

SISTEMA DI PESATURA DINAMICA WEIGH-IN-MOTION

Prof. Ing. Iunio Iervolino

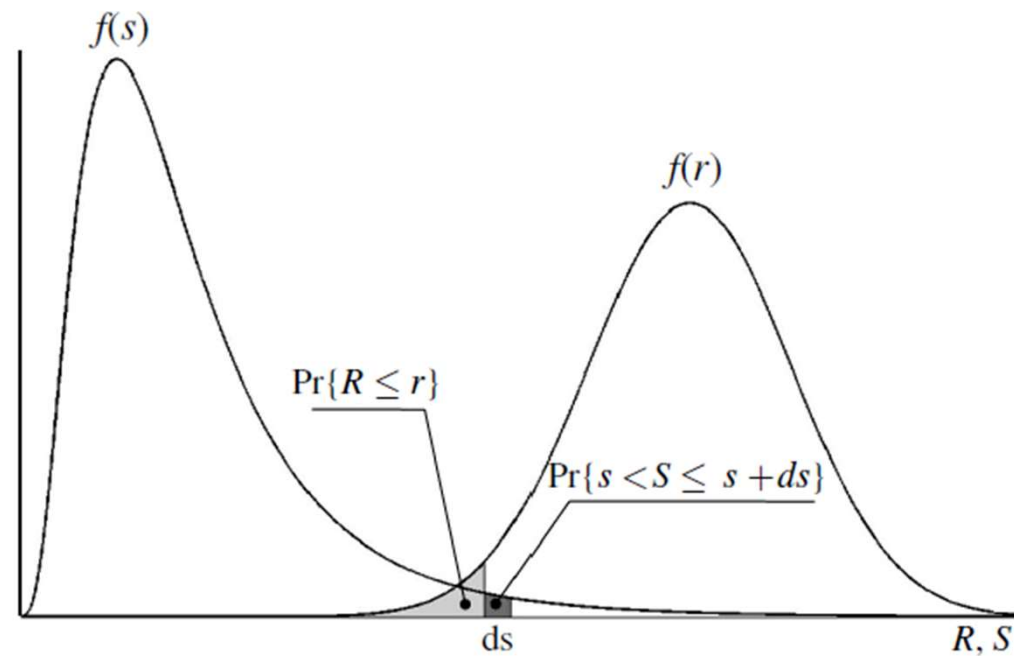


UNIVERSITÀ DEGLI
STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



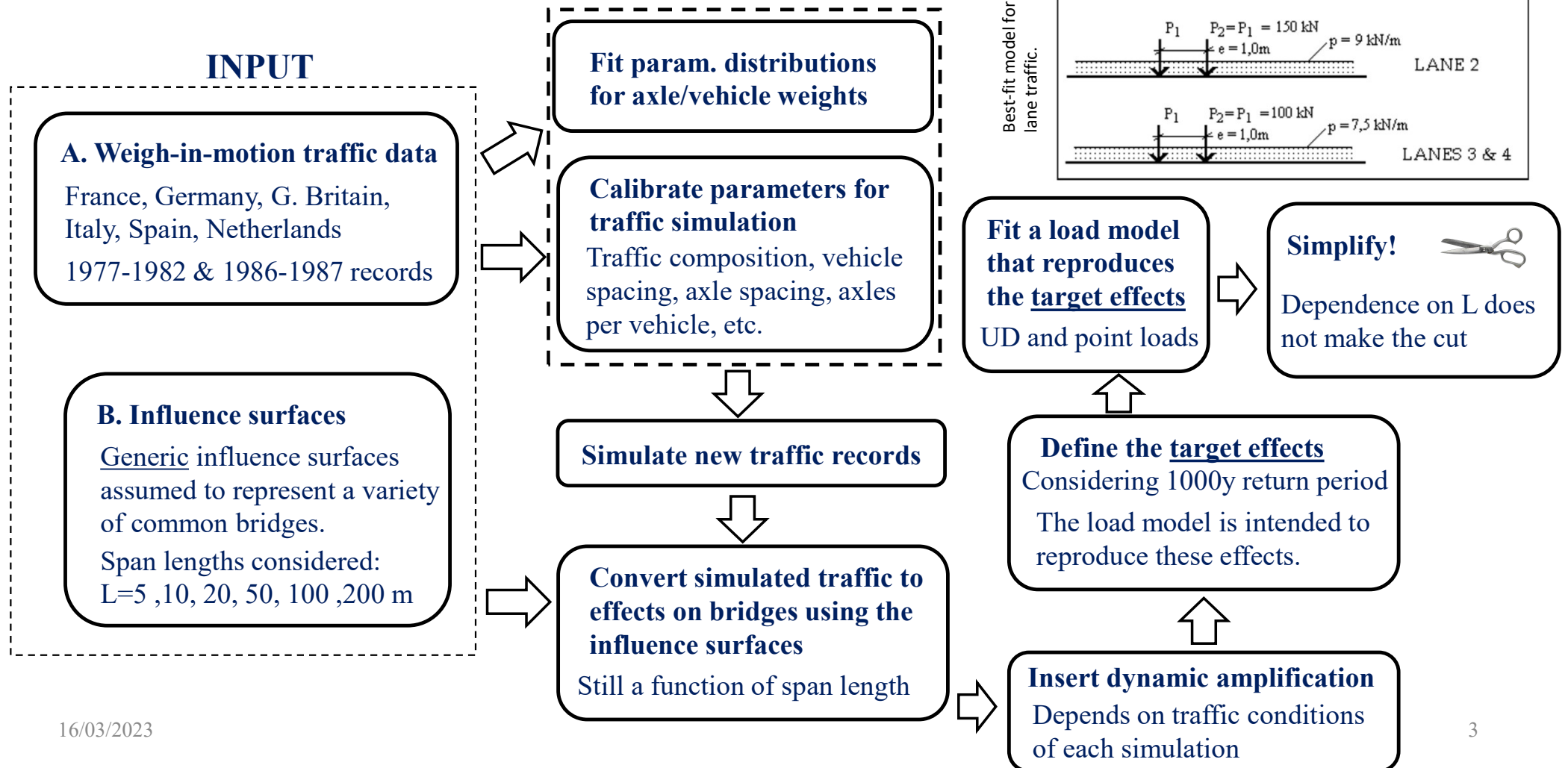
IUSS
Scuola Universitaria Superiore Pavia

