

Evaluation of the impact and fire damage of a highway bridge

Valutazione del danno da impatto e da incendio su un sovrappasso autostradale

A. Belleri¹, N. Bettini², R. Felicetti³

¹ *Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università degli Studi di Bergamo, Dalmine, Italy*

² *Di.Mo.Re. Srl, Brescia, Italy*

³ *Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Milano, Italy*

ABSTRACT: In a dramatic car accident that occurred in January 2017, a touring coach hit at high speed one pillar of the highway overpass at the Verona-Est exit of the A4 motorway (Italy). This was followed by a violent fire that affected the support portal and part of the decking intrados, consisting of post-tensioned box beams. In order to assess the damage suffered by the structure, the effects of impact and exposure to high temperatures were analysed separately.

Regarding the first issue, the numerical models of the bridge calibrated on the basis of dynamic characterization tests included the contribution of the inertial forces and the effect of the higher intensity of the impulsive force in the first stage of the impact. With reference to the effects of high temperature, a general survey and more detailed analyses have been carried out, using both traditional techniques and more advanced methods. This allowed to form a clear picture of the damage suffered, coordinated with the modelling of the fire scenario. / In un drammatico incidente stradale occorso nel gennaio 2017, un autobus granturismo ha impattato a forte velocità contro un pilastro di sostegno del sovrappasso autostradale dell'uscita Verona-Est dell'autostrada A4. Ne è seguito un violento incendio che ha interessato il portale di appoggio e un'area circoscritta all'intradosso dell'impalcato, costituito da travi a cassone post-tese. Al fine di una valutazione dei danni subiti dalla struttura sono stati analizzati separatamente gli effetti dell'impatto e dell'esposizione alle alte temperature.

Per quanto riguarda la prima tematica, nei modelli numerici tarati sulla base delle prove di caratterizzazione dinamica del ponte è stata inclusa la componente inerziale della struttura, considerando anche la maggiore intensità dell'azione impulsiva nella prima fase dell'impatto. Con riferimento agli effetti dell'alta temperatura, sono state svolte indagini di ricognizione generale e di maggior dettaglio, impiegando sia tecniche tradizionali sia metodi più avanzati, fornendo un quadro chiaro del danneggiamento subito, coordinatamente con la modellazione dello scenario di incendio.

KEYWORDS: impact; dynamic identification; fire scenario / impatto; identificazione dinamica; scenario d'incendio

1 INTRODUZIONE

Il presente articolo ha per oggetto la valutazione del danno e delle possibili criticità sul cavalcavia n.287 di svincolo dell'Autostrada A4 Brescia - Padova in località Verona est, in seguito all'impatto di un autobus, e al conseguente incendio, occorsi in data 20 gennaio 2017 alle ore 23.40 circa.

Il cavalcavia (Fig. 1) è di tipo semi-integrale ed è costituito da elementi prefabbricati assemblati in opera. La struttura presenta un andamento rettilineo e ha dimensioni in pianta di 56.50x10m. L'impalcato è articolato in tre campate (rispettivamente da 10, 36 e 10m) ed è formato da 5 travi a cassone affiancate ($b \times h = 1.88 \times 1.15$ m) rese continue da giunti in calcestruzzo gettati in opera e dall'armatura post-tesa. Il collegamento tra le travi è affidato a delle cerniere lineari continue realizzante mediante una chiave di taglio lungo ciascun fianco del cassone.

I due appoggi intermedi sono costituiti da cuscini in neoprene armato posati su architravi a sezione

trapezia ($b \times h = 0.70-1.00 \times 1.50$ m) sorretti da pilastri rastremati con sezione variabile da 0.60x1.20m sul piano campagna a 0.70x1.50m in sommità. Il materiale utilizzato è calcestruzzo di classe $R_{ck} 50$, acciaio d'armatura in barre ad aderenza migliorata Feb44k, trefoli per cavi di precompressione con f_{ptk} superiore a 1770 MPa.

Le verifiche sono state condotte con il duplice scopo di valutare l'effettivo stato di danno del pilastro in seguito all'impatto (in particolare possibili rotture a taglio), e il momento resistente residuo dell'impalcato dopo l'incendio, per valutare l'eventuale necessità di lavori di ripristino.

L'incidente ha coinvolto un autobus Setra S317 il quale, dopo un primo impatto con il guard-rail a bordo carreggiata, ha abbattuto un palo di illuminazione e successivamente ha impattato contro il primo pilone del cavalcavia (Fig. 2 e 3). Nell'impatto con il pilastro di sostegno del sovrappasso l'intera fiancata destra e i sedili sono stati rimossi per una lunghezza di circa 8m.

2 CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL SOVRAPPASSO E MODELLO STRUTTURALE

Per una migliore calibrazione del modello a elementi finiti da utilizzare nelle analisi è stata eseguita una campagna di acquisizione delle vibrazioni ambientali al fine di elaborare un'identificazione dinamica del cavalcavia. Per la registrazione delle accelerazioni sono stati posizionati 9 accelerometri (modello 731A di Wilcoxon Research Inc., sensibilità 10V/g), disponendoli con l'asse orizzontale in direzione trasversale all'impalcato. (Fig. 4 e 5).

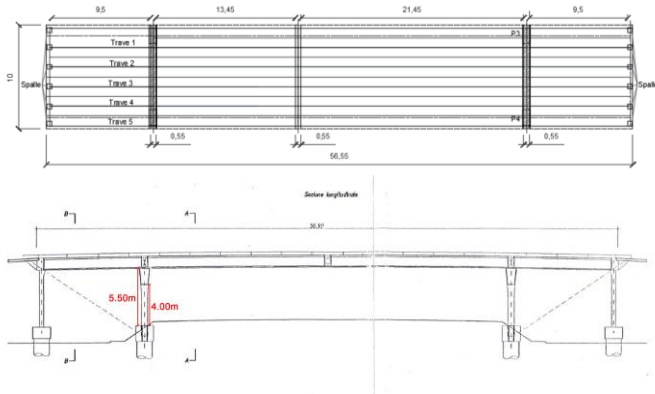


Figure 1. Plan view and cross section of the bridge / Pianta e sezione del cavalcavia.



