riflessa	100
Distanza	100
Umidità relativa	100
3.3.1. Attrezzatura impiegata	100
3.4. Procedure di analisi	101
3.4.1. Prove termografiche con sorgente termica forno	101
3.4.1.1. Provini rinforzati con la rete in fibra di carbonio	102
3.4.1.2. Provini rinforzati con la lamina in fibra di carbonio	103
3.4.2. Prove termografiche con sorgente termica faro alogeno	104
3.4.2.1. Provini rinforzati con la rete in fibra di carbonio	106
Provini della Serie A	106
Distanza S: Fase di riscaldamento	106
Distanza S: Fase di raffreddamento	108
Distanza L: Fase di riscaldamento	109
Distanza L: Fase di raffreddamento	109
Provini della Serie B	110
Distanza S: Fase di riscaldamento	110
Distanza S: Fase di raffreddamento	112

Distanza L: Fase di riscaldamento	112
Distanza L: Fase di raffreddamento	113
Provini della Serie C	114
Distanza S: Fase di riscaldamento	114
Distanza S: Fase di raffreddamento	115
Distanza L: Fase di riscaldamento	116
Distanza L: Fase di raffreddamento	117
3.4.2.2. Provini rinforzati con la lamina in fibra di carbonio	117
Provini della Serie A	117
Distanza S: Fase di riscaldamento	118
Distanza S: Fase di raffreddamento	119
Distanza L: Fase di riscaldamento	121
Distanza L: Fase di raffreddamento	122
Provini della Serie B	123
Distanza S: Fase di riscaldamento	124
Distanza S: Fase di raffreddamento	125
Distanza L: Fase di riscaldamento	126
Distanza L: Fase di raffreddamento	128
Provini della Serie C	129
Distanza S: Fase di riscaldamento	129
Distanza S: Fase di raffreddamento	131
Distanza L: Fase di riscaldamento	132
Distanza L: Fase di raffreddamento	133
3.4.2.3. Provini rinforzati con la rete in PBO	134
Provini della Serie A	134
Distanza S: Fase di riscaldamento	135
Distanza S: Fase di raffreddamento	136
Distanza L: Fase di riscaldamento	137
Distanza L: Fase di raffreddamento	138
Provini della Serie B	140
Distanza S: Fase di riscaldamento	140
Distanza S: Fase di raffreddamento	141
Distanza L: Fase di riscaldamento	142
Distanza L: Fase di raffreddamento	144
Provini della Serie C	145

Distanza S: Fase di riscaldamento	145
Distanza S: Fase di raffreddamento	147
Distanza L: Fase di riscaldamento	148
Distanza L: Fase di raffreddamento	149
3.5. Considerazioni	150
Conclusioni	151
Appendice A	157
Malta di ripristino: Provini Serie A	157
Rete in FRP: Primer	157
Rete in FRP: 1° strato resina epossidica	158
Rete in FRP: 2° strato resina epossidica	158
Lamina in FRP	159
Rete in PBO	160
Appendice B	161
1. Travetti Serie B rinforzati con la rete in FRP	161
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	161
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	163
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	164
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	165
Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	167
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	169
2. Travetti Serie C rinforzati con la rete in FRP	170
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	170
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	172
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	173
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	175
Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	177
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	178
3. Travetti Serie B rinforzati con la lamina in FRP	179
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	179
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	181
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	183
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	184
Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	186
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	187

4. Travetti Serie C rinforzati con la lamina in FRP	188
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	188
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	190
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	191
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	193
Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	195
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	196
5. Travetti Serie B rinforzati con la rete in PBO	197
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	197
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	199
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	200
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	201
Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	203
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	204
4. Travetti Serie C rinforzati con la rete in PBO	206
Risultati Velocità dell'applicazione della DTT	206
Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT	208
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT	209
Risultati Velocità dell'applicazione della STT	210
Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT	212
Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT	213
Bibliografia	215

Introduzione

I primi impieghi dei metodi di prova non distruttivi, comunemente indicati con l'acronimo NDT (Non-Destructive Testings), risalgono al 1850-1860, anni in cui erano utilizzati, tramite dei colpi di martello, per individuare i distacchi tra il cerchio e le ruote nei carri ferroviari.

Solamente dopo il 1930, in seguito al notevole impiego delle saldature, furono introdotti i sistemi radiografici per individuare i difetti nei collegamenti. Qualche anno dopo, le indagini di tipo non distruttivo compirono i primi passi anche nel campo delle costruzioni in calcestruzzo: nel 1945 ci furono le prime applicazioni degli ultrasuoni e nel 1948 arrivò lo sclerometro [Cianfrone, 1993].

Nel campo delle costruzioni questi metodi di prova ebbero un forte sviluppo a partire dal 1970, in seguito alla necessità di interventi di restauro e di conservazione delle opere esistenti. Oggi i metodi consolidati utilizzati nelle indagini strutturali sono molteplici, ma l'attività di ricerca è in continuo sviluppo, alla scoperta di nuove tecniche e nuovi strumenti, in alcuni casi ereditando le conoscenze provenienti da altri settori.

I vantaggi che derivano dall'uso di queste tecniche sono:

- il mantenimento dell'integrità della struttura indagata: le indagini non recano alcun danno alla struttura;
- la possibilità di ottenere informazioni su porzioni limitate e sulla struttura nel suo insieme;
- la rapidità di esecuzione delle prove.

La scelta della tecnica di indagine più idonea è funzione delle caratteristiche e delle informazioni che si vogliono determinare e dell'elemento sotto esame. Solitamente sono impiegati contemporaneamente più metodi di indagine, al fine di poter verificare i risultati ed eventualmente poterli correlare tra loro.

I metodi di prova non distruttivi possono essere classificati in:

- metodi meccanici: pull out, sclerometro, sonda Windsor, martinetti piatti;
- metodi acustici: prove soniche, prove ultrasoniche, prove di caratterizzazione dinamica;
- metodi elettromagnetici: radiografia a raggi x o gamma, termografia, radar, pacometro;
- metodi chimici: misura della carbonatazione, misura della quantità degli ioni di cloro.

Negli ultimi anni i metodi NDT hanno dimostrato di avere un ruolo di fondamentale importanza nel controllo della qualità di nuovi prodotti, tecnologie e materiali. In particolare, in ingegneria, le prove sono attualmente condotte su strutture realizzate in calcestruzzo, in muratura, in acciaio, in legno e sui materiali avanzati, tra cui i materiali compositi.

I materiali compositi, secondo la definizione generica comunemente utilizzata, sono costituiti da due o più materiali, o fasi, di natura diversa e macroscopicamente distinguibili, in cui almeno due delle fasi presentano caratteristiche fisiche e meccaniche sufficientemente diverse tra loro in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti [CNR-DT 200, 2004].

I materiali compositi fibrorinforzati in matrice polimerica FRP (Fiber Reinforced Polymer) sono costituiti da una matrice organica e da fibre aventi elevate proprietà meccaniche, e quindi, per quanto detto, costituiscono un sottoinsieme dei materiali compositi.

Anche in natura esistono alcuni materiali compositi. Un esempio è rappresentato dal legno costituito dall'unione di lunghi filamenti, scomponibili in sottilissime fibre di cellulosa, combinati tra loro dalla lignina che costituisce la matrice. Un ulteriore esempio è il bambù, costituito dall'unione di fibre di silice immerse in una fase continua di cellulosa [Minguzzi,1998].

La tecnologia del rinforzo di materiali mediante l'utilizzo di fibre risale a tempi molto antichi. La prima testimonianza di mattoni in terra cruda essiccata rinforzati con paglia, avente lo scopo di ridurre la fragilità, si trova nella città di Çatal Hüyük, in Anatolia, datata dagli archeologi intorno al 6500 a.C. Un esempio, più vicino alla realtà sarda, è rappresentato dai *ladiri*, ossia delle costruzioni realizzate in mattoni in argilla cruda impastata con paglia di fieno esistenti in Sardegna nella zona del Campidano.

I primi utilizzi di materiali fibrorinforzati risalgono agli inizi del 1900, attraverso l'insieme di resine fenoliche rinforzate con fibre d'amianto. Dalla seconda guerra mondiale in poi è stato un crescendo di applicazioni e di scoperte:

- 1942: utilizzo di plastiche rinforzate e vetroresina impiegate in barche, aeroplani e nelle prime apparecchiature elettriche;
- 1958: creazione della fibra di carbonio dal Dr. Roger Bacon, presso il Parma Technical Center in Ohio;
- 1960: primo utilizzo delle fibre di boro e di carbonio ad alta resistenza in applicazioni aeronautiche;
- 1970: nascita dei compositi a matrice metallica di boro o alluminio;
- 1973: invenzione del Kevlar (fibra aramidica) dalla DuPont.

Negli ultimi decenni si è assistito ad un incremento, in Ingegneria Civile, dell'utilizzo dei materiali fibrorinforzati per il consolidamento e il rinforzo di costruzioni nuove ed esistenti realizzate in muratura, legno, cemento armato, cemento armato precompresso e acciaio. Tale exploit è giustificato dal fatto che questi materiali mostrano eccellenti proprietà di resistenza e rigidezza [Duthinh et al. 2001, CNR DT 200, 2004], elevati rapporti resistenza/peso e rigidezza/peso [Mallick, 1993], alta durabilità [Homan et al. 2000] ed elevata resistenza alla corrosione [Sherwood et al. 1998, Hamilton, 2007]. Purtroppo però la risposta strutturale dei materiali FRP dipende fortemente dalla loro corretta applicazione, ed affinché il rinforzo con questi materiali sia assicurato in maniera ottimale è fondamentale realizzare una perfetta adesione tra FRP e il substrato [Büyükoztürk et al. 2006]. A causa di queste motivazioni, contemporaneamente alla diffusione dei compositi fibrorinforzati si è sviluppata una intensa attività di ricerca sui metodi d'indagine non distruttivi in grado di fornire indicazioni sulla qualità del sistema di rinforzo [Luprano et al. 2006].

Il controllo della qualità è uno strumento di fondamentale importanza, non solo per la verifica della corretta messa in opera dei materiali fibrorinforzati, ma soprattutto per il monitoraggio degli stessi durante la loro vita d'esercizio.

Il legame che si genera nell'interfaccia può essere seriamente compromesso dalla presenza di bolle d'aria, dovute ad una scorretta messa in opera del sistema di rinforzo e a distacchi fra FRP e substrato, che possono generarsi in seguito all'applicazione dei carichi e all'esposizione agli agenti atmosferici.

Alcune caratteristiche dei compositi in fibra di carbonio, tra le quali l'anisotropia, la radiotrasparenza e l'amagnetismo, escludono la possibilità di impiegare un gran numero dei classici metodi d'indagine non distruttivi, come ad esempio i metodi radiografici e magnetici che hanno invece fornito ottimi risultati nel controllo della qualità di altri materiali quali i metalli [Stabile, 2008].

Le CNR-DT 200/2004 nel punto 5.8 sottolineano l'importanza e la necessità del controllo della qualità dell'applicazione del sistema di rinforzo; infatti viene messo in evidenza che: *“Una volta che l'intervento sia stato realizzato è necessario procedere al suo controllo ed, in seguito, al suo eventuale monitoraggio nel tempo mediante prove non distruttive o parzialmente distruttive”*.

Tra i vari metodi non distruttivi le tecniche di Termografia ad Infrarossi (IRT) ed Ultrasoniche (UT) hanno mostrato di essere strumenti promettenti per il controllo della qualità ed esistono numerosi lavori di ricerca tesi a dimostrarne la loro validità.

La tecnica IRT è adoperata nel campo del controllo della qualità dell'applicazione dei materiali fibrorinforzati per individuare la presenza di vuoti o altre anomalie

localizzate nell'interfaccia fra il sistema di rinforzo e il substrato. Mediante tale tecnica è possibile ottenere una immagine (termogramma) acquisita con una termocamera che lavora nel campo degli infrarossi in seguito al riscaldamento della superficie dei campioni esaminati. In letteratura sono presenti numerose ricerche di applicazione della Tecnica IR:

- ✓ Hu ed altri (2002) hanno utilizzato con successo la IRT per individuare la presenza di vuoti e analizzare la propagazione di fessurazioni in elementi in calcestruzzo rinforzati con FRP.
- ✓ Valluzzi ed altri (2009) hanno applicato la IRT su travi in cemento armato rinforzate con lamine in CFRP per il controllo della qualità dell'interfaccia fra il sistema di rinforzo e il substrato in calcestruzzo. I risultati ottenuti durante la sperimentazione hanno mostrato che questa tecnica è capace di fornire ottime informazioni sull'adesione del FRP al substrato in calcestruzzo.
- ✓ Corvaglia ed altri (2009) hanno messo a punto una procedura IRT capace di individuare e fornire un dimensionamento delle aree dei difetti di adesione presenti nell'interfaccia FRP - substrato.

La tecnica UT è un altro importante strumento impiegato per la individuazione di anomalie e difetti posti all'interno di elementi rinforzati con FRP e rappresenta, inoltre, uno dei metodi di indagine maggiormente utilizzati nella diagnostica strutturale e nelle indagini sui materiali. Anche in questo caso in letteratura sono presenti numerose ricerche:

- Bastianini ed altri (2001) hanno utilizzato l'analisi ultrasonica pulsed echo per sottoporre a test differenti materiali compositi applicati a diversi substrati utilizzando principalmente come dato l'ampiezza del segnale ultrasonico. I risultati hanno consentito di concludere che utilizzando questa tipologia di indagine è possibile individuare la presenza dei difetti.
- Godinez-Azcuaga ed altri (2004) hanno impiegato un sistema portatile Acusto - Ultrasonico per sottoporre a test delle strutture in calcestruzzo avvolte con FRP. I risultati e le immagini C-scan hanno mostrato come la tecnica sia capace di mettere in evidenza la presenza di fessurazioni, delaminazioni e punti di non aderenza fra il rinforzo e il substrato stesso.

Riguardo a questi metodi, le CNR DT 200/2004, nel punto 5.8.3.2 riguardante le tecniche non distruttive applicabili per il controllo e la verifica della applicazione dei sistemi FRP, sottolineano per le Prove Ultrasoniche che esse *“Devono essere condotte impiegando metodologie in riflessione con frequenze non inferiori a 1.0 MHz e sonde con diametro non superiore a 25 mm, adottando la tecnica basata sulla variazione dell'ampiezza del*

primo picco per la localizzazione dei difetti” e per le Prove Termografiche sottolineano che esse “Risultano efficaci solamente in presenza di materiali di rinforzo caratterizzati da bassa conducibilità termica e non sono applicabili a rinforzi in carbonio o con fibre metalliche, a meno che non vengano utilizzati accorgimenti particolari che ne garantiscano una sensibilità adeguata. Occorre inoltre assicurare che il riscaldamento impartito nel corso della prova non danneggi il rinforzo con temperature troppo vicine a quelle di transizione vetrosa”.

Alla luce di quanto riportato in precedenza nel presente lavoro di tesi si è deciso di focalizzare l’attenzione sul controllo della qualità dei sistemi fibrorinforzati impiegando prevalentemente i metodi di indagine non distruttivi IRT e UT. Questi metodi sono stati impiegati per testare numerosi provini in calcestruzzo rinforzati con differenti compositi, ed in particolare lamine e reti in fibra di carbonio e reti in PBO (Poliparafenilenbenzobisoxazolo). La differenza principale tra queste tipologie di rinforzo consiste nel fatto che nei sistemi FRP (lamine e reti) l’adesione tra il rinforzo e il substrato è realizzato utilizzando una resina epossidica bicomponente, mentre nel PBO l’aderenza è assicurata tramite una malta cementizia.

Le fibre di PBO sono l’ultimo ritrovato nel campo dei rinforzi strutturali. Sono state sviluppate dalla TOYOBO Co.. Nel 1998 sono state introdotte nel campo militare dove venivano impiegate prevalentemente nel vestiario antiproiettile. Recentemente è iniziata la sperimentazione nel campo dell’ingegneria civile dove si sta tentando di sostituirle alla fibra di carbonio; infatti, il PBO presenta tenacità, modulo elastico, resistenza all’abrasione, al taglio ed ai raggi UV elevati ed inoltre possiede una elevata resistenza alla fiamma ed al calore.

L’obiettivo principale del lavoro di ricerca illustrato nella presente tesi consiste nel dimostrare la validità dei due metodi di prova non distruttivi menzionati nella individuazione e nel dimensionamento sia dei difetti di adesione dei materiali fibrorinforzati sia delle anomalie presenti nei differenti materiali. L’aspetto originale della tesi consiste nell’impiego combinato, per gli scopi illustrati, della Termografia ad Infrarosso (IRT) e della metodologia Ultrasonica (UT) sui rinforzi in FRP e in PBO. L’utilizzo delle due metodologie di prova ha consentito di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti imposti: la IRT, e le relative elaborazioni dei dati, ha individuato i soli difetti posizionati nella interfaccia composito/calcestruzzo, mentre l’analisi e le elaborazioni dei dati UT hanno permesso di identificare la presenza non solo dei difetti posti nell’interfaccia con il composito, ma anche di quelli presenti all’interno del volume dei provini stessi.

Nel primo capitolo della tesi vengono accuratamente descritte le fasi di realizzazione dei provini in calcestruzzo e l’applicazione dei rinforzi in FRP e PBO.

Nel secondo capitolo sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo ultrasonico condotto secondo la Tecnica di Trasmissione Diretta e Semidiretta. Vengono analizzati i dati relativi alla Velocità, all'Ampiezza e all'Ampiezza Spettrale dei segnali impiegati per l'indagine. Sono inoltre messi in evidenza i limiti e le potenzialità di entrambe le metodologie di prova adottate.

Nel terzo capitolo viene descritta l'applicazione del metodo della termografia ad infrarossi condotta secondo l'approccio di tipo attivo, impiegando due diverse tipologie di fonti di calore. Sono presentati i termogrammi e le relative elaborazioni effettuate in ambiente Matlab® e infine sono commentati i risultati ottenuti dall'impiego di entrambe le fonti di riscaldamento.

Nell'ultimo capitolo vengono messi in evidenza i risultati ottenuti durante la sperimentazione, e quindi presentate le considerazioni conclusive.

1 Descrizione dei provini

1.1 Realizzazione dei provini in calcestruzzo

Per la sperimentazione oggetto di questa tesi sono stati realizzati, presso la sede della UNICAL di Cagliari, 45 provini in calcestruzzo aventi forma prismatica di dimensione pari a 0.15×0.15×0.60 m.

I getti sono stati realizzati in dieci casseforme in acciaio, con chiusura tramite asse bullonato, dopo aver disposto i casseri su una tavola vibrante. Trascorse 24 ore dal getto, i provini sono stati scasserati e posti in vasche per la maturazione per 28 giorni ad una temperatura di 20°C e con una umidità relativa pari a 100%.

I travetti sono stati classificati in tre serie, ciascuna costituita da 15 provini, in base al differente mix design utilizzato per la realizzazione.

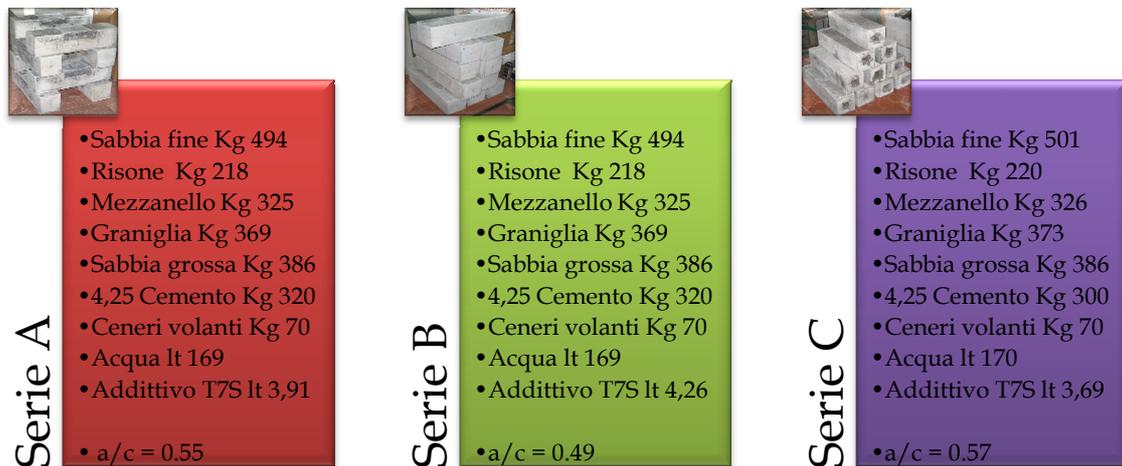


Figura 1. Mix design impiegato per i getti.

Nelle figure successive sono mostrate alcune immagini relative alle differenti fasi di realizzazione dei provini.



Figura 2. Prelievo del calcestruzzo.



Figura 3. Immagine del calcestruzzo fresco.



Figura 4. Prova al cono di Abrams.



Figura 5. Preparazione dei casseri.



Figura 6. Getto dei travetti sulla piastra vibrante.



Figura 7. Immagine dei travetti dopo il getto.



Figura 8. Scassero dei provini.



Figura 9. Maturazione in vasca dei provini.

1.1.1 Travetti Serie A

Il primo gruppo, costituito da 15 travetti, è stato identificato come Serie A. In questi provini, in fase di esecuzione è stata realizzata una cavità disposta nella parte superiore e centrale, avente dimensioni pari a $0.2 \times 0.15 \times 0.05$ m. Nella figure sotto riportate sono messe in evidenza le caratteristiche geometriche dei travetti appartenenti a questa serie.

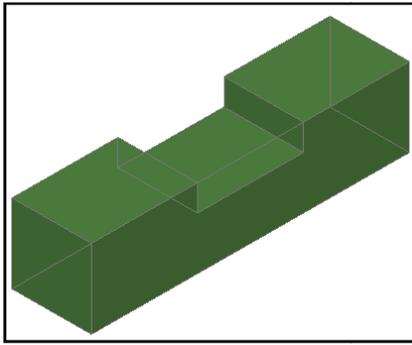


Figura 10. Assonometria travetto Serie A.

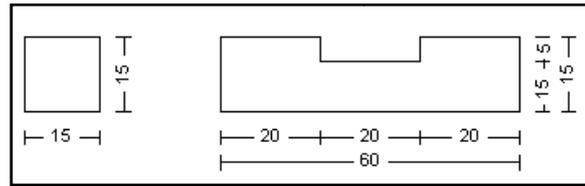


Figura 11. Sezione e vista del travetto Serie A.

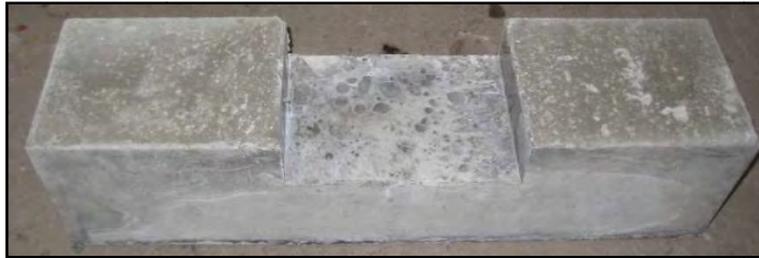


Figura 12. Immagine del travetto appartenente alla Serie A.

Nel getto è stato impiegato un calcestruzzo avente R_{ck} pari a 30 N/mm^2 ed è stata effettuata la misura della consistenza mediante la prova di abbassamento al cono di Abrams, che ha fornito un valore pari a 18 cm corrispondente alla Classe S4 fluida.

Con lo stesso getto sono stati realizzati sei provini cubici aventi lato pari a 0.30 m sui quali sono state eseguite le prove di compressione a 7 e a 28 giorni, le quali hanno fornito i valori medi riportati in figura.



Figura 13. Valori medi della resistenza a compressione dei cubetti della Serie A.

Dopo la maturazione, i travetti della Serie A sono stati sottoposti ad un intervento di ripristino, in modo da colmare il vuoto realizzato nella parte superiore, utilizzando una malta a ritiro controllato. Il prodotto impiegato è una malta premiscelata in polvere, composta da cementi ad alta resistenza, aggregati selezionati, additivi speciali e fibre sintetiche. Tutti i provini sono stati scasserati dopo 24 ore di maturazione avvenuta ad una temperatura di 15°C e umidità costante.

Nella figure successive sono mostrate alcune fasi di realizzazione dell'intervento di ripristino.



Figura 14. Realizzazione intervento di ripristino.



Figura 15. Travetti dopo la maturazione.

Per la valutazione del volume totale di malta necessario per eseguire i getti sono state seguite le prescrizioni della scheda tecnica fornita dal produttore.

Nella Appendice A sono riportati i calcoli effettuati per la determinazione della quantità di polvere e acqua necessari per l'intervento di ripristino.

1.1.2 Travetti Serie B

Il secondo gruppo, costituito da 15 travetti pieni in calcestruzzo, è stato identificato come Serie B. Nella figure sotto riportate sono messe in evidenza le caratteristiche geometriche dei provini.

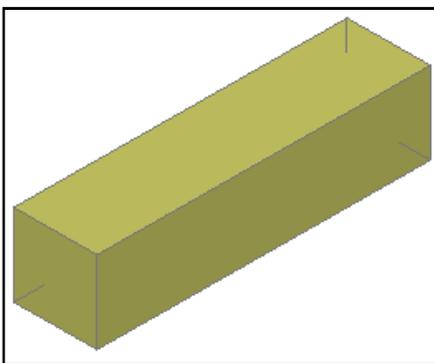


Figura 16. Assonometria travetto Serie B.

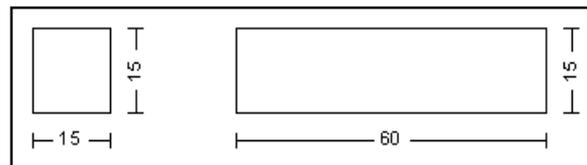


Figura 17. Sezione e vista del travetto Serie B.



Figura 18. Immagine dei travetti della Serie B.

Per il getto è stato utilizzato un calcestruzzo avente un valore di R_{ck} pari a 35 N/mm². Tramite la prova al cono di Abrams è stato ottenuto un abbassamento pari a 22 cm corrispondente ad una classe di consistenza S4 fluida.

Le prove di compressione sui campioni cubici eseguite a 7 e 28 giorni hanno fornito i risultati indicati nello schema seguente.



Figura 19. Valori medi della resistenza compressione dei cubetti della Serie B.

1.1.3 Travetti Serie C

Il terzo gruppo, sempre costituito da 15 travetti, è stato identificato come Serie C. In questi travetti è stata realizzata una cavità centrale, che si sviluppa secondo tutta la lunghezza del provino, avente sezione quadrata con lato pari a 0.05 m.

Nelle figure sotto riportate sono mostrate le caratteristiche geometriche dei travetti appartenenti alla Serie C.

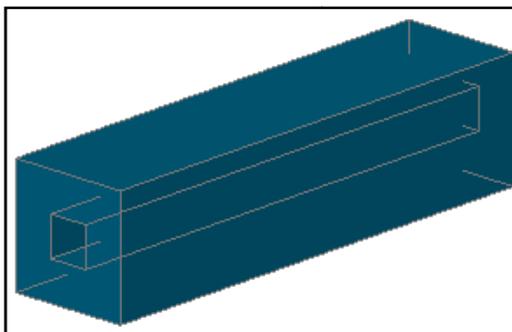


Figura 20. Assonometria travetto Serie C.

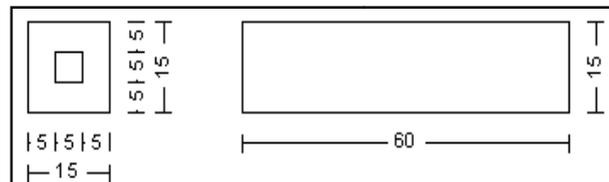


Figura 21. Sezione e vista travetto Serie C.



Figura 22. Immagine dei travetti della Serie C



Figura 23. Cavità nei travetti

Il calcestruzzo utilizzato per i travetti della Serie C è caratterizzato da R_{ck} pari a 35 N/mm². La prova al cono di Abrams ha fornito un valore di abbassamento pari a 25 cm corrispondente ad una classe di consistenza S5 superfluida.

Le prove di compressione sui campioni cubici eseguite a 7 e 28 giorni hanno fornito i risultati indicati nello schema seguente.



Figura 24. Resistenza compressione dei cubetti del getto della Serie C.

1.2 Numerazione dei travetti

Tutti i travetti sono stati numerati, associando alla lettera della Serie di appartenenza un numero progressivo da 1 a 15 in modo da individuarli in modo univoco. Sono state inoltre numerate le quattro facce laterali dei travetti con un numero progressivo da 1 a 4.

Successivamente su tutti i travetti sono stati individuati e contrassegnati i punti, tre per ogni faccia laterale, per l'esecuzione delle prove ultrasoniche da condurre durante la sperimentazione. Tali punti giacciono sull'asse baricentrico, distano 0.15 m tra loro e dallo spigolo delle facce di base e sono stati contrassegnati con numerazione progressiva da 1 a 3 seguendo la stessa direzione per tutte le facce. Nelle immagini seguenti sono mostrate la numerazione delle facce e dei punti di esecuzione delle prove ultrasoniche. Successivamente alla numerazione dei provini e all'individuazione dei punti caratteristici sono state condotte le prove ultrasoniche.

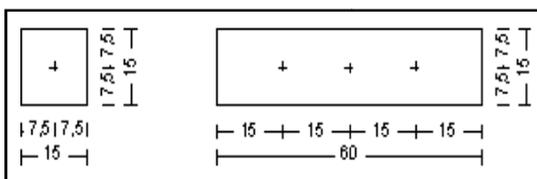


Figura 25. Disposizione dei punti di indagine delle prove ultrasoniche.

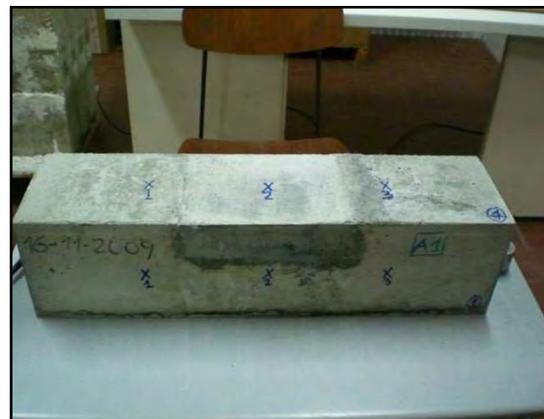


Figura 26. Immagine della numerazione dei travetti, delle facce e dei punti.

1.3 Rinforzo dei travetti

L'obiettivo principale della sperimentazione presentata in questa tesi consiste nel dimostrare la validità dei metodi di prova non distruttivi, in particolare ultrasonico e termografico, nella individuazione di difetti di aderenza eventualmente presenti tra il substrato in calcestruzzo e il rinforzo e l'individuazione di anomalie disposte all'interno del volume dell'elemento rinforzato. Per simulare le anomalie di aderenza si è deciso di disporre, nelle facce laterali di alcuni travetti dove sarebbero stati successivamente applicati i rinforzi, difetti artificiali realizzati tramite un nastro in teflon (T), un accumulo di colla (C) e uno spessore in plastica (P).



Figura 27. Difetti nei travetti. Da sinistra verso destra: nastro di teflon, accumulo di colla, spessore in plastica.

Nella tabella seguente è mostrata la distribuzione dei difetti nei vari provini, la loro forma e dimensione.

Tabella 1. Descrizione dei difetti nei travetti.

Provini	Posizione	Tipo di difetto	Forma	Dimensione
dall'A3 all'A10 dall'A12 all'A15	1	Teflon	quadrata	6 × 6 cm
	2	Colla	circolare	diam. 5 cm
	3	Plastica	quadrata	4 × 4 cm
dal B3 al B10 dal B12 al B15	1	Teflon	quadrata	6 × 6 cm
	2	Colla	circolare	diam. 5 cm
	3	Plastica	quadrata	4 × 4 cm
dal C3 al C10 dal C12 al C15	1	Teflon	quadrata	6 × 6 cm
	2	Colla	circolare	diam. 5 cm
	3	Plastica	quadrata	4 × 4 cm

Sono stati quindi impiegati i tre tipi di rinforzo:

- Rete in FRP;
- Lamina in FRP;
- Rete in PBO.

Nello schema seguente vengono indicati i travetti, per ogni serie, rinforzati con le differenti tecniche e materiali. È importante sottolineare che nei primi travetti di ogni serie e di ogni gruppo, come ad esempio A1, A2, A11, è stata realizzata la perfetta aderenza tra il sistema di rinforzo e il substrato in calcestruzzo, al fine di ottenere elementi di confronto.

Tabella 2. Individuazione dei travetti in funzione delle differenti tecniche di rinforzo adottate.

A1, A3, A5, A7, A9 B1, B3, B5, B7, B9 C1, C3, C5, C7, C9	• rete in FRP
A2, A4, A6, A8, A10 B2, B4, B6, B8, B10 C2, C4, C6, C8, C10	• lamina in FRP
A11, A12, A13, A14, A15 B11, B12, B13, B14, B15 C11, C12, C13, C14, C15	• rete in PBO

1.3.1 Rinforzo dei travetti con la rete in FRP

Per il rinforzo dei travetti con la rete in fibre di carbonio è stata utilizzata la rete X Wrap 310 prodotta dalla Ruredil, confezionata in rotoli da 26 m e avente una larghezza di 0.25 m.

Nelle tabelle successive sono riportate le caratteristiche tecniche della fibra, della rete e alcune informazioni relative all'aderenza del sistema di rinforzo al calcestruzzo.

Tabella 3. Caratteristiche tecniche della fibra in carbonio.

Tensione di rottura a trazione	4800 MPa
Modulo elastico a trazione	240 GPa
Allungamento a rottura	2%
Densità	1.8 g/cm ³

Tabella 4. Caratteristiche tecniche della fascia Ruredil X Wrap 310 (riferite al foglio non impregnato).

Resistenza caratteristica f_{tk}	>3500 MPa
Resistenza caratteristica per unità di larghezza f_{tkl}	>600 N/mm ²
Spessore nominale	0.17 mm
Peso per unità di area	310 g/m ²

Tabella 5. Aderenza del calcestruzzo.

Trazione diretta	> σ_{tcls} ovvero rottura del cls
Per taglio	> τ_{tcls} ovvero rottura del cls
Modulo elastico caratteristico E_{tk}	>240 GPa
Deformazione ultima	>1.5%
Compatibilità termica secondo EN 104-840-3;50 cicli	Nessun degrado
Fattore di resistenza al vapor acqueo (DIN 52615)	< 10 ⁵

La rete in fibra di carbonio è stata applicata su quindici provini, cinque per ogni serie di travetti. Nel primo travetto per ciascuna serie è stata realizzata la perfetta aderenza, mentre gli altri sono caratterizzati dalla presenza dei difetti disposti nella interfaccia fra la rete e il calcestruzzo. Nella tabella seguente è indicato il numero del lato rinforzato e la presenza o meno dei difetti di adesione.

Tabella 6. *Provini rinforzati con la rete in FRP.*

Serie A Lato 4	<ul style="list-style-type: none"> • A1 perfetta aderenza • A3, A5, A7, A9 con difetti di aderenza
Serie B Lato 1	<ul style="list-style-type: none"> • B1 perfetta aderenza • B3, B5, B7, B9 con difetti di aderenza
Serie C Lato 4	<ul style="list-style-type: none"> • C1 perfetta aderenza • C3, C5, C7, C9 con difetti di aderenza

Prima dell'applicazione della rete in FRP, la superficie del provino è stata pulita con una spazzola in acciaio sino ad ottenere una superficie piana, liscia e regolare. La rete in fibre di carbonio è stata ritagliata in fasce aventi le stesse dimensioni della superficie dei travetti. Sui provini è stato quindi applicato uno strato di primer, uno strato di resina, la rete e infine un ulteriore strato di resina.

Il primer impiegato è un prodotto bicomponente, fornito dallo stesso produttore della rete in fibra di carbonio. Nell'Appendice A sono riportati i calcoli effettuati per la determinazione della quantità necessaria dei due componenti per il rinforzo dei 15 travetti. Il primer è stato preparato omogeneizzando i due componenti con un miscelatore a bassa velocità ed è stato applicato sui provini con un pennello. Si è poi atteso il tempo necessario per la completa asciugatura dello stesso prima di procedere all'applicazione del primo strato di resina epossidica.

La resina epossidica è anch'essa un composto bicomponente. In Appendice A sono riportati i calcoli effettuati per la determinazione della quantità necessaria dei due componenti per il rinforzo dei 15 travetti. La resina è stata preparata omogeneizzando i due componenti con un miscelatore a bassa velocità ed è stata applicata sui travetti utilizzando un rullo.

Dopo un'attesa di circa trenta minuti è stata posizionata la rete, esercitando inizialmente una leggera pressione con le mani e poi con un rullo di gomma, dal centro verso le estremità, in modo da favorire la fuoriuscita di eventuali bolle d'aria e far aderire la rete perfettamente al travetto.

Dopo una ulteriore attesa di circa trenta minuti è stato applicato il secondo strato di resina epossidica, avente composizione differente rispetto al primo strato, per cui in Appendice A sono riportati i calcoli necessari per la determinazione della quantità

necessaria dei due componenti per il rinforzo dei 15 travetti. Il secondo strato di resina è stato preparato e applicato sopra la rete in modo da ricoprire completamente le fibre. L'applicazione del rinforzo è stata eseguita ad una temperatura pari a circa 15°C e la polimerizzazione è avvenuta al riparo dalla polvere e dall'umidità.

Nelle figure successive sono mostrate alcune immagini delle varie fasi di applicazione del rinforzo.



Figura 28. *Stesura del primer.*



Figura 29. *Stesura del primo strato di resina.*

Figura 30. *Stesura del primo strato di resina.*



Figura 31. *Applicazione della rete*

Figura 32. *Applicazione della rete.*



Figura 33. *Travetto rinforzato con la rete FRP dopo la polimerizzazione.*

1.3.2 Rinforzo dei travetti con la lamina in FRP

Per il rinforzo dei travetti è stata utilizzata la lamina X Lam 50S prodotta dalla Ruredil, confezionata in bobine di 20 m avente larghezza pari a 50 mm e spessore di 1.4 mm. Nelle tabelle successive sono indicate le caratteristiche tecniche del prodotto impiegato.

Tabella 7. Caratteristiche della lamina.

Tipologia di lamina	Ruredil X Lam 50 S
Sezione [mm]	1.4
Larghezza [mm]	50
Tensione di rottura a trazione [MPa]	>2200
Modulo elastico [GPa]	165
Allungamento a rottura [%]	1.3
Densità [g/cm ³]	1.6

Tabella 8. Caratteristiche della resina bicomponente.

Rapporto di catalisi A : B [in peso]	100 : 25
Densità [kg/dm ³]	1.65 - 1.67 (A+B)
Pot life a 25 °C [minuti]	60±10
Modulo elastico (a 20gg, 20 °C, 65% umidità) [MPa]	11000
Resistenza a compressione (a 20gg, 20 °C, 65% umidità) [MPa]	67
Adesione al calcestruzzo [MPa]	> 4 (si rompe il cls)

La lamina in fibra di carbonio è stata applicata su quindici provini, cinque per ogni serie di travetti. In un provino per ciascuna serie è stata realizzata la perfetta aderenza fra il sistema di rinforzo e il calcestruzzo. Nella tabella seguente è mostrato uno schema riepilogativo relativo ai prismi rinforzati con la lamina in FRP.

Tabella 9. Provini rinforzati con la lamina in FRP.

Serie A Lato 4	• A2 perfetta aderenza
	• A4, A6, A8, A10 con difetti di aderenza
Serie B Lato 1	• B2 perfetta aderenza
	• B4, B6, B8, B10 con difetti di aderenza
Serie C Lato 4	• C2 perfetta aderenza
	• C4, C6, C8, C10 con difetti di aderenza

Il lato di applicazione del rinforzo è stato pulito con una spazzola in acciaio sino ad ottenere un superficie piana, liscia e regolare. La lamina in fibre di carbonio è stata tagliata mediante sega a nastro per una lunghezza pari a 60 cm.

Per realizzare l'adesione del sistema di rinforzo sui travetti è stata utilizzata una resina epossidica bicomponente fornita dallo stesso produttore delle lamine. In Appendice A sono riportati i calcoli effettuati per determinare la quantità necessaria dei due componenti per il rinforzo dei 15 travetti.

I due componenti sono stati pesati con una bilancia elettronica di precisione e sono stati omogeneizzati con un miscelatore elettrico a bassa velocità. Per la loro posa in opera, le lamine sono state liberate dallo strato di pellicola protettiva presente nel lato interessato dal rinforzo. Su tale lato è poi stata stesa la resina, in uno spessore pari a circa 1.5 - 2.0 mm, con l'ausilio di una spatola dentata. Le lamine sono state quindi poste sulla superficie del travetto esercitando una pressione con un rullo in modo da distribuire uniformemente la resina e favorire la fuoriuscita delle eventuali bolle d'aria. Infine, è stata rimossa la pellicola protettiva presente sul lato esterno della lamina. L'applicazione del sistema di rinforzo è stata eseguita ad una temperatura di circa 15°C e la polimerizzazione è avvenuta al riparo da polvere e umidità.

Nelle immagini successive sono mostrate alcune fasi di applicazione delle lamine in FRP.



Figura 34. *Pesata dei componenti A e B.*



Figura 35. *Rimozione della prima pellicola protettiva della lamina.*



Figura 36. *Disposizione della prima lamina.*



Figura 37. *Disposizione della seconda lamina.*



Figura 38. Passaggio del rullo per la fuoriuscita delle bolle d'aria e della resina in eccesso.



Figura 39. Travetto rinforzato con le lamine in FRP.

1.3.3 Rinforzo dei travetti con la rete in PBO

Per il rinforzo dei travetti con la rete in PBO è stata utilizzata la rete bidirezionale (0/90°) XMesh Gold prodotta dalla Ruredil, confezionata in rotoli aventi larghezza pari a 1 m e lunghezza 15 m. L'applicazione e l'adesione della rete alla superficie dei travetti è garantita da una malta monocomponente a matrice inorganica, X Mesh M750, fornita dal produttore della rete stessa. Nelle tabelle successive sono indicate le caratteristiche riportate nella scheda tecnica del prodotto impiegato.

Tabella 10. Caratteristiche delle fibre di PBO.

Densità [g/cm ³]	1.56
Resistenza a trazione [GPa]	5.8
Modulo elastico [GPa]	270
Allungamento a rottura [%]	2.15
Temperatura di decomposizione [°C]	650
Coefficiente di dilatazione termica [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	- 6

Tabella 11. Caratteristiche della rete.

Peso della rete supporto + fibre di PBO [g/m ²]	da 110 a 126
Peso delle fibre di PBO nella rete [g/m ²]	88
Spessore equivalente di tessuto secco in direzione dell'ordito [mm]	0.0455
Spessore equivalente di tessuto secco in direzione della trama [mm]	0.0115
Carico di rottura dell'ordito per unità di larghezza [kN/m]	264.0
Carico di rottura della trama per unità di larghezza [kN/m]	66.5

Tabella 12. Caratteristiche della matrice inorganica.

Consistenza secondo UNI EN 196/3	175
Litri di H ₂ O per 100 kg di Ruredil X Mesh M750	24 - 26
Resa prodotto secco [kg/m ² /mm]	1.210 - 1.270
Resistenza a compressione a 28 gg [MPa]	≥ 15
Resistenza a flessione a 28 gg [MPa]	≥ 2
Modulo elastico secante a 28 gg [MPa]	≥ 6000

La rete in PBO è stata applicata su quindici provini, cinque per ogni serie di travetti. In un travetto per ciascuna serie è stata realizzata la perfetta aderenza fra il sistema di rinforzo e il calcestruzzo. Nella tabella seguente è presentato uno schema riepilogativo dei provini rinforzati con la rete in PBO.

Tabella 13. *Provini rinforzati con la rete in PBO.*

Serie A Lato 4	<ul style="list-style-type: none"> • A11 perfetta aderenza • A12, A13, A14, A15 con difetti di aderenza
Serie B Lato 1	<ul style="list-style-type: none"> • B11 perfetta aderenza • B12, B13, B14, B15 con difetti di aderenza
Serie C Lato 4	<ul style="list-style-type: none"> • C11 perfetta aderenza • C12, C13, C14, C15 con difetti di aderenza

La prima fase dell'operazione di rinforzo è consistita nella preparazione della malta seguendo i rapporti acqua/legante riportati nella Scheda Tecnica del prodotto. In Appendice A sono riportati i calcoli effettuati per determinare la quantità di malta necessaria per il rinforzo dei 15 travetti. Dopo aver versato in un apposito contenitore circa il 90% dell'acqua prescritta, si è azionata l'impastatrice aggiungendo la malta senza interruzioni per evitare la formazione di grumi. L'impasto è stato mescolato per 2-3 minuti, ed in seguito è stata aggiunta l'acqua rimanente. L'impasto è stato omogeneizzato per altri 1-2 minuti. Prima dell'applicazione, la malta è stata lasciata riposare per circa 2-3 minuti, e quindi rimescolata ed applicata sulla superficie dei provini.

Una superficie in calcestruzzo, affinché sia idonea per l'applicazione del sistema di rinforzo, deve risultare planare e priva di irregolarità per cui la faccia dei travetti interessata dal rinforzo è stata ripulita con una spazzola in acciaio e bagnata con acqua fino a saturazione, avendo cura di asportarne l'eccesso.

È stato quindi applicato un primo strato di malta, con uno spessore pari a circa 3 mm, e dopo un attesa di circa due minuti si è proceduto con il posizionamento della rete in PBO, esercitando una leggera pressione che permettesse alla malta di impregnare la rete stessa. Infine è stato eseguito un secondo strato di malta, anche questo con uno spessore pari a circa 3 mm, in modo da ricoprire completamente la rete. Nelle immagini successive sono mostrate differenti fasi relative all'applicazione della rete in fibra di PBO.



Figura 40. Preparazione malta.



Figura 41. Applicazione primo strato di malta.



Figura 42. Applicazione rete in PBO.



Figura 43. Applicazione secondo strato di malta.



Figura 44. Travetto rinforzato con la rete in PBO.

2 Prove Ultrasoniche

2.1 Introduzione

Con una semplice osservazione sperimentale è possibile constatare che i corpi, nell'emettere suoni si trovano in uno stato di vibrazione, intesa come uno spostamento elastico del corpo intorno ad una posizione di equilibrio. Di conseguenza, i suoni e le vibrazioni, sono due fenomeni strettamente connessi [Rayleigh, 1877].

Le prime ipotesi sulla natura dei suoni sono attribuite a Pitagora ed ad Aristotele, ma fu nel 1877, con la pubblicazione in Inghilterra del testo intitolato "The theory of sound" per opera di Rayleigh, che si gettarono le basi per una trattazione rigorosa dei fenomeni vibratorii di bassa e media frequenza.

Durante la prima guerra mondiale, in Francia, furono condotte delle prove sperimentali tese alla individuazione di sottomarini con l'impiego degli ultrasuoni emessi con il sistema Sonar. Nel 1933, in Germania, fu brevettato un metodo di analisi dei materiali basato sulla trasmissione di segnali ultrasonici continui.

Durante la seconda guerra mondiale lo sviluppo di tecniche radar e sonar, basate su segnali di tipo impulsivo, progredì rapidamente e nel 1942, negli USA, venne depositato il brevetto del "reflectoscope" di Firestone, strumento di analisi dei materiali basato sulla riflessione e l'eco di segnali impulsivi.

Negli ultimi decenni, grazie all'imponente sviluppo scientifico e tecnologico, è stato possibile assistere ad un forte impulso sulla sperimentazione di tecniche diagnostiche basate sui metodi acustici, da principio in campo medico (ecografia) e poi adottate anche in altri settori tra cui le prove sui materiali. In quest'ultimo campo, inizialmente l'applicazione ha riguardato i materiali "trasparenti" alle vibrazioni, come ad esempio i metalli, le materie plastiche omogenee, per poi estendersi a quelli poco trasparenti, quali i calcestruzzi, le pietre e i legni.

Gli sforzi della ricerca nel settore delle NDT industriali con ultrasuoni sono attualmente tesi alla demodulazione dei segnali di ritorno attraverso l'applicazione delle trasformate di Fourier (FFT). Ciò permette non solo d'individuare la posizione e di valutare la dimensione equivalente dei difetti, ma di vederne realmente la forma, diagnosticandone la natura, come già accade nell'ecografia in campo medico.

I metodi di prova sonici e ultrasonici sui materiali si basano generalmente sulla propagazione di onde elastiche longitudinali di compressione tra due punti, posti a

distanza nota ed opportunamente scelti sull'elemento sottoposto ad indagine, con frequenza inferiore a 20 kHz per i primi e superiori ai 20 kHz per i secondi.

Le onde che si generano in un corpo solido in seguito all'applicazione di un impulso Ultrasonico possono essere classificate in modo semplificato come segue [Cianfrone, 1993]:

- onde longitudinali, chiamate anche onde P o onde di pressione - trazione: al passaggio di queste onde, le particelle del mezzo attraversato oscillano nella stessa direzione di propagazione dell'onda. Sono le onde più veloci e si propagano in mezzi solidi, liquidi e aeriformi;
- onde trasversali, chiamate anche onde S o di taglio: fanno oscillare le particelle del mezzo attraversato in direzione ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda. Sono più lente rispetto alle onde longitudinali e si propagano solamente nei mezzi solidi;
- onde di superficie: si propagano coinvolgendo gli strati superficiali del mezzo attraversato e sono le più lente.

Nelle indagini ultrasoniche su elementi in calcestruzzo le onde maggiormente utilizzate sono quelle longitudinali, in quanto consentono di ottenere informazioni quali:

- ✓ l'uniformità del calcestruzzo;
- ✓ le variazioni delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo nel tempo;
- ✓ il modulo di elasticità dinamico;
- ✓ il coefficiente dinamico di Poisson;
- ✓ la presenza di difetti interni;
- ✓ l'indice percentuale di vuoti;
- ✓ la stima della resistenza caratteristica del calcestruzzo;
- ✓ lo spessore dello strato di calcestruzzo deteriorato;
- ✓ la valutazione dell'entità di fessure superficiali [Lombardo,2000].

Le indagini sui materiali tramite il metodo di prova Ultrasonico si basano sul principio fisico secondo cui la propagazione delle onde dipende dalle caratteristiche e proprietà del mezzo attraversato. I cambiamenti dei parametri numerici associati alla propagazione dell'onda sono generati da alterazioni delle proprietà fisiche del materiale indagato [Krautkammer & Krautkammer 1990].

L'applicazione tradizionale delle prove ultrasoniche si basa sulla determinazione della Velocità V dell'onda acustica che si propaga nel mezzo sottoposto a prova. L'indagine è condotta preferibilmente applicando la Tecnica di Trasmissione Diretta (DTT) [EN 12504-4 2004]. Secondo tale tecnica l'onda acustica è trasmessa attraverso il

provino da un trasduttore emettitore ed è poi ricevuta nel lato opposto da un secondo trasduttore ricevitore. Questo consente di misurare il tempo T , Tempo di Transit, che rappresenta il tempo impiegato dall'onda per attraversare lo spessore del provino, ossia la distanza esistente tra l'emettitore e il ricevitore lungo percorsi di lunghezza L . La Velocità media dell'onda viene quindi determinata tramite il semplice rapporto L/T . Dalla teoria della propagazione delle onde è noto che la Velocità V è funzione delle caratteristiche dei materiali, quali il modulo di elasticità dinamico E_d , il coefficiente di Poisson ν , e la densità ρ . Per un materiale omogeneo e isotropo la Velocità V è data dalla seguente relazione:

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}}$$

L'analisi delle Velocità consente, quindi, di ottenere informazioni cruciali nella indagine dei materiali.

Nei casi in cui i due lati opposti dell'elemento indagato non siano accessibili, le indagini Ultrasoniche possono essere condotte applicando la Tecnica di Trasmissione Semidiretta (STT) o Indiretta (ITT). Nella tecnica STT, i due trasduttori, emettitore e ricevitore, sono posti su due lati adiacenti, in genere fra loro ortogonali, del campione sottoposto a prova, mentre nella tecnica ITT i due trasduttori sono posti sullo stesso lato. Nella Figura seguente è mostrato il posizionamento dei trasduttori nelle tecniche DTT, STT e ITT.

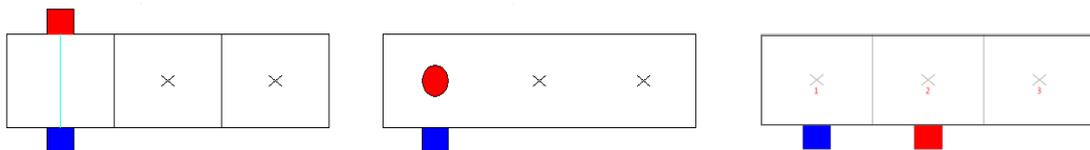


Figura 1. Da sinistra a destra: Posizionamento dei trasduttori nelle tecniche DTT, STT e ITT.

L'attenuazione dell'Amplitude e la Frequenza del segnale, correlate alla potenza dell'onda, consentono di ottenere ulteriori informazioni sul materiale indagato: l'onda è assorbita o attenuata in modo diverso nei differenti materiali. Inoltre, le onde sono riflesse dall'interfaccia di materiali differenti: la presenza di difetti e di anomalie modificano l'Amplitude e la Frequenza del segnale ricevuto [Nelligan, 2007; Camplani ed altri, 2008].

La prova tramite UT presenta i seguenti vantaggi:

- è un metodo di prova che può essere impiegato in laboratorio e in situ;
- non ha limiti in merito alle dimensioni dell'elemento sottoposto a prova;
- non presenta rischi legati all'impiego della strumentazione;
- il costo della strumentazione non è eccessivo;

- consente di effettuare indagini anche in elementi in cui risulta accessibile un solo lato;
- fornisce indicazioni utili sulla presenza e sulla profondità delle lesioni;
- è un metodo molto efficace se vengono analizzate contemporaneamente le variazioni di Velocità e l'Attenuazione del segnale.

Per quanto riguarda gli svantaggi:

- non esiste una relazione diretta che consenta di collegare la Velocità ultrasonica con la resistenza del calcestruzzo;
- le superfici di contatto con i trasduttori devono essere levigate e pulite, al fine di garantire il perfetto contatto e la ripetibilità della misura [Pucinotti, 2005].

Le prove Ultrasoniche, nel presente lavoro, sono state condotte applicando le Tecniche di Trasmissione Diretta e Semidiretta. Sono stati analizzati e elaborati i dati relativi al Tempo di Transitto del segnale lungo percorsi scelti, tre per ogni lato del travetto e, di conseguenza, sono state determinate le Velocità V . Un ulteriore parametro analizzato è l'ampiezza A del segnale ricevuto, valutata determinando la differenza esistente fra il picco massimo e minimo, come mostrato nella figura seguente. Nelle analisi è stato considerato il semplice parametro Ampiezza del segnale ricevuto in quanto risulta essere praticamente coincidente con l'Attenuazione del segnale, infatti, il segnale in ingresso è costante con un'ampiezza sempre identica per tutte le prove.

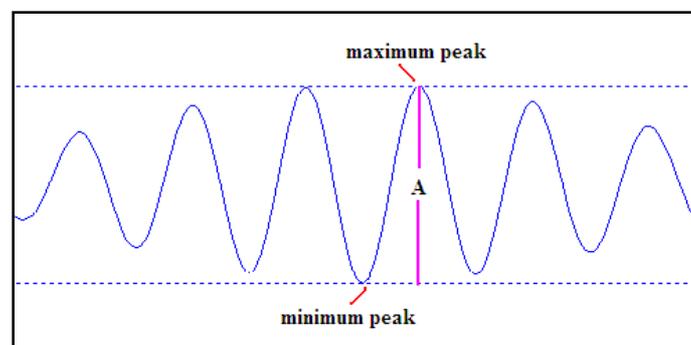


Figura 2. Determinazione dell'Ampiezza del segnale ricevuto A .

Sono stati inoltre analizzati ed elaborati i dati relativi all'Ampiezza Spettrale, valutata come indicato nella figura seguente.

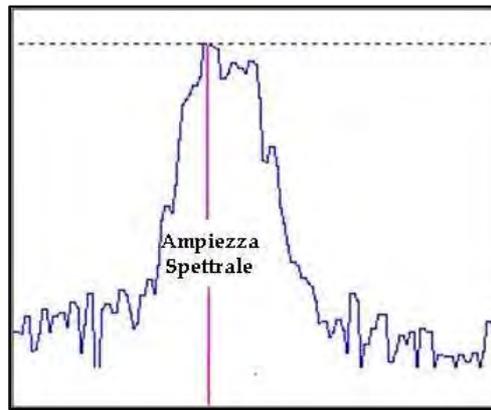


Figura 3. Determinazione dell'Ampiezza Spettrale del segnale ricevuto A.

Per sollecitare i provini è stato utilizzato un segnale di breve durata, costituito da sette cicli e mezzo racchiuso in una finestra di Hanning. La scelta è stata dettata dal fatto che è un segnale ampiamente utilizzato nelle prove NDT in quanto consente di separare i segnali desiderati dalle riflessioni spurie [Jackson, 1995]. Il segnale è descritto dalla relazione seguente:

$$y(t) = \frac{1}{2} \sin(2 \pi f t) \left[1 - \cos\left(\frac{2}{15} 2 \pi f t\right) \right]$$

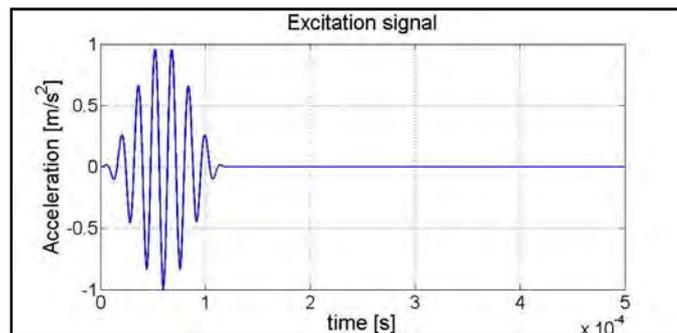


Figura 4. Segnale impiegato durante le prove UT.

La strumentazione impiegata per le prove è stata assemblata dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Infrastrutturale e Geomatica dell'Università degli Studi di Cagliari ed è costituita da:

- un generatore di funzioni d'onda arbitrario della Velleman Instruments per la generazione del segnale;
- un oscilloscopio digitale della Velleman Instruments per la visualizzazione del segnale e per la sua analisi preliminare;
- un paio di trasduttori piezoelettrici (con frequenza di risonanza pari a 54 kHz) per la immissione e la ricezione del segnale;
- un PC, con software dedicato, per l'acquisizione e il trattamento dei segnali.

Per ridurre la dissipazione dell'energia del segnale dovuta alla diversa impedenza acustica dei materiali a contatto e per favorire l'ottimizzazione della trasmissione del

segnale attraverso l'interfaccia trasduttore - materiale, si è utilizzato il grasso di vasellina come agente di accoppiamento, mentre, al fine di garantire l'assialità dei trasduttori e le medesime condizioni operative è stato appositamente utilizzato un sistema di supporto. Nella figura successiva è mostrato uno schema del set-up strumentale impiegato nelle prove.

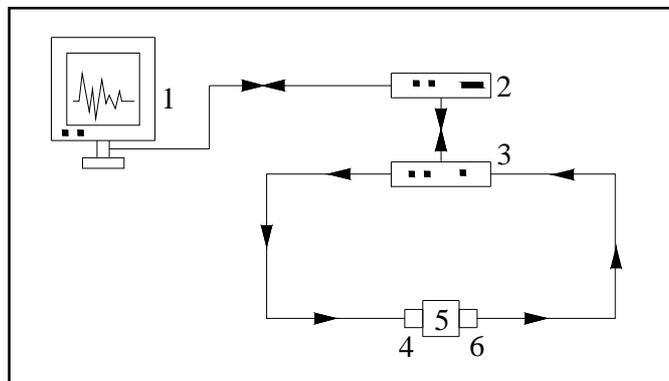


Figura 5. Set-up strumentale. 1)PC. 2)Generatore del segnale. 3)Oscilloscopio. 4,6) Trasduttori. 5)Travetto.



Figura 6. Immagine della strumentazione impiegata.

2.2 Prove Ultrasoniche sui travetti non rinforzati

Le prove Ultrasoniche sui travetti non rinforzati sono state condotte applicando la Tecnica di Trasmissione Diretta (DTT) e la Tecnica di Trasmissione Semidiretta (STT). Di seguito saranno analizzati i risultati relativi ai Tempi di Transito e alle corrispondenti Velocità, omettendo di riportare i risultati relativi alle Ampiezze e alle Ampiezze Spettrali in quanto non hanno consentito di ottenere informazioni aggiuntive.

2.2.1 Prove UT sui travetti della Serie A

Risultati dell'applicazione della DTT

Nella Tabella successiva sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità, determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini, ottenuti tramite l'applicazione della Tecnica di Trasmissione Diretta nei travetti della Serie A, caratterizzati dalla presenza della malta di ripristino.

Tabella 1. Valori della DTT dei travetti della Serie A.

Travetto	Percorso	Tempo [µs]	Velocità [m/s]
A1	1 - 3	61.53	2437.70
		61.60	2435.06
		59.27	2530.93
	2 - 4	56.73	2643.95
		60.20	2491.69
		52.13	2877.24
A2	1 - 3	44.07	3403.93
		52.73	2844.50
		51.93	2888.32
	2 - 4	56.60	2650.18
		59.67	2513.97
		51.13	2933.51
A3	1 - 3	52.07	2880.92
		51.33	2922.08
		50.47	2972.26
	2 - 4	51.60	2906.98
		60.40	2483.44
		52.33	2866.24
A4	1 - 3	51.93	2888.32
		52.53	2855.33
		52.00	2884.62
	2 - 4	59.20	2533.78
		51.20	2929.69
		51.67	2903.23
A5	1 - 3	48.87	3069.58
		49.27	3044.65
		51.13	2933.51
	2 - 4	51.73	2899.48
		54.47	2753.98
		52.13	2877.24
A6	1 - 3	56.93	2634.66
		60.40	2483.44
		49.60	3024.19
	2 - 4	58.40	2568.49
		59.53	2519.60
		52.33	2866.24
A7	1 - 3	50.33	2980.13
		50.93	2945.03
		51.00	2941.18

	2 - 4	51.87	2892.03
		53.13	2823.09
		53.33	2812.50
A8	1 - 3	52.60	2851.71
		51.60	2906.98
		52.47	2858.96
	2 - 4	50.80	2952.76
		52.27	2869.90
		50.60	2964.43
A9	1 - 3	60.27	2488.94
		51.67	2903.23
		51.07	2937.34
	2 - 4	49.60	3024.19
		53.07	2826.63
		52.07	2880.92
A10	1 - 3	52.33	2866.24
		48.40	3099.17
		52.20	2873.56
	2 - 4	50.13	2992.02
		53.40	2808.99
		58.67	2556.82
A11	1 - 3	52.80	2840.91
		51.60	2906.98
		52.40	2862.60
	2 - 4	51.20	2929.69
		58.40	2568.49
		51.20	2929.69
A12	1 - 3	56.80	2640.85
		54.00	2777.78
		52.40	2862.60
	2 - 4	51.20	2929.69
		50.40	2976.19
		52.40	2862.60
A13	1 - 3	50.80	2952.76
		52.00	2884.62
		52.40	2862.60
	2 - 4	51.60	2906.98
		58.80	2551.02
		51.20	2929.69
A14	1 - 3	52.40	2862.60
		52.40	2862.60
		55.60	2697.84
	2 - 4	52.80	2840.91

		55.20	2717.39
		52.00	2884.62
A15	1 - 3	52.40	2862.60
		50.80	2952.76

		52.00	2884.62
		55.20	2717.39
	2 - 4	52.80	2840.91
		51.60	2906.98

La malta di ripristino, presente sul lato 4 dei travetti, viene incontrata dai trasduttori solo nella seconda acquisizione della percorso 2 - 4. Come si può notare dalla Tabella 1 la Velocità ottenuta in corrispondenza del ripristino in malta varia tra 2483.44 m/s e 2976.19 m/s con valore medio pari a 2711.66 m/s. Tale valore risulta essere prossimo a quello medio dell'intera Serie: si può pertanto concludere che questa anomalia non ha determinato una sensibile alterazione del Tempo di Transito e della conseguente Velocità del segnale Ultrasonico.

Di seguito è riportato l'istogramma dei Tempi di Transito del segnale Ultrasonico impiegato nelle prove.

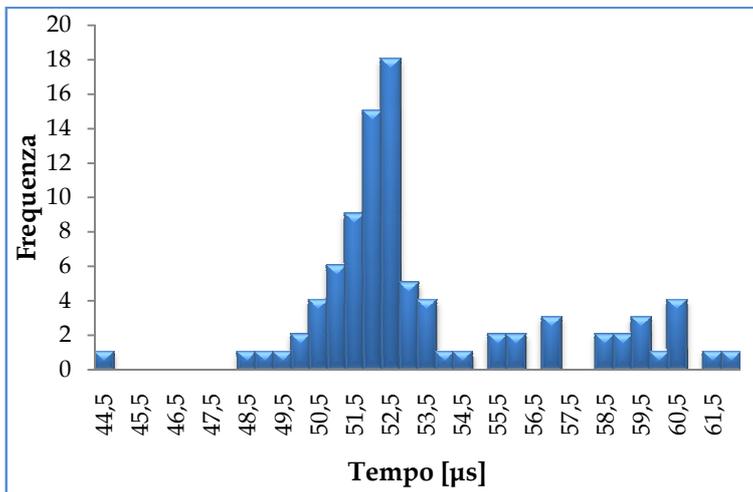


Grafico 1. Distribuzione del Tempo di Transito determinata tramite la DTT per i provini della Serie A.

Come è possibile notare dal Grafico 1, il range di variazione dei Tempi di Transito è pari a 18 µs, ma vi è una concentrazione dei dati in corrispondenza dell'intervallo 48.0 - 54.0 µs, dove ricade circa il 74 % delle acquisizioni effettuate. Di seguito sono riportati i valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito dei travetti della Serie.

Tabella 2. Valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito della Serie A.

	Minimo [µs]	Massimo [µs]	Media [µs]	DSR* [µs]	DSP* [%]	Mediana [µs]	Moda [µs]
Tempo di Transito	44.07	61.60	53.22	3.33	5.99	53.23	52.40

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

I valori di Moda e Mediana sono prossimi al Valore Medio della distribuzione per cui quest'ultimo dato è effettivamente rappresentativo dell'intera distribuzione.

Di seguito è presentato l'istogramma della Velocità del segnale.

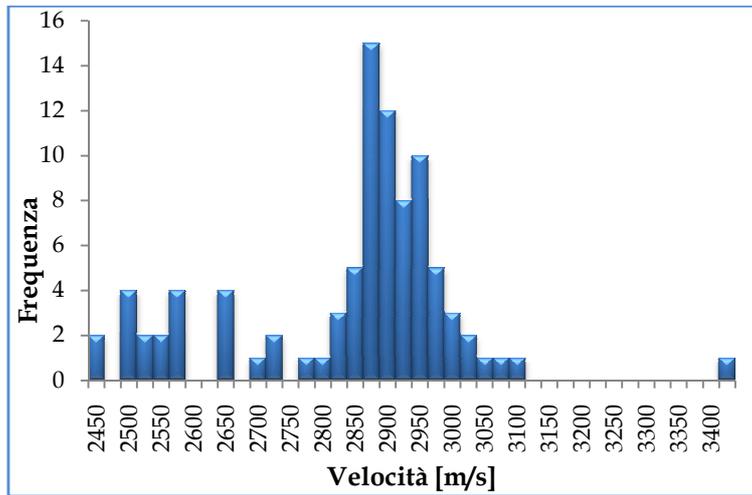


Grafico 2. Distribuzione della Velocità determinata tramite la DTT per i travetti della Serie A.

Il legame di proporzionalità inversa esistente tra il Tempo di Transito e la Velocità implica che lo sviluppo di questo diagramma sia simile a quello relativo al Tempo di Transito, ma con una distribuzione speculare rispetto ad esso. Come evidenziato dal Grafico 2, il range di variazione della Velocità è pari a circa 900 m/s, ma vi è una concentrazione dei dati nell'intervallo 2800 - 3100 m/s, nel quale ricade il 78 % dei valori acquisiti. Di seguito sono riportati i valori caratteristici della distribuzione della Velocità dei travetti della Serie.

Tabella 3. Valori caratteristici della distribuzione delle Velocità della Serie A.

	Minimo [m/s]	Massimo [m/s]	Media [m/s]	DSR* [m/s]	DSP* [%]	Mediana [m/s]	Moda [m/s]
Velocità	2435.06	3403.93	2829.07	169.39	5.99	2871.73	2862.60

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

I valori di Media e Mediana della distribuzione sono prossimi alla media della Velocità per cui quest'ultimo dato è rappresentativo dell'intera distribuzione.

Risultati dell'applicazione della STT

Di seguito è riportata la tabella contenente i Tempi di Transito e le relative Velocità, determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini, ottenuti con l'applicazione della Tecnica di Trasmissione Semidiretta nei singoli travetti della Serie.