NELL'APPROCCIO SEMI-PROBABILISTICO SIA LE SOLLECITAZIONI CHE LE RESISTENZE SONO PERCENTILI RARI DELLE RELATIVE DISTRIBUZIONI MARGINALI (NEL TEMPO E/O NELLO SPAZIO).



Nelle *costruzioni esistenti* i percentili rari delle resistenze sono valutate ad hoc sulla base delle indagini, si dovrebbe fare lo stesso per le sollecitazioni -> analisi di livello V delle linee guida.

CARICO DA TRAFFICO: EN1991 – LOAD MODEL 1 DERIVATION

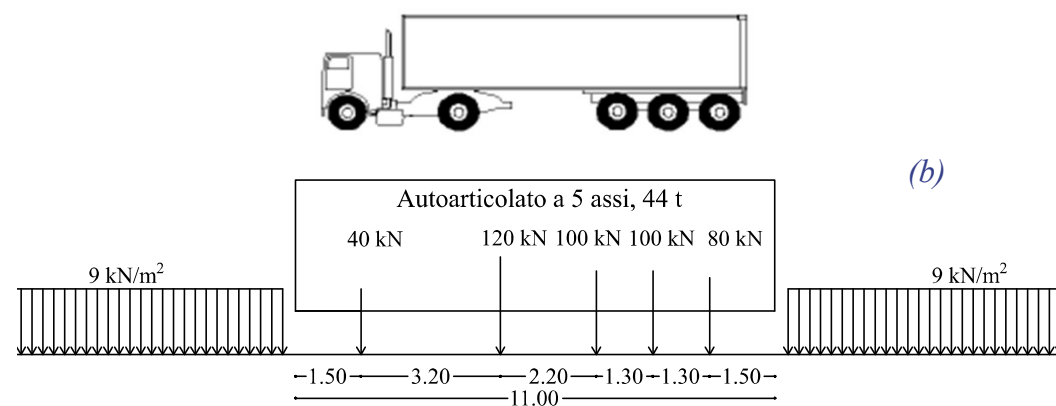
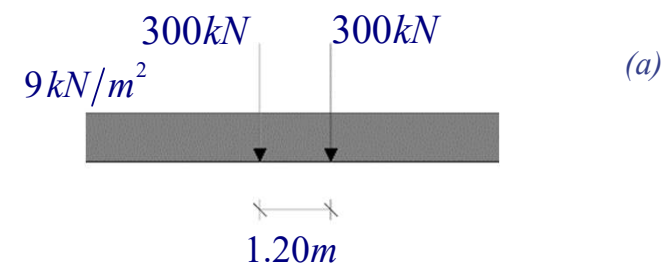
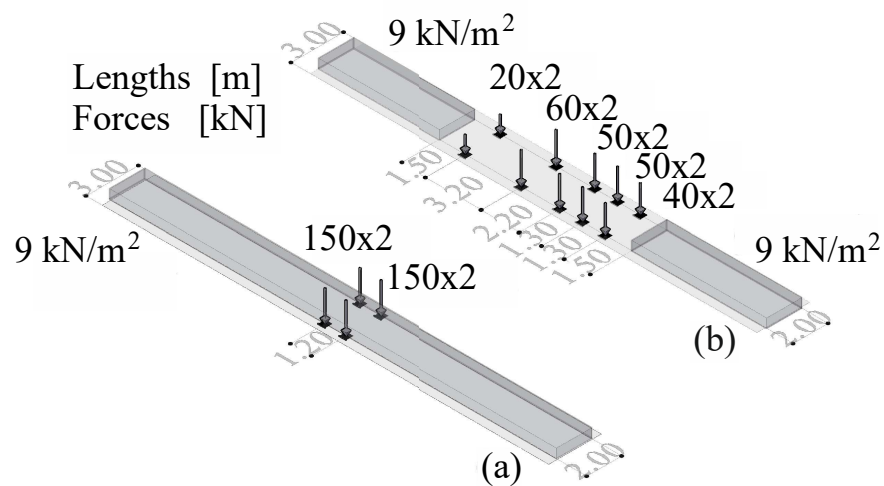


