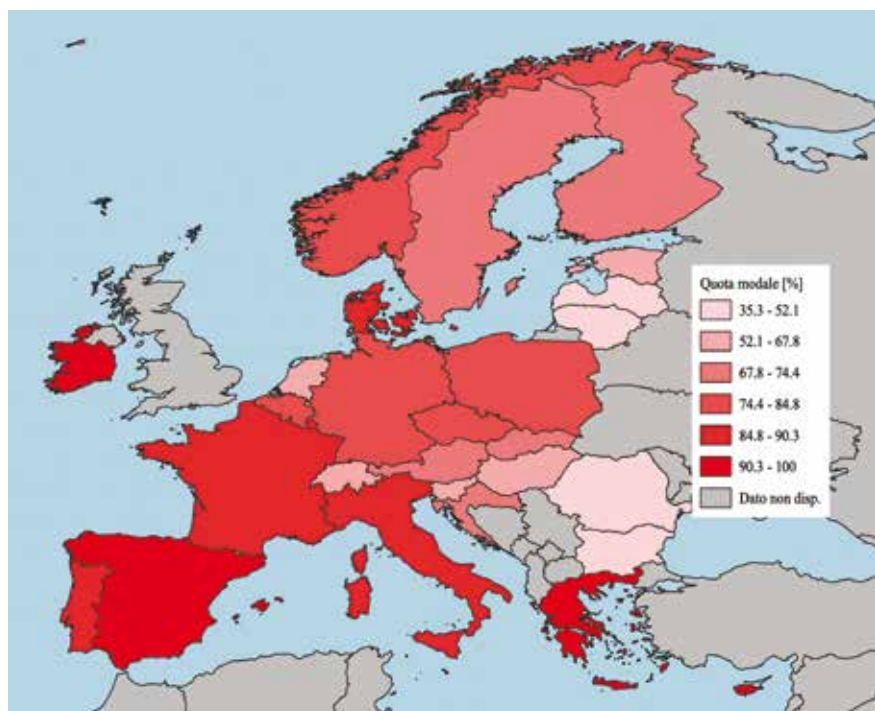


MONITORAGGIO DEI CARICHI VEICOLARI SUI PONTI

ATTRAVERSO L'USO DI SISTEMI WEIGH-IN-MOTION (WIM), IL CASO SPERIMENTALE DI BRESCIA
ATTRAVERSO LO STUDIO DELL'UNIVERSITÀ DI BRESCIA

Svolgendo un ruolo di primo piano nella ripartizione modale della movimentazione delle merci, il settore del trasporto stradale può essere considerato una delle attività economiche chiave dell'Unione Europea [1]. Nel 2020,

infatti, il trasporto merci su strada ha rappresentato il 77,4% del trasporto merci interno totale [2]. Inoltre, la quota della modalità stradale aumenta considerando alcuni Paesi specifici (Figura 1).



1. La quota modale della strada per il trasporto merci interno nell'Unione Europea nel 2020: in Italia era pari a circa l'88% (elaborazione Autori su dati Eurostat [2])

Condizione essenziale per un'efficiente operatività del sistema di trasporto stradale è una rete stradale sicura e resiliente. In origine, il concetto di resilienza era proprio della scienza dei materiali; tuttavia, oggi è stato esteso anche a sistemi complessi, come lo sono le reti di trasporto. Una rete di trasporto resiliente è un sistema in grado di reagire a eventi imprevisti, che potrebbero portare a condizioni di congestione o sovraccarico delle infrastrutture stradali, distribuendo e reagendo tempestivamente alle criticità, anche applicando criteri decisionali e metodi di intelligenza artificiale. Risulta quindi indispensabile una dotazione capillare di sistemi di monitoraggio, che acquisisca dati in tempo reale sia dai veicoli che dalle infrastrutture. In particolare, l'eccessivo carico da traffico veicolare è uno dei principali fattori minanti la resilienza della rete stradale [3]. Difatti, significativa attenzione sollevano i veicoli eccezionali, ovvero la cui massa lorda (GVM) supera i limiti fissati dai codici nazionali della circolazione [4], che comunemente dipendono dalla tipologia del veicolo e del numero di assi.