Tabella 4. Valori della STT dei travetti della Serie A.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
A1	1 - 2	45.40	2336.26
		43.67	2428.99
		50.67	2093.41
	1 - 4	50.20	2112.87
		50.27	2110.07
		52.67	2013.91
	3 - 2	48.33	2194.47

	3 - 4	57.10	1857.55
		42.07	2521.38
		56.00	1894.04
		58.93	1799.76
A2	1 - 2	53.07	1998.73
		50.20	2112.87
		59.00	1797.73
	1 - 4	59.67	1777.64
		53.87	1969.05
		53.67	1976.39

	3 - 2	48.27	2197.50	
		43.40	2443.92	
		52.07	2037.12	
		42.27	2509.45	
	3 - 4	48.47	2188.43	
		59.67	1777.64	
		48.20	2200.54	
A3	1 - 2	48.40	2191.45	
		48.20	2200.54	
		43.67	2428.99	
	1 - 4	50.67	2093.41	
		45.53	2329.41	
		49.53	2141.31	
	3 - 2	44.13	2403.31	
		47.40	2237.68	
		50.13	2115.68	
	3 - 4	50.20	2112.87	
		52.33	2026.74	
		49.33	2149.99	
		49.67	2135.56	
	A4	1 - 2	47.60	2228.28
49.33			2149.99	
42.67			2485.92	
1 - 4		41.87	2533.42	
		55.80	1900.82	
		47.00	2256.72	
3 - 2		43.93	2414.25	
		45.80	2315.85	
		51.67	2052.89	
3 - 4		46.13	2299.12	
		50.27	2110.07	
		49.67	2135.56	
A5		1 - 2	51.60	2055.54
			50.00	2121.32
	47.67		2225.16	
	1 - 4	49.07	2161.67	
		50.07	2118.50	
		47.53	2231.40	
	3 - 2	43.07	2462.83	
		42.53	2493.72	
		49.73	2132.69	
	3 - 4	50.40	2104.48	
		49.80	2129.84	
		47.33	2240.83	
	A6	1 - 2	43.87	2417.92
			51.00	2079.73
49.67			2135.56	
1 - 4		45.27	2343.14	
		51.73	2050.25	
		43.00	2466.65	
3 - 2		40.87	2595.42	
		42.00	2525.38	
		42.47	2497.63	
3 - 4		42.27	2509.45	
		40.93	2591.19	

A7	1 - 2	49.53	2141.31
		43.27	2451.45
		50.00	2121.32
	1 - 4	49.47	2144.19
		52.27	2029.32
		52.20	2031.92
	3 - 2	41.40	2561.98
		47.53	2231.40
		52.07	2037.12
	3 - 4	48.67	2179.44
48.00		2209.71	
47.20		2247.16	
A8	1 - 2	48.40	2191.45
		52.07	2037.12
		51.67	2052.89
	1 - 4	53.33	1988.74
		45.20	2346.59
		46.73	2269.60
	3 - 2	43.87	2417.92
		41.07	2582.78
		41.07	2582.78
	3 - 4	51.27	2068.91
49.67		2135.56	
55.20		1921.49	
A9	1 - 2	45.53	2329.41
		47.67	2225.16
		43.13	2459.03
	1 - 4	45.80	2315.85
		46.40	2285.91
		47.73	2222.05
	3 - 2	40.33	2629.74
		48.73	2176.46
		45.60	2326.01
	3 - 4	49.47	2144.19
52.00		2039.73	
50.60		2096.17	
A10	1 - 2	49.87	2126.99
		55.47	1912.25
		54.00	1964.19
	1 - 4	47.40	2237.68
		47.40	2237.68
		45.40	2336.26
	3 - 2	52.47	2021.59
		45.73	2319.23
		47.20	2247.16
	3 - 4	50.60	2096.17
46.07		2302.45	
54.33		1952.14	
A11	1 - 2	44.00	2410.59
		42.00	2525.38
		45.20	2346.59
	1 - 4	49.20	2155.81
		46.40	2285.91
		43.20	2455.23
	3 - 2	41.20	2574.42

		48.00	2209.71	
		47.20	2247.16	
		3 - 4	49.20	2155.81
			50.40	2104.48
			48.80	2173.48
A12	1 - 2	47.20	2247.16	
		45.60	2326.01	
		48.80	2173.48	
	1 - 4	50.00	2121.32	
		48.00	2209.71	
		48.80	2173.48	
	3 - 2	46.00	2305.78	
		41.20	2574.42	
		47.20	2247.16	
	3 - 4	46.80	2266.37	
		42.40	2501.56	
		49.20	2155.81	
	A13	1 - 2	46.00	2305.78
46.00			2305.78	
48.00			2209.71	
1 - 4		48.00	2209.71	
		50.40	2104.48	
		48.00	2209.71	
3 - 2		48.40	2191.45	
		46.80	2266.37	
		41.20	2574.42	
3 - 4		52.00	2039.73	
		49.60	2138.43	
A14		1 - 2	49.20	2155.81
			43.20	2455.23
	41.20		2574.42	
	1 - 4	41.20	2574.42	
		47.20	2247.16	
		41.60	2549.66	
	3 - 2	49.60	2138.43	
		41.20	2574.42	
		48.00	2209.71	
	3 - 4	47.20	2247.16	
		49.20	2155.81	
		50.40	2104.48	
	A15	3 - 4	48.80	2173.48
42.40			2501.56	
47.60			2228.28	
1 - 2		48.40	2191.45	
		48.80	2173.48	
		57.20	1854.30	
1 - 4		47.60	2228.28	
		48.00	2209.71	
		40.40	2625.40	
3 - 2		48.40	2191.45	
		54.00	1964.19	
		50.00	2121.32	
3 - 4		49.60	2138.43	

L'anomalia realizzata con la malta di ripristino viene intercettata in corrispondenza del secondo punto dei percorsi 1 - 4 e 3 - 4. In questo caso si ha il valore minimo di Velocità pari a 1777.64 m/s e il massimo pari a 2549.66 m/s con media pari a 2184.42 m/s. Come nel caso delle acquisizioni tramite la DTT, il valore medio determinato in corrispondenza dell'anomalia realizzata con la malta di ripristino è simile alle Velocità negli altri punti di misura: il difetto non ha determinato una variazione del Tempo di Transito e quindi della Velocità del segnale.

Di seguito è riportato l'istogramma dei Tempi di Transito.

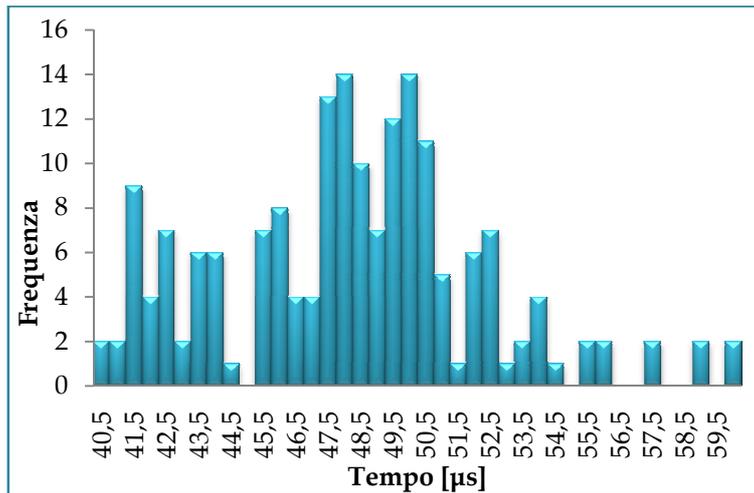


Grafico 3. Distribuzione del Tempo di Transito determinata tramite la STT per i provini della Serie A.

Il range di variazione dei Tempi di Transito è pari a circa 20 μs, ma la concentrazione maggiore dei dati si ha in corrispondenza dell'intervallo 45.0 - 54.0 μs, dove ricade circa il 72% delle acquisizioni. Di seguito sono riportati i valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito dei travetti.

Tabella 5. Valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito della Serie A.

	Minimo [μs]	Massimo [μs]	Media [μs]	DSR* [μs]	DSP* [%]	Mediana [μs]	Moda [μs]
Tempo di Transito	40.33	59.67	48.00	4.07	8.48	48.20	48.00

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

La Moda e la Mediana coincidono con il valore medio per cui tale dato è rappresentativo dell'intera distribuzione.

Nel Grafico 4 è riportata la distribuzione delle Velocità. Il range di variazione dei dati è pari a circa 850 m/s, ma la concentrazione maggiore si riscontra nell'intervallo di 2000 - 2400 m/s dove ricade circa il 70 % delle acquisizioni effettuate.

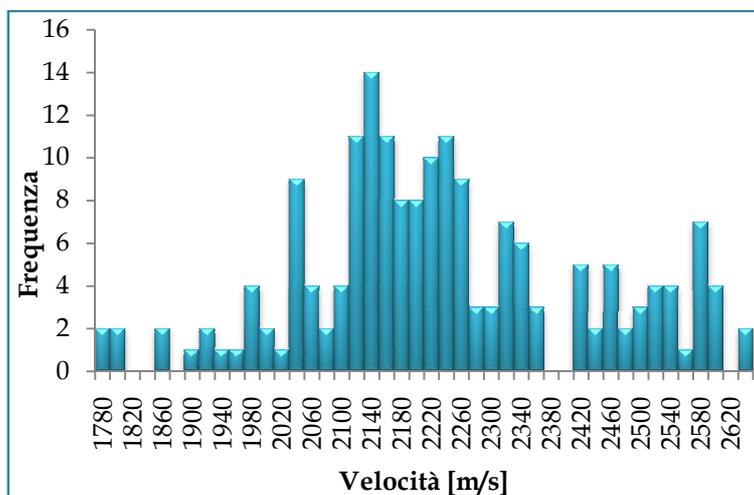


Grafico 4. Distribuzione della Velocità determinata tramite la STT della Serie A.

I valori caratteristici della distribuzione della Velocità determinati tramite la STT sono indicati nella tabella di seguito riportata.

Tabella 6. Valori caratteristici della distribuzione delle Velocità della Serie A.

	Minimo [m/s]	Massimo [m/s]	Media [m/s]	DSR* [m/s]	DSP* [%]	Mediana [m/s]	Moda [m/s]
Velocità	1777.64	2629.74	2225.37	188.18	8.46	2200.54	2209.71

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

La Moda e la Mediana sono prossimi al valore Medio, per cui tale dato è rappresentativo dell'intera distribuzione.

Le Velocità rilevate mediante la STT sono inferiori rispetto ai valori determinati tramite la DTT. Questa differenza è legata alla natura del metodo STT, che fornisce valori tendenzialmente più sparsi e più difficilmente interpretabili, come peraltro sottolineato nella norma EN 12504-4 2004 che fornisce le indicazioni per le modalità esecutive delle prove Ultrasoniche.

2.2.2 Prove UT sui travetti della Serie B

Risultati dell'applicazione della DTT

Nella Tabella 7 sono riportati i Tempi di Transito e le Velocità, ottenuti nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini della Serie.

Tabella 7. Valori della DTT dei travetti della Serie B.

Travetto	Percorso	Tempo [µs]	Velocità [m/s]
B1	1 - 3	54.53	2750.61
		56.07	2675.39
		59.53	2519.60
	2 - 4	52.40	2862.60
		53.00	2830.19
		51.93	2888.32
B2	1 - 3	51.47	2914.51
		52.47	2858.96
		52.20	2873.56
	2 - 4	51.93	2888.32
		54.20	2767.53
		53.27	2816.02
B3	1 - 3	54.07	2774.35
		53.47	2805.49
		54.13	2770.94
	2 - 4	55.80	2688.17
		54.47	2753.98
		53.20	2819.55
B4	1 - 3	54.47	2753.98
		52.07	2880.92
		55.07	2723.97

	2 - 4	54.07	2774.35
		54.67	2743.90
		53.40	2808.99
B5	1 - 3	51.60	2906.98
		56.07	2675.39
		52.00	2884.62
	2 - 4	55.73	2691.39
		54.47	2753.98
		53.80	2788.10
B6	1 - 3	60.20	2491.69
		50.67	2960.53
		51.53	2910.74
	2 - 4	51.00	2941.18
		52.47	2858.96
		52.33	2866.24
B7	1 - 3	50.80	2952.76
		52.53	2855.33
		52.40	2862.60
	2 - 4	53.53	2801.99
		54.20	2767.53
		52.93	2833.75
B8	1 - 3	53.53	2801.99
		60.13	2494.46
		51.67	2903.23
	2 - 4	54.47	2753.98

		53.47	2805.49			52.00	2884.62
		53.87	2784.65			51.60	2906.98
B9	1 - 3	51.53	2910.74	B13	1 - 3	57.20	2622.38
		51.20	2929.69			52.40	2862.60
		55.40	2707.58			50.80	2952.76
	2 - 4	53.13	2823.09		2 - 4	52.80	2840.91
		55.80	2688.17			52.40	2862.60
		58.27	2574.37			52.80	2840.91
B10	1 - 3	53.40	2808.99	B14	1 - 3	53.20	2819.55
		58.27	2574.37			51.60	2906.98
		59.33	2528.09			53.60	2798.51
	2 - 4	54.40	2757.35		2 - 4	52.00	2884.62
		53.53	2801.99			53.60	2798.51
		54.53	2750.61			52.00	2884.62
B11	1 - 3	53.20	2819.55	B15	1 - 3	52.40	2862.60
		54.20	2767.53			52.40	2862.60
		52.80	2840.91			52.00	2884.62
	2 - 4	57.60	2604.17		2 - 4	52.00	2884.62
		54.40	2757.35			52.40	2862.60
		52.80	2840.91			51.60	2906.98
B12	1 - 3	52.80	2840.91				
		58.80	2551.02				
		53.60	2798.51				
	2 - 4	52.00	2884.62				

Nei travetti appartenenti a questa Serie non è stata predisposta alcuna anomalia. Nel Grafico 5 è mostrata la distribuzione dei Tempi di Transito.

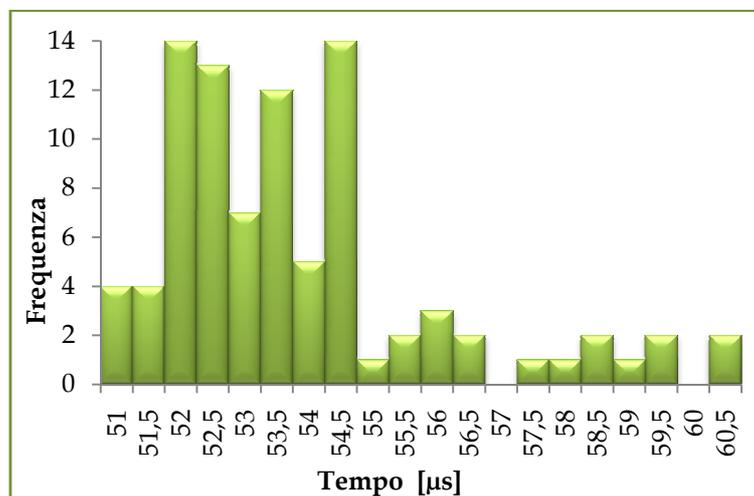


Grafico 5. Distribuzione del Tempo di Transito determinata tramite la DTT per i provini della Serie B.

L'intervallo di variazione del Tempo di Transito del segnale è pari a circa 10 µs ed è circa la metà rispetto a quello determinato per i provini della Serie A.

La concentrazione maggiore dei dati è stata determinata nell'intervallo 51 - 55 µs, dove ricade circa l'80% delle acquisizioni effettuate. Nella Tabella 8 sono indicati i valori caratteristici della distribuzione del Tempo di Transito.

Tabella 8. Valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transitto della Serie B.

	Minimo [μs]	Massimo [μs]	Media [μs]	DSR* [μs]	DSP* [%]	Mediana [μs]	Moda [μs]
Tempo di Transitto	50.67	60.20	53.66	2.14	3.99	53.20	52.40

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

Il valore medio del Tempo di Transitto è prossimo alla Moda e alla Mediana, per cui il dato è rappresentativo dell'intera distribuzione.

Nel Grafico 6 è rappresentata la distribuzione delle Velocità. Il range di variazione tra il valore massimo e il minimo è pari a 500 m/s ma il 78% delle acquisizioni ricade nell'intervallo compreso tra 2600 - 2900 m/s.

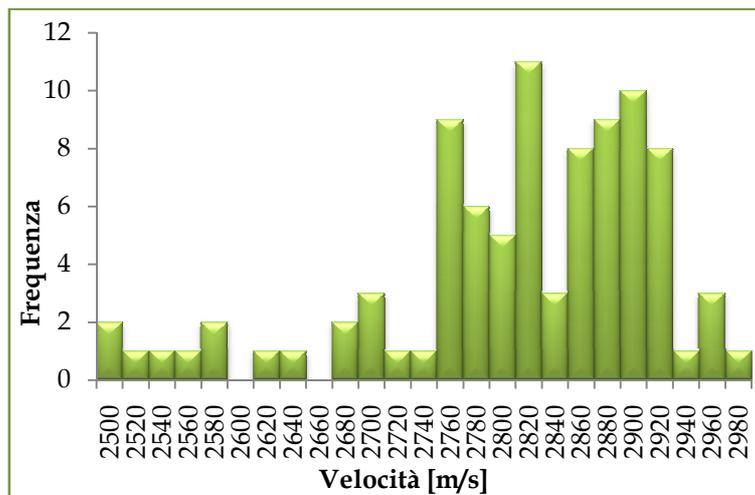


Grafico 6. Distribuzione della Velocità determinata tramite la DTT della Serie B.

Nella Tabella 9 sono indicati i valori caratteristici della distribuzione delle Velocità.

Tabella 9. Valori caratteristici della distribuzione delle Velocità della Serie B.

	Minimo [m/s]	Massimo [m/s]	Media [m/s]	DSR* [m/s]	DSP* [%]	Mediana [m/s]	Moda [m/s]
Velocità	2491.69	2960.53	2799.81	106.36	3.80	2819.55	2862.60

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

Il valore Medio è leggermente inferiore alla Moda e alla Mediana a causa della asimmetria presente nel grafico, ma il suo valore risulta rappresentativo dell'intera distribuzione.

Risultati dell'applicazione della STT

In Tabella 10 sono riportati i valori dei Tempi di Transitto e della Velocità, determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini, ottenuti con la applicazione della Tecnica di Trasmissione Semidiretta.

Tabella 10. Valori della STT dei travetti della Serie B.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
B1	1 - 2	43.87	2417.92

		47.27	2243.99
		45.60	2326.01
	1 - 4	51.93	2042.35
		50.80	2087.91

	3 - 2	57.07	1858.63	
		44.93	2360.52	
		43.20	2455.23	
		47.60	2228.28	
	3 - 4	48.67	2179.44	
		49.47	2144.19	
		49.13	2158.74	
		50.87	2085.18	
	B2	1 - 2	57.73	1837.17
			41.93	2529.40
			47.00	2256.72
		1 - 4	48.80	2173.48
48.20			2200.54	
54.53			1944.98	
3 - 2		42.53	2493.72	
		43.20	2455.23	
		43.53	2436.43	
3 - 4		43.33	2447.68	
		48.40	2191.45	
		49.60	2138.43	
B3	1 - 2	42.27	2509.45	
		45.27	2343.14	
		43.67	2428.99	
	1 - 4	47.67	2225.16	
		43.53	2436.43	
		40.40	2625.40	
	3 - 2	50.00	2121.32	
		52.20	2031.92	
		48.40	2191.45	
	3 - 4	46.67	2272.84	
		41.07	2582.78	
		45.73	2319.23	
B4	1 - 2	53.53	1981.31	
		46.87	2263.14	
		50.30	2108.67	
	1 - 4	48.80	2173.48	
		58.00	1828.72	
		42.93	2470.48	
	3 - 2	40.13	2642.84	
		46.20	2295.80	
		46.67	2272.84	
	3 - 4	49.27	2152.90	
		47.73	2222.05	
		46.93	2259.93	
B5	1 - 2	50.67	2093.41	
		49.67	2135.56	
		45.60	2326.01	
	1 - 4	46.93	2259.93	
		48.33	2194.47	
		49.13	2158.74	
	3 - 2	43.27	2451.45	
		48.67	2179.44	
		45.80	2315.85	
	3 - 4	42.00	2525.38	
		48.07	2206.64	
		45.60	2326.01	
B6	1 - 2	53.13	1996.22	
		39.73	2669.45	
		46.87	2263.14	
	1 - 4	50.47	2101.70	
		46.53	2279.36	
		41.53	2553.76	
	3 - 2	46.60	2276.09	
		51.40	2063.54	
		45.20	2346.59	
	3 - 4	47.80	2218.95	
		45.60	2326.01	
		43.27	2451.45	
B7	1 - 2	46.67	2272.84	
		40.67	2608.18	
		49.80	2129.84	
	1 - 4	43.07	2462.83	
		48.27	2197.50	
		43.27	2451.45	
	3 - 2	53.60	1978.84	
		49.73	2132.69	
		42.93	2470.48	
	3 - 4	48.00	2209.71	
		50.67	2093.41	
		44.13	2403.31	
B8	1 - 2	48.73	2176.46	
		45.13	2350.06	
		43.53	2436.43	
	1 - 4	50.13	2115.68	
		43.13	2459.03	
		50.07	2118.50	
	3 - 2	50.07	2118.50	
		42.80	2478.18	
		50.13	2115.68	
	3 - 4	46.67	2272.84	
		46.27	2292.49	
		48.53	2185.43	
B9	1 - 2	46.33	2289.19	
		45.27	2343.14	
		46.67	2272.84	
	1 - 4	50.00	2121.32	
		44.00	2410.59	
		42.27	2509.45	
	3 - 2	49.87	2126.99	
		46.13	2299.12	
		46.33	2289.19	
	3 - 4	43.53	2436.43	
		44.13	2403.31	
		54.40	1949.74	
B10	1 - 2	45.33	2339.69	
		57.73	1837.17	
		42.40	2501.56	
	1 - 4	44.60	2378.16	
		59.47	1783.62	
		64.13	1653.84	
	3 - 2	64.13	1653.84	

	3 - 4	44.67	2374.61
		51.20	2071.60
		50.47	2101.70
		52.67	2013.91
		47.13	2250.34
B11	1 - 2	53.20	1993.72
		56.40	1880.60
		52.60	2016.46
	1 - 4	43.80	2421.60
		50.80	2087.91
		44.40	2388.87
	3 - 2	46.00	2305.78
		51.20	2071.60
		42.00	2525.38
	3 - 4	50.00	2121.32
		44.40	2388.87
		49.20	2155.81
	B12	1 - 2	44.40
42.00			2525.38
47.60			2228.28
1 - 4		47.20	2247.16
		48.80	2173.48
		50.00	2121.32
3 - 2		44.00	2410.59
		49.60	2138.43
		43.20	2455.23
3 - 4		42.80	2478.18
		43.80	2421.60
	43.80	2421.60	
B13	1 - 2	49.20	2155.81
		50.80	2087.91
		42.80	2478.18
	1 - 4	41.60	2549.66
		46.40	2285.91

	3 - 2	48.80	2173.48
		50.00	2121.32
		48.40	2191.45
		47.20	2247.16
		41.60	2549.66
	3 - 4	48.40	2191.45
		46.80	2266.37
		48.40	2191.45
B14	1 - 2	48.40	2191.45
		48.40	2191.45
		47.20	2247.16
	1 - 4	42.00	2525.38
		41.60	2549.66
		46.00	2305.78
	3 - 2	49.20	2155.81
		48.80	2173.48
		48.80	2173.48
	3 - 4	46.80	2266.37
		47.20	2247.16
		47.60	2228.28
	B15	1 - 2	48.80
45.60			2326.01
48.00			2209.71
1 - 4		49.20	2155.81
		48.80	2173.48
		47.20	2247.16
3 - 2		48.40	2191.45
		47.20	2247.16
		46.40	2285.91
3 - 4		46.80	2266.37
		46.80	2266.37
	50.40	2104.48	

Come già osservato nei travetti della Serie A, i valori rilevati mediante la STT sono inferiori rispetto a quelli determinati con la DTT. Nel Grafico 7 è mostrata la distribuzione dei Tempi di Transito. Nonostante il range di variazione sia pari a 24 μ s, la concentrazione maggiore di dati, pari al 90 % circa delle acquisizioni effettuate, si ha nell'intervallo compreso tra 41.0 e 52.0 μ s.

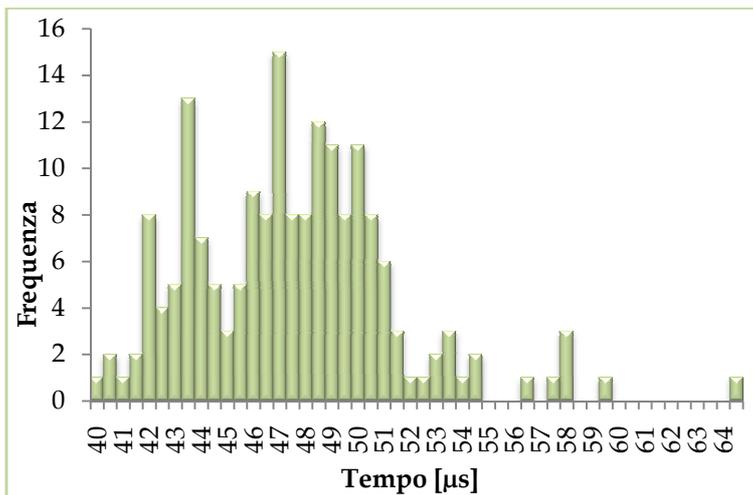


Grafico 7. Distribuzione del Tempo di Transito determinata tramite la STT della Serie B.

I valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito sono indicati nella tabella seguente.

Tabella 11. Valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito della Serie B.

	Minimo [μs]	Massimo [μs]	Media [μs]	DSR* [μs]	DSP* [%]	Mediana [μs]	Moda [μs]
Tempo di Transito	39.73	64.13	47.33	3.90	8.25	47.20	48.40

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

Si tratta di una distribuzione asimmetrica con valore Medio prossimo alla Mediana. La Media è quindi un parametro attendibile e rappresentativo della distribuzione dei dati.

Nel Grafico 8 è riportata la distribuzione delle Velocità rilevate mediante la STT. Il range di variazione dei dati è pari a circa 1000 m/s ma circa l'80% dei valori registrati ricade nell'intervallo compreso tra 2100 - 2500 m/s.

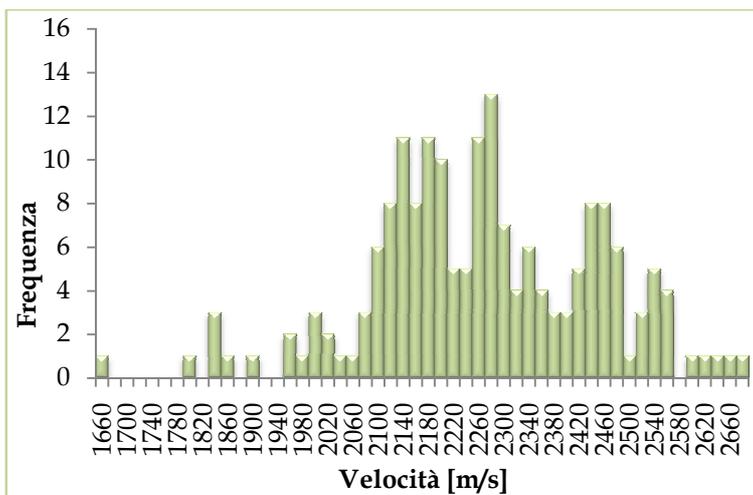


Grafico 8. Distribuzione della Velocità determinata tramite la STT per la Serie B.

I valori caratteristici della distribuzione della Velocità determinate tramite l'applicazione della STT sono indicati nella Tabella seguente.

Tabella 12. Valori caratteristici della distribuzione delle Velocità della Serie B.

	Minimo [m/s]	Massimo [m/s]	Media [m/s]	DSR* [m/s]	DSP* [%]	Mediana [m/s]	Moda [m/s]
Velocità	1653.84	2669.45	2255.72	178.32	7.91	2247.16	2173.48

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

La distribuzione mostra un'asimmetria a destra ed il valore Medio è prossimo alla Mediana. Tale parametro è quindi rappresentativo dell'intera distribuzione.

2.2.3 Prove UT sui travetti della Serie C

Risultati dell'applicazione della DTT

Nella Tabella 13 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle corrispondenti Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini, ottenuti con la Tecnica di Trasmissione Diretta nei travetti della Serie C, caratterizzati dalla presenza di una cavità disposta secondo tutta la loro lunghezza.

Tabella 13. Valori della DTT dei travetti della Serie C.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
C1	1 - 3	64.80	2314.81
		61.67	2432.43
		61.93	2421.96
	2 - 4	62.27	2408.99
		62.87	2386.00
		68.40	2192.98
C2	1 - 3	62.80	2388.54
		56.60	2650.18
		61.60	2435.06
	2 - 4	61.33	2445.65
		69.20	2167.63
		69.60	2155.17
C3	1 - 3	78.53	1910.02
		66.60	2252.25
		60.93	2461.71
	2 - 4	61.60	2435.06
		67.33	2227.72
		65.07	2305.33
C4	1 - 3	66.80	2245.51
		70.40	2130.68
		63.27	2370.92
	2 - 4	69.47	2159.31
		70.60	2124.65
		68.80	2180.23
C5	1 - 3	80.13	1871.88
		65.00	2307.69
		64.67	2319.59
	2 - 4	77.47	1936.32
		67.87	2210.22

C6	1 - 3	62.13	2414.16
		60.93	2461.71
		58.13	2580.28
	2 - 4	64.27	2334.02
		61.60	2435.06
		67.53	2221.13
C7	1 - 3	62.73	2391.07
		69.60	2155.17
		64.53	2324.38
	2 - 4	67.07	2236.58
		67.73	2214.57
		63.20	2373.42
C8	1 - 3	61.00	2459.02
		61.47	2440.35
		62.13	2414.16
	2 - 4	68.13	2201.57
		62.67	2393.62
		64.13	2338.88
C9	1 - 3	61.73	2429.81
		61.73	2429.81
		66.20	2265.86
	2 - 4	67.40	2225.52
		68.40	2192.98
		66.13	2268.15
C10	1 - 3	63.73	2353.56
		66.00	2272.73
		63.87	2348.64
	2 - 4	65.60	2286.59
		64.00	2343.75
		64.67	2319.59
C11	1 - 3	56.53	2653.30
		64.00	2343.75
		60.40	2483.44

	2 - 4	70.40	2130.68
		68.80	2180.23
		70.00	2142.86
		70.40	2130.68
C12	1 - 3	70.40	2130.68
		69.60	2155.17
		65.60	2286.59
	2 - 4	70.80	2118.64
		68.80	2180.23
		70.40	2130.68
C13	1 - 3	71.60	2094.97
		68.40	2192.98
		70.00	2142.86
	2 - 4	70.00	2142.86
		70.40	2130.68
C14	1 - 3	70.80	2118.64
		64.40	2329.19
		68.40	2192.98
	2 - 4	69.60	2155.17
		72.80	2060.44
		69.60	2155.17
C15	1 - 3	69.20	2167.63
		70.40	2130.68
		64.00	2343.75
	2 - 4	63.20	2373.42
		69.60	2155.17
		70.40	2130.68
		69.20	2167.63

I dati riportati nella tabella precedente sono stati determinati in corrispondenza dell'anomalia rappresentata dalla cavità. La presenza di questo difetto ha determinato, rispetto ai valori registrati per le Serie A e B, un incremento dei Tempi di Transito e un conseguente decremento delle Velocità, data la relazione di proporzionalità inversa esistente tra le queste due grandezze.

Nel grafico seguente è mostrata la distribuzione dei Tempi di Transito valutata mediante la DTT. Il range di variazione dei dati è pari a circa 24 μs , ma la maggior parte delle acquisizioni effettuate, pari a circa il 90%, ricade nell'intervallo compreso tra 61.0 μs e 71.0 μs .

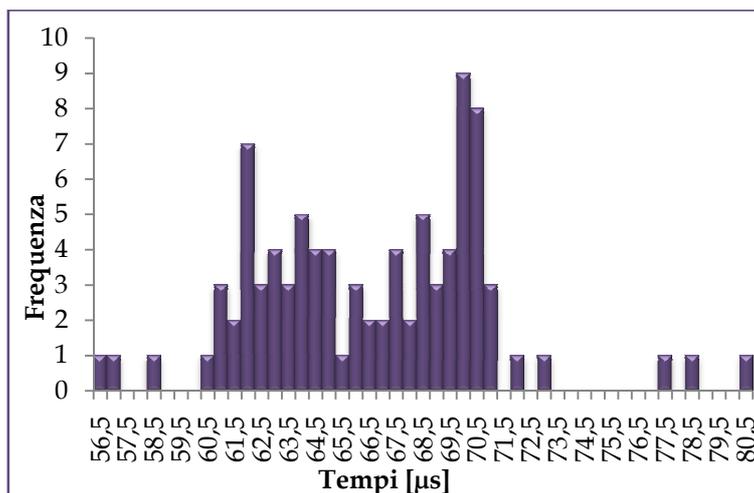


Grafico 9. Distribuzione del Tempo di Transito determinata tramite la DTT della Serie C.

Nella Tabella seguente sono riportati i valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito.

Tabella 14. Valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito della Serie C.

	Minimo [μs]	Massimo [μs]	Media [μs]	DSR* [μs]	DSP* [%]	Mediana [μs]	Moda [μs]
Tempo di Transito	56.53	80.13	66.38	4.32	6.50	66.40	70.40

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

Si tratta di una distribuzione asimmetrica con il valore della Mediana coincidente con la Media. Tale parametro risulta, quindi, rappresentativo dell'intera distribuzione.

Nel Grafico 10 è riportata la distribuzione della Velocità relativa all'applicazione della DTT. Le Velocità variano nell'intervallo compreso tra 1800 m/s e 2660 m/s, ma circa il 92 % dei valori registrati ricade nell'intervallo compreso tra 2100 - 2500 m/s.

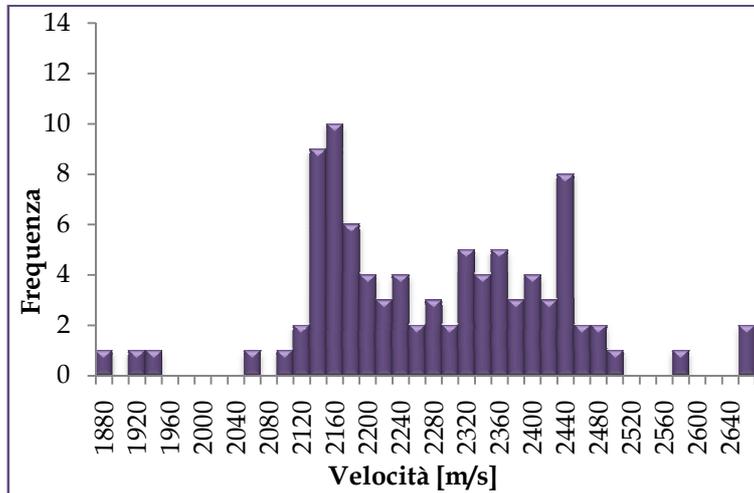


Grafico 10. Distribuzione della Velocità determinata tramite la DTT della Serie B.

Nella Tabella 15 sono riportati i valori caratteristici della distribuzione delle Velocità.

Tabella 15. Valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito della Serie C.

	Minimo [m/s]	Massimo [m/s]	Media [m/s]	DSR* [m/s]	DSP* [%]	Mediana [m/s]	Moda [m/s]
Velocità	1871.88	2653.30	2229.18	146.23	6.44	2259.06	2130.68

* DSR = Deviazione Standard Relativa; DSP = Deviazione Standard Percentuale

Si tratta di una distribuzione asimmetrica con il valore della Mediana prossimo alla Media. Tale parametro risulta, quindi, rappresentativo dell'intera distribuzione di dati.

Risultati dell'applicazione della STT

Di seguito è riportata la tabella contenente i valori dei Tempi di Transito e delle corrispondenti Velocità determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini della Serie C.

Tabella 16. Valori della STT dei travetti della Serie C.

Travetto	Percorso	Tempo [µs]	Velocità [m/s]
C1	1 - 2	48.80	2173.48
		45.47	2332.83
		46.40	2285.91
	1 - 4	45.60	2326.01
		41.40	2561.98
		46.00	2305.78

	3 - 2	42.00	2525.38
		42.93	2470.48
		41.60	2549.66
	3 - 4	48.40	2191.45
		43.40	2443.92
		44.40	2388.87
C2	1 - 2	41.87	2533.42
		50.93	2082.45
		44.80	2367.55
	1 - 4	56.67	1871.75

	3 - 2	56.40	1880.60	
		54.47	1947.36	
		56.73	1869.55	
		59.47	1783.62	
		48.20	2200.54	
	3 - 4	56.40	1880.60	
		46.27	2292.49	
		51.73	2050.25	
	C3	1 - 2	49.40	2147.09
			48.07	2206.64
46.13			2299.12	
1 - 4		48.20	2200.54	
		42.73	2482.04	
		52.40	2024.16	
3 - 2		45.93	2309.13	
		42.53	2493.72	
		47.80	2218.95	
3 - 4		55.47	1912.25	
		56.80	1867.36	
		47.60	2228.28	
C4	1 - 2	44.00	2410.59	
		44.00	2410.59	
		51.73	2050.25	
	1 - 4	48.93	2167.56	
		54.40	1949.74	
		51.80	2047.61	
	3 - 2	40.33	2629.74	
		49.33	2149.99	
		41.20	2574.42	
	3 - 4	41.80	2537.46	
		50.93	2082.45	
		43.87	2417.92	
C5	1 - 2	48.40	2191.45	
		48.00	2209.71	
		45.00	2357.02	
	1 - 4	51.33	2066.22	
		54.67	1940.23	
		53.73	1973.93	
	3 - 2	39.33	2696.59	
		49.87	2126.99	
		54.13	1959.35	
	3 - 4	42.87	2474.32	
		51.73	2050.25	
		46.20	2295.80	
C6	1 - 2	46.00	2305.78	
		53.73	1973.93	
		46.27	2292.49	
	1 - 4	46.60	2276.09	
		48.53	2185.43	
		48.87	2170.52	
	3 - 2	46.40	2285.91	
		48.93	2167.56	
		47.00	2256.72	
	3 - 4	54.93	1930.81	
		51.47	2060.87	
		49.87	2126.99	
C7	1 - 2	53.60	1978.84	

	1 - 4	43.13	2459.03
		50.53	2098.93
		47.13	2250.34
		48.93	2167.56
		50.00	2121.32
	3 - 2	41.40	2561.98
		48.13	2203.59
		53.47	1983.78
	3 - 4	58.27	1820.35
		57.40	1847.84
56.07		1891.78	
C8	1 - 2	50.53	2098.93
		42.13	2517.39
		43.20	2455.23
	1 - 4	49.73	2132.69
		48.40	2191.45
		48.60	2182.43
	3 - 2	46.93	2259.93
		40.20	2638.46
		46.27	2292.49
	3 - 4	47.60	2228.28
		46.60	2276.09
		45.73	2319.23
C9	1 - 2	47.20	2247.16
		47.87	2215.86
		46.27	2292.49
	1 - 4	52.00	2039.73
		46.80	2266.37
		50.67	2093.41
	3 - 2	49.73	2132.69
		49.87	2126.99
		43.07	2462.83
	3 - 4	53.33	1988.74
		51.73	2050.25
		53.00	2001.25
C10	1 - 2	53.17	1994.97
		49.33	2149.99
		56.80	1867.36
	1 - 4	63.73	1664.22
		59.47	1783.62
		53.33	1988.74
	3 - 2	55.00	1928.47
		58.00	1828.72
		52.67	2013.91
	3 - 4	48.00	2209.71
		48.53	2185.43
		40.80	2599.66
C11	1 - 2	48.00	2209.71
		47.60	2228.28
		48.80	2173.48
	1 - 4	48.00	2209.71
		51.60	2055.54
		54.40	1949.74
	3 - 2	47.20	2247.16
		47.60	2228.28
		47.60	2228.28
	3 - 4	50.00	2121.32

		49.20	2155.81				
		51.20	2071.60				
C12	1 - 2	47.60	2228.28	C14	1 - 2	46.00	2305.78
		49.60	2138.43			47.20	2247.16
		46.40	2285.91			46.40	2285.91
		50.40	2104.48			48.00	2209.71
	1 - 4	50.40	2104.48		1 - 4	48.40	2191.45
		51.20	2071.60			46.80	2266.37
		48.00	2209.71			45.20	2346.59
		46.40	2285.91			47.60	2228.28
	3 - 2	48.80	2173.48		3 - 2	49.60	2138.43
		48.80	2173.48			48.00	2209.71
		47.20	2247.16			50.40	2104.48
		46.40	2285.91			47.60	2228.28
3 - 4	48.40	2191.45	3 - 4	47.60	2228.28		
	48.40	2191.45		44.80	2367.55		
	50.40	2104.48		50.40	2104.48		
	45.20	2346.59		48.40	2191.45		
C13	1 - 2	49.20	2155.81	C15	1 - 4	46.40	2285.91
		50.80	2087.91			51.60	2055.54
		49.20	2155.81			50.40	2104.48
		48.00	2209.71			44.80	2367.55
	3 - 2	48.00	2209.71		3 - 2	48.80	2173.48
		48.00	2209.71			46.00	2305.78
		50.40	2104.48			48.80	2173.48
		48.40	2191.45			46.00	2305.78
	3 - 4	48.40	2191.45		3 - 4	48.80	2173.48
		49.20	2155.81			51.60	2055.54
		49.20	2155.81				
		49.20	2155.81				

La cavità presente nei provini appartenenti a questa Serie non viene mai intercettata durante le acquisizioni. A differenza di quanto riscontrato nelle Serie A e B, i valori dei Tempi di Transito e delle corrispondenti Velocità rilevati mediante la STT sono simili a quelli ottenuti nella stessa Serie con l'applicazione della DTT. La presenza della cavità ha determinato, infatti, rispetto alle Serie A e B, una riduzione della Velocità determinata tramite la DTT pari a circa 500 m/s.

Nel Grafico 11 è rappresentata la distribuzione dei Tempi di Transito. Il Tempo di Transito varia nell'intervallo compreso tra 39.5 μ s e 64.0 μ s, ma la maggior parte di dati, pari a circa l'80 %, si riscontra nell'intervallo compreso tra 45.0 μ s e 55.0 μ s.

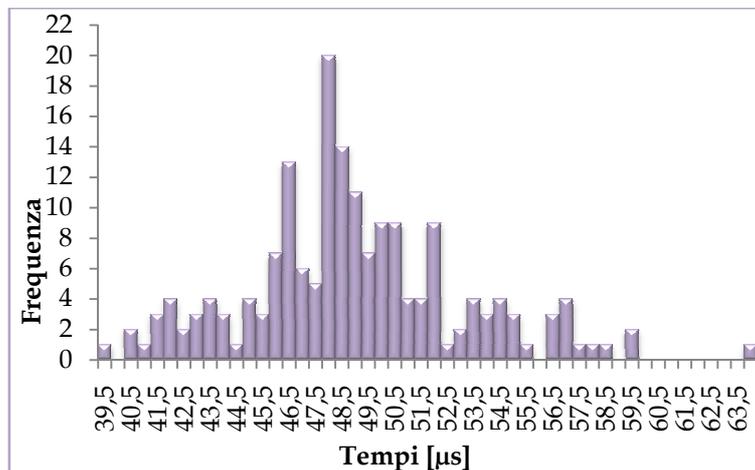


Grafico 11. Distribuzione del Tempo di Transito tramite la STT nella Serie C.

Di seguito sono riportati i valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito.

Tabella 17. Valori caratteristici della distribuzione dei Tempi di Transito della Serie C.

	Minimo [μs]	Massimo [μs]	Media [μs]	DSR* [μs]	DSP* [%]	Mediana [μs]	Moda [μs]
Tempo di Transito	39.33	63.73	48.79	4.16	8.53	48.40	47.60

I valori di Moda e Mediana sono prossimi alla Media, per cui quest'ultimo dato è rappresentativo dell'intera distribuzione.

Nel Grafico 12 è riportata la distribuzione delle Velocità. Le Velocità variano nell'intervallo compreso tra 1680 m/s e 2700 m/s, ma circa il 78 % dei dati registrati ricade tra 2000 m/s e 2500 m/s.

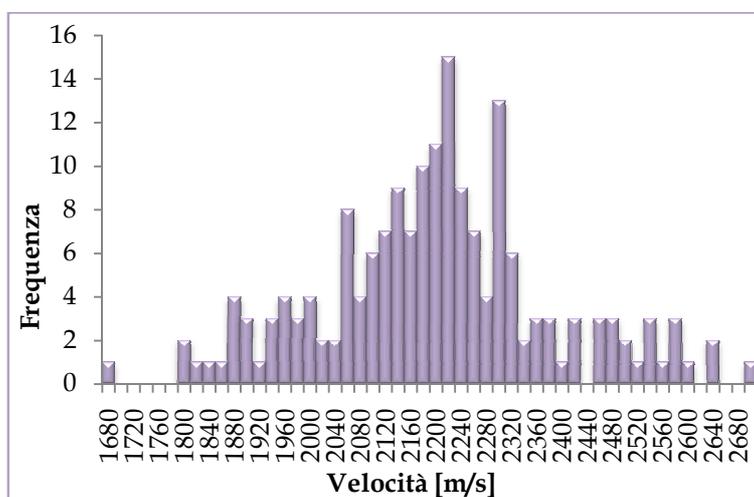


Grafico 12. Distribuzione della Velocità determinata tramite la STT della Serie C.

Di seguito sono riportati i valori caratteristici della distribuzione delle Velocità.

Tabella 18. Valori caratteristici della distribuzione delle Velocità della Serie C.

	Minimo [m/s]	Massimo [m/s]	Media [m/s]	DSR* [m/s]	DSP* [%]	Mediana [m/s]	Moda [m/s]
Velocità	1664.22	2696.59	2189.37	184.19	8.41	2191.28	2228.28

I valori di Media e Mediana sono prossimi alla media delle Velocità, per cui quest'ultimo dato è rappresentativo dell'intera distribuzione.

2.2.4 Discussione dei risultati

In questo paragrafo sono analizzati i valori delle Velocità determinati tramite l'applicazione della DTT e della STT delle tre Serie di travetti con lo scopo di fare un confronto tra di essi.

Nei Grafici 13 e 14 sono riportati i valori medi delle Velocità dei 45 travetti rilevate rispettivamente tramite la DTT e la STT. Nel Grafico 15 sono stati rappresentati, tramite istogrammi, i valori medi delle Velocità determinati mediante la DTT e la STT delle tre

Serie analizzate. Infine nei Grafici 16 e 17 sono riportati i valori delle Deviazioni Standard Percentuali determinati tramite l'applicazione della DTT e della STT.

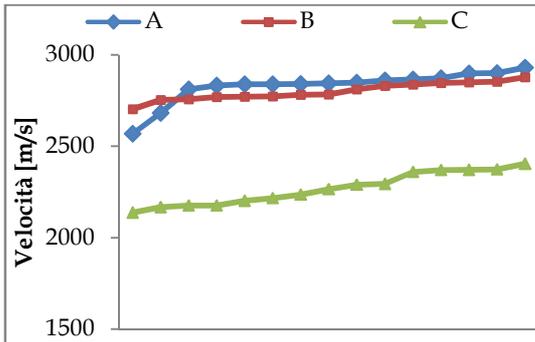


Grafico 13. Valori medi delle Velocità determinati tramite la DTT dei 45 travetti delle Serie A, B e C.

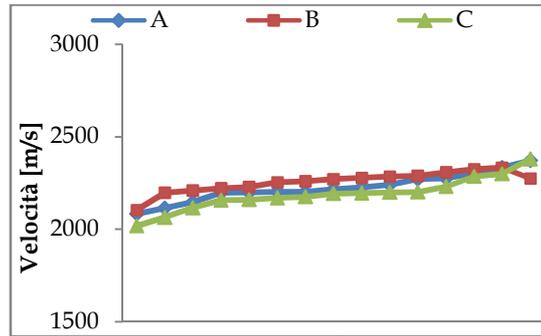


Grafico 14. Valori medi delle Velocità determinati tramite la STT dei 45 travetti delle Serie A, B e C.

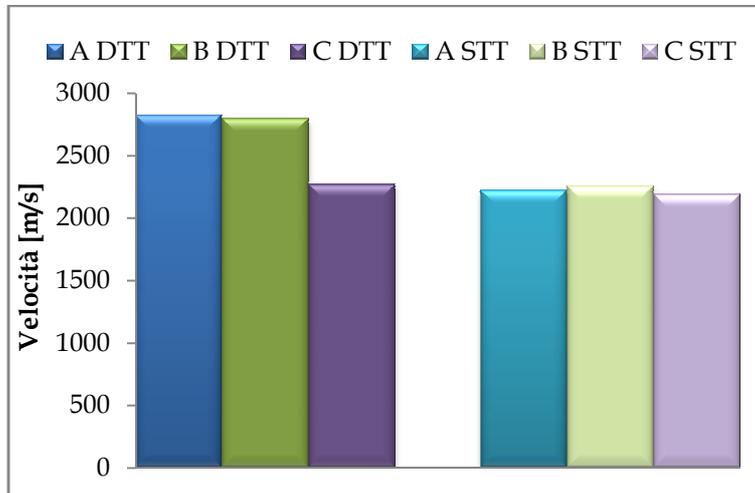


Grafico 15. Valori medi delle Velocità determinati tramite la DTT e la STT delle Serie A, B e C.

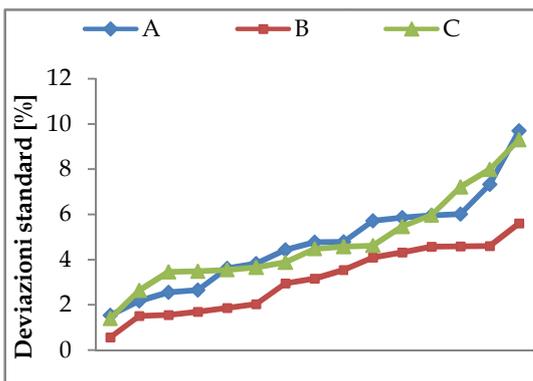


Grafico 16. Deviazione standard Percentuale della Velocità valutate tramite la DTT delle Serie A, B e C.

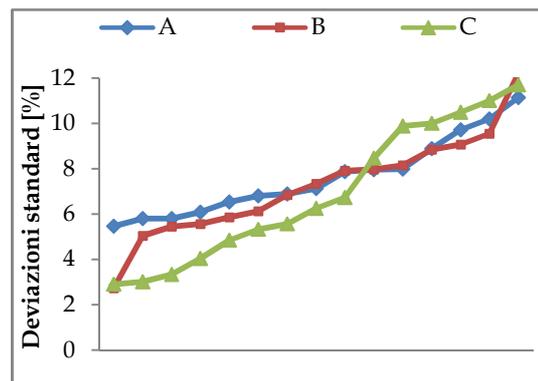


Grafico 17. Deviazione Standard Percentuale della Velocità valutate tramite la STT delle Serie A, B e C.

Dall'analisi dei Grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- Le Velocità Medie determinate tramite la DTT dei provini delle Serie A e B presentano valori simili, mentre la Serie C mostra un decremento della

Velocità pari a circa 500 m/s a causa della presenza della cavità che ha determinato un incremento del Tempo di Transito del segnale Ultrasonico;

- Le Velocità Medie determinate tramite l'applicazione della STT delle tre Serie presentano valori simili;
- La presenza dell'anomalia realizzata con la malta di ripristino nei travetti della Serie A non ha provocato alcuna alterazione dei Tempi di Transito e quindi delle Velocità determinate con l'applicazione della DTT e della STT per cui si hanno valori prossimi a quelli della Serie B;
- L'analisi delle Deviazioni Standard Percentuali ottenuti tramite la DTT consente di notare come tutti i provini appartenenti alla Serie B presentino valori inferiori, e quindi dati più stabili, di quelli delle Serie A e C caratterizzati rispettivamente dalla presenza della malta di ripristino e della cavità.

2.2.5 Ampiezza del segnale dei provini non rinforzati

Nei Grafici 18 e 19 sono riportati i valori medi delle Ampiezze del segnale ricevuto dei 45 travetti rilevati rispettivamente tramite la DTT e la STT.

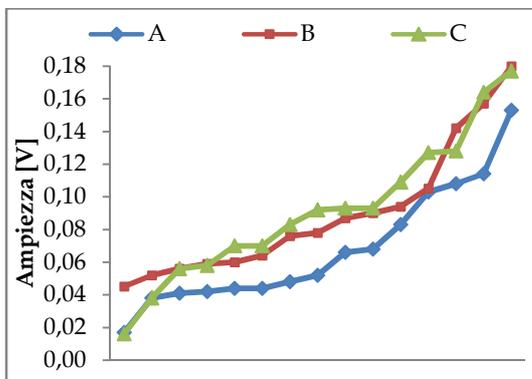


Grafico 18. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite la DTT dei 45 travetti delle Serie A, B e C.

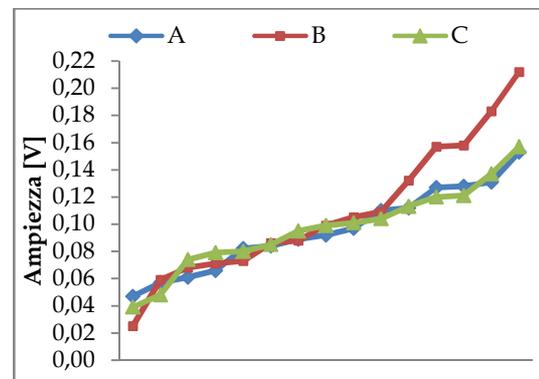


Grafico 19. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite la STT dei 45 travetti delle Serie A, B e C.

Dall'analisi dei Grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- Le Ampiezze Medie determinate tramite la DTT dei provini delle Serie A, B e C presentano valori simili;
- Le Ampiezze Medie valutate tramite la STT dei provini delle tre Serie presentano valori simili.

La presenza della cavità non ha determinato una considerevole variazione dell'Ampiezza del segnale ricevuto in quanto l'onda Ultrasonica per percorrere la distanza tra il trasduttore emettitore e quello ricevitore ha seguito il percorso che gli ha

opposto la minore resistenza. È lecito quindi pensare che l'onda abbia viaggiato nel calcestruzzo seguendo il percorso indicato in Figura 7.

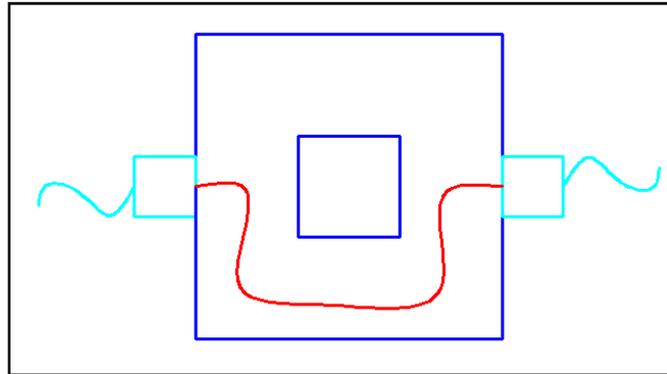


Figura 7. Percorso seguito dall'onda Ultrasonica nella DTT.

Il percorso seguito dall'onda ha quindi provocato una considerevole variazione del Tempo di Transito e quindi della Velocità, ma non ha determinato alcuna alterazione dell'Ampiezza del segnale ricevuto.

2.3 Prove Ultrasoniche sui travetti rinforzati

In questo paragrafo saranno analizzati i risultati delle prove Ultrasoniche, condotte applicando le metodologie DTT e STT, sui travetti rinforzati con la rete e con le lamine in FRP e con la rete in PBO. Saranno analizzati i risultati relativi alle Velocità, alle Ampiezze e alle Ampiezze Spettrali.

2.3.1 Prove UT sui travetti rinforzati con la rete in FRP

Saranno qui presentati i risultati ottenuti sui travetti delle tre Serie rinforzati con la rete in fibra di carbonio. Nel primo travetto di ogni Serie, A1, B1 e C1 è stata realizzata la perfetta aderenza tra la rete e il substrato in calcestruzzo. Negli altri travetti sono stati posizionati, sul lato del rinforzo e prima dell'applicazione del rinforzo stesso tre difetti realizzati con un nastro in Teflon (T), un accumulo di Colla (C) e uno spessore in Plastica (P).

2.3.1.1 Travetti Serie A

I travetti appartenenti a questa Serie sono caratterizzati dalla presenza della malta di ripristino. Il rinforzo è stato applicato sul lato contrassegnato con il numero 4.

Risultati Velocità dell'applicazione della DTT

In Tabella 19 sono indicati i valori dei Tempi di Transito e delle corrispondenti Velocità determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutate su tutti i travetti della Serie.

Tabella 19. Valori della DTT dei travetti della Serie A rinforzati con la rete in fibra di carbonio.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
A1	1 - 3	55.20	2717.39
		67.60	2218.93
		51.20	2929.69
	2 - 4	52.40	2862.60
		53.60	2798.51
		52.60	2851.71
A3	1 - 3	45.50	3296.70
		52.20	2873.56
		54.60	2747.25
	2 - 4	63.20	2373.42
		56.60	2650.18
		61.40	2443.00
A5	1 - 3	45.60	3289.47
		50.40	2976.19
		53.20	2819.55

	2 - 4	81.60	1838.24
		54.80	2737.23
		59.60	2516.78
A7	1 - 3	48.00	3125.00
		46.40	3232.76
		51.20	2929.69
	2 - 4	82.40	1820.39
		57.60	2604.17
		57.60	2604.17
A9	1 - 3	52.80	2840.91
		53.00	2830.19
		51.80	2895.75
	2 - 4	70.00	2142.86
		57.20	2622.38
		64.40	2329.19

I tre difetti presenti nei travetti A3, A5, A7 e A9 nelle acquisizioni tramite la DTT vengono intercettati ciascuno una sola volta in corrispondenza del percorso 2 - 4.

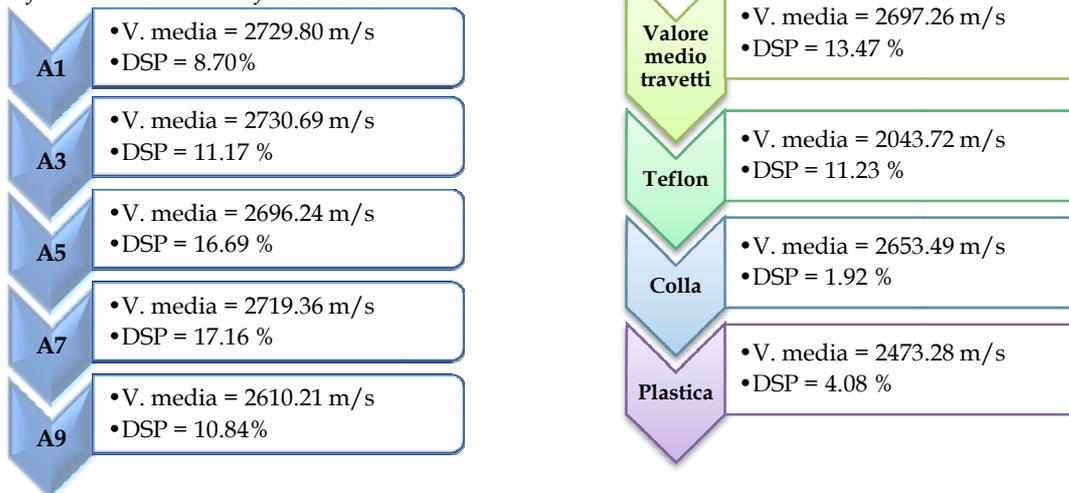
Nella Tabella seguente sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 20. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1820.39 nel provino A7	2373.42 nel provino A3
Colla	2604.17 nel provino A7	2737.23 nel provino A5
Plastica	2329.19 nel provino A9	2604.17 nel provino A7

In Tabella 21 sono riportate le Velocità Medie dei singoli provini con le corrispondenti Deviazioni Standard Percentuali (DSP). Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 21. Valori medi della DTT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione non altera il valore della Velocità Media nei singoli travetti, mentre le DSP sono sensibilmente più elevate nei provini in cui sono state realizzate le tre anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 650 m/s;
- l'accumulo di Colla non ha determinato alcun decremento;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento di circa 400 m/s.

Nel Grafico 20 sono rappresentati i valori medi delle Velocità ottenute tramite l'applicazione della DTT dei provini rinforzati con la rete in FRP.

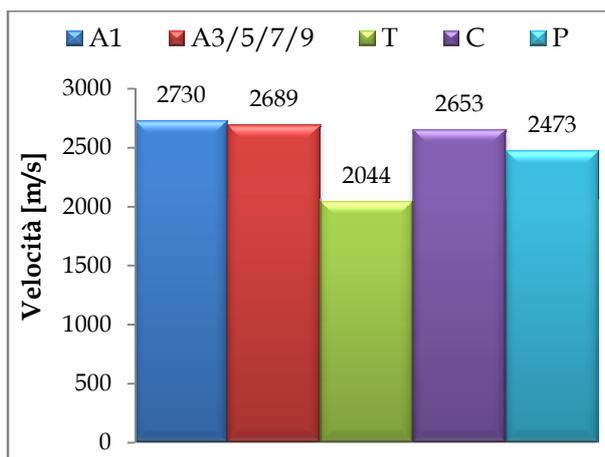


Grafico 20. Valori medi delle Velocità determinati tramite la DTT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

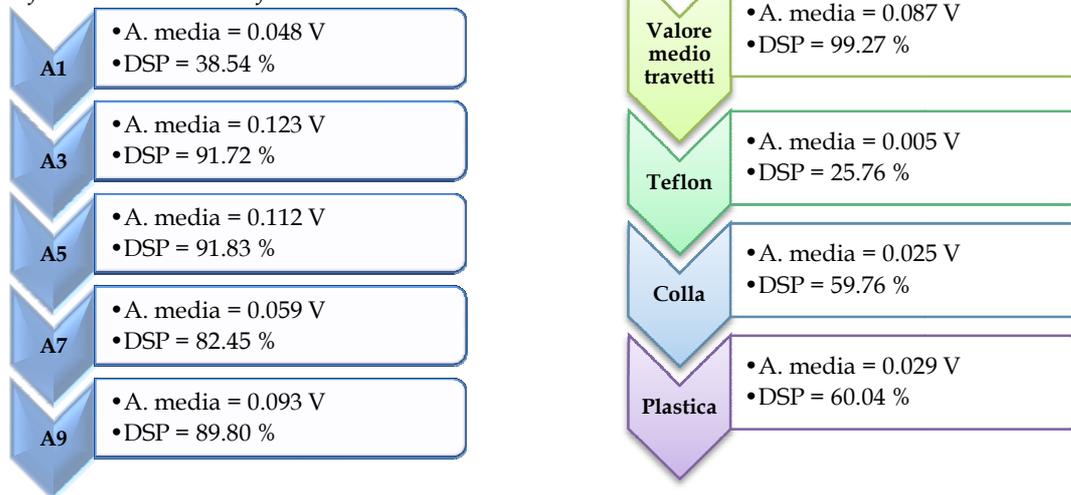
La barra blu rappresenta il valore medio del travetto di riferimento A1, la barra rossa rappresenta la Velocità Media calcolata su tutti i provini con i difetti (A3, A5, A7 e A9), la barra verde rappresenta il valore medio in corrispondenza del difetto

realizzato con il nastro in Teflon (T), la barra viola in corrispondenza del difetto realizzato con l'accumulo di Colla (C) ed infine la barra celeste in corrispondenza del difetto realizzato con lo spessore in Plastica (P). Dal Grafico 18 e dalla Tabella 21 è possibile notare come dei tre difetti, solo la mancanza di adesione realizzata con il nastro in Teflon e la presenza della bolla d'aria causata dalla presenza dello spessore in Plastica siano ben individuati, in quanto hanno determinato, rispetto al provino di confronto A1, un considerevole incremento del Tempo di Transito del segnale UT e conseguentemente un decremento della Velocità. Inoltre il decremento di Velocità determinato in corrispondenza dei due difetti T e P è nettamente superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino A1, che è risultata pari a 237.46 m/s, pertanto è possibile affermare che le due anomalie risultano individuate.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 22 sono indicati i valori medi delle Ampiezze rilevate tramite l'applicazione della DTT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre riportati i valori medi delle Ampiezze determinate mediante la DTT e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 22. Valori medi della DTT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 21 sono rappresentati valori medi delle Ampiezze determinati tramite la DTT dei segnali registrati dal trasduttore ricevitore. Dai valori numerici riportati in Tabella 22 e dal Grafico 21 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. L'analisi dell'Ampiezza è quindi più adatta, rispetto a quella della Velocità, nella individuazione dei difetti e delle anomalie. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non

quantitativo, a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati nella Tabella 22.

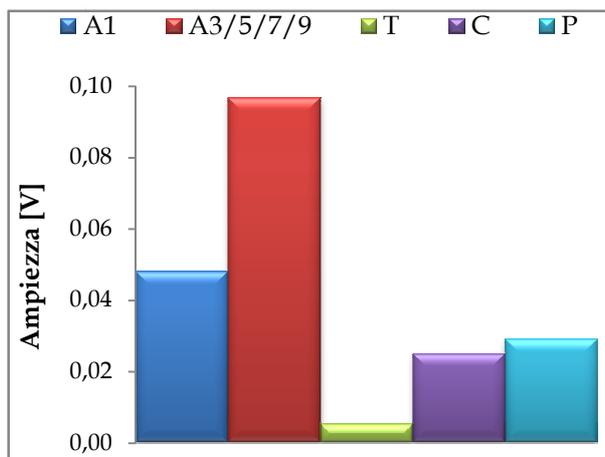


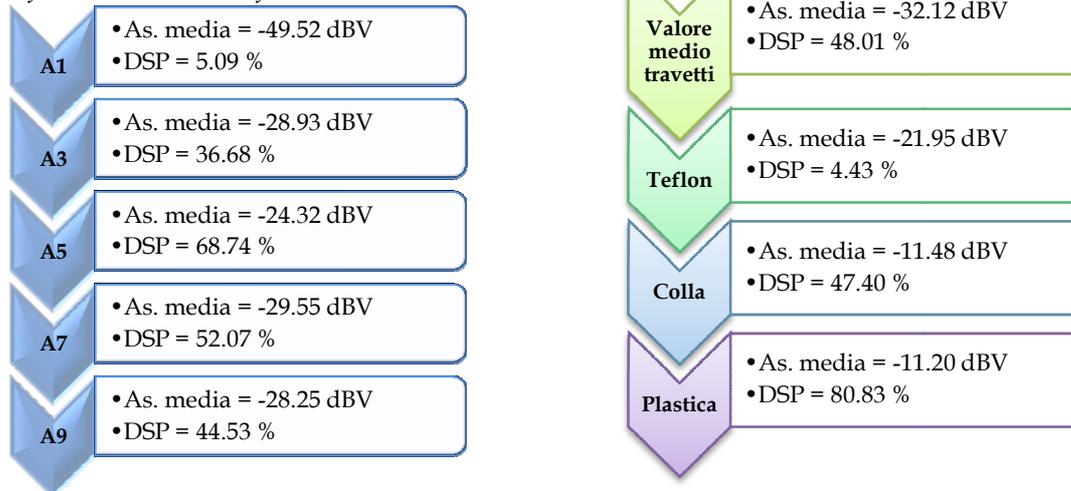
Grafico 21. Valori medi delle Ampiezze determinati tramite la DTT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

La causa principale dell'elevata dispersione dei dati è legata alla eccessiva sensibilità di questo parametro rispetto alle modalità operative: una pressione maggiore dei trasduttori sulla superficie dei provini e un quantitativo maggiore del mezzo di accoppiamento possono determinare una notevole variazione dell'Ampiezza del segnale. Si vuole comunque sottolineare l'importanza di questo parametro in quanto il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato per il provino di confronto A1 e a quello calcolato come media di tutti i provini con i difetti (A3, A5, A7 e A9).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 23 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati tramite la DTT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 23. Valori medi della DTT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 22 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dall'analisi del Grafico 22 e della Tabella 23 è evidente come questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione, ed inoltre sia caratterizzato da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati per l'Ampiezza del segnale ricevuto.

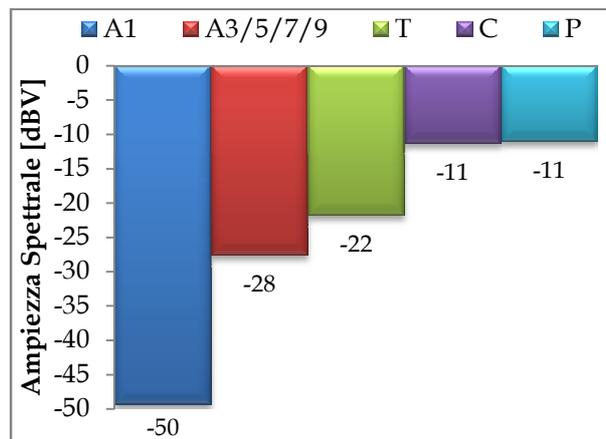


Grafico 22. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite la DTT della Serie A rinforzata con la rete in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato un considerevole variazione, rispetto al provino A1, del valore medio dell'Ampiezza Spettrale calcolata su tutti i provini con i difetti (A3, A5, A7 e A9). Il nastro in Teflon, a differenza di quanto osservato nelle precedenti analisi, ha determinato, rispetto agli altri difetti, la minor variazione dell'Ampiezza Spettrale.

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

In Tabella 24 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità ottenuti nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e determinati nei singoli travetti della Serie.

