

IL RISANAMENTO STRUTTURALE DEL VIADOTTO CERNICCHIARA

TECNICHE DI RINFORZO IN CFRP PER L'ADEGUAMENTO SISMICO DEI VIADOTTI: LE NUOVE TECNOLOGIE QUALI SISTEMI DI INTERVENTO INVISIBILI

Il sistema di bloccaggio provvisorio delle quattro lamine in CFRP

Valori Scarl - Consorzio Stabile, grazie al know-how di Impresa, alle competenze maturate dai propri Direttori Tecnici e forte di una consolidata esperienza acquisita attraverso interventi manutentivi su alcune tra le principali opere strutturali del Paese (i viadotti Akragas e Salsetto ad Agrigento, il Ponte Bisantis a Catanzaro, i ponti sul fiume Po nelle province di Parma e Pavia, ed altri), si colloca oggi tra le Società leader in Italia nel campo della manutenzione e messa in sicurezza di ponti e viadotti.

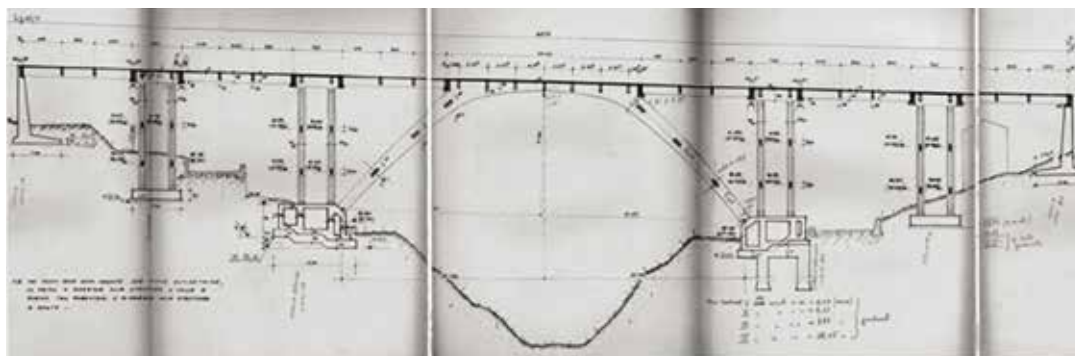
Nel 2018, si è aggiudicata l'Accordo Quadro ANAS SpA DG 37/17 - Lotto 5 Calabria per la "manutenzione straordinaria e risanamento strutturale di opere d'arte" per un importo complessivo di 10 milioni di Euro. Tra gli interventi previsti in appalto spiccano, per complessità e innovazione tecnologica, i lavori per il rinforzo strutturale degli impalcati e dei pulvini del viadotto Cernicchiara a Salerno, ubicato alla p.k. 0+250 dell'Autostrada A2 del Mediterraneo.

Il miglioramento strutturale del viadotto è stato realizzato utilizzando tecniche in CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymers; il ricorso a queste tecnologie di derivazione aeronautica nell'ambito infra-

strutturale è abbastanza recente e, più in generale, costituisce aspetto innovativo negli interventi di riabilitazione strutturale. I rinforzi in CFRP consentono di migliorare le performance meccaniche degli elementi strutturali incrementando la loro duttilità e garantendo una più longeva durabilità dell'opera. Nell'ambito delle politiche di decarbonizzazione, il risanamento strutturale delle opere esistenti gioca un ruolo fondamentale in termini di riduzione delle emissioni di CO₂.

IL VIADOTTO CERNICCHIARA

Si tratta di un viadotto a sei campate e un arco centrale; ogni campata è riconducibile allo schema di trave appoggiata agli estremi, rappresentati dalle pile, mentre quella centrale è riconducibile a un arco incastrato alla base.



1. Il profilo storico del viadotto

Le pile sono del tipo a telaio nelle due direzioni. Ogni pila è quindi costituita da quattro colonne collegate, nel senso dell'asse trasversale del viadotto, da travi orizzontali disposte su due livelli.

L'intero viadotto è stato realizzato in calcestruzzo armato gettato in opera.

La redazione del progetto ha comportato un approfondito studio della documentazione originaria completato con ispezioni in sito, rese possibili grazie al ponteggio sospeso installato e messo a disposizione dalla ditta esecutrice dei lavori, la T.E.I.P. Srl, consorziata del Consorzio Valori Scarl.

