



CONVEGNO FABRE
PONTI, VIADOTTI, E GALLERIE ESISTENTI:
RICERCA, INNOVAZIONE E APPLICAZIONI
LUCCA, 2-4 FEBBRAIO 2022



Vulnerability to traffic loads of Italian bridges in relation to the evolution of the code framework from the Normale of 1933 to present

Stefano Bozza^a, Marco Fasan^a, Salvatore Noè^a

^a Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Trieste, Piazzale Europa, 34127 Trieste, Italy

Keywords: Traffic loads code evolution, vulnerability, RC and PC girder bridges, transverse load distribution

ABSTRACT

Over the last century, the definition of the design traffic loads for Italian road bridges has undergone a continuous evolution, starting from the first code in 1933 up to the current code (NTC2018). The changes in the arrangement and in the intensity of the design loads that have occurred over the years resulted in significant variations, both decreasing and increasing the overall static demand required to the bridges compared to previous codes.

As part of a broader study on the structural risk of existing bridges with respect to traffic loads, it is certainly of interest to investigate the influence of the adopted design code on the risk itself. The paper presents some of the results of a study conducted with this purpose, regarding Reinforced Concrete and Prestressed Concrete beam-and-slab bridges with simply supported spans, one of the most common typology among bridges with medium-small span.

The comparison between the effects of the design loads considered by the historical codes and those required by the current NTC2018 is carried out in terms of internal forces in the edge girder. The results obtained for the historical codes are also compared with those derived from the load schemes provided by the new “Guidelines for the classification and management of risk, safety and monitoring of existing bridges” for different partially-operational levels. The study can provide useful elements for the definition of a fast procedure for the preliminary assessment of bridges or for vehicle weight limitation definition, based on the geometric characteristics of the decks and their design age.

Vulnerabilità dei ponti italiani nei confronti dei carichi da traffico in relazione all'evoluzione del quadro normativo dalla Normale del 1933 ad oggi

Stefano Bozza^a, Marco Fasan^a, Salvatore Noè^a

^a Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Trieste, Piazzale Europa, 34127 Trieste, Italy

Keywords: Evoluzione normativa carichi da traffico, vulnerabilità, ponti a graticcio in c.a e c.a.p., ripartizione Trasversale dei carichi

ABSTRACT

Nell'arco dell'ultimo secolo la definizione dei carichi da traffico per la progettazione dei ponti stradali italiani ha subito una continua evoluzione, a partire dai primi riferimenti normativi nel 1933 fino alle attuali NTC2018. Le modifiche nella disposizione e nell'entità dei carichi di progetto che si sono succedute nel corso degli anni hanno

comportato variazioni non trascurabili, sia in diminuzione sia in aumento, nell'impegno statico complessivo richiesto ai ponti rispetto alle precedenti normative.

Nell'ambito di un più ampio studio sul rischio strutturale dei ponti esistenti nei confronti dei carichi da traffico è certamente d'interesse indagare quale sia l'influenza della norma di progettazione utilizzata sul rischio stesso. La memoria presenta alcuni dei risultati di un'indagine condotta a tal fine, con riferimento alla tipologia dei ponti a graticcio in c.a. o c.a.p. a campate semplicemente appoggiate, tra le più diffuse fra i ponti di luce medio-piccola. Il confronto tra gli effetti dei carichi di progetto previsti dalle normative storiche e quelli derivanti dalle corrispondenti azioni previste dalle attuali NTC2018 è fatto con riferimento alle sollecitazioni calcolate nella trave di riva. I risultati ottenuti per le normative storiche sono anche confrontati con quelli relativi agli schemi di carico previsti dalle nuove "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti" per diversi livelli di transitabilità. Il presente studio può fornire elementi utili alla definizione di criteri speditivi per la valutazione preliminare dei ponti o per la limitazione del traffico, basati sulle caratteristiche geometriche degli impalcati e sulla loro epoca di progettazione.