Tabella 24. Valori della STT dei travetti della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]	
A1	1 - 2	43.00	2466.65	
		42.60	2489.81	
		40.40	2625.40	
	1 - 4	48.20	2200.54	
		46.40	2285.91	
		45.20	2346.59	
	3 - 2	48.60	2182.43	
		45.60	2326.01	
		44.40	2388.87	
	3 - 4	58.00	1828.72	
		47.80	2218.95	
		56.60	1873.96	
A3	1 - 2	41.20	2574.42	
		44.80	2367.55	
		44.60	2378.16	
	1 - 4	63.60	1667.70	
		54.20	1956.94	
		54.00	1964.19	
	3 - 2	45.60	2326.01	
		47.00	2256.72	
		50.00	2121.32	
	3 - 4	70.40	1506.62	
		52.20	2031.92	
		59.80	1773.68	
A5	1 - 2	41.20	2574.42	
		44.00	2410.59	
		45.20	2346.59	
	1 - 4	75.20	1410.45	
		46.80	2266.37	
		62.00	1710.74	
A7	3 - 2	50.00	2121.32	
		49.20	2155.81	
		43.20	2455.23	
	3 - 4	80.00	1325.83	
		54.40	1949.74	
		56.40	1880.60	
	A9	1 - 2	50.40	2104.48
			44.40	2388.87
			53.20	1993.72
		1 - 4	76.80	1381.07
			56.00	1894.04
			62.00	1710.74
3 - 2		49.20	2155.81	
		50.40	2104.48	
		42.40	2501.56	
3 - 4		94.00	1128.36	
		57.60	1841.42	
		60.80	1744.51	
A9	1 - 2	48.00	2209.71	
		48.60	2182.43	
		49.00	2164.61	
	1 - 4	78.00	1359.82	
		58.40	1816.20	
		57.20	1854.30	
	3 - 2	43.00	2466.65	
		50.60	2096.17	
		49.40	2147.09	
	3 - 4	74.40	1425.62	
		62.60	1694.35	
		54.80	1935.51	

Le anomalie di adesione sono intercettate in corrispondenza delle acquisizioni effettuate nei percorsi 1 - 4 e 3 - 4.

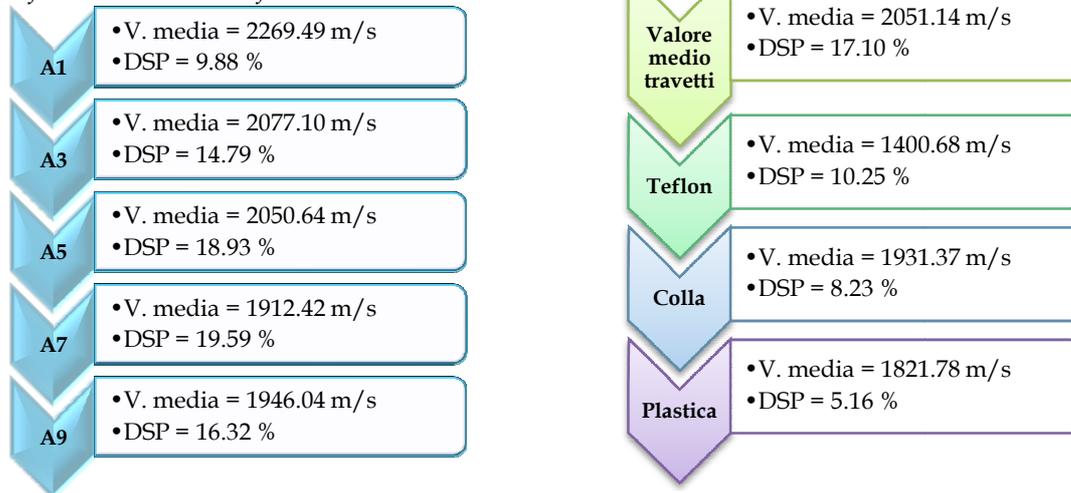
Nella Tabella 25 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza dei difetti.

Tabella 25. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1128.36 nel provino A7	1667.70 nel provino A3
Colla	1694.35 nel provino A9	2266.37 nel provino A5
Plastica	1710.74 nel provino A7	1964.19 nel provino A3

In Tabella 26 sono riportate le Velocità Medie dei singoli provini con le corrispondenti Deviazioni Standard Percentuali (DSP). Sono inoltre indicate le Velocità Medie e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelle valutate in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 26. Valori medi della STT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione altera leggermente il valore della Velocità Media nei singoli travetti ed inoltre le DSP sono sensibilmente più elevate nei provini in cui sono state realizzate le tre anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 650 m/s;
- l'accumulo di Colla ha determinato un decremento nettamente inferiore pari a circa 100 m/s;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento di circa 200 m/s.

Nel Grafico 23 è rappresentata la Velocità Media del travetto di confronto A1 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (A3/5/7/9) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

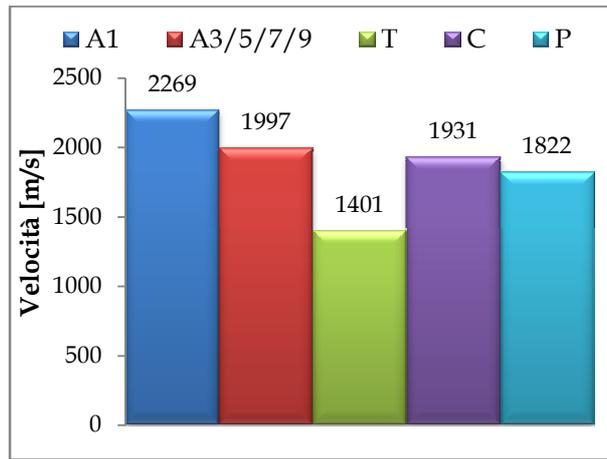


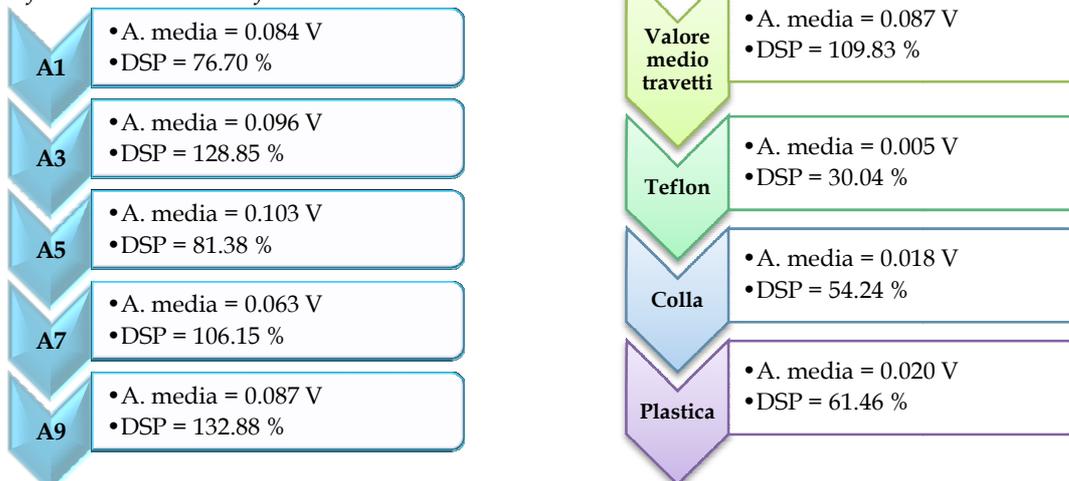
Grafico 23. Valori medi delle Velocità determinati tramite la STT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 26 e dal Grafico 23 si può notare come il difetto realizzato tramite il nastro in Teflon (T) abbia determinato, rispetto al travetto A1, un decremento della Velocità di circa 800 m/s. Gli altri difetti, (C) e (P) invece, hanno determinato un decremento pari a circa 200 - 300 m/s. Il valore della loro Velocità risulta inoltre prossimo a quello medio dei travetti A3, A5, A7 e A9. Solo la mancanza di aderenza provocata dal nastro in Teflon e la presenza della bolla d'aria realizzata con lo spessore in Plastica hanno determinato un decremento della Velocità rispetto al provino di riferimento A1, superiore al valore della Deviazione Standard Relativa dello stesso che è risultata pari a 224.23 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

Nella Tabella 27 sono riportate le Ampiezze Medie del segnale e le rispettive DSP registrate dal trasduttore ricevitore nei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati il valore medio e le relative DSP della intera Serie e quello determinato in corrispondenza dei tre difetti di adesione, T C e P.

Tabella 27. Valori medi della STT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 24 sono rappresentate le Ampiezze Medie del segnale registrato dal trasduttore ricevitore.

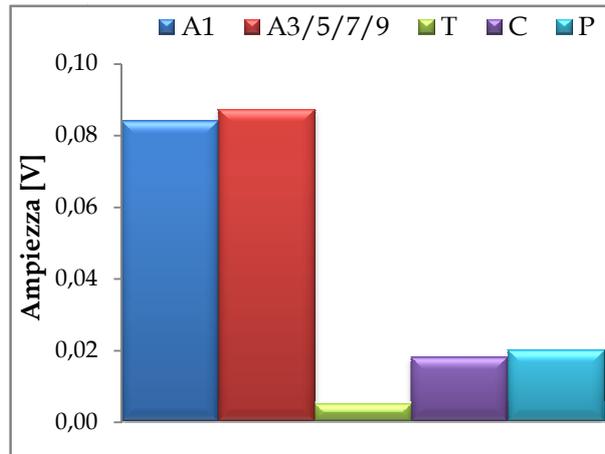


Grafico 24. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite la STT della Serie A rinforzata con la rete in FRP.

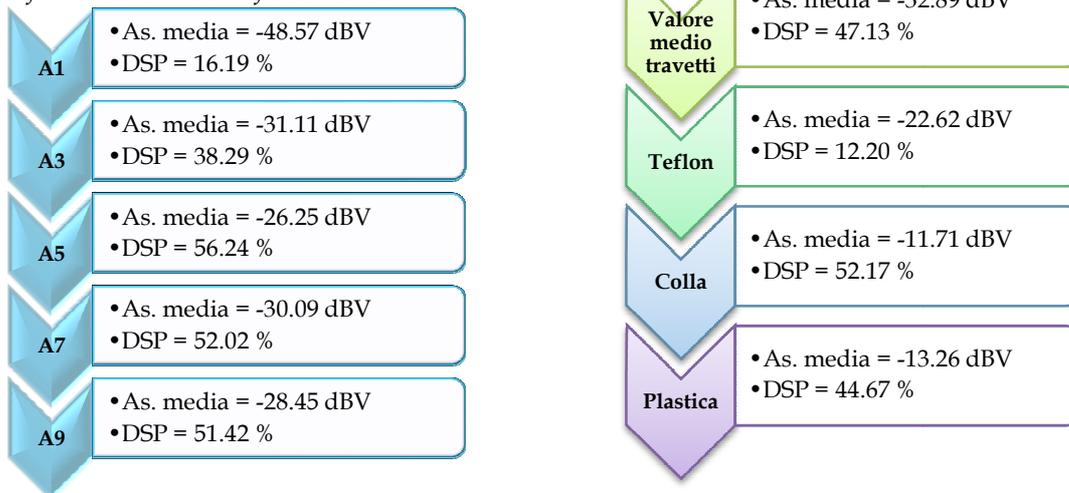
Dai valori numerici riportati in Tabella 27 e dal Grafico 24 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta la individuazione di tutti i difetti di adesione predisposti sui travetti sottoposti a prova. Il nastro in Teflon è il difetto che ha determinato la maggiore riduzione dell'Ampiezza del segnale. Il Grafico 24, come nel caso DTT, ha valenza qualitativa a causa dell'elevata dispersione dei dati come messo in evidenza dai valori di DSP indicati in Tabella 27.

Si vuole comunque sottolineare l'importanza di questo parametro in quanto il valore valutato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato in A1 e a quello di tutti i provini con i difetti (A3/5/7/9).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 28 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della STT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP determinate nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale e le relative DSP dell'intera Serie e quelli individuati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 28. Valori medi della STT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 25 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati mediante l'applicazione della STT.

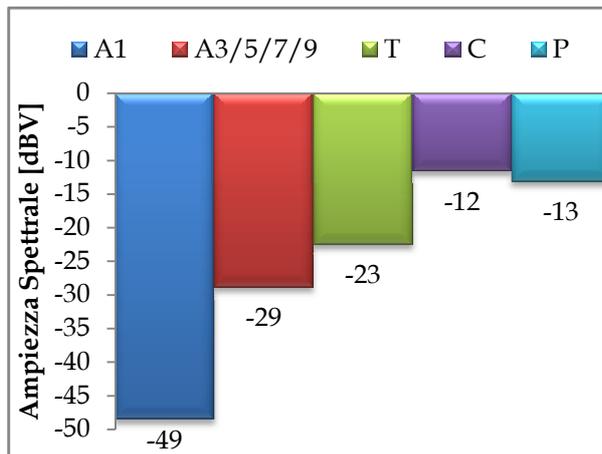


Grafico 25. Valori medi delle Ampiezze Spettrali della STT della Serie A rinforzata con la rete FRP.

L'analisi dell'Ampiezza Spettrale consente di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione, ed inoltre è caratterizzata da valori di Deviazioni Standard Percentuali nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell'Ampiezza del segnale ricevuto.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato, rispetto al provino di riferimento A1, una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale di tutti i provini con difetti (A3/5/7/9). Il nastro in Teflon, ossia la mancanza di aderenza FRP/calcestruzzo, è l'anomalia che ha inciso in minor misura rispetto agli altri determinando infatti la minore alterazione dell'Ampiezza Spettrale, a differenza di quanto messo in evidenza nelle analisi delle Velocità Medie e delle Ampiezze Medie.

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT

Nei Grafici 26 e 27 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di riferimento A1, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della DTT e della STT di tutti i provini con i difetti (A3/5/7/9), del nastro in Teflon (T), dell'accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

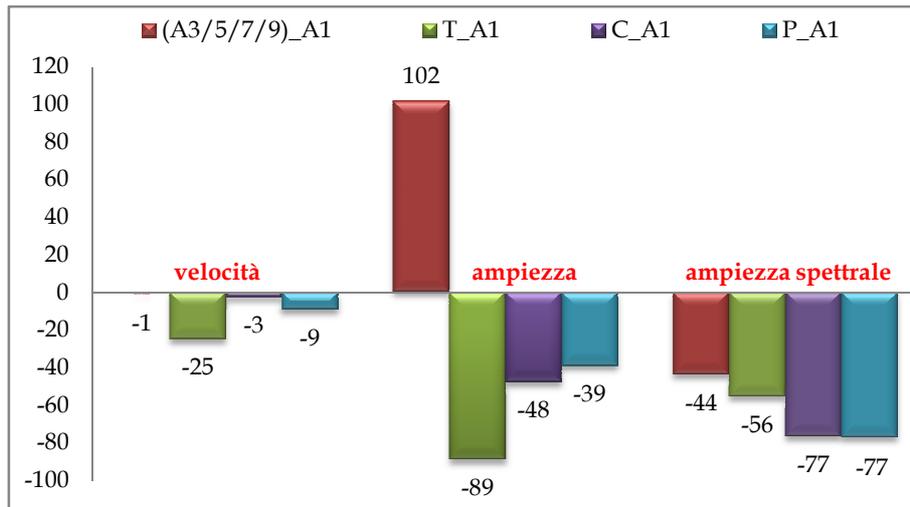


Grafico 26. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT della Serie A rinforzata con la rete in FRP.

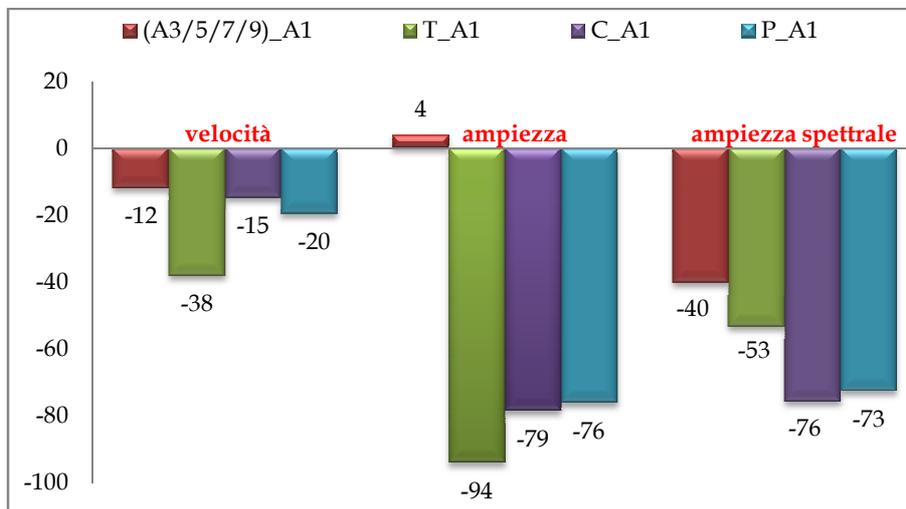


Grafico 27. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la STT della Serie A rinforzata con la rete in FRP.

Dai grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- I travetti con i difetti presentano una riduzione notevole dell'Ampiezza Spettrale e una riduzione minima della Velocità determinate tramite la DTT e la STT. L'Ampiezza del segnale ricevuto, invece, presenta un'anomalia in quanto è caratterizzata da un elevato incremento. Questo è dovuto alla eccessiva sensibilità

del parametro rispetto alle modalità operative. Inoltre, rispetto agli altri provini della stessa Serie, il provino A1 non rinforzato, scelto come travetto di riferimento nelle successive analisi, ha presentato il minor valore dell'Ampiezza media del segnale. Il rinforzo con la rete in FRP ha determinato in genere un incremento, in alcuni casi pari a tre volte, dell'Ampiezza del segnale nei singoli travetti rispetto agli stessi non rinforzati;

- Il nastro in Teflon, rispetto all'accumulo di Colla e allo spessore in Plastica ha determinato la maggiore variazione della Velocità e dell'Ampiezza e la minore variazione dell'Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT e la STT;
- L'accumulo di Colla ha determinato una minore variazione della Velocità valutata mediante l'applicazione della DTT e della STT;
- Lo spessore in Plastica ha causato la minore variazione dell'Ampiezza del segnale determinata tramite l'applicazione della DTT e della STT;
- L'analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull'applicazione del sistema di rinforzo.

2.3.1.2 Travetti Serie B

Poiché i risultati ottenuti per i provini della Serie B, rinforzati con la rete in FRP, sono simili a quelli della Serie A, si riportano in questa sezione le sole analisi relative alle variazioni percentuali determinate tramite l'applicazione della DTT e della STT. Nell'Appendice B sono comunque riportati tutti i risultati e le analisi relativi alle Velocità, alle Ampiezze e alle Ampiezze Spettrali rilevate mediante la DTT e la STT.

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e STT

Nei Grafici 28 e 29 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di confronto B1 con perfetta aderenza, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della DTT e della STT di tutti i provini con i difetti (B3/5/7/9), del nastro in Teflon (T), dell'accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

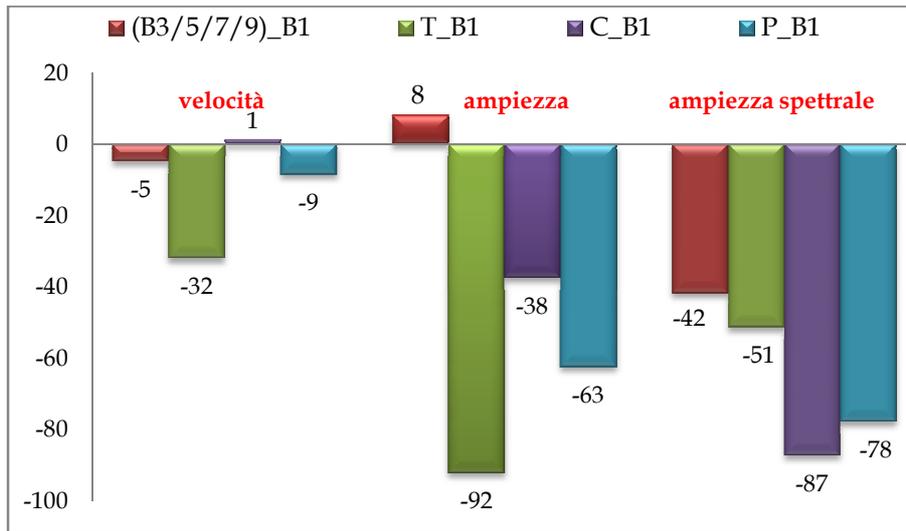


Grafico 28. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT della Serie B rinforzata con la rete in FRP.

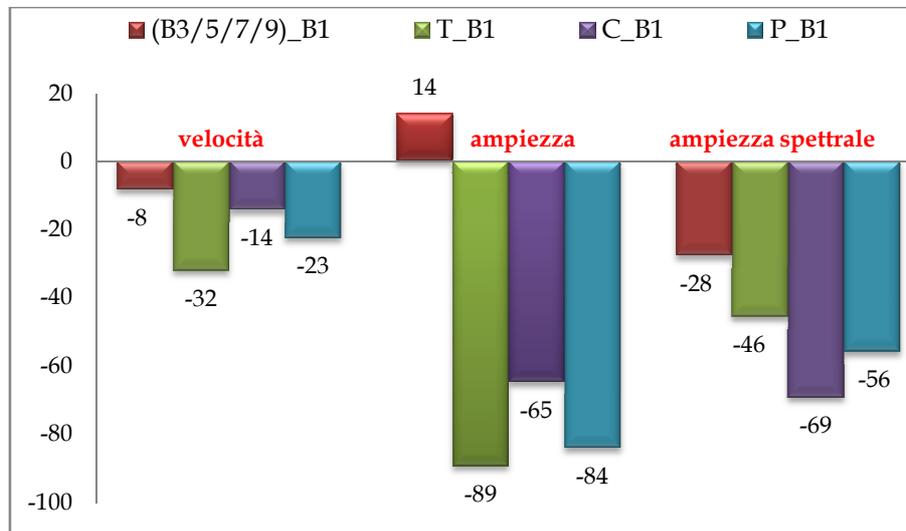


Grafico 29. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la STT della Serie B rinforzata con la rete in FRP.

Dai grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- I travetti con difetti presentano una riduzione notevole dell'Ampiezza Spettrale e una riduzione minima della Velocità determinate tramite la DTT e la STT. L'Ampiezza del segnale ricevuto, invece, presenta un'anomalia in quanto è caratterizzata da un incremento. Questo è dovuto alla eccessiva sensibilità del parametro rispetto alle modalità operative come già spiegato per i provini della Serie A rinforzati con la rete in FRP;
- Il nastro in Teflon, rispetto all'accumulo di Colla e allo spessore in Plastica, ha determinato la maggiore variazione della Velocità e dell'Ampiezza e la minore variazione dell'Ampiezza Spettrale valutate mediante la DTT e la STT ;

- L'accumulo di Colla ha determinato la minore variazione della Velocità e dell'Ampiezza e la maggiore variazione dell'Ampiezza Spettrale determinate tramite l'applicazione della DTT e della STT;
- L'analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull'applicazione del sistema di rinforzo.

2.3.1.3 Travetti Serie C

Poiché i risultati ottenuti per i provini della Serie C, rinforzati con la rete in FRP, sono simili a quelli delle Serie precedenti si riportano in questa sezione le sole analisi relative alle variazioni percentuali valutate tramite la DTT e la STT. Nell'Appendice B sono comunque riportati tutti i risultati e le analisi relativi alle Velocità, alle Ampiezze e alle Ampiezze Spettrali rilevate mediante l'applicazione della DTT e della STT.

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT

Nei Grafici 30 e 31 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di confronto C1 con perfetta aderenza, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della DTT e della STT di tutti i provini con difetti (C3/5/7/9), del nastro in Teflon (T), dell'accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

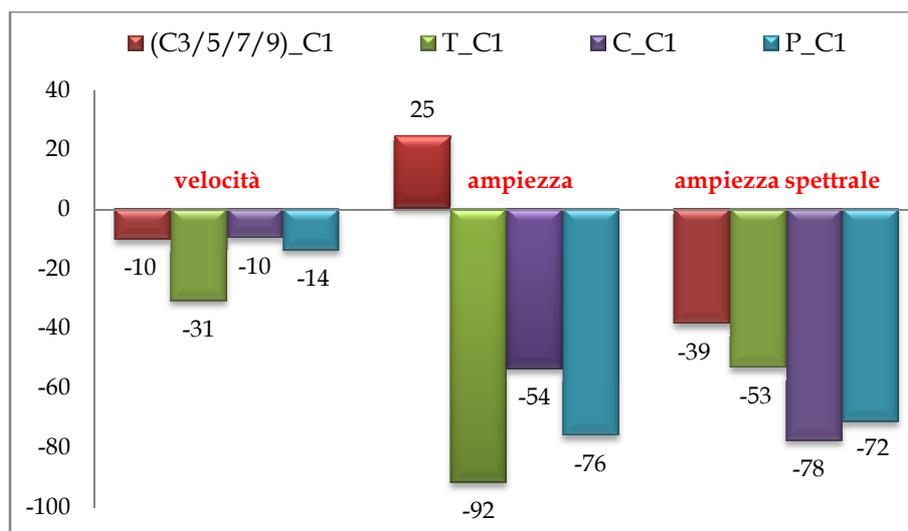


Grafico 30. *Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT della Serie C rinforzata con la rete in FRP.*

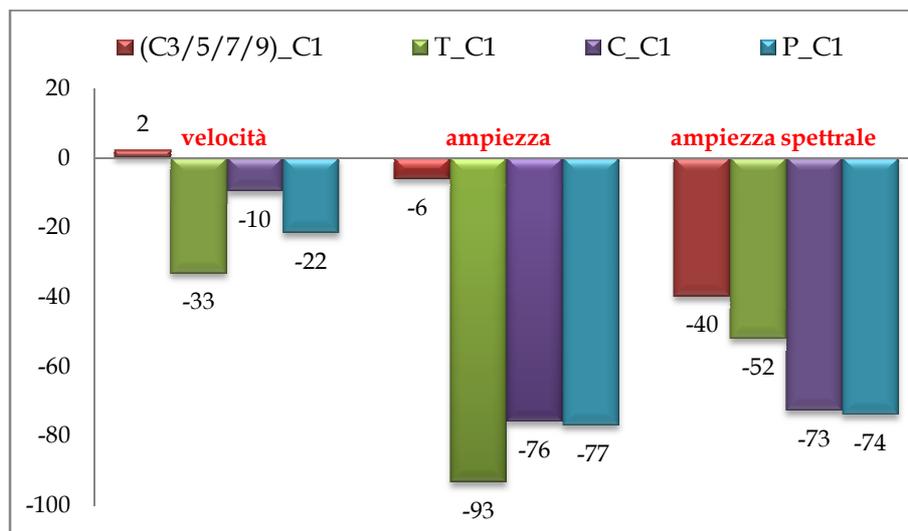


Grafico 31. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la STT della Serie C rinforzata con la rete in FRP.

Dai grafici sopra riportati è possibile notare che:

- I provini con i difetti presentano una riduzione notevole dell’Ampiezza Spettrale e una variazione minima della Velocità determinate tramite la DTT e la STT. L’Ampiezza del segnale ricevuto, invece, ancora una volta presenta un’anomalia in quanto è caratterizzata da un incremento a causa della eccessiva sensibilità del parametro rispetto alle modalità operative;
- Il difetto realizzato con l’accumulo di Colla ha determinato, rispetto agli altri difetti, la minore variazione della Velocità e dell’Ampiezza mediante la DTT e la STT e la maggiore variazione dell’Ampiezza Spettrale valutata tramite la DTT;
- L’analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull’applicazione del sistema di rinforzo.

2.3.2 Prove UT sui travetti rinforzati con la lamina in FRP

In questo paragrafo saranno presentati i risultati ottenuti sui travetti delle tre Serie rinforzati con la lamina in fibra di carbonio. Nel primo provino di ogni Serie, A2, B2 e C2 è stata realizzata la perfetta aderenza tra la lamina e il substrato in calcestruzzo, al fine di realizzare un elemento di confronto. Negli altri travetti sono stati posizionati, sul lato del rinforzo e prima dell’applicazione dello stesso, tre difetti realizzati con un nastro in Teflon (T), un accumulo di Colla (C) e uno spessore in Plastica (P).

2.3.2.1 Travetti serie A

Nei travetti appartenenti a questa Serie, caratterizzati dalla presenza della malta di ripristino, il rinforzo è stato applicato sul lato contrassegnato con il numero 4.

Risultati Velocità dell'applicazione della DTT

In Tabella 29 sono indicati i valori dei Tempi di Transito e delle corrispondenti Velocità valutate nei travetti della Serie e determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini.

Tabella 29. Valori della DTT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
A2	1 - 3	45.00	3333.33
		53.00	2830.19
		49.60	3024.19
	2 - 4	55.60	2697.84
		55.00	2727.27
		53.60	2798.51
A4	1 - 3	52.80	2840.91
		51.60	2906.98
		51.40	2918.29
	2 - 4	66.60	2252.25
		56.60	2650.18
		53.80	2788.10
A6	1 - 3	58.80	2551.02
		60.80	2467.11
		59.20	2533.78

	2 - 4	97.20	1543.21
		64.00	2343.75
		72.00	2083.33
A8	1 - 3	52.00	2884.62
		54.00	2777.78
		55.40	2707.58
	2 - 4	76.00	1973.68
		64.80	2314.81
		64.00	2343.75
A10	1 - 3	60.00	2500.00
		60.80	2467.11
		59.20	2533.78
	2 - 4	105.20	1425.86
		57.20	2622.38
		69.20	2167.63

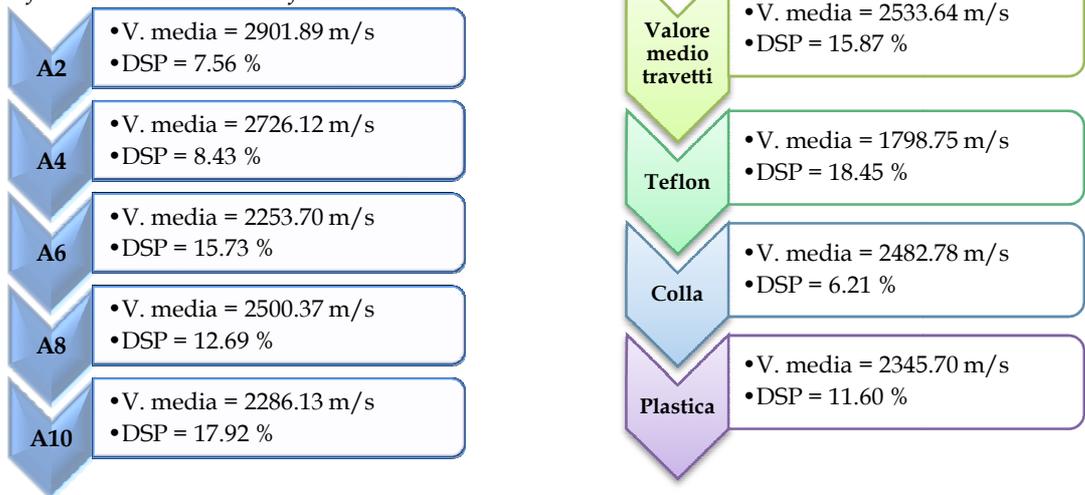
I tre difetti presenti nei travetti A4, A6, A8 e A10 nelle acquisizioni mediante la DTT vengono intercettati ciascuno una sola volta in corrispondenza del percorso 2 - 4. Nella Tabella seguente sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 30. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1425.86 nel provino A10	2252.25 nel provino A10
Colla	2314.81 nel provino A8	2650.18 nel provino A4
Plastica	2083.33 nel provino A6	2788.10 nel provino A4

In Tabella 31 sono riportate le Velocità Medie dei travetti della Serie con le corrispondenti DSP. Sono inoltre indicati i valori delle Velocità Medie e le relative DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 31. Valori medi della DTT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione non altera il valore della Velocità Media nei singoli travetti, mentre le DSP sono sensibilmente più elevate nei provini in cui sono state realizzate le tre anomalie di adesione.

Analizzando i valori medi DTT in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha causato un decremento della Velocità tramite la DTT pari a circa 700 m/s;
- l'accumulo di Colla non ha causato alcun decremento delle Velocità;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento pari a circa 200 m/s.

Nel Grafico 32 è rappresentata la Velocità Media del travetto di confronto A2 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini con i difetti (A4/6/8/10) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

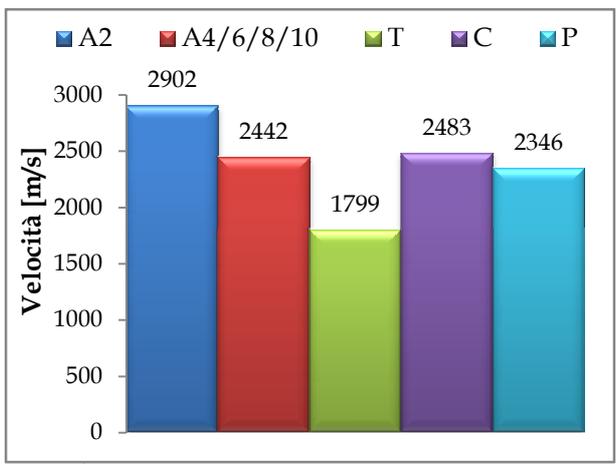


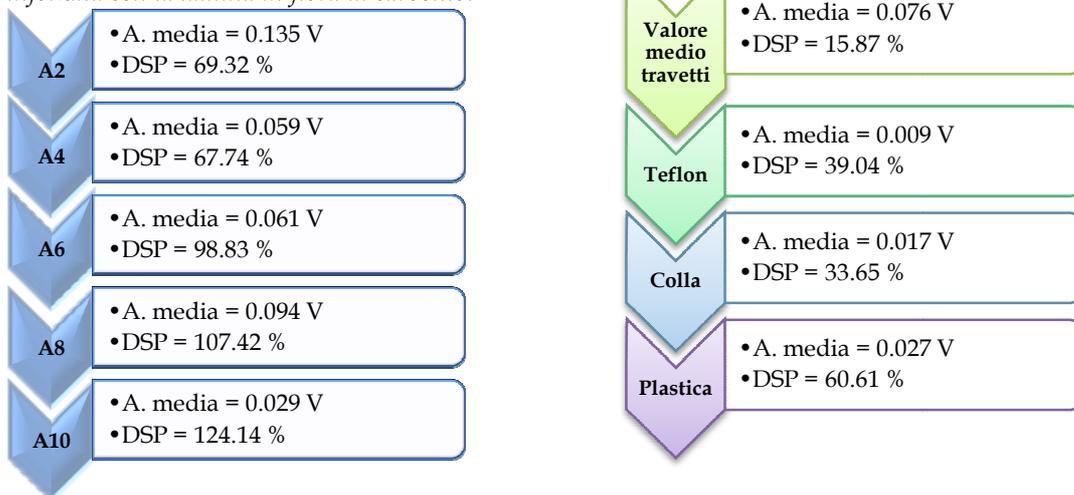
Grafico 32. Valori medi delle Velocità determinate tramite la DTT della Serie A rinforzata con la lamina in FRP.

La barra blu rappresenta il valore medio del travetto di confronto A2, la barra rossa rappresenta la Velocità Media di tutti i provini con i difetti (A4/6/8/10), la barra verde rappresenta il valore medio in corrispondenza del nastro in Teflon, la barra viola in corrispondenza dell'accumulo di Colla ed infine la barra azzurra in corrispondenza dello spessore in Plastica. Dal Grafico 32 e dalla Tabella 31 è possibile notare come i tre difetti siano tutti ben individuati in quanto hanno causato, rispetto al provino A2, un considerevole incremento dei Tempi di Transito e conseguentemente un decremento delle Velocità. Inoltre il decremento di Velocità in corrispondenza dei tre difetti, T, C e P, è nettamente superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino di riferimento A2 che è risultata pari a 219.89 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 32 sono indicati i valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della DTT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre riportati i valori medi dell'Ampiezza valutate mediante la DTT e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 32. Valori medi della DTT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



Nel Grafico 33 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della DTT dei segnali ricevuti. Come già detto precedentemente l'analisi dell'Ampiezza consente di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. Rimane tuttavia valida la sua valenza qualitativa a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 32.

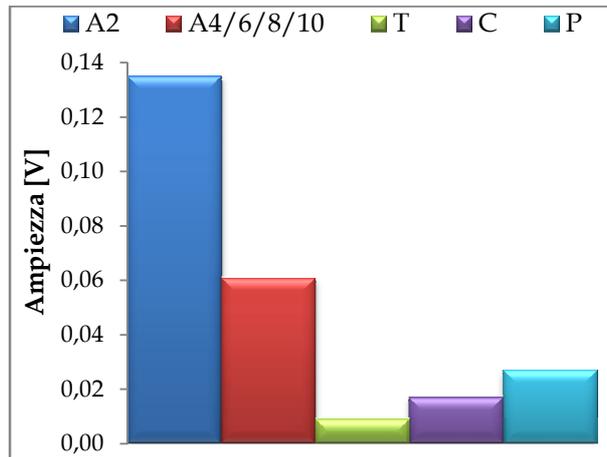


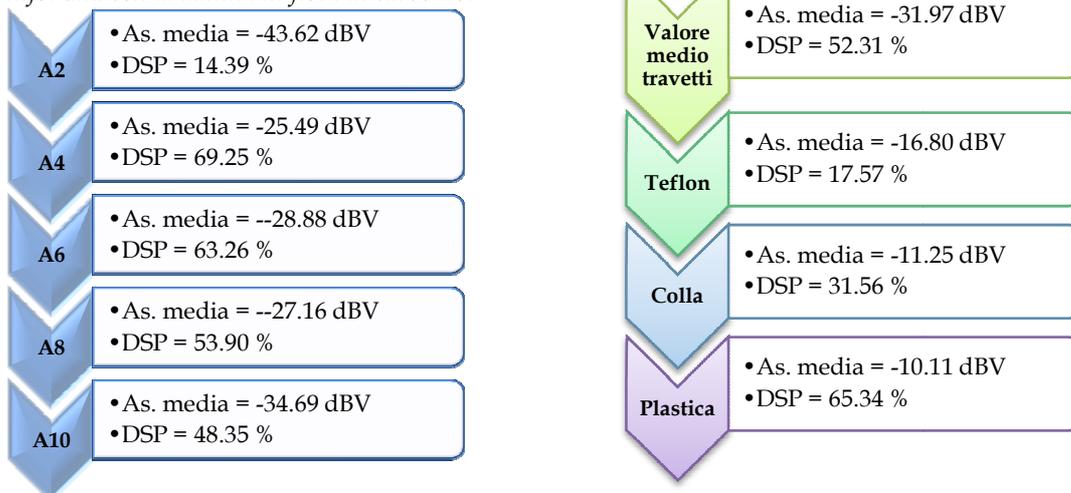
Grafico 33. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Come notato già nelle precedenti analisi il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel provino di riferimento A2 e a quello di tutti i provini con i difetti (A4/6/8/10).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 33 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite la DTT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 33. Valori medi della DTT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



Nel Grafico 34 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dal Grafico 34 e dalla Tabella precedente è evidente come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati per l'Ampiezza del segnale ricevuto.

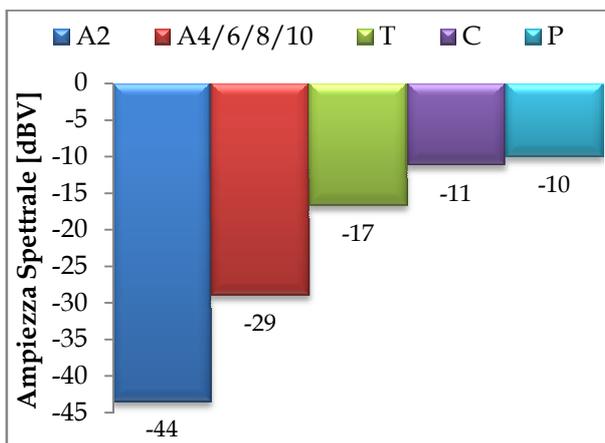


Grafico 34. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie A rinforzata con la lamina in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato, rispetto al provino di confronto A2, una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale di tutti i provini con i difetti (A4/6/8/10). Il nastro in Teflon, a differenza di quanto osservato nelle precedenti analisi, ha determinato, rispetto agli altri difetti, la minore variazione dell'Ampiezza Spettrale.

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

In Tabella 34 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità, determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutati nei singoli travetti della Serie.

Tabella 34. Valori della STT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Travetto	Percorso	Tempo [µs]	Velocità [m/s]
A2	1 - 2	50.00	2121.32
		42.40	2501.56
		57.00	1860.81
	1 - 4	56.40	1880.60
		49.40	2147.09
		50.20	2112.87
	3 - 2	39.40	2692.03
		44.40	2388.87
		43.40	2443.92
	3 - 4	51.60	2055.54
		52.40	2024.16
		51.80	2047.61
A4	1 - 2	41.20	2574.42
		41.60	2549.66
		49.00	2164.61
	1 - 4	72.80	1456.95
		61.80	1716.28
		49.20	2155.81
	3 - 2	51.20	2071.60

A6	3 - 4	49.20	2155.81
		49.00	2164.61
		68.40	1550.67
		63.60	1667.70
		52.60	2016.46
A6	1 - 2	51.20	2071.60
		50.80	2087.91
		49.20	2155.81
	1 - 4	86.40	1227.62
		62.80	1688.95
A6	3 - 2	72.00	1473.14
		47.20	2247.16
		42.80	2478.18
	3 - 4	41.60	2549.66
		77.20	1373.91
A8	1 - 2	58.40	1816.20
		64.00	1657.28
		50.40	2104.48
	1 - 4	51.00	2079.73
		43.80	2421.60
		106.40	996.86
	3 - 2	58.80	1803.84
	54.80	1935.51	

	3 - 2	42.20	2513.41
		48.60	2182.43
		48.20	2200.54
	3 - 4	85.20	1244.91
		64.00	1657.28
		56.40	1880.60
A10	1 - 2	46.00	2305.78
		48.60	2182.43
		56.00	1894.04

	1 - 4	88.00	1205.30
		65.60	1616.86
		112.00	947.02
	3 - 2	64.40	1646.99
		49.20	2155.81
		56.00	1894.04
	3 - 4	72.40	1465.00
		69.60	1523.94
		62.40	1699.78

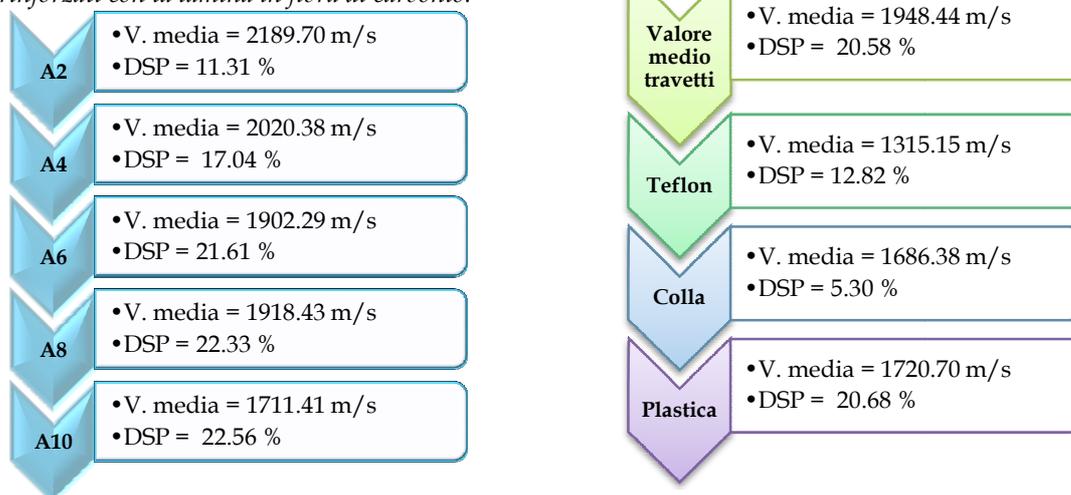
Le anomalie di adesione vengono intercettate in corrispondenza dei percorsi 1 - 4 e 3 - 4. Nella Tabella seguente sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza dei difetti.

Tabella 35. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	996.86 nel provino A8	1550.67 nel provino A4
Colla	1523.94 nel provino A10	1816.20 nel provino A6
Plastica	947.02 nel provino A10	2155.81 nel provino A4

In Tabella 36 sono riportate le Velocità Medie e le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le relative DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 36. Valori medi della STT della Serie A rinforzati con la lamina in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione altera leggermente il valore della Velocità Media nei singoli travetti, mentre le DSP sono sensibilmente più elevate nei provini in cui sono state realizzate le tre anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 650 m/s;

- l'accumulo di Colla e le spessore in Plastica hanno determinato un decremento nettamente inferiore, pari a circa 200 m/s.

Nel Grafico 35 è rappresentata la Velocità Media del travetto di confronto A2 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (A4/6/8/10) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

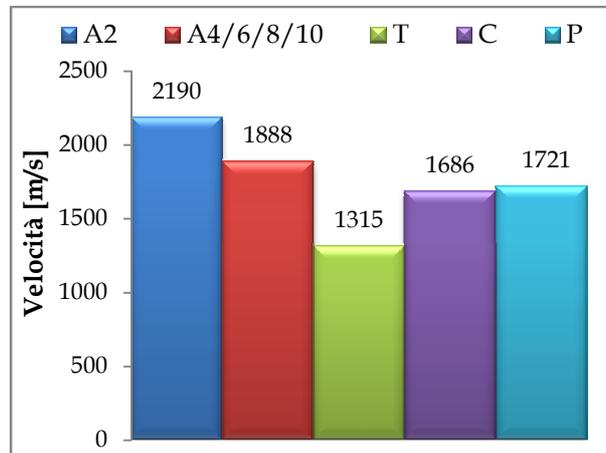


Grafico 35. Valori medi delle Velocità determinate tramite la STT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 36 e dal Grafico 35 si può notare come, rispetto al travetto di riferimento A2, il difetto realizzato tramite il nastro in Teflon (T) abbia determinato un decremento della Velocità pari a circa 900 m/s, l'accumulo di Colla (C) pari a 500 m/s e lo spessore in Plastica (P) pari a circa 400 m/s. Tutti i difetti hanno determinato un decremento della Velocità, rispetto al provino A2, superiore al valore della Deviazione Standard Relativa dello stesso, che è risultata pari a 219.89 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

Nella tabella successiva sono riportate le Ampiezze Medie del segnale e le rispettive DSP registrate dal trasduttore ricevitore nei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei difetti di adesione T, C e P.

Tabella 37. Valori medi della STT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

A2	• A. media = 0.140 V • DSP = 74.59 %	Valore medio travetti	• A. media = 0.075 V • DSP = 109.08 %
A4	• A. media = 0.087 V • DSP = 91.93 %	Teflon	• A. media = 0.008 V • DSP = 47.17 %
A6	• A. media = 0.079 V • DSP = 90.11 %	Colla	• A. media = 0.010 V • DSP = 71.05 %
A8	• A. media = 0.044 V • DSP = 112.49 %	Plastica	• A. media = 0.023 V • DSP = 84.65 %
A10	• A. media = 0.025 V • DSP = 119.15 %		

Nel Grafico 36 sono rappresentate le Ampiezze Medie del segnale ricevuto. Dai valori numerici indicati in Tabella 37 e dal Grafico 36 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta la individuazione di tutti i difetti di adesione predisposti sui provini. Il nastro in Teflon è il difetto che ha determinato la maggiore riduzione dell'Ampiezza del segnale. Il Grafico 36, come nel caso dell'applicazione della DTT, ha valenza qualitativa a causa dell'elevata dispersione dei dati come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 37.

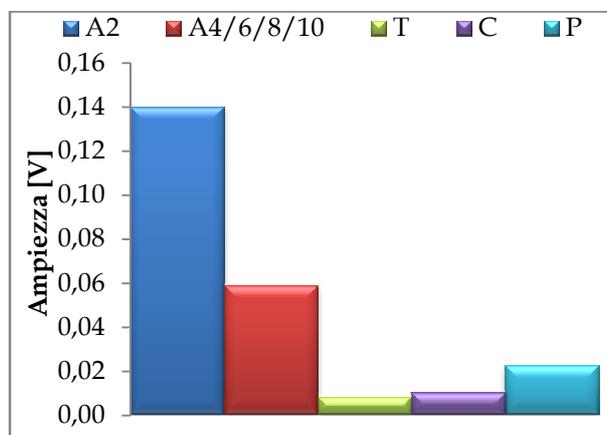


Grafico 36. Valori medi delle Ampiezze determinati tramite l'applicazione della STT della Serie A rinforzata con la lamina in FRP.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel provino di riferimento A2 e a quello valutato su tutti i provini con i difetti (A4/6/8/10).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 38 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati tramite l'applicazione della STT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le

relative DSP determinate nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi dell' Ampiezza Spettrale e le relative DSP della intera Serie e quelli individuati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 38. Valori medi della STT della Serie A rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

A2	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -45.16 dBV •DSP = 12.32 % 	Valore medio travetti	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -32.45 dBV •DSP = 56.06 %
A4	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -20.32 dBV •DSP = 123.21 % 	Teflon	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -18.67 dBV •DSP = 16.86 %
A6	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -26.99 dBV •DSP = 50.05 % 	Colla	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -17.73 dBV •DSP = 41.87 %
A8	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -31.77 dBV •DSP = 50.47 % 	Plastica	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -13.84 dBV •DSP = 57.36 %
A10	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -38.03 dBV •DSP = 36.03 % 		

Nel Grafico 37 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati mediante la STT. Dal Grafico 37 e dai valori numerici riportati nella Tabella precedente è evidente come l'analisi dell' Ampiezza Spettrale consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di Deviazioni Standard Percentuali nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell' Ampiezza del segnale ricevuto.

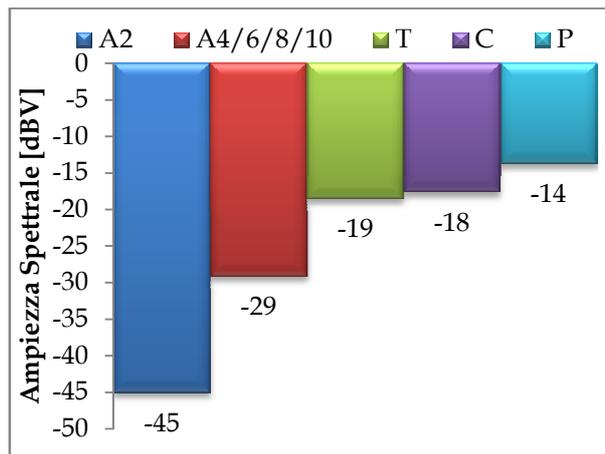


Grafico 37. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati tramite la STT della Serie A rinforzata con la lamina FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato, rispetto al provino di riferimento A2, una considerevole variazione del valore medio dell' Ampiezza Spettrale valutato su tutti i provini con le anomalie (A4/6/8/10). Il nastro in Teflon, ossia la mancanza di aderenza FRP/calcestruzzo, è l'anomalia che ha inciso in minor misura rispetto agli altri determinando infatti la minore variazione dell' Ampiezza Spettrale, a

differenza di quanto messo in evidenza nelle analisi delle Velocità Medie e delle Ampiezze Medie.

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT

Nei Grafici 38 e 39 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di riferimento A2, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinati tramite la DTT e la STT di tutti i provini con difetti (A4/6/8/10), del nastro in Teflon (T), dell'accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

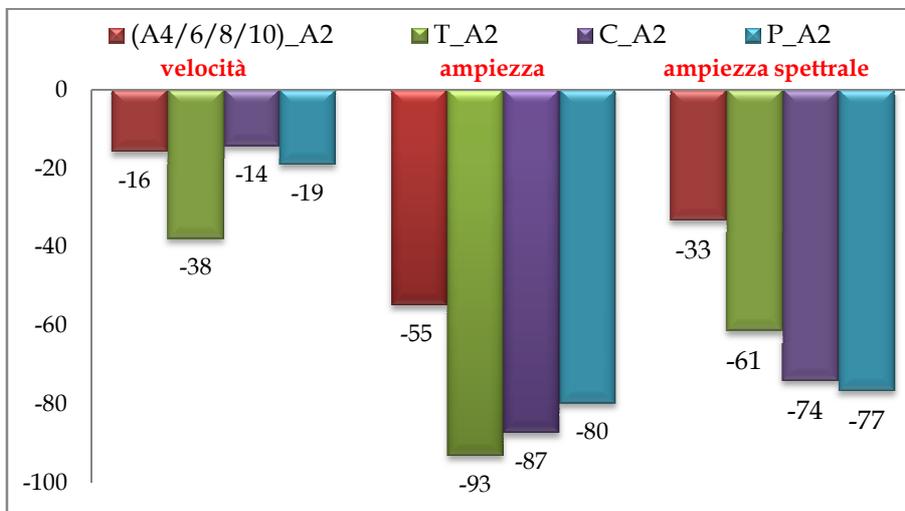


Grafico 38. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinati tramite la DTT della Serie A rinforzata con la lamina in FRP.

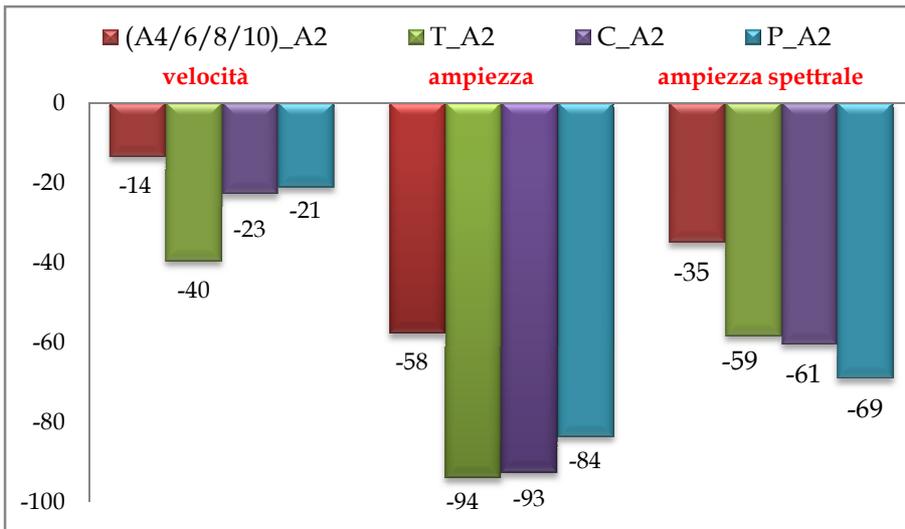


Grafico 39. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinati tramite la STT della Serie A rinforzata con la lamina in FRP.

Dai grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- I provini con i difetti presentano una variazione notevole dell’Ampiezza e dell’Ampiezza Spettrale e una variazione minima della Velocità determinate tramite l’applicazione della DTT e della STT. L’Ampiezza del segnale ricevuto, a differenza di quanto osservato nei provini rinforzati con la rete in FRP non presenta alcuna anomalia;
- Il nastro in Teflon rispetto ai difetti C e P, ha determinato la maggiore variazione della Velocità e dell’Ampiezza e la minore variazione dell’Ampiezza Spettrale valutate mediante la DTT e la STT;
- Il difetto realizzato con lo spessore in Plastica, rispetto ai difetti T e C, ha determinato la minore variazione dell’Ampiezza e la maggiore variazione dell’Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT e la STT;
- L’analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull’applicazione del sistema di rinforzo.

2.3.2.2 Travetti Serie B

Poiché i risultati ottenuti per i provini della Serie B, rinforzati con la lamina in FRP, sono simili a quelli della Serie A si riportano in questa sezione le sole analisi relative alle variazioni percentuali determinate tramite la DTT e la STT. Nell’Appendice B sono comunque riportati tutti i risultati e le analisi relative alle Velocità, alle Ampiezze e alle Ampiezze Spettrali della DTT e della STT.

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l’applicazione della DTT e della STT

Nei Grafici 40 e 41 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di riferimento B2 caratterizzato dalla perfetta aderenza, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinate tramite la DTT e la STT di tutti i provini con difetti (B4/6/8/10), del nastro in Teflon (T), dell’accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

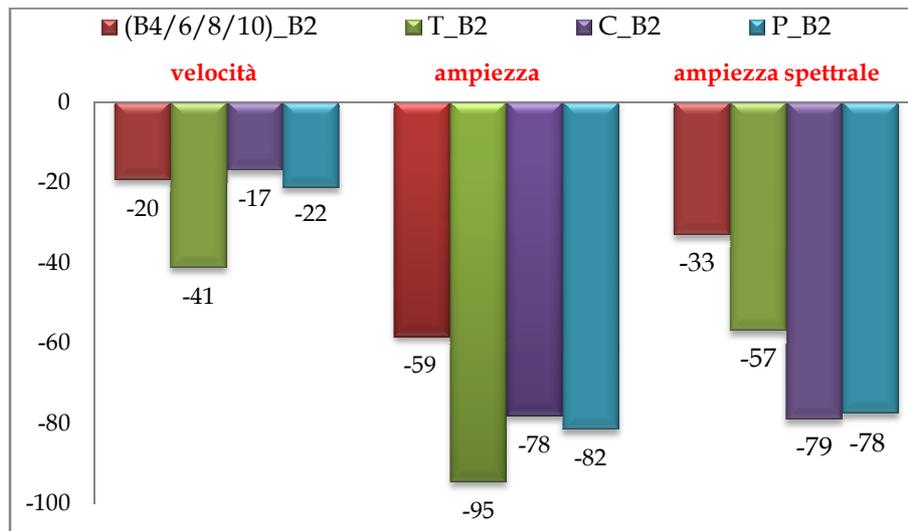


Grafico 40. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT della Serie B rinforzata con la lamina in FRP.

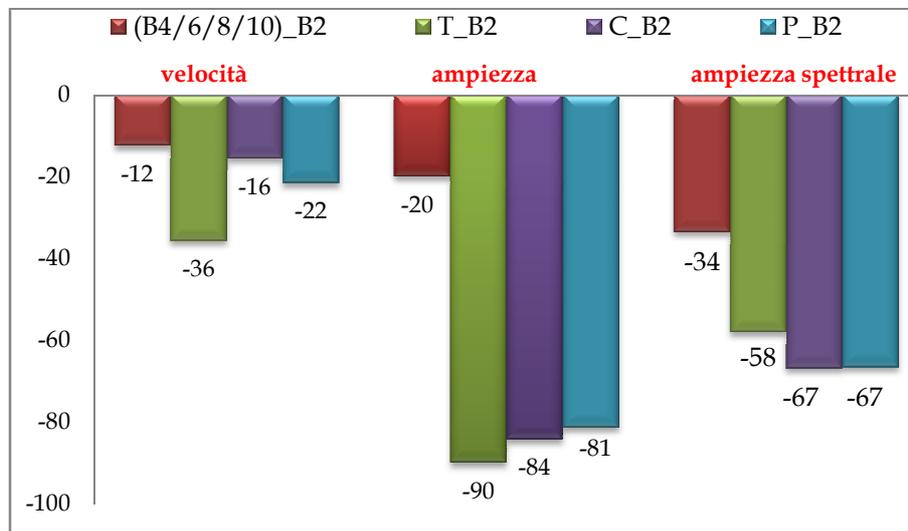


Grafico 41. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la STT della Serie B rinforzata con la lamina in FRP.

Dai grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- I provini con i difetti presentano una variazione notevole dell’Ampiezza e dell’Ampiezza Spettrale e una variazione minima della Velocità determinate tramite l’applicazione della DTT e della STT. L’Ampiezza del segnale ricevuto, a differenza di quanto osservato nei provini rinforzati con la rete in FRP non presenta alcuna anomalia;
- Il nastro in Teflon, rispetto all’accumulo di Colla e allo spessore in Plastica, ha determinato la maggiore variazione della Velocità e dell’Ampiezza e la minore variazione dell’Ampiezza Spettrale determinate mediante la DTT e la STT ;
- Il difetto realizzato con l’accumulo di Colla ha determinato, rispetto agli altri difetti, la minore variazione della Velocità valutate mediante la DTT e la STT;

- L'accumulo di Colla e lo spessore in Plastica hanno determinato una variazione dell'Ampiezza e dell'Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT e la STT dello stesso ordine di grandezza;
- L'analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull'applicazione del sistema di rinforzo.

2.3.2.3 Travetti Serie C

Poiché i risultati ottenuti per i provini della Serie C, rinforzati con la lamina in FRP, sono simili a quelli delle Serie precedenti si riportano in questa sezione le sole analisi relative alle variazioni percentuali determinate tramite la DTT e la STT. Nell'Appendice B sono comunque riportati tutti i risultati e le analisi relativi alle Velocità, alle Ampiezze e alle Ampiezze Spettrali della DTT e della STT.

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e STT

Nei Grafici 42 e 43 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di riferimento C2 con perfetta adesione, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinati tramite la DTT e la STT di tutti i provini con difetti (C4/6/8/10), del nastro in Teflon (T), dell'accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

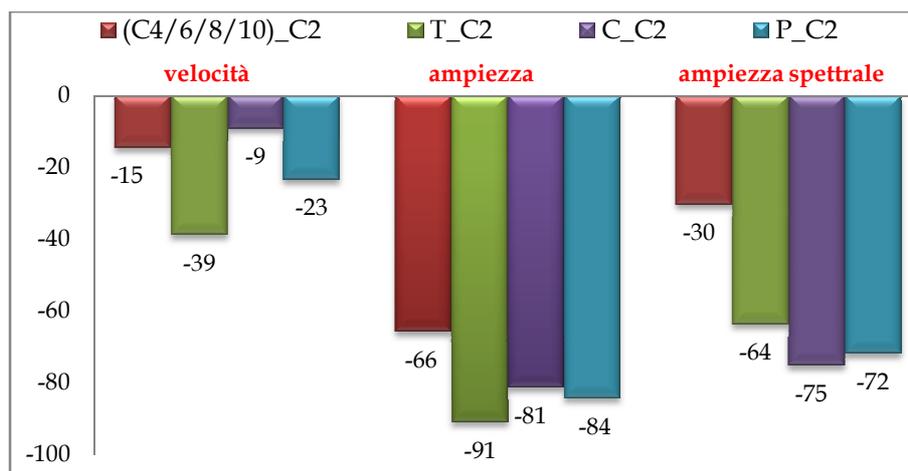


Grafico 42. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT della Serie C rinforzata con la lamina in FRP.

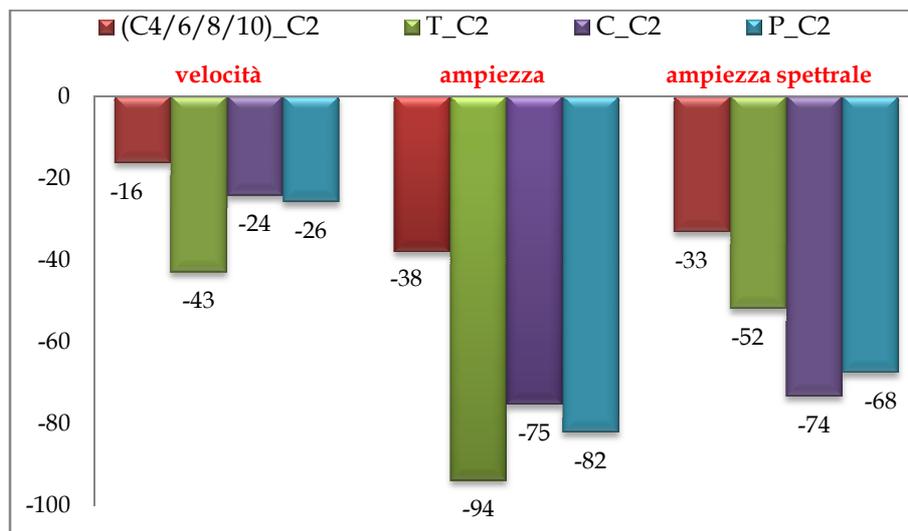


Grafico 43. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza determinate tramite la STT della Serie C rinforzata con la lamina in FRP.

Dai grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- I provini con i difetti presentano una variazione notevole dell’Ampiezza e dell’Ampiezza Spettrale e una variazione minima della Velocità determinate tramite la DTT e la STT. L’Ampiezza del segnale ricevuto, a differenza di quanto osservato nei provini rinforzati con la rete in FRP non presenta alcuna anomalia;
- Il nastro in Teflon, rispetto agli altri due difetti, ha causato la maggiore variazione della Velocità e dell’Ampiezza e la minore variazione dell’Ampiezza Spettrale della DTT e della STT;
- Il difetto realizzato con l’accumulo di Colla ha determinato la minore variazione della Velocità e dell’Ampiezza e la maggiore variazione dell’Ampiezza Spettrale della DTT e della STT;
- L’analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull’applicazione del sistema di rinforzo.

2.3.3 Prove UT sui travetti rinforzati con la rete in PBO

In questo paragrafo saranno analizzati i risultati ottenuti sui travetti delle tre Serie rinforzati con la rete in fibra di PBO. Nel primo provino di ogni Serie, A11, B11 e C11 è stata realizzata la perfetta aderenza tra la rete in fibra di PBO e il substrato in calcestruzzo. Negli altri travetti sono stati posizionati, sul lato del rinforzo e prima dell’applicazione dello stesso, tre difetti realizzati con un nastro in Teflon (T), un accumulo di Colla (C) e uno spessore in Plastica (P).

2.3.3.1 Travetti Serie A

Nei travetti appartenenti a questa Serie, caratterizzati dalla presenza della malta da ripristino, il rinforzo è stato applicato sul lato contrassegnato con il numero 4.

Risultati Velocità dell'applicazione della DTT

In Tabella 39 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle corrispondenti Velocità di tutti i travetti della Serie e determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini.

Tabella 39. Valori della DTT dei travetti della Serie A rinforzati con la rete in fibra di PBO.

Travetto	Percorso	Tempo [µs]	Velocità [m/s]
A11	1 - 3	52.00	2884.62
		52.40	2862.60
		55.60	2697.84
	2 - 4	56.40	2659.57
		54.40	2757.35
		55.60	2697.84
A12	1 - 3	56.80	2640.85
		57.20	2622.38
		52.40	2862.60
	2 - 4	79.20	1893.94
		66.40	2259.04
		65.60	2286.59
A13	1 - 3	58.80	2551.02
		52.80	2840.91

	2 - 4	58.00	2586.21
		82.00	1829.27
		67.60	2218.93
A14	1 - 3	70.80	2118.64
		58.40	2568.49
		52.40	2862.60
	2 - 4	57.20	2622.38
		82.00	1829.27
		66.80	2245.51
A15	1 - 3	63.60	2358.49
		58.40	2568.49
		51.20	2929.69
	2 - 4	53.60	2798.51
		81.20	1847.29
		66.00	2272.73
		72.80	2060.44

I tre difetti presenti nei travetti A12, A13, A14 e A15 vengono intercettati ciascuno una sola volta in corrispondenza dei tre punti relativi al Percorso 2 - 4. Nella Tabella seguente sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 40. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1829.27 nel provino A13	1893.94 nel provino A12
Colla	2218.93 nel provino A13	2272.73 nel provino A15
Plastica	2060.44 nel provino A13	2358.49 nel provino A14

In Tabella 41 sono riportate le Velocità Medie dei singoli travetti della Serie con le corrispondenti DSP. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 41. Valori medi della DTT dei travetti della Serie A rinforzati con la rete in fibra di PBO.

A11	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2759.97 m/s •DSP = 3.10 % 	Valore medio travetti	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2474.47 m/s •DSP = 13.81 %
A12	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2427.56 m/s •DSP = 13.09 % 	Teflon	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1849.94 m/s •DSP = 1.43 %
A13	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2357.50 m/s •DSP = 14.27 % 	Colla	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2249.05 m/s •DSP = 0.88 %
A14	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2414.46 m/s •DSP = 13.55 % 	Plastica	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2206.04 m/s •DSP = 5.49 %
A15	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2412.86 m/s •DSP = 16.08 % 		

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato, rispetto al provino di riferimento A11, un decremento della Velocità media dei travetti pari a circa 300 m/s ed inoltre i valori delle Deviazioni Standard Percentuali sono sensibilmente più elevati nei provini in cui sono state realizzate le anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha causato un decremento della Velocità pari a circa 600 m/s;
- l'accumulo di Colla e lo spessore in Plastica hanno determinato un decremento della Velocità pari a circa 200 m/s.

Nel Grafico 44 è rappresentata la Velocità Media del travetto A11 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini con i difetti (A12/13/14/15) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

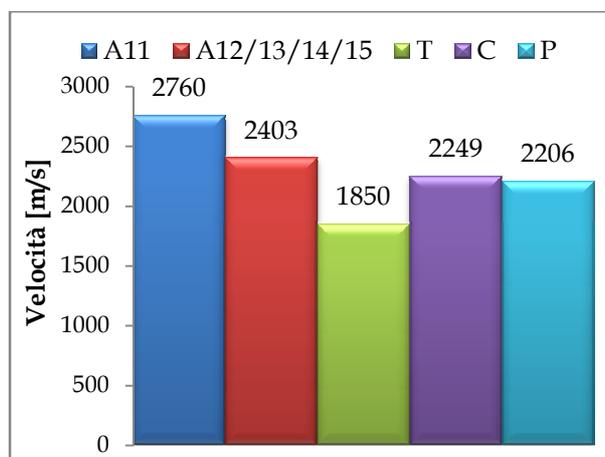


Grafico 44. Valori medi delle Velocità determinate mediante l'applicazione della DTT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di PBO.