Figure 2. Lateral view of the bridge / Vista laterale del cavalcavia.

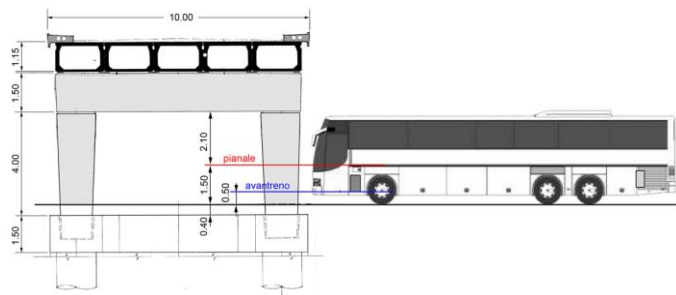


Figure 3. Scheme of the impact / Schema dell'impatto.

La struttura dell'automezzo è caratterizzata da un telaio leggero in acciaio, composto da profili piegati a freddo ed elementi scatolari. Ci si può attendere una maggiore forza di impatto nella fase iniziale, considerata la maggior resistenza e massa dell'avantreno rispetto alla parte centrale del telaio e al vano bagagli sottostante.

Un'altra particolarità di questo automezzo è la posizione anteriore di due serbatoi del gasolio, di cui quello destro è stato distrutto nell'impatto. Un terzo serbatoio supplementare è collocato nella parte posteriore del vano bagagli e non ha riportato danni significativi. Le riprese della telecamera di sorveglianza (Fig. 2) mostrano che una quantità significativa di combustibile si è riversata sulla prima corsia della carreggiata e ha alimentato l'incendio.

Per quanto riguarda la velocità al momento dell'impatto, questa è stata considerata compresa tra 100 e 110 km/h, ritenendo tale intervallo coerente con i danni subiti dal guard rail e dall'automezzo.

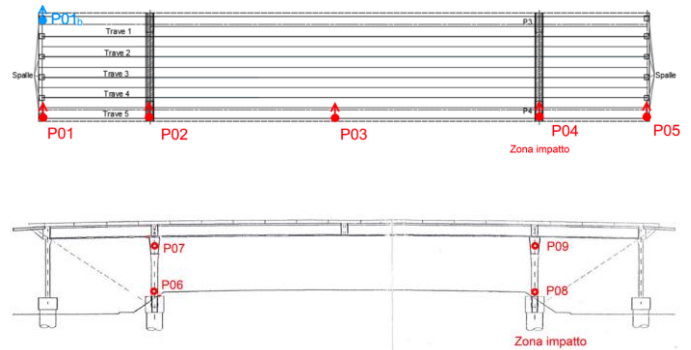


Figure 4. Position of accelerometers / Posizione degli accelerometri.

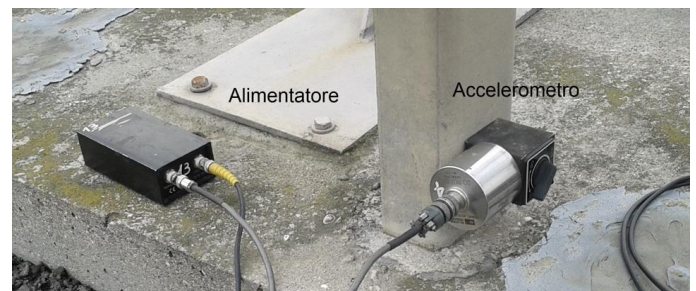


Figure 5. Accelerometer at position P04 / Accelerometro in posizione P04.

Per valutare le caratteristiche dinamiche (frequenze proprie, modi di vibrare, smorzamento) nella direzione trasversale del sovrappasso sono stati utilizzati le registrazioni accelerometriche da vibrazioni ambientali (frequenza di campionamento 400 Hz). I dati sono stati preliminarmente filtrati con filtro passabanda di ordine 2048 tra le frequenze 0.5 Hz – 100 Hz. È stata applicata una decomposizione nel dominio delle frequenze (Brinker et al. 2001) che ha permesso di identificare quattro modi in direzione trasversale (Modo 1 – 4.83Hz; Modo 2 – 9.57Hz; Modo 3 – 12.67Hz; Modo 4 – 20.89Hz) le cui forme modali sono riportate in Figura 6.

I risultati dell'identificazione dinamica sono stati utilizzati per calibrare il modello a elementi sviluppato attraverso il codice MidasGen. A tal fine sono stati utilizzati elementi tipo trave con formulazione alla Timoshenko le cui sezioni sono state definite in accordo con la documentazione di progetto esecutivo e i rilievi. Oltre alla continuità flessionale tra gli

elementi prefabbricati e sono state considerate delle molle aggiuntive:

- a) Molla traslazionale tra impalcato e spalla (k_s) che simula l'interazione complessiva del ponte col terrapieno circostante; per quanto riguarda la rotazione nel piano dell'impalcato, questa è stata modellata come incastro rotazionale;
- b) Molla traslazionale tra portali e impalcato (k_p) simulante la presenza del neoprene; è stata posizionata una molla sotto ogni cassone (5 molle per pila);
- c) Molla traslazionale tra pilastri e terreno (k_t) simulante l'interazione col terreno sottostante; per quanto riguarda la rotazione questa è stata modellata come incastro rotazionale.

La procedura di calibrazione ha portato alla definizione di un modello a elementi finiti le cui molle aggiuntive hanno rigidezza pari a $k_s=1000\text{kN/mm}$, $k_p=70\text{kN/mm}$, $k_t=1500\text{kN/mm}$. Tale modello è riportato in Figura 7.

Il modello così ottenuto ha la particolarità di avere 3 modi di vibrare trasversali prossimi ai risultati dell'identificazione dinamica, in particolare Modo 1 – 5.11Hz, Modo 3 – 10.22Hz e Modo 4 – 23.29Hz. Per ciascun modo il valore MAC (modal assurance criterion) è pari a 0.9966, 0.9120 e 0.6126 rispettivamente. Valori MAC prossimi a 1 indicano buona rispondenza tra la forma dell'autovettore identificato e simulato. Tale modello è stato quindi considerato adatto per le successive analisi delle sollecitazioni dovute all'impatto dell'autobus.