TIPOLOGIA DI VEICOLO	NUMERO DI ASSI	LIMITE DI MASSA [kg]	TIPOLOGIA DI VEICOLO	NUMERO DI ASSI	LIMITE DI MASSA [kg]
Veicolo a singola unità	2	18.000	Autotreno	5 o più	44.000
Autotreno	3 o più	25.000	Autoarticolato	3	30.000
	3	24.000		4	40.000
	4	40.000		5 o più	44.000

2. I limiti di massa previsti in Italia dal Codice della Strada [5]



3. La rappresentazione fotografica del ponte lungo la Tangenziale Sud oggetto di monitoraggio del carico veicolare transitante



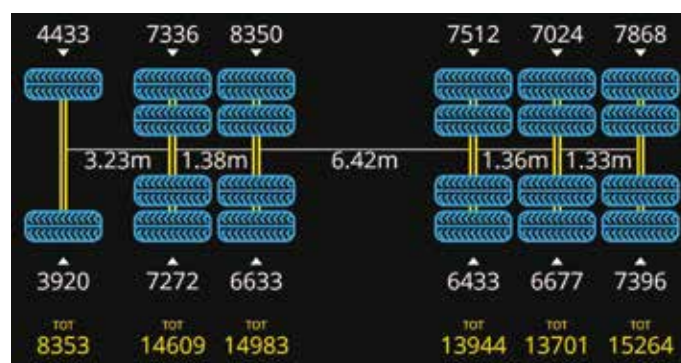
4. La rappresentazione fotografica del sistema WIM installato dalla Provincia di Brescia per monitoraggio del carico veicolare transitante sul ponte

La Figura 2 esemplifica i principali limiti di massa previsti in Italia dal Codice della Strada [5], che dovrebbero essere superati solo a seguito di autorizzazioni rilasciate dagli Enti Gestori [6]. Gli unici veicoli che potrebbero superare tali limiti senza autorizzazioni sono i mezzi d'opera fino a 54.000 kg a cui si richiede il pagamento di una compensazione per la maggior usura indotta sulle infrastrutture stradali.

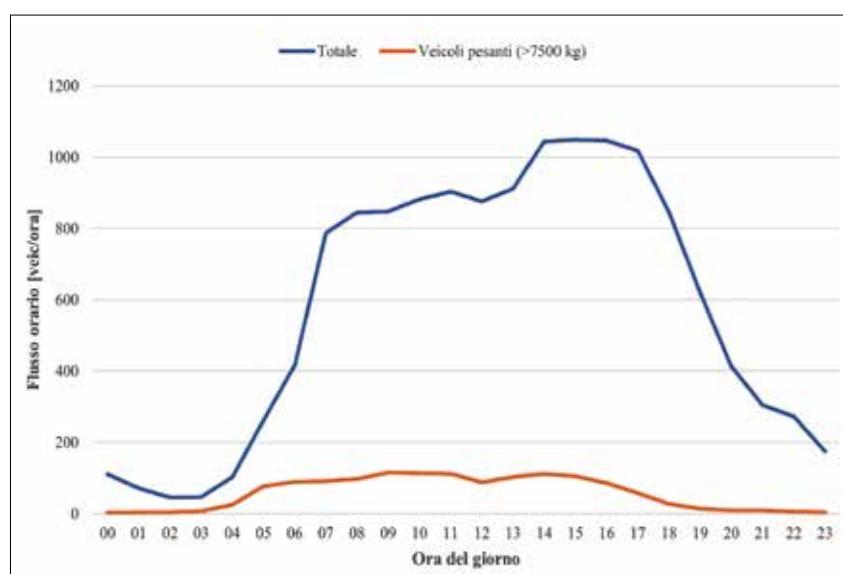
Tuttavia, con il progressivo aumento dei volumi di traffico, le masse veicolari sempre più frequentemente superano illegalmente i limiti di Legge [7], talvolta provocando il danneggiamento dei ponti quando i carichi di progetto delle strutture vengono ecceduti [8]. Dunque, è essenziale installare sistemi di monitoraggio

del carico da traffico sui ponti per la gestione sicura delle infrastrutture stradali.