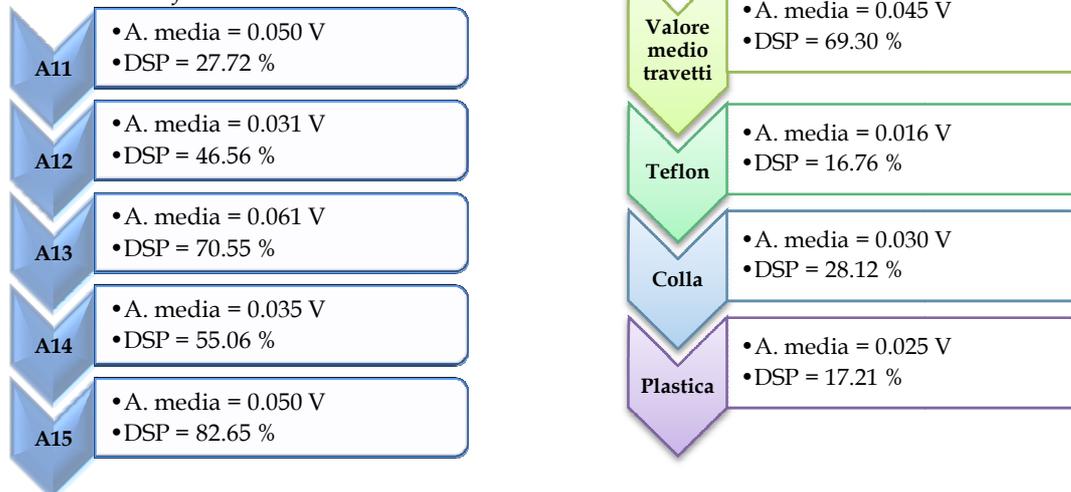
Dai valori numerici riportati in Tabella 41 e dal Grafico 44 è possibile notare come i tre difetti siano ben individuati in quanto hanno determinato, rispetto al provino di

riferimento A11, un considerevole incremento del Tempo di Transito del segnale e un conseguente decremento della Velocità. Inoltre il decremento di Velocità in corrispondenza dei tre difetti di adesione è nettamente superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino A11 che è risultata pari a 85.51 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 42 sono riportati i valori medi delle Ampiezze del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 42. Valori medi della DTT dei travetti della Serie A rinforzati con la rete in PBO.



Nel Grafico 45 sono rappresentate le Ampiezze Medie dei segnali. Dai valori numerici riportati in Tabella 42 e dal Grafico 45 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. L'analisi dell'Ampiezza è quindi più adatta, rispetto a quella della Velocità, nella individuazione dei difetti e delle anomalie. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non quantitativo a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 42.

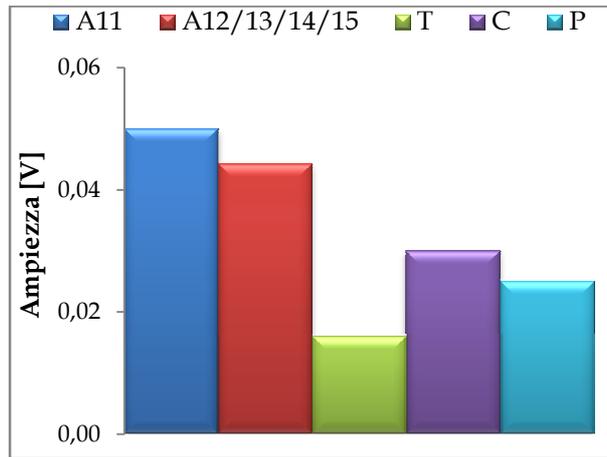


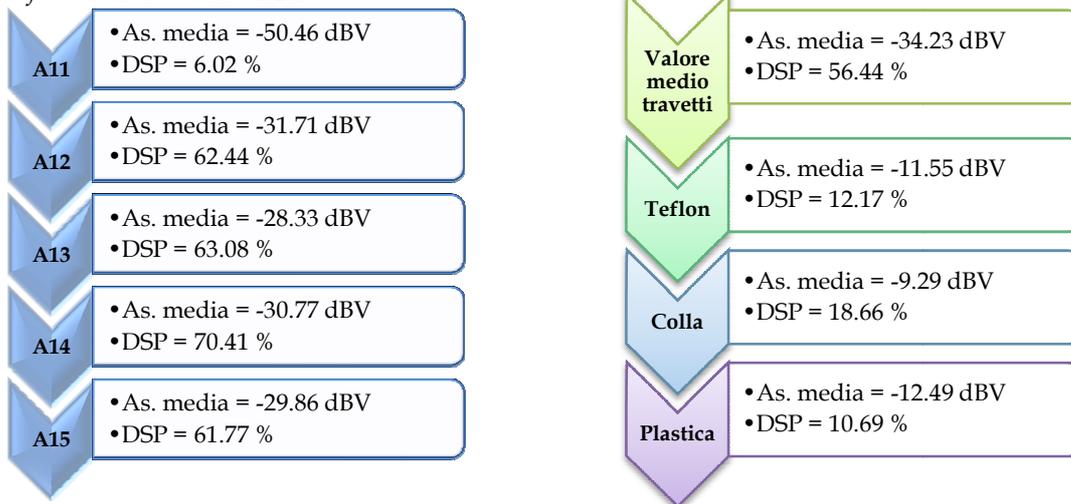
Grafico 45. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel travetto di riferimento A11 e a quello calcolato su tutti i provini con i difetti (A12/13/14/15).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 43 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 43. Valori medi della DTT della Serie A rinforzata con la rete in PBO.



Nel Grafico 46 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dai valori numerici riportati nella Tabella 43 e dal Grafico 46 è evidente come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di DSP nettamente inferiori di quelli determinati per l'Ampiezza del segnale.

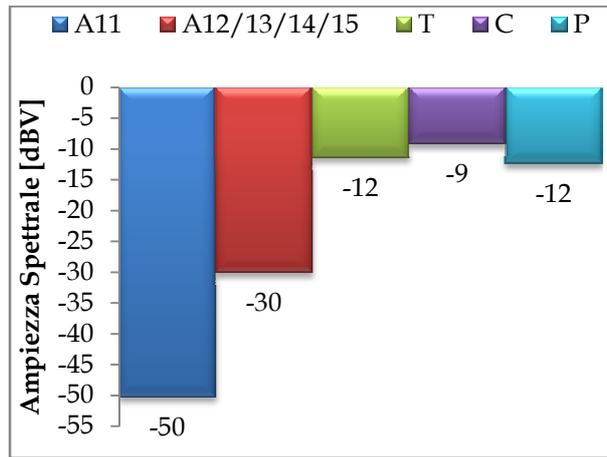


Grafico 46. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie A rinforzata con la rete in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato, rispetto al provino di riferimento A11, una considerevole variazione dell'Ampiezza Spettrale Media calcolata su tutti i travetti con le anomalie (A12/13/14/15).

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

In Tabella 44 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità rilevate su tutti i travetti delle Serie e determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini.

Tabella 44. Valori della STT dei travetti della Serie A rinforzati con la rete in fibra di PBO.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
A11	1 - 2	52.00	2884.62
		52.40	2862.60
		55.60	2697.84
	1 - 4	56.40	2659.57
		54.40	2757.35
		55.60	2697.84
	3 - 2	56.80	2640.85
		57.20	2622.38
		52.40	2862.60
	3 - 4	79.20	1893.94
		66.40	2259.04
		65.60	2286.59
A12	1 - 2	58.80	2551.02
		52.80	2840.91
		58.00	2586.21
	1 - 4	82.00	1829.27
		67.60	2218.93
		70.80	2118.64
	3 - 2	58.40	2568.49
		52.40	2862.60
		57.20	2622.38
	3 - 4	82.00	1829.27

A13	1 - 2	66.80	2245.51
		63.60	2358.49
	1 - 4	58.40	2568.49
		51.20	2929.69
		53.60	2798.51
		81.20	1847.29
	3 - 2	66.00	2272.73
		72.80	2060.44
		52.00	2884.62
		52.40	2862.60
	3 - 4	55.60	2697.84
		56.40	2659.57
54.40		2757.35	
55.60		2697.84	
A14	1 - 2	56.80	2640.85
		57.20	2622.38
		52.40	2862.60
	1 - 4	79.20	1893.94
		66.40	2259.04
		65.60	2286.59
	3 - 2	58.80	2551.02
		52.80	2840.91
		58.00	2586.21
	3 - 4	82.00	1829.27
		67.60	2218.93
		70.80	2118.64

A15	1 - 2	58.40	2568.49
		52.40	2862.60
		57.20	2622.38
	1 - 4	82.00	1829.27
		66.80	2245.51
		63.60	2358.49

	3 - 2	58.40	2568.49
		51.20	2929.69
		53.60	2798.51
	3 - 4	81.20	1847.29
		66.00	2272.73
		72.80	2060.44

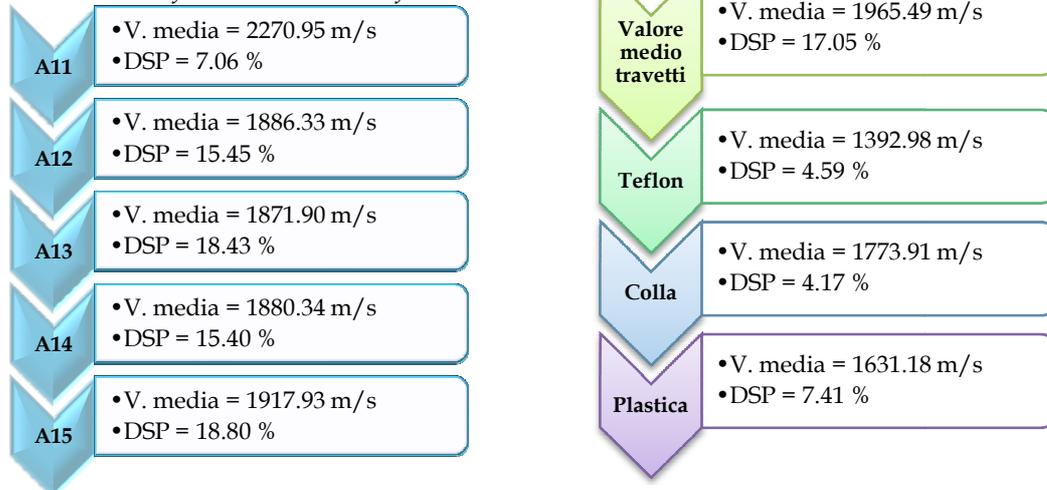
Le tre anomalie di adesione sono intercettate durante le acquisizioni in corrispondenza dei tre punti nei percorsi 1 - 4 e 3 - 4. Nella Tabella seguente sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza dei difetti.

Tabella 45. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1306.23 nel provino A13	1515.23 nel provino A14
Colla	1626.78 nel provino A14	1867.36 nel provino A12
Plastica	1425.62 nel provino A13	1756.06 nel provino A12

In Tabella 46 sono riportate le Velocità Medie e le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione

Tabella 46. Valori medi della STT dei travetti della Serie A rinforzati con la rete in fibra di PBO.



La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato, rispetto al provino di riferimento A11, un decremento della Velocità Media dei travetti pari a circa 400 m/s ed inoltre i valori di DSP sono sensibilmente più elevati nei provini in cui sono state realizzate le anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 600 m/s;
- l'accumulo di Colla ha determinato un decremento nettamente inferiore pari a circa 200 m/s;

- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento pari a circa 300 m/s.

Nel Grafico 47 è rappresentata la Velocità Media del travetto di confronto A11 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (A12/13/14/15) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

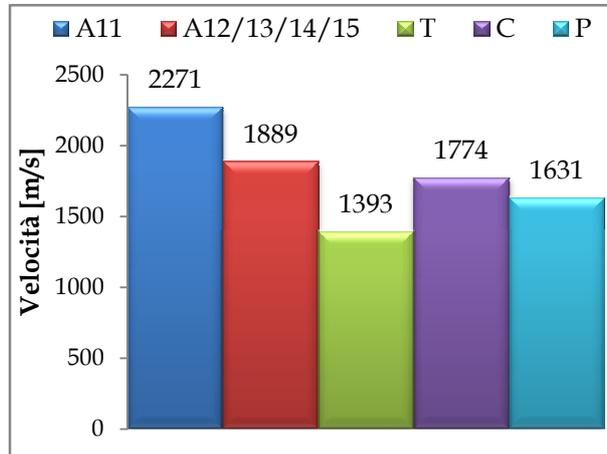


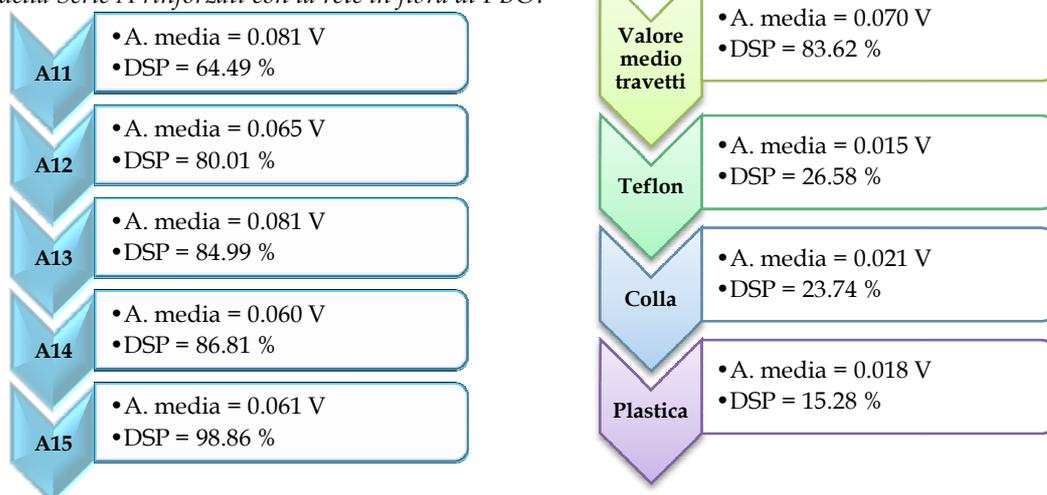
Grafico 47. Valori medi delle Velocità determinate mediante l'applicazione della STT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 46 e dal Grafico 47 si può notare come tutte le anomalie abbiano determinato, rispetto al provino A11, un considerevole decremento della Velocità pari a circa 900 m/s per T e 500 - 600 m/s per C e P. Tale decremento, inoltre, è superiore al valore della Deviazione Standard Relativa del provino di riferimento A11 che è risultata pari a 160.34 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

Nella Tabella 47 sono riportate le Ampiezze Medie del segnale e le rispettive DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 47. Valori medi della STT dei travetti della Serie A rinforzati con la rete in fibra di PBO.



Nel Grafico 48 sono rappresentate le Ampiezze Medie valutate mediante l'applicazione della STT della Serie. Dai valori numerici indicati in Tabella 47 e dal Grafico 48 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione predisposti sui travetti. Il nastro in Teflon è il difetto che ha determinato la maggiore riduzione dell'Ampiezza del segnale. Il grafico sotto riportato, come nel caso di applicazione della DTT, ha valenza qualitativa a causa dell'elevata dispersione dei dati come messo in evidenza dai valori di DSP indicati in Tabella 47.

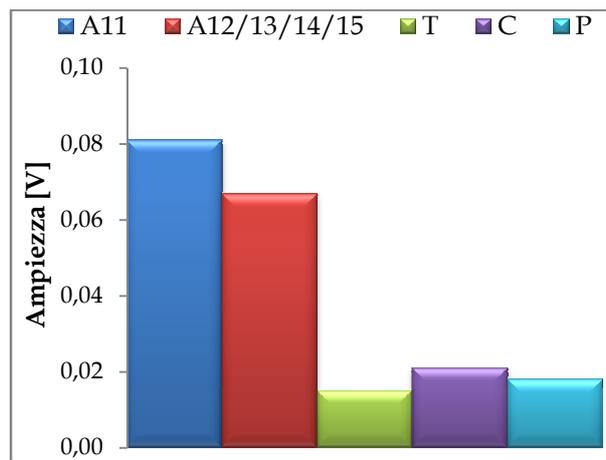


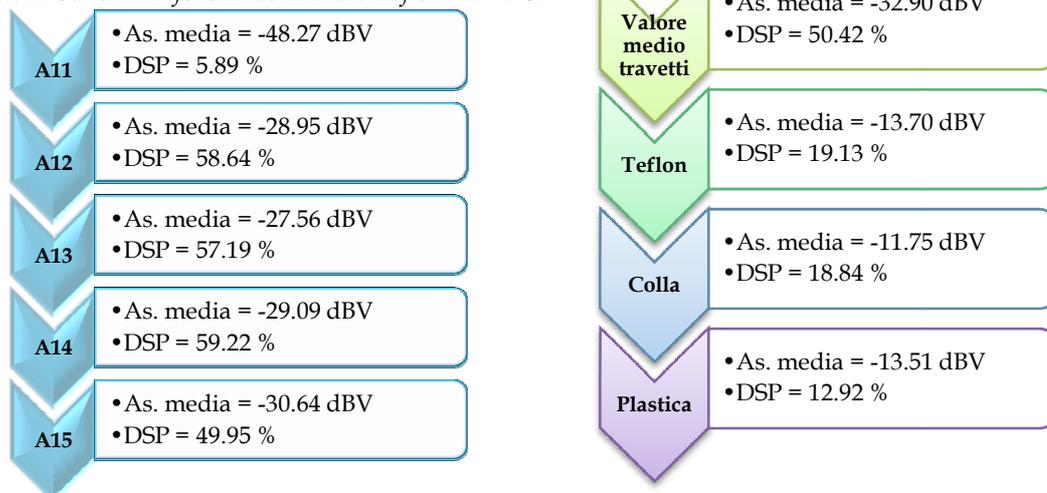
Grafico 48. Valori medi delle Ampiezze tramite l'applicazione della STT della Serie A rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello del provino di confronto A11 e a quello calcolato su tutti i travetti con i difetti (A12/13/14/15).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 48 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP determinate nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale e le relative DSP dell'intera Serie e quelli individuati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 48. Valori medi della STT dei travetti della Serie A rinforzata con la rete in fibra di PBO.



Nel Grafico 49 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali. Dal Grafico 49 e dai valori numerici riportati nella Tabella 48 è evidente come l'analisi dell'Ampiezza Spettrale consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell'Ampiezza del segnale ricevuto.

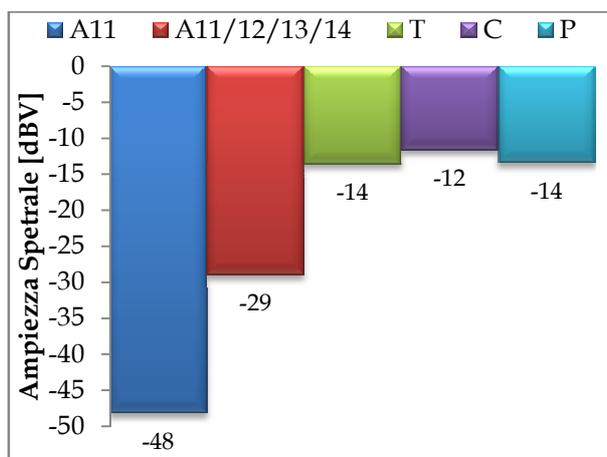


Grafico 49. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della STT della Serie A rinforzata con la rete in PBO.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato, rispetto al provino di riferimento A11, una considerevole variazione dell'Ampiezza Spettrale Media calcolata su tutti i travetti con le anomalie (A12/13/14/15).

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT

Nei Grafici 50 e 51 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di riferimento A11, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinati mediante la DTT e la STT di tutti i provini con difetti

(A12/13/14/15), del nastro in Teflon (T), dell'accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

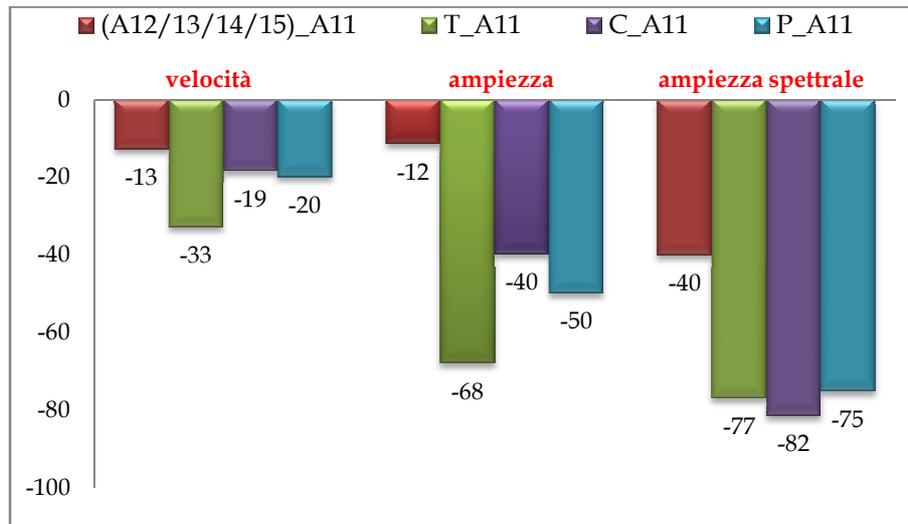


Grafico 50. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT della Serie A rinforzata con la rete in PBO.

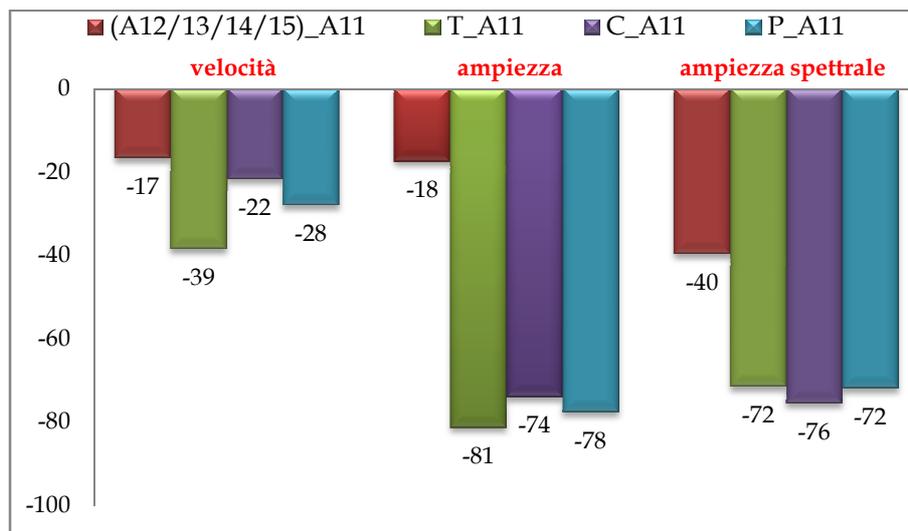


Grafico 51. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la STT della Serie A rinforzata con la rete in PBO.

Dai grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- I provini con i difetti presentano una variazione notevole dell'Ampiezza Spettrale e una variazione minima della Velocità e dell'Ampiezza del segnale ricevuto valutate tramite l'applicazione della DTT e della STT;
- Il nastro in Teflon, rispetto agli altri difetti, ha determinato la maggiore variazione della Velocità e dell'Ampiezza determinate mediante la DTT e la STT;
- L'accumulo di Colla, rispetto a T e P, ha determinato la minore variazione della Velocità e dell'Ampiezza valutate mediante la DTT e la STT e la maggiore variazione dell'Ampiezza Spettrale determinate nella DTT e nella STT;

- L'analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull'applicazione del sistema di rinforzo.

2.3.3.2 Travetti Serie B

Poiché i risultati ottenuti per i provini della Serie B, rinforzati con la rete in PBO, sono simili a quelli della Serie A si riportano in questa sezione le sole analisi relative alle variazioni percentuali determinate tramite la DTT e la STT. Nell'Appendice B sono comunque riportati tutti i risultati e le analisi relativi alle Velocità, alle Ampiezze e alle Ampiezze Spettrali rilevati mediante la DTT e la STT.

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e STT

Nei Grafici 52 e 53 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di riferimento B11 con perfetta adesione, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinate tramite la DTT e la STT di tutti i provini con i difetti (B12/13/14/15), del nastro in Teflon (T), dell'accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

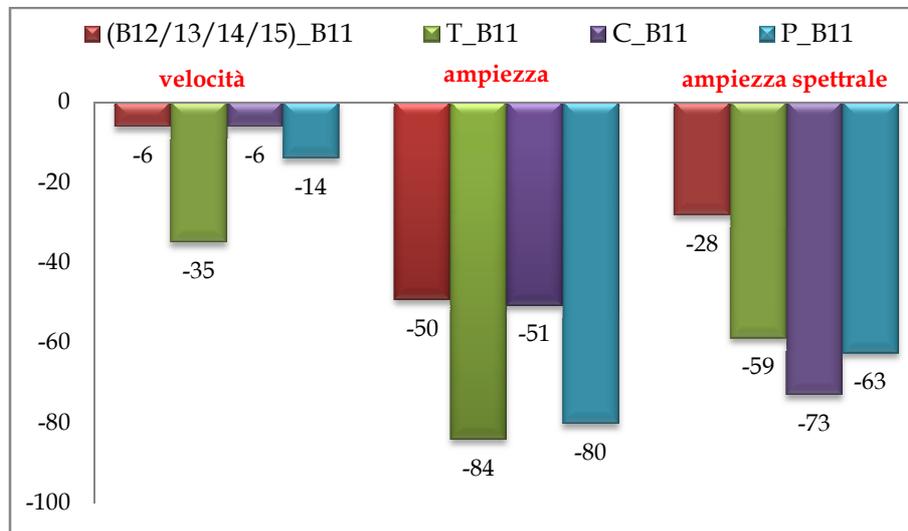


Grafico 52. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT della Serie B rinforzata con la rete in PBO.

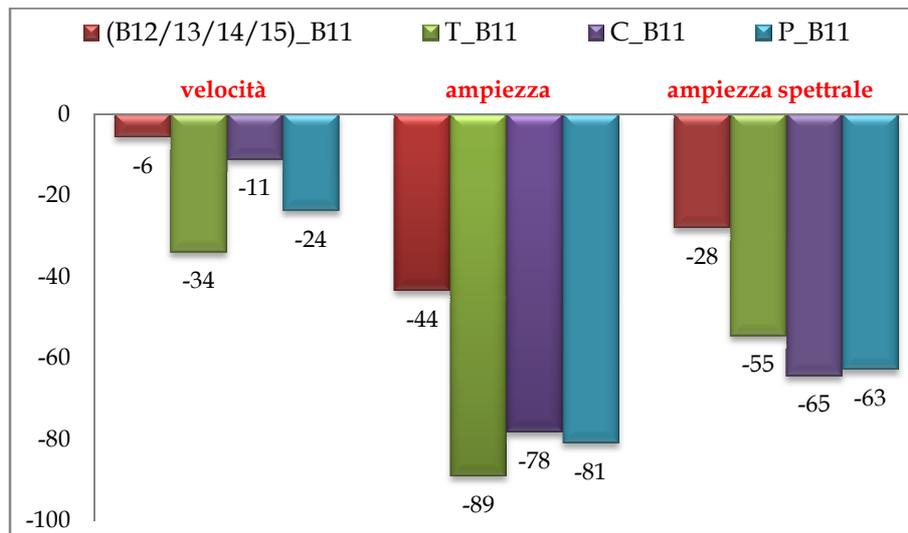


Grafico 53. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la STT della Serie B rinforzata con la rete in PBO.

Dai grafici sopra riportati è possibile notare che:

- I provini con i difetti presentano una notevole variazione dell’Ampiezza e dell’Ampiezza Spettrale e una variazione minima della Velocità determinate tramite l’applicazione della DTT e della STT;
- Il nastro in Teflon, rispetto ai difetti C e P, ha provocato la maggiore variazione della Velocità e dell’Ampiezza e la minore variazione dell’Ampiezza Spettrale valutate mediante la DTT e la STT;
- Il difetto realizzato con l’accumulo di colla ha determinato la minore variazione della Velocità e dell’Ampiezza determinate tramite la DTT e la STT e la maggiore variazione dell’Ampiezza Spettrale determinata tramite la DTT e la STT;
- L’analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull’applicazione del sistema di rinforzo.

2.3.3.3 Travetti Serie C

Poiché i risultati ottenuti per i provini della Serie C, rinforzati con la rete in PBO, sono simili a quelli delle Serie precedenti si riportano in questa sezione le sole analisi relative alle variazioni percentuali della DTT e della STT. Nell’Appendice B sono comunque riportati tutti i risultati e le analisi relative alle Velocità, alle Ampiezze e alle Ampiezze Spettrali determinate mediante l’applicazione della DTT e della STT.

Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale tramite l'applicazione della DTT e della STT

Nei Grafici 54 e 55 sono rappresentate le variazioni percentuali, valutate rispetto al travetto di riferimento C11 con perfetta aderenza, dei valori medi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali determinate mediante l'applicazione della DTT e della STT di tutti i provini con i difetti (C12/13/14/15), del nastro in Teflon (T), dell'accumulo di Colla (C) e dello spessore in Plastica (P).

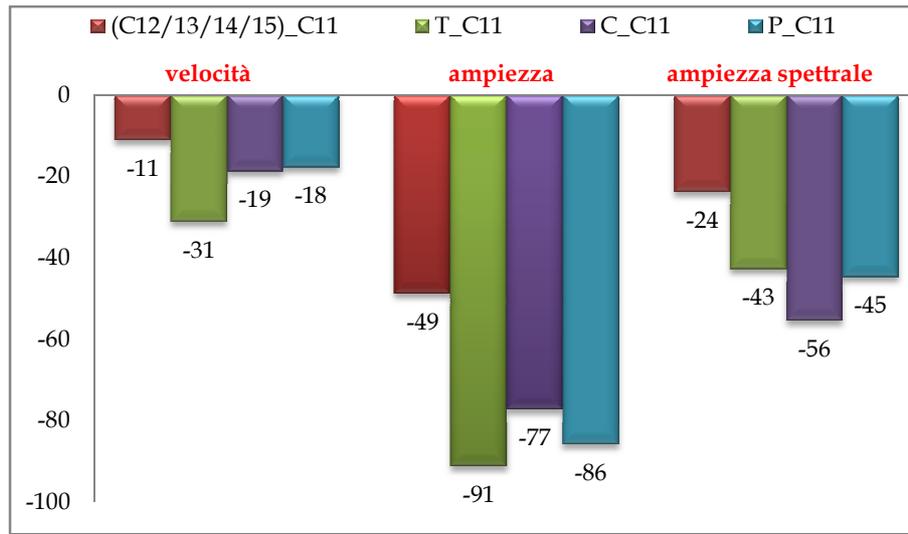


Grafico 54. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT della Serie C rinforzata con la rete in PBO.

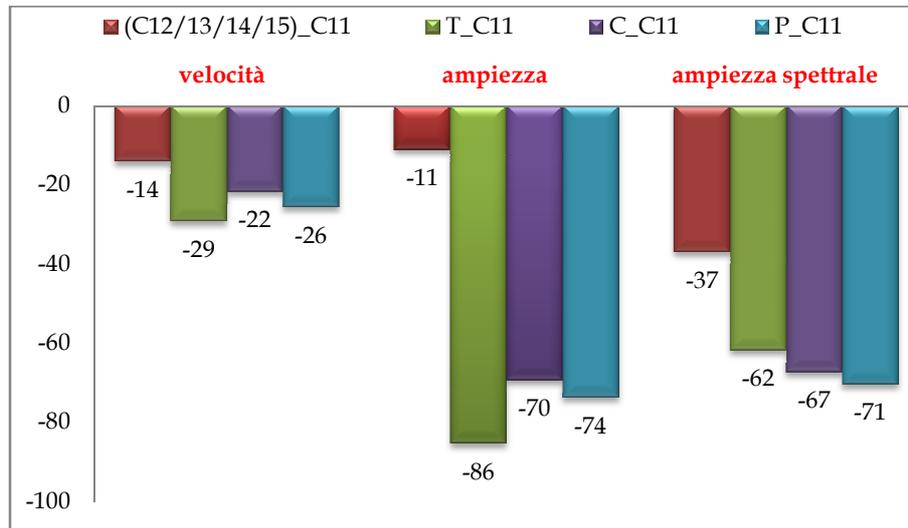


Grafico 55. Variazioni percentuali Velocità, Ampiezza e Ampiezza Spettrale determinate tramite la STT della Serie C rinforzata con la rete in PBO.

Dai grafici sopra riportati è possibile trarre le seguenti informazioni:

- I provini con i difetti presentano una variazione notevole dell'Ampiezza e dell'Ampiezza Spettrale determinate tramite la DTT e una variazione minima della Velocità rilevate mediante la DTT e la STT;

- Il nastro in Teflon, rispetto a C e P, ha determinato la maggiore variazione di Velocità e dell'Ampiezza e la minore variazione dell'Ampiezza Spettrale determinate tramite l'applicazione della DTT e della STT;
- L'analisi congiunta dei tre parametri consente di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione e fornisce un quadro dettagliato sull'applicazione del sistema di rinforzo.

2.4 Considerazioni

Le prove ultrasoniche sono state condotte mediante le Tecniche di Trasmissione Diretta e Semidiretta su un totale di 45 provini prima e dopo l'applicazione del sistema di rinforzo.

Le Velocità e le Deviazioni Standard determinate tramite la DTT dei provini non rinforzati hanno consentito di individuare la presenza delle anomalie poste all'interno del loro volume, mentre gli analoghi valori rilevati mediante la STT delle tre Serie, essendo simili fra di loro, non forniscono indicazioni utili.

L'analisi delle Velocità Medie determinate tramite l'applicazione della DTT e della STT sui provini delle tre Serie rinforzati con la rete e lamine in FRP e con rete in PBO non ha consentito di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. Le Ampiezze Medie determinate mediante la DTT e la STT hanno individuato tutti i difetti di adesione, ma i valori sono caratterizzati da elevate Deviazioni Standard, per cui questo parametro è significativo da un punto di vista qualitativo e non quantitativo. I valori medi determinati in corrispondenza dei difetti di adesione sono comunque nettamente inferiori rispetto a quelli relativi ai travetti di riferimento caratterizzati dalla perfetta aderenza fra il sistema di rinforzo e il calcestruzzo. Le Ampiezze Spettrali Medie, valutate impiegando la DTT e la STT, hanno individuato anch'esse la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sono caratterizzate da valori di Deviazione Standard nettamente inferiori rispetto all'Ampiezze Medie.

Le diverse tipologie di rinforzo, in generale, non hanno modificato i valori di Velocità e Ampiezza Spettrale, solamente nei provini rinforzati con la rete in FRP si è verificata un'anomalia dell'Ampiezza del segnale ricevuto.

L'analisi congiunta dei tre parametri legati al segnale trasmesso ha consentito di ottenere tutte le informazioni necessarie per la individuazione delle anomalie all'interno dei provini e nell'interfaccia tra il rinforzo e il calcestruzzo.

3 Prove Termografiche

3.1 Introduzione

La prima intuizione dell'esistenza delle radiazioni luminose fuori dallo spettro del visibile è conseguenza di un fatto accidentale: Sir William Herschel (1738-1822), valutando la qualità di diversi filtri per l'osservazione del Sole al telescopio, si accorse che alcuni di essi lasciavano passare una quantità di calore maggiore, al punto di rischiare di danneggiare l'occhio dell'osservatore. Per chiarire la ragione del fenomeno Herschel scompose attraverso un prisma la luce solare nelle sue componenti monocromatiche e, con un termometro a mercurio, valutò la quantità di calore che esse fornivano. Osservò che le componenti rosso-viola fornivano l'apporto maggiore di calore e si rese conto, inoltre, che posizionando il termometro nella zona scura oltre lo spettro, la temperatura continuava ad aumentare fino a raggiungere un massimo. Herschel arrivò quindi alla conclusione che, pur non essendo visibile, esisteva un'ulteriore spettro che chiamò "spettro termometrico".

Nel 1840 il figlio di William Herschel, John, realizzò la prima immagine termografica attraverso l'evaporazione differenziale di una patina disposta su un foglio per effetto della radiazione infrarossa focalizzata.

Nel 1880 Samuel Pierpont Langley inventò il bolometro, uno strumento impiegato per misurare la radiazione elettromagnetica totale, comprensiva di tutte le lunghezze d'onda. Il primo bolometro era costituito da una sottile striscia di platino verniciata di nero collegata su un braccio di un ponte di Wheatstone, che permetteva di misurare in modo preciso il valore di una resistenza elettrica. La radiazione infrarossa veniva focalizzata sulla striscia e un galvanometro collegato al ponte consentiva la misura della radiazione.

Il periodo compreso tra il 1900 ed il 1920 fu caratterizzato da un deciso incremento dell'interesse per gli infrarossi. In particolare, durante il primo conflitto mondiale si valutarono diverse applicazioni in ambito militare. I sistemi più sensibili, messi a punto in questo periodo, erano in grado di rivelare la presenza di un velivolo a 1.5 km di distanza e di una persona a 300 m.

Durante il secondo conflitto mondiale fu incoraggiato lo sviluppo di rivelatori ad infrarossi ultrasensibili che consentivano di visualizzare un bersaglio nella più completa oscurità. Tali tecnologie rimasero segrete fino al 1950. Dalla metà del 1950, eliminato il segreto militare, la tecnologia è diventata disponibile per scopi industriali e civili.

In campo industriale, la termografia ad infrarossi è impiegata per individuare i difetti di isolamento, le infiltrazioni di aria e di acqua, per rilevare i malfunzionamenti di motori, valvole, cuscinetti e cinghie. Nell'edilizia consente di mettere in evidenza le dispersioni energetiche, i distacchi di piastrelle o intonaco e le strutture nascoste. Può essere inoltre di aiuto nella sorveglianza, nella lotta contro gli incendi e nella localizzazione delle fughe di gas.

La Termografia ad Infrarossi (IRT) è una tecnica di indagine non distruttiva priva di contatto fisico con l'elemento ispezionato legata alla misura dell'energia elettromagnetica da esso irradiata nella zona infrarossa.

La radiazione elettromagnetica è un mezzo di trasmissione dell'energia sotto forma di onde aventi componenti elettrica e magnetica. La sequenza ordinata dei raggi secondo i valori di lunghezza d'onda e frequenza è chiamata "spettro elettromagnetico".

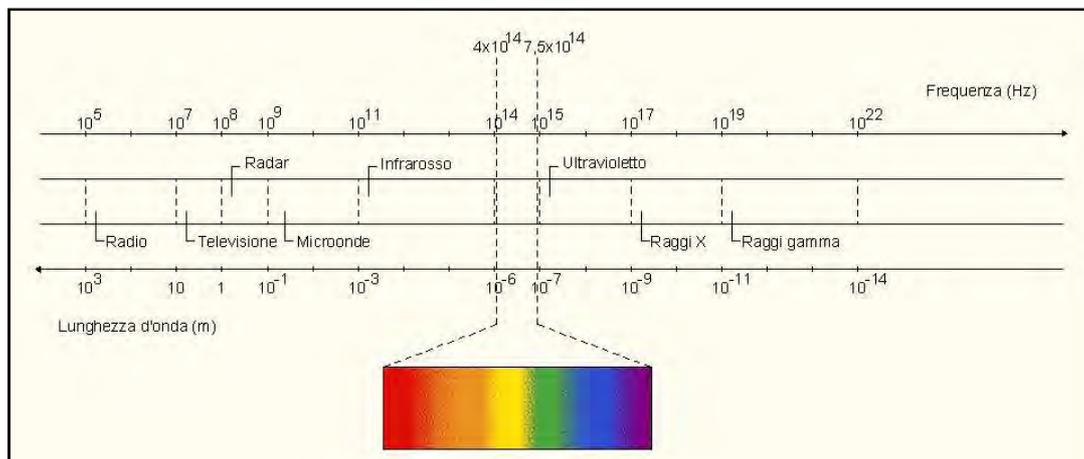


Figura 1. Spettro elettromagnetico.

Lo spettro è arbitrariamente suddiviso in intervalli in funzione dei valori assunti dai due parametri. La frequenza e la lunghezza d'onda sono quindi le sole grandezze che differiscono tra i vari tipi di radiazione. Le varie regioni dello spettro si raccordano tra loro con continuità ed è praticamente impossibile circoscrivere in modo assoluto i limiti di ciascuna porzione.

I nomi utilizzati per differenziare ciascun tipo di radiazione hanno origine storica e rappresentano i raggi di ogni banda per i quali esiste qualche caratteristica o tecnica di produzione o sistema di rilevazione che li accomuna.

La componente che prende il nome di radiazione infrarosso è la porzione dello spettro elettromagnetico compresa fra le microonde e la banda del rosso della luce visibile, caratterizzata da lunghezze d'onda variabili tra 0,75 μm e 100 μm . Tali lunghezze d'onda risultano troppo grandi per essere rilevate dall'occhio umano. I raggi infrarossi sono percepiti come calore in quanto sono originati dall'emissione di energia

che deriva dagli urti tra le molecole che compongono la materia conseguenti alla loro agitazione termica. Tutti i corpi aventi una temperatura superiore allo zero assoluto ($-273,16^{\circ}\text{C}$) emettono infrarossi che aumentano al crescere della temperatura del corpo a causa della maggior energia termica da esso irradiata. La banda dell'infrarosso può essere ulteriormente suddivisa in quattro sottoregioni: infrarosso vicino ($0,75\text{-}3\ \mu\text{m}$), infrarosso medio ($3\text{-}6\ \mu\text{m}$), infrarosso lontano ($6\text{-}15\ \mu\text{m}$) e infrarosso estremo ($15\text{-}100\ \mu\text{m}$). La porzione che interessa più strettamente la termografia è quella compresa tra 2 e $13\ \mu\text{m}$.

Per termografia si intende l'utilizzo di una telecamera ad infrarossi, o termocamera, per visualizzare e misurare, ad una certa distanza, l'energia termica irradiata da un oggetto partendo dal rilevamento dell'intensità della radiazione infrarossa emessa, al fine di conoscere la temperatura superficiale e la sua distribuzione sull'oggetto, tramite la formazione di un'immagine termica.

Le modalità di trasmissione del calore sono essenzialmente tre: conduzione, convezione ed irraggiamento.

La prima avviene nel caso di corpi messi direttamente a contatto, la seconda è tipica dei fluidi o dei gas in movimento, la terza avviene indipendentemente dalla presenza di un mezzo ed è una forma di trasmissione delle onde elettromagnetiche [Flir System, 2006].

I principi fisici alla base della teoria termografica e quindi del funzionamento della termocamera sono la radiazione del corpo nero e le leggi di Planck, Wien e Stefan-Boltzmann di seguito descritte.

Radiazione del corpo nero

Il corpo nero ideale ha un potere assorbente uguale a 1, cioè possiede la capacità di assorbire tutta l'energia raggiante che incide dall'esterno su di esso, senza rifletterne o trasmetterne alcuna parte. Per corpo nero si intende, quindi, un oggetto che possiede la capacità di assorbire tutte le radiazioni che lo colpiscono ad una lunghezza d'onda qualsiasi, ma che contemporaneamente, secondo la legge di Kirchhoff, è ugualmente in grado di emettere radiazioni. Infatti, se viene riscaldato ad una temperatura uniforme, genera la radiazione del corpo nero le cui caratteristiche dipendono unicamente dalla temperatura raggiunta. [Barducci, 1981]

La costruzione di corpi neri reali, rappresentati da un'apertura di una cavità isoterma realizzata con un materiale opaco assorbente, viene impiegata in laboratorio come sorgente di radiazione di riferimento alle diverse temperature per le calibrazioni e le tarature delle macchine termografiche.

La legge di Planck sull'irraggiamento

La legge di Planck definisce l'emittanza energetica spettrale (W) della radiazione emessa dal corpo nero ad ogni lunghezza d'onda (λ) e per una data temperatura (T), fornendo una descrizione della distribuzione spettrale dell'energia termica irradiata.

La rappresentazione grafica della legge a varie temperature mostra un insieme di curve caratterizzate da emittanza spettrale pari allo zero per lunghezze d'onda nulle, che però aumenta rapidamente fino a raggiungere il massimo, per poi tendere nuovamente allo zero per lunghezze d'onda elevate. Per temperature maggiori l'emittanza è più elevata e la lunghezza d'onda alla quale si raggiunge il massimo tende invece a diminuire [Fracastoro, 2000].

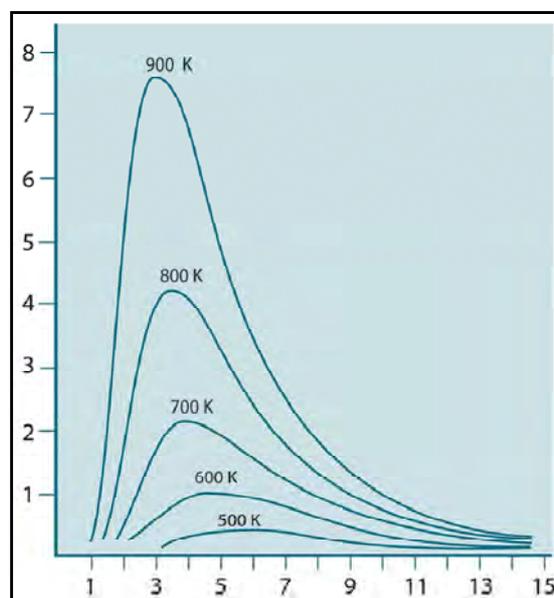


Figura 2. Rappresentazione grafica della legge di Planck: in ascissa: λ (Lunghezza d'onda); in ordinata: W (Emittanza spettrale).

La legge di Wien

La legge di Wien esprime il valore della lunghezza d'onda λ_{\max} della radiazione infrarossa in corrispondenza della quale si ha il picco di emittanza spettrale per una certa temperatura del corpo nero (T) [Barducci, 1981].

La legge di Stefan-Boltzmann

La legge di Stefan-Boltzmann è espressa dalla relazione:

$$W = \sigma \cdot T^4 \quad [W/m^2]$$

dove:

σ è la costante di Stefan - Boltzmann ed è pari a $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$;

W rappresenta il potere emissivo [Wm^{-2}];

T rappresenta la temperatura del corpo [K].

La relazione precedente si ottiene tramite l'integrazione della legge di Planck e fornisce una correlazione tra la quantità totale di energia emessa da un corpo nero (W) e la sua temperatura (T). Tuttavia i corpi reali non rispettano quasi mai le leggi sopra illustrate. Infatti, sulla loro superficie si possono verificare fenomeni di parziale assorbimento, riflessione e trasmissione della radiazione incidente che impediscono agli oggetti reali di comportarsi come un corpo nero ideale.

Per il principio di conservazione dell'energia, dalla somma dei coefficienti di assorbimento (α), riflessione (ρ) e trasmissione (τ), ciascuno dei quali è pari al rapporto tra il flusso energetico spettrale rispettivamente assorbito, riflesso o trasmesso dall'oggetto e quello incidente per qualsiasi lunghezza d'onda, si ottiene una relazione pari all'unità. Tale relazione corrisponde all'intera radiazione incidente [Felli, 2004]:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

I materiali abitualmente interessati dalla termografia sono opachi, e quindi non trasparenti all'infrarosso. Per cui, nella precedente uguaglianza può essere trascurato il coefficiente di trasmissione, che risulta in questi casi pari a zero, e la relazione diventa:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1.$$

Nessuna superficie reale emette, a parità di temperatura, la stessa quantità di un corpo nero. Viene quindi definito un ulteriore fattore, chiamato "emissività" (ϵ), dato dal rapporto tra l'emittanza o il flusso energetico spettrale emesso dall'oggetto e quello emesso dal corpo nero alla stessa temperatura e lunghezza d'onda. Un corpo di questo tipo viene detto "corpo grigio".

Per il principio di Kirchhoff, l'emissività è uguale al coefficiente di assorbimento ad ogni specifica temperatura e lunghezza d'onda, per cui per sostituzione nella formula precedente si ottiene che la somma dell'emissività e del coefficiente di riflessione è pari all'unità:

$$\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

Quindi, un corpo, che riflette molto emette poco e viceversa. Si può inoltre aggiungere che per i materiali particolarmente riflettenti entra in gioco solo il coefficiente di riflessione che risulterà quindi pari all'unità.

Per ottenere una relazione che rappresenti correttamente la radiazione di un corpo reale è necessario modificare le formule relative ad un corpo ideale inserendo un coefficiente che tenga conto dei fattori considerati, per poter dimostrare che il potere emissivo del corpo reale è identico a quello di un corpo nero alla stessa temperatura, ridotta in proporzione con il valore del fattore di emissività secondo la formula di Stefan-Boltzmann adattata:

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [W/m^2]$$

In questo modo, poiché l'emissività consente di descrivere la frazione dell'emittanza radiante del corpo nero prodotta da un oggetto con la stessa temperatura, la conoscenza del valore di ε del corpo grigio in esame consente di determinarne la temperatura a partire dalla radiazione termica emessa.

3.2 Tecnica di analisi termografica

La termografia è divenuta un tipo di ispezione fondamentale in tutti i campi dove non sia possibile effettuare misure di temperatura per contatto. Viene classificata in due tipologie di indagine a seconda degli obiettivi che si intende perseguire:

- termografia passiva;
- termografia attiva.

La termografia passiva consiste nell'analizzare l'elemento soggetto ad indagine nella sua condizione stazionaria di esercizio, senza influenzarne il regime termico. È necessario che per l'esecuzione dell'indagine non vi siano porzioni dell'elemento irraggiate dal sole o da sistemi di illuminazione artificiale, perché tali zone fornirebbero risultati poco significativi. Le principali applicazioni nel campo edile sono collegabili all'individuazione della presenza di ponti termici ed infiltrazioni d'acqua all'interno delle murature.

La termografia attiva consiste nel sollecitare termicamente l'elemento soggetto ad indagine modificandone le condizioni stazionarie. La differenza tra i valori della conducibilità termica e del calore specifico delle diverse parti dell'elemento indagato portano le stesse ad assumere differenti temperature sotto sollecitazione termica [Siviero et al., 1995]. Questa tecnica consente di individuare elementi situati sotto il rivestimento esterno, nonché la verifica dello stato di aderenza e la conservazione del rivestimento stesso.

La termografia di tipo attivo è applicabile secondo diverse tecniche in funzione delle differenti modalità di riscaldamento della superficie:

- termografia Pulsata (PT);
- termografia Lock-in (LT);
- termografia Ultrasound Lock-in (ULT).

La termografia Pulsata consiste nel riscaldare il provino per un intervallo di tempo molto breve e registrare la curva di decadimento della temperatura. Il riscaldamento avviene tramite un impulso che può essere implementato per mezzo di una o più lampade, flash, raggi laser, getti d'aria o d'acqua. La temperatura superficiale, in

seguito all'impulso, cambia rapidamente, poiché il calore si propaga per irraggiamento, per convezione e, sotto la superficie, per diffusione. La presenza di un'anomalia altera la diffusione con conseguente variazione di temperatura nella zona del difetto rispetto a quelle circostanti. Questa tecnica è utilizzata per i materiali che hanno un'alta conducibilità termica, la cui superficie può essere riscaldata con un impulso molto breve. Il suo maggior vantaggio è dato dalla rapidità di esecuzione [Maldague, 2001/2002].

Nella termografia Lock-in il riscaldamento della superficie avviene modulando sinusoidalmente una fonte di calore, ad esempio una lampada, che produce un'onda termica che si propaga nel corpo indagato. L'onda viene riflessa quando incontra delle discontinuità, creando un'interferenza con l'onda termica esercitata sul corpo. In questo caso, agendo sulla modulazione della fonte di calore, è possibile determinare la profondità di eventuali difetti.

Nella termografia Ultrasound Lock-in viene sfruttato uno stimolo termico generato da una sorgente ad ultrasuoni che emette onde ad alta energia.

Esistono anche altri metodi termografici che si basano sulla combinazione di due tecniche o sull'osservazione della curva di riscaldamento o di raffreddamento dell'oggetto.

La scelta della tecnica impiegata nelle indagini di tipo termografico è essenzialmente funzione del problema che si deve affrontare. Per effettuare una corretta indagine è necessario conoscere:

- le caratteristiche dell'attrezzatura termografica;
- le caratteristiche dell'elemento indagato o degli strati che lo compongono;
- le proprietà radiative dei materiali coinvolti nell'indagine;
- i fattori climatici;
- l'accessibilità per le ispezioni;
- l'influenza dell'ambiente sull'elemento sotto indagine;
- la presenza di altri fattori che possono condizionare le prove.

3.3 Termocamera

Il funzionamento della termocamera si basa sulla rilevazione senza contatto dell'energia termica emessa dagli elementi ispezionati con dei detector aventi proprietà piroelettriche. Questa energia viene convertita in un segnale elettronico che viene in seguito elaborato da software specifici al fine di produrre immagini digitali e realizzare calcoli analitici della temperatura attraverso il computer. La visualizzazione delle

immagini ad infrarosso, immagini termiche o radiazioni di calore, viene effettuata utilizzando diverse colorazioni in scala per mettere in evidenza i punti caldi, quelli freddi e le differenze di calore esistenti tra le varie parti della superficie esaminata. Si ottiene, in questo modo, una rappresentazione del gradiente termico tra zone diverse del corpo e un modello della distribuzione termica.

La radiazione infrarossa, può essere emessa, assorbita, riflessa e trasmessa. La termocamera non rileva solamente la radiazione causata dalla temperatura dell'oggetto, ma anche quella che si origina nelle zone circostanti e viene riflessa dall'oggetto stesso. Entrambe queste radiazioni variano in base all'assorbimento atmosferico, e il valore della misurazione può essere fortemente influenzato dalla temperatura ambientale.

Per una rilevazione precisa della temperatura superficiale dell'oggetto è quindi opportuno considerare tali fenomeni inserendo dei parametri opportuni che permettano di tenere conto delle caratteristiche dei vari elementi indagati e delle situazioni ambientali in cui si opera, in modo da correggere i fattori di disturbo della misurazione sopra menzionati. Tali parametri sono: l'emissività dell'oggetto, la temperatura riflessa, la temperatura atmosferica, la distanza tra oggetto e termocamera e l'umidità relativa.

Emissività

L'emissività si riferisce alla quantità di energia termica irradiata dall'oggetto, e poiché è espressa dal rapporto tra la radiazione emessa dal corpo in questione ad una data temperatura e quella emessa dal corpo nero alla stessa temperatura, risulta compresa nell'intervallo variabile tra lo zero e l'unità. Un corpo con emissività prossima al valore nullo riflette tutta l'energia proveniente dall'ambiente, mentre se tale valore è prossimo all'unità, come per i materiali compositi, l'oggetto ha un comportamento simile a quello del corpo nero tendendo ad assorbire tutta l'energia incidente su di esso senza alcuna riflessione. Per valori compresi nell'intervallo 0 - 1 ci si trova nella situazione del corpo grigio dove parte della radiazione incidente viene assorbita e parte riflessa.

Il coefficiente di emissività dipende dal materiale, dallo stato della superficie, dalla temperatura e dalla lunghezza d'onda ed è solitamente riportato in tabelle per i vari materiali in diverse condizioni. Questi valori sono indicati nei manuali corredati alla strumentazione, ma con lo scopo di ottenere migliori risultati spesso i rilevatori termografici prevedono un sistema di correzione che tenga conto del reale coefficiente di emissività che può essere misurato direttamente sul corpo in esame, ad esempio

impiegando la termometria di contatto oppure utilizzando una termocoppia o dei materiali di riferimento con valori di emissività noti.

Temperatura ambientale riflessa

La temperatura ambientale riflessa consente di bilanciare la radiazione riflessa dall'elemento indagato e quella emessa dall'atmosfera tra la termocamera e l'elemento stesso. E' di fondamentale importanza l'impostazione di tale valore quando l'emissività è bassa, la distanza molto elevata e la temperatura dell'elemento sottoposto ad indagine simile a quella dell'ambiente.

Distanza

Inserire il valore della distanza è utile per bilanciare l'assorbimento della radiazione tra l'oggetto sottoposto ad indagine e la termocamera dovuto alla "trasmittanza", che diminuisce all'aumentare della distanza. Operando una rilevazione non a contatto, si deve tener conto della presenza di un mezzo tra la sorgente e il rilevatore, rappresentato in generale dall'atmosfera terrestre, i cui gas hanno anch'essi proprietà termiche che vanno considerate in modo da evitare eccessive attenuazioni della radiazione emessa dall'elemento indagato.

Umidità relativa

L'umidità relativa viene impostata per ovviare al fatto che la trasmittanza dipende in certa misura anche da questo parametro. Tuttavia, per brevi distanze e valori di umidità normali si può utilizzare un valore standard pari al 50%.

3.3.1 Attrezzatura impiegata

La termocamera ad infrarossi utilizzata durante le prove oggetto della presente tesi è il modello ThermaCAM S65 della FLIR. Un sensore microbolometrico ha consentito di ottenere immagini con una risoluzione di 320 x 240 pixel con più di 76000 punti di misurazione per immagine e una frequenza di 50 Hz. La termocamera consente la visualizzazione delle immagini attraverso un visore monoculare e su un display LCD.



Figura 3. Immagini del modello di termocamera impiegata durante la sperimentazione.

3.4 Procedure di analisi

La tecnica termografica utilizzata nel corso della sperimentazione è di tipo attivo che prevede una sollecitazione termica dei provini sottoposti ad indagine ed una contemporanea registrazione termografica, ad intervalli di tempo prestabiliti, della evoluzione della loro temperatura superficiale. Le indagini sono state condotte secondo due modalità operative. In una prima fase, che ha interessato solamente i provini rinforzati con la rete e le lamine in fibra di carbonio, è stato impiegato, come sorgente termica un forno elettrico. Durante la seconda fase, che ha interessato anche i provini rinforzati con la rete in fibra di PBO, la sorgente termica utilizzata è rappresentata da un faretto alogeno con una potenza pari a 400 W.

3.4.1 Prove Termografiche con sorgente termica forno

I provini interessati dalle prove sono quelli rinforzati con la rete e le lamine in fibra di carbonio. I travetti, tre per ogni Serie, (uno con difetti di adesione, uno con perfetta aderenza e uno non rinforzato) sono stati posizionati nel forno e poi riscaldati ad una temperatura pari a 45°C per circa un'ora. È stata quindi monitorata la fase di raffreddamento, registrando un termogramma al minuto per circa 45 minuti. Nella scelta della temperatura del forno si è prestata particolare attenzione a non raggiungere la Temperatura di Transizione della resina epossidica impiegata per la posa in opera dei rinforzi in FRP. Tale parametro è di fondamentale importanza, in quanto rappresenta il limite raggiunto il quale le resine epossidiche, impiegate per garantire l'adesione tra il rinforzo e il calcestruzzo, cambiano di stato e le loro caratteristiche meccaniche diminuiscono drasticamente con una conseguente perdita di efficacia dell'intero intervento di rinforzo [CNR-DT 200/2004].

Dopo aver analizzato tutti i termogrammi è stato inoltre deciso di effettuare una elaborazione in ambiente Matlab® realizzando una sottrazione di immagini, pixel per

pixel, della temperatura fra il termogramma determinato in corrispondenza del tempo di fine acquisizione e quello relativo al tempo iniziale di apertura del forno. Tale operazione è di fondamentale importanza in quanto consente di mettere meglio in evidenza la presenza di difetti e di anomalie termiche non immediatamente visibili, e contemporaneamente di ridurre gli errori di interpretazione dei termogrammi stessi.

3.4.1.1 Provini rinforzati con la rete in fibra di carbonio

La termocamera è stata posta ad una distanza di circa 3 metri dai travetti. Nelle figure seguenti sono mostrate alcune immagini relative alle prove condotte sui provini rinforzati con la rete in fibra di carbonio.



Figura 4. *Provini Serie A nel forno. Dall'alto verso il basso: A1_perfetta aderenza rete/calcestruzzo; A3_difetti; provino non rinforzato.*

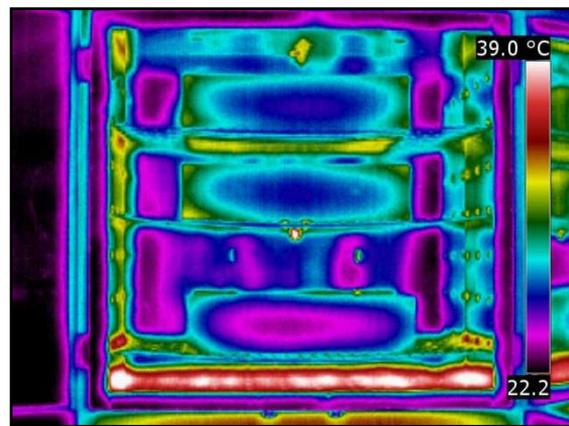


Figura 5. *Termogramma relativo al tempo t=0 minuti: apertura forno.*

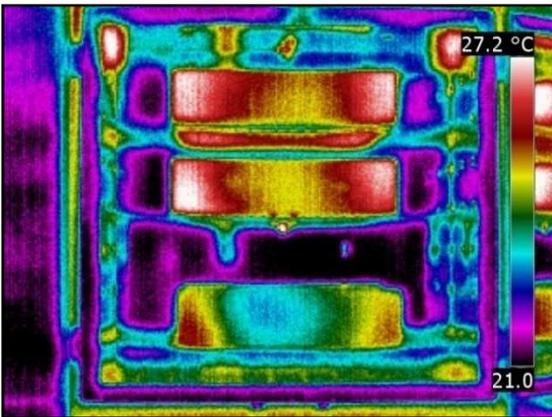


Figura 6. *Termogramma relativo al tempo t=20 minuti.*

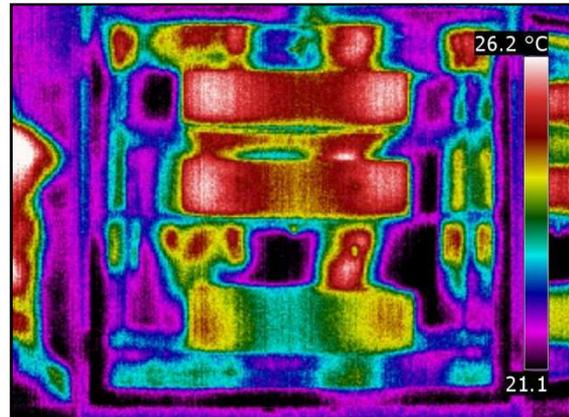


Figura 7. *Termogramma relativo al tempo t=45 minuti.*

Come si può notare dai termogrammi riportati nelle Figure 5, 6 e 7, i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon e lo spessore in Plastica presenti nel travetto centrale sono leggermente evidenti. Nell'immagine seguente è mostrata l'elaborazione relativa alla sottrazione tra il termogramma al tempo finale $t = 45$ minuti e il tempo iniziale $t = 0$ minuti.

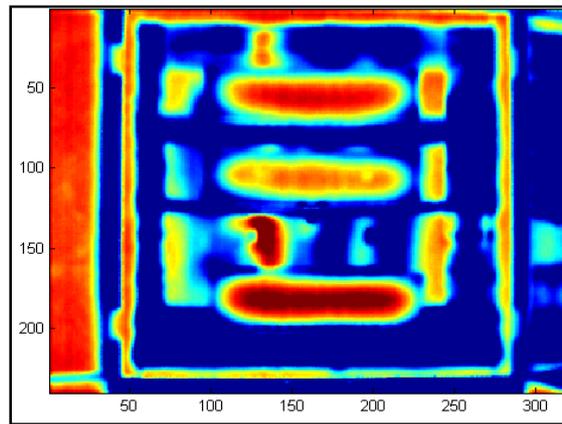


Figura 8. Elaborazione Matlab®: sottrazione termogrammi.

Come messo in evidenza dalla Figura 8, nel provino centrale sono presenti due zone, corrispondenti ai difetti realizzati con il nastro in Teflon e lo spessore in Plastica, caratterizzate da una distribuzione termica anomala.

Questa tipologia di indagine termografica è stata condotta su altri provini rinforzati con la rete in fibra di carbonio. Non tutte, però, hanno fornito risultati interessanti, in quanto non sempre è stato possibile mettere in evidenza i difetti di adesione.

3.4.1.2 Provini rinforzati con la lamina in fibra di carbonio

Le prove sono state condotte con le medesime condizioni operative descritte in precedenza. Nelle figure seguenti sono mostrate alcune immagini relative alle prove condotte sui provini rinforzati con le lamine in fibra di carbonio.



Figura9. Provini Serie B nel forno. Dall'alto verso il basso: C2_perfetta aderenza, C4_difetti, C10 non rinforzato.

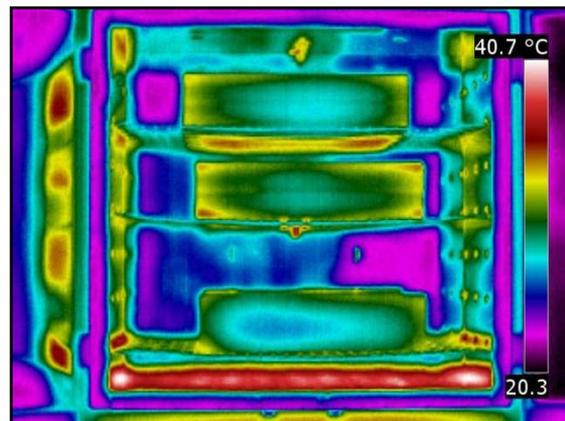


Figura 10. Termogramma relativo al tempo $t=0$ minuti: apertura forno.

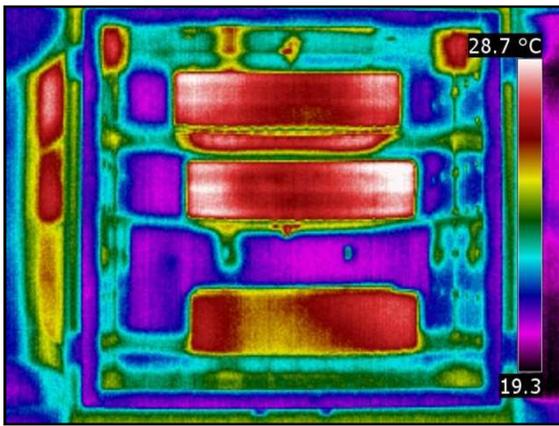


Figura 11. Termogramma relativo al tempo $t=20$ minuti.

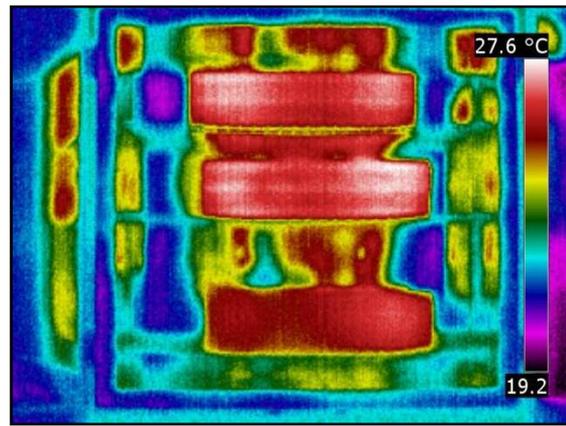


Figura 12. Termogramma relativo al tempo $t=45$ minuti.

Come si può notare dai termogrammi riportati nelle Figure 10, 11 e 12, i difetti di adesione, presenti nel travetto centrale, non sono evidenti. Nell'immagine seguente è mostrata l'elaborazione relativa alla sottrazione tra il termogramma al tempo finale $t = 45$ minuti e il tempo iniziale $t = 0$ minuti.

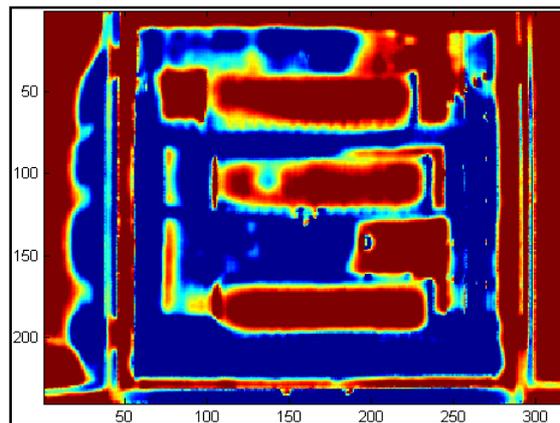


Figura 13. Elaborazione Matlab®: sottrazione termogrammi.

Come messo in evidenza dalla Figura 13, nel provino centrale è presente una zona, corrispondente al difetto realizzato con il nastro in Teflon, caratterizzata da una distribuzione termica anomala.

3.4.2 Prove Termografiche con sorgente termica faro alogeno

Dati i risultati poco significativi ottenuti impiegando il forno come sorgente termica, è stato deciso di modificare la stessa impiegando un faretto alogeno con potenza pari a 400 W.

Durante questa fase di prove termografiche sono stati analizzati, per ogni tipologia di rinforzo e per ogni Serie di travetti, due provini contemporaneamente: uno con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e uno con difetti. Le prove sono state condotte ponendo il faretto e la termocamera a due distanze differenti dai travetti:

- Distanza L: è stata eseguita ponendo la termocamera e il faretto ad una distanza dai travetti rispettivamente pari a 2.15 m e 2.10 m;
- Distanza S: è stata eseguita ponendo la termocamera e il faretto ad una distanza dai provini rispettivamente pari a 1.55 m e 1.10 m.

Nelle immagini seguenti è mostrato il posizionamento dell'attrezzatura di prova nelle due modalità operative.

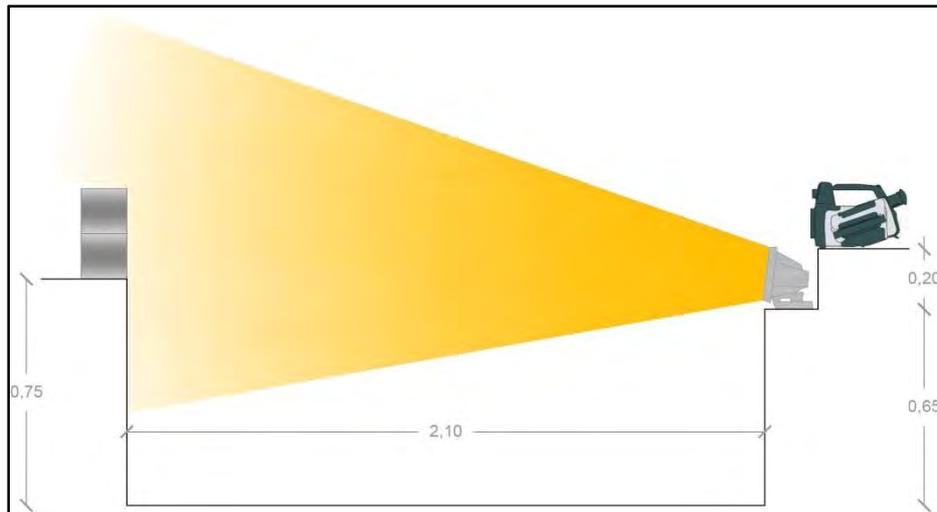


Figura 14. Posizionamento attrezzatura di prova nella distanza L.