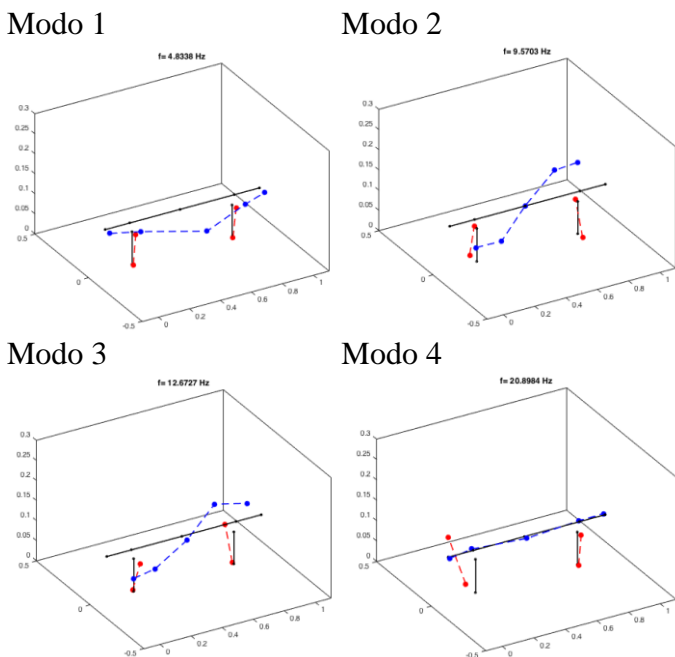


Figure 6. Modal shapes of identified modes / Forme modali dei modi identificati.

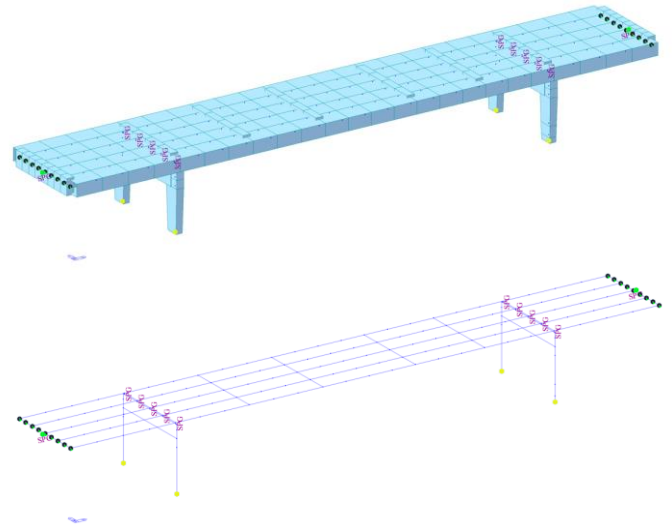


Figure 7. Finite element model / Modello a elementi finiti.

3 SCENARIO DI IMPATTO ED EFFETTI SULLA STRUTTURA

La struttura dell'automezzo incidentato presenta zone di maggior rigidezza e massa (avantreno, retrotreno e vano motore) e zone più deformabili (la parte centrale che comprende il vano bagagli). Durante l'impatto con un ostacolo, la grande deformazione subita comporta una forza impressa sull'ostacolo abbastanza distribuita nel tempo.

Per determinare la curva forza-tempo si è fatto riferimento a risultati di letteratura (Dias de Meira et al. 2016). Nel caso in esame si può ritenere che l'azione di impatto sia composta da due contributi principali (Fig. 3):

- a) l'effetto dell'avantreno, di maggiore intensità e ad una quota più bassa (0.5m), per avanzamenti dell'automezzo fino a 3m;
- b) l'effetto del pianale della cabina, di intensità inferiore e posto ad una quota più elevata (1.5m), per avanzamenti tra 1.2 e 7.9m.

Le due componenti sono state tarate in funzione della velocità di impatto ipotizzata, in modo da rispettare l'equivalenza tra energia cinetica iniziale e lavoro di deformazione complessivo. L'intensità massima del contributo b) è stata posta pari al 40% del contributo a) in accordo con Dias de Meira et al. 2016). A partire dall'andamento della forza in funzione dell'avanzamento dell'automezzo è stato valutato l'andamento della velocità e quindi il tempo trascorso, in modo da ricavare il diagramma forza-tempo necessario come dato di input per le analisi numeriche. Per una massa di 24t e velocità di riferimento di 100km/h o 110km/h si riporta in Figura 8 la distribuzione spaziale della forza di impatto in relazione allo spostamento relativo autobus-pila.

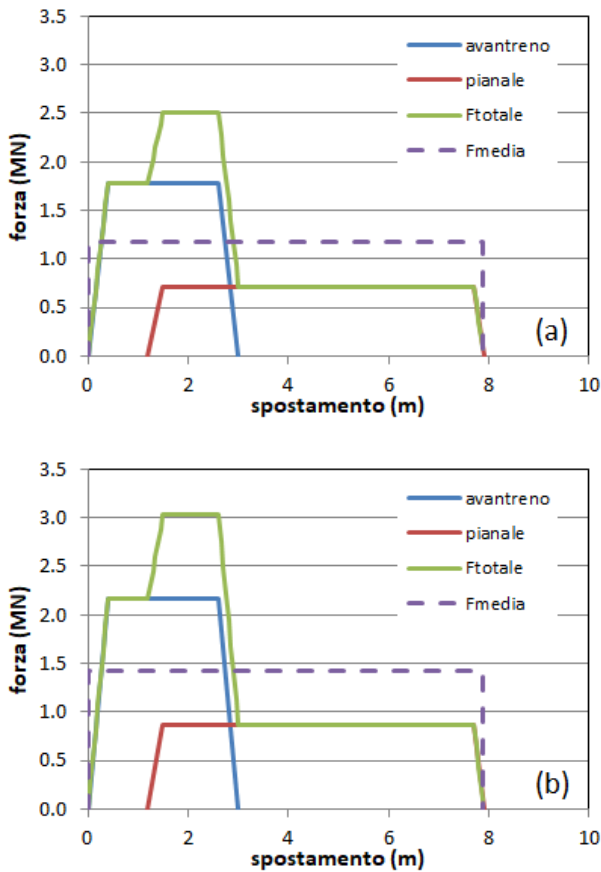


Figure 8. Load transmitted at the impact zones: a) 100 km/h; b) 110 km/h / Carico trasmesso nella zona di impatto: a) 100 km/h; b) 110 km/h.