I sistemi Weigh-In-Motion (WIM), che misurano la massa veicolare in modo dinamico, divengono una soluzione efficace alla prevenzione dei danni strutturali, sebbene la letteratura che ne descrive l'applicazione provenga solo dal contesto americano e cinese, mentre ad oggi sono pochi gli studi condotti in Europa ed in particolare in Italia. Infatti, questa ricerca, svolta in collaborazione fra il DICATAM dell'Università degli Studi



5. Un esempio di configurazione veicolare acquisita dal sistema WIM installato dalla Provincia di Brescia [11]



6. Il flusso orario medio rilevato durante il periodo di monitoraggio

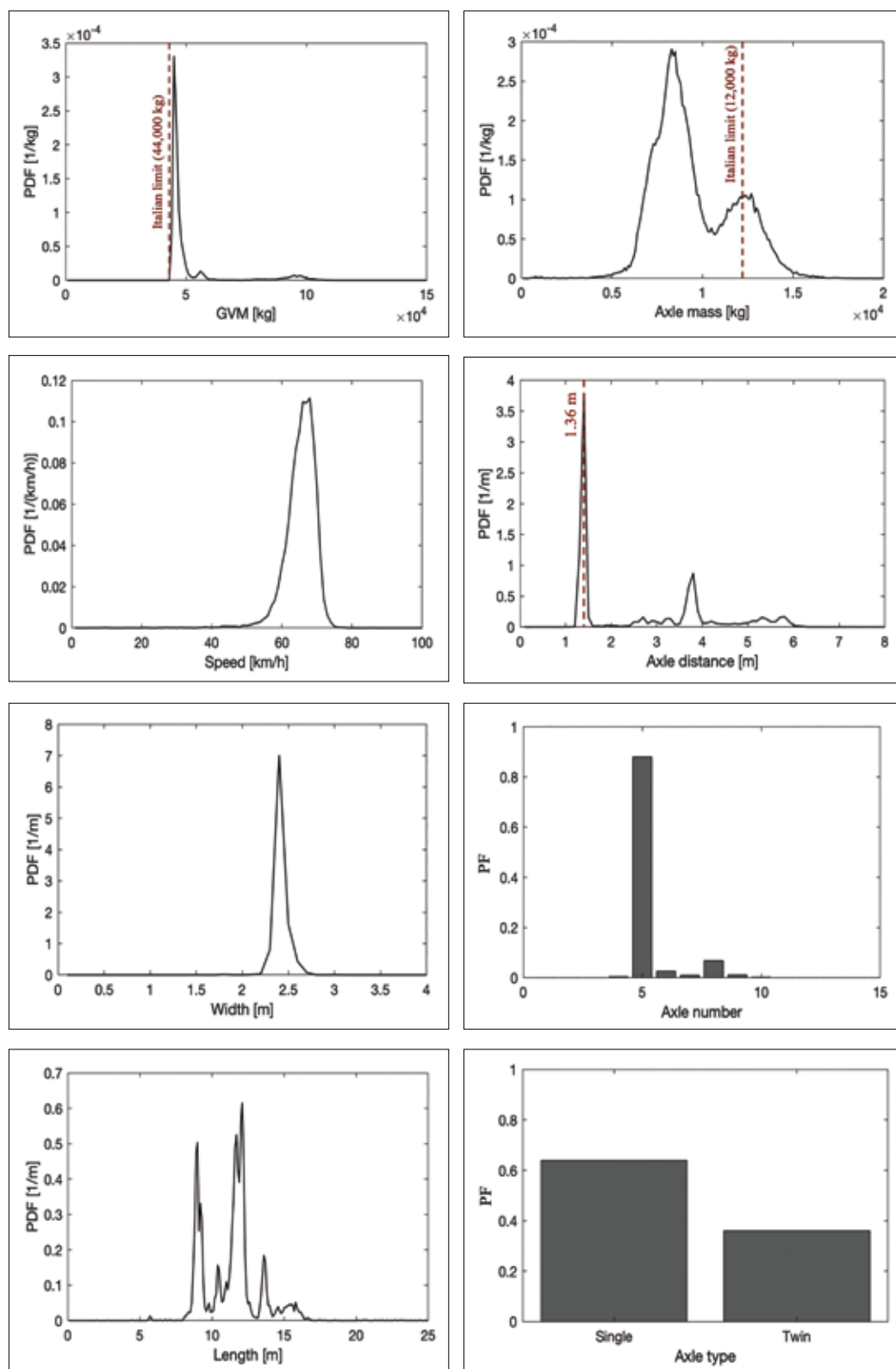
di Brescia ed il settore delle Strade e dei Trasporti della Provincia di Brescia, all'interno del accordo di collaborazione recentemente siglato ("Analisi sulla sicurezza strutturale dei ponti di competenza della Provincia: individuazione delle criticità strutturali, sperimentazione e validazione delle Linee Guida Ministeriali sulla sicurezza dei ponti esistenti, attività di ricerca scientifica in ambiti specialistici legati alle predite di precompressione, alle travi e selle gerber, alla corrosione e alla resilienza, consulenza scientifica e specialistica al fine dell'ottimizzazione degli interventi di rinforzo") mira a colmare questa lacuna.