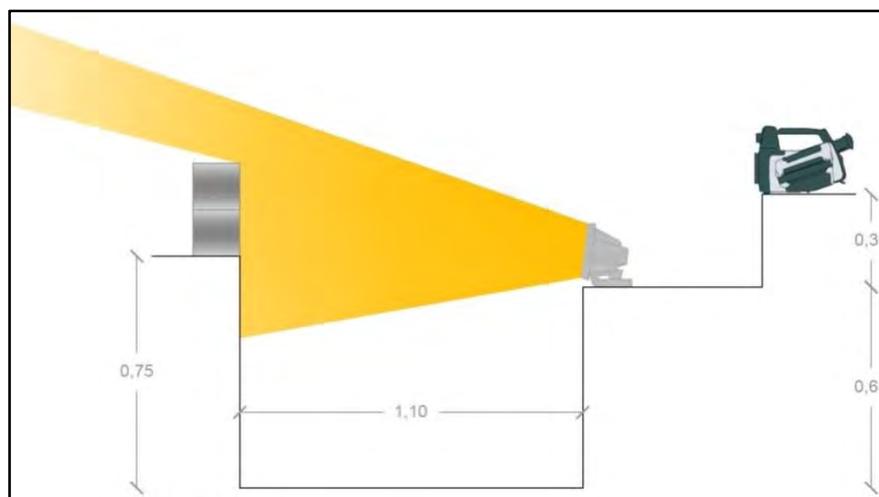


Figura 15. Posizionamento attrezzatura di prova nella distanza S.

Le prove sono state condotte secondo due fasi di riscaldamento e raffreddamento dei provini, durante le quali sono stati registrati i relativi termogrammi. L'intervallo di tempo di memorizzazione dei termogrammi è stato determinato in seguito a studi e tentativi effettuati per ogni singolo materiale di rinforzo. In funzione delle proprietà e degli spessori dei tre rinforzi si è rilevata la necessità di attendere diversi intervalli di tempo affinché l'energia assorbita dal provino per irraggiamento e convezione avesse modo di raggiungere per diffusione l'interfaccia di collegamento rinforzo-calcestruzzo e quindi si potessero rilevare le variazioni di temperatura in corrispondenza delle

anomalie di adesione. Inoltre, nella scelta del tempo di sollecitazione termica dei provini si è prestata particolare attenzione a non raggiungere la Temperatura di Transizione della resina epossidica.

Anche in questa modalità operativa, al fine di mettere meglio in evidenza la presenza di difetti e di punti caratterizzati da anomalie termiche non immediatamente visibili e per ridurre gli errori di interpretazione dei termogrammi, è stata eseguita l'elaborazione con Matlab® di sottrazione delle immagini della temperatura fra i due istanti iniziale e finale.

3.4.2.1 Provini rinforzati con la rete in fibra di carbonio

Per i provini rinforzati con rete in fibra di carbonio la fase di riscaldamento è durata 2 minuti durante i quali sono stati scattati 4 termogrammi a distanza di 30 secondi l'uno dall'altro. La fase di raffreddamento è durata invece 30 secondi durante i quali sono stati scattati 2 termogrammi a distanza di 15 secondi l'uno dall'altro.

Verranno di seguito presentati alcuni termogrammi relativi ai provini di ciascuna Serie.

Provini della Serie A

Nella immagine seguente (Fig. 16) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, A1 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e A3 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.



Figura 16. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: A3 con difetti di adesione, nella parte inferiore: A1 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

Nelle immagini seguenti (Figg. 17 e 18) è mostrato il termogramma relativo all'istante finale dei provini A1_A3 determinato nella distanza S.

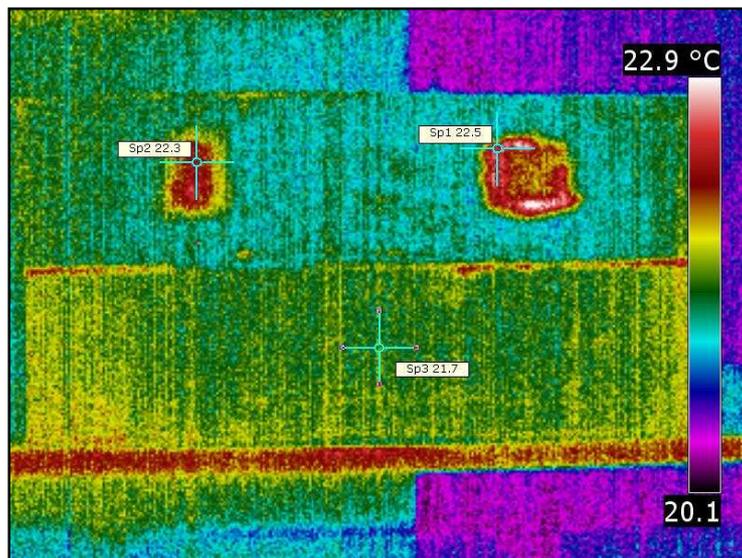


Figura 17. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 2$ minuti.

Come mostrato nell'immagine precedente (Fig. 17), i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino A3. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 22.3°C e 22.5°C , con un incremento pari a circa 1°C , rispetto alle zone di perfetta aderenza. Tali valori sono nettamente inferiori alla Temperatura di Transizione della resina epossidica. Nella Figura 18 è mostrata l'elaborazione con Matlab® relativa alla sottrazione di immagini fra il tempo finale $t = 2$ minuti relativo allo spegnimento del faretto e quello iniziale $t = 0$ minuti relativo alla sua accensione.

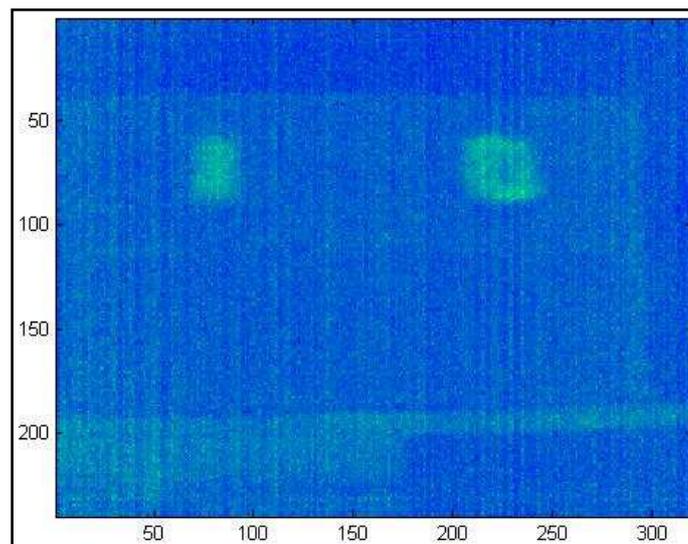


Figura 18. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può vedere, solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. L'elaborazione con Matlab®, pur avendo messo in evidenza i due difetti non li ha

evidenziati in maniera notevole. Questo è dovuto al breve riscaldamento dei provini con una variazione minima della temperatura superficiale.

In tutti i travetti della Serie A rinforzati con la rete in fibra di carbonio sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 1 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione Teflon e Plastica.

Tabella 1. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
A1_A3	22.3	22.5
A1_A5	22.3	22.5
A1_A7	21.7	22.1
A1_A9	22.1	22.4

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di impregnazione della rete realizzata con il nastro in Teflon è l'anomalia di adesione che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 19) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini A1_A3 della distanza S.

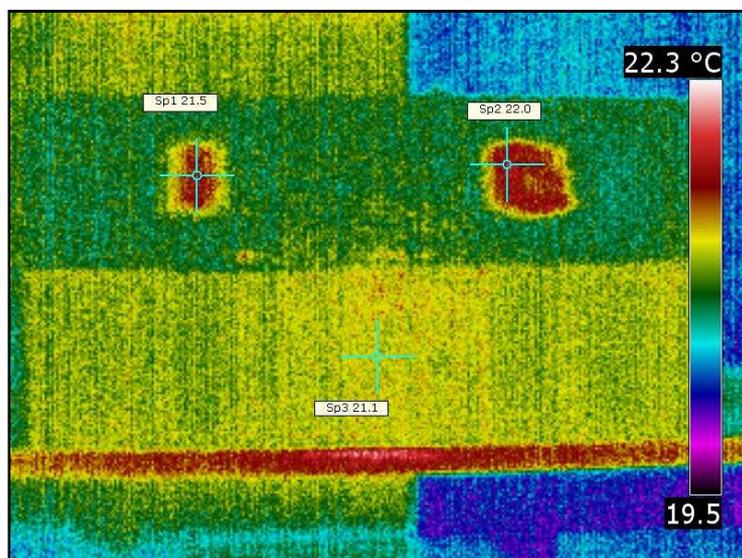


Figura 19. Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 15$ secondi.

Trascorsi 15 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Distanza L: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 20) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini A1_A3 determinato nella distanza L.

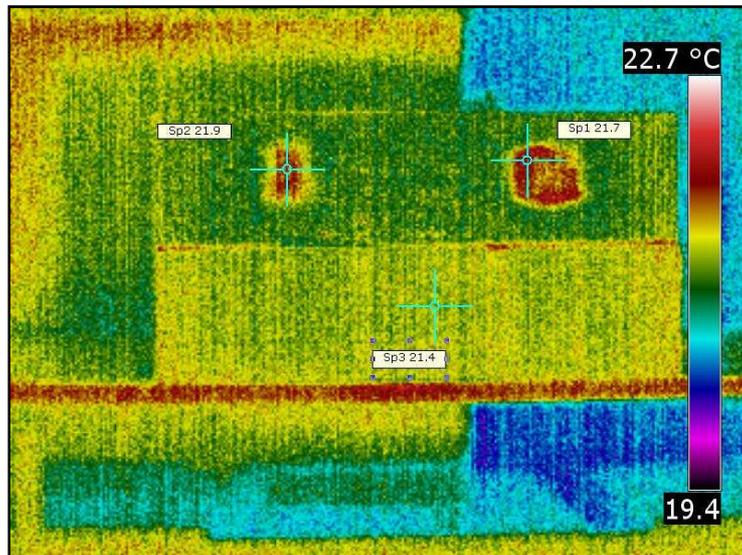


Figura 20. Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 2$ minuti.

Come mostrato nella Figura 20, i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale in corrispondenza del provino superiore (A3). La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 21.9°C e 21.7°C, con un incremento pari a circa 0.5°C rispetto alle zone con perfetta aderenza rete/calcestruzzo.

Distanza L: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 21) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini A1_A3 della distanza L.

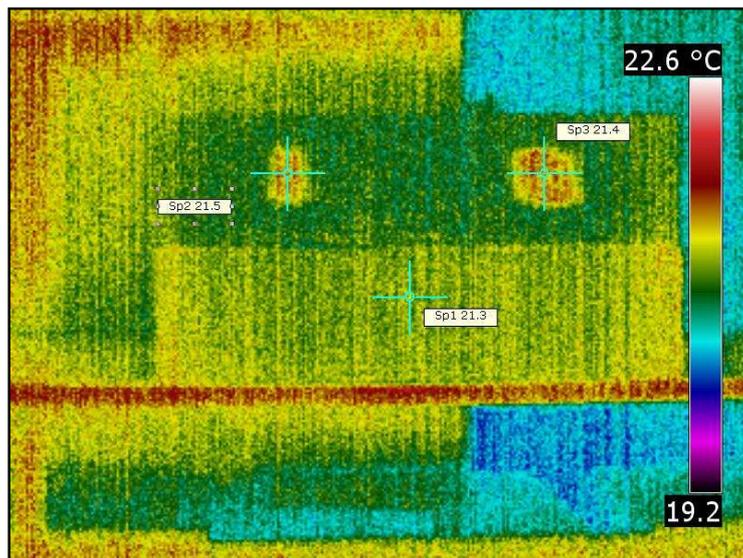


Figura 21. Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 15$ secondi.

Trascorsi 15 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Provini della Serie B

Nella immagine seguente (Fig. 22) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, B1 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e B3 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.



Figura 22. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: B3 con difetti di adesione, nella parte inferiore: B1 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 23) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini B1_B3 determinato nella distanza S.

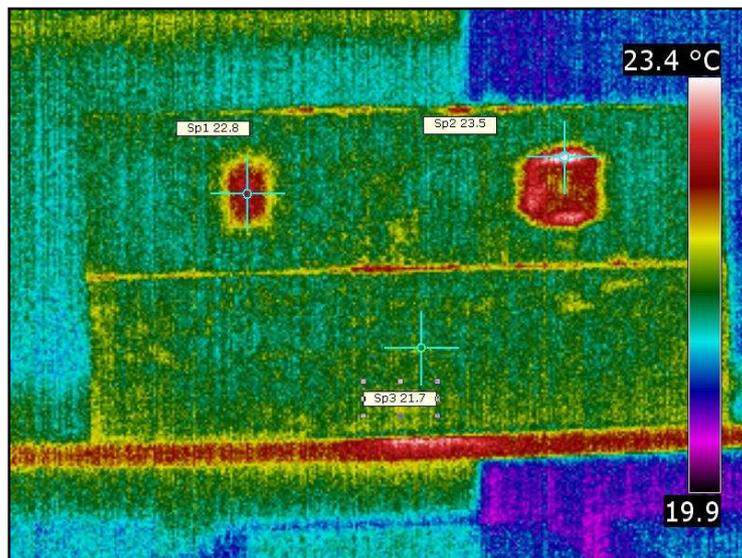


Figura 23. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 2$ minuti.

Come mostrato nella Figura 23, i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino B3. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 22.8°C e 23.5°C , con un incremento pari a circa 2°C , rispetto alle zone caratterizzate da perfetta aderenza rete/calcestruzzo. Tali valori sono nettamente inferiori alla Temperatura di Transizione della resina epossidica utilizzata come matrice fra la rete in fibra di carbonio e il calcestruzzo.

Nell'immagine seguente (Fig. 24) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 2$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

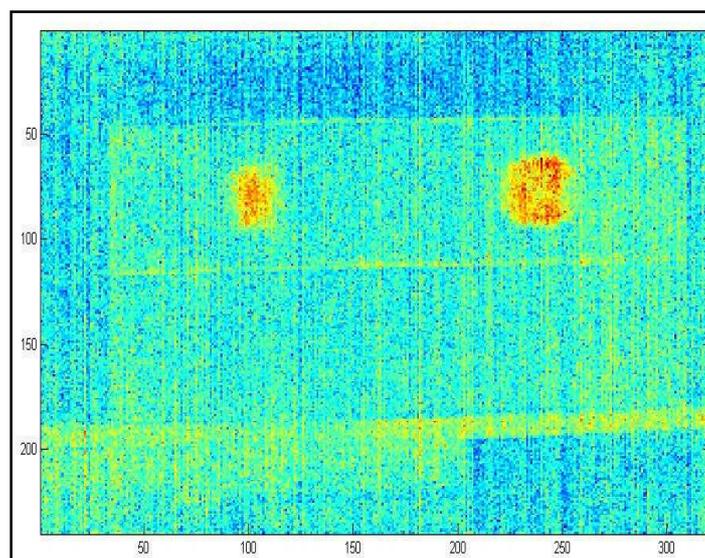


Figura 24. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può vedere, solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili.

In tutti i travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di carbonio, sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 2 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione T e P.

Tabella 2. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
B1_B3	22.8	23.5
B1_B5	22.9	23.3
B1_B7	22.3	22.7
B1_B9	22.9	23.2

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di impregnazione della rete realizzata con il nastro in Teflon è l'anomalia di adesione che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 25) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini B1_B3 della distanza S.

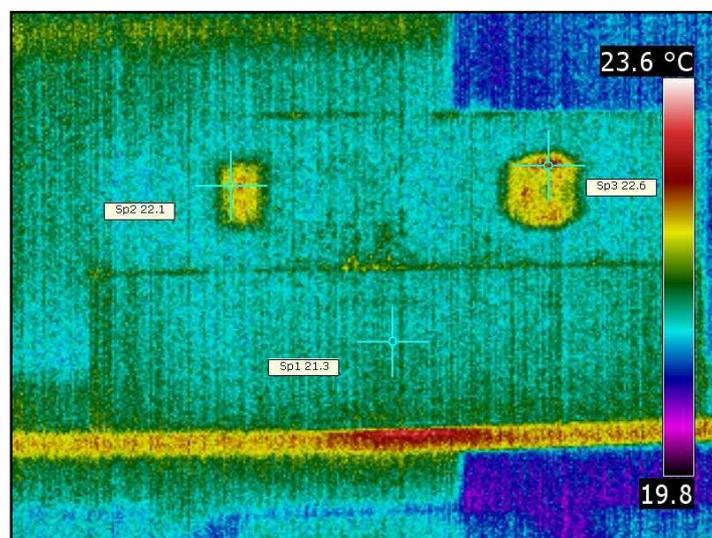


Figura 25. Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 15$ secondi.

Trascorsi 15 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Distanza L: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 26) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini B1_B3 determinato nella distanza L.

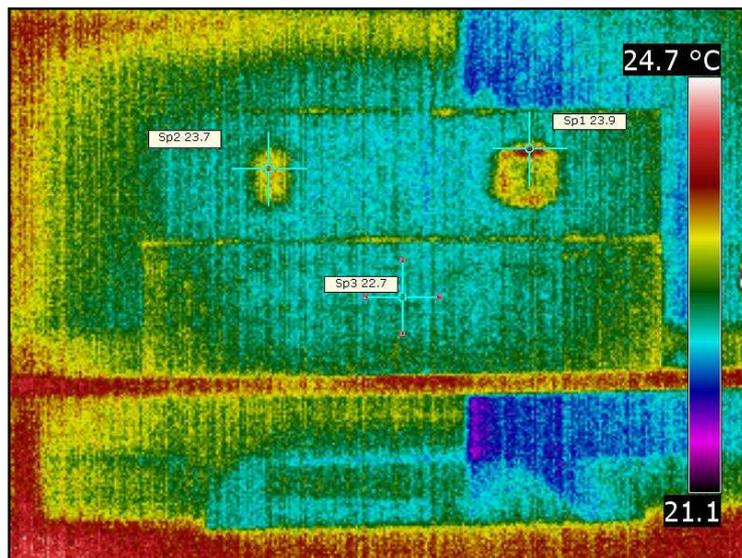


Figura 26. Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 2$ minuti.

Come mostrato nella Figura 26, i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale in corrispondenza del provino superiore (B3). La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 23.7°C e 23.9°C, con un incremento pari a circa 1°C rispetto alle zone caratterizzate dalla perfetta aderenza.

Distanza L: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 27) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini B1_B3 della distanza L.

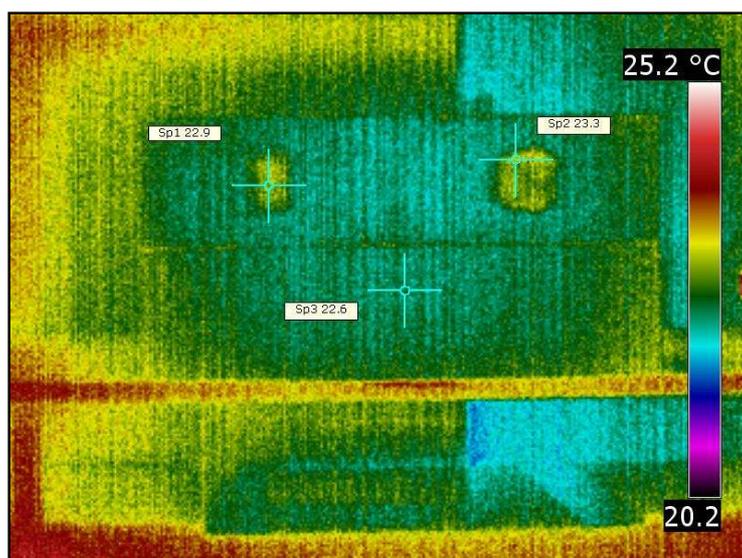


Figura 27. Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 15$ secondi.

Trascorsi 15 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Provini della Serie C

Nella immagine seguente (Fig 28) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, C1 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e C3 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.

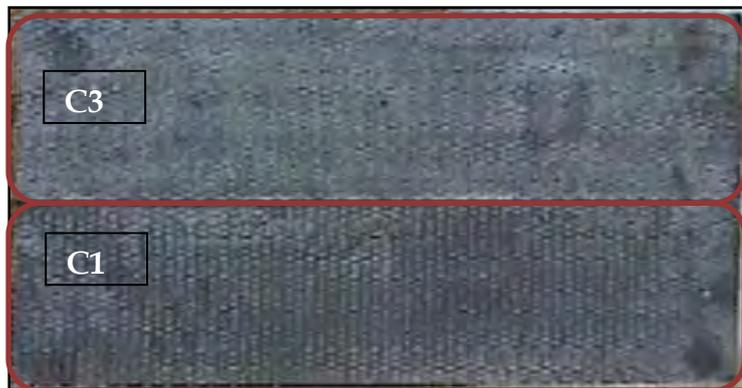


Figura 28. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: C3 con difetti di adesione, nella parte inferiore: C1 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

Nella Figura 29 è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini C1_C3 determinato nella distanza S.

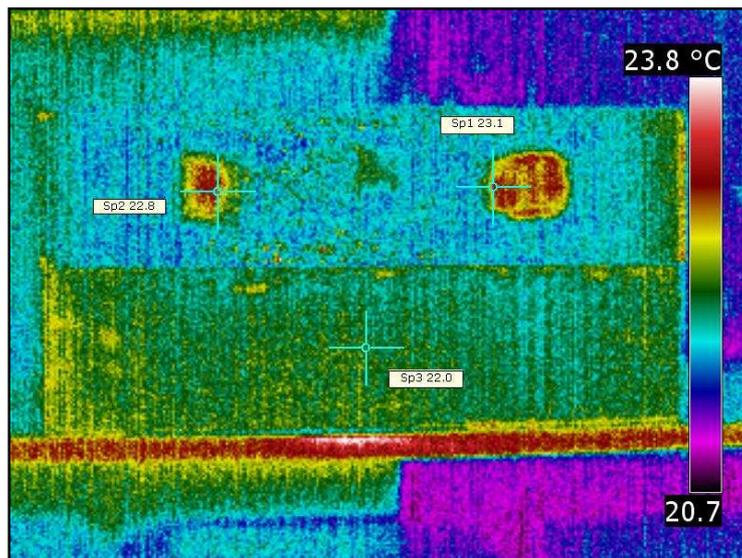


Figura 29. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 2$ minuti.

Come mostrato nell'immagine precedente (Fig. 29), i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino C3. La mancanza di

aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 22.8°C e 23.1°C, con un incremento pari a circa 1°C rispetto alle zone caratterizzate da perfetta aderenza rete/calcestruzzo.

Nell'immagine seguente (Fig. 30) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 2$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

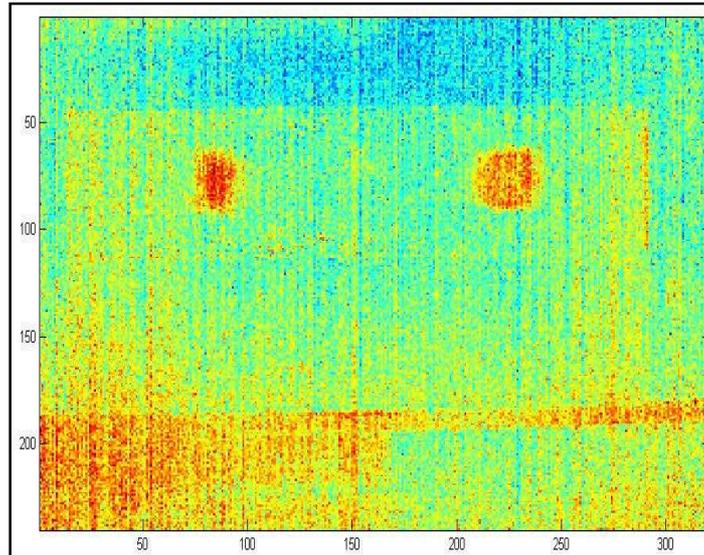


Figura 30. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può vedere, solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili.

In tutti i travetti della Serie C rinforzati con la rete in fibra di carbonio, sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 3 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione T e P.

Tabella 3. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
C1_C3	22.8	23.1
C1_C5	23.1	23.4
C1_C7	22.7	23.2
C1_C9	23.0	23.6

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di impregnazione della rete realizzata con il nastro in Teflon è l'anomalia di adesione che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 31) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini C1_C3 della distanza S.

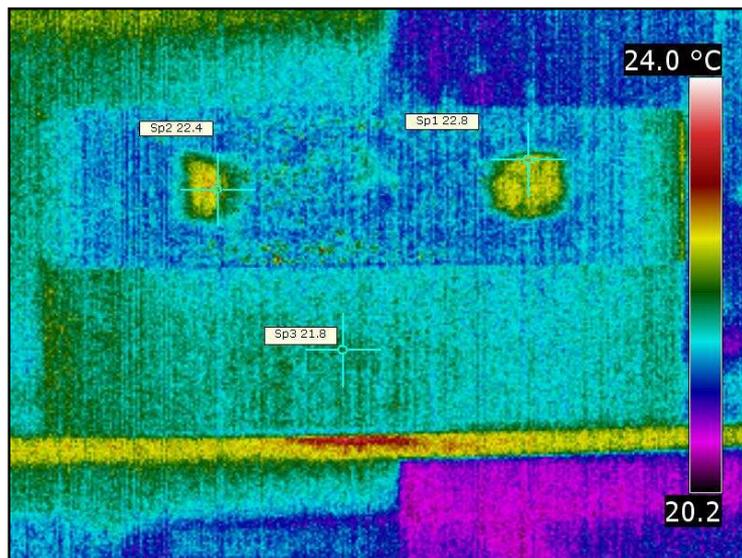


Figura 31. Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 15$ secondi.

Trascorsi 15 secondi dallo spegnimento del faretto si noti come le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Distanza L: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 32) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini C1_C3 determinato nella distanza L.

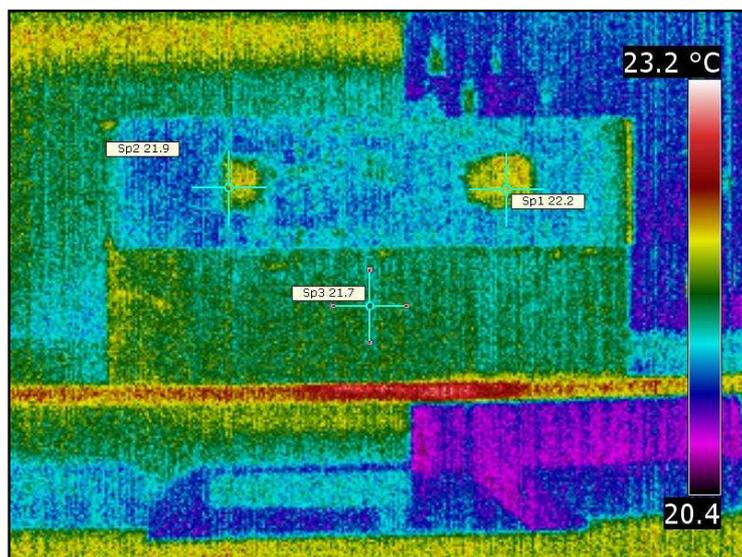


Figura 32. Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 2$ minuti.

Come mostrato nella Figura 32, i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale in corrispondenza del provino superiore C3. La mancanza di aderenza della rete determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato, rispetto alle zone con perfetta adesione rete/calcestruzzo, un incremento

della temperatura pari rispettivamente a 21.9°C e 22.2°C, con un incremento pari a circa 0.5°C rispetto alle zone caratterizzate dalla perfetta aderenza.

Distanza L: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 33) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini C1_C3 della distanza L.

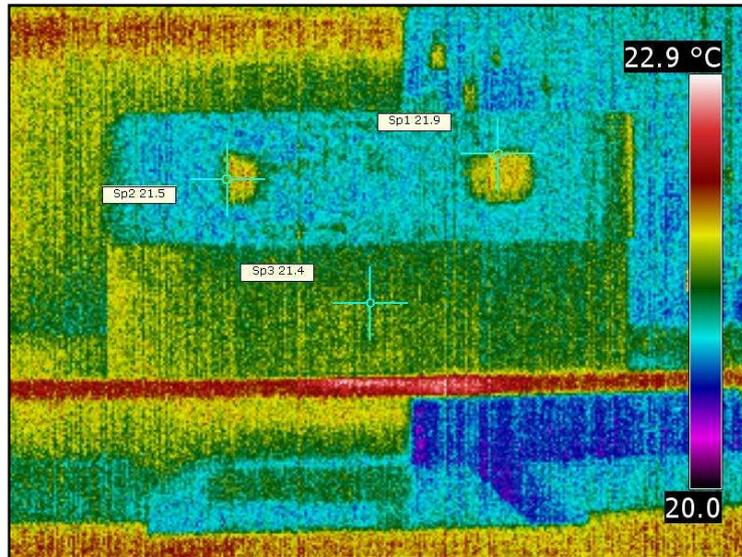


Figura 33. Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 15$ secondi.

Trascorsi 15 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

3.4.2.2 Provini rinforzati con la lamina in fibra di carbonio

Per i provini rinforzati con la lamina in fibra di carbonio la fase di riscaldamento è durata 7 minuti durante i quali sono stati scattati 14 termogrammi a distanza di 30 secondi l'uno dall'altro. La fase di raffreddamento è durata invece 2 minuti durante i quali sono stati scattati 12 termogrammi a distanza di 10 secondi l'uno dall'altro.

Verranno di seguito presentati a titolo esemplificativo alcuni termogrammi relativi ai provini di ciascuna Serie.

Provini della Serie A

Nella immagine seguente (Fig. 34) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, A2 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e A4 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.

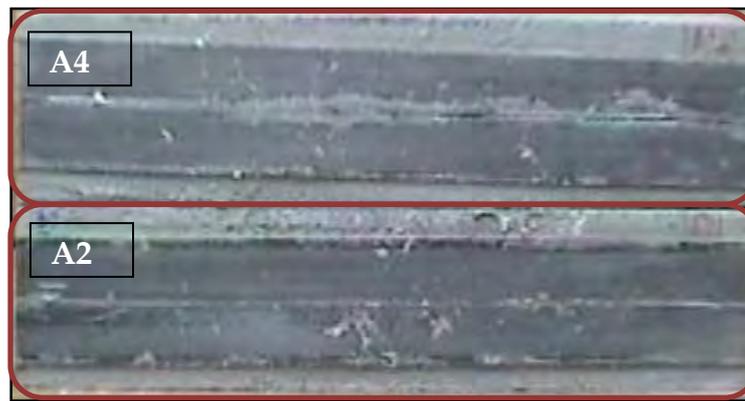


Figura 34. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: A4 con difetti di adesione, nella parte inferiore: A2 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 35) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini A2_A4 determinato nella distanza S.

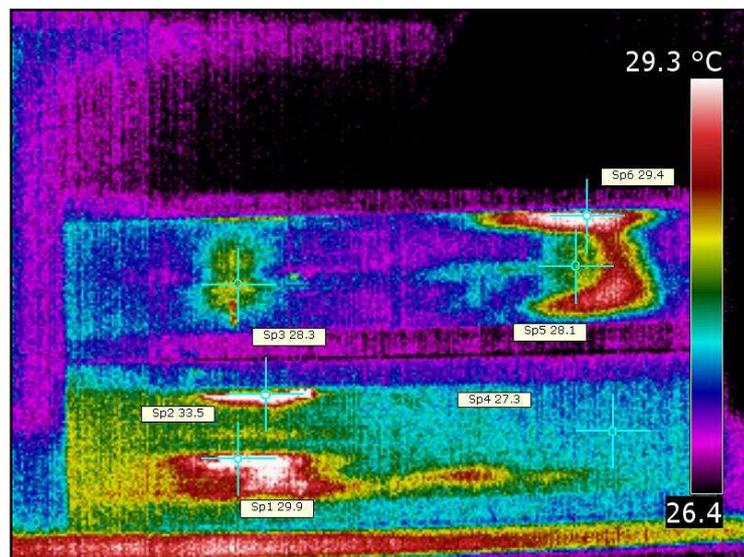


Figura 35. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

Come mostrato nella Figura 35, i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino A4. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 28.3°C e 29.4°C, con un incremento pari a circa 2°C rispetto alle zone caratterizzate dalla perfetta aderenza lamina/calcestruzzo. Nel termogramma precedente è inoltre possibile notare come nella lamina inferiore del provino A2 non sia stata realizzata la perfetta aderenza, infatti, risulta ben visibile un'estesa zona con distribuzione anomala della Temperatura causata dalla presenza di una bolla di aria in cui è stata raggiunta una temperatura massima pari a circa 30°C.

Nell'immagine seguente (Fig. 36) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

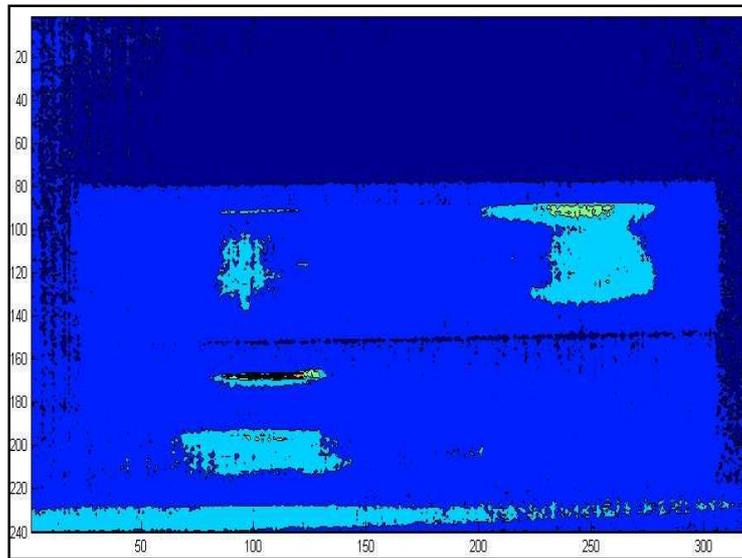


Figura 36. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può vedere nella Figura 36, solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. Risultano inoltre evidenti due zone nel travetto inferiore, in cui non è stata realizzata la perfetta aderenza lamina/calcestruzzo.

In tutti i travetti della Serie A rinforzati con la lamina in fibra di carbonio, sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 4 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione T e P.

Tabella 4. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
A2_A4	28.3	29.4
A2_A6	27.6	28.0
A2_A8	28.4	28.8
A2_A10	28.2	28.6

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di adesione della lamina realizzata con il nastro in Teflon è l'anomalia che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 37) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini A2_A4 della distanza S.

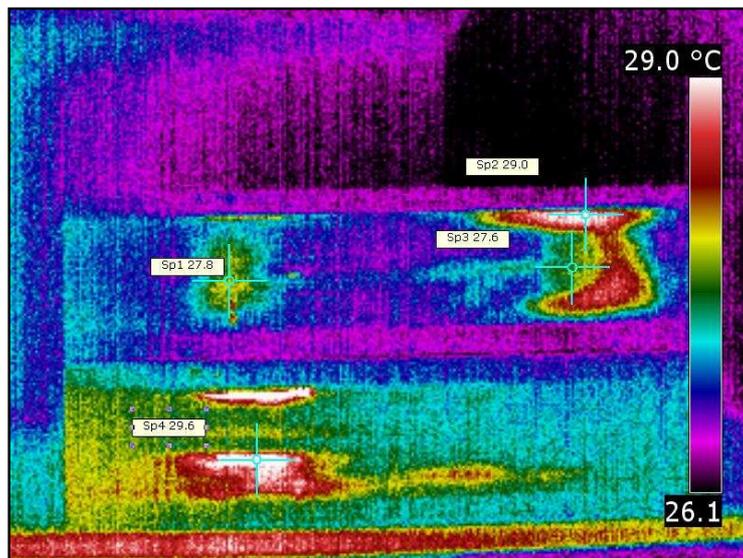


Figura 37. Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento. Nell'immagine seguente (Fig. 38) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

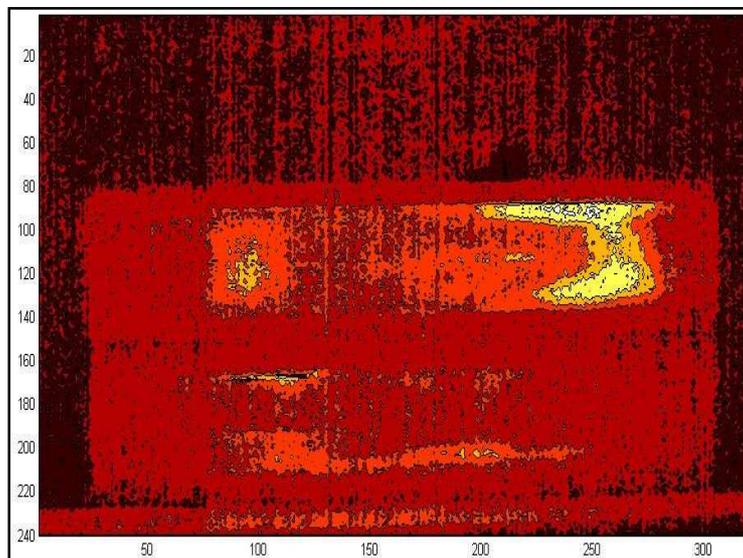


Figura 38. Distanza S: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

Solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. Risultano inoltre evidenti delle zone nel travetto inferiore, in cui non è stata realizzata la perfetta aderenza lamina/calcestruzzo.

Distanza L: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 39) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini A2_A4 determinato nella distanza L.

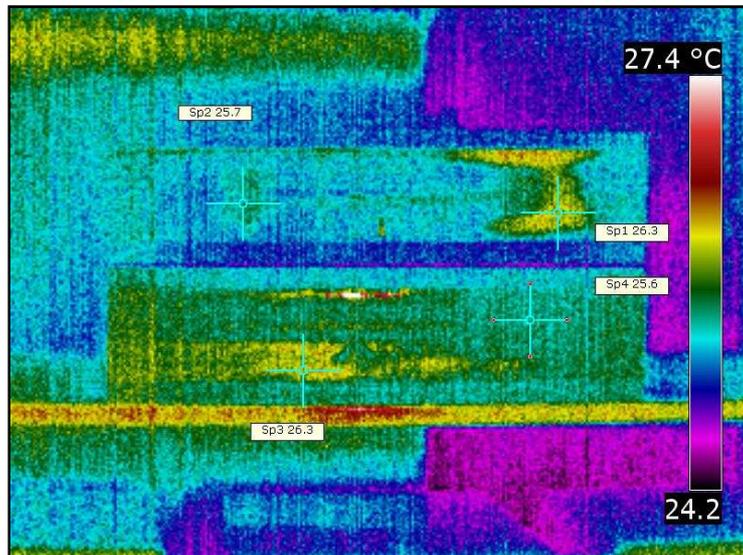


Figura 39. Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

Il difetto di adesione realizzato con il nastro in Teflon (T) risulta a malapena visibile, mentre lo spessore in Plastica (P) e la conseguente presenza della bolla d'aria ha determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino A4. Dal termogramma precedente è inoltre possibile notare come nella lamina inferiore del provino A2 non sia stata realizzata la perfetta aderenza, infatti, risulta ben visibile un'estesa zona caratterizzata da una distribuzione anomala della Temperatura causata dalla presenza di una bolla di aria.

Nell'immagine seguente (Fig. 40) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

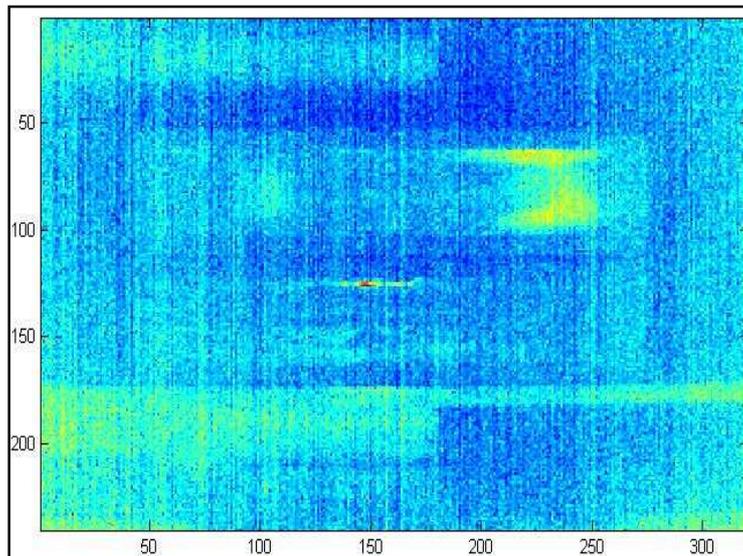


Figura 40. Distanza L: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Solo la presenza della bolla d'aria realizzata con lo spessore in Plastica risulta ben visibile a questa distanza.

Distanza L: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 41) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini A2_A4 della distanza L.

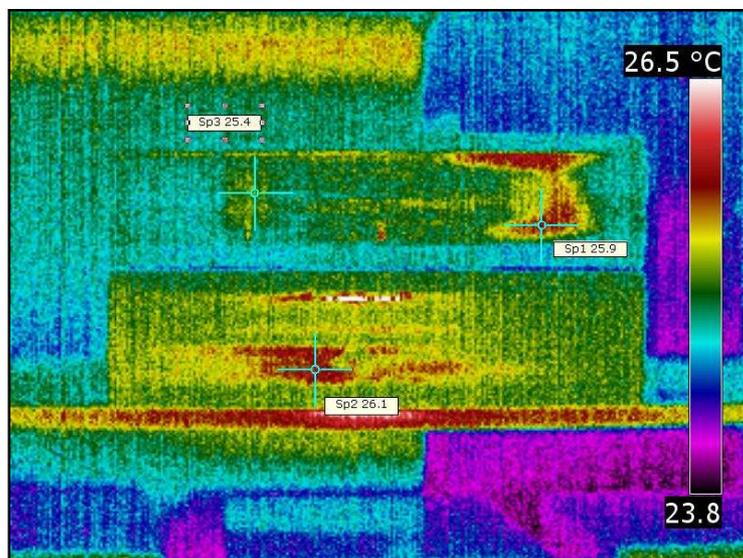


Figura 41. Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento. Nella Figura 42 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale, caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno, e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

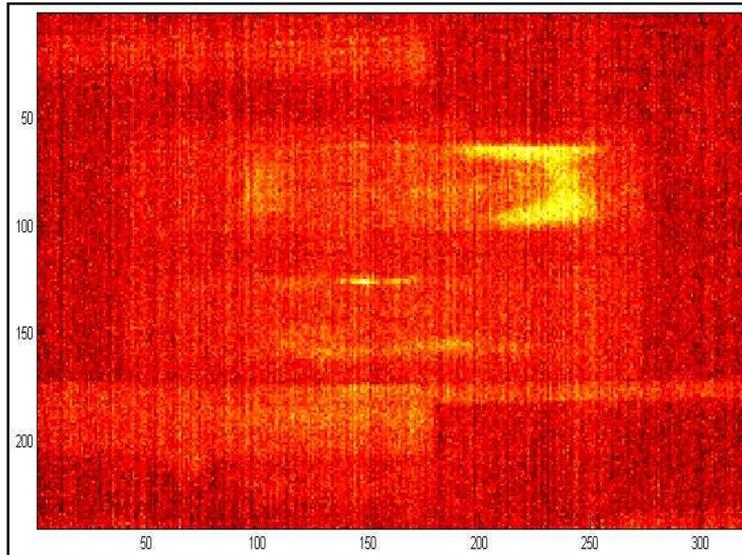


Figura 42. Distanza L: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

Solo la presenza della bolla di aria determinata dallo spessore in Plastica è facilmente identificabile. La mancanza di adesione della lamina inferiore nel travetto A2 e il nastro in Teflon nel provino A4 sono leggermente visibili.

Provini della Serie B

Nella immagine seguente (Fig. 43) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, B2 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e B4 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.

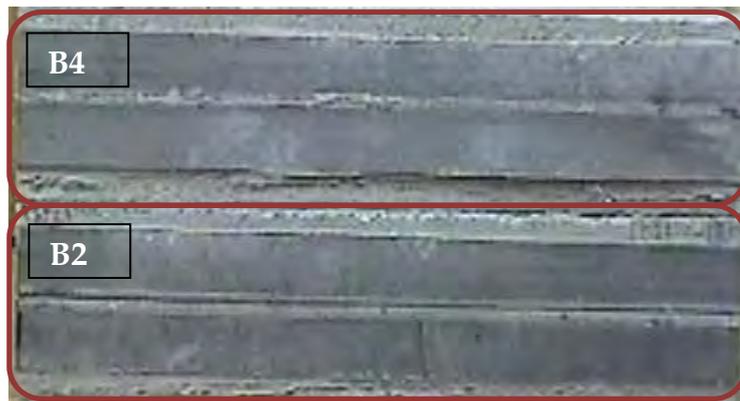


Figura 43. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: B4 con difetti di adesione, nella parte inferiore: B2 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

Nella Figura 44 è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini B2_B4 determinato nella distanza S.

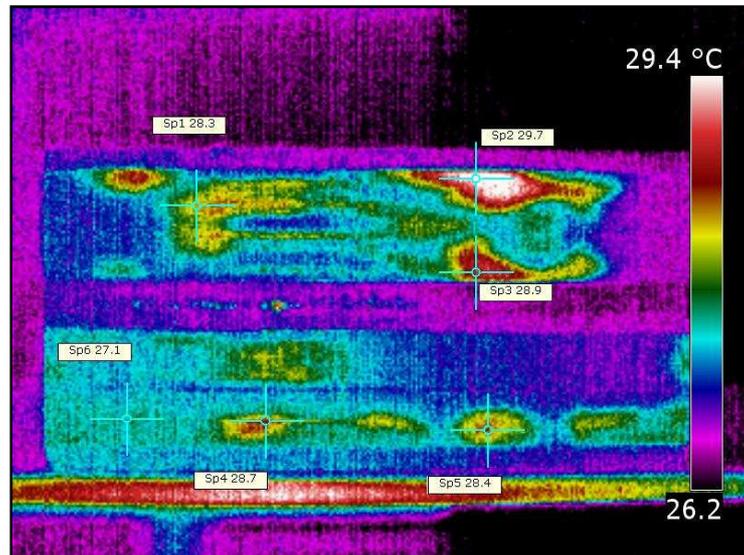


Figura 44. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

I difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino B4. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 28.3°C e 29.7°C, con un incremento pari a circa 2.5°C rispetto alle zone caratterizzate da perfetta aderenza lamina/calcestruzzo. Tali valori sono nettamente inferiori alla temperatura di transizione della resina epossidica utilizzata come matrice fra la lamina in fibra di carbonio e il calcestruzzo. Nel termogramma precedente è inoltre possibile notare come nella lamina inferiore del provino B2 non sia stata realizzata la perfetta aderenza, infatti, risultano ben visibili numerose zone con una distribuzione anomala della Temperatura superficiale causata dalla presenza di bolle di aria in cui si è raggiunto un valore massimo pari a circa 29°C.

Nell'immagine seguente (Fig. 45) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

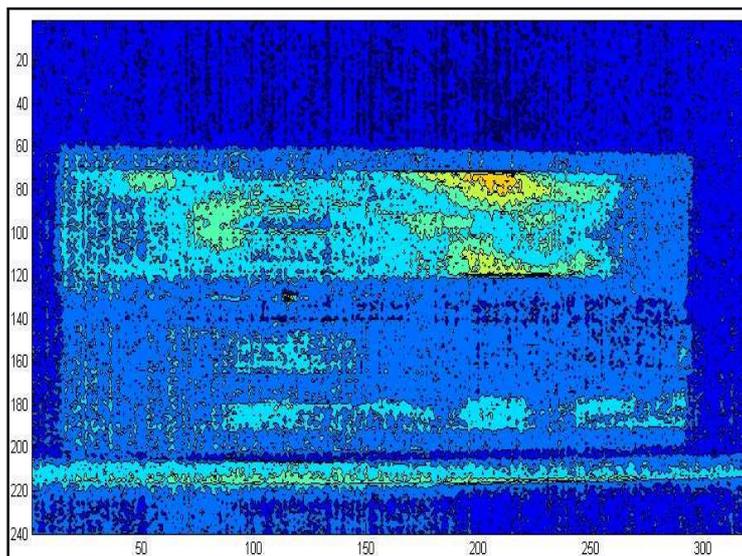


Figura 45. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. Risultano inoltre evidenti alcune zone nel travetto inferiore, in cui non è stata realizzata la perfetta aderenza lamina/calcestruzzo.

In tutti i travetti della Serie B rinforzati con la lamina in fibra di carbonio, sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 5 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione T e P.

Tabella 5. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
B2_B4	28.3	29.7
B2_B6	28.5	29.2
B2_B8	29.0	29.5
B2_B10	29.4	29.7

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di adesione della lamina realizzata con il Teflon è l'anomalia che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 46) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini B2_B4 della distanza S.

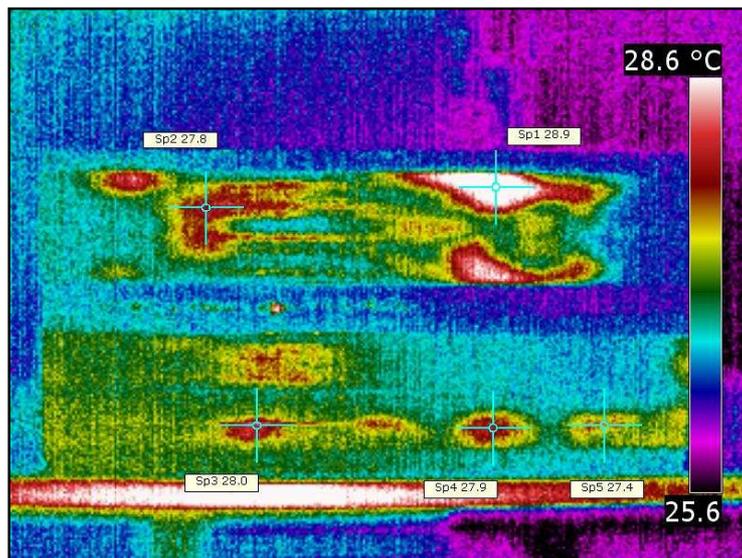


Figura 46. Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento. Nella Figura 47 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

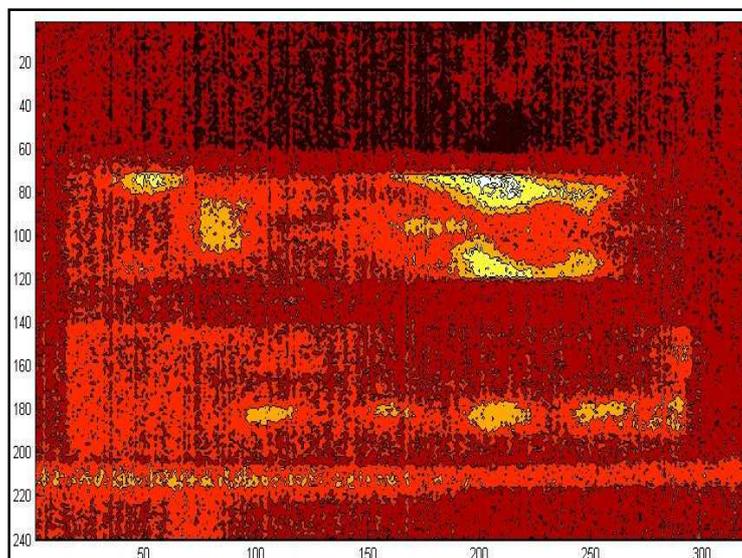


Figura 47. Distanza S: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

Solamente due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. Risultano inoltre evidenti diverse zone nel travetto inferiore, in cui non è stata realizzata la perfetta aderenza lamina/calcestruzzo.

Distanza L: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 48) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini B2_B4 determinato nella distanza L.

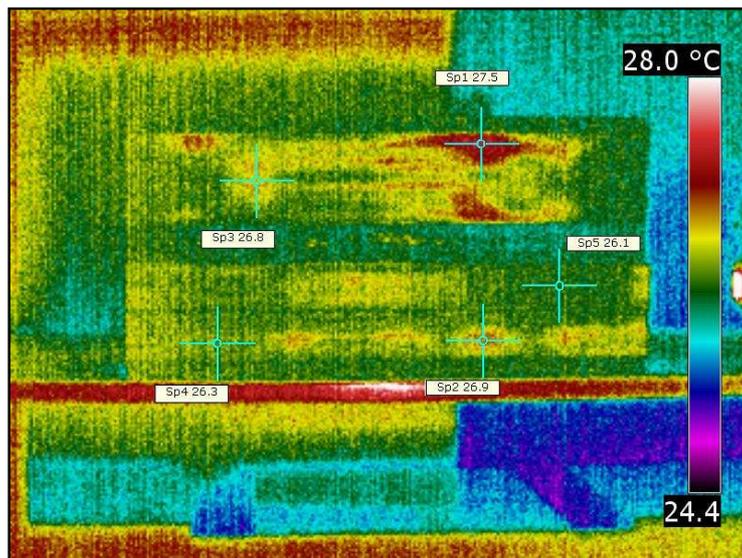


Figura 48. Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

Il difetto di adesione realizzato con il nastro in Teflon (T) risulta poco visibile, mentre lo spessore in Plastica (P) e la conseguente presenza della bolla d'aria ha determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino B4. Dal termogramma precedente è inoltre possibile notare come nella lamina inferiore del provino B2 non sia stata realizzata la perfetta aderenza, infatti, risulta ben visibili numerose zone con una distribuzione anomala della Temperatura causata dalla presenza di bolle di aria.

Nella Figura 49 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

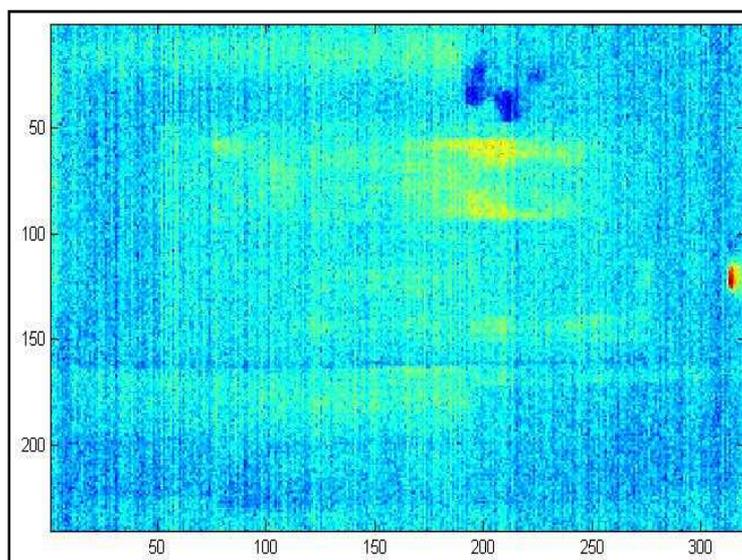


Figura 49. Distanza L: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può vedere, solo la presenza delle bolle di aria realizzate dallo spessore in Plastica sono visibili a questa distanza.

Distanza L: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 50) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini B2_B4 della distanza L.

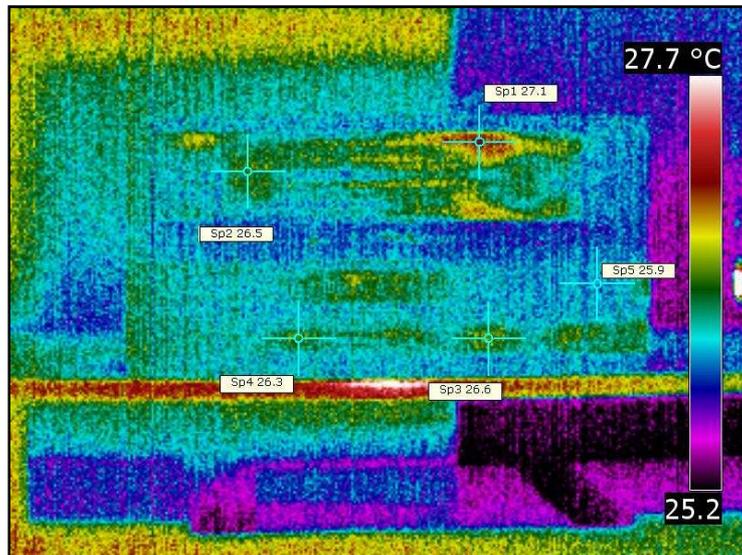


Figura 50. *Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.*

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento. Nella Figura 51 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale, caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno, e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

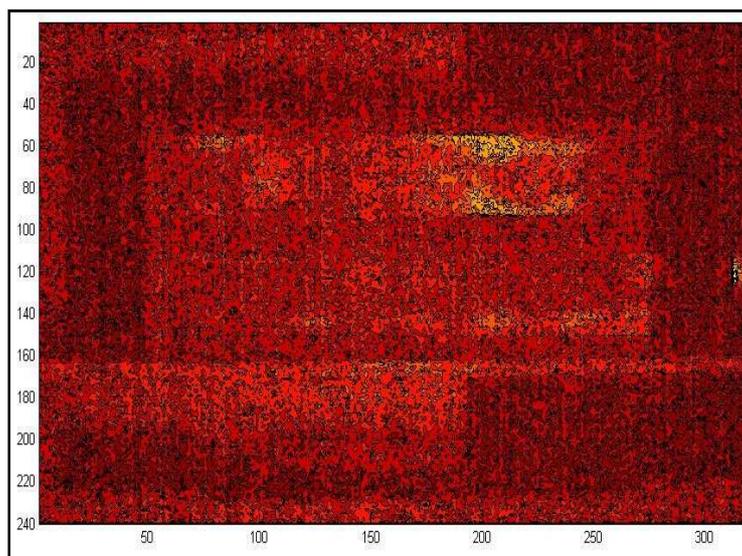


Figura 51. *Distanza L: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.*

Solo la presenza della bolla di aria determinata dallo spessore in Plastica è leggermente identificabile. La mancanza di adesione della lamina inferiore nel travetto B2 e il nastro in Teflon nel provino B4 sono poco visibili.

Provini della Serie C

Nella immagine seguente (Fig. 52) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, C2 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e C4 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.

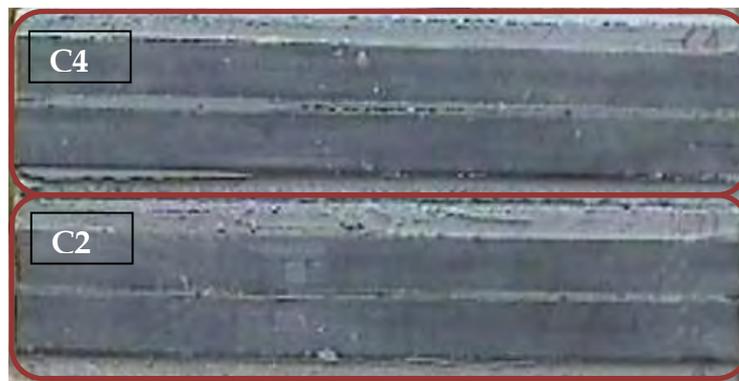


Figura 52. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: C4 con difetti di adesione, nella parte inferiore: C2 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

In Figura 53 è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini C2_C4 determinato nella distanza S.

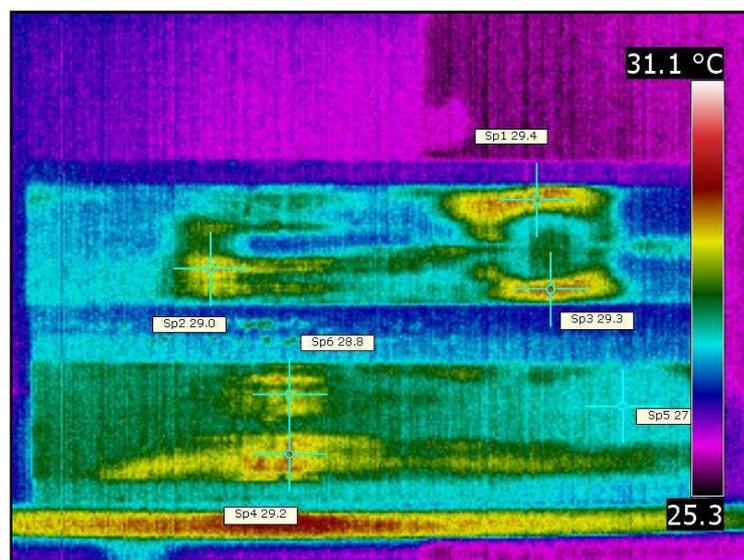


Figura 53. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

I difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino C4. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 29.0°C e 29.4°C, con un incremento pari a circa 2.5°C rispetto alle zone caratterizzate da perfetta aderenza lamina/calcestruzzo. Nel termogramma mostrato in Figura 53 è inoltre possibile notare

come nelle lamine del provino C2 non sia stata realizzata la perfetta aderenza, infatti, risultano distinguibili delle zone caratterizzate da una distribuzione anomala della Temperatura causata dalla presenza di bolle di aria in cui si è raggiunta un valore massimo pari a circa 29°C.

Nell'immagine seguente (Fig. 54) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

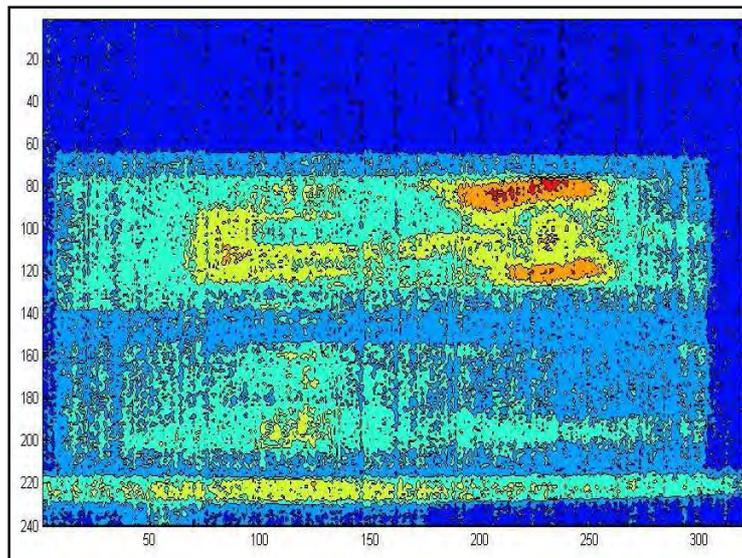


Figura 54. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. Risultano inoltre evidenti alcune zone nel travetto inferiore, in cui non è stata realizzata la perfetta aderenza lamina/calcestruzzo.

In tutti i travetti della Serie C rinforzati con la lamina in fibra di carbonio, sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 6 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione T e P.

Tabella 6. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
C2_C4	29.0	29.4
C2_C6	28.8	29.0
C2_C8	29.2	29.8
C2_C10	29.1	29.5

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di adesione della lamina realizzata con il nastro in Teflon è l'anomalia che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

Nella Figura 55 è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini C2_C4 della distanza S.

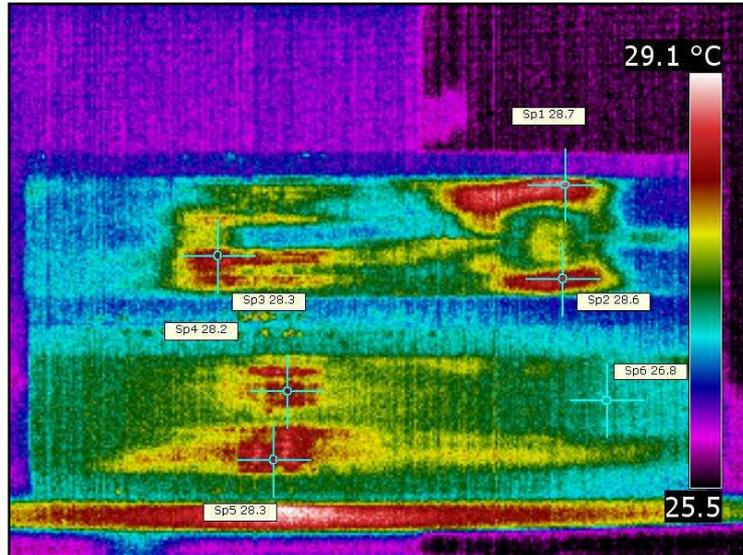


Figura 55. Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Nell'immagine seguente (Fig. 56) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

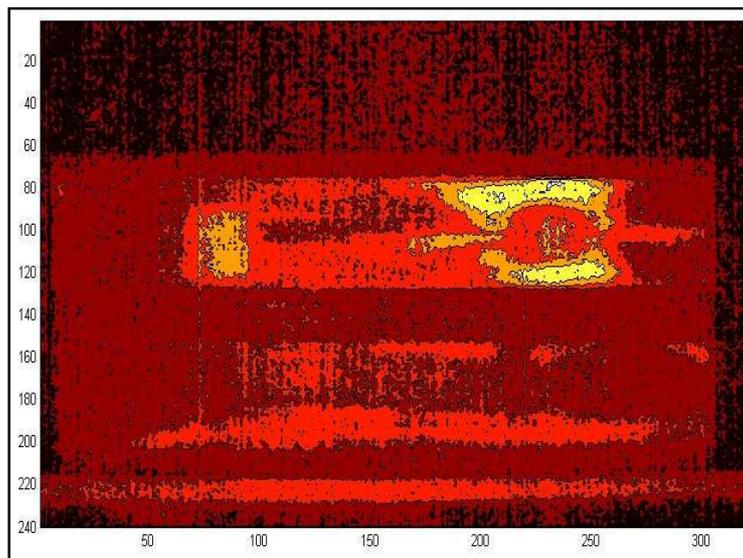


Figura 56. Distanza S: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

Solamente due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. Risultano inoltre evidenti diverse zone nel travetto inferiore, in cui non è stata realizzata la perfetta aderenza lamina/calcestruzzo.

Distanza L: Fase di riscaldamento

In Figura 57 è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini C2_C4 determinato nella distanza L.

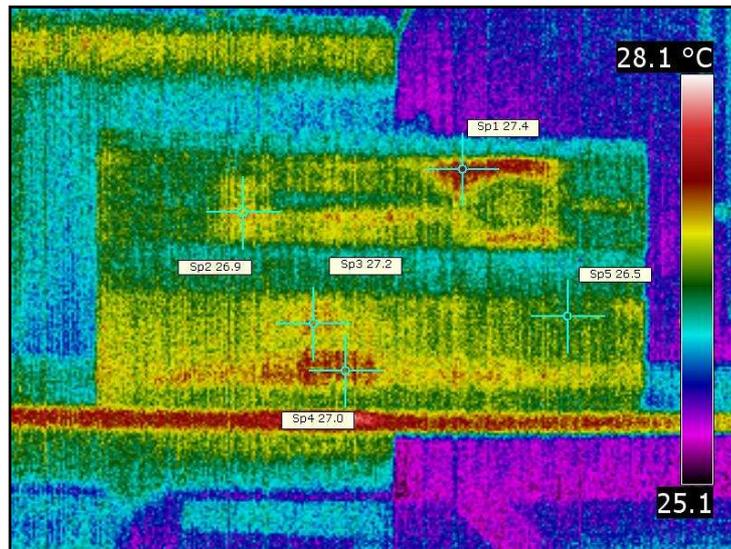


Figura 57. *Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.*

Il difetto di adesione realizzato con il nastro in Teflon (T) risulta poco visibile, mentre lo spessore in Plastica (P) e la conseguente presenza di bolle d'aria ha determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino C4. Dal termogramma precedente è inoltre possibile notare come nella lamina inferiore del provino C2 non sia stata realizzata la perfetta aderenza, infatti, risulta ben visibili una estesa zona con una distribuzione anomala della Temperatura causata dalla presenza di bolle di aria.

Nell'immagine seguente (Fig. 58) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

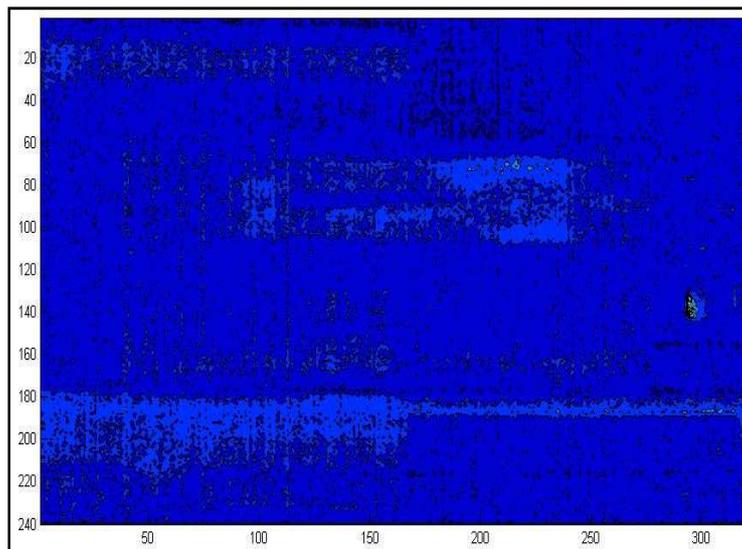


Figura 58. Distanza L: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può vedere le anomalie di adesione sono poco visibili a questa distanza.

Distanza L: Fase di raffreddamento

In Figura 59 è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini C2_C4 della distanza L.