Ciò ha permesso di valutare, tra le varie soluzioni progettuali, quella più performante ed anche quella meno invasiva sotto il profilo architettonico dell'opera. L'adozione dei sistemi di rinforzo in CFRP ha permesso di realizzare un intervento invisibile ed efficace, quindi con esigui spessori di materiale ma con un sensibile incremento delle performances meccaniche e della durabilità dell'opera.

Il modello numerico di calcolo è stato implementato sul software FEM, Noliàn® della Softing®. Lo studio del viadotto ha permesso di individuare, nelle varie condizioni di carico e delle loro combinazioni, gli elementi più sollecitati dai carichi accidentali, dai carichi mobili e sotto l'impegno della sollecitazione sismica.

Il confronto tra lo studio strutturale dello stato di fatto e quello di progetto ha permesso di determinare il coefficiente ζ_E , rapporto tra l'azione sismica sopportabile dalla struttura e l'azione sismica che si utilizzerebbe nel progetto di una struttura nuova (rif. Par. 8.3 NTC 2018).

IL MODELLO DI CALCOLO E LE CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Sono stati implementati due modelli numerici per lo studio della struttura, entrambi basati su metodi di calcolo agli elementi finiti ma con diverso livello di dettaglio e distinto obiettivo:

- un modello globale che rappresenta l'intero viadotto e che tiene conto, attraverso i vincoli interni, dell'indipendenza degli impalcati (che sono semplicemente appoggiati sulle pile), necessario per le valutazioni complessive e di più ampio contesto come la risposta alle azioni sismiche della struttura nella sua globalità e la valutazione delle sollecitazioni indotte sugli archi;
- un modello locale descrittivo dell'impalcato, considerato isolato e con i reali vincoli di estremità. Questo ha consentito le valutazioni locali sulle singole travi e sulla soletta d'impalcato, permettendo gli studi necessari a determinare le deficienze strutturali d'impalcato nello stato di fatto, e di

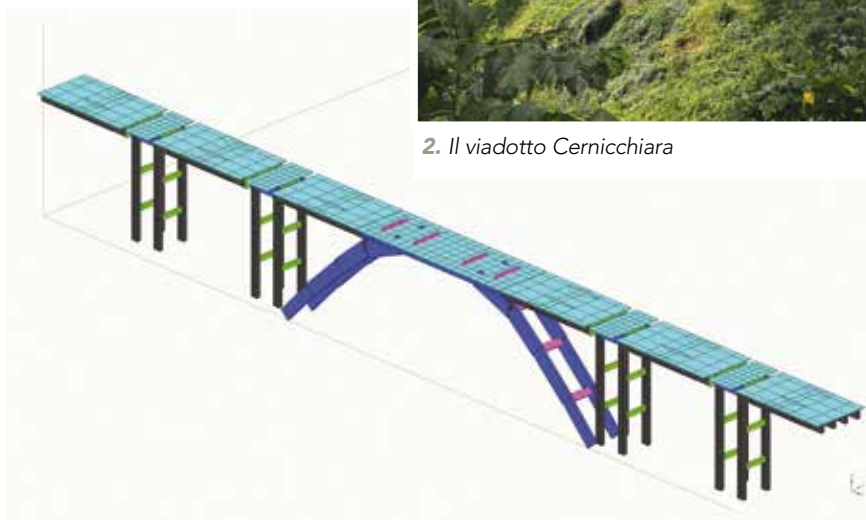
valutare l'efficacia dell'intervento di riabilitazione strutturale con il rinforzo in CFRP.

L'analisi del degrado dei materiali costituenti gli elementi strutturali quali il calcestruzzo e i ferri d'armatura ha costituito uno dei momenti più interessanti del progetto indirizzando verso la scelta della tipologia di intervento.