GLI SCHEMI DI CARICO DI NORMA SONO CONVENZIONALI

SCHEMI DI CARICO DA TRAFFICO SECONDO NTC 2018 E LLGG 2020

(a) modello di carico 1 NTC 2018

(b) carico da 440kN

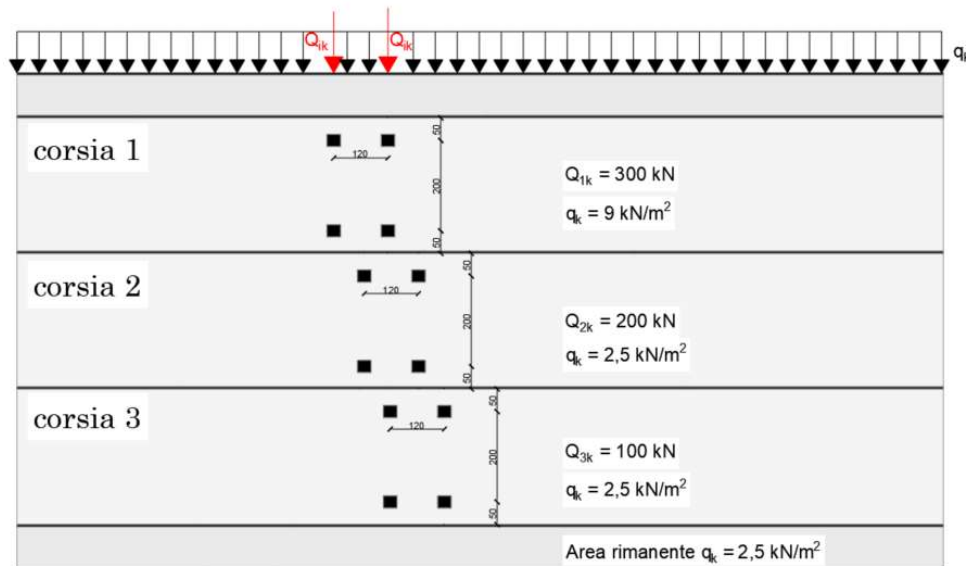


NTC 2018: NORME TECNICHE DELLE COSTRUZIONI

LLGG 2020: LINEE GUIDA PER LA CLASSIFICAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO, LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ED IL MONITORAGGIO DEI PONTI ESISTENTI