Sulla base delle caratteristiche sezionali dedotte dagli elaborati grafici, sono stati valutati i domini M-N di pressoflessione retta per il pilastro del cavalcavia colpito dall'autobus al variare delle quote e confrontati con le sollecitazioni ottenute applicando la forza di impatto sul modello a elementi finiti (esempio riportato in Figura 9). Per tutti i punti, le coppie di sollecitazione M-N sono lontane dalla frontiera del dominio, per cui non si evidenziano problematiche di resistenza a pressoflessione.

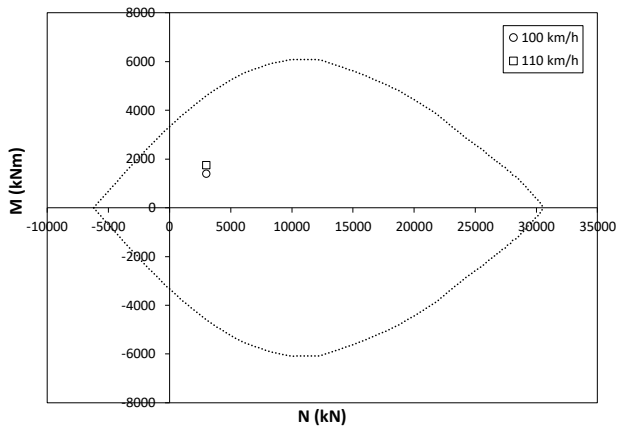


Figure 9. M-N capacity vs demand comparison of the column hit by the coach (ground level) / Verifica M-N pila a quota piano campagna.

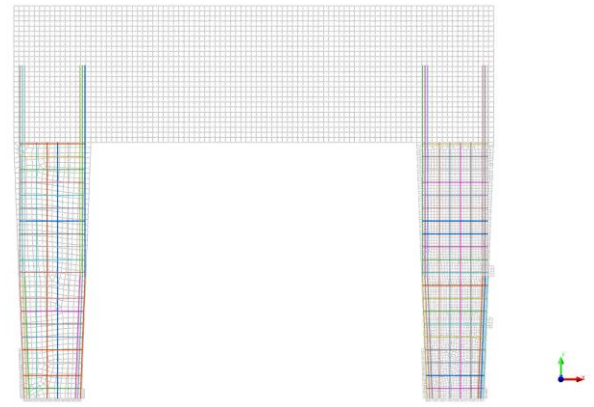


Figure 10. Finite element model of the portal / Modello a elementi finiti del portale.

Per quanto riguarda la sollecitazione a taglio (2.36MN e 2.86MN per velocità di 100 e 110km/h rispettivamente), si osserva che la verifica non è soddisfatta secondo normativa vigente (rapporto domanda/capacità pari a 150%) per una carenza di resistenza lato staffe. Trattandosi di problema diffusivo locale è stato quindi definito un modello a elementi finiti bidimensionale (Figura 10, Diana 9.6) su cui è stata eseguita un'analisi statica non-lineare incrementale considerando uno stato di sforzo piano. La mesh è costituita da elementi plane stress a 8 nodi del secondo ordine (CQ16M) con spessore degli elementi coerente con gli elaborati progettuali. Le armature sono elementi embedded. Il calcestruzzo è stato modellato adottando una formulazione total strain rotating crack con comportamento elasto-fragile a trazione e comportamento quasi-fragile a compressione con curva tipo Thorenfeld. Le barre di armatura sono elementi monodimensionali con comportamento elasto-plastico alla von Mises. Il carico da impatto è modellato come spostamento impresso (per cogliere il ramo degradante della risposta) agente alla quota dell'avantreno, pari a 0.5m dal piano campagna. L'analisi condotta, di tipo pushover, ha permesso di valutare la capacità della pila analizzata, in particolare la resistenza a taglio.

La Figura 11 riporta la curva forza-spostamento

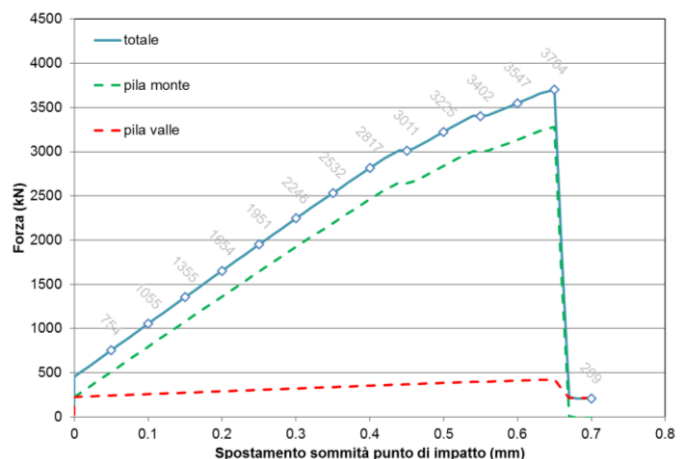


Figure 11. Lateral resistance of the portal / Resistenza laterale del portale.

del punto di applicazione del carico. Il comportamento è elasto-fragile, con massima resistenza a carico laterale pari a circa 3.7MN. La modellazione in controllo di forza, con applicazione contestuale di un primo carico alla quota dell'avantreno e di un secondo carico (pari al 40%) alla quota del pianale fornisce una resistenza di circa 3.6MN.