1 INTRODUZIONE

Una grande parte delle infrastrutture stradali italiane è stata costruita nei decenni successivi alla seconda guerra mondiale (Pinto e Franchin 2010), seguendo normative oggi superate. Molti ponti oggi in esercizio potrebbero essere sottodimensionati rispetto agli standard richiesti dalle normative vigenti e potenzialmente inadeguati anche a sopportare carichi che ordinariamente transitano nelle strade.

Nell'arco dell'ultimo secolo la definizione dei carichi da traffico per la progettazione dei ponti stradali ha subito una continua evoluzione (Buratti et al. 2019), a partire dai primi riferimenti normativi (Ministero dei Lavori pubblici 1933, 1945, 1962), che prevedevano l'utilizzo di schemi di carico "reali", passando per decreti ministeriali che definivano schemi di carico convenzionali (Ministero dei Lavori Pubblici 1980, 1990, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2005) fino all'allineamento della normativa nazionale alle indicazioni dell'Eurocodice (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2008, 2018). L'ultima novità normativa sul tema dei carichi da traffico sui ponti è costituita dalle "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti" pubblicate nel 2020 (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2020), che pur non riguardando la progettazione dei ponti definisce degli schemi di carico conformi alle limitazioni di carico da Codice della Strada al fine di valutare la transitabilità temporanea di opere non adeguate alle Norme Tecniche vigenti.

Le modifiche nella disposizione e nell'entità dei carichi di progetto che si sono succedute nel corso degli anni hanno comportato variazioni non trascurabili, sia in diminuzione sia in aumento, nell'impegno statico complessivo richiesto ai ponti rispetto alle precedenti normative. Quantificare il deficit di capacità con cui sono stati

dimensionati i ponti esistenti è di particolare interesse per valutare qual è la loro vulnerabilità nei confronti dei carichi da traffico in funzione dell'epoca di costruzione.

Con riferimento ai ponti a graticcio in c.a. o c.a.p. semplicemente appoggiati, in questo studio è riportato un confronto tra gli effetti indotti dai carichi prescritti dalle normative storiche e quelli indotti dai carichi prescritti dalla normativa vigente, tenendo in considerazione gli effetti di ripartizione trasversale dei carichi. Gli effetti sono misurati in termini di sollecitazioni flettenti e taglianti massime nella trave di riva (elemento più sollecitato del graticcio), considerando l'effetto della deformabilità trasversale e della rigidità torsionale degli elementi con la metodologia proposta da Guyon, Massonnet e Bareš.

2 STUDIO PARAMETRICO: METODOLOGIA E DESCRIZIONE

2.1 Metodologia

Le azioni da considerare per il calcolo dei ponti stradali sono schematizzate per corsie, solitamente con carichi diversi tra corsia e corsia. Tali azioni devono essere disposte nelle configurazioni più sfavorevoli, nelle quali gli elementi principali dell'impalcato non sono uniformemente caricati. Per stimare le massime sollecitazioni nella trave di riva, che risulta in genere quella maggiormente impegnata al variare delle possibili disposizioni dei carichi, è necessario considerare come tali carichi si ripartiscono trasversalmente tra le travi.

La ripartizione trasversale è tenuta in conto in questo studio attraverso il metodo di Guyon – Massonnet – Bareš (GMB) (Bareš e Massonnet 1966).

Il metodo si basa sulle ipotesi:

1. L'impalcato a graticcio reale sia modellabile con sufficiente approssimazione come

un graticcio ideale a maglie infinitesime con uguali rigidezze flessionali e torsionali medie nelle due direzioni ortogonali longitudinale e trasversale;

2. Sia possibile effettuare un'analisi armonica in direzione longitudinale, cosa che presuppone che il graticcio sia semplicemente appoggiato alle estremità.