CONDIZIONI DI CARICO DA NORMATIVA

SCHEMA DI CARICO 1 SECONDO NTC 2018



COMBINAZIONI DI CARICO

- SLU – NTC 2018

$$Q_d = 1.35 \cdot G_{1K} + 1.5 \cdot G_{2K} + 1.35 \cdot Q_K$$

- OPERATIVITA' – LLGG 2020

$$Q_d = 1.26 \cdot G_{1K} + 1.26 \cdot G_{2K} + 1.20 \cdot Q_K$$

G_{1K} : valore caratteristico del peso degli elementi strutturali

G_{2K} : valore caratteristico del peso degli elementi non strutturali

Q_K : valore caratteristico del carico da traffico

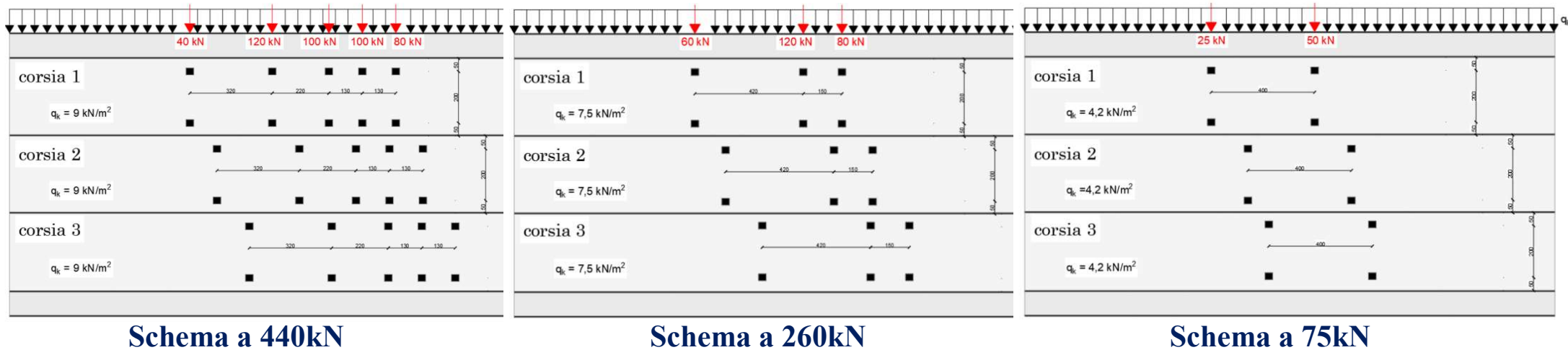
γ_{G1} : fattore parziale di sicurezza per il peso proprio strutturale

γ_{G2} : fattore parziale di sicurezza per il peso proprio non strutturale

γ_Q : fattore parziale di sicurezza per il carico da traffico

CONDIZIONI DI CARICO DA NORMATIVA

SCHEMA DI CARICO DA TRANSITABILITA' SECONDO LLGG 2020

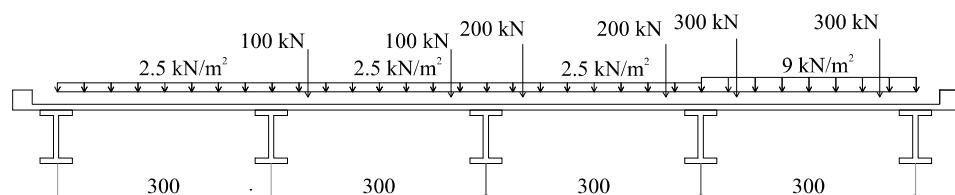


COMBINAZIONE DI CARICO ALLO SLU

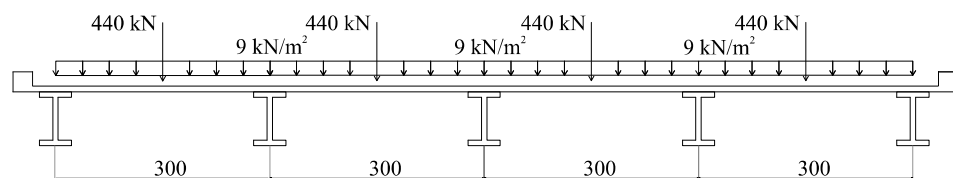
$$Q_d = 1.26 \cdot G_{1K} + 1.26 \cdot G_{2K} + 1.60 \cdot Q_K$$