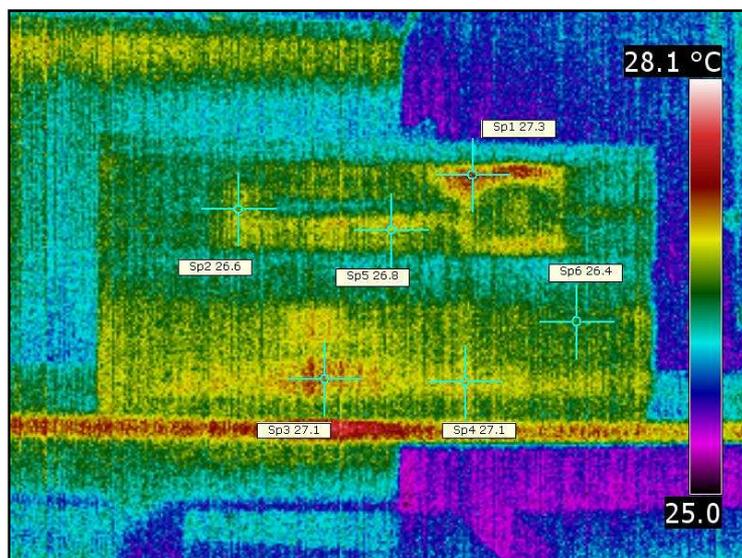


Figura 59. Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Nell'immagine seguente (Fig. 60) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale, caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno, e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

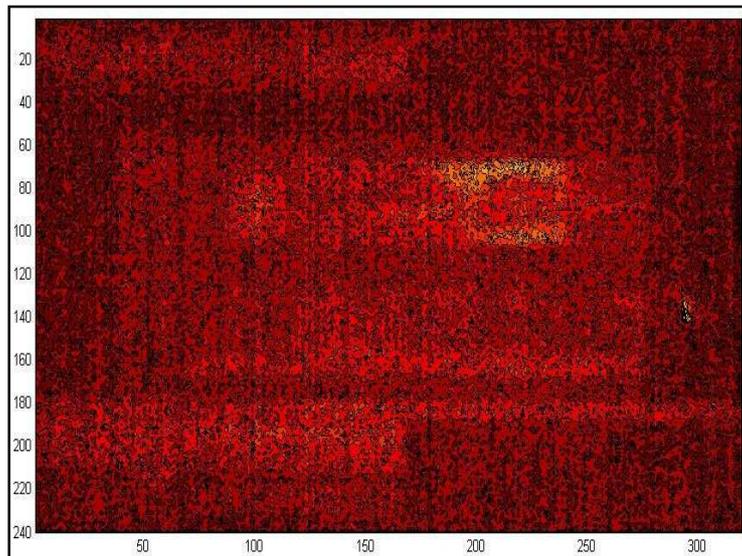


Figura 60. Distanza L: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può vedere, anche nella fase di raffreddamento a questa distanza, i difetti di adesione sono poco visibili.

3.4.2.3 Provini rinforzati con la rete in fibra di PBO

Per i provini rinforzati con la rete in fibra di PBO la fase di riscaldamento è durata 7 minuti durante i quali sono stati scattati 14 termogrammi a distanza di 30 secondi l'uno dall'altro. La fase di raffreddamento è durata invece 2 minuti durante i quali sono stati scattati 12 termogrammi a distanza di 10 secondi l'uno dall'altro.

Verranno di seguito presentati a titolo esemplificativo alcuni termogrammi relativi ai provini di ciascuna Serie.

Provini della Serie A

Nella immagine seguente (Fig. 61) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, A11 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e A12 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.



Figura 61. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: A12 con difetti di adesione, nella parte inferiore: A11 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

In Figura 62 è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini A11_A12 determinato nella distanza S.

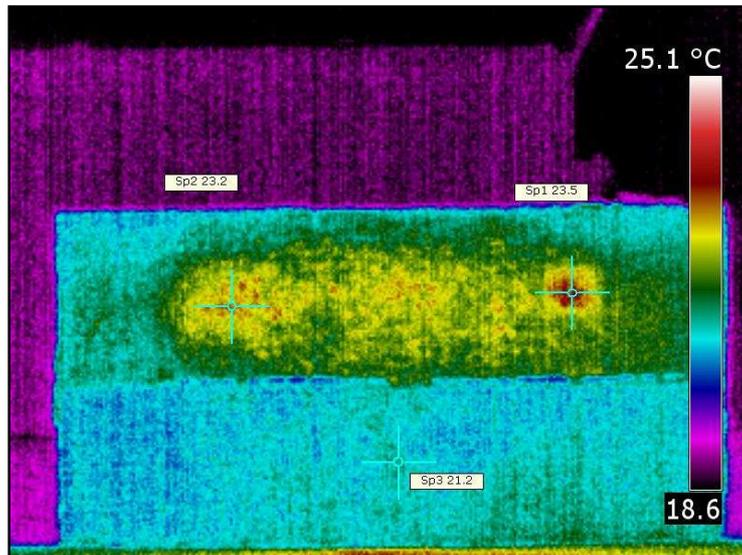


Figura 62. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

I difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino A12. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 23.2°C e 23.5°C, con un incremento pari a circa 2°C rispetto alle zone caratterizzate dalla perfetta aderenza PBO/calcestruzzo.

Nell'immagine seguente (Fig. 63) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

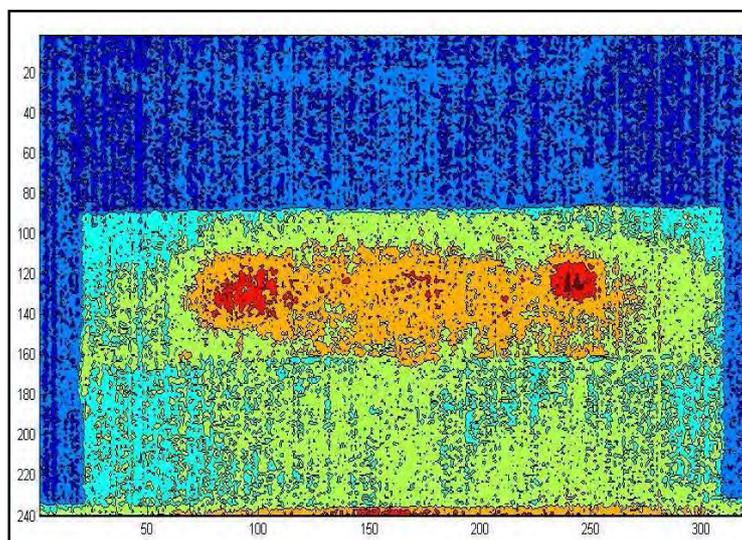


Figura 63. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Solo due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili. Nel travetto superiore A12 sono inoltre evidenti delle zone caratterizzate da una distribuzione anomala della Temperatura. Queste sono in parte causate dalla riflessione del faretto sulla superficie del provino ed in parte alla rugosità della superficie stessa.

In tutti i travetti della Serie A rinforzati con la rete in fibra di PBO, sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 7 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione T e P.

Tabella 7. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
A11_A12	23.2	23.5
A11_A13	21.6	22.0
A11_A14	21.9	22.5
A11_A15	20.9	21.3

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di adesione realizzata con il nastro in Teflon è l'anomalia che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 64) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini A11_A12 della distanza S.

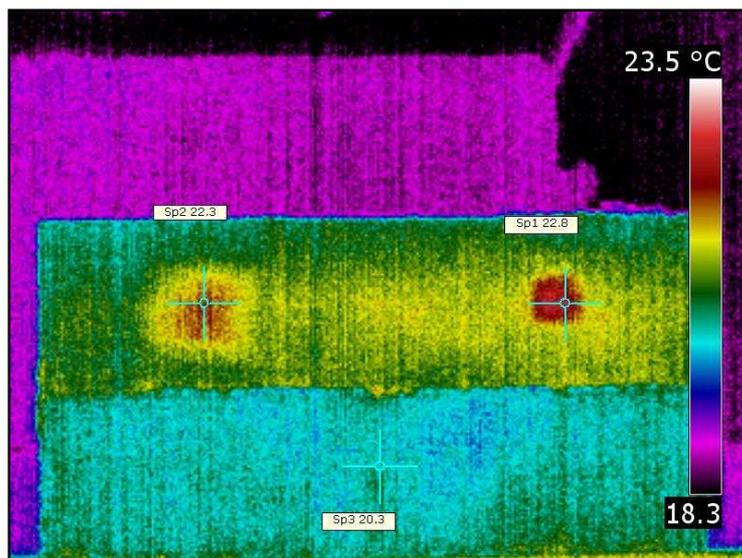


Figura 64. Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

In Figura 65 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

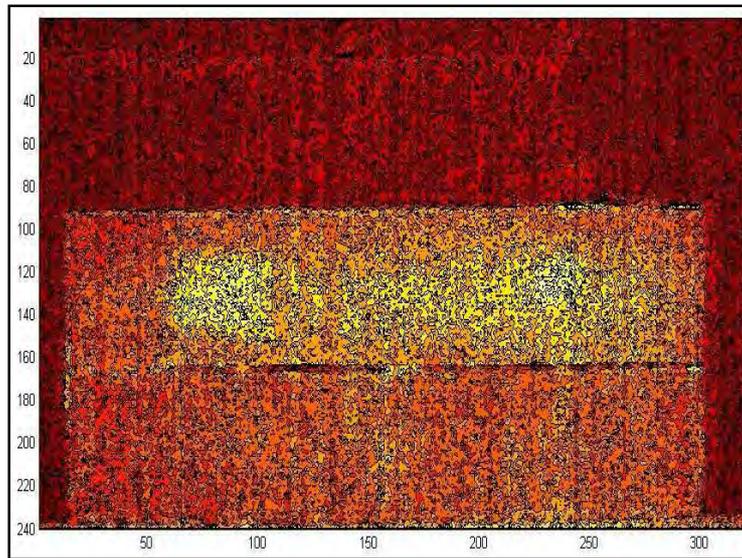


Figura 65. Distanza S: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

I due difetti di adesione sono leggermente visibili. L'elaborazione con Matlab® mostrata in Figura 65 non consente di evidenziare le zone in cui sono presenti le anomalie a causa della bassa differenza di temperatura esistenti fra il primo e l'ultimo termogramma della Serie.

Distanza L: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 66) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini A11_A12 determinato nella distanza L.

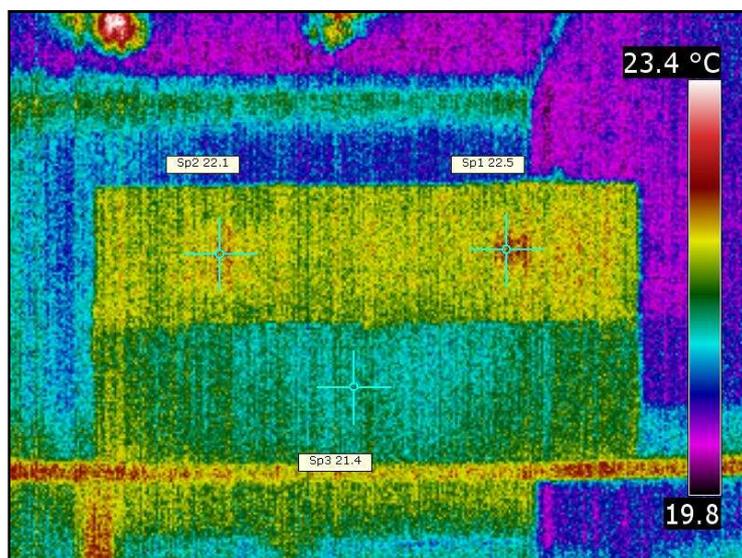


Figura 66. Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

I difetti di adesione, a differenza di quanto osservato nei provini rinforzati con le reti e le lamine in fibra di carbonio, sono difficilmente individuabili. Si intravede la presenza di due zone caratterizzate da una distribuzione anomala della Temperatura, ma non si riesce ad effettuarne un dimensionamento.

Nell'immagine seguente è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

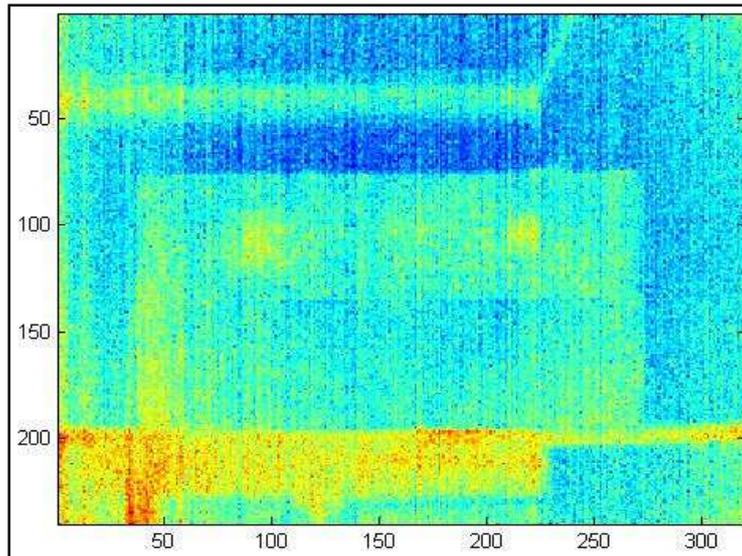


Figura 67. Distanza L: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può notare in Figura 67, l'elaborazione con Matlab® non consente di mettere in evidenza i difetti di adesione a causa della bassa differenza di temperatura esistente, nelle zone con le anomalie, fra il primo e l'ultimo termogramma della serie.

Distanza L: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 68) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini A11_A12 della distanza L.

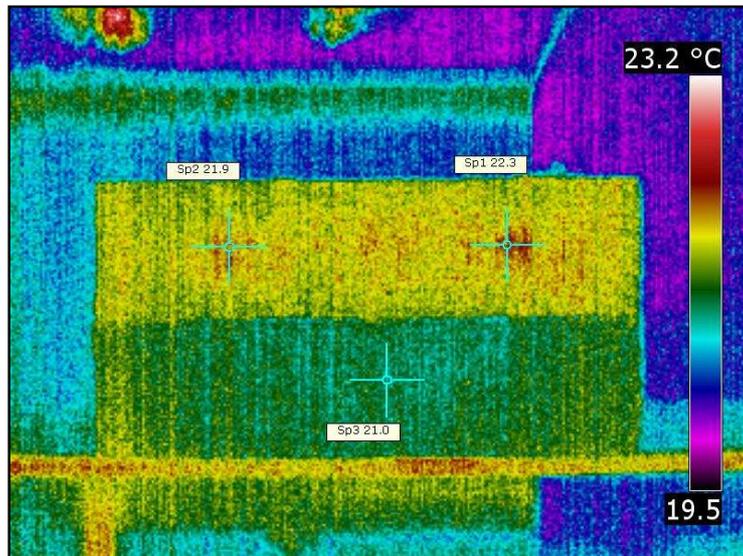


Figura 68. Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.3°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

In Figura 69 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale, caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno, e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

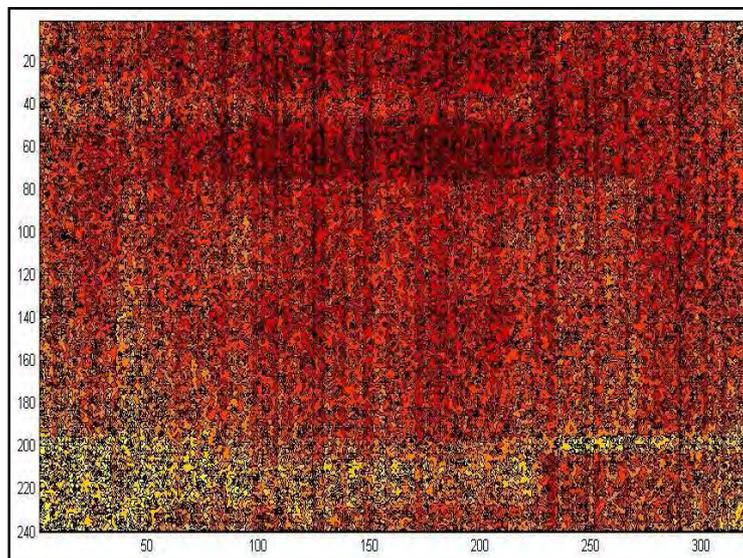


Figura 69. Distanza L: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

L'elaborazione con Matlab® mostrata in Figura 69 non consente di mettere in evidenza i difetti di adesione a causa della bassa differenza di temperatura esistente, nelle zone con le anomalie, fra il primo e l'ultimo termogramma della serie.

Provini della Serie B

Nella immagine seguente (Fig. 70) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, B11 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e B12 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.



Figura 70. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: B12 con difetti di adesione, nella parte inferiore: B11 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

In Figura 71 è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini B11_B12 determinato nella distanza S.

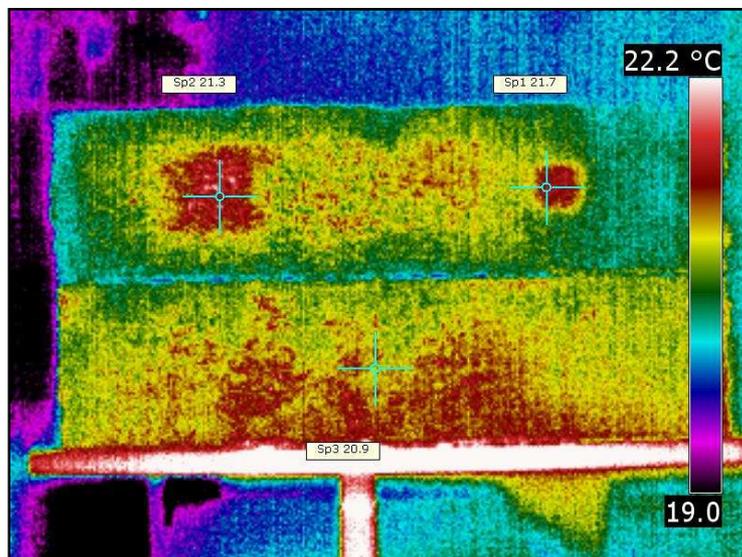


Figura 71. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

Come mostrato nell'immagine precedente (Fig. 71), i difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino B4. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 21.3°C e 21.7°C , con un incremento pari a circa 1.0°C rispetto alle zone caratterizzate da perfetta aderenza rete/calcestruzzo.

Nell'immagine seguente è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

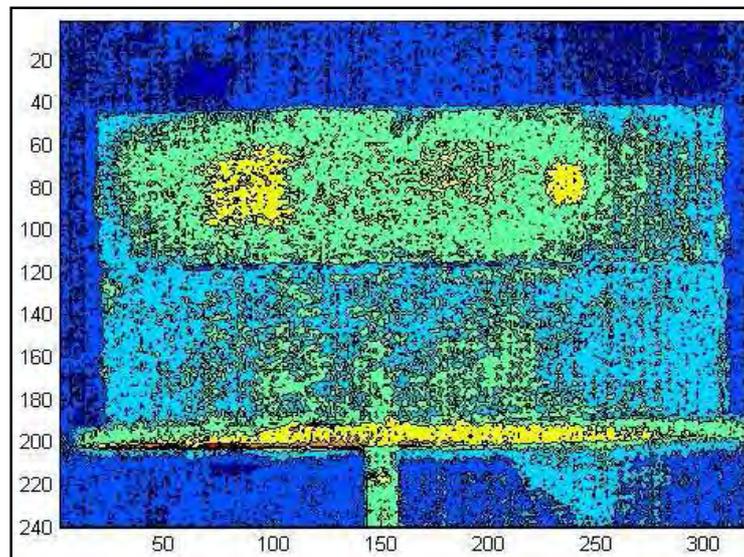


Figura 72. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Solamente due dei difetti di adesione sono facilmente identificabili.

In tutti i travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di PBO, sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 8 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione T e P.

Tabella 8. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
B11_B12	21.3	21.7
B11_B13	21.4	21.6
B11_B14	21.4	21.7
B11_B15	21.5	21.9

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di adesione della rete in PBO realizzata con il nastro in Teflon è l'anomalia che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

In Figura 73 è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini B11_B12 della distanza S.

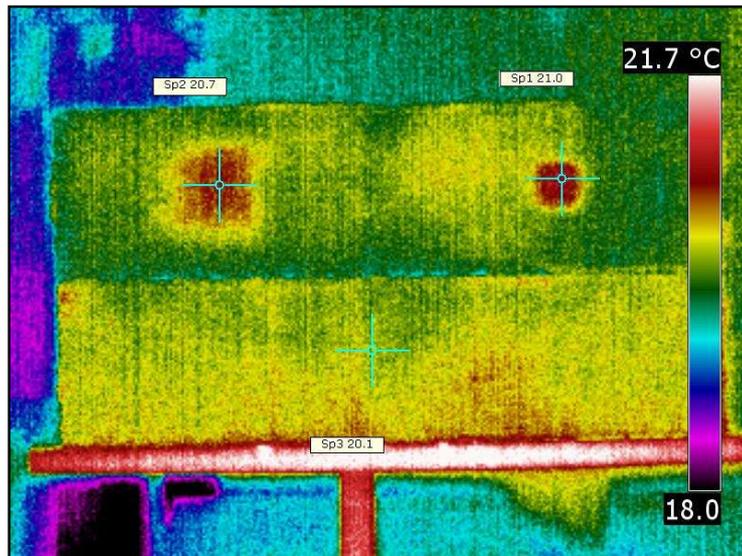


Figura 73. Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.5°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Nell'immagine seguente è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

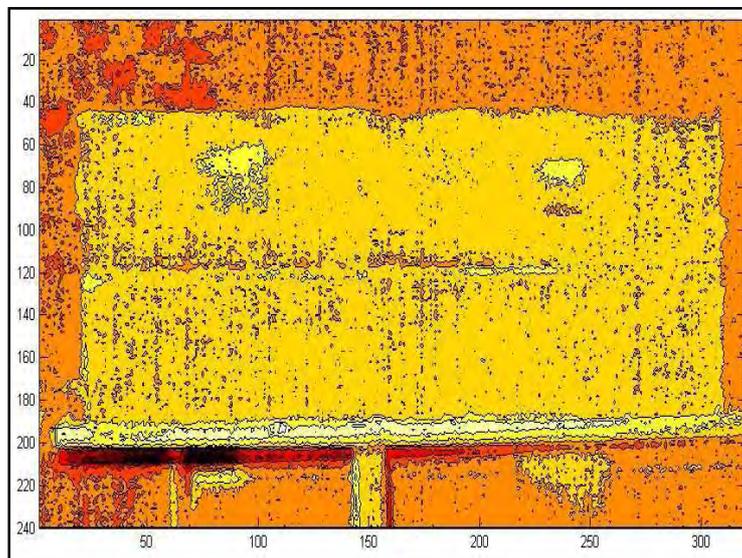


Figura 74. Distanza S: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

Solamente due dei difetti di adesione sono leggermente identificabili.

Distanza L: Fase di riscaldamento

In Figura 75 è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini B11_B12 determinato nella distanza L.

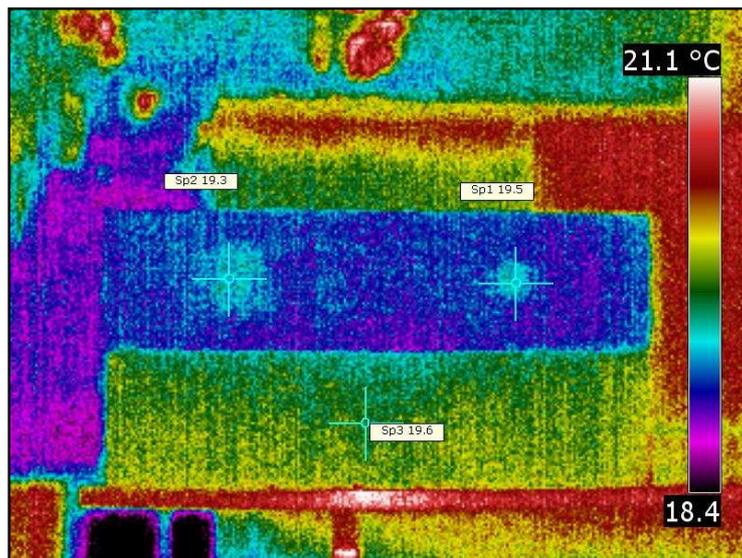


Figura 75. Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

I difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino B12.

Nell'immagine seguente (Fig. 76) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

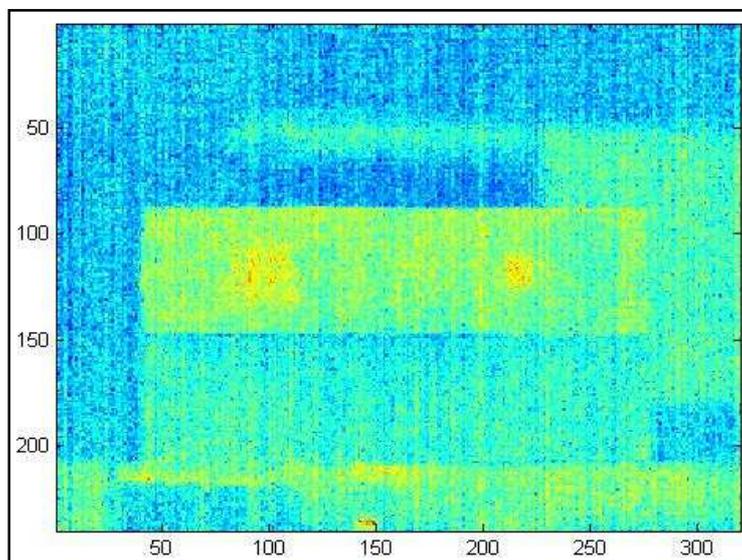


Figura 76. Distanza L: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

I due difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon e lo spessore in Plastica sono leggermente visibili. L'elaborazione con Matlab® mostrata in Figura 76 non consente di metterli in evidenza a causa della bassa differenza di temperatura esistente, nelle zone con le anomalie, fra il primo e l'ultimo termogramma della serie.

Distanza L: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 77) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini B11_B12 della distanza L.

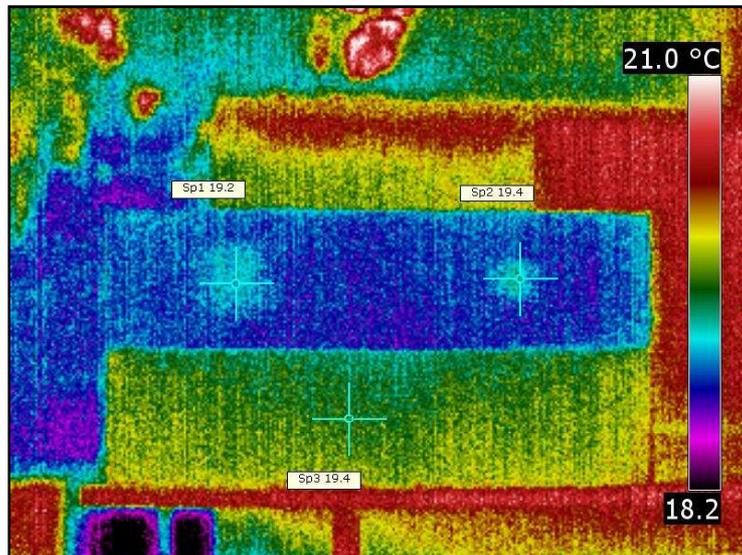


Figura 77. *Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.*

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 0.3°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

In Figura 78 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale, caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno, e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

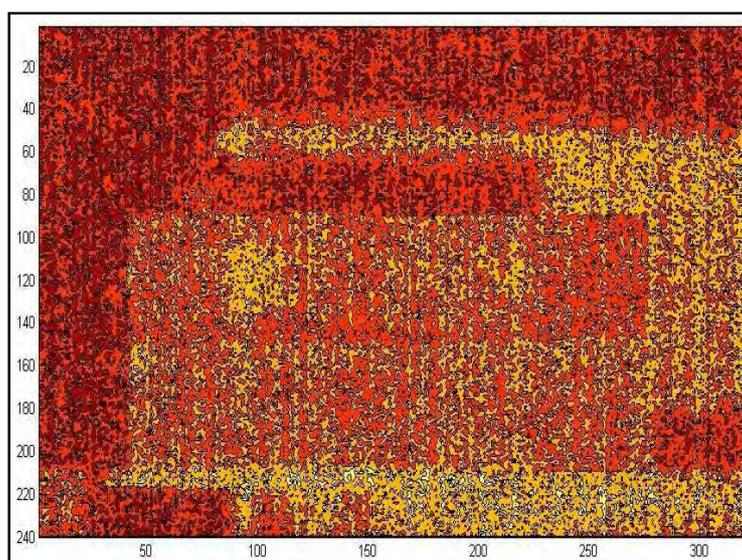


Figura 78. *Distanza L: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.*

L'elaborazione con Matlab® mostrata in Figura 78 non consente di mettere in evidenza i difetti di adesione a causa della bassa differenza di temperatura esistente, nelle zone con le anomalie, fra il primo e l'ultimo termogramma della Serie.

Provini della Serie C

Nella immagine seguente (Fig. 79) è mostrata una fotografia relativa al posizionamento dei travetti, C11 con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e C12 con le anomalie di adesione, durante le prove termografiche.



Figura 79. Fotografia dei provini. Nella parte superiore: C12 con difetti di adesione, nella parte inferiore: C11 con perfetta aderenza.

Distanza S: Fase di riscaldamento

In Figura 80 è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini C11_C12 determinato nella distanza S.

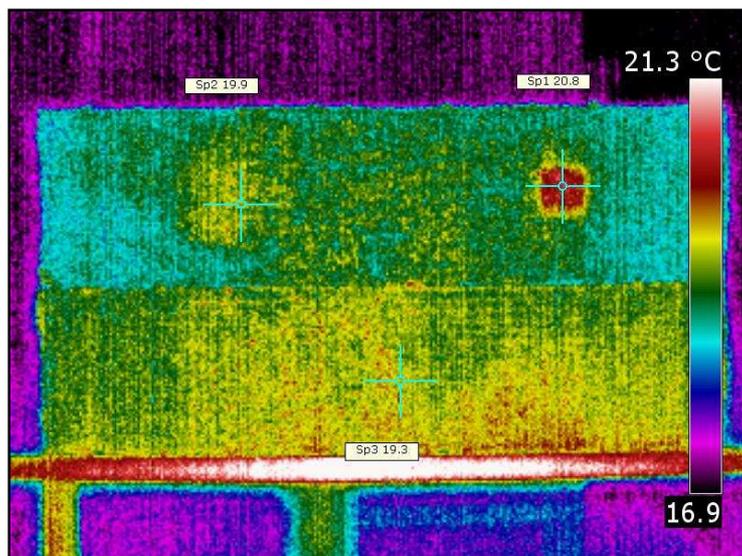


Figura 80. Distanza S: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

I difetti di adesione realizzati con il nastro in Teflon (T) e lo spessore in Plastica (P) hanno determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino C12. La mancanza di aderenza determinata da T e la bolla di aria realizzata da

P hanno determinato una temperatura pari rispettivamente a 20.8°C e 19.9°C, con un incremento pari a circa 1°C rispetto alle zone caratterizzate da perfetta aderenza rete/calcestruzzo.

Nell'immagine seguente (Fig. 81) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

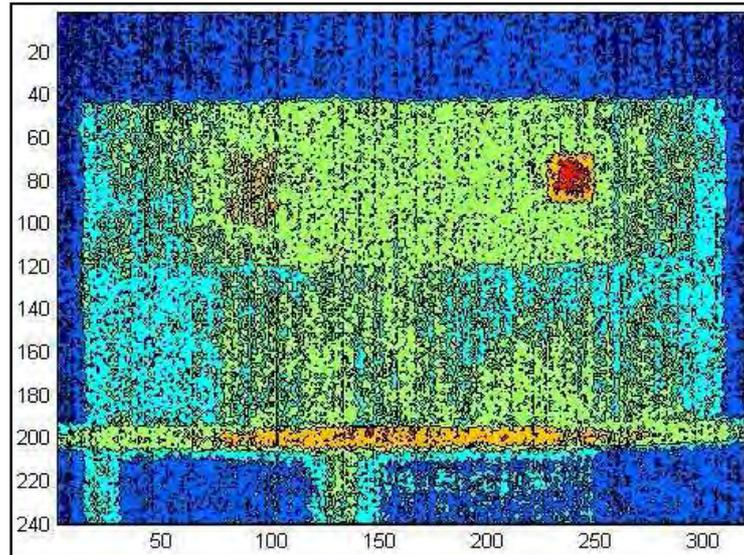


Figura 81. Distanza S: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Solamente il difetto di adesione realizzato con lo spessore in Plastica è facilmente identificabile, mentre l'anomalia realizzata con il nastro in Teflon è a poco visibile. In tutti i travetti della Serie C rinforzati con la rete in fibra di PBO, sono stati ottenuti termogrammi simili. Nella Tabella 9 sono riportate le temperature massime della fase di riscaldamento nella distanza S determinate in corrispondenza dei due difetti di adesione T e P.

Tabella 9. Temperature determinate in corrispondenza di Teflon (TT) e Plastica (TP).

Travetti	TT [°C]	TP [°C]
C11_C12	19.9	20.8
C11_C13	20.1	20.6
C11_C14	19.9	20.6
C11_C15	20.4	21.1

La presenza della bolla d'aria realizzata tramite lo spessore in Plastica, rispetto alla mancanza di adesione della rete in PBO realizzata con il nastro in Teflon è l'anomalia che ha determinato il maggior valore di temperatura superficiale.

Distanza S: Fase di raffreddamento

Nella Figura 82 è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini C11_C12 della distanza S.

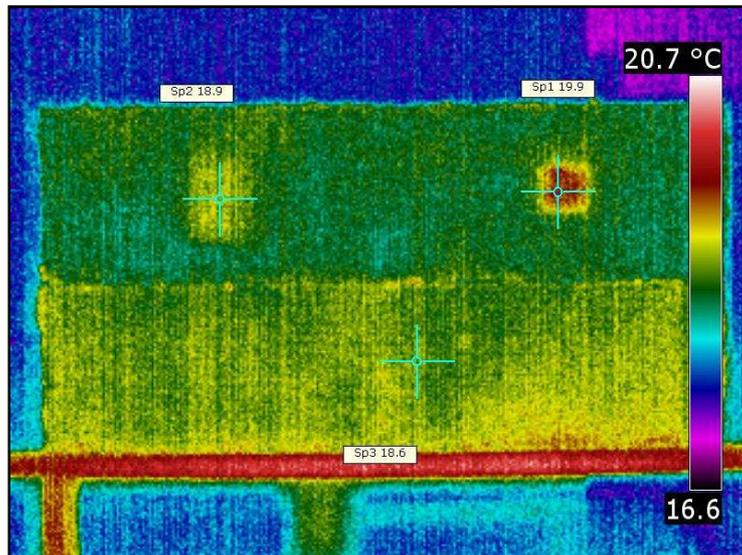


Figura 82. *Distanza S: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.*

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 1.0°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

Nell'immagine seguente (Fig. 83) è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

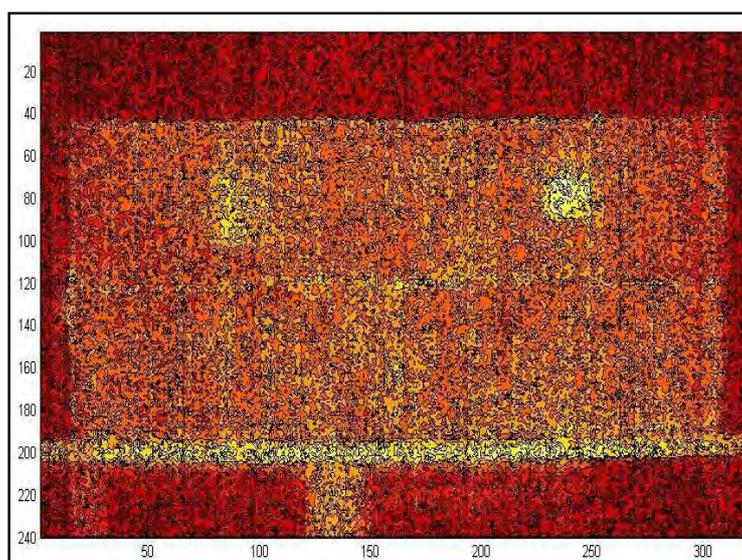


Figura 83. *Distanza S: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.*

I due difetti di adesione sono leggermente visibili. L'elaborazione con Matlab® mostrata in Figura 83 non consente di evidenziare le zone in cui sono presenti le

anomalie a causa della bassa differenza di temperatura esistenti fra il primo e l'ultimo termogramma della Serie.

Distanza L: Fase di riscaldamento

Nella immagine seguente (Fig. 84) è mostrato il termogramma dell'istante finale relativo ai provini C11_C12 determinato nella distanza L.

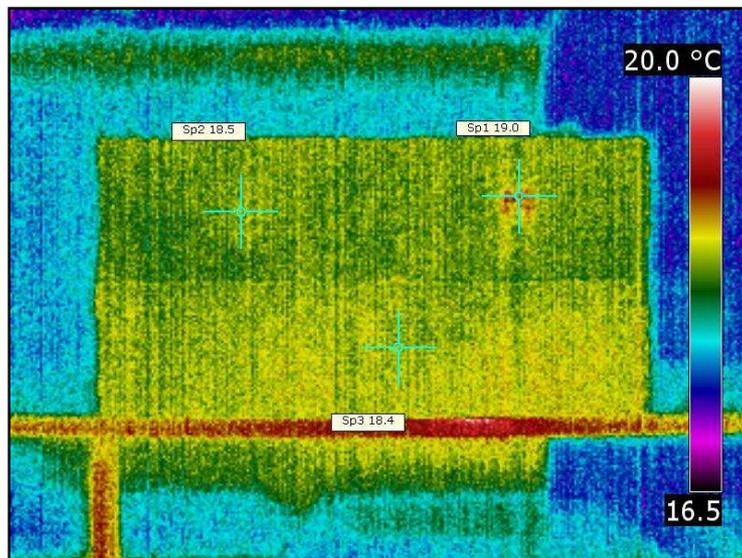


Figura 84. Distanza L: Fase di riscaldamento. Istante finale $t = 7$ minuti.

Solamente il difetto di adesione realizzato con lo spessore in Plastica (P) e la conseguente presenza di bolle d'aria ha determinato una distribuzione anomala della Temperatura superficiale del provino C12.

In Figura 85 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante $t = 7$ minuti caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno e l'istante $t = 0$ minuti di accensione dello stesso.

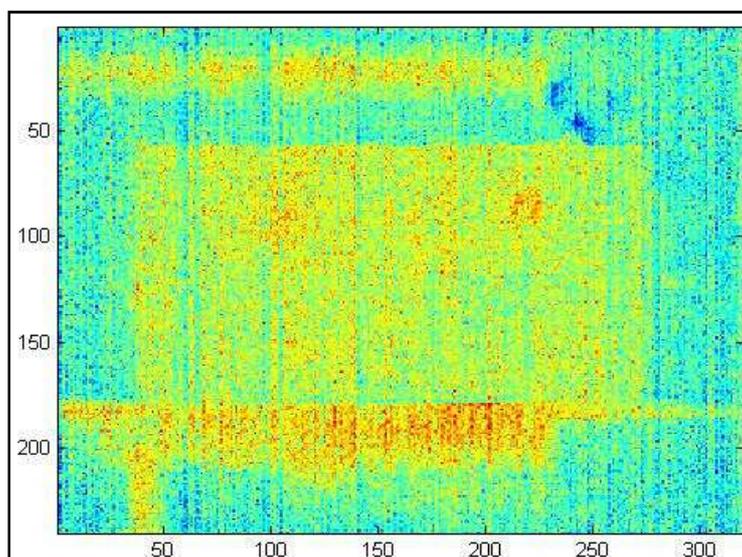


Figura 85. Distanza L: Fase di riscaldamento. Elaborazione Matlab®.

Come si può notare della Figura 85 le anomalie di adesione sono poco visibili a questa distanza.

Distanza L: Fase di raffreddamento

Nella immagine seguente (Fig. 86) è mostrato il primo termogramma della fase di raffreddamento dei provini C11_C12 della distanza L.

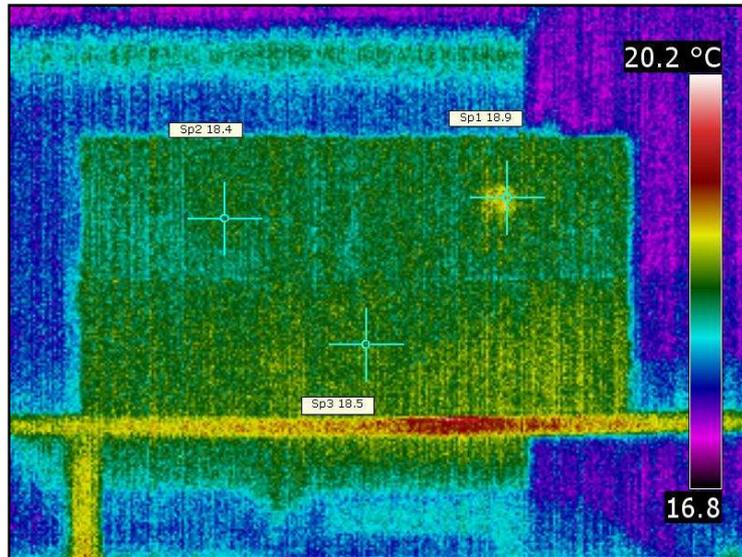


Figura 86. Distanza L: Fase di raffreddamento. Istante iniziale $t = 10$ secondi.

Trascorsi 10 secondi dallo spegnimento del faretto le temperature in corrispondenza dei difetti di adesione sono diminuite di circa 1.0°C rispetto all'ultimo termogramma della fase di riscaldamento.

In Figura 87 è mostrata la sottrazione dei termogrammi effettuata con Matlab®, fra l'istante iniziale, caratterizzato dallo spegnimento del faretto alogeno, e l'istante $t = 2$ minuti di fine acquisizione.

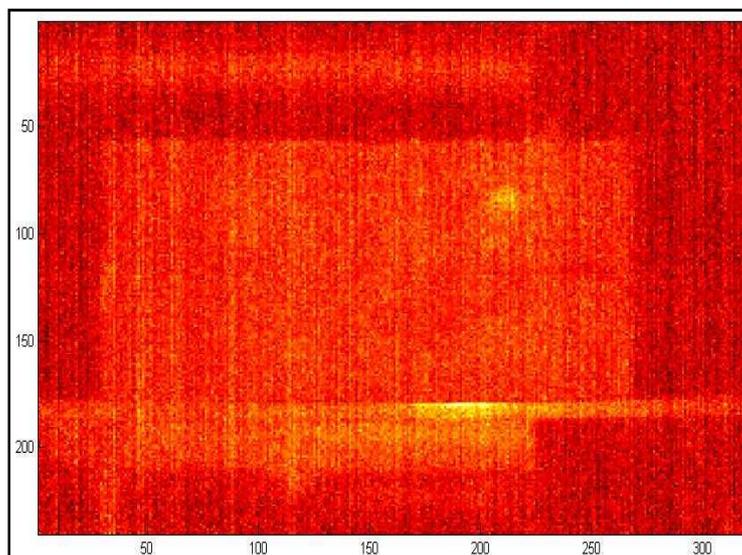


Figura 87. Distanza L: Fase di raffreddamento. Elaborazione Matlab®.

Anche nella fase di raffreddamento a questa distanza, solo il difetto di adesione realizzato con lo spessore in Plastica è leggermente visibile.

3.5 Considerazioni

Le prove Termografiche sui provini rinforzati con le differenti tecnologie sono state condotte adottando un approccio di tipo attivo secondo due modalità operative. In una prima fase, durante la quale sono stati sottoposti a prova i soli travetti rinforzati con le reti e le lamine in FRP, i provini sono stati sottoposti ad un riscaldamento in un forno elettrico, ad una temperatura di 45°C per circa un'ora. È stata poi seguita e monitorata la fase di raffreddamento durante la quale sono stati registrati i termogrammi con una scadenza temporale fra gli stessi di 1 minuto. L'analisi dei termogrammi e delle relative elaborazioni in Matlab® non sempre ha consentito di mettere in evidenza i difetti di adesione.

Nella seconda fase, durante la quale sono stati sottoposti a prova tutti i travetti, si è adoperato un faretto alogeno con potenza di 400 W come sorgente termica. Le prove sono state condotte ponendo il faretto a due distanze differenti dai provini. È stata quindi seguita e monitorata la fase di riscaldamento, durante la quale i provini sono stati sollecitati termicamente tramite il faretto, e la fase di raffreddamento. Per i travetti rinforzati con le reti e le lamine in fibra di carbonio si è prestata particolare attenzione affinché non venisse raggiunta la temperatura di transizione della resina epossidica. L'analisi dei termogrammi e le relative elaborazione con Matlab® hanno consentito di mettere in evidenza solamente due difetti di adesione e precisamente il nastro in Teflon e lo spessore in Plastica a causa della loro capacità di inglobare al proprio interno un diverso volume d'aria.

Conclusioni

Lo scopo principale del lavoro presentato in questa tesi è quello di testare l'attendibilità di diversi sistemi diagnostici di tipo non distruttivo nell'individuazione di anomalie nell'applicazione di rinforzi in compositi fibrorinforzati su elementi in calcestruzzo.

A tal fine, presso lo stabilimento della Unical di Cagliari, sono stati realizzati 45 provini suddivisi in tre Serie, ciascuna costituita da quindici travetti, aventi caratteristiche differenti. La Serie A è caratterizzata da una zona in cui è presente un ripristino eseguito con una malta cementizia a ritiro controllato. La Serie B è costituita da provini pieni. La Serie C presenta una cavità che si sviluppa per tutta la lunghezza dei provini. Per ogni Serie, cinque travetti sono stati rinforzati impiegando differenti tecnologie: reti e lamine in FRP (Fiber Reinforced Polymers) e reti in PBO (Poliparafenilenbenzobisoxazolo). Per ciascuna tipologia di rinforzo, in uno dei provini è stata realizzata la perfetta aderenza con il calcestruzzo, mentre nei restanti 4 sono state inserite, nell'interfaccia rinforzo/calcestruzzo, tre differenti anomalie atte a simulare situazioni di errata applicazione dei compositi. La mancanza di aderenza e l'assenza di impregnazione della rete è stata simulata con un nastro in Teflon, la disomogeneità e l'eccesso di resina è stata realizzata con un accumulo di Colla, la presenza di una bolla d'aria è stata realizzata con uno spessore in Plastica.

I provini sono stati sottoposti a prove non distruttive di tipo ultrasonico e termografico prima e dopo l'applicazione del rinforzo. Le prove ultrasoniche sono state condotte impiegando le Tecniche di Trasmissione Diretta (DTT) e Semidiretta (STT). Nella Tecnica Diretta l'onda acustica è trasmessa attraverso il provino da un trasduttore emettitore ed è poi ricevuta nel lato opposto da un secondo trasduttore ricevitore. Nella Tecnica Semidiretta i due trasduttori emettitore e ricevitore sono posti su due lati adiacenti del provino, in genere fra loro ortogonali. La scelta di utilizzare entrambe le Tecniche di Trasmissione è stata dettata dal fatto che, come suggerito nella EN 12504-4 del 2004, "Testing concrete - Determination of ultrasonic pulse velocity", non sempre i lati opposti dell'elemento sottoposto a prova risultano accessibili e di conseguenza non risulta sempre applicabile la DTT. Dall'applicazione di entrambe le Tecniche di Trasmissione è stato possibile determinare e analizzare i Tempi di Transito T dei segnali lungo percorsi appositamente scelti, aventi lunghezza L intesa come distanza tra i due trasduttori; noti i Tempi di Transito, sono state determinate le Velocità V come semplici rapporti L/T . Sono inoltre state valutate le Ampiezze A del segnale ricevuto, valutate come massimo valore picco - picco dei segnali registrati dal

trasduttore ricevitore, ed infine le Ampiezze Spettrali, intese come massimo valore raggiunto dall'Ampiezza nel dominio delle frequenze. In seguito all'applicazione delle tecniche DTT e STT si nota che i valori dei parametri di studio ottenuti con la STT nei provini non rinforzati sono nettamente inferiori rispetto a quelli ottenuti con la DTT, ed inoltre sono caratterizzati da una maggiore dispersione. Per quanto riguarda i risultati, le due tecniche hanno fornito indicazioni diverse:

- L'analisi delle Velocità acquisite mediante la DTT ha consentito di individuare la presenza della cavità nella Serie C ma non ha determinato alcuna variazione del valore in corrispondenza della malta di ripristino nella Serie A;
- Le Velocità relative alle prove con la STT nelle tre Serie presentano valori tra loro simili, non fornendo pertanto elementi particolarmente utili ai fini diagnostici;
- L'analisi delle Deviazioni Standard dei dati acquisiti con la DTT ha consentito di notare un comportamento simile per le Serie A e C, caratterizzate rispettivamente dalla presenza della malta di ripristino e della cavità. I valori determinati per queste Serie risultano più elevati rispetto a quelli della Serie B costituita dai provini pieni, per la quale pertanto la Velocità può essere considerata un parametro sufficientemente stabile;
- Le Deviazioni Standard relative alle prove con la STT delle tre Serie presentano valori tra loro simili e tendenzialmente più elevati rispetto a quelli relativi alla DTT.

Per quanto riguarda le informazioni ottenute dalle indagini ultrasoniche sui provini rinforzati è stato possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Le analisi delle Velocità Medie acquisite mediante la DTT e la STT eseguite sui provini rinforzati con la rete in FRP non hanno sempre consentito di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione;
- Le analisi delle Velocità Medie relative alle prove con la DTT e la STT condotte sui provini rinforzati con la lamina in FRP e la rete in PBO hanno sempre messo in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione;
- Le Ampiezze Medie del segnale ricevuto, per le acquisizioni effettuate mediante la DTT e la STT, sui provini rinforzati con la rete in FRP hanno mostrato risultati difficilmente interpretabili a causa di una eccessiva sensibilità del parametro rispetto alle modalità operative di esecuzione delle prove: una pressione maggiore dei trasduttori e l'impiego di un quantitativo maggiore del mezzo di accoppiamento, impiegato al fine di garantire l'ottimizzazione della trasmissione

del segnale attraverso l'interfaccia trasduttore - materiale, hanno determinato una considerevole variazione dell'ampiezza del segnale. Tale parametro è infatti strettamente legato all'energia trasportata dal segnale a sua volta sensibilmente influenzata dalle condizioni di trasmissione del segnale stesso. L'analisi effettuata ha comunque mostrato come il parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione, nonostante abbia valenza qualitativa e non quantitativa a causa della eccessiva dispersione dei dati;

- Le Ampiezze Medie determinate tramite la DTT e la STT sui provini rinforzati con le lamine in FRP e la rete in PBO presentano un notevole dispersione messa in evidenza da valori di Deviazione Standard decisamente elevati. Il parametro, pur consentendo di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione, ha pertanto valenza solo qualitativa;
- Le Ampiezze Spettrali Medie relative alle prove con la DTT e la STT sui provini rinforzati con le diverse tecnologie hanno consentito di determinare la presenza di tutti i difetti di adesione e sono caratterizzate da valori di Deviazione Standard meno elevati rispetto alle Ampiezze. Tale parametro appare dunque più stabile rispetto all'ampiezza del Segnale ma comunque meno stabile rispetto alle Velocità;
- I valori determinati tramite la STT, rispetto ai rispettivi valori acquisiti con la DTT, sono generalmente caratterizzati da una maggiore dispersione.

La tecnica termografica adoperata nel corso della sperimentazione è un approccio di tipo attivo che prevede una sollecitazione termica dei provini sottoposti ad indagine ed una contemporanea registrazione, ad intervalli di tempo prestabiliti, della evoluzione della loro temperatura superficiale. Le indagini sono state condotte secondo due modalità operative. In una prima fase, che ha interessato solamente i provini rinforzati con la rete e le lamine in FRP, è stata scelta, come sorgente termica, un forno elettrico. Durante la seconda fase, che ha interessato anche i provini rinforzati con la rete in fibra di PBO, la sorgente termica utilizzata è stata da un faretto alogeno con una potenza pari a 400 W.

Durante la prima fase tre travetti per ogni Serie, uno con difetti di adesione, uno con perfetta aderenza e uno non rinforzato, sono stati posizionati nel forno e riscaldati ad una temperatura pari a 45°C per circa un'ora. È stata quindi monitorata la fase di raffreddamento degli stessi, registrando un termogramma al minuto per circa 45 minuti. Nella scelta della temperatura del forno si è prestata particolare attenzione a non raggiungere la Temperatura di Transizione della resina epossidica impiegata per la messa in opera del rinforzo. I termogrammi e le relative elaborazioni eseguite in

ambiente Matlab®, non hanno sempre consentito di mettere in evidenza la presenza di tutti i difetti di adesione.

Durante la seconda fase sono stati analizzati, per ogni tipologia di rinforzo e per ogni Serie di travetti, due provini contemporaneamente: uno con perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo e uno con difetti. Le prove sono state condotte ponendo il faretto e la termocamera a due distanze differenti dai travetti e quindi seguendo le fasi di riscaldamento e raffreddamento, durante le quali sono stati registrati i termogrammi. L'intervallo di tempo di memorizzazione dei termogrammi ottimale è stato determinato in seguito a studi e tentativi effettuati per ogni singolo materiale di rinforzo. In funzione delle proprietà e degli spessori dei tre rinforzi si è rilevata la necessità di attendere diversi intervalli di tempo affinché l'energia assorbita dal provino per irraggiamento e convezione avesse modo di raggiungere per diffusione l'interfaccia di collegamento rinforzo-calcestruzzo e quindi si potessero rilevare le variazioni di temperatura in corrispondenza delle anomalie di adesione. Inoltre, nella scelta del tempo di sollecitazione termica dei provini si è prestata particolare attenzione per i travetti rinforzati con le reti e le lamine in FRP, a non raggiungere la Temperatura di Transizione della resina epossidica. L'analisi dei termogrammi e delle relative elaborazioni in ambiente Matlab® hanno consentito di trarre le seguenti conclusioni:

- Nei provini rinforzati con la rete in FRP sono stati sempre individuati la mancanza di aderenza e l'assenza di impregnazione della rete realizzata tramite il nastro in Teflon e la presenza della bolla di aria generata dallo spessore in Plastica;
- Nei provini rinforzati con le lamine in FRP, l'indagine condotta ha consentito di individuare la mancanza di aderenza realizzata dal nastro in Teflon e la bolla d'aria generata dallo spessore in Plastica. Inoltre, è stato possibile individuare numerose zone nei travetti di riferimento in cui non è stata realizzata la perfetta adesione fra il rinforzo e il substrato in calcestruzzo;
- Nei provini rinforzati con la rete in PBO sono stati individuati l'assenza di aderenza realizzata tramite il nastro in Teflon e la bolla d'aria generata dallo spessore in Plastica.

Dai risultati ottenuti dalla sperimentazione oggetto di questa tesi è possibile concludere che il metodo di prova ultrasonico e le relative analisi delle Velocità, delle Ampiezze e delle Ampiezze Spettrali rappresentano un ottimo strumento di indagine in grado di fornire informazioni sulla presenza di disomogeneità strutturali e utile per

l'individuazione di difetti di adesione dei sistemi di rinforzo, realizzati tramite materiale composito, su elementi in calcestruzzo. La tecnica ultrasonica impiegata ha consentito di ottenere informazioni di tipo puntuale: le anomalie sono state individuate in quanto le traiettorie di misura sono state appositamente scelte in modo da intersecare le stesse. D'altra parte, nelle indagini in situ l'operatore non conosce a priori la posizione dei difetti e delle anomalie di adesione e nasce quindi l'esigenza di impiegare ulteriori metodi di prova che consentano di individuare con miglior precisione il campo di indagine. La tecnica termografica, caratterizzata dal vantaggio di poter essere eseguita a distanza su un'ampia porzione di struttura e di consentire l'analisi in tempo reale dell'oggetto indagato in maniera rapida e a costo contenuto, si dimostra quindi utile per una prima localizzazione dei difetti e per la individuazione delle zone caratterizzate da una distribuzione anomala della Temperatura. I risultati si presentano comunque fortemente influenzati dalle caratteristiche ambientali, ottiche e termiche e da quelle del materiale indagato.

Le indagini sperimentali finora condotte, ed i relativi dati raccolti ed elaborati, consentono di formulare una ipotesi di metodologia operativa orientata alla caratterizzazione dei compositi fibrorinforzati su elementi in calcestruzzo, ed alla individuazione di eventuali difetti/anomalie presenti sulla superficie e nel volume di tali elementi.

Quanto emerso dalla sperimentazione suggerisce la seguente sequenza operativa:

- Primo impiego della Tecnica Termografica con lo scopo di individuare in maniera grossolana le zone caratterizzate da una anomala distribuzione di temperatura;
- Ulteriore impiego della Tecnica Termografica sulle zone individuate in modo da ottenere informazioni più dettagliate sulla presenza, la geometria e le dimensioni delle disomogeneità;
- Utilizzo della Tecnica Ultrasonica in corrispondenza delle anomalie individuate nel tentativo di caratterizzarle e discriminarle quantitativamente.

Per quanto concerne l'impiego delle indagini termografiche e la relativa analisi dei risultati emerge l'importanza di condurre uno studio dettagliato dei termogrammi al fine di individuare le zone caratterizzate da una effettiva distribuzione anomala della temperatura distinguendole da facili e possibili riflessioni. Oltre a ciò, risulta di fondamentale importanza l'elaborazione delle immagini con software specifici in grado di evidenziare le disomogeneità presenti. Infatti è possibile, realizzando una sottrazione di immagini, pixel per pixel, della temperatura fra un termogramma

determinato in corrispondenza del tempo di fine acquisizione e quello relativo al tempo iniziale, mettere meglio in evidenza la presenza di difetti e di anomalie termiche non immediatamente visibili, e contemporaneamente di ridurre gli errori di interpretazione dei termogrammi stessi.

Per quanto concerne l'applicazione delle prove ultrasoniche e l'analisi dei loro risultati, la sperimentazione evidenzia l'efficacia dell'analisi comparata di differenti parametri legati alla trasmissione dell'onda, quali Velocità di propagazione, Ampiezza del segnale ricevuto o Attenuazione del segnale e Ampiezza Spettrale. Infatti, tramite tutti questi parametri, come precedentemente descritto, è possibile ottenere informazioni differenti sull'applicazione dei rinforzi in materiale composito fibrorinforzato su elementi in calcestruzzo.

I risultati raggiunti con l'applicazione combinata delle due tecniche di prova hanno consentito di ottenere un quadro dettagliato e preciso della qualità dell'applicazione dei sistemi di rinforzo, e quindi, la metodologia di prova presentata può essere considerata uno strumento importante per il controllo della qualità dei rinforzi strutturali.

Le analisi condotte sino ad oggi si propongono inoltre come un punto di partenza per successivi approfondimenti, quali ad esempio per le prove ultrasoniche, la modifica del segnale di ingresso e l'impiego di un diverso mezzo di accoppiamento, ed anche l'applicazione combinata ultrasonica/termografica su elementi di strutture esistenti rinforzate con materiali compositi.

Appendice A

Malta di ripristino: Provini Serie A

Nella Tabella 1 è mostrato un quadro riassuntivo delle dimensioni dei provini della Serie A necessario per il calcolo del volume totale di malta.

Tabella 1. *Calcolo volume della malta.*

Elemento realizzato	Altezza [m]	Lato 1 [m]	Lato 2 [m]	Numero elementi	Volume malta [m ³]
Prisma per travetti	0.05	0.15	0.2	15	0.0225

Una volta determinato il volume totale di malta necessario per la realizzazione dei getti, attraverso le formule seguenti, è stato calcolato il peso dell'impasto:

$$M_v = 2200 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Peso specifico della malta}$$

$$V_m = 0.0225 \text{ m}^3 \quad \text{Volume totale di malta}$$

$$M_m = M_v \cdot V_m = 49.5 \text{ kg} \quad \text{Massa totale di malta}$$

Valutata la massa totale di malta è stato possibile calcolare il quantitativo di acqua necessario per realizzare il volume di impasto richiesto. La scheda tecnica del prodotto prescrive 16 parti d'acqua per ogni 100 parti di polvere del prodotto. La quantità di malta è stata aumentata per tener conto della dispersione durante le fasi di getto. Le quantità di acqua e polvere sono quindi state determinate come indicato di seguito:

$$M_m = 50 \text{ kg} \quad \text{Massa malta}$$

$$C_a = 16 \quad \text{Parti di acqua per l'impasto}$$

$$C_c = 100 \quad \text{Parti di polvere per l'impasto}$$

$$M_a = \frac{M_m}{(C_c + C_a)} \cdot C_a = 6.90 \text{ litri} \quad \text{Quantitativo di acqua per l'impasto}$$

Rete in FRP: Primer

In funzione della resa del primer, indicata nella scheda tecnica del prodotto, è stato possibile determinare la quantità di prodotto necessaria per i provini:

$$R_p = 0.250 \text{ kg/m}^2 \quad \text{Resa del primer}$$

$$S_p = n \cdot l_1 \cdot l_2 = 1.35 \text{ m}^2 \quad \text{Superficie totale}$$

dove:

$$n = 15 \quad \text{Numero travetti}$$

$$l_1 = 0.6 \text{ m} \quad \text{Lunghezza provino}$$

$$l_2 = 0,15 \text{ m} \quad \text{Larghezza provini}$$

$$M_p = R_p \cdot S_p = 0.337 \text{ kg}$$

Quantità totale di primer

$$M_A = \frac{M_p}{(C_A + C_B)} \cdot C_A = 0.22 \text{ kg}$$

Quantità del componente A

$$M_B = \frac{M_p}{(C_A + C_B)} \cdot C_B = 0.11 \text{ kg}$$

Quantità del componente A

dove C_A e C_B sono riportati nella Scheda Tecnica del prodotto e sono rispettivamente pari a 2 e 1.

Rete in FRP: 1° strato di resina epossidica

Impiegando il parametro resa della resina presente nella Scheda Tecnica del prodotto secondo i seguenti calcoli è stato possibile determinare la quantità di prodotto necessaria per i provini:

$$R_r = 0.5 \text{ kg/m}^2$$

Resa della resina

$$S_r = n \cdot l_1 \cdot l_2 = 1.35 \text{ m}^2$$

Superficie totale

dove:

$$n = 15$$

Numero travetti

$$l_1 = 0.6 \text{ m}$$

Lunghezza provino

$$l_2 = 0,2 \text{ m}$$

Larghezza provino

$$M_r = R_r \cdot S_r = 0.675 \text{ kg}$$

Quantità totale di resina

$$M_A = \frac{M_r}{(C_A + C_B)} \cdot C_A = 0.45 \text{ kg}$$

Quantità necessaria componente A

$$M_B = \frac{M_r}{(C_A + C_B)} \cdot C_B = 0.225 \text{ kg}$$

Quantità necessaria componente B

dove C_A e C_B sono riportati nella Scheda Tecnica del prodotto e sono rispettivamente pari a 2 e 1.

Rete in FRP: 2° strato di resina epossidica

Impiegando il parametro resa della resina presente nella Scheda Tecnica del prodotto secondo i seguenti calcoli è stato possibile determinare la quantità di prodotto necessaria per i provini:

$$R_r = 0.3 \text{ kg/m}^2$$

Resa della resina

$$S_r = n \cdot l_1 \cdot l_2 = 1.35 \text{ m}^2$$

Superficie da impregnare

dove:

$$n = 15$$

Numero travetti

$$l_1 = 0.6 \text{ m}$$

Lunghezza provino

$$l_2 = 0.15 \text{ m}$$

Larghezza provino

$$M_r = R_r \cdot S_r = 0.405 \text{ kg}$$

Quantità totale di resina

$$M_A = \frac{M_r}{(C_A + C_B)} \cdot C_A = 0.27 \text{ kg}$$

Quantità necessaria componente A

$$M_B = \frac{M_r}{(C_A + C_B)} \cdot C_B = 0.135 \text{ kg}$$

Quantità necessaria componente B

dove C_A e C_B sono riportati nella Scheda Tecnica del prodotto e sono rispettivamente pari a 2 e 1.

Lamina in FRP

Di seguito vengono indicati i calcoli effettuati per determinare il quantitativo totale di resina necessario, tenendo presente che su ogni travetto è stato deciso di disporre due lamine tra loro affiancate:

$$D_r = 1660 \text{ kg/m}^3$$

Densità della resina

$$V_r = s_r \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot n_l \cdot n_p = 0.0018 \text{ m}^3$$

Volume totale di resina

dove:

$$s_r = 0.002 \text{ m}$$

Spessore di resina per lamina

$$l_1 = 0.6 \text{ m}$$

Lunghezza lamina

$$l_2 = 0.05 \text{ m}$$

Larghezza lamina

$$n_l = 2$$

Numero lamine per travetto

$$n_p = 15$$

Numero travetti rinforzati con le lamine

$$M_r = D_r \cdot V_r = 2.99 \text{ kg}$$

Quantità totale di resina.

La scheda tecnica della resina bicomponente fornita dal produttore prescrive che i due componenti A e B devono essere miscelati fra di loro in maniera tale da rispettare il rapporto in peso di 100 a 25. Prendendo in considerazione un incremento del quantitativo totale di resina necessario per tener conto delle parti disperse durante la messa in opera delle lamine, è stato possibile determinare le quantità necessarie dei due componenti attraverso i calcoli di seguito riportati:

$$M_r = 3.2 \text{ kg}$$

Massa resina realizzata

$$M_A = \frac{M_r}{(C_A + C_B)} \cdot C_A = 2.56 \text{ kg}$$

Quantitativo componente A

$$M_B = \frac{M_r}{(C_A + C_B)} \cdot C_B = 0.64 \text{ kg}$$

Quantitativo componente B

dove C_A e C_B sono riportati nella Scheda Tecnica del prodotto e sono rispettivamente pari a 100 e 25.

Rete in PBO

Di seguito vengono indicati i calcoli effettuati per determinare la quantità di malta necessaria per il rinforzo dei travetti:

$$R_m = 1.250 \text{ kg/m}^2 / \text{mm} \quad \text{Resa del prodotto}$$

$$S_m = l_1 \cdot l_2 = 0.09 \text{ m}^2 \quad \text{Superficie del prisma}$$

dove:

$$l_1 = 0.6 \text{ m} \quad \text{Lunghezza prisma}$$

$$l_2 = 0.15 \text{ m} \quad \text{Larghezza prisma}$$

In funzione dei valori sopra riportati è stato quindi possibile determinare la massa totale di malta fresca necessaria per realizzare il rinforzo dei travetti, e di conseguenza il quantitativo totale del prodotto in polvere e il volume totale di acqua necessaria:

$$M_m = R_m \cdot S_m \cdot s \cdot n_s \cdot n_p = 10.125 \text{ kg} \quad \text{Massa totale polvere per 15 prismi}$$

$$r_{a/l} = 0.26 \text{ l/kg} \quad \text{Rapporto acqua/legante malta fresca}$$

$$Q_a = M_m \cdot r_{a/l} = 2.63 \text{ l} \quad \text{Quantitativo di acqua}$$

dove:

$$s = 3 \text{ mm} \quad \text{Spessore singolo strato}$$

$$n_s = 2 \quad \text{Numero strati per travetto}$$

$$n_p = 15 \quad \text{Numero travetti}$$

Appendice B

1. Travetti Serie B rinforzata con la rete in FRP

Nei travetti della Serie B il rinforzo è stata applicato sul lato contrassegnato con il numero 1.

Risultati Velocità dell'applicazione della DTT

In Tabella 1 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutate su tutti i travetti della Serie.

Tabella 1. Valori della DTT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di carbonio.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
B1	1 - 3	61.00	2459.02
		70.00	2142.86
		71.00	2112.68
	2 - 4	51.80	2895.75
		61.60	2435.06
		55.80	2688.17
B3	1 - 3	71.20	2106.74
		53.80	2788.10
		71.20	2106.74
	2 - 4	53.60	2798.51
		52.40	2862.60
		59.20	2533.78
B5	1 - 3	106.00	1415.09
		60.80	2467.11

	2 - 4	72.40	2071.82
		60.40	2483.44
		55.60	2697.84
B7	1 - 3	51.20	2929.69
		104.40	1436.78
		64.40	2329.19
	2 - 4	59.20	2533.78
		60.80	2467.11
		65.20	2300.61
B9	1 - 3	64.80	2314.81
		87.20	1720.18
		63.20	2373.42
	2 - 4	66.00	2272.73
		61.60	2435.06
		68.40	2192.98
		59.60	2516.78

I tre difetti presenti nei travetti B3, B5, B7 e B9 nelle acquisizioni tramite la DTT vengono intercettati ciascuno una sola volta in corrispondenza del percorso 1 - 3.