In tali ipotesi è possibile ricondurre il problema a equazioni formalmente uguali a quelle di una piastra ortotropa, di cui gli autori hanno determinato una soluzione in forma chiusa. Dalla soluzione è stata ricavata una serie di coefficienti che permettono di calcolare le sollecitazioni negli elementi del graticcio a partire da quelle indotte da un carico uniformemente ripartito nella larghezza, in funzione di due parametri adimensionali: il parametro di torsione α e di deformabilità trasversale θ :

$$\alpha = \frac{\gamma_l + \gamma_t}{2\sqrt{\rho_l \rho_t}} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{b}{L} \sqrt[4]{\frac{\rho_l}{\rho_t}} \quad (2)$$

dove b è la semilarghezza del graticcio equivalente ($2b = n \cdot b_l$, con n numero di travi e b_l interasse travi); L è la luce di calcolo tra gli appoggi; ρ_l , γ_l e ρ_t , γ_t sono rispettivamente i valori medi sulla larghezza e sulla lunghezza delle rigidezze flessionali (ρ) e torsionali (γ) degli elementi longitudinali (l) e trasversali (t).

Nel presente lavoro, sulla base di un'analisi preliminare condotta su un campione fittizio di ponti a graticcio con travi e traversi di sezione rettangolare con le caratteristiche riportate in

Tabella 1, i valori di α e θ sono stati stimati in funzione delle sole dimensioni geometriche dell'impalcato (luce e larghezza) con le seguenti espressioni:

$$\alpha \cong \min \left\{ \frac{1,16}{L^{0,92}} - 0,023 ; 0,08 \right\} \quad (3)$$

$$\theta \cong 1,5 \frac{b}{L} \quad (4)$$

Tabella 1. Caratteristiche ponti c.a. e c.a.p. ipotizzate

Parametro	Intervallo valori considerato
Altezza impalcato	1/16 ÷ 1/22 L (≥ 70 cm)
Interasse travi	1,0 ÷ 3,0 m
Numero traversi	2 ÷ 4
Spessore soletta	20 cm
Spessore anima travi	20 cm
Spessore traversi	30 cm
Altezza traversi	Altezza trave – 15 cm

Per quanto riguarda invece la modellazione dei carichi, si è fatto ricorso ai carichi uniformemente distribuiti equivalenti, ovvero dei carichi ripartiti in modo uniforme sulla lunghezza del ponte che, su uno schema statico di trave in semplice appoggio, inducono la stessa sollecitazione massima (momento o taglio nelle sezioni più sollecitate) di un diverso schema di carico, disposto nella configurazione più sfavorevole. Tale concetto (presente ad esempio nella Circolare del 1962) permette di utilizzare un modello di carico semplificato senza perdere l'entità del massimo effetto indotto dallo schema di carico originale. Inoltre, un carico uniforme è facilmente sviluppabile in serie di Fourier di soli seni, in modo tale da rispettare le ipotesi del metodo di GMB.

Nel presente lavoro, tutti gli schemi di carico descritti nelle normative considerate sono stati dunque sostituiti dai relativi carichi distribuiti equivalenti, calcolati per le sollecitazioni di momento flettente e taglio massimi in funzione della luce del ponte (per un certo numero di luci e calcolati per interpolazione lineare per valori intermedi). Nel calcolo, i carichi uniformi equivalenti sono stati poi approssimati con i primi sei termini sinusoidali dello sviluppo in serie di Fourier.

La disposizione trasversale dei carichi assunta nel calcolo è quella tale da massimizzare l'eccentricità degli stessi rispetto all'asse dell'impalcato, cosicché la trave di riva risulti più caricata. Le sollecitazioni di momento flettente sono stimate integrando le rispettive sollecitazioni per unità di larghezza del graticcio infinitesimo sulla quota parte di impalcato competente alla trave di riva. La sollecitazione di taglio è calcolata come derivata del momento presso la sezione di appoggio, correggendo il valore calcolato per la combinazione di momento massimo per il fattore $q_{eq,t}/q_{eq,m}$ per considerare il carico equivalente di taglio invece che il carico equivalente di momento flettente. Nel presente studio, l'integrazione è sempre svolta su una fascia di larghezza 2 m a bordo impalcato (valore medio tra quelli degli interessi considerati).

2.2 Descrizione studio parametrico

Come precedentemente riportato, lo studio parametrico si focalizza sui ponti in c.a. o c.a.p. a graticcio a campate semplicemente appoggiate.