La crisi fragile è legata al collasso del puntone di calcestruzzo che connette la fondazione e l'avantreno della pila di monte. La fessurazione comincia a manifestarsi per un carico complessivo di circa 3.0MN (Figura 12), e il puntone si isola per un carico di circa 3.4MN (Figura 13), quindi poco prima del collasso. Dal confronto con i valori massimi del carico prodotti dall'impatto emerge che anche nell'ipotesi di velocità maggiore (110km/h) non si raggiunge il limite di fessurazione. Le osservazioni visive sul campo confermano l'assenza di quadri fessurativi riconducibili a questo meccanismo di rottura. Le analisi mostrano inoltre che armature lavorano a tassi di sforzo ridotti fino al collasso (intorno a 200MPa) per cui è improbabile che siano state danneggiate dall'impatto.

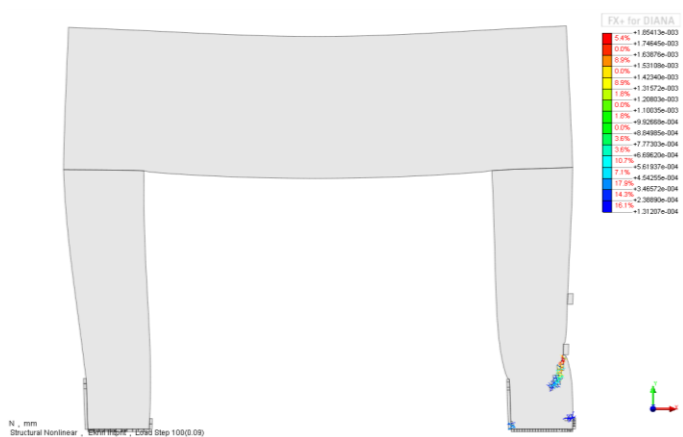


Figure 12. Crack pattern at a lateral load of 3.0MN / Quadro fessurativo associato al carico laterale di 3.0MN.

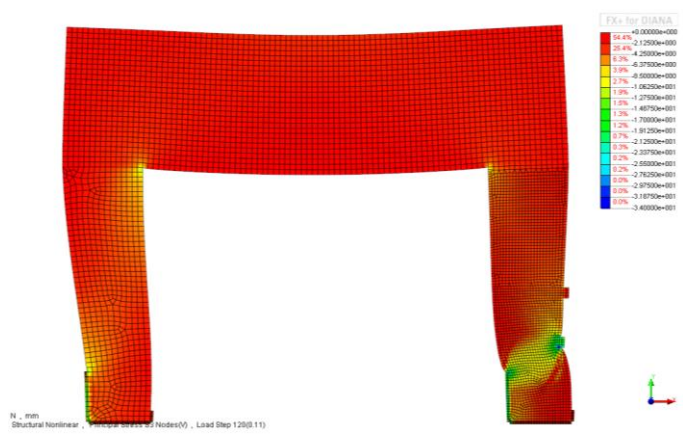


Figure 13. Minimum principal stress (compression) at a lateral load of 3.4MN / Sforzi principali minimi (compressione) associati a carico laterale di 3.4MN.

4 SCENARIO DI INCENDIO, STIMA DEL DANNO E DELLA CAPACITÀ RESIDUA

La valutazione della capacità portante residua a seguito dell'incendio richiede una modellazione del carico termico sulla base delle informazioni disponibili e una sua validazione fondata sugli esiti delle prove diagnostiche eseguite sul campo (Felicetti, 2014).

L'esame della registrazione del sistema di videosorveglianza mostra che l'innesco dell'incendio è stato immediato, in considerazione dell'elevata velocità di impatto e della posizione anteriore di due serbatoi del gasolio. La successiva propagazione delle fiamme è stata molto rapida, come è tipico per questo tipo di automezzi, e ancor più in conseguenza del danneggiamento dovuto all'impatto. La durata complessiva dell'incendio è stata di circa 30 minuti, con massima intensità (fiamme che impattano sull'intradosso dell'impalcato) nei primi 10-15 minuti. Le operazioni di estinzione sono cominciate subito dopo l'arrivo di due autopompe dei Vigili del Fuoco, circa 16 minuti dopo l'impatto.

Ai fini della modellazione del carico termico è stato considerato il modello di incendio localizzato proposto da Hasemi e riportato nell'Eurocodice 1 parte 1-2. La curva di rilascio termico, necessaria per definire la potenza generata dalla combustione, è stata assunta sulla base di dati di letteratura (Beard A. & Carvel R. 2012) opportunamente scalati in relazione alla maggiore dimensione dell'automezzo e all'elevato carico di incendio (Figura 14a).

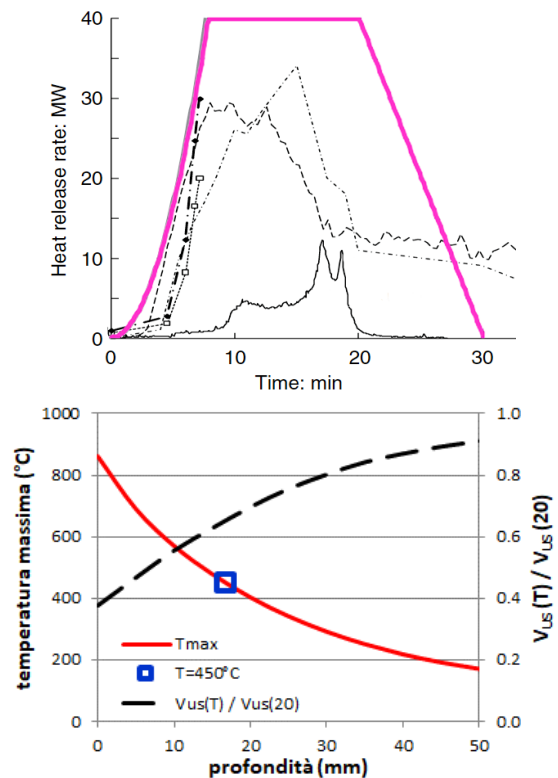


Figure 14. Assumed HRR curve and resulting concrete temperature profile / Curva di rilascio termico ipotizzata e conseguente profilo termico nel copriferro.

Va sottolineato che il modello utilizzato è poco sensibile ai parametri adottati, dal momento che viene raggiunta una sorta di saturazione del flusso termico in ingresso nella superficie degli elementi strutturali. Un elemento chiave è invece la durata del riscaldamento, sulla quale sono disponibili informazioni precise.