CARICHI NTC 2018 vs CARICHI LLGG 2020

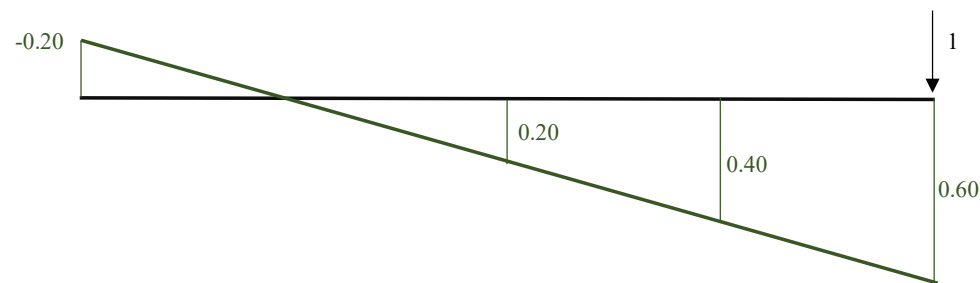
Carico 1 NTC 2018



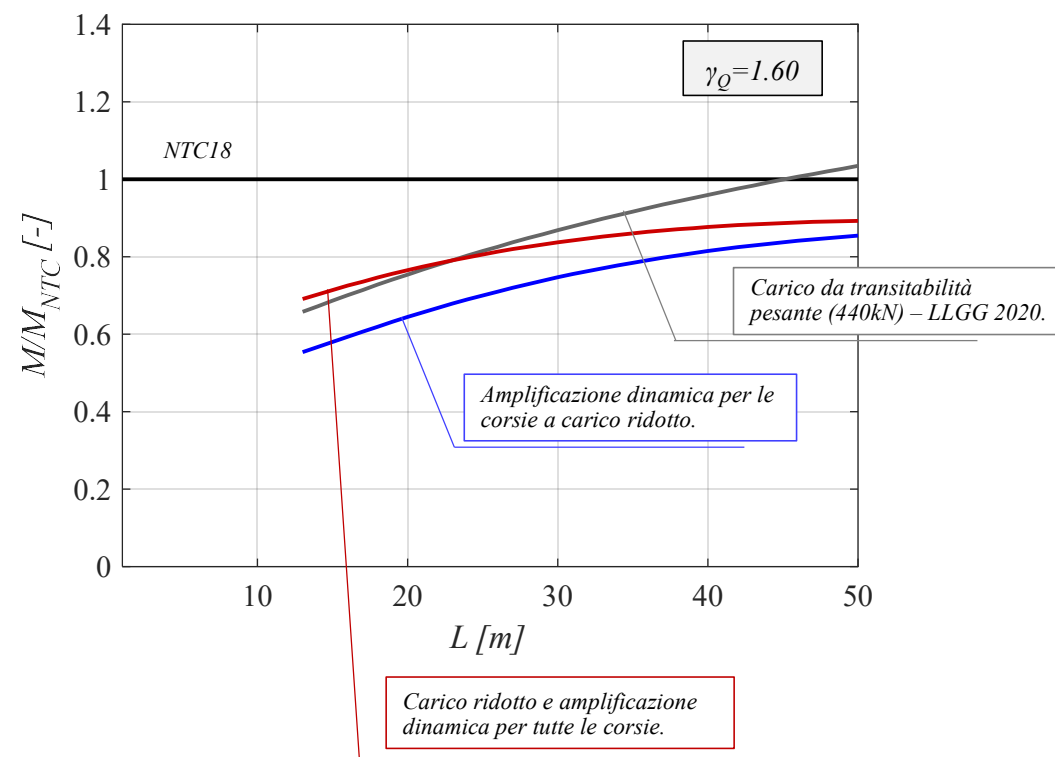
Carichi LLGG 2020 (440kN)



Ripartizione trasversale del carico



Momento in mezzeria



VIADOTTI CASO STUDIO

AUTOSTRADA A56 TANGENZIALE DI NAPOLI



(a) Viaduct no. 1



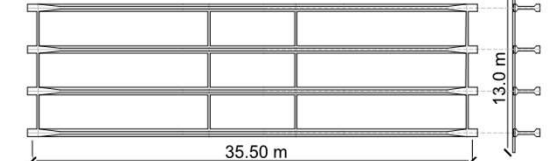
(b) Viaduct no. 2



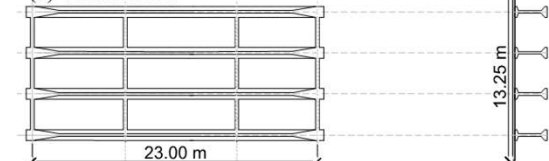
(c) Viaduct no. 3



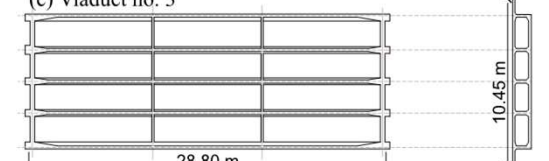
(a) Viaduct no. 1



(b) Viaduct no. 2



(c) Viaduct no. 3



a) Miano –Agnano.

b) Arena Sant'Antonio.

c) Calata San Domenico.

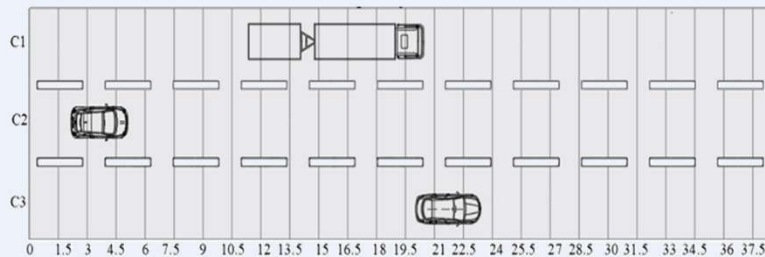
METODOLOGIA

Distribuzione spaziale dei veicoli (con assi)

Dati caselli / Tutor

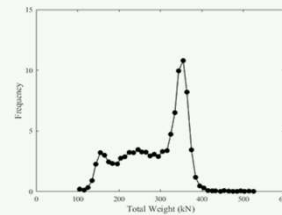
Caratterizzazione parco veicolare

Micro Simulazioni di traffico (Traiettoria)