Per considerare un significativo numero di casi, sia la luce dell'impalcato che la sua larghezza sono stati variati, ciascuno all'interno di un predefinito intervallo. In particolare, sono stati considerati ponti con luce variabile da 5 m a 50 m, campionando l'intervallo ogni metro, per un totale di 46 luci considerate. Sono stati considerati impalcati a singola carreggiata, di larghezza variabile da un minimo di 6 m e un massimo di 12 m; come per le luci, sono stati considerati anche valori intermedi, discretizzando l'intervallo ogni metro, per un totale di 7 casi. Il totale di geometrie analizzate è quindi pari a 322 casi.

Per ciascuna geometria, il calcolo è stato svolto per le seguenti normative e categorie di ponti:

- Normale n.8/1933
 - Ponti di 1° tipo (1° categoria)
 - Ponti di 2° tipo (2° categoria)
- Circolare n.6018/1945
 - Ponti di 1° tipo (1° categoria)
- Circolare n.384/1962
 - Ponti di 1° categoria
 - Ponti di 2° categoria
- Decreto Ministeriale 02/08/1980
 - Ponti di 1° categoria
 - Ponti di 2° categoria
- Decreto Ministeriale 04/05/1990
 - Ponti di 1° categoria
 - Ponti di 2° categoria
- Decreto Ministeriale 14/09/2005
 - Ponti di 1° categoria
 - Ponti di 2° categoria
- Decreto Ministeriale 14/01/2008
 - Ponti di 1° categoria
 - Ponti di 2° categoria
- Decreto Ministeriale 17/01/2018
 - Ponti stradali
- Linee Guida 2020
 - Transitabilità ai mezzi pesanti
 - Transitabilità ai mezzi intermedi
 - Transitabilità ai mezzi leggeri
 - Transitabilità agli autoveicoli

Al fine di semplificare i calcoli, sono state fatte le seguenti assunzioni:

1. Non è stata considerata la presenza di marciapiedi, bensì di due cordoli laterali di larghezza fissa (75 cm); la larghezza totale dell'impalcato è quindi pari alla larghezza della carreggiata, aumentata di 1,5 m.
2. Il coefficiente di amplificazione dinamica del Decreto Ministeriale del 1980 è stato

calcolato considerando $g/q = 1$ (vedi Buratti et al 2019, Bencivenga et al 2021).

Infine, si sottolinea che tutte le sollecitazioni sono calcolate tenendo in considerazione i coefficienti di amplificazione dinamica dei carichi definiti in ogni normativa, ma sono al netto dei coefficienti parziali di sicurezza.

I risultati sono espressi in termini di rapporto tra sollecitazione calcolata secondo una normativa storica e sollecitazione calcolata secondo la normativa vigente. Si sottolinea che tale rapporto è lo stesso descritto dalle Linee Guida al Livello 3 della valutazione, ovvero costituisce una "valutazione preliminare" del ponte.

3 RISULTATI

I risultati dello studio parametrico descritto sono riportati di seguito in forma grafica da Figura 1 a Figura 8. I dati riportati in Figura 1, relativi agli schemi di carico previsti dalle Linee Guida, sono riportati in secondo piano anche nelle successive figure, relative alle normative storiche considerate, per avere un utile confronto tra le sollecitazioni di progetto di ponti esistenti e quelle associate ai quattro livelli di transitabilità con limitazioni di carico da Codice della Strada.

Nonostante i calcoli siano stati svolti sia per i massimi momenti flettenti sia per le massime azioni di taglio, in questa sede, per brevità, i risultati sono riportati solo per i momenti flettenti. I risultati per il taglio sono abbastanza confrontabili in termini di andamenti e ordini di grandezza.