IL CONTESTO DI RICERCA E LA MODALITÀ DI RACCOLTA DEI DATI

La ricerca ha coinvolto la stazione pilota WIM installata sulla Tangenziale Sud di Brescia dalla Provincia di Brescia [9], che fa parte della rete stradale principale e costituisce una delle arterie con il maggior flusso di traffico nel territorio, con un volume di traffico medio giornaliero variabile tra 20.000 e 30.000 veic./giorno, e un'elevata percentuale di mezzi pesanti [10]. La Provincia di Brescia ha scelto di collocare il sistema WIM in prossimità di un ponte, per monitorare i carichi veicolari che agiscono su di esso. Si tratta di un cavalcavia composto da una struttura semplicemente appoggiata, con una campata di 23,5 m e un impalcato composto da 13 travi longitudinali prefabbricate in calcestruzzo armato precompresso e una trave di irrigidimento trasversale a mezza campata gettata in opera (Figura 3).

Il sistema WIM adottato per il monitoraggio del carico da traffico sul ponte è costituito da due piastre in acciaio inox incassate nel manto stradale, dotate di sensori in fibra ottica,

e collegate ad un data logger (Figura 4). Il dispositivo, che esegue la pesatura dei veicoli in transito sfruttando le proprietà fotoelastiche delle fibre di vetro, acquisisce dati che elabora in tempo reale e che memorizza in un database ospitato su un



7A, 7B, 7C, 7D, 7E, 7F, 7G e 7H. Le distribuzioni di probabilità calcolate sui principali parametri veicolari acquisiti dal sistema WIM durante il periodo assunto come caso studio [9]

FATTORE [UNITÀ]	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	FATTORE [UNITÀ]	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3
Massa veicolare lorda [kg]	44.093	53.091	93.535	Massa minima per asse [kg]	6.923	7.014	7.592
Velocità [km/ora]	64,9	64,8	62,4	Massa massima per asse [kg]	11.959	13.454	14.093
Larghezza [m]	2,36	2,41	2,43	Dev. Std. massa per asse [kg]	2.014	2.567	2.114
Lunghezza [m]	11,33	10,5	13,73	Distanza media degli assi [m]	2,82	2,50	1,93
Numero di assi [assi]	5,0	5,2	8,1	Distanza minima tra gli assi [m]	1,31	1,34	1,33
Numero di assi singoli [assi]	3,6	2,5	2,5	Distanza massima tra gli assi [m]	4,97	4,07	3,65
Numero di assi gemellati [assi]	1,4	2,7	5,9	Dev. Std. distanza tra gli assi [m]	1,79	1,33	0,99
Massa media per asse [kg]	8.819	10.327	11.513				

8. I risultati dell'analisi cluster: coordinate dei baricentri (centroidi) dei tre cluster [9]

server di rete, accessibile da remoto 24 ore al giorno.

I parametri principali che vengono acquisiti dal sistema WIM per ogni veicolo in transito sono: la massa veicolare lorda (GVM), la velocità di transito, la lunghezza, la larghezza, il numero di assi, la tipologia di ciascun asse (ruota singola o gemellata), la massa su ciascun asse e gli interassi (Figura 5).

L'ELABORAZIONE DEI DATI E I RISULTATI

In primo luogo, il set di dati raccolto è stato pre-elaborato per rimuovere le osservazioni anomale e poi filtrato sul parametro massa veicolare lorda (GVM) imponendo una soglia minima di 44.000 kg per escludere dall'analisi i veicoli più leggeri, in quanto i veicoli in condizioni di sovraccarico erano al centro di questa ricerca.