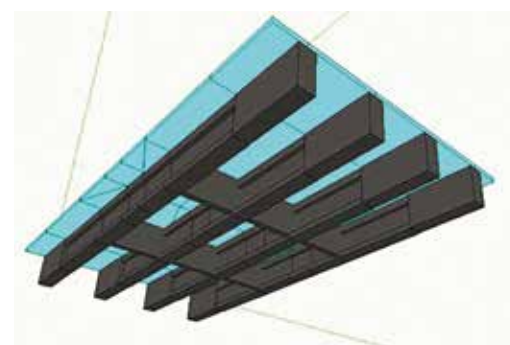
È stata condotta una campagna georadar sulle travi per individuare e definire il livello di compattezza del calcestruzzo, individuare nidi di ghiaia e dettagliare le armature. La caratterizzazione meccanica del calcestruzzo e delle armature, e la definizione dello stato di degrado sono stati effettuati attraverso prelievi di campioni in sito e successive prove di laboratorio. La specifica tipologia dei ferri di armatura riscontrata ha permesso di classificare l'acciaio come AQ 50.



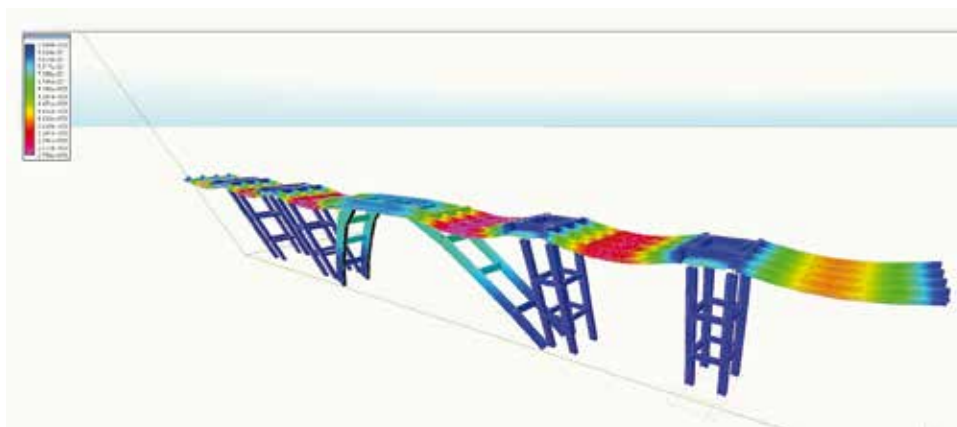
2. Il viadotto Cernicchiara



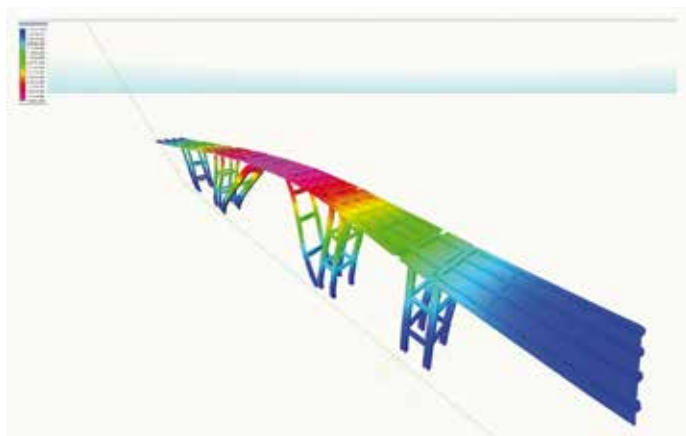
3. Il modello numerico tridimensionale del viadotto



4. Il modello numerico della singola campata



5. Le valutazioni strutturali: il diagramma delle deformate d'impalcato soggetto ai carichi permanenti



6. La rappresentazione del primo modo di vibrare

LE VALUTAZIONI STRUTTURALI

Le analisi strutturali condotte sui due modelli hanno permesso di individuare gli elementi strutturali critici su cui intervenire. L'analisi condotta per via iterativa sull'azione sismica ha restituito risultati soddisfacenti fino a uno $\zeta_E \approx 0,25$, dopodiché si è potuto osservare che gli elementi strutturali entravano progressivamente in crisi.

Le travi d'impalcato hanno mostrato una carenza di capacità resistente sia nei confronti delle azioni flessionali che di quelle

a taglio, e in misura prevalente per le travi di riva. Gli archi del viadotto hanno mostrato una certa criticità alle azioni sismiche nelle zone d'imposta, cosa peraltro attesa. Ha costituito un aspetto prevalente dell'analisi dello stato di fatto l'esame e la verifica delle condizioni locali dei pulvini e di alcuni quadri fessurativi che si presentavano sulle travi.