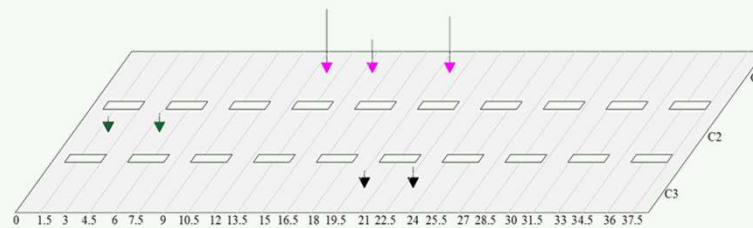
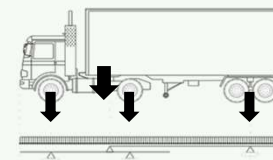


Distribuzione spaziale forze

Peso totale di ciascun veicolo

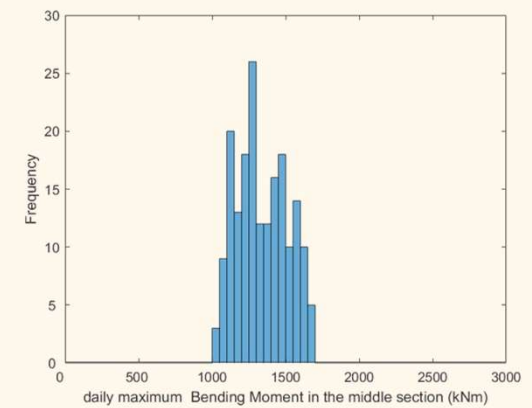


Ripartizione carico su assi



Sollecitazioni

Modello FE



DATI DISPONIBILI

DATI DI TRAFFICO

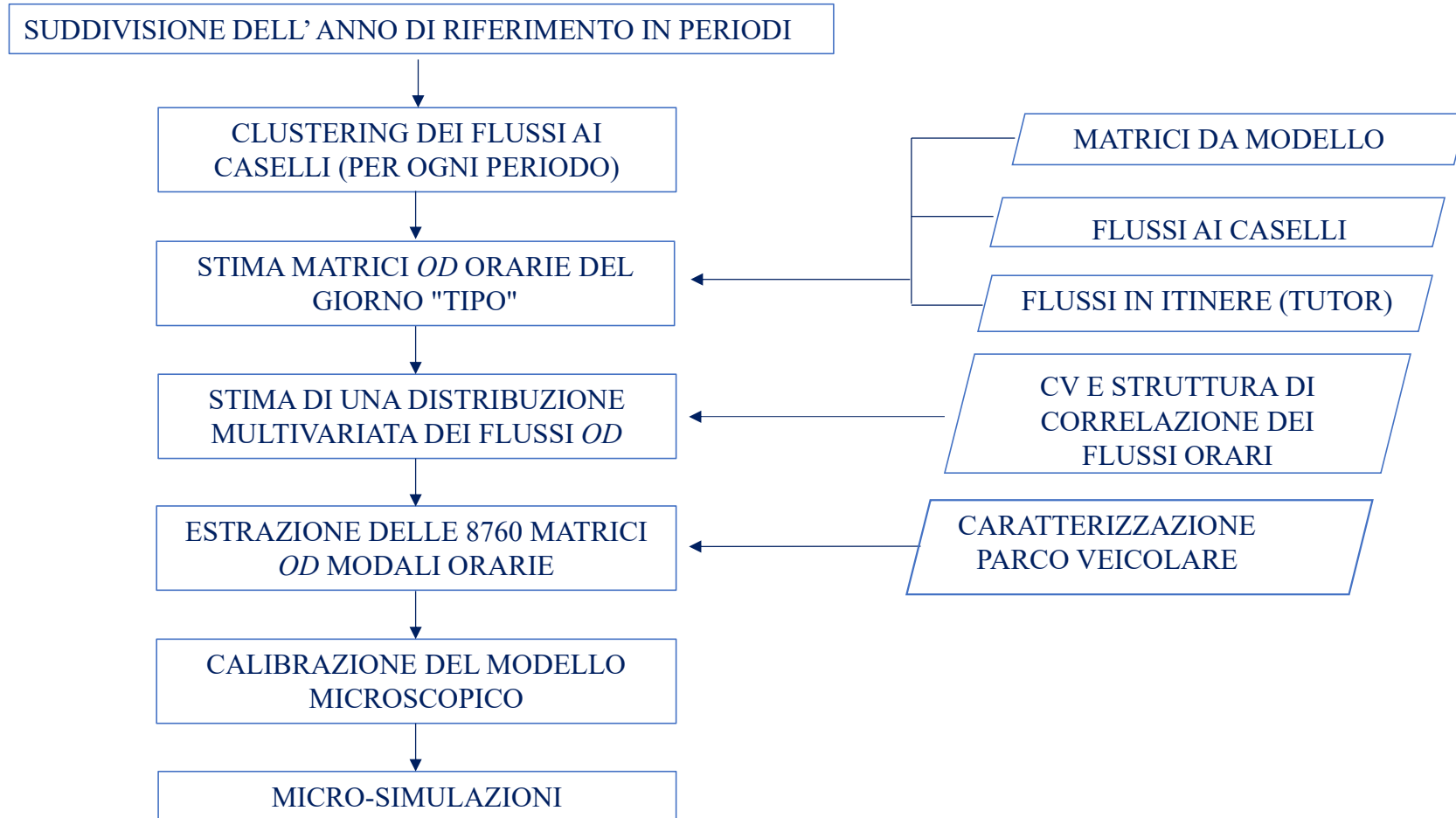
- ☐ Flussi orari ai caselli relative nell'anno 2018
- ☐ Flussi orari ai Caselli relative al periodo 13/02/2021 – 24/02/2021
- ☐ Flussi orari ai portali tutor relative al periodo 13/02/2021 – 24/02/2021