A partire dallo scenario di incendio così delineato, è stato determinato il profilo delle temperature massime subite dall'intradosso delle travi a cassone (spessore 0.10m) e il corrispondente profilo atteso di decadimento della velocità degli impulsi ultrasonici (Figura 14b). Di particolare interesse è la profondità dell'isoterma 450°C, che corrisponde all'inizio della decomposizione della Portlandite, la cui presenza può essere verificata mediante un semplice kit per il prelievo e l'analisi dell'alcalinità della polvere di perforazione prodotta da un comune trapano (Felicetti 2013). In sintesi, le indagini diagnostiche effettuate sono articolate come segue:

- ricognizione generale con battitura delle superfici;
- diffusa serie di misure ultrasoniche indirette con sonde affiancate a distanza fissa (150mm);
- prove di rifrazione di impulsi ultrasonici con sonde affiancate a distanze crescenti (100-600mm);
- misura della profondità di de-alcalinizzazione;
- misure di durezza dinamica delle barre esposte.

La battitura ha evidenziato estesi distacchi del coprifermo nell'architrave e nei pilastri, con fenomeni di spacco superficiale nel pilastro contro cui è avvenuto l'impatto. Nelle travi a cassone il fenomeno è risultato meno evidente, anche grazie alla presenza nelle prescrizioni di progetto di fibre polipropilene con funzione anti-ritiro, che hanno ridotto la pressione del vapore nei pori della matrice cementizia. Le indagini ultrasoniche indirette, integrate da misure più avanzate con onde di taglio (Bellanova et Al. 2017), hanno permesso di tracciare una mappa del danneggiamento superficiale, con particolare riferimento all'intradosso delle travi (Figura 15).

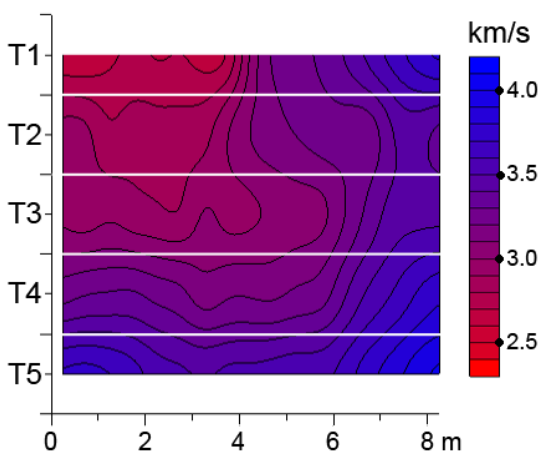


Figure 15. Contour map of ultrasonic pulse velocity at the intrados of the 5 box beams / Mappa della velocità degli impulsi ultrasonici all'intradosso delle 5 travi a cassone.

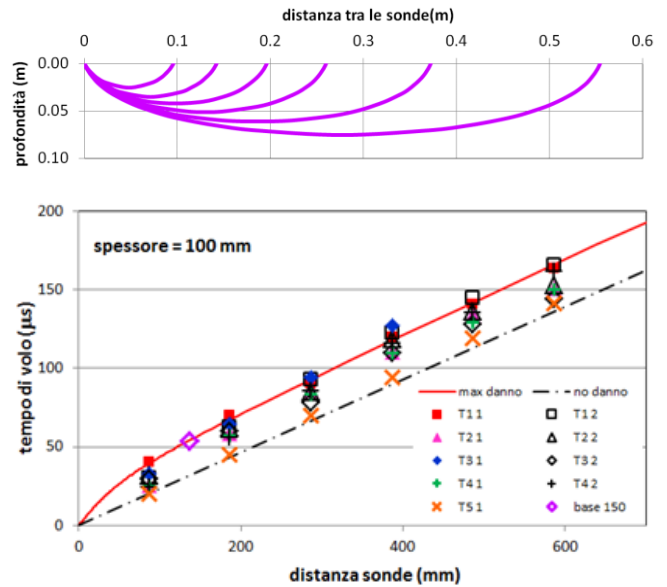


Figure 16. Sub-surface trajectories of ultrasonic pulse refraction and related X-T curve / Traiettorie di rifrazione degli impulsi ultrasonici e curva X-T corrispondente.

Un'analisi di maggior dettaglio della profondità del danneggiamento è stata resa possibile dalle prove di rifrazione degli impulsi ultrasonici, dal momento che al crescere della distanza tra le sonde vengono indagati strati sempre più profondi del materiale. Al fine di interpretare i risultati sperimentali, dal profilo delle velocità indicato in Figura 14b sono state calcolate numericamente le traiettorie e i tempi di propagazione degli impulsi (Figura 16). La curva distanza-tempo (X-T) così ottenuta è in ottimo accordo con le misure sperimentali ottenute nelle travi più danneggiate (T1, T2 e T3), il che permette di validare lo scenario di incendio ipotizzato. Anche le misure di profondità di dissociazione della Portlandite (15mm massimo) appaiono coerenti con il profilo termico ipotizzato (punto a 450°C in Figura 14b).

Sulla base dello scenario di incendio così validato è già possibile concludere che lo spessore di calcestruzzo danneggiato è relativamente sottile ($T > 300^\circ\text{C}$ fino a 30mm), in virtù della breve durata dell'incendio. Tale spessore ha un'influenza trascurabile se rapportato alle sezioni massive dei pilastri e dell'architrave. Più significativa è la severità per la sezione delle travi a cassone, a causa del ridotto spessore della tavola inferiore (0.10m). Ipotizzando a favore di sicurezza la totale rimozione di uno strato di 30mm dal fondo e da un lato della sezione della trave (condizione di esposizione della trave di bordo) è possibile valutare la massima riduzione della capacità portante nella zona di appoggio (Figura 17).