IL PROGETTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO

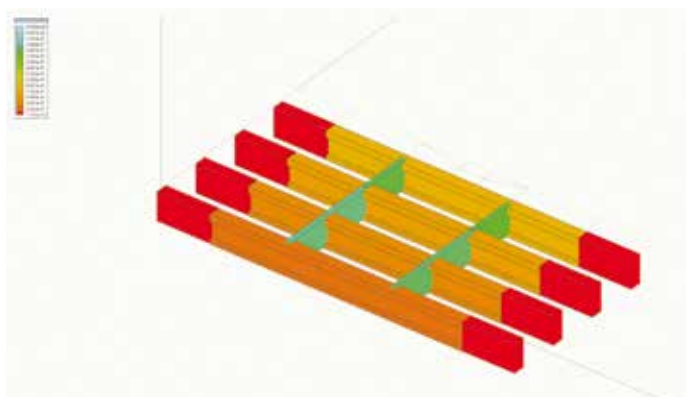
Lo studio dello stato di degrado e l'analisi delle sollecitazioni indotte dai carichi esterni, la cui intensità

secondo le Norme tecniche in vigore (NTC 2018) è maggiore rispetto a quella considerata all'epoca della progettazione, hanno permesso di identificare elementi strutturali quali le travi d'impalcato e l'imposta degli archi, come elementi critici. Le estremità delle travi e le imposte dell'arco hanno mostrato carenze in termini di resistenza alle sollecitazioni a taglio mentre le zone centrali delle travi d'impalcato hanno evidenziato carenze in termini di resistenza alle azioni flettenti.

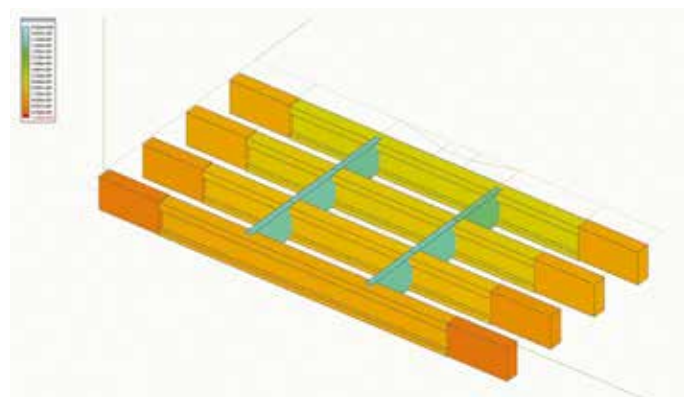
Tra le possibili soluzioni di rinforzo si è scelto di intervenire con i sistemi in CFRP. I materiali fibrorinforzati a matrice polimerica in fibra di carbonio (CFRP) sono materiali compositi, eterogenei ed anisotropi, con comportamento prevalentemente elastico lineare fino al collasso.

Questi materiali, applicati nell'ambito del rinforzo delle strutture di ingegneria civile, offrono il vantaggio di conferire maggior duttilità ed incrementare la resistenza dell'elemento strutturale con esigui spessori (si tratta di qualche millimetro). Questo determina la totale "invisibilità" dell'intervento di rinforzo sotto il profilo estetico. Gli esigui spessori non modificano le geometrie degli elementi, lasciando inalterate le inerzie strutturali e le masse sismiche coinvolte nell'analisi dinamica. Ne deriva una struttura dalle geometrie e dai pesi equivalenti a quella originaria.

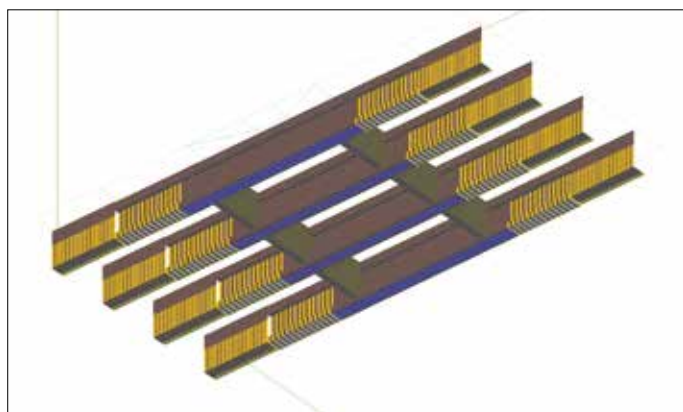
Inoltre, viene meno la redistribuzione delle tensioni all'interno della struttura come conseguenza del rinforzo, per cui l'anda-