Successivamente, alcune statistiche descrittive sono state calcolate sui parametri acquisiti dal sistema WIM, e un'analisi cluster (basata sul noto algoritmo K-means [9]) è stata condotta per individuare le

Data	ID	Numero assi	Massa lorda
13 gen 09:03	1089189	9	113.600 kg
27 gen 06:11	1320592	10	109.200 kg
11 gen 06:46	1050904	10	107.600 kg
18 gen 10:24	1173295	9	107.600 kg
12 gen 08:04	1070386	8	107.200 kg
13 gen 07:59	1087861	8	107.000 kg
11 gen 19:28	1065595	8	106.600 kg
11 gen 18:48	1064930	8	106.200 kg
4 gen 06:53	950843	8	106.000 kg
13 gen 08:07	1088028	8	106.000 kg
12 gen 17:08	1080542	9	105.400 kg
5 gen 07:47	967351	8	105.200 kg
18 gen 08:53	1171798	10	105.200 kg
11 gen 21:35	1066704	8	104.800 kg
5 gen 06:40	966372	8	104.600 kg

9. L'elenco dei veicoli eccezionali identificati durante il mese di Gennaio 2022 [11]

diverse tipologie veicolari presenti all'interno del campione. Un periodo di osservazione di due mesi (dal 1° Gennaio 2022 al 28 Febbraio 2022) è stato considerato come caso di studio, durante il quale sono stati registrati oltre un milione di veicoli. Dopo la procedura di pre-elaborazione, sono state conservate in totale circa 665.000 osservazioni ed è stato individuato un insieme di circa 14.900 mezzi in sovraccarico eseguendo la procedura di filtraggio del peso.

Le statistiche descrittive hanno rivelato che le distribuzioni di molti parametri veicolari avevano una forma multimodale, implicando la presenza di diversi sottoinsiemi, ognuno costituito da veicoli con caratteristiche simili (Figure 7A, 7B, 7C, 7D, 7E, 7F, 7G e 7H).

Questo risultato è stato confermato dall'analisi cluster, che ha rivelato l'esistenza di tre cluster veicolari (Figura 8): i primi due erano composti da veicoli ordinari leggermente sovraccaricati e mezzi d'opera, rispettivamente, mentre un terzo cluster era invece formato prevalentemente da veicoli eccezionali.

In particolare, i risultati dell'analisi cluster hanno indicato che i veicoli eccezionali erano caratterizzati da una massa veicolare lorda media (GVM) di circa 94.000 kg, erano più lunghi dei veicoli ordinari ed erano dotati di un numero di assi maggiore. Inoltre, mentre per i veicoli ordinari leggermente sovraccaricati e per i mezzi d'opera prevaleva la tipologia di asse a ruota singola, nei veicoli eccezionali prevaleva la tipologia di asse a ruota gemellata.

Infine, le masse agenti sui singoli assi dei veicoli eccezionali erano significativamente superiori a quelle dell'intero campione e i valori massimi superavano notevolmente il limite di 12.000 kg prescritto dal Codice della Strada. In particolare, circa il 95% dei veicoli eccezionali aveva almeno un asse con una massa superiore ai 12.000 kg, contro il 63% dell'intero campione. Quest'ultimo risultato è particolarmente rilevante, in quanto conferma che i veicoli eccezionali contribuiscono in modo decisamente più accentuato rispetto ai veicoli ordinari al degrado delle infrastrutture stradali, essendo il danno proporzionale alla quarta potenza del carico applicato su ciascun asse [12].

CONCLUSIONI

Il principale contributo di questo studio è stato quello di fornire una comprensione più approfondita delle caratteristiche principali che consentono di distinguere tra veicoli ordinari, sovraccarichi ed eccezionali. Sebbene siano stati analizzati i dati di una sola stazione pilota WIM, questa ricerca dimostra quantitativamente che le violazioni dei limiti di massa per asse sono un fenomeno rilevante in un contesto italiano. Infine, i risultati di questo studio pongono le basi per due linee di ricerca future.

La prima riguarda lo sviluppo di modelli per la previsione della massa veicolare lorda in funzione di un ridotto insieme di altre caratteristiche del veicolo (ad esempio, larghezza, lunghezza, velocità di passaggio, numero di assi e distanza tra gli assi) per consentire una rapida stima dei carichi veicolari con sistemi di monitoraggio più economici degli WIM, come le telecamere per il traffico.