Sono state svolte anche analisi termiche 2D di maggior dettaglio, con particolare riguardo per i tre cavi di post-tensione presenti nel fianco esposto della prima trave (Figura 18). Si osserva che, grazie all'elevato coprifermo ($\geq 40\text{mm}$) e al ponte termico indotto dai cavi stessi, la temperatura massima raggiunta dai trefoli supera di poco i 100°C , il che può far ritenere trascurabile la perdita di precompressione-

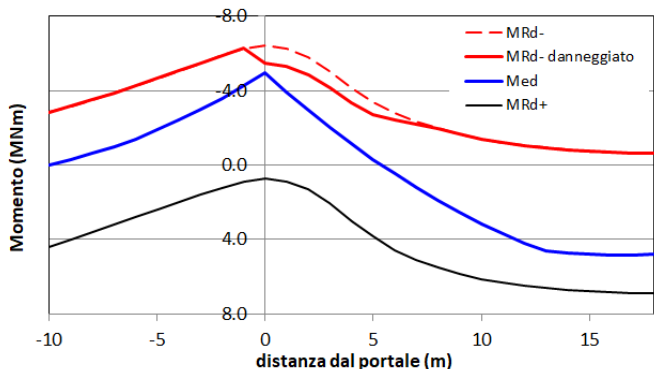


Figure 17. Residual design bending resistance of the most damaged beam vs design bending moment M_{ed} / Capacità portante residua di progetto della trave più danneggiata e confronto col momento sollecitante di progetto M_{ed} .

ne e praticamente nulla la perdita di resistenza dei cavi. Per quanto riguarda l'armatura ordinaria, la zona più esposta è la parte superiore del pilastro contro cui è avvenuto l'impatto, che è stata oggetto di un esteso spacco superficiale, mettendo a nudo le barre più esterne (Figura 19). Il confronto in termini di durezza dinamica (metodo Leeb) con una barra non esposta ha mostrato una riduzione del 4%, corrispondente ad un calo circa doppio della resistenza allo snervamento (Felicetti & Gambarova 2013). Anche in questo caso il danno può essere considerato trascurabile in considerazione del numero di barre più interne che costituiscono l'armatura del pilastro.

Un ultimo aspetto che è stato oggetto di studio riguarda la valutazione del danno subito dai cuscini di appoggio in neoprene armato, posti tra l'architrave e l'intradosso delle travi a cassone. L'ispezione visiva ha mostrato una carbonizzazione molto superficiale dell'elastomero (circa 2mm), al di sotto della quale è stata conservata l'elasticità originaria. Non essendo disponibili dati di letteratura sulla diffusione del calore in questo tipo di materiale, è stata svolta una prova di laboratorio posizionando un elemento identico tra cubetti di calcestruzzo (Figura 20) ed esponendone un lato ad una piastra radiante a 800°C per 30 minuti. Come prevedibile, tale condizione è risultata più severa del caso reale, con una profondità della carbonizzazione circa doppia. Ciò nonostante,

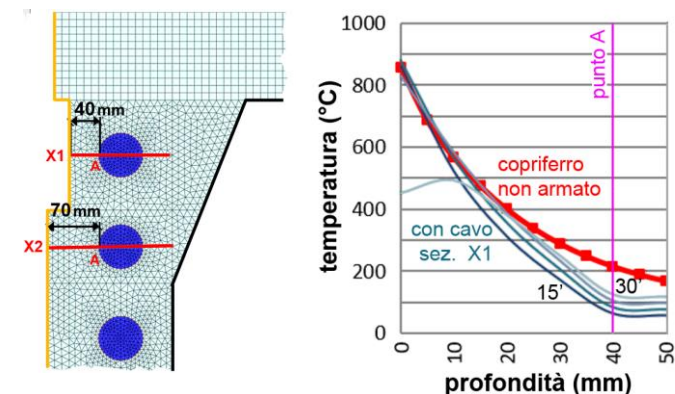


Figure 18. Temperature profile across the cover of the most exposed post-tensioning cable / Profilo termico nel copriferro del cavo più esposto al fuoco.

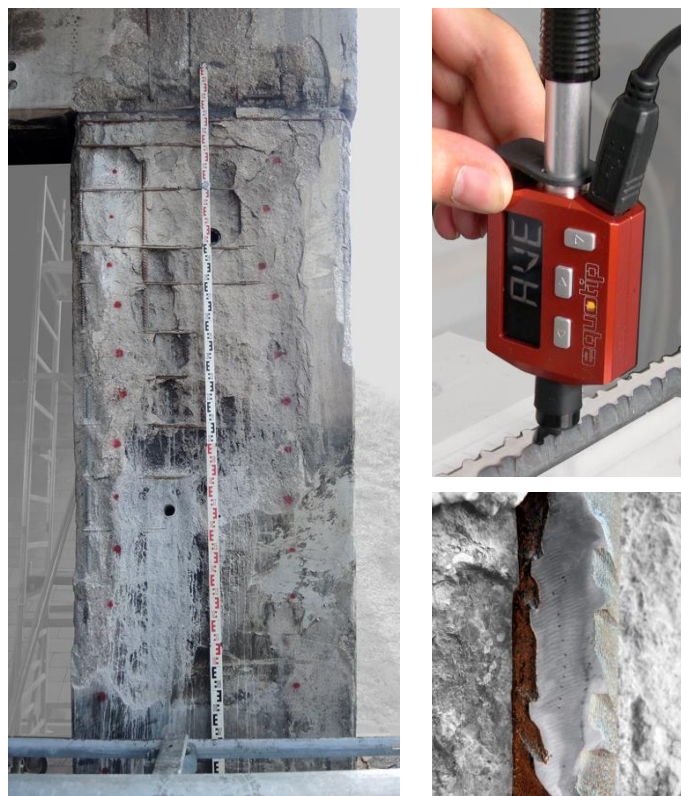


Figure 19. Surface spalling on one column and dynamic hardness tests on exposed rebars / Spacco superficiale su un pilastro e prove di durezza dinamica sulle barre esposte.

grazie al potere isolante dello strato carbonizzato e ai ponti termici, non si è osservata una penetrazione significativa del calore e solo un primo strato di circa 7mm ha raggiunto temperature tali da portare alla decomposizione dei plastificanti (220-260°C, Caballero et al. 2005). Si può quindi concludere che non sia necessaria la sostituzione dei cuscini d'appoggio.