7. Il modello numerico di verifica stato di fatto (in rosso le parti non verificate)



8. Il modello numerico di verifica stato di progetto gli elementi soddisfano tutti le verifiche



9. Il modello strutturale del rinforzo a flessione e taglio in campata

mento delle sollecitazioni per ogni elemento strutturale rimane inalterato. Anche la durata della struttura aumenta poiché in termini di durabilità, se adeguatamente protetta dal calore e dai raggi UV la resina - che è la matrice - non degenera, mentre le fibre in carbonio sono particolarmente resistenti agli agenti aggressivi.

I SISTEMI DI RINFORZO A FLESSIONE E IL TAGLIO IN CAMPATA

Le travi d'impalcato sono state rinforzate a flessione mediante lamine in CFRP poste all'intradosso di tutte le travi. Alle travi di bordo si sono applicate quattro lamine in parallelo, alle travi interne il rinforzo è stato eseguito con l'applicazione di tre lamine affiancate. Le dimensioni di ogni singola lamina sono:

- spessore = 1,4 mm;
- larghezza = 100 mm;
- lunghezza = 12.500 mm.

Il rinforzo a taglio per tutte le travi ha previsto l'applicazione di tessuto in CFRP uniassiale. Il rinforzo è stato at-



11. Un dettaglio delle lamine CFRP



10. L'applicazione in campata del rinforzo a flessione

tuato con 24 staffe aperte a "U" di larghezza pari a 100 mm e sviluppo pari a 2.800 mm circa; la disposizione delle staffe ha seguito l'andamento della sollecitazione a taglio, per cui le prime 15 staffe in CFRP sono state poste a interasse di 15 cm mentre le ulteriori nove staffe sono state poste a interasse di 30 cm.

LA CANTIERIZZAZIONE

Per poter lavorare a stretto contatto dell'intradosso dell'impalcato ed in testa alle pile è stato installato un ponteggio sospeso in grado di garantire un'agevole fruibilità di tutte le



12. Il ponteggio sospeso sulle campate 1, 2 e 3

aree interessate dai lavori. Lavorando esclusivamente all'intradosso, è stato possibile gestire e organizzare in quota l'intero cantiere così da annullare qualsiasi interferenza con l'area all'estradosso e quindi con la circolazione stradale. Utilizzare questo tipo di apprestamento di cantiere, in uno snodo cruciale come lo svincolo di Salerno Centro, ha consentito la fruizione dell'opera durante le attività lavorative.

Per la corretta applicazione delle resine è stato eseguito il monitoraggio delle condizioni ambientali con l'uso di una stazione elettronica per il monitoraggio dell'umidità dell'aria e della temperatura ambientale, consentendo di tenere sotto controllo sia il dew point (punto di rugiada) sia la temperatura di transizione vetrosa. È stato possibile così predisporre per tempo presidi di confinamento e condizionamento climatico in grado di garantire le condizioni di corretta applicazione dei sistemi di rinforzo in ogni condizione ambientale.