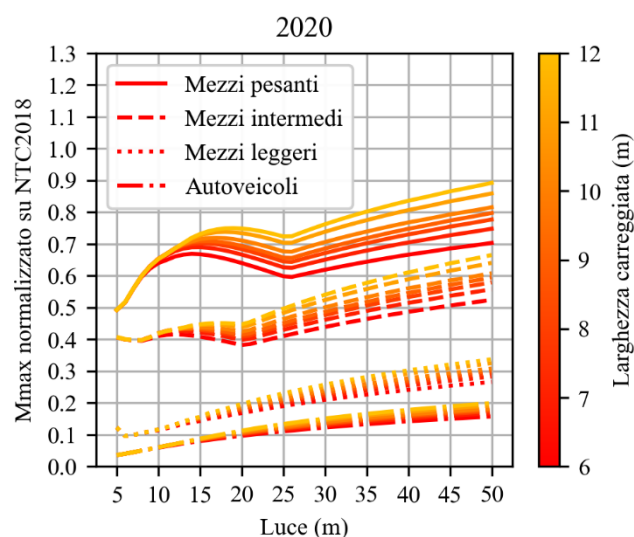


Figura 1. Rapporti di domanda per le Linee Guida 2020

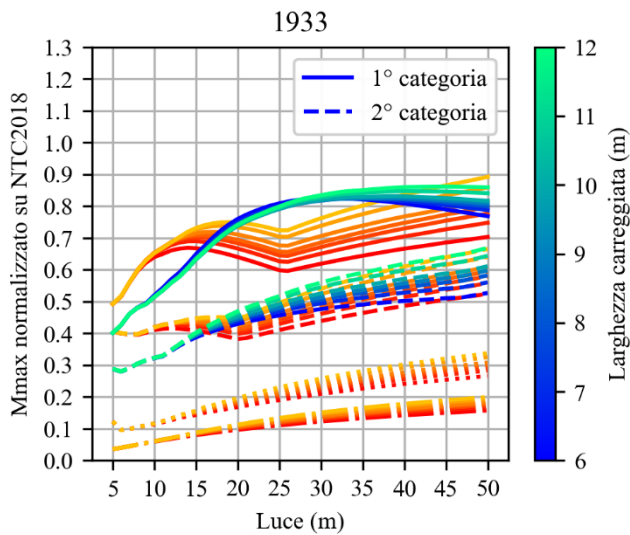


Figura 2. Rapporti di domanda per la Normale n.8 del 1933

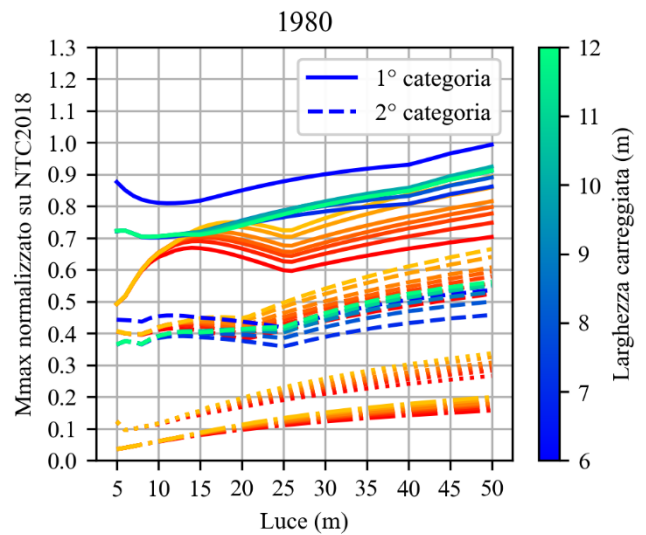


Figura 5. Rapporti di domanda per il Decreto Ministeriale del 02/08/1980

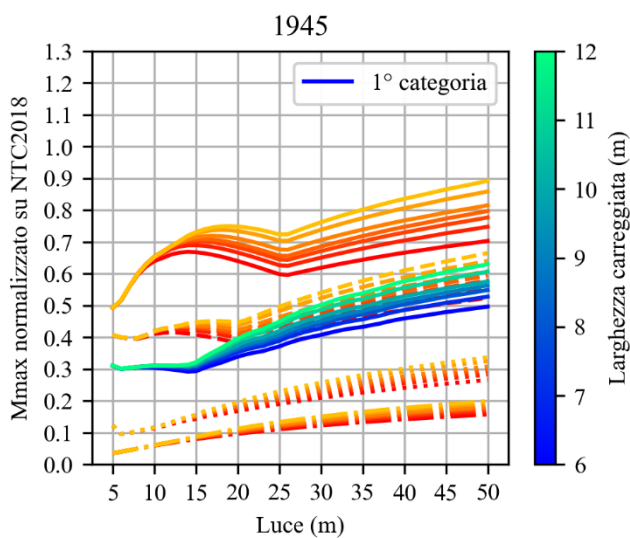


Figura 3. Rapporti di domanda per la Circolare n.6018 del 1945

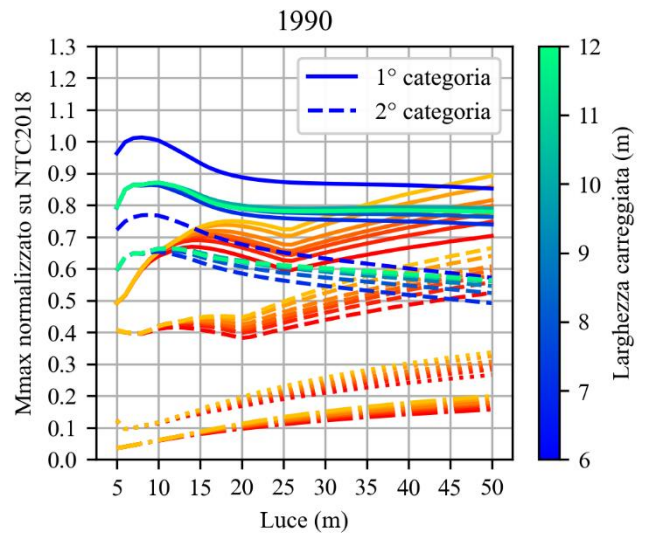


Figura 6. Rapporti di domanda per il Decreto Ministeriale del 04/05/1990

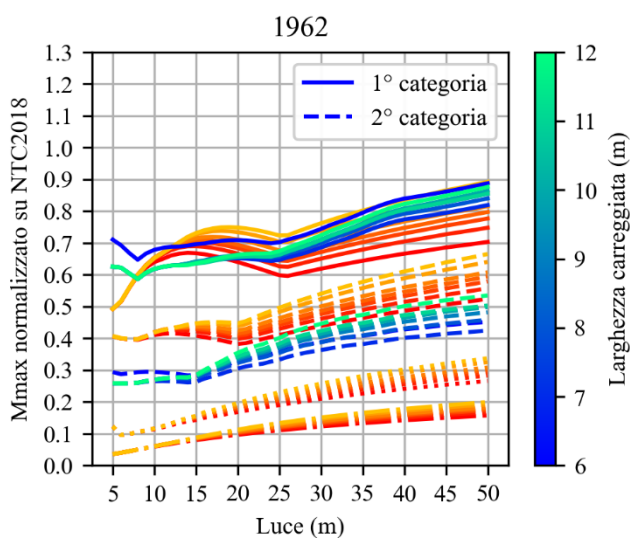


Figura 4. Rapporti di domanda per la Circolare n.384 del 1962

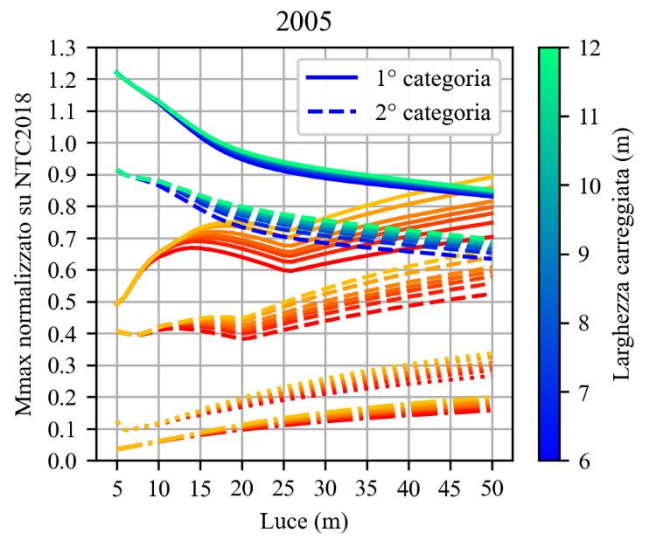


Figura 7. Rapporti di domanda per il Decreto Ministeriale 14/09/2005

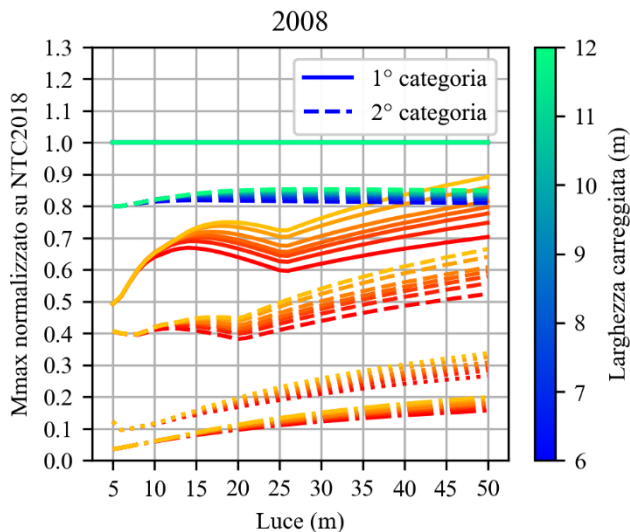


Figura 8. Rapporti di domanda per il Decreto Ministeriale 14/01/2008