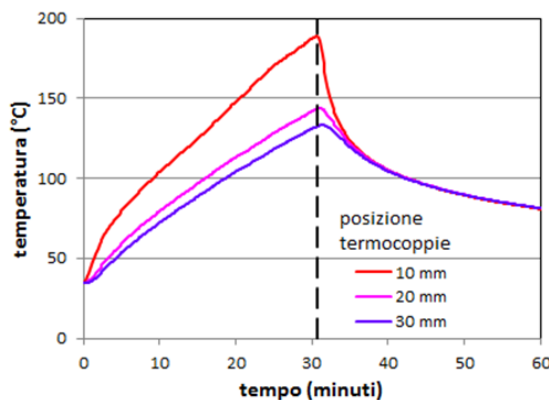


Figure 20. Heating test on a reinforced elastomeric bearing pad / Prova di riscaldamento su un cuscinetto di appoggio in neoprene armato.

5 CONCLUSIONI

The paper discussed the assessment of a bridge subjected to impact of a bus and to the consequent fire. The impact probably occurred at an approximate speed of 100-110km/h, involving an energy of the order of 9-11MJ and producing a considerable deformation of the vehicle chassis (about 8m). The maximum flexural stress produced in the pillar are well below the capacity. As far as shear load is considered, an assessment of the resistance according to the actual regulations would have prefigured a shear collapse. However, a more detailed model showed that the capacity of the pillar is higher than the demand and that the damage progression before collapse is extremely limited (brittle failure).

The information collected on the dynamics of the fire and the comparison with Non-Destructive tests allowed identifying the maximum thermal load to which the structural elements were exposed. Thanks to the high cover thickness of the post-tensioning cables and to the short exposure, the beams suffered just a 15% maximum reduction of the bending capacity. On the other hand, a negligible effect can be recognized on the pillars and the lintel, due to their massive sections. Also the rebars in the pillar impacted by the bus, although partially exposed, have suffered a modest damage (reduction of the yield strength to the order of 10%). Finally, a thermal radiation test on a reinforced elastomeric bearing pad showed the good response to the fire of this material, thanks to the excellent insulating properties of the charred surface layer.

Nel presente articolo sono stati discussi gli esiti delle valutazioni svolte al fine di evidenziare eventuali criticità relativamente alla sicurezza statica di un cavalcavia soggetto a impatto di un autobus e al conseguente incendio. L'impatto è probabilmente avvenuto a una velocità indicativa di 100-110km/h, coinvolgendo un'energia dell'ordine di 9-11MJ e producendo una notevole deformazione del telaio dell'autoveicolo (circa 8m). Le sollecitazioni flessionali massime che l'impatto ha prodotto nel pilastro sono largamente inferiori alla capacità resistente in presenza di carico assiale. Per quel che concerne le sollecitazioni taglianti, una valutazione della resistenza secondo normativa avrebbe prefigurato un collasso a taglio. Tuttavia, una modellazione di maggior dettaglio ha mostrato come la capacità della sezione di base risulti superiore alla sollecitazione attesa e che la fase di danneggiamento pre-collasso sia estremamente limitata.

Le informazioni raccolte sulla dinamica dell'incendio e il confronto con prove diagnostiche svolte hanno consentito di identificare con buona attendibilità il carico termico massimo a cui sono stati esposti gli elementi strutturali più esposti. Grazie all'elevato spessore del copriferro dei cavi di post-tensione e all'esposizione relativamente breve, le travi

dell'impalcato hanno subito una modesta riduzione di capacità flessionale (non superiore al 15%). Si può invece ritenere trascurabile il danno subito dai pilastri e dall'architrave, grazie alle loro sezioni massive. Anche le barre del pilastro contro cui ha impattato l'autobus, per quanto parzialmente esposte alle fiamme, hanno subito un danno modesto (riduzione della resistenza allo snervamento dell'ordine del 10%). Infine, una prova di esposizione all'irraggiamento termico di un appoggio in neoprene armato ha mostrato la buona risposta al fuoco di questo materiale, grazie soprattutto alla formazione di uno strato carbonizzato superficiale di ottime proprietà isolanti.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'ing. Marco Viespoli di Autostrada Brescia-Verona-Vicenza-Padova Spa per il supporto tecnico e logistico durante lo svolgimento delle prove sul campo.

REFERENCES

- Bellanova M., Cucchi M., Felicetti R. & Lo Monte F. 2017. Unconventional applications of A1040 MIRA tomograph. *Atti Conferenza Nazionale sulle prove non distruttive monitoraggio diagnostica AIPnD 2017*, Milano, 9p.
- Beard A. & Carvel R. 2012. *The handbook of tunnel fire safety*. 2nd edition, ICE, London.
- Brincker R., Zhang L. & Andersen P. 2001. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Mater. Struct.* 10(3):441
- Caballero J.A., Conesa J.A., Martín-Gullón I. and Font R. 2005. Kinetic study of the pyrolysis of neoprene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 74: 231-237
- Decreto Ministeriale del 14/01/2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08).
- Diana 9.6. Manuale di Analisi.
- Dias de Meira Jr A., Iturrioz I., Walber M. and Goedel F. 2016. Numerical Analysis of an Intercity Bus Structure: A Simple Unifilar Model Proposal to Assess Frontal and Semifrontal Crash Scenarios. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13: 1616-1640.
- EN1991-1-2 (2002), Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- Felicetti R. 2013. Assessment Methods of Fire Damages in Concrete Tunnel Linings, *Fire Technology*, 49(2), 509-529.
- Felicetti R. & Gambarova P.G. 2013, Assessment of the Residual Strength of Fire-Damaged Steel-Rebars, *Nondestructive Testing of Materials and Structures*. RILEM Bookseries, vol 6. Springer, Dordrecht, p.213-218.
- Felicetti R. 2014. Assessment of fire damage in concrete structures: new inspection tools and combined interpretation of results. *Proc. 8th Int. Conf. "Structures in Fire" - SIF 14*, Shanghai (China), 11-13 June, pp. 1111-1120.
- FEMA 273: NEHRP Guidelines for the seismic Rehabilitation of buildings.
- MidasGen 2015. Manuale di Analisi.