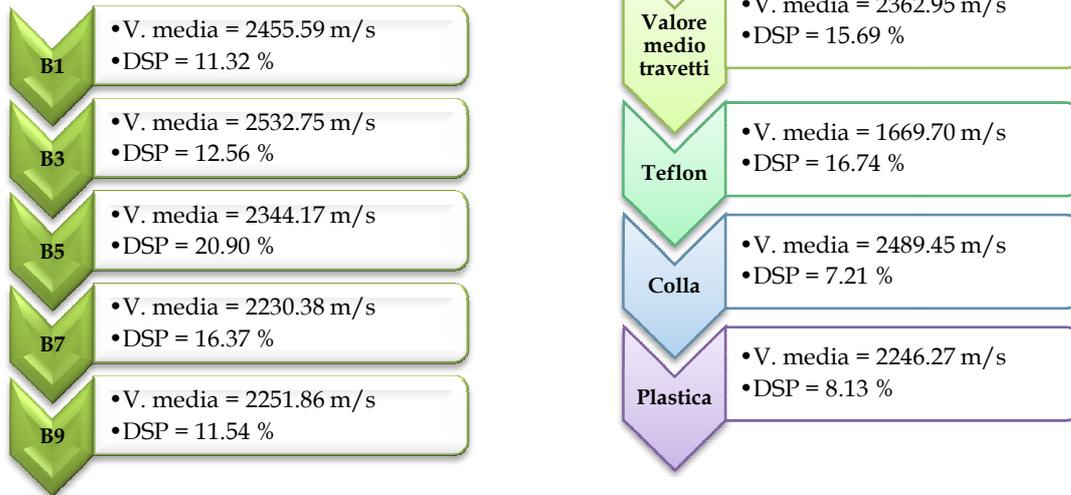
Nella Tabella seguente sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 2. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1415.09 nel provino B5	2106.74 nel provino B3
Colla	2329.19 nel provino B7	2788.10 nel provino B3
Plastica	2071.78 nel provino B5	2533.78 nel provino B7

In Tabella 3 sono riportate le Velocità Medie dei singoli provini della Serie con le corrispondenti Deviazioni Standard Percentuali (DSP). Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 3. Valori medi della DTT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione non altera il valore della Velocità Media nei singoli travetti, mentre le DSP sono più elevate nei provini in cui sono state realizzate le tre anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 700 m/s;
- l'accumulo di Colla non ha determinato alcun decremento;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento di circa 100 m/s.

Nel Grafico 1 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento B1, quella di tutti i provini con difetti (B3/5/7/9) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

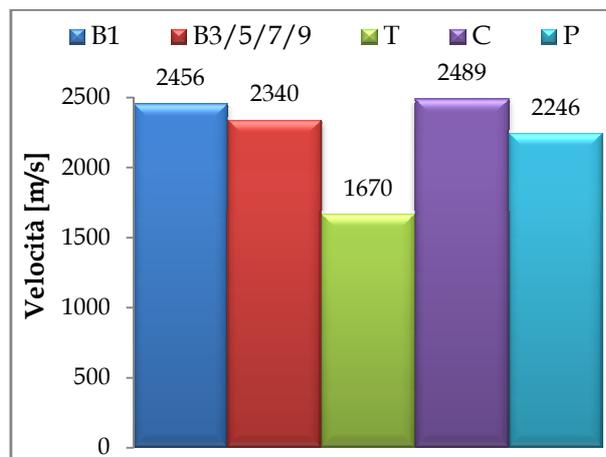


Grafico 1. Valori medi delle Velocità determinati tramite la DTT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

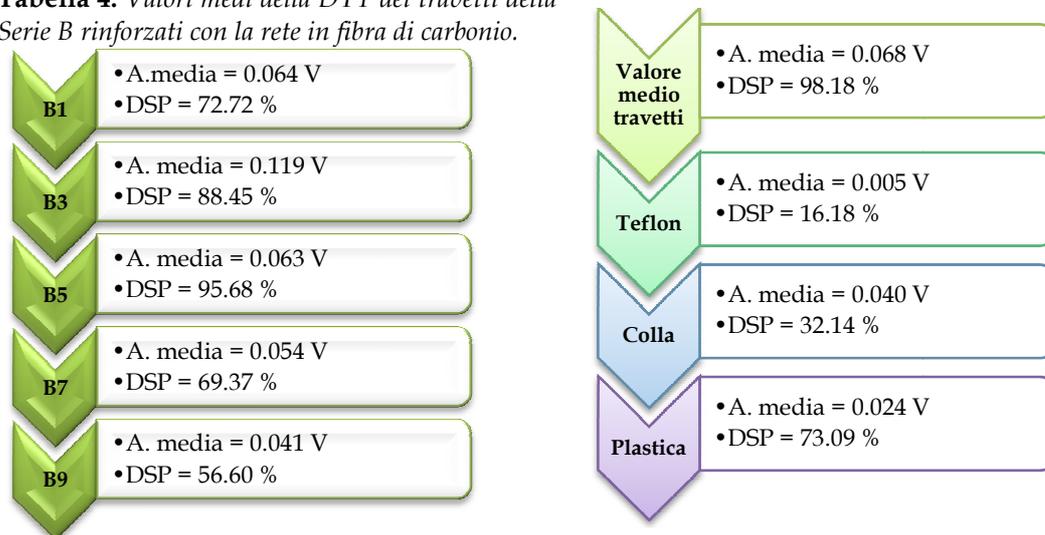
Dal Grafico 1 e dai valori numerici indicati nella Tabella 3 è possibile notare come dei tre difetti, solo la mancanza di adesione realizzata con il nastro in Teflon è

individuata in quanto ha causato, rispetto al valore del provino di confronto B1, un considerevole incremento del Tempo di Transito del segnale UT e un conseguente decremento della Velocità. Inoltre il decremento di Velocità determinato in corrispondenza di questo difetto è superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino B1, che è risultato pari a 277.99 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 4 sono riportati i valori medi delle Ampiezze del Segnale registrate dal trasduttore ricevitore e le relative DSP nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze determinate tramite la DTT e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 4. Valori medi della DTT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 2 sono rappresentati valori medi delle Ampiezze determinate mediante l'applicazione della DTT dei segnali. Dai valori numerici riportati in Tabella 4 e dal Grafico 2 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. L'analisi dell'Ampiezza è quindi più adatta, rispetto a quella della Velocità, nella individuazione dei difetti e delle anomalie. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo, e non quantitativo, a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 4.

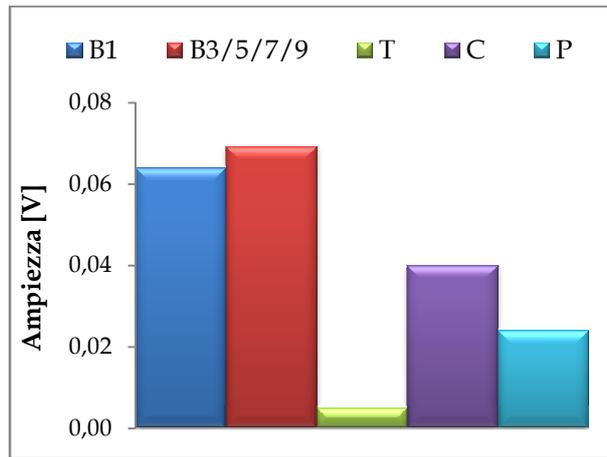


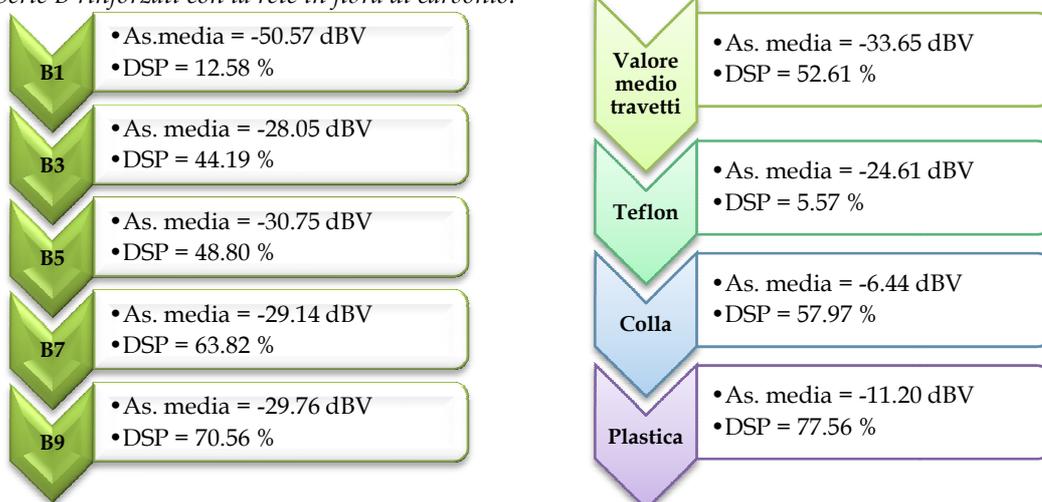
Grafico 2. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite la DTT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

La causa principale dell'elevata dispersione dei dati è legata alla eccessiva sensibilità di questo parametro rispetto alle modalità operative: una pressione maggiore dei trasduttori sulla superficie dei provini e un quantitativo maggiore del mezzo di accoppiamento possono determinare una notevole variazione dell'Ampiezza del segnale. Si vuole comunque sottolineare l'importanza di questo parametro, in quanto il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato per il provino di confronto B1 e a quello calcolato come media di tutti i provini con i difetti (B3/5/7/9).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 5 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP nei singoli prismi della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 5. Valori medi della DTT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 3 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dall'analisi del Grafico e della Tabella 33 è evidente come questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione, ed inoltre sia caratterizzato da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell'Ampiezza del segnale ricevuto.

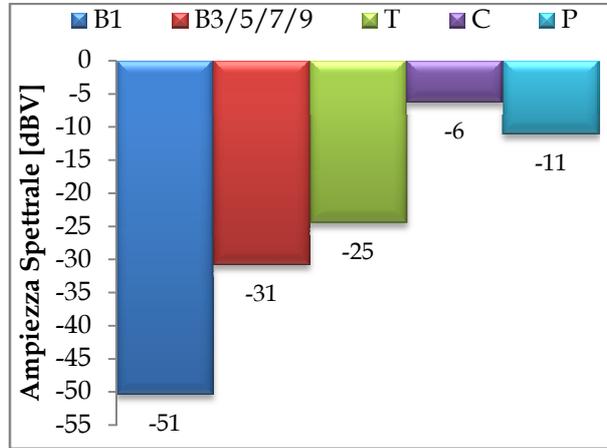


Grafico 3. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie B rinforzata con la rete in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato, rispetto al provino di confronto B1, una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale calcolato su tutti i provini con difetti (B3/5/7/9). Il nastro in Teflon rispetto agli altri difetti, a differenza di quanto osservato nelle precedenti analisi, ha determinato il minor decremento dell'Ampiezza Spettrale.

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

Nella Tabella 6 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle rispettive Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutate su tutti i travetti della Serie.

Tabella 6. Valori della STT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di carbonio

Travetto	Percorso	Tempo [µs]	Velocità [m/s]
B1	1 - 2	57.40	1847.84
		47.20	2247.16
		61.20	1733.10
	1 - 4	53.00	2001.25
		60.40	1756.06
		47.80	2218.95
	3 - 2	52.60	2016.46
		45.20	2346.59
		44.20	2399.68
	3 - 4	53.00	2001.25
		46.40	2285.91

B3	1 - 2	50.60	2096.17	
		90.40	1173.30	
		61.60	1721.85	
		85.60	1239.09	
	1 - 4	65.60	1616.86	
		59.80	1773.68	
		67.60	1569.02	
		44.60	2378.16	
	3 - 2	42.80	2478.18	
		42.80	2478.18	
		47.60	2228.28	
		47.80	2218.95	
3 - 4	44.40	2388.87		
	81.60	1299.83		
	B5	1 - 2	59.20	1791.66

	1 - 4	62.80	1688.95
		81.20	1306.23
		60.00	1767.77
		66.80	1587.81
	3 - 2	46.00	2305.78
		44.40	2388.87
		48.40	2191.45
	3 - 4	44.00	2410.59
		46.00	2305.78
		50.80	2087.91
		76.00	1395.61
		61.60	1721.85
B7	1 - 2	58.00	1828.72
		67.60	1569.02
		55.20	1921.49
	1 - 4	61.60	1721.85
		52.00	2039.73
	3 - 2	49.20	2155.81

	3 - 4	46.80	2266.37	
		59.20	1791.66	
		50.80	2087.91	
		52.40	2024.16	
	B9	1 - 2	71.20	1489.69
			62.40	1699.78
			65.60	1616.86
		1 - 4	74.00	1433.32
			57.20	1854.30
			65.20	1626.78
			52.00	2039.73
			51.60	2055.54
3 - 2	47.60	2228.28		
	44.80	2367.55		
	50.80	2087.91		
	52.80	2008.83		

Le tre anomalie di adesione sono intercettate in corrispondenza delle acquisizioni effettuate nei percorsi 1 - 2 e 1 - 4. Nella Tabella 25 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre difetti.

Tabella 7. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1173.30 nel provino B3	1616.86 nel provino B3
Colla	1699.78 nel provino B9	1921.49 nel provino B7
Plastica	1239.09 nel provino B3	1828.72 nel provino B7

In Tabella 8 sono riportate le Velocità Medie dei singoli provini della Serie con le corrispondenti Deviazioni Standard Percentuali (DSP). Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 8. Valori medi della STT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di carbonio.

B1	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 2079.20 m/s •DSP = 10.38 %
B3	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1938.70 m/s •DSP = 23.68 %
B5	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1927.72 m/s •DSP = 20.22 %
B7	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1877.02 m/s •DSP = 12.94 %
B9	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1875.71 m/s •DSP = 15.34 %

Valore medio travetti	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1939.67 m/s •DSP = 17.54 %
Teflon	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1410.48 m/s •DSP = 9.84 %
Colla	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1781.55 m/s •DSP = 3.92 %
Plastica	<ul style="list-style-type: none"> •V. media = 1609.89 m/s •DSP = 9.98 %

La presenza dei tre difetti di adesione altera leggermente il valore della Velocità Media nei singoli travetti ed inoltre le DSP sono sensibilmente più elevate nei provini in cui sono state realizzate le tre anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 500 m/s;
- l'accumulo di Colla ha determinato un decremento nettamente inferiore pari a circa 150 m/s;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento di circa 300 m/s.

Nel Grafico 4 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento B1 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (B3/5/7/9) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C, P).

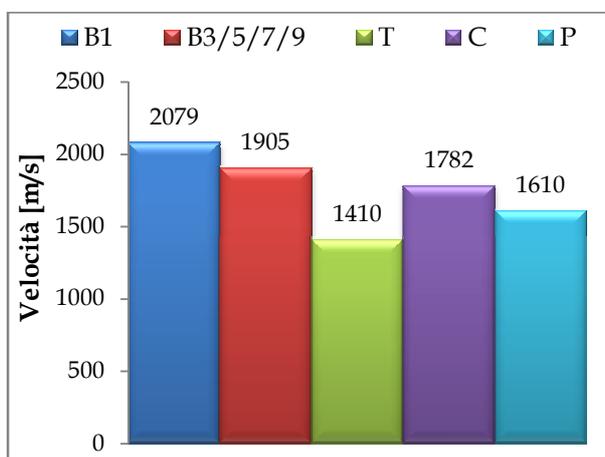


Grafico 4. Valori medi delle Velocità determinati mediante l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 8 e dal Grafico 4 si può notare come dei tre difetti quello realizzato tramite il nastro in Teflon (T) abbia determinato, rispetto al travetto di riferimento B1, un decremento della Velocità pari a circa 600 m/s. Gli altri difetti, (C) e (P) invece, hanno determinato un decremento pari a circa 150 - 300 m/s. Solo la mancanza di aderenza provocata dal nastro in Teflon e la presenza della bolla d'aria realizzata con lo spessore in Plastica hanno indotto, rispetto al provino di confronto B1, un decremento di Velocità superiore al suo valore di Deviazione Standard Relativa che è risultata pari a 215.79 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

Nella tabella successiva sono riportate le Ampiezze Medie del segnale e le relative DSP registrate dal trasduttore ricevitore nei singoli provini della Serie. Sono inoltre

indicati i valori medi delle Ampiezze e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione T, C e P.

Tabella 9. Valori medi della STT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di carbonio.

B1	•A. media = 0.057 V •DSP = 82.57 %	Valore medio travetti	•A. media = 0.063 V •DSP = 101.73 %
B3	•A. media = 0.056 V •DSP = 114.59 %	Teflon	•A. media = 0.006 V •DSP = 60.19 %
B5	•A. media = 0.061 V •DSP = 98.15 %	Colla	•A. media = 0.020 V •DSP = 67.93 %
B7	•A. media = 0.089 V •DSP = 94.60 %	Plastica	•A. media = 0.009 V •DSP = 66.47 %
B9	•A. media = 0.054 V •DSP = 100.80 %		

Nel Grafico 5 sono rappresentate le Ampiezze Medie del segnale. Dai valori numerici indicati in Tabella 9 e dal Grafico 5 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta la individuazione di tutti i difetti di adesione predisposti sui travetti sottoposti a prova. Il nastro in Teflon è il difetto che ha determinato la maggiore riduzione dell'Ampiezza del segnale. Il Grafico 5, come nel caso dell'applicazione della DTT, ha valenza qualitativa a causa dell'elevata dispersione dei dati come messo in evidenza dai valori di DSP indicati nella Tabella 9.

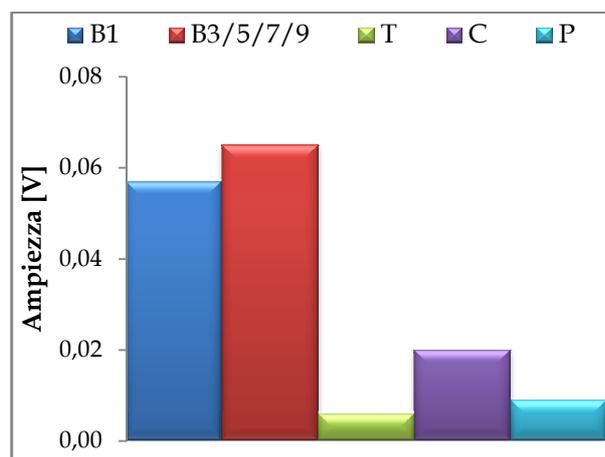


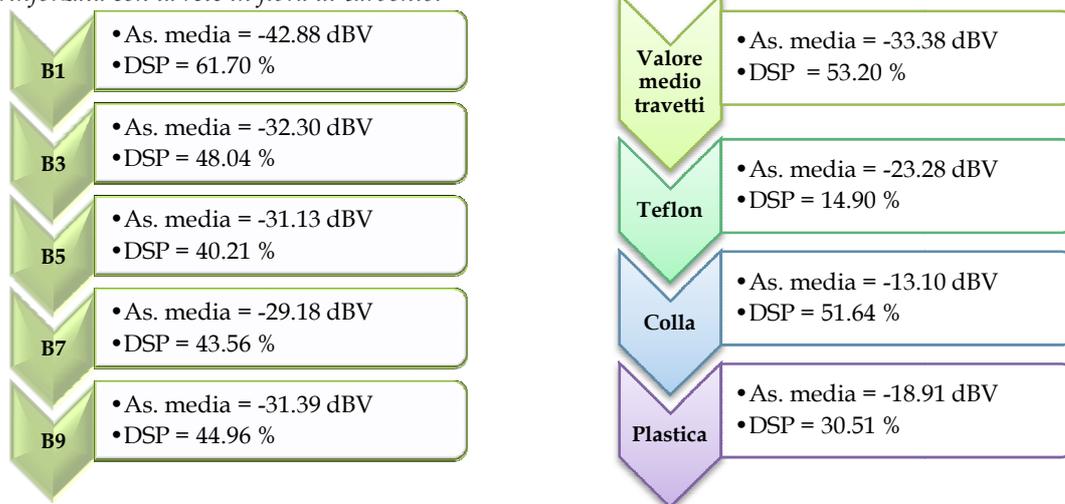
Grafico 5. Valori medi delle Ampiezze determinati tramite l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello individuato nel provino di riferimento B1 e a quello calcolato su tutti i provini con difetti (B3/5/7/9).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 10 sono riportati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale determinati tramite l'applicazione della STT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP determinate nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP della intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 10. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 6 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate con l'applicazione della STT. Dai valori numerici indicati nella Tabella 10 e dal Grafico 6 è evidente come l'analisi dell'Ampiezza Spettrale consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di Deviazioni Standard Percentuali nettamente inferiori rispetto a quelli determinati per l'Ampiezza del segnale ricevuto.

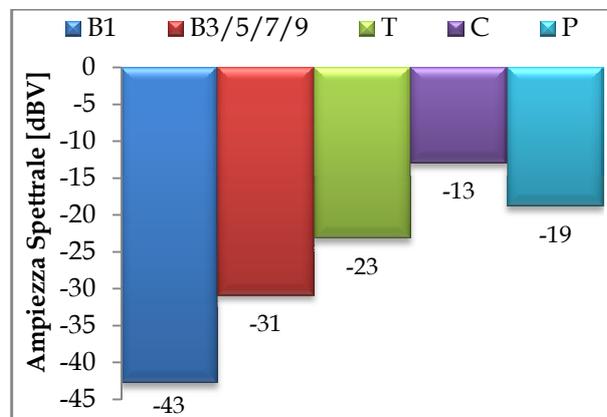


Grafico 6. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate con l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la rete FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento B1, una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale

di tutti i provini (B3/5/7/9). Il nastro in Teflon, ossia la mancanza di aderenza FRP/calcestruzzo, è l'anomalia che ha inciso in minor misura rispetto agli altri, determinando infatti la minore alterazione dell'Ampiezza Spettrale a differenza di quanto messo in evidenza nell'analisi delle Velocità Medie e delle Ampiezze Medie.

2. Travetti Serie C rinforzati con la rete in FRP

Nei travetti appartenenti a questa Serie, caratterizzati dalla presenza di una cavità disposta seconda la loro lunghezza, la rete in FRP è stata applicata sul lato contrassegnato con il numero 4.

Risultati Velocità dell'applicazione della DTT

Nella Tabella 11 sono indicati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità determinate nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutate su tutti i travetti della Serie.

Tabella 11. Valori della DTT dei travetti della Serie C rinforzati con la rete in fibra di carbonio.

Travetto	Percorso	Tempo [µs]	Velocità [m/s]
C1	1 - 3	69.40	2161.38
		69.20	2167.63
		71.00	2112.68
	2 - 4	71.40	2100.84
		72.20	2077.56
		68.40	2192.98
C3	1 - 3	63.80	2351.10
		57.60	2604.17
		64.00	2343.75
	2 - 4	83.60	1794.26
		61.60	2435.06
		80.80	1856.44
C5	1 - 3	72.00	2083.33
		71.60	2094.97
		72.40	2071.82

	2 - 4	120.40	1245.85
		81.20	1847.29
		86.00	1744.19
C7	1 - 3	79.20	1893.94
		85.60	1752.34
		78.40	1913.27
	2 - 4	104.00	1442.31
		77.20	1943.01
		93.20	1609.44
C9	1 - 3	78.80	1903.55
		73.00	2054.79
		77.00	1948.05
	2 - 4	106.40	1409.77
		102.00	1470.59
		70.40	2130.68

I tre difetti di adesione presenti nei provini C3, C5, C7 e C9 sono intercettati ciascuna una sola volta in corrispondenza delle acquisizioni effettuate nel percorso 2 - 4. Nella Tabella 12 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

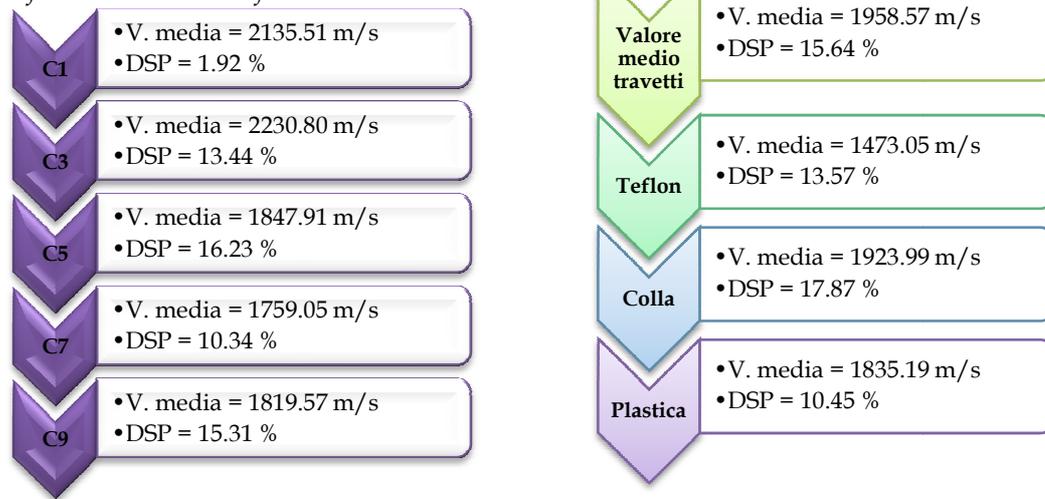
Tabella 12. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1245.85 nel provino C5	1794.26 nel provino C3
Colla	1470.59 nel provino C9	2435.06 nel provino C3
Plastica	1609.44 nel provino C7	2130.68 nel provino C9

Le Velocità rilevate mediante l'applicazione della DTT nella Serie C, come già riscontrato nelle analisi effettuate sui provini non rinforzati, sono inferiori ai valori riportati per le Serie A e B a causa della presenza della cavità.

In Tabella 13 sono riportate le Velocità Medie dei singoli provini della Serie con le corrispondenti Deviazioni Standard Percentuali (DSP). Sono inoltre indicate le Velocità medie e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelle valutate in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 13. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione non altera il valore della Velocità Media nei singoli travetti, mentre le DSP sono sensibilmente più elevate nei provini in cui sono state realizzate le tre anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 500 m/s;
- l'accumulo di Colla non ha prodotto alcun decremento;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento pari a circa 100 m/s.

Nel Grafico 7 è rappresentata la Velocità media del travetto di riferimento C1 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini con difetti (C3/5/7/9) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

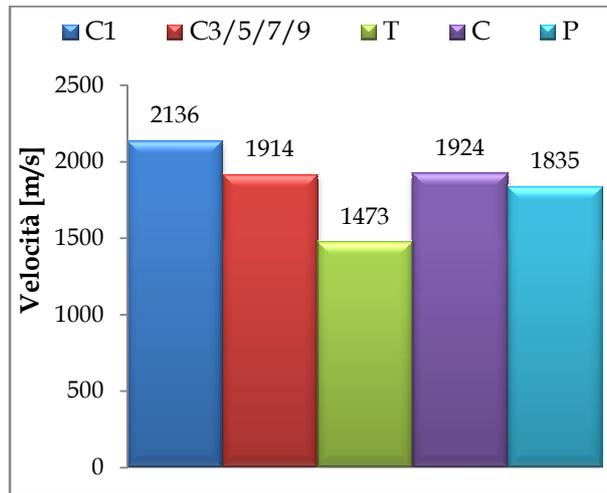


Grafico 7. Valori medi delle Velocità determinati tramite l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

Dal Grafico 7 e dai riportati in Tabella 13 è possibile notare come i tre difetti siano individuati in quanto hanno determinato rispetto al valore medio del provino di riferimento C1, un considerevole incremento del Tempo di Transito del segnale UT e conseguentemente un decremento della Velocità. Inoltre il decremento di Velocità in corrispondenza dei difetti, T, C e P, è nettamente superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino di confronto C1 che è risultata pari a 41.00 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 14 sono riportati i valori medi delle Ampiezze determinati mediante l'applicazione della DTT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze valutate tramite la DTT e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei difetti di adesione.

Tabella 14. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

C1	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.063 V • DSP = 22.79 %
C3	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.082 V • DSP = 108.14 %
C5	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.123 V • DSP = 100.72 %
C7	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.038 V • DSP = 78.19 %
C9	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.071 V • DSP = 130.76 %
Valore medio travetti	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.075 V • DSP = 113.79 %
Teflon	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.005 V • DSP = 32.43 %
Colla	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.029 V • DSP = 75.89 %
Plastica	<ul style="list-style-type: none"> • A. media = 0.015 V • DSP = 57.84 %

Nel Grafico 8 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze determinate tramite la DTT dei segnali registrati dal trasduttore ricevitore. Dal Grafico 8 e dai dati indicati nella Tabella 14 è evidente come questa analisi consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. L'analisi dell'Ampiezza è quindi più adatta, rispetto a quella della Velocità, nella individuazione dei difetti e delle anomalie. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non quantitativo a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati nella Tabella 14.

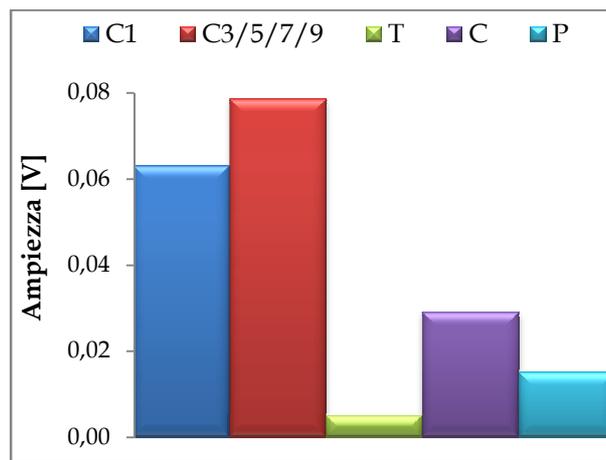


Grafico 8. Valori medi delle Ampiezze determinati mediante l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel provino di confronto C1 e a quello calcolato su tutti i provini con i difetti (C3/5/7/9).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 15 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati mediante l'applicazione della DTT del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 15. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

C1	• As. media = -48.07 dBV • DSP = 6.23 %	Valore medio travetti	• As. media = -33.19 dBV • DSP = 47.63 %
C3	• As. media = -28.28 dBV • DSP = 57.80 %	Teflon	• As. media = -22.42 dBV • DSP = 4.55 %
C5	• As. media = -25.57 dBV • DSP = 59.73 %	Colla	• As. media = -10.58 dBV • DSP = 88.48 %
C7	• As. media = -31.07 dBV • DSP = 51.46 %	Plastica	• As. media = -13.67 dBV • DSP = 35.88 %
C9	• As. media = -32.97 dBV • DSP = 40.32 %		

Nel Grafico 9 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dall'analisi del Grafico e della Tabella 15 è evidente come questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzato da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati per l'Ampiezza del segnale ricevuto.

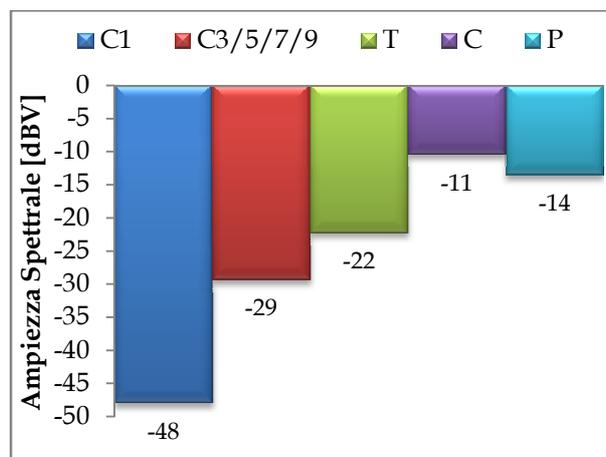


Grafico 9. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la rete in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento C1, una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale di tutti i travetti con le anomalie (C3/5/7/9). Il nastro in Teflon, a differenza di quanto osservato nelle precedenti analisi, ha determinato la minore alterazione dell'Ampiezza Spettrale rispetto agli altri difetti.

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

Nella Tabella 16 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutate su tutti i travetti della Serie.

Tabella 16. Valori della STT dei travetti della Serie C rinforzati con la rete in fibra di carbonio

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]	
C1	1 - 2	66.80	1587.81	
		48.60	2182.43	
		56.40	1880.60	
	1 - 4	61.20	1733.10	
		59.40	1785.62	
		58.40	1816.20	
	3 - 2	50.80	2087.91	
		49.40	2147.09	
		49.40	2147.09	
	3 - 4	60.00	1767.77	
		58.80	1803.84	
		61.20	1733.10	
C3	1 - 2	47.60	2228.28	
		43.40	2443.92	
		41.80	2537.46	
	1 - 4	64.80	1636.82	
		47.40	2237.68	
		67.00	1583.07	
	3 - 2	49.60	2138.43	
		49.40	2147.09	
		48.60	2182.43	
	3 - 4	63.80	1662.48	
		47.20	2247.16	
		70.60	1502.35	
C5	1 - 2	41.20	2574.42	
		48.40	2191.45	
		54.00	1964.19	
	1 - 4	71.20	1489.69	
		60.00	1767.77	
C7	3 - 2	70.40	1506.62	
		50.00	2121.32	
		49.60	2138.43	
	3 - 4	46.00	2305.78	
		80.00	1325.83	
		56.00	1894.04	
	C9	1 - 2	45.60	2326.01
			46.80	2266.37
			48.00	2209.71
		1 - 4	82.40	1287.21
			68.00	1559.79
			55.20	1921.49
3 - 2		55.20	1921.49	
		42.40	2501.56	
		48.40	2191.45	
3 - 4		83.60	1268.73	
		57.20	1854.30	
		64.40	1646.99	
C9	1 - 2	51.80	2047.61	
		43.60	2432.71	
		49.20	2155.81	
	1 - 4	83.60	1268.73	
		54.80	1935.51	
		68.60	1546.15	
	3 - 2	47.00	2256.72	
		50.40	2104.48	
		48.80	2173.48	
	3 - 4	94.00	1128.36	
		69.60	1523.94	
		70.20	1510.91	

Le tre anomalie di adesione sono intercettate durante le acquisizioni in corrispondenza dei percorsi 1 - 4 e 3 - 4. Nella Tabella 17 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza dei difetti.

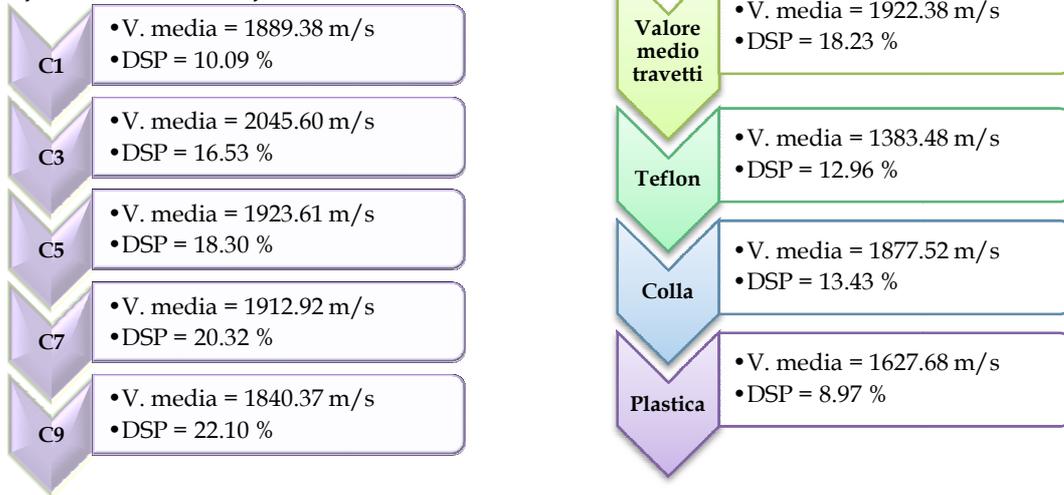
Tabella 17. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1128.36 nel provino C9	1662.48 nel provino C3
Colla	1523.94 nel provino C9	2247.16 nel provino C3
Plastica	1502.35 nel provino C3	1921.49 nel provino C7

In Tabella 18 sono riportate le Velocità Medie dei singoli provini della Serie con le corrispondenti Deviazioni Standard Percentuali (DSP). Sono inoltre indicati i valori

medi delle Velocità e delle rispettive DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 18. Valori medi della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione non altera il valore della Velocità Media nei singoli travetti mentre le DSP sono più elevate nei provini in cui sono state realizzate le anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 550 m/s;
- l'accumulo di Colla non ha prodotto alcun decremento;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento pari a circa 300 m/s.

Nel Grafico 10 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento C1, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (C3/5/7/9) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

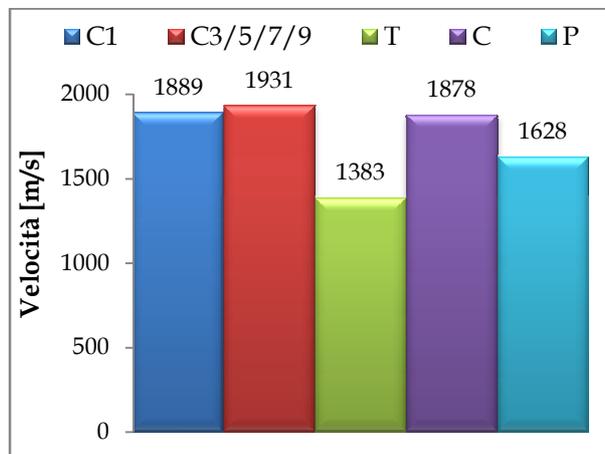


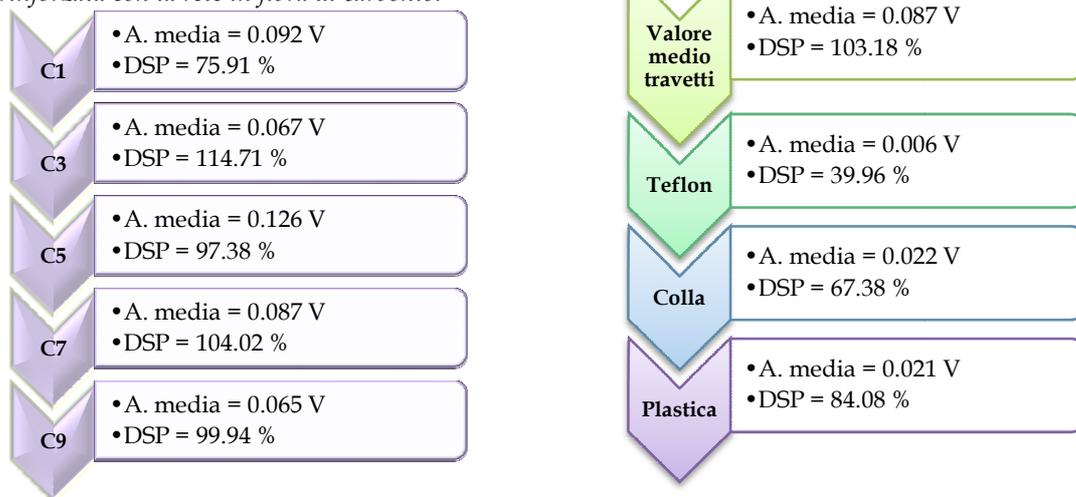
Grafico 10. Valori medi delle Velocità determinate tramite l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

Dal Grafico 10 e dai valori numerici riportati in Tabella 18 è possibile notare come dei tre difetti, solo la mancanza di adesione realizzata con il nastro in Teflon e la bolla d'aria causata dalla presenza dello spessore in Plastica siano ben individuati determinando rispetto al valore medio del provino di riferimento C1, un considerevole incremento del Tempo di Transito del segnale UT e conseguentemente un decremento della Velocità. Inoltre tale decremento è nettamente superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino di confronto C1 che è risultata pari a 190.66 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

Nella tabella successiva sono riportati i valori medi delle Ampiezze del segnale STT e le rispettive DSP determinate nei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei difetti di adesione.

Tabella 19. Valori medi della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 11 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze determinati mediante l'applicazione della STT dei segnali ricevuti. Dai valori numerici presenti in Tabella 19 e dal Grafico 11 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non quantitativo, a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP indicati nella Tabella 47.

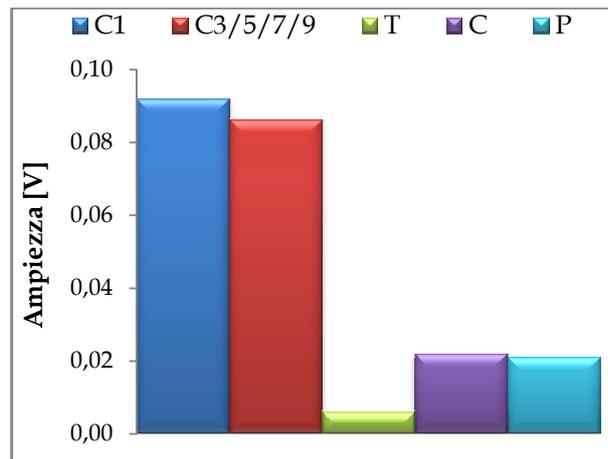


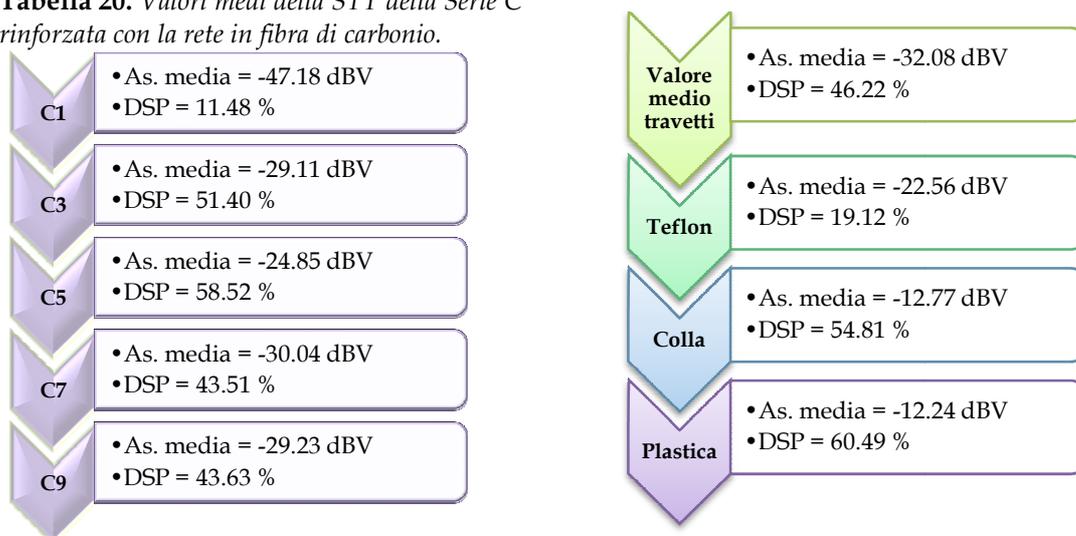
Grafico 11. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel provino di confronto C1 e a quello valutato su tutti i provini con difetti (C3/5/7/9).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 20 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale determinati mediante l'applicazione della STT con le relative DSP valutate nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale e le relative DSP della intera Serie e quelli individuati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 20. Valori medi della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di carbonio.



Nel Grafico 12 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate mediante la STT. Dall'analisi del Grafico 12 e della Tabella precedente è evidente come l'analisi dell'Ampiezza Spettrale consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di Deviazioni Standard

Percentuali nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell' Ampiezza del segnale ricevuto.

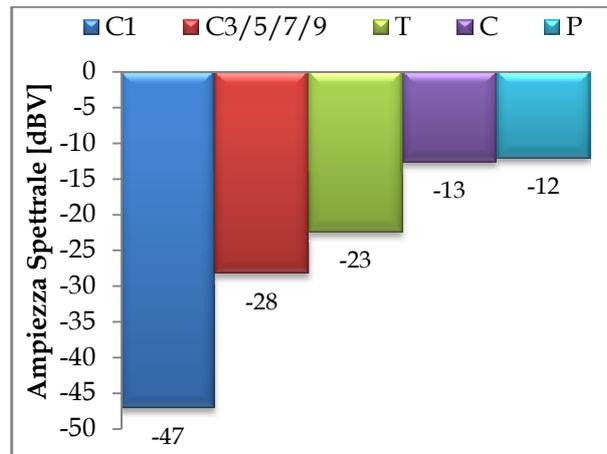


Grafico 12. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati mediante l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la rete FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato una considerevole variazione rispetto al provino di riferimento C1, del valore medio dell' Ampiezza Spettrale calcolato su tutti i provini con difetti (C3/5/7/9). Il nastro in Teflon, ossia la mancanza di aderenza FRP/calcestruzzo, è l'anomalia che ha inciso in minor misura rispetto agli altri, infatti, ha determinato la minore variazione dell' Ampiezza Spettrale, a differenza di quanto messo in evidenza nelle analisi delle Velocità Medie e delle Ampiezze Medie.

3. Travetti serie B rinforzati con la lamina in FRP

Nei travetti della Serie B il rinforzo con la lamina in FRP è stato applicato sul lato contrassegnato con il numero 1.

Risultati Velocità dell'applicazione della DTT

In Tabella 21 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutate su tutti i travetti della Serie.

Tabella 21. Valori della DTT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
B2	1 - 3	52.40	2862.60
		54.80	2737.23
		54.20	2767.53
	2 - 4	51.20	2929.69
		47.20	3177.97
		48.00	3125.00

B4	1 - 3	77.40	1937.98
		58.40	2568.49
		56.00	2678.57
	2 - 4	54.00	2777.78
		54.60	2747.25
B6	1 - 3	82.00	1829.27
		62.40	2403.85
	2 - 4	75.20	1994.68
		62.80	2388.54

		62.80	2388.54
		61.20	2450.98
B8	1 - 3	87.20	1720.18
		63.20	2373.42
		65.60	2286.59
		54.80	2737.23
	2 - 4	62.40	2403.85

		54.80	2737.23
B10	1 - 3	108.40	1383.76
		63.20	2373.42
		66.80	2245.51
	2 - 4	56.80	2640.85
		62.40	2403.85
		62.00	2419.35

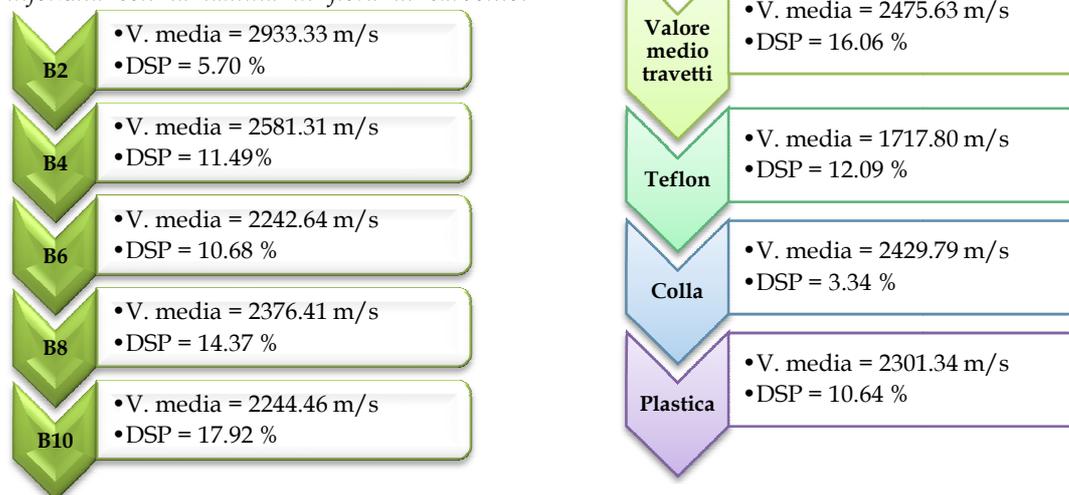
I tre difetti presenti nei travetti B4, B6, B8 e B10 vengono intercettati ciascuno una sola volta in corrispondenza delle acquisizioni effettuate nel percorso 1 - 3. Nella Tabella 22 sono riportati i valori massimi e minimi in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 22. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1383.76 nel provino B10	1937.98 nel provino B4
Colla	2373.42 nel provino B10	2568.49 nel provino B4
Plastica	1994.68 nel provino B6	2678.57 nel provino B4

In Tabella 23 sono riportate le Velocità Medie e le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 23. Valori medi della DTT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione presenti nei provini B4, B6 e B10 ha determinato un decremento della Velocità Media ed inoltre le loro DSP sono più elevate rispetto al provino di riferimento B2.

Analizzando le velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 750 m/s;

- l'accumulo di Colla e lo spessore in Plastica non hanno determinato alcuna alterazione significativa.

Nel Grafico 13 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento B2, quella di tutti i provini con difetti (B4/6/8/10) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

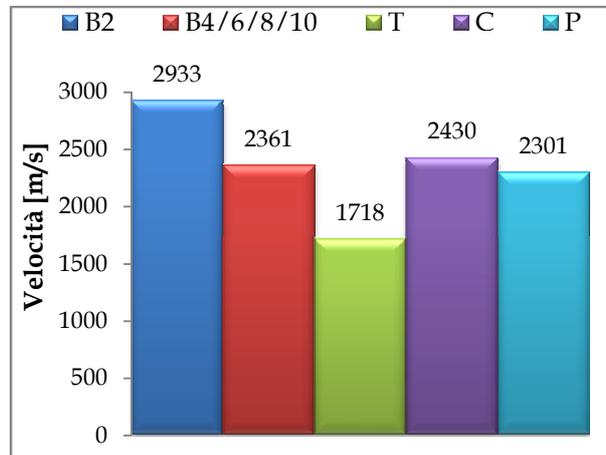


Grafico 13. Valori medi delle Velocità determinati tramite l'applicazione della DTT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Dal Grafico 13 e dai valori numerici riportati nella Tabella 23 si può notare come i tre difetti abbiano determinato rispetto al valore medio del provino di confronto B2, un considerevole incremento dei Tempi di Transit del segnale UT e conseguentemente un decremento delle Velocità di circa 1200 m/s per il nastro in Teflon e 400 - 500 m/s per l'accumulo di Colla e lo spessore in Plastica. Il loro decremento è inoltre superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino di riferimento B2 che è risultata pari a 167.11 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 24 sono riportati i valori medi delle Ampiezze del Segnale registrate dal trasduttore ricevitore e le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti.

Tabella 24. Valori medi della DTT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

B2	• A. media = 0.156 V • DSP = 41.91 %	Valore medio travetti	• A. media = 0.083 V • DSP = 86.70 %
B4	• A. media = 0.074 V • DSP = 69.34 %	Teflon	• A. media = 0.008 V • DSP = 37.90 %
B6	• A. media = 0.054 V • DSP = 78.37 %	Colla	• A. media = 0.034 V • DSP = 38.08 %
B8	• A. media = 0.091 V • DSP = 100.15 %	Plastica	• A. media = 0.028 V • DSP = 61.61 %
B10	• A. media = 0.039 V • DSP = 60.32 %		

Nel Grafico 14 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze determinati tramite l'applicazione della DTT dei segnali registrati dal trasduttore ricevitore. Dai valori numerici riportati in Tabella 24 e dal Grafico 14 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. L'analisi dell'Ampiezza è quindi più adatta rispetto a quella della Velocità nella individuazione dei difetti e delle anomalie. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo, e non quantitativo, a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 24.

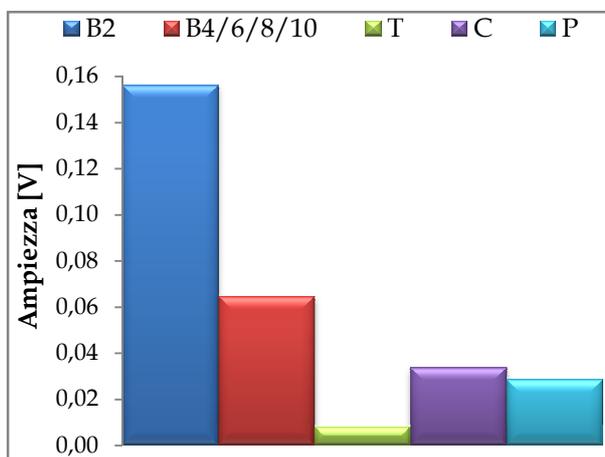


Grafico 14. Valori medi delle Ampiezze determinati tramite l'applicazione della DTT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello del travetto di riferimento B2 e a quello valutato su tutti i provini con i difetti (B4/6/8/10).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 25 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 25. Valori medi della DTT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

B2	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -42.89 dBV • DSP = 11.25 % 	Valore medio travetti	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -31.50 dBV • DSP = 58.65 %
B4	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -27.68 dBV • DSP = 63.07 % 	Teflon	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -18.40 dBV • DSP = 19.39 %
B6	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -29.56 dBV • DSP = 44.62 % 	Colla	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -8.90 dBV • DSP = 42.00 %
B8	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -26.22 dBV • DSP = 64.95 % 	Plastica	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -9.56 dBV • DSP = 53.70 %
B10	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -31.14 dBV • DSP = 64.78 % 		

Nel Grafico 15 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dall'analisi del Grafico 15 e della Tabella 25 è evidente come questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzato da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell'Ampiezza del segnale.

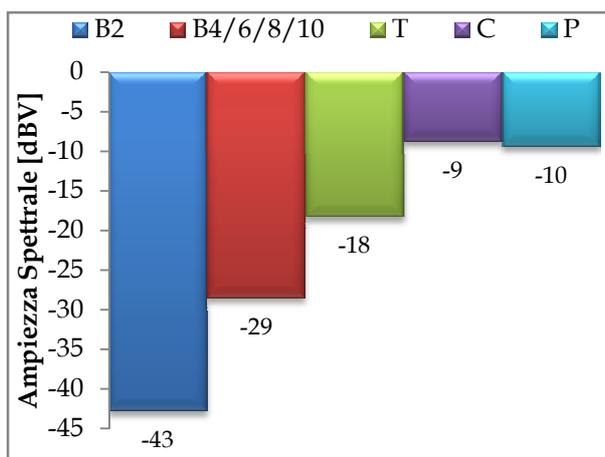


Grafico 15. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati tramite l'applicazione della DTT della Serie B rinforzata con la lamina in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di confronto B2 una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale calcolato su tutti i travetti con le anomalie (B4/6/8/10). Il nastro in Teflon rispetto agli

altri difetti, a differenza di quanto osservato nelle precedenti analisi, ha determinato la minore alterazione dell' Ampiezza Spettrale.

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

In Tabella 26 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e le rispettive Velocità valutate mediante la STT determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutati su tutti i travetti della Serie.

Tabella 26. Valori della STT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
B2	1 - 2	49.40	2147.09
		41.60	2549.66
		48.00	2209.71
	1 - 4	52.20	2031.92
		45.20	2346.59
		53.80	1971.49
	3 - 2	54.60	1942.60
		52.60	2016.46
		45.00	2357.02
	3 - 4	46.40	2285.91
		50.20	2112.87
		46.60	2276.09
B4	1 - 2	66.60	1592.58
		55.60	1907.66
		60.60	1750.26
	1 - 4	60.80	1744.51
		54.80	1935.51
		70.40	1506.62
	3 - 2	50.40	2104.48
		50.60	2096.17
		53.40	1986.26
	3 - 4	50.00	2121.32
		52.20	2031.92
		50.40	2104.48
B6	1 - 2	86.40	1227.62
		58.00	1828.72
		60.40	1756.06
	1 - 4	80.00	1325.83
		57.20	1854.30
		67.20	1578.36

	3 - 2	54.80	1935.51
		52.40	2024.16
		54.40	1949.74
	3 - 4	47.60	2228.28
		54.00	1964.19
		50.40	2104.48
B8	1 - 2	76.80	1381.07
		52.80	2008.83
		56.80	1867.36
	1 - 4	81.60	1299.83
		56.40	1880.60
		55.60	1907.66
	3 - 2	43.60	2432.71
		42.80	2478.18
		44.80	2367.55
	3 - 4	43.60	2432.71
		44.40	2388.87
		43.60	2432.71
B10	1 - 2	77.20	1373.91
		73.20	1448.99
		72.00	1473.14
	1 - 4	82.00	1293.49
		56.00	1894.04
		56.40	1880.60
	3 - 2	48.00	2209.71
		54.00	1964.19
		49.20	2155.81
	3 - 4	47.20	2247.16
		49.60	2138.43
		46.80	2266.37

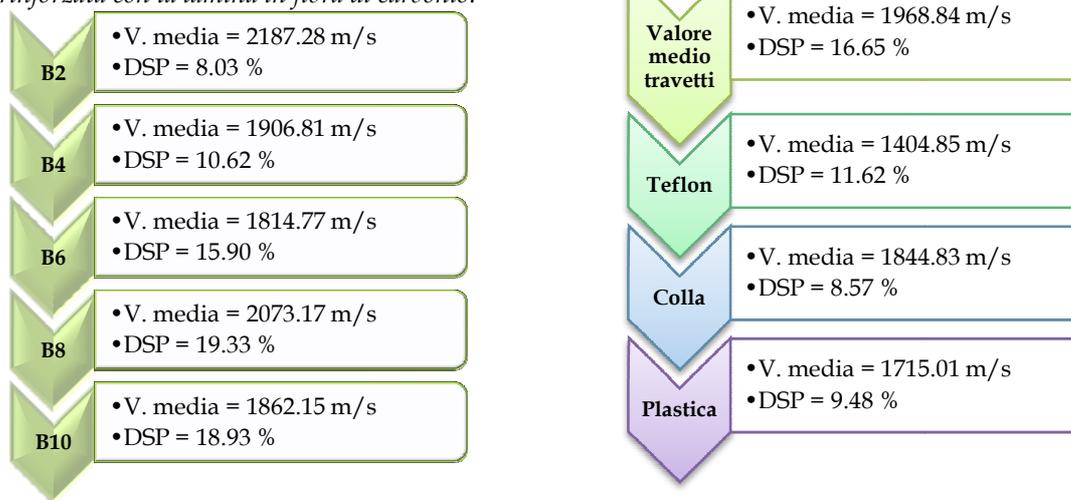
I tre difetti sono intercettati in corrispondenza delle acquisizioni effettuate nei percorsi 1 - 2 e 1 - 4. Nella Tabella 27 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 27. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1227.62 nel provino B6	1744.51 nel provino B4
Colla	1448.99 nel provino B10	2008.83 nel provino B8
Plastica	1473.14 nel provino B10	1907.66 nel provino B8

In Tabella 28 sono riportate le Velocità Medie dei singoli provini della Serie con le relative DSP. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 28. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento B2 un decremento della Velocità Media dei provini B4, B6, B8 e B10 ed inoltre le loro DSP sono più elevate.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 550 m/s;
- l'accumulo di Colla mostra un decremento pari a circa 100 m/s;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento della Velocità pari a circa 250 m/s.

Nel Grafico 16 è rappresentata la Velocità Media del travetto di confronto B2, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (B4/6/8/10) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

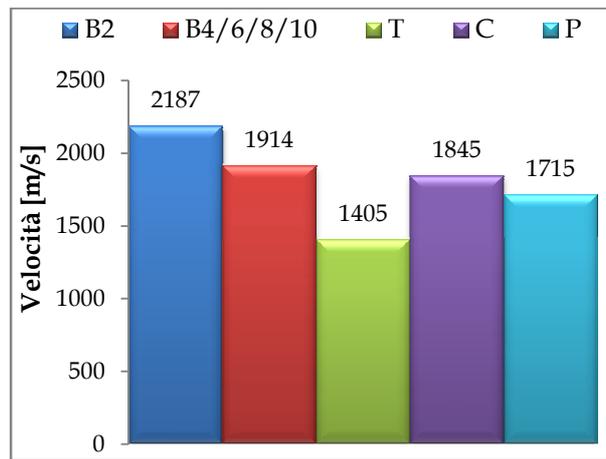


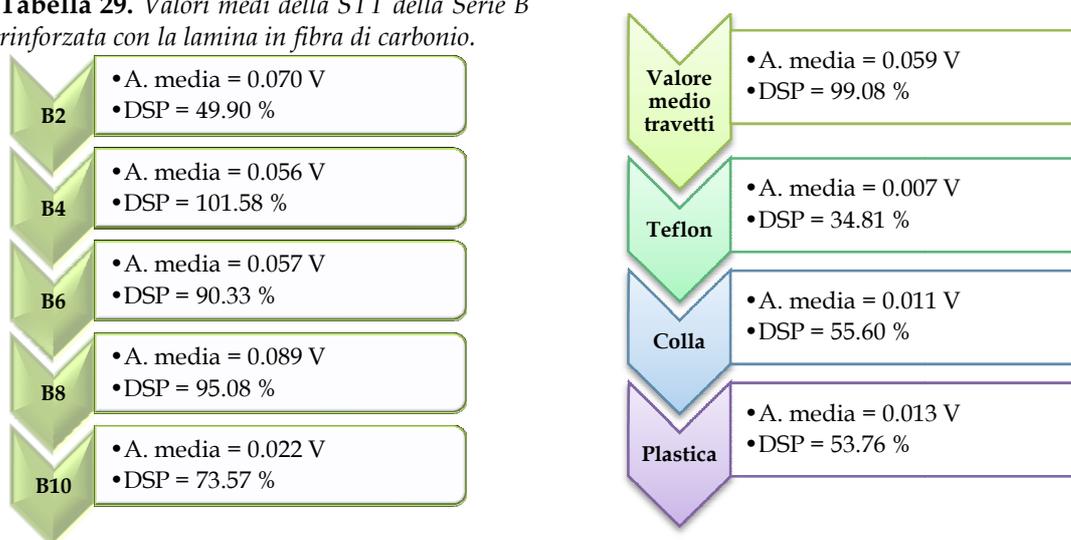
Grafico 16. Valori medi delle Velocità determinati tramite l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 28 e dal Grafico 16 è possibile notare come i tre difetti hanno determinato rispetto al provino di riferimento B2 un considerevole decremento delle Velocità pari è circa 700 m/s a per il nastro in Teflon e 300 - 400 m/s per l'accumulo di Colla e lo spessore in Plastica. Tali decrementi sono inoltre superiori al valore della Deviazione Standard Relativo del provino di confronto B2 che è risultata pari a 175.72 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

Nella tabella successiva sono riportate le Ampiezze Medie del segnale e le relative DSP registrate dal trasduttore ricevitore nei singoli provini della Serie. Sono inoltre mostrati i valori delle Ampiezze Medie e le relative DSP della intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei difetti di adesione.

Tabella 29. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



Nel Grafico 17 sono rappresentate le Ampiezze Medie del segnale ricevuto. Dai valori numerici riportati in Tabella 29 e dal Grafico 17 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta la individuazione di tutti i difetti di adesione predisposti

sui travetti sottoposti a prova. Il nastro in Teflon è il difetto che ha determinato la maggiore riduzione dell'Ampiezza del segnale. Il Grafico 17, come nel caso di applicazione della DTT, ha valenza qualitativa a causa dell'elevata dispersione dei dati come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 29.

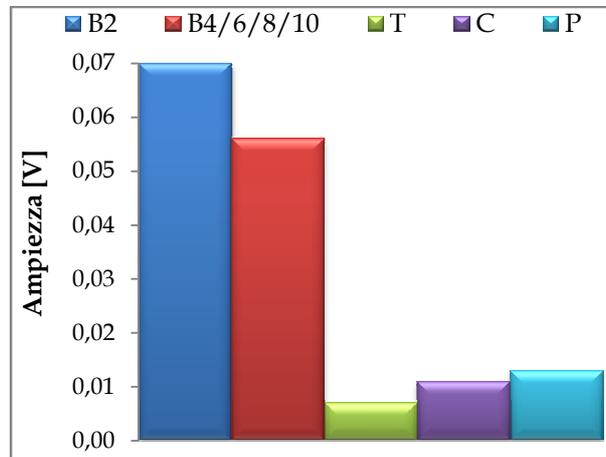


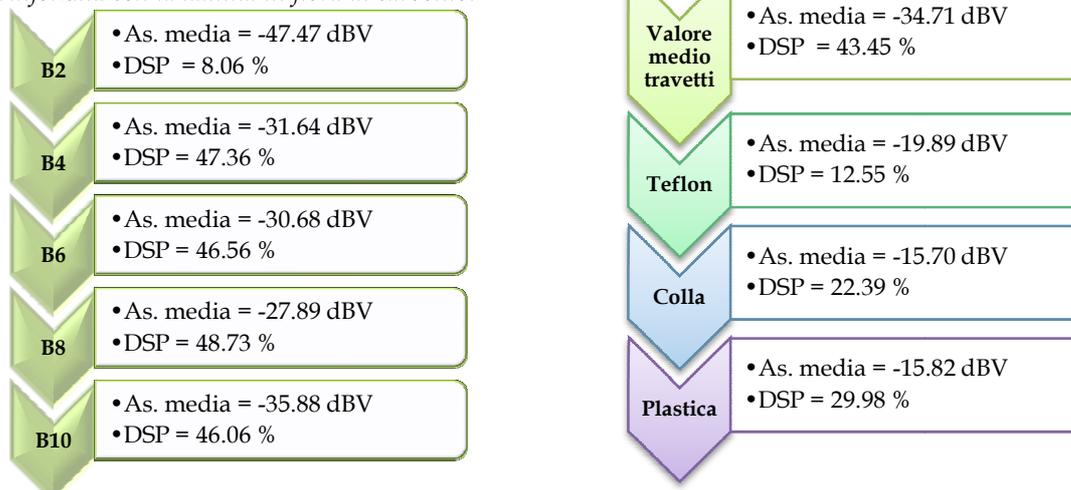
Grafico 17. Valori medi delle Ampiezze determinate mediante l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel provino di riferimento B2 e a quello valutato su tutti i provini con difetti (B4/6/8/10).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 30 sono riportati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale del segnale registrato dal trasduttore ricevitore determinati mediante l'applicazione della STT con le relative DSP determinate nei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP della intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 30. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



Nel Grafico 18 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate mediante l'applicazione della STT. Dal Grafico 18 e dai valori numerici riportati nella Tabella 30 è evidente come l'analisi dell'Ampiezza Spettrale consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di Deviazioni Standard Percentuali nettamente inferiori rispetto a quelli determinati per l'Ampiezza del segnale ricevuto.

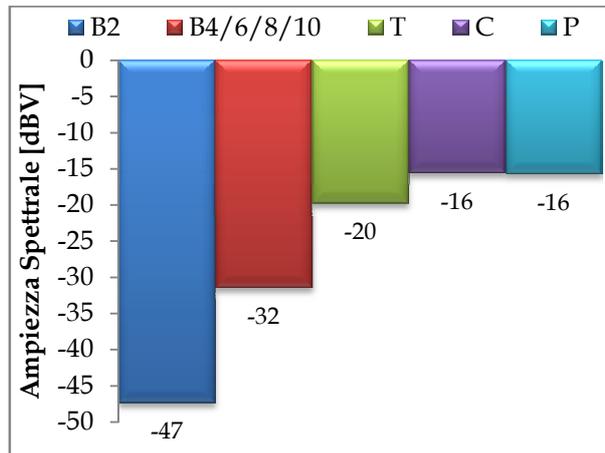


Grafico 18. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate mediante l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la lamina in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento B2 una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale valutato su tutti i travetti con le anomalie (B4/6/8/10). Il nastro in Teflon, ossia la mancanza di aderenza FRP/calcestruzzo, è l'anomalia che ha inciso in minor misura rispetto agli altri, infatti, ha determinato la minore alterazione dell'Ampiezza Spettrale a differenza di quanto messo in evidenza nell'analisi delle Velocità Medie e delle Ampiezze Medie.

4. Travetti Serie C rinforzati con la lamina in FRP

Nei provini appartenenti a questa Serie, caratterizzati dalla presenza di una cavità disposta secondo la loro lunghezza, la lamina in FRP è stata applicata sul lato contrassegnato con il numero 4.

Risultati Velocità dell'applicazione della DTT

In Tabella 31 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutati su tutti i travetti della Serie.

Tabella 31. Valori della DTT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Travetto	Letture	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
C2	1 - 3	71.00	2112.68
		55.00	2727.27
		70.20	2136.75
	2 - 4	65.80	2279.64
		66.60	2252.25
		73.80	2032.52
C4	1 - 3	69.80	2149.00
		65.20	2300.61
		62.80	2388.54
	2 - 4	105.60	1420.45
		64.60	2321.98
		82.00	1829.27
C6	1 - 3	64.00	2343.75
		63.20	2373.42
		64.80	2314.81

	2 - 4	113.20	1325.09
		90.80	1651.98
		84.80	1768.87
C8	1 - 3	79.20	1893.94
		63.20	2373.42
		73.20	2049.18
	2 - 4	110.00	1363.64
		75.20	1994.68
		94.00	1595.74
C10	1 - 3	80.00	1875.00
		84.80	1768.87
		82.40	1820.39
	2 - 4	106.40	1409.77
		67.60	2218.93
		87.60	1712.33

I tre difetti di adesione presenti nei provini C4, C6, C8 e C10 sono intercettati ciascuno una sola volta in corrispondenza acquisizioni effettuate nel percorso 2 - 4. Nella Tabella 32 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 32. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1325.09 nel provino C6	1420.45 nel provino C4
Colla	1651.98 nel provino C6	2321.98 nel provino C4
Plastica	1595.74 nel provino C8	1829.27 nel provino C4

In Tabella 33 sono riportate le Velocità Medie dei singoli provini della Serie con le corrispondenti DSP. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le relative DSP della intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 33. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

C2	•V. media = 2256.85 m/s •DSP = 10.03 %
C4	•V. media = 2068.31 m/s •DSP = 16.56 %
C6	•V. media = 1962.99 m/s •DSP = 20.57 %
C8	•V. media = 1878.43 m/s •DSP = 17.29 %
C10	•V. media = 1800.88 m/s •DSP = 13.27 %

Valore medio travetti	•V. media = 1993.49 m/s •DSP = 17.67 %
Teflon	•V. media = 1379.74 m/s •DSP = 2.76 %
Colla	•V. media = 2046.89 m/s •DSP = 12.55 %
Plastica	•V. media = 1726.55 m/s •DSP = 4.99 %

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento C2 un decremento della Velocità Media nei singoli travetti ed inoltre le loro DSP sono sensibilmente più elevate.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 600 m/s;
- l'accumulo di Colla non ha prodotto alcun decremento;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento pari a circa 250 m/s.