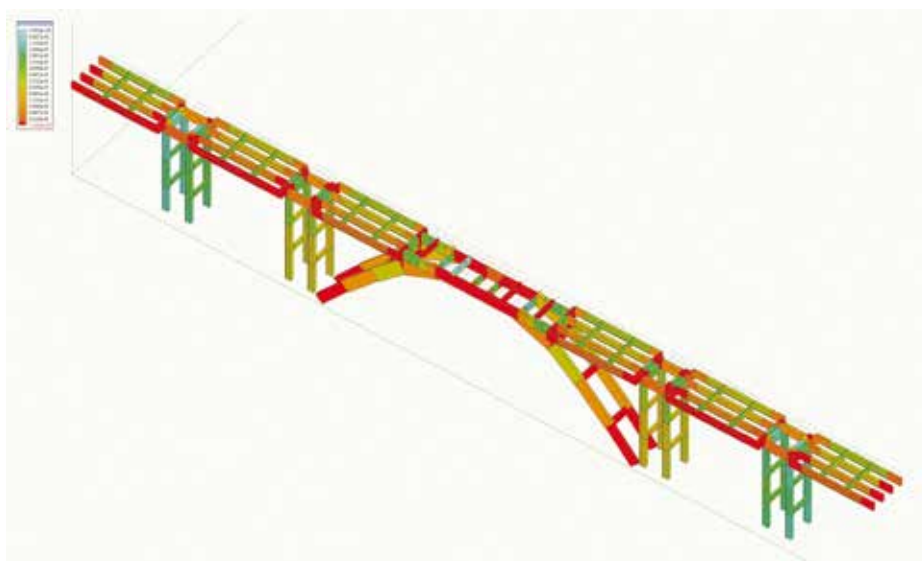
LE FASI LAVORATIVE

L'intervento è stato realizzato attraverso una precisa sequenza di fasi ognuna fondamentalmente prodromica a quella successiva.

Si è partiti con l'idroscarifica ad alta pressione del calcestruzzo all'intradosso del bulbo delle travi; successivamente, è stata effettuata la spazzolatura a metallo bianco delle armature affioranti a cui è seguita l'applicazione di inibitore della corrosione. La fase di ricostruzione della parte idroscarificata, realizzata con malte speciali ad alta resistenza, ha permesso di ricostruire la geometria originaria della sezione e di creare un valido supporto per la successiva applicazione del sistema CFRP.

Sul supporto così ricostruito è stato applicato il sistema di rinforzo in CFRP distinto nelle fasi di applicazione: primer, applicazione resina, incollaggio lamine e tessuti in CFRP. In ultimo, sul sistema di rinforzo è stato applicato un rivestimento ad elevata capacità protettiva nei confronti degli agenti aggressivi del calcestruzzo armato di tipo elastomerico.

Per l'applicazione delle staffe, è stato necessario arrotondare gli spigoli realizzando un raccordo di raggio pari a 2 cm, assicurare l'ancoraggio delle staffe ed evitare le espulsioni



13. Il diagramma delle verifiche di sicurezza soddisfatte

d'angolo attraverso la realizzazione di fiocchi in CFRP, fissati al supporto in calcestruzzo mediante l'utilizzo di ancorante chimico inserito nei fori preventivamente realizzati. ■

⁽¹⁾ Ingegnere, Titolare dello Studio di Ingegneria delle Strutture

⁽²⁾ Ingegnere, Direttore Tecnico della Valori Scarl - Consorzio Stabile

DATI TECNICI

Stazione Appaltante: ANAS SpA

Impresa Appaltatrice: Valori Scarl - Consorzio Stabile

Impresa Esecutrice: TEIP Srl

Progetto Esecutivo: Ing. Francesco Fanigliuolo dello Studio Ingegneria delle Strutture

Direttore Operation e Coordinamento Territoriale: Ing. Matteo G. Castiglioni di ANAS SpA

Responsabile Manutenzione Programmata Direzione Generale: Ing. Domenico Petruzzelli di ANAS SpA

Responsabile Centro-Sud Ufficio Ponti, Viadotti e Gallerie: Ing. Paolo Mannella di ANAS SpA

Responsabile Struttura Territoriale Calabria: Ing. Francesco Caporaso di ANAS SpA

Responsabile Area Gestione Rete Autostrada A2 del Mediterraneo: Ing. Massimiliano Campanella di ANAS SpA

RUP: Ing. Giuseppe Meli di ANAS SpA

Direttore dei Lavori: Ing. Giorgio Fratagnoli di ANAS SpA

Coordinatore della sicurezza in fase di esecuzione: Ing. Risoli di ANAS SpA

Direttore Tecnico Impresa appaltatrice: Ing. Davide Ferraro

Responsabile di produzione Impresa appaltatrice: Dott. Franco Celauro

Direttore Tecnico Impresa esecutrice: P.I. Giuseppe Ippolito

Importo complessivo dei lavori: 1.588.579,79 Euro (Accordo Quadro DG 37/17 applicativo n° 3)

Ringraziamenti

Si ringrazia il P.I. Giuseppe Ippolito, Direttore Tecnico della T.E.I.P. Srl, per l'eccellente coordinamento delle fasi lavorative, reso possibile grazie alla sua decennale esperienza nelle applicazioni dei rinforzi strutturali in CFRP. Si ringrazia, inoltre, l'Area Gestione Rete A2 Autostrada del Mediterraneo nella persona del responsabile Ing. Massimiliano Campanella.