La seconda riguarda la definizione di un quadro di riferimento per la valutazione e la gestione, in tempo reale, del rischio legato al transito dei veicoli pesanti sui ponti. ■

⁽¹⁾ *Ingegnere, Ph.D., Assegnista di Ricerca in Ingegneria dei Trasporti presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM) dell'Università degli Studi di Brescia*

⁽²⁾ *Studentessa in Editoria e Comunicazione presso l'Università Cattolica del Sacro Cuore (sede di Brescia) ed Assurance Consultant in Generali Italia presso l'Agenzia Generali Brescia Castello*

⁽³⁾ *Professore Ordinario in Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM) dell'Università degli Studi di Brescia*

⁽⁴⁾ *Ingegnere, Assegnista di Ricerca e Dottorando in Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica*

Bibliografia

- [1]. European Commission, "Road freight transport in the EU. In search of a balance between the economic and social dimension of the internal market", 2020.
- [2]. Eurostat, "Freight transport statistics - modal split," 2022. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Freight_transport_statistics_-_modal_split (accessed Jun. 14, 2022).
- [3]. R. Ventura, B. Barabino, G. Maternini - "Traffic hazard on main road's bridges: real-time managing the risk of design load overcoming events - Preprint" Social Science Research Network (SSRN), 2023, Accessed: Apr. 03, 2023 (Online), available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4396914.
- [4]. R. Ventura, B. Barabino, D. Vetturi, G. Maternini - "Bridge Safety Analysis Based on the Function of Exceptional Vehicle Transit Speed," The Open Transportation Journal, vol. 14, no. 1, pp. 222-236, Dec. 2020, doi: 10.2174/1874447802014010222.
- [5]. Repubblica Italiana, "Nuovo codice della Strada - D.Lgs. 285/1992 e s.m.", Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n° 115 del 03/08/2015, vol. 115, 2015.
- [6]. R. Ventura, G. Maternini - "Alcuni effetti della circolazione dei veicoli pesanti," Strade & Autostrade, vol. 151, pp. 160-162, 2022 (Online), available: <https://www.stradeeautostrade.it/its-smart-road/alcuni-effetti-della-circolazione-dei-veicoli-pesanti/>.
- [7]. R. Ventura, B. Barabino, G. Maternini - "Estimating the frequency of design traffic loads overcoming on road's bridges - Preprint", Social Science Research Network (SSRN), 2023.
- [8]. G. Zhang, Y. Liu, J. Liu, S. Lan, J. Yang - "Causes and statistical characteristics of bridge failures: a review", Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), vol. 9, no. 3, pp. 388-406, 2022, doi: 10.1016/j.jtte.2021.12.003.
- [9]. R. Ventura, B. Barabino, D. Vetturi, G. Maternini - "Bridge's vehicular loads characterization through Weight-In-Motion (WIM) systems. The case study of Brescia", European Transport/Trasporti Europei, vol. 00, no. 90, pp. 1-12, Feb. 2023, doi: 10.48295/ET.2023.90.6.
- [10]. C. Faccin, L. Zavanella, E. Savoldi, A. Boroni, P. Rossini - "Piano del traffico della viabilità extraurbana (PTVE)", 2011, (Online), available: <https://www.provincia.brescia.it/cittadino/viabilita-e-strade/piano-del-traffico-della-viabilita-extraurbana-ptve>.
- [11]. IWIM BISONTE, "Sistema di Pesatura Dinamica", <https://www.iwim.it> (accessed Aug. 18, 2022).
- [12]. D. Rys, J. Judycki, P. Jaskula - "Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data", International Journal of Pavement Engineering, 17(8), 716-726, 2016.

(DICATAM) dell'Università degli Studi di Brescia

⁽⁵⁾ *Architetto, Dirigente del Settore delle Strade e dei Trasporti della Provincia di Brescia*

⁽⁶⁾ *Ingegnere presso il Settore delle Strade e dei Trasporti della Provincia di Brescia*

⁽⁷⁾ *Professore Associato in Ingegneria dei Trasporti presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica (DICATAM) dell'Università degli Studi di Brescia*