PARCO VEICOLARE

- ☐ Database Nazionale suddiviso per categorie di veicoli, per casa produttrice e portata*
- ☐ Database Regionale suddiviso per categorie di veicoli*
- ☐ Classi di pedaggio Tangenziale di Napoli

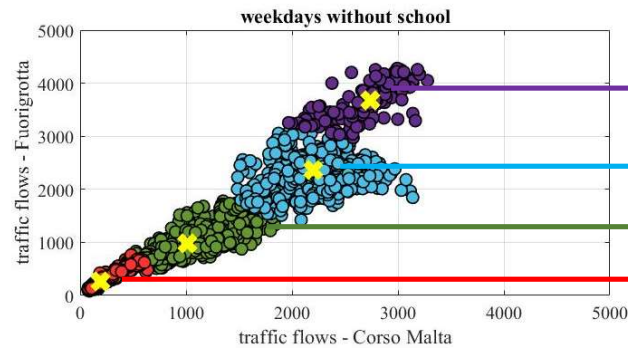
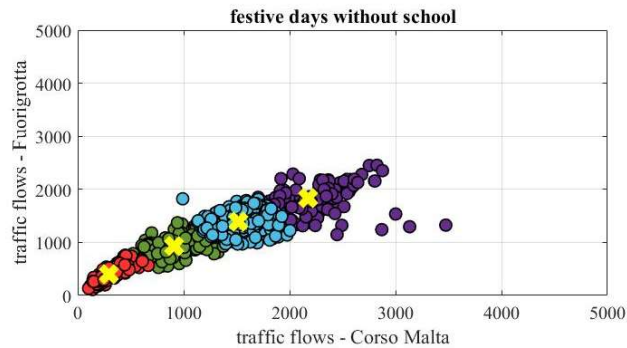
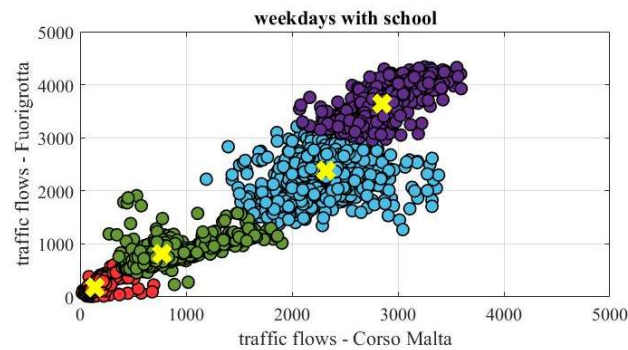
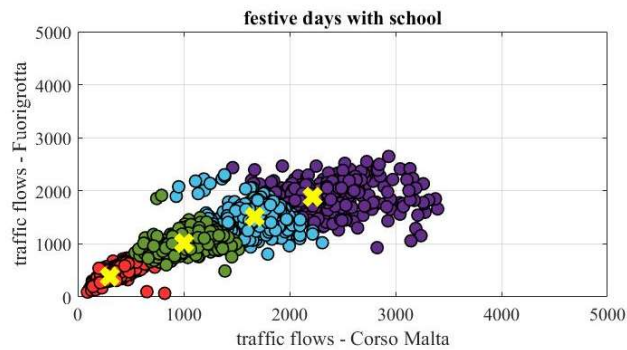
*Fonte Automobile Club d'Italia (ACI)

PROCEDURA



CLUSTER ANALYSIS

L'analisi è eseguita rispetto ai flussi di traffico più significativi: **Corso Malta e Fuorigrotta**



Cluster	Numerosità
Festivi – Con scuola	85
Feriali – Con scuola	184
Festivi – Senza scuola	27
Feriali – Senza scuola	69