Nel Grafico 19 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento C2, quella di tutti i provini con difetti (C4/6/8/10) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

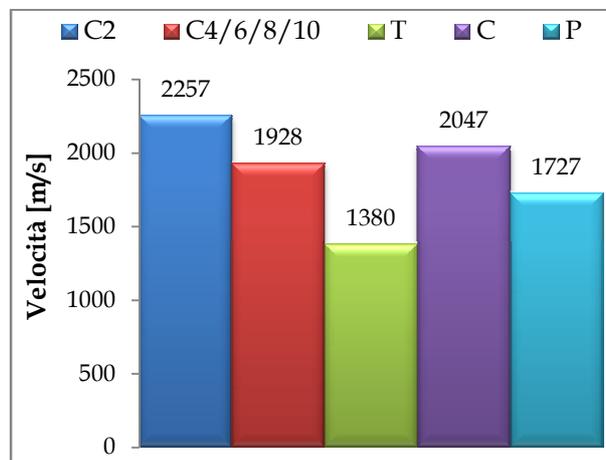


Grafico 19. Valori medi delle Velocità determinate mediante l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Dal Grafico 19 e dai valori numerici riportati nella Tabella 33 è possibile notare come i difetti di adesione T e P siano individuati determinando rispetto al provino di riferimento C2, un considerevole incremento dei Tempi di Transito e conseguentemente un decremento delle Velocità. Tale decremento è pari a circa 900 m/s per il nastro in Teflon e 500 m/s per lo spessore in Plastica e tale valore è, inoltre, superiore alla Deviazione Standard Relativa del travetto di confronto C2 che è risultata pari a 226.34 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 34 sono riportati i valori medi delle Ampiezze del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP nei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei difetti di adesione.

Tabella 34. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

C2	• A. media = 0.135 V • DSP = 51.51 %	Valore medio travetti	• A. media = 0.064 V • DSP = 97.35 %
C4	• A. media = 0.076 V • DSP = 80.50 %	Teflon	• A. media = 0.012 V • DSP = 70.51 %
C6	• A. media = 0.043 V • DSP = 79.78 %	Colla	• A. media = 0.025 V • DSP = 44.17 %
C8	• A. media = 0.045 V • DSP = 91.15 %	Plastica	• A. media = 0.021 V • DSP = 25.00 %
C10	• A. media = 0.020 V • DSP = 43.99 %		

Nel Grafico 20 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze dei segnali determinate tramite l'applicazione della DTT. Dal Grafico 20 e dalla Tabella 34 è evidente che questa analisi consente di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. L'analisi dell'Ampiezza è quindi più adatta rispetto a quella della Velocità, nella individuazione dei difetti e delle anomalie. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non quantitativo, a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 34.

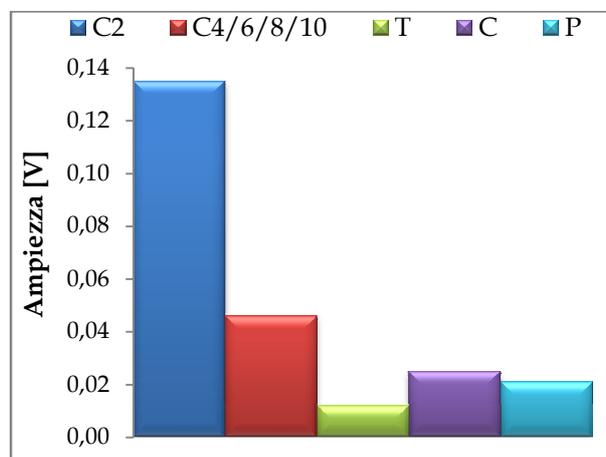


Grafico 20. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello di riferimento C2 e a quello calcolato su tutti i provini con i difetti (C4/6/8/10).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 35 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore determinati tramite l'applicazione della DTT con le

relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 35. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

C2	• As. media = -42.86 dBV • DSP = 9.29 %	Valore medio travetti	• As. media = -32.41 dBV • DSP = 51.89 %
C4	• As. media = -25.83 dBV • DSP = 65.14 %	Teflon	• As. media = -15.51 dBV • DSP = 30.00 %
C6	• As. media = -29.65 dBV • DSP = 56.60 %	Colla	• As. media = -10.62 dBV • DSP = 27.19 %
C8	• As. media = -29.63 dBV • DSP = 56.70 %	Plastica	• As. media = -12.02 dBV • DSP = 15.06 %
C10	• As. media = -34.08 dBV • DSP = 57.34 %		

Nel Grafico 21 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dall'analisi del Grafico 21 e della Tabella 35 è evidente come questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzato da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati per l'Ampiezza del segnale.

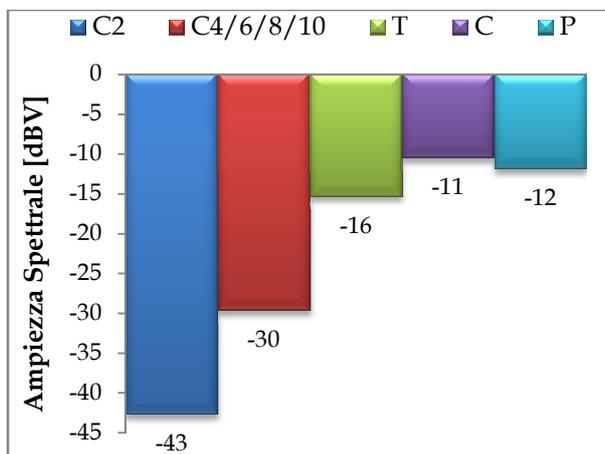


Grafico 21. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la lamina in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento C2 una notevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale di tutti i travetti con i difetti (C4/6/8/10). Il nastro in Teflon, a differenza di quanto osservato nelle precedenti analisi, ha determinato, rispetto agli altri difetti, la minore alterazione dell'Ampiezza Spettrale.

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

In Tabella 36 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutati su tutti i travetti della Serie.

Tabella 36. Valori della STT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]	
C2	1 - 2	49.60	2138.43	
		50.60	2096.17	
		55.40	1914.55	
	1 - 4	50.80	2087.91	
		53.40	1986.26	
		48.60	2182.43	
	3 - 2	48.20	2200.54	
		48.40	2191.45	
		42.20	2513.41	
	3 - 4	57.40	1847.84	
		50.20	2112.87	
		52.20	2031.92	
C4	1 - 2	50.80	2087.91	
		53.80	1971.49	
		57.00	1860.81	
	1 - 4	71.80	1477.24	
		54.00	1964.19	
		52.60	2016.46	
	3 - 2	48.80	2173.48	
		49.80	2129.84	
		49.40	2147.09	
	3 - 4	65.00	1631.78	
		54.20	1956.94	
		58.80	1803.84	
C6	1 - 2	43.60	2432.71	
		43.20	2455.23	
		48.80	2173.48	
	1 - 4	94.40	1123.58	
		62.00	1710.74	
C8	3 - 2	69.20	1532.75	
		65.20	1626.78	
		51.60	2055.54	
	3 - 4	50.40	2104.48	
		108.40	978.47	
		65.60	1616.86	
	C10	1 - 2	69.60	1523.94
			59.20	1791.66
			55.60	1907.66
		1 - 4	53.60	1978.84
			80.80	1312.70
			60.80	1744.51
3 - 2		63.20	1678.26	
		46.80	2266.37	
		48.80	2173.48	
3 - 4		50.80	2087.91	
		86.40	1227.62	
		76.80	1381.07	
C8	1 - 2	73.20	1448.99	
		58.80	1803.84	
		56.40	1880.60	
	1 - 4	65.60	1616.86	
		102.40	1035.80	
		76.40	1388.30	
	3 - 2	78.00	1359.82	
		52.80	2008.83	
		56.40	1880.60	
	3 - 4	58.80	1803.84	
		92.40	1147.90	
		72.00	1473.14	
	66.40	1597.38		

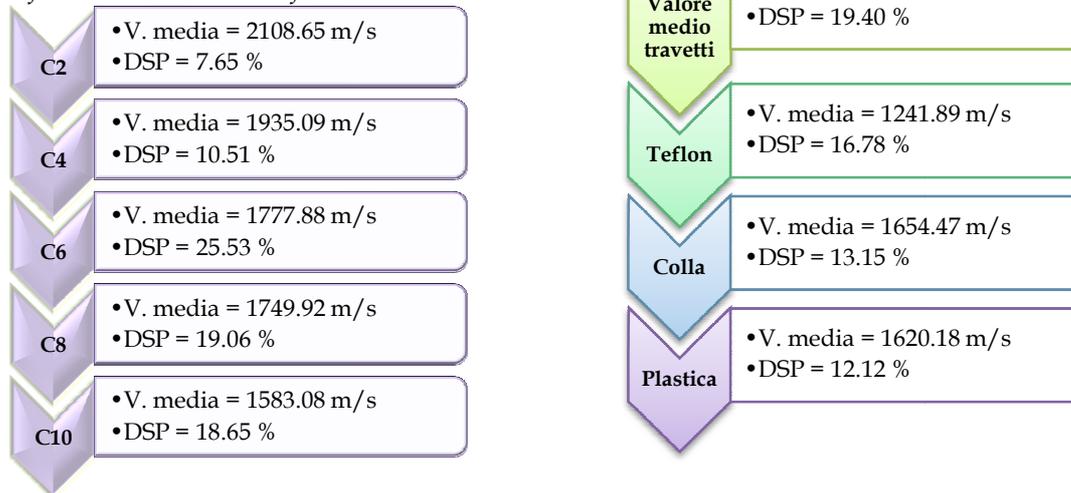
Le anomalie di adesione sono intercettate in corrispondenza delle acquisizioni effettuate nei percorsi 1 - 4 e 3 - 4. Nella Tabella 37 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza dei difetti.

Tabella 37. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	978.47 nel provino C6	1631.78 nel provino C4
Colla	1381.07 nel provino C8	1964.19 nel provino C4
Plastica	1359.82 nel provino C10	2016.46 nel provino C4

In Tabella 38 sono riportate le Velocità Medie e le relative DSP determinate sui singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e delle rispettive DSP dell'intera Serie e quelli valutati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 38. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento C2 un decremento della Velocità Media dei singoli travetti ed inoltre le DSP dei provini con i le anomalie sono sensibilmente più elevate.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 600 m/s;
- l'accumulo di Colla e lo spessore in Plastica hanno determinato un decremento pari a circa 200 m/s.

Nel Grafico 22 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento C2, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (C4/6/8/10) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

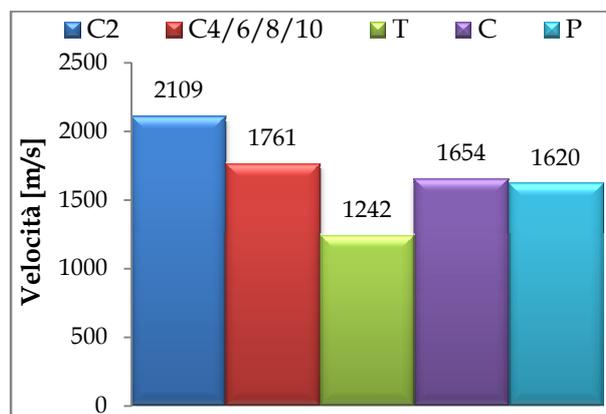


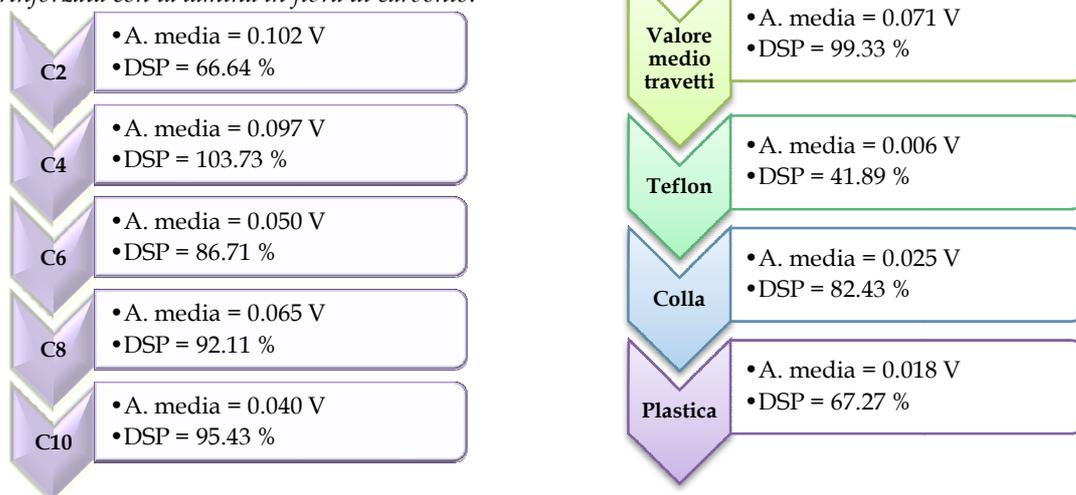
Grafico 22. Valori medi delle Velocità determinate tramite l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 38 e dal Grafico 22 si può notare come i tre difetti abbiano determinato rispetto al provino di confronto C2 un considerevole decremento della Velocità pari a 900 m/s per il nastro in Teflon, 450 m/s per l'accumulo di Colla e 500 m/s per lo spessore in Plastica. Tale valore è inoltre superiore alla Deviazione Standard Relativa del provino di riferimento C2 che è risultata pari a 161.41 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

Nella tabella successiva sono riportati i valori medi delle Ampiezze del segnale registrati mediante l'applicazione della STT e le rispettive DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei difetti di adesione.

Tabella 39. Valori medi della STT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



Nel Grafico 23 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della STT. Dai valori numerici riportati in Tabella 39 e dal Grafico 23 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non quantitativo a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP indicati in Tabella 39.

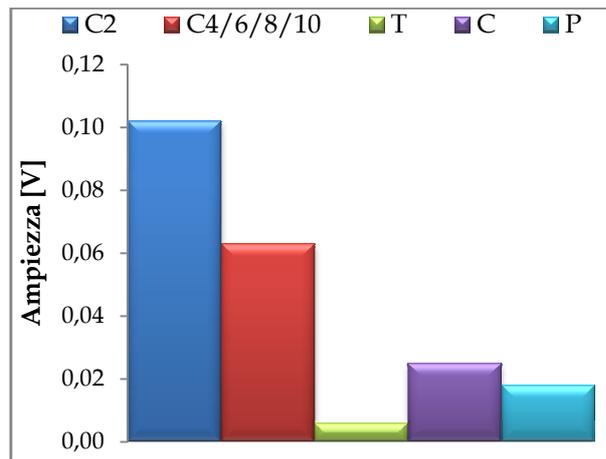


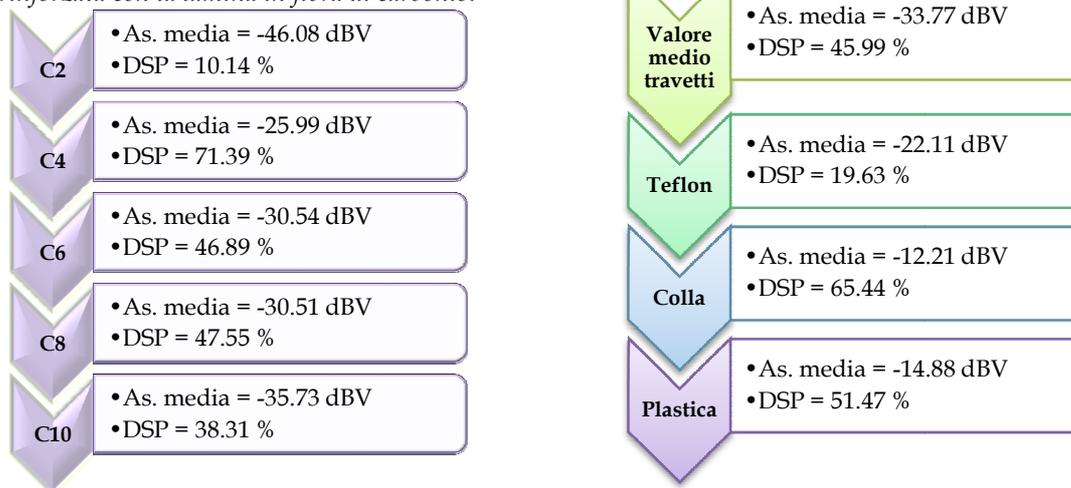
Grafico 23. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello del provino C2 e a quello calcolato su tutti i travetti con difetti (C4/6/8/10).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 40 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP determinate nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli individuati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 40. Valori medi della STT della Serie C rinforzata con la lamina in fibra di carbonio.



Nel Grafico 24 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali rilevate tramite l'applicazione della STT. Dal Grafico 24 e dai valori numerici riportati in Tabella 40 risulta evidente come l'analisi dell'Ampiezza Spettrale consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da

valori di Deviazioni Standard Percentuali nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell' Ampiezza del segnale.

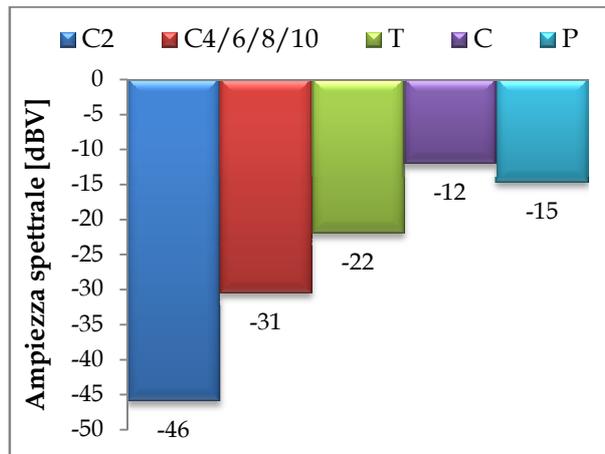


Grafico 24. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinate tramite l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la lamina in FRP.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al travetto di riferimento C2 una considerevole variazione del valore medio dell' Ampiezza Spettrale valutato su tutti i provini con le anomalie (C4/6/8/10). Il nastro in Teflon, ossia la mancanza di aderenza FRP/calcestruzzo, è l'anomalia che ha inciso in minor misura rispetto agli altri, infatti ha determinato la minore alterazione dell' Ampiezza Spettrale, a differenza di quanto messo in evidenza nelle analisi delle Velocità Medie e delle Ampiezze Medie.

5. Travetti Serie B rinforzati con la rete in PBO

Nei travetti della Serie B il rinforzo è stato applicato sul lato contrassegnato con il numero 1.

Risultati Velocità DTT

In Tabella 41 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutati su tutti i travetti della Serie.

Tabella 41. Valori della DTT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di PBO.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
B11	1 - 3	58.80	2551.02
		56.00	2678.57
		59.20	2533.78
	2 - 4	59.20	2533.78
		59.60	2516.78
		56.80	2640.85

B12	1 - 3	89.40	1677.85
		60.80	2467.11
		62.80	2388.54
B12	2 - 4	52.00	2884.62
		52.00	2884.62
		52.40	2862.60
B13	1 - 3	79.20	1893.94
		63.20	2373.42
		65.20	2300.61

	2 - 4	58.00	2586.21
		52.40	2862.60
		52.80	2840.91
B14	1 - 3	102.40	1464.84
		64.00	2343.75
		73.20	2049.18
	2 - 4	56.40	2659.57
		51.60	2906.98

B15	1 - 3	57.20	2622.38
		91.20	1644.74
		60.80	2467.11
	2 - 4	71.20	2106.74
		58.80	2551.02
		60.00	2500.00
		58.80	2551.02

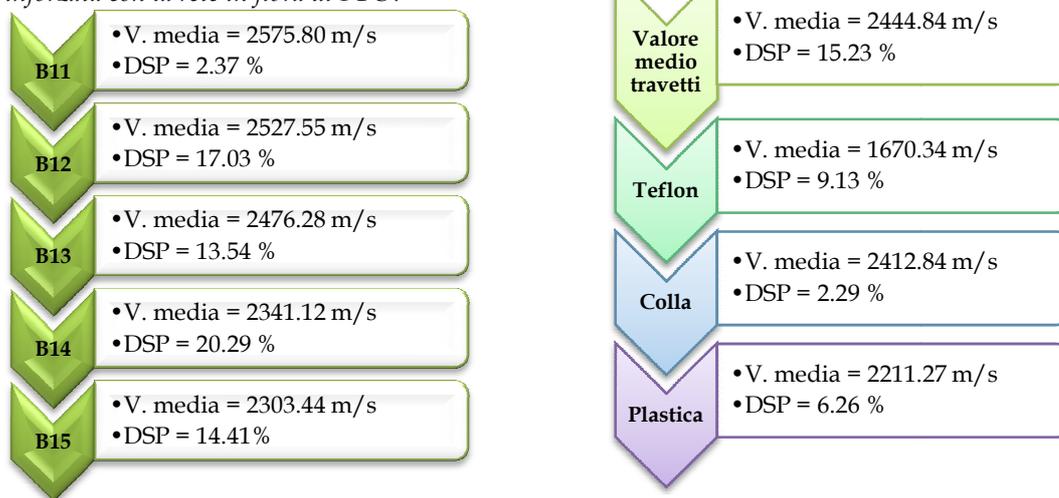
I tre difetti presenti nei travetti B12, B13, B14 e B15 vengono intercettati ciascuno una sola volta in corrispondenza delle acquisizioni effettuate nel percorso 1 - 3. Nella Tabella 42 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 42. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1464.84 nel provino B14	1893.94 nel provino B13
Colla	2343.75 nel provino B14	2467.11 nel provino B15
Plastica	2049.18 nel provino B14	2388.54 nel provino B12

In Tabella 43 sono riportate le Velocità Medie e le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie disposte sui provini.

Tabella 43. Valori medi della DTT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.



La presenza dei tre difetti di adesione non altera il valore delle Velocità Medie dei singoli travetti mentre le DSP sono più elevate nei provini in cui sono state realizzate le anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 800 m/s;
- l'accumulo di Colla non ha provocato alcuna alterazione significativa;

– lo spessore in Plastica ha determinato un decremento pari a circa 250 m/s.

Nel Grafico 25 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento B11, quella di tutti i provini con difetti (B12/13/14/15) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie (T, C e P).

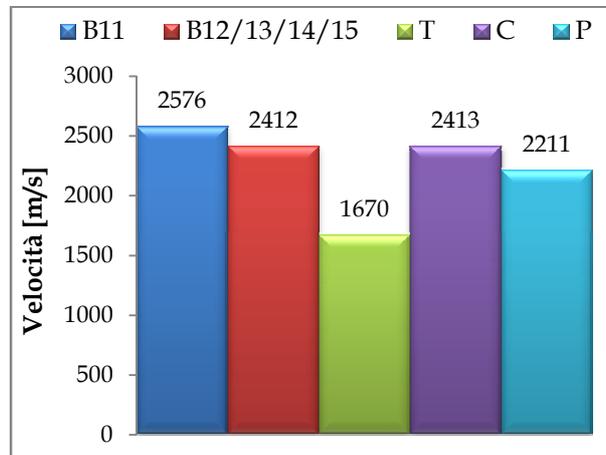


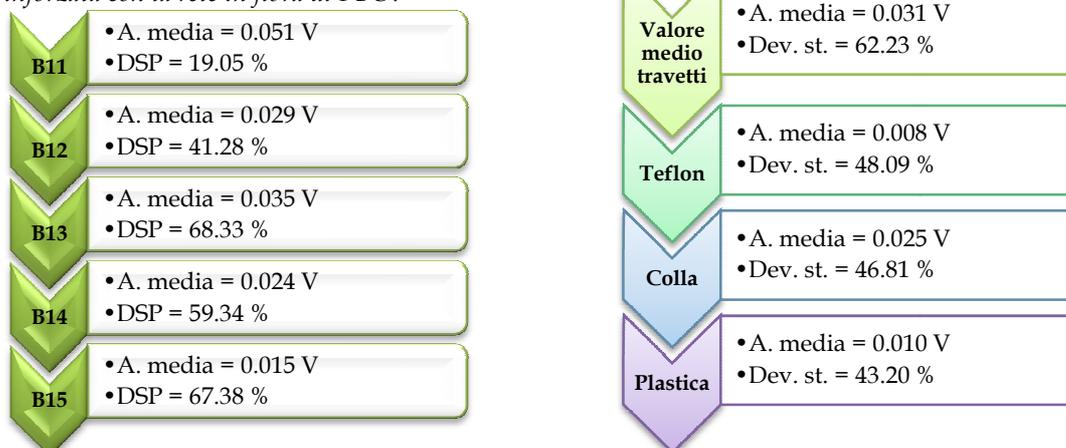
Grafico 25. Valori medi delle Velocità determinati tramite l'applicazione della DTT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Dai valori numerici riportati nella Tabella 43 e dal Grafico 25 è possibile notare come i tre difetti siano individuati in quanto hanno determinato rispetto al provino di confronto B11 un decremento della Velocità superiore alla Deviazione Standard Relativa dello stesso che è risultata pari a 61.13 m/s

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 44 sono riportati i valori medi delle Ampiezze del Segnale e le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 44. Valori medi della DTT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.



Nel Grafico 26 sono rappresentati valori medi delle Ampiezze dei segnali. Dai valori numerici riportati in Tabella 44 e dal Grafico 26 si può notare come l'analisi di

questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. L'analisi dell'Ampiezza è quindi più adatta, rispetto a quella della Velocità, nella individuazione dei difetti e delle anomalie. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non quantitativo a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 44.

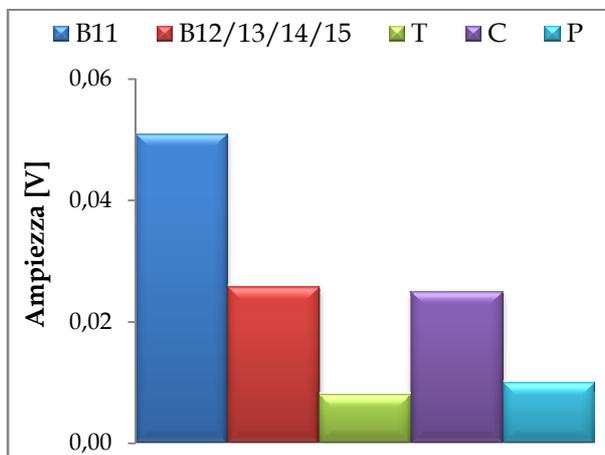


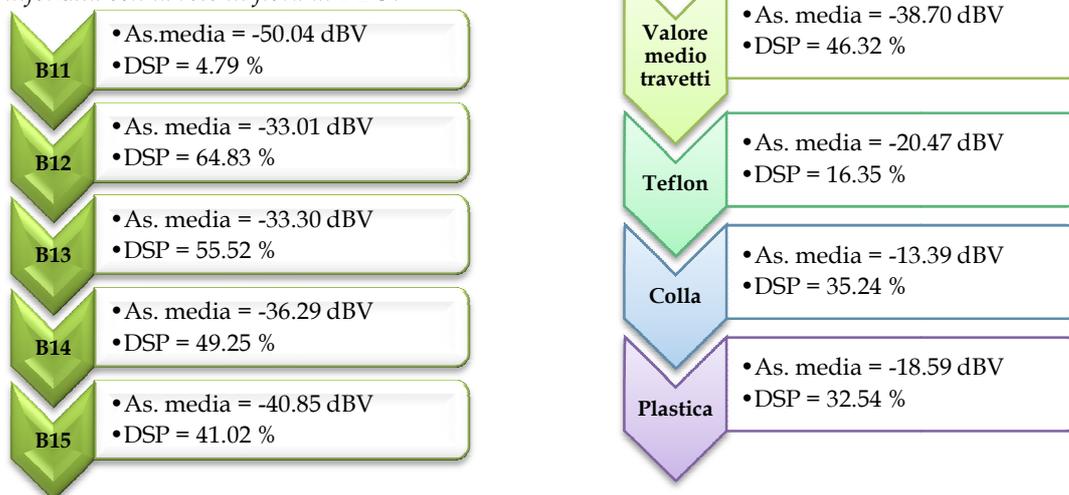
Grafico 26. Valori medi delle Ampiezze determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore a quello del provino di confronto B11 caratterizzato dalla perfetta aderenza rinforzo/calcestruzzo.

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 45 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 45. Valori medi della DTT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.



Nel Grafico 27 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dall'analisi del Grafico 27 e della Tabella 45 è evidente come questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzato da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell'Ampiezza del segnale.

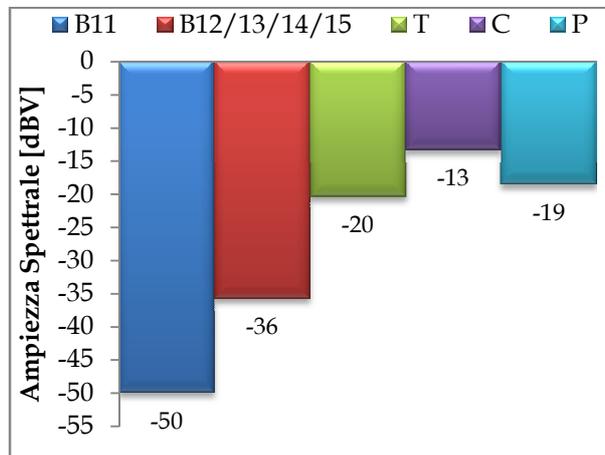


Grafico 27. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati mediante l'applicazione della DTT della Serie B rinforzata con la rete in PBO.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento B11 una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale valutato su tutti i travetti con le anomalie (B12/13/14/15). Il nastro in Teflon rispetto agli altri difetti, a differenza di quanto osservato nelle precedenti analisi, ha determinato la minore alterazione dell'Ampiezza Spettrale.

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

In Tabella 46 sono riportati i valori dei Tempi di Transito e delle rispettive Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutati su tutti i travetti della Serie.

Tabella 46. Valori della STT dei travetti della Serie B rinforzati con la rete in fibra di PBO.

Travetto	Percorso	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
B11	1 - 2	54.00	1964.19
		53.20	1993.72
		52.00	2039.73
	1 - 4	48.00	2209.71
		50.80	2087.91
		50.40	2104.48
	3 - 2	50.80	2087.91
		52.00	2039.73
		56.40	1880.60
	3 - 4	50.40	2104.48
		50.00	2121.32

B12	1 - 2	49.60	2138.43
		85.20	1244.91
		55.20	1921.49
	1 - 4	66.40	1597.38
		62.80	1688.95
		50.00	2121.32
	3 - 2	67.60	1569.02
		49.60	2138.43
		46.80	2266.37
	3 - 4	44.00	2410.59
		53.20	1993.72
		50.00	2121.32
B13	1 - 2	43.20	2455.23
		79.60	1332.49
		58.80	1803.84

	1 - 4	61.60	1721.85	B15	3 - 4	46.80	2266.37
		78.80	1346.02			48.80	2173.48
		58.00	1828.72			46.40	2285.91
		64.40	1646.99			46.80	2266.37
	3 - 2	49.60	2138.43		1 - 2	89.20	1189.08
		48.40	2191.45			58.80	1803.84
		47.20	2247.16			74.40	1425.62
		41.20	2574.42			79.20	1339.22
	3 - 4	46.80	2266.37		1 - 4	66.40	1597.38
		42.40	2501.56			76.00	1395.61
		89.20	1189.08			46.80	2266.37
		58.00	1828.72			44.00	2410.59
B14	1 - 2	68.40	1550.67	3 - 2	47.20	2247.16	
		68.80	1541.66		41.60	2549.66	
		60.80	1744.51		46.00	2305.78	
	1 - 4	63.60	1667.70	3 - 4	44.40	2388.87	
		43.20	2455.23				
		45.60	2326.01				

Le anomalie di adesione sono intercettate ciascuna una sola volta in corrispondenza delle acquisizioni effettuate nei percorsi 1 - 2 e 1 - 4. Nella Tabella 47 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 47. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1189.08 nel provino B14	1688.95 nel provino B12
Colla	1597.38 nel provino B15	2121.32 nel provino B12
Plastica	1395.61 nel provino B15	1721.85 nel provino B13

Nella Tabella 48 sono riportate le Velocità Medie e le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 48. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.

B11	•V. media = 2064.35 m/s •DSP = 4.06 %	Valore medio travetti	•V. media = 1968.59 m/s •DSP = 18.76 %	
B12	•V. media = 1960.73 m/s •DSP = 18.02 %		Teflon	•V. media = 1358.92 m/s •DSP = 12.04 %
B13	•V. media = 1966.61 m/s •DSP = 20.23 %		Colla	•V. media = 1831.23 m/s •DSP = 7.63 %
B14	•V. media = 1941.31 m/s •DSP = 19.95 %		Plastica	•V. media = 1571.86 m/s •DSP = 6.78 %
B15	•V. media = 1909.93 m/s •DSP = 25.02 %			

La presenza dei tre difetti di adesione non ha determinato rispetto al provino di riferimento B11 un elevato decremento della Velocità Media dei provini B12, B13, B14 e B15 mentre i valori di DSP sono nettamente più elevati nei travetti con le anomalie.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 600 m/s;
- l'accumulo di Colla mostra un decremento pari a circa 100 m/s;
- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento pari a circa 400 m/s.

Nel Grafico 28 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento B11, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (B12/13/14/15) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

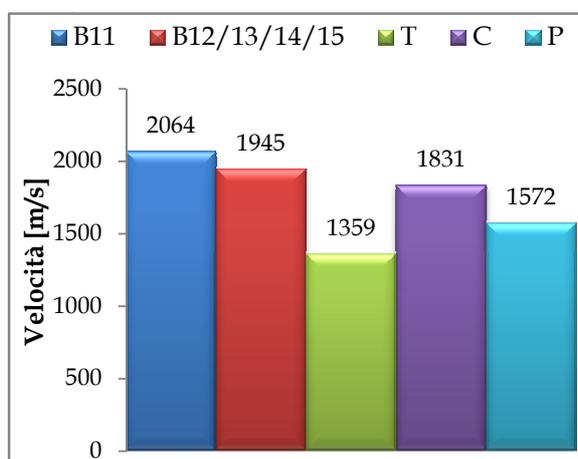


Grafico 28. Valori medi delle Velocità determinati mediante l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Dall'analisi della Tabella 48 e del Grafico 28 si può notare come i tre difetti siano ben individuati determinando rispetto al travetto di confronto B11 un considerevole decremento della Velocità pari a 700 m/s per il nastro in Teflon, 200 m/s per l'accumulo di Colla e 500 m/s per lo spessore in Plastica. Tale decremento è inoltre superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino di riferimento B11 che è risultata pari a 83.76 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

In Tabella 49 sono riportati i valori medi delle Ampiezze e le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 49. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.

B11	• A. media = 0.074 V • DSP = 46.38 %	Valore medio travetti	• A. media = 0.048 V • DSP = 101.81 %
B12	• A. media = 0.034 V • DSP = 73.08 %	Teflon	• A. media = 0.008 V • DSP = 37.48 %
B13	• A. media = 0.046 V • DSP = 85.73 %	Colla	• A. media = 0.016 V • DSP = 78.24 %
B14	• A. media = 0.071 V • DSP = 109.60 %	Plastica	• A. media = 0.014 V • DSP = 101.49 %
B15	• A. media = 0.016 V • DSP = 74.14 %		

Nel Grafico 29 sono rappresentate le Ampiezze Medie del segnale ricevuto. Dai valori numerici riportati in Tabella 49 e dal Grafico 29 si evince come l'analisi di questo parametro consenta la individuazione di tutti i difetti di adesione predisposti sui travetti sottoposti a prova. Il nastro in Teflon è il difetto che ha determinato la maggiore riduzione dell'Ampiezza del segnale. Il Grafico 29, come nel caso di applicazione della DTT, ha valenza qualitativa a causa dell'elevata dispersione dei dati come messo in evidenza dai valori di DSP indicati in Tabella 49.

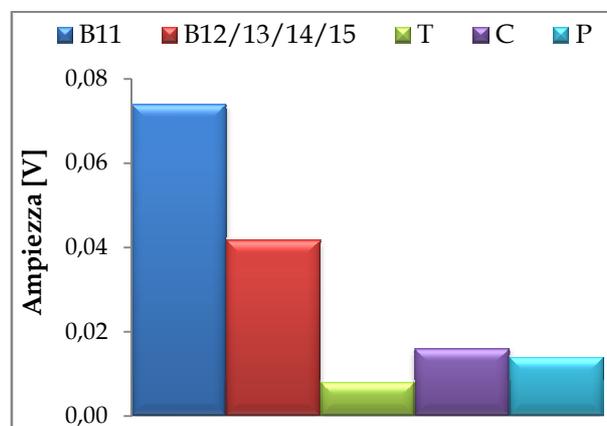


Grafico 29. Valori medi delle Ampiezze determinati mediante l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Il valore determinato in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel provino di riferimento B11 e a quello calcolato su tutti i provini con difetti (B12/13/14/15).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 50 sono riportati i valori medi dell'Ampiezza Spettrale del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP determinate nei singoli provini

della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 50. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.

B11	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -48.03 dBV •DSP = 7.67 % 	Valore medio travetti	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -37.24 dBV •DSP = 43.28 %
B12	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -33.28 dBV •DSP = 54.65 % 	Teflon	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -21.72 dBV •DSP = 17.11 %
B13	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -32.89 dBV •DSP = 49.30 % 	Colla	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -17.03 dBV •DSP = 35.40 %
B14	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -31.31 dBV •DSP = 51.25 % 	Plastica	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -17.79 dBV •DSP = 44.80 %
B15	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -40.70 dBV •DSP = 40.48 % 		

Nel Grafico 30 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali valutati mediante l'applicazione della STT. Dai valori numerici riportati in Tabella 50 e dal Grafico 30 è evidente come l'analisi dell'Ampiezza Spettrale consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di Deviazioni Standard Percentuali nettamente inferiori rispetto a quelli determinati per l'Ampiezza del segnale ricevuto.

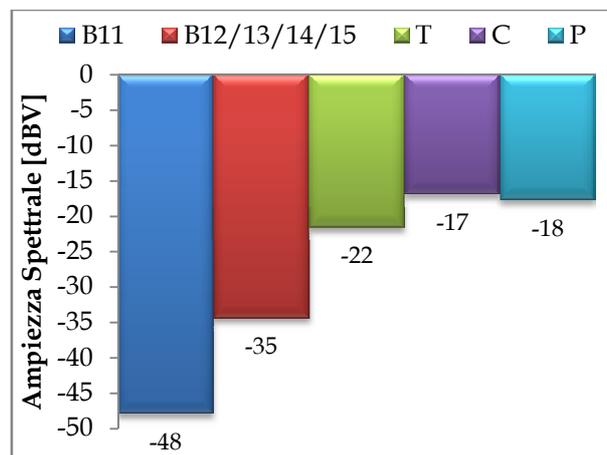


Grafico 30. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati mediante l'applicazione della STT della Serie B rinforzata con la rete in PBO.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento B11 una considerevole alterazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale calcolato su tutti i provini con le anomalie (B12/13/14/15). Il nastro in Teflon, ossia la mancanza di aderenza FRP/calcestruzzo, è l'anomalia che ha inciso in minor misura rispetto agli altri, infatti, ha determinato la minore alterazione dell'Ampiezza

Spettrale a differenza di quanto messo in evidenza nelle analisi delle Velocità Medie e delle Ampiezze Medie.

6. Travetti Serie C rinforzati con la rete in PBO

I travetti della Serie C sono caratterizzati dalla presenza di una cavità disposta seconda tutta la loro lunghezza. Il rinforzo in fibra di PBO è stato applicato sul lato contrassegnato con il numero 4.

Risultati Velocità DTT

Nella Tabella 51 sono riportati i Tempi di Transito e le Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutati su tutti i travetti della Serie.

Tabella 51. Valori della DTT dei travetti della Serie C rinforzati con la rete in fibra di PBO.

Travetto	Lettura	Tempo [μs]	Velocità [m/s]
C11	1 - 3	71.20	2106.74
		62.80	2388.54
		66.80	2245.51
	2 - 4	68.80	2180.23
		67.20	2232.14
		65.20	2300.61
C12	1 - 3	71.20	2106.74
		70.40	2130.68
		62.00	2419.35
	2 - 4	102.80	1459.14
		83.60	1794.26
		85.20	1760.56
C13	1 - 3	73.20	2049.18
		64.00	2343.75
		64.80	2314.81

	2 - 4	99.60	1506.02
		80.80	1856.44
		84.00	1785.71
C14	1 - 3	72.00	2083.33
		55.60	2697.84
		61.60	2435.06
	2 - 4	96.80	1549.59
		78.80	1903.55
		81.60	1838.24
C15	1 - 3	71.60	2094.97
		71.60	2094.97
		68.00	2205.88
	2 - 4	90.80	1651.98
		87.20	1720.18
		75.60	1984.13

Le anomalie di adesione presenti sui provini B12, B13, B14 e B15 sono intercettate durante le acquisizioni in corrispondenza del percorso 2 - 4. Nella Tabella 52 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle tre difetti.

Tabella 52. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1459.14 nel provino C12	1651.98 nel provino C15
Colla	1720.18 nel provino C14	1903.55 nel provino C14
Plastica	1760.56 nel provino C12	1984.13 nel provino C15

Le Velocità determinate tramite l'applicazione della DTT della Serie C sono inferiori ai valori determinati per le Serie A e B a causa della presenza della cavità.

In Tabella 53 sono riportate le Velocità Medie e le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 53. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.

C11	•V. media = 2242.30 m/s •DSP = 3.95 %	Valore medio travetti	•V. media = 2041.34 m/s •DSP = 14.58 %
C12	•V. media = 1945.12 m/s •DSP = 15.96 %	Teflon	•V. media = 1541.68 m/s •DSP = 4.62 %
C13	•V. media = 1975.99 m/s •DSP = 15.00 %	Colla	•V. media = 1818.61 m/s •DSP = 3.78 %
C14	•V. media = 2084.60 m/s •DSP = 18.36 %	Plastica	•V. media = 1842.16 m/s •DSP = 4.70 %
C15	•V. media = 1958.69 m/s •DSP = 10.42 %		

La presenza dei tre difetti ha determinato rispetto al provino di riferimento C11 un decremento della Velocità media dei provini inoltre i valori di DSP sono notevolmente superiori nei travetti con le anomalie di adesione.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 500 m/s;
- l'accumulo di Colla e lo spessore in Plastica hanno prodotto un decremento pari a circa 200 m/s.

Nel Grafico 31 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento C11 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini con i difetti (C12/13/14/15) e quelle determinate in corrispondenza delle tre anomalie di adesione (T, C e P).

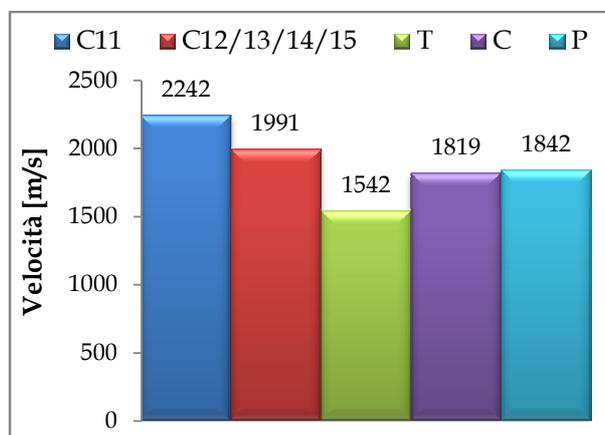


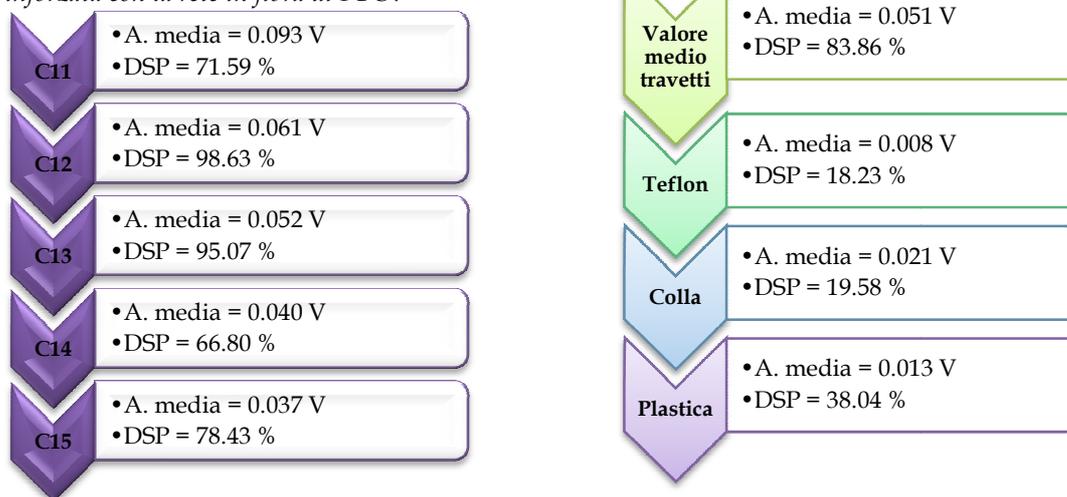
Grafico 31. Valori medi delle Velocità determinati tramite l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Dal Grafico 31 e dai valori numerici riportati nella Tabella 53 è possibile notare come tutti i difetti di adesione siano ben individuati determinando rispetto al provino di riferimento B11 un decremento della Velocità pari a 700 m/s per T e 400 m/s per C e P. Tali decrementi, inoltre, sono nettamente superiori al valore di Deviazione Standard Relativo del provino di confronto B11 che è risultata pari a 88.63 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della DTT

In Tabella 54 sono riportate le Ampiezze Medie del segnale registrato dal trasduttore ricevitore e le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 54. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.



Nel Grafico 32 sono rappresentate le Ampiezze Medie dei segnali. Dall'esame del Grafico 32 e della Tabella 54 è evidente come questa analisi consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. L'analisi dell'Ampiezza è quindi più adatta, rispetto a quella della Velocità, nella individuazione dei difetti e delle anomalie. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non quantitativo a causa dell'elevata dispersione dei dati, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 54.

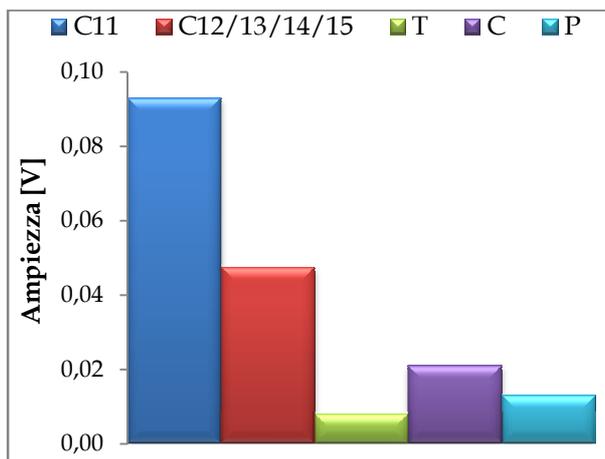


Grafico 32. Valori medi delle Ampiezze determinati tramite l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Il valore in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel travetto di riferimento C11 e a quello calcolato su tutti i provini con difetti (C12/13/14/15).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della DTT

In Tabella 55 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

Tabella 55. Valori medi della DTT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.

C11	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -47.99 dBV • DSP = 7.46 % 	Valore medio travetti	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -38.80 dBV • DSP = 37.99 %
C12	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -47.47 dBV • DSP = 7.46 % 	Teflon	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -27.38 dBV • DSP = 44.00 %
C13	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -31.69 dBV • DSP = 50.35 % 	Colla	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -21.32 dBV • DSP = 73.27 %
C14	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -32.29 dBV • DSP = 49.25 % 	Plastica	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -26.44 dBV • DSP = 51.38 %
C15	<ul style="list-style-type: none"> • As. media = -34.58 dBV • DSP = 48.67 % 		

Nel Grafico 33 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali dei segnali. Dall'esame del Grafico 33 e della Tabella 55 è evidente come questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzato da valori di DSP nettamente inferiori rispetto a quelli determinati per l'Ampiezza del segnale.

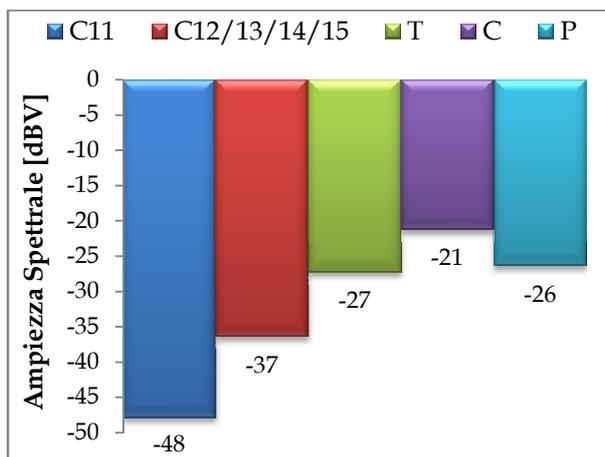


Grafico 33. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati tramite l'applicazione della DTT della Serie C rinforzata con la rete in PBO.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di confronto C11 una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale calcolato su tutti i provini con i difetti (C12/13/14/15). Il nastro in Teflon, a differenza di quanto osservato nelle precedenti analisi, ha determinato, rispetto agli altri difetti, la minore alterazione dell'Ampiezza Spettrale.

Risultati Velocità dell'applicazione della STT

Nella Tabella 56 sono riportati i Tempi di Transito e le Velocità determinati nei tre punti contrassegnati su ogni faccia dei provini e valutati su tutti i travetti della Serie

Tabella 56. Valori della STT dei travetti della Serie C rinforzati con la rete in fibra di PBO.

Travetto	Percorso	Tempo [µs]	Velocità [m/s]
C11	1 - 2	42.80	2478.18
		46.00	2305.78
		47.60	2228.28
	1 - 4	54.40	1949.74
		49.20	2155.81
		53.60	1978.84
	3 - 2	46.40	2285.91
		43.60	2432.71
		41.20	2574.42
	3 - 4	52.80	2008.83
		45.60	2326.01
		50.40	2104.48
C12	1 - 2	41.60	2549.66
		42.40	2501.56
		48.40	2191.45
	1 - 4	73.60	1441.11
		64.00	1657.28
		69.20	1532.75
	3 - 2	41.60	2549.66
		44.00	2410.59

C13	3 - 4	42.80	2478.18
		71.20	1489.69
		66.80	1587.81
C13	1 - 2	69.60	1523.94
		47.60	2228.28
		41.20	2574.42
C13	1 - 4	46.80	2266.37
		75.60	1402.99
		66.00	1607.06
C13	3 - 2	68.40	1550.67
		41.20	2574.42
		47.60	2228.28
C13	3 - 4	57.20	1854.30
		71.20	1489.69
		66.40	1597.38
C13	1 - 2	69.60	1523.94
		52.00	2039.73
		49.20	2155.81
C13	1 - 4	50.00	2121.32
		74.00	1433.32
		68.00	1559.79
C13	3 - 2	71.20	1489.69
		48.80	2173.48
		41.60	2549.66
C13	3 - 2	41.20	2574.42

C15	3 - 4	71.60	1481.37
		63.20	1678.26
		67.20	1578.36
	1 - 2	49.20	2155.81
		42.00	2525.38
		49.60	2138.43
1 - 4	70.00	1515.23	
	66.40	1597.38	

	3 - 2	68.80	1541.66
		48.80	2173.48
		47.60	2228.28
	3 - 4	52.80	2008.83
		74.00	1433.32
		65.60	1616.86
		69.60	1523.94

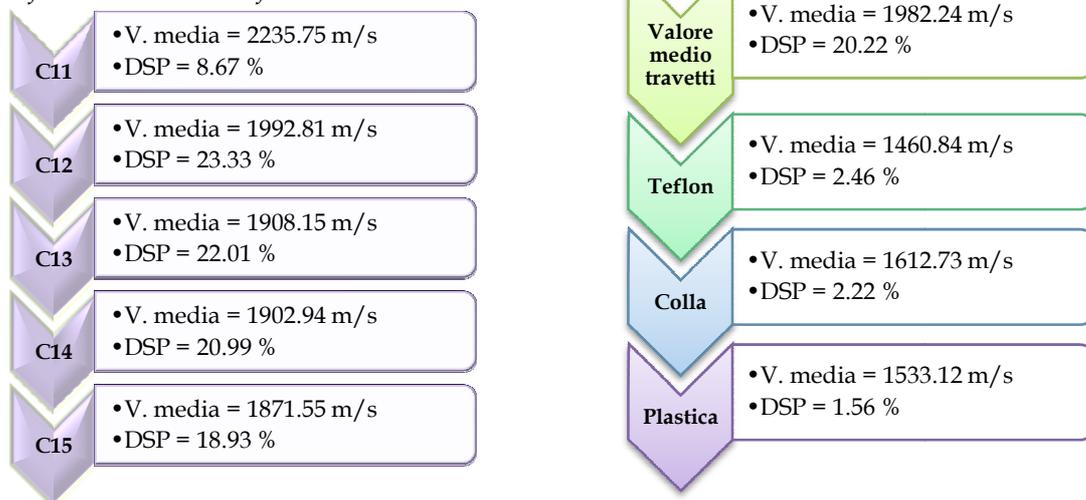
I difetti di adesione sono intercettati durante le acquisizioni in corrispondenza dei percorsi 1 - 4 e 3 - 4. Nella Tabella 57 sono riportati i valori massimi e minimi determinati in corrispondenza delle anomalie.

Tabella 57. Valori massimi e minimi in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Difetto	Velocità Minima [m/s]	Velocità Massima [m/s]
Teflon	1402.99 nel provino C13	1515.23 nel provino C15
Colla	1559.79 nel provino C14	1678.26 nel provino C14
Plastica	1489.69 nel provino C14	1578.36 nel provino C14

In Tabella 58 sono riportate le Velocità Medie e le relative DSP dei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Velocità e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 58. Valori medi della STT della Serie B rinforzata con la rete in fibra di PBO.



La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al travetto di riferimento C11 un decremento della Velocità Media dei singoli provini ed inoltre i valori delle DSP sono più elevate.

Analizzando le Velocità Medie in corrispondenza dei tre difetti è possibile notare che rispetto al valore medio dell'intera Serie:

- il nastro in Teflon ha determinato un decremento pari a circa 500 m/s;
- l'accumulo di Colla ha prodotto un decremento pari a circa 350 m/s;

- lo spessore in Plastica ha determinato un decremento della Velocità pari a circa 450 m/s.

Nel Grafico 34 è rappresentata la Velocità Media del travetto di riferimento C11 con perfetta aderenza, quella di tutti i provini in cui sono presenti i difetti (C12/13/14/15) ed i valori determinati in corrispondenza delle tre anomalie di adesione.

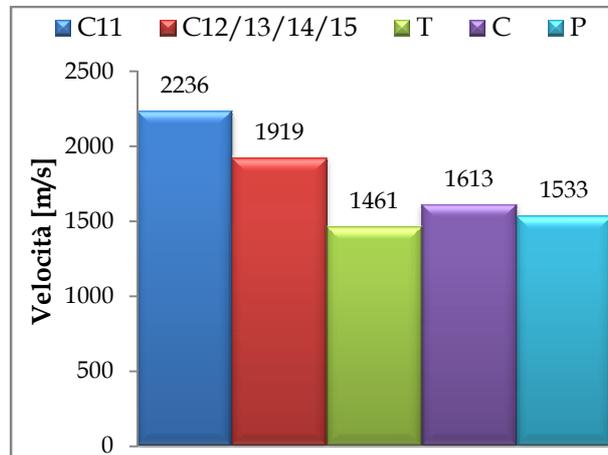


Grafico 34. Valori medi delle Velocità determinati tramite l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Dall'esame dei dati riportati in Tabella 58 e del Grafico 34 è possibile notare come tutti i difetti siano ben individuati determinando rispetto al provino di confronto C11, un decremento della Velocità di circa 800 m/s per T, 600 m/s per C e 700 m/s per P. Tale decremento è inoltre superiore al valore di Deviazione Standard Relativo del provino di riferimento C11 che è risultata pari a 193.82 m/s.

Risultati Ampiezza dell'applicazione della STT

Nella tabella successiva sono riportati i valori medi delle Ampiezze del segnale e le rispettive DSP dei singoli travetti della Serie. Sono inoltre riportati i valori medi delle Ampiezze e le rispettive DSP dell'intera Serie e quelli determinati in corrispondenza dei tre difetti di adesione.

Tabella 59. Valori medi della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.

C11	• A. media = 0.069 V • DSP = 41.85 %	Valore medio travetti	• A. media = 0.063 V • DSP = 84.10 %
C12	• A. media = 0.051 V • DSP = 76.00 %	Teflon	• A. media = 0.010 V • DSP = 30.36 %
C13	• A. media = 0.056 V • DSP = 102.55 %	Colla	• A. media = 0.021 V • DSP = 62.68 %
C14	• A. media = 0.070 V • DSP = 99.45 %	Plastica	• A. media = 0.018 V • DSP = 47.85 %
C15	• A. media = 0.068 V • DSP = 83.45 %		

Nel Grafico 35 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze dei segnali determinati mediante l'applicazione della STT. Dall'esame dei valori numerici presenti in Tabella 59 e dal Grafico 35 si può notare come l'analisi di questo parametro consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione. Tale discorso è però valido da un punto di vista qualitativo e non quantitativo a causa dell'elevata dispersione dei dati ottenuti, come messo in evidenza dai valori di DSP riportati in Tabella 59.

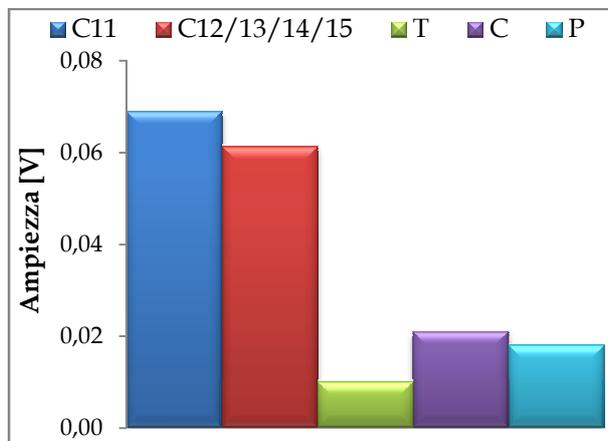


Grafico 35. Valori medi delle Ampiezze determinati mediante l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.

Il valore in corrispondenza delle anomalie di adesione è nettamente inferiore rispetto a quello determinato nel provino di riferimento C11 e a quello calcolato su tutti i provini con i difetti (C12/13/14/15).

Risultati Ampiezza Spettrale dell'applicazione della STT

In Tabella 60 sono riportati i valori medi delle Ampiezze Spettrali del segnale registrato dal trasduttore ricevitore con le relative DSP determinati nei singoli provini della Serie. Sono inoltre indicati i valori medi delle Ampiezze Spettrali e le relative DSP dell'intera Serie e quelli individuati in corrispondenza dei singoli difetti di adesione.

Tabella 60. Valori medi della STT della Serie C rinforzata con la rete in fibra di PBO.

C11	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -49.69 dBV •DSP = 8.02 % 	Valore medio travetti	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -34.94 dBV •DSP = 44.56 %
C12	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -31.10 dBV •DSP = 51.28 % 	Teflon	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -18.91 dBV •DSP = 13.33 %
C13	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -32.07 dBV •DSP = 50.99 % 	Colla	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -16.19 dBV •DSP = 24.28 %
C14	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -32.21 dBV •DSP = 37.86 % 	Plastica	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -14.62 dBV •DSP = 35.50 %
C15	<ul style="list-style-type: none"> •As. media = -29.62 dBV •DSP = 53.28 % 		

Nel Grafico 36 sono rappresentati i valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati tramite l'applicazione della STT. Dall'esame del Grafico 36 e della Tabella 60 è evidente come l'analisi dell'Ampiezza Spettrale consenta di individuare la presenza di tutti i difetti di adesione ed inoltre sia caratterizzata da valori di Deviazioni Standard Percentuali nettamente inferiori rispetto a quelli determinati nell'Ampiezza del segnale ricevuto.

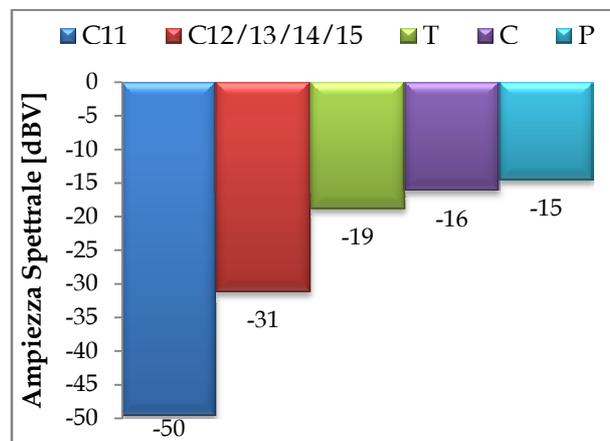


Grafico 36. Valori medi delle Ampiezze Spettrali determinati tramite l'applicazione della STT della Serie C rinforzata con la rete PBO.

La presenza dei tre difetti di adesione ha determinato rispetto al provino di riferimento C11 una considerevole variazione del valore medio dell'Ampiezza Spettrale calcolato su tutti i provini con le anomalie (C12/13/14/15). Il difetto realizzato con il nastro in Teflon è l'anomalia che ha inciso in minor misura rispetto agli altri, infatti, ha determinato la minore alterazione dell'Ampiezza Spettrale, a differenza di quanto messo in evidenza nelle analisi delle Velocità Medie e delle Ampiezze Medie.

Bibliografia

A. Di Tommaso, F. Focacci, G. Mantegazza. *“Rinforzo a flessione con rete di carbonio e matrice cementizia: risultati sperimentali”*. Giornate AICAP 2004. 23° Convegno Nazionale: Migliorare le costruzioni di calcestruzzo strutturale: l'esistente e il nuovo. Verona. Maggio 2006.

A. Di Tommaso, F. Focacci. *“Valutazione sperimentale delle proprietà meccaniche di compositi a matrice cementizia (FRCM)”*. Atti del convegno nazionale: Sperimentazione su materiali e strutture. Venezia. Dicembre 2006.

ACI 440.2R-02. *“Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures”*. Reported by ACI Committee 400, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. 2002.

C. L. Bank. *“Composites for Construction. Structural design with FRP materials.”* John Wiley & Sons, Inc. 2006.

C. W. Hu, J. K. C. Delpak, D. B. Tann. *“Detection of air blisters and crack propagation in FRP strengthened concrete elements using Infrared Thermography”*. Inframation - The Thermographer's Conference. 2002.

CNR-DT 200/2004. *“Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati”*, Roma. CNR 13 luglio 2004.

D. Duthinh, M. Starnes. *“Strengthening of reinforced concrete beams with Carbon FRP”*. Composites in Constructions. 2001.

D. P. Almond, M. P. Saintey. *“Defect sizing by transient thermography. II: a numerical treatment.”* J. Phys. D: Appl. Phys. 28. 1995.

D.P. Almond, R. Hamzah, P. Delpech, Peng Wen, M.H. Beheshty, M. B. Saintey. *“Experimental investigations of defect sizing by transient thermography.”* QIRT 96-Eurotherm Series 50 ETS ed. Pisa 1997.

D.P. Almond, S.K. Lau. *“Defect sizing by transient thermography. I: an analytical treatment.”* J. Phys. D: Appl. Phys. 27. 1994.

E. Agneloni, G. Celestini. *“Compositi FRP. Linee guida per il rinforzo strutturale. Elementi Generali.”* NCT Global Media Editore. San Mariano (PG). 2002.

E. Agneloni, G. Celestini. *“Compositi FRP. Linee guida per il rinforzo strutturale. Ricerca e sperimentazione.”* NCT Global Media Editore. San Mariano (PG). 2002.

E. G. Sherwood, K. A. Soudki. *“Repair of corroded RC beams with carbon FRP sheets”*. Proceedings of the 5th International Conference on Composites Engineering. 1998.

- E. Grinzato, R. Trentin, P. G. Bison, S. Marinetti.** *"Control of CFRP strengthening applied to civil structures by IR thermography."* Thermosense XXIX°, SPIE, Orlando(USA). 2007.
- E. Grinzato, S. Marinetti, P. G. Bison.** *"Controllo termografico di strutture edili fibrorinforzate."* CNR ITC Padova, Conferenza Nazionale AIPnD, Milano. 2005.
- E. Grinzato.** *"IR Termografy applied to historical buildings."* In: Proceedings of quantitative infrared thermography. 2002.
- E. Siviero, M. Forin, R. Cantoni.** *"Durabilità delle opere in calcestruzzo, corrosione delle armature, prevenzione, misura della durabilità, sperimentazione e controlli"*. Franco Angeli Editore. 1995.
- EN 12504-4.** *"Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity"*. 2004
- F. Bastianini, A. Di Tommaso, G. Pascale.** *"Ultrasonic Nondestructive assessment of bonding defects in composite structural strengthenings"*. Composite Structures. 2001.
- F. Cianfrone.** *"Indagini microsismiche ed ultrasoniche"*. Atti del seminario sul tema Sperimentazione su strutture. Attualità ed affidabilità delle metodologie di indagine. Cagliari. 1993.
- Fib Bulletin 14.** *"Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures"*. Technical Report prepared by the Working Party EBR of Task Group 9.3, International Federation for Structural Concrete. July 2001.
- G. Minguzzi.** *"Fiber Reinforced Plastics. Utilizzo dei materiali compositi a matrice polimerica in edilizia civile"*. Alinea. Firenze. 1998.
- G. Moncada Lo Giudice, S. Santoboni.** *"Acustica"*. CEA Editore. 1997
- G. Stabile.** *"Diagnosi strutturale non invasiva su strutture in materiale composito"*. Compositi n°7. Marzo 2008.
- G. V. Fracastoro.** *"Fondamenti e applicazioni di termodinamica"*. Otto Editore. 2000
- H. R. Hamilton, M. P. Kutaraba, J. R. Brown.** *"Repair of corrosion damaged concrete beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites"*. Journal of the American Composites Manufactures Association. 2007.
- I. Barducci.** *"Trasmissione del Calore"*. ESA Editore. 1981.
- J. Krautkammer, H. Krautkammer.** *"Ultrasonic Testing of materials"*. Springer-Verlag. 1990.
- J. W. S. Rayleigh.** *"The theory of sound"*. London, MacMillan. 1877.
- L. B. Jackson.** *"Digital Filters and Signal Processing"*. Kluwer Academic Publishers, Boston. 1995.
- "Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP."* Documento approvato il 24 luglio 2009 dall'assemblea Generale Consiglio Superiore LL PP.

- M. Arduini, A. Nicoletti, P. Corrado.** *“Il rinforzo con materiali compositi fibrosi FRP per strutture in cemento armato, muratura, legno.”* Maggioli Editore. 2010.
- M. Camplani, B. Cannas, F. Cau, G. Concu, M. Usai.** *“Acoustic NDT on building materials using Features extraction techniques”*. O. Gervasi et al. (Eds.). ICCSA 2008. Part II. Springer Lecture Notes in Computer Science 5073, pp. 582–595. 2008.
- M. Felli.** *“Lezioni di fisica Tecnica II. Trasmissione del calore, Acustica, Tecnica dell’illuminazione”*. Morlacchi Editore. 2004.
- M. R. Valluzzi, E. Grinzato, C. Pellegrino, C. Modena.** *“IR thermography for interface analysis of FRP laminates externally bonded to RC beams”*. Materials and Structures. 2009.
- N. P. Avdelidis, A. Moropoulou.** *“Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures”*. Journal of Cultural Heritage, 5, 119_127. 2004.
- O. Büyüköztürk, T. Y. Yu.** *“Understanding and Assessment of debonding failures in FRP-Concrete systems”*. Seventh International Congress on Advanced in Civil Engineering. Turkey. 2006.
- P. Corvaglia, A. Largo.** *“IRT survey for the quality control of FRP reinforced RC structures”*. 2009.
- P. K. Mallick.** *“Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design”*. Marcel Dekker Inc. 1993.
- R. Pucinotti.** *“Patologia e diagnostica del cemento armato. Indagini non distruttive e carotaggi nelle opere da consolidare”*. Dario Flaccovio Editore. Palermo. 2005.
- S. Lombardo, F. Mortellaro.** *“Collaudo statico delle strutture in c.a. normale e precompresso e delle strutture metalliche”*. Dario Flaccovio Editore. Palermo. 2000.
- S. M. Homan, S. A. Sheikh, P. Collins, G. Pernica, J. Daoud.** *“Durability of Fibre Reinforced Polymers used in concrete structures”*. 2000.
- S. Russo.** *“Strutture in composito. Sperimentazione, teoria e applicazioni.”*Hoepli Editore. 2007.
- T. Nelligan.** *“An introduction to ultrasonic material analysis”*. Olympus NDT. www.olympusndt.com. 2007.
- UNI ENV 196/1.** *“Determinazione delle resistenze meccaniche”*.1991.
- UNI 10824-1.** *“Prove non distruttive. Termografia all'infrarosso: Termini e definizioni.”* 2000.
- V. A. Luprano, P. Bison, E. Grinzato, S. Marinetti, A. Tati, A. Tundo.** *“Non destructive defect characterization in civil structures reinforced by means of FRP.”* ECNDT 2006 Proceedings. 2006.
- V. A. M. Luprano, A. Tundo, E. Grinzato, S. Marinetti.** *“Non Destructive defect characterization in civil structures reinforced by means of FRP”*. ECNDT 2006.

V. F. Godinez-Azcuaga, R. S. Gostautas, R. D. Finlayson, M. Miller. *“Evaluation of FRP wrapped concrete columns and bridges”*. Proceedings of Structural Materials VI- An NDT Conference, Buffalo, New York. 2004.

X.P.V. Maldague. *“Introduction to NDT by Active Infrared Thermography”*. Materials Evaluation. 2002.

X.P.V. Maldague. *“Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing”*. In: J. Wiley & Sons Inc., A Wiley-Interscience Publication. 2001.

Y. A. Cengel. *“Termodinamica e trasmissione del calore.”* McGraw-Hill. 1998.