Al crescere della luce, gli schemi di carico più gravosi possono cambiare: questo è evidente ad esempio nelle modifiche dell'andamento delle curve relative ai "mezzi pesanti" e "mezzi intermedi" (così come previsti dalle Linee Guida) in Figura 1, e analogamente nell'andamento di alcune delle curve relative ad altre normative riportate nelle figure successive.

La prima evidente osservazione che emerge dal confronto delle normative è che i ponti dimensionati secondo la Circolare del 1945 corrispondono sostanzialmente a ponti di seconda categoria della Normale n. 8 del 1933 o della Circolare del 1962.

I carichi per ponti di prima categoria prescritti dalla Normale del 1933, dalla Circolare del 1962 e dal Decreto del 1980 inducono sollecitazioni confrontabili con quelle indotte dagli schemi di mezzi pesanti proposte dalle nuove Linee Guida; il Decreto del 1990 risulta molto più severo delle normative precedenti per ponti di piccola luce (inferiore a 25 m) e confrontabile alla normativa precedente per luci più elevate (superiori a 25 m). Il Decreto del 2005 per ponti di prima categoria è sistematicamente più severo del precedente, mentre le azioni previste a partire dal 2008 (identiche a quelle attualmente vigenti) sono meno severe per luci inferiori a 15 m circa, ma più severe per luci maggiori.

I carichi per ponti di seconda categoria prescritti dalle normative fino agli anni ottanta (Decreto del 1980 incluso) inducono effetti confrontabili a quelli indotti dallo schema di mezzi intermedi proposto dalle Linee Guida; le norme successive hanno incrementato progressivamente i carichi di seconda categoria, richiedendo prestazioni

inferiori solo del 20% circa a quelle dei ponti di prima categoria, fino all'eliminazione della distinzione delle due categorie nella normativa attualmente vigente.

Infine, nelle Figure da 4 a 6 si può notare come la larghezza delle corsie influenzi la ripartizione trasversale dei carichi. Nei decreti del 1980 e del 1990 la larghezza delle corsie era convenzionalmente fissata a 3,50 m, ma era richiesto di considerare almeno due corsie per carreggiate più larghe di 5,0 m o 5,5 m rispettivamente. Confrontando queste norme con le attuali disposizioni (larghezza corsie pari a 3,0 m), i ponti stretti (larghezza carreggiata 6,0 m) hanno le corsie della stessa dimensione, mentre ponti larghi almeno 7,0 m hanno le corsie con un ingombro maggiore, le quali vengono quindi disposte con meno eccentricità; ciò si traduce in azioni inferiori sulla trave di riva. Tale effetto è meno marcato nella Circolare del 1962 poiché solo la corsia di mezzi militari era di larghezza 3,5 m.

4 CONCLUSIONI

Nel presente studio è stato indagato il rapporto tra vulnerabilità statica ed epoca di costruzione dei ponti italiani esistenti in relazione all'evoluzione del quadro normativo in materia di carichi da considerare nel progetto di ponti stradali. Lo studio ha interessato tutte le principali normative e la quasi totalità delle categorie di opere da esse previste; inoltre, i risultati sono stati confrontati con gli schemi prescritti per valutare la transitabilità dei ponti ai sensi delle nuove Linee guida.

È stato presentato un esteso studio parametrico riguardante tipici impalcati a graticcio di travi semplicemente appoggiati realizzati in calcestruzzo armato ordinario o precompresso. Il confronto con l'attuale normativa è stato condotto in termini di sollecitazione dell'elemento più caricato (trave di riva nella disposizione dei carichi con massima eccentricità), considerando gli effetti della ripartizione trasversale dei carichi tramite il metodo di Guyon – Massonnet – Bareš.

I risultati ottenuti forniscono informazioni utili a quantificare la capacità portante rispetto le azioni verticali dei ponti esistenti (espressa in rapporto agli standard richiesti dalla normativa vigente) in funzione di anno di costruzione, luce e larghezza impalcato. Tali informazioni potrebbero essere impiegate per implementare procedure speditive

per la valutazione preliminare delle opere (valutazione di Livello 3 delle Linee Guida) in funzione di caratteristiche tipologiche, geometriche e storiche.

BIBLIOGRAFIA

- Bareš, R., Massonnet, C. 1966. *Le calcul des grillages de poutres et dalles orthotropes*, Dunod.
- Bencivenga, P., Buratti, G., Cosentino, A., De Matteis, G., Morelli, F., Salvatore, W., Zizi, M. 2021. Evolution of Design Traffic Loads for Italian Road Bridges. *Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures*, pp 1351-1358.
- Buratti, G., Cosentino, A., Morelli, F., Salvatore, W., Bencivenga, P., Zizi, M., De Matteis, G. 2019. Alcune considerazioni sull'evoluzione normativa dei carichi da traffico nella progettazione dei ponti stradali in Italia. *XVIII Convegno ANIDIS*, Ascoli Piceno.
- Ministero dei Lavori Pubblici 1933. *Normale n.8 – Carichi da considerare nel calcolo dei ponti per strade ordinarie*.
- Ministero dei Lavori Pubblici 1945. *Circolare n.6018 del 09/06/1945*.
- Ministero dei Lavori Pubblici 1962. *Circolare n.384 – Norme relative ai carichi per il calcolo dei ponti stradali*.
- Ministero dei Lavori Pubblici 1980. *Decreto ministeriale del 02/08/1980 – Criteri generali e prescrizioni tecniche per la progettazione, esecuzione e il collaudo dei ponti stradali*.
- Ministero dei Lavori Pubblici 1990. *Decreto ministeriale del 04/05/1990 – Aggiornamento alle norme tecniche per la progettazione, esecuzione e il collaudo di ponti stradali*.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2005. *Decreto Ministeriale 14/09/2005 – Norme tecniche per le costruzioni*.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2008. *Decreto Ministeriale 14/01/2008 – Norme tecniche per le costruzioni*.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2018. *Decreto Ministeriale 17/01/2018 – Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2020. *Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*.
- Pinto, P. E.; Franchin, P. 2010. Issues in the Upgrade of Italian Highway Structures. *Journal of Earthquake Engineering*, **14**(8), 1221–1252.