Fascia oraria 6 am - 10 am

Fascia oraria 10 am - 9 pm

Fascia oraria 9 pm – 12 pm

Fascia oraria 12 pm – 6 am

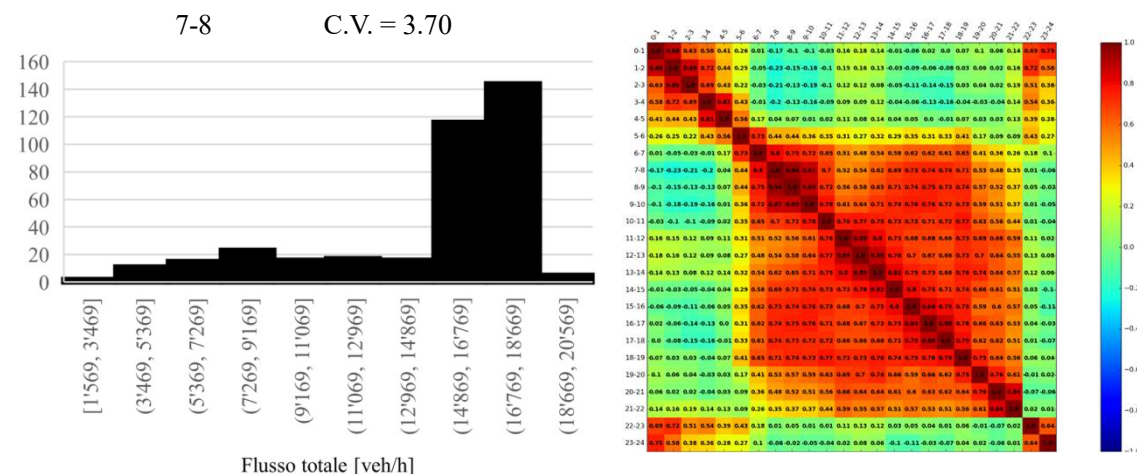
X: centroide del cluster

STIMA MATRICI *OD* ORARIE DEL GIORNO TIPO

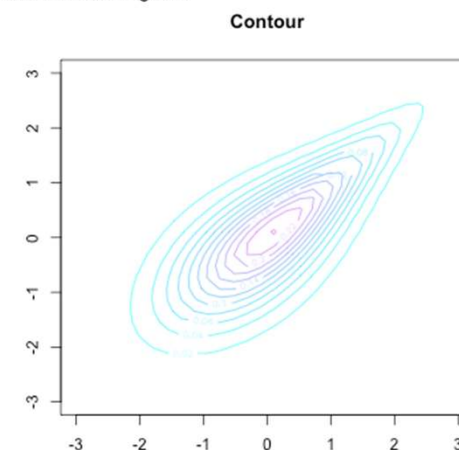
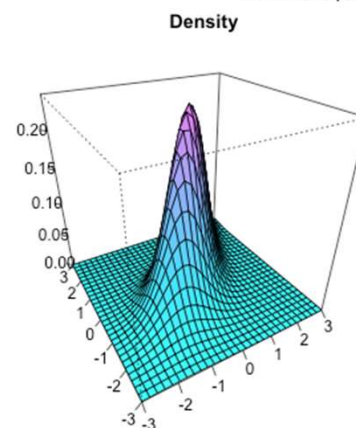
STIMA DELLE MATRICI O/D DA DISTRIBUZIONE MULTIVARIATA

Ipotesi:

- 1) La struttura spaziale dei flussi *OD* in una determinata ora rimane invariata per tutti i giorni dello stesso periodo.
- 2) Il CV di ciascun flusso *OD* (per una determinata ora, all'interno di un periodo) è assimilabile al CV del flusso totale nella stessa ora.
- 3) La correlazione temporale dei flussi *OD* fra le ore di un giorno, è assimilabile alla correlazione temporale del flusso totale.
- 4) I flussi *OD* orari sono distribuiti secondo una normale con media pari al flusso *OD* orario della giornata tipo e con CV ricavato dall'ipotesi 2.






Gumbel copula (param=2) with normal marginals



CONFIGURAZIONE DEL PARCO VEICOLARE

CODICE DELLA STRADA - ARTICOLO 54 – AUTOVEICOLI

Classe	Importo con Iva
CLASSE 2: Autovetture ed altri veicoli a due assi	1,00 €
CLASSE 3: Veicoli a tre assi	1,65 €
CLASSE 4: Veicoli a quattro assi	2,10 €
CLASSE 5: Veicoli a cinque assi	2,60 €
CLASSE 6: Veicoli a sei assi	3,05 €
CLASSE 7: Veicoli a sette assi	3,50 €
CLASSE 8: Veicoli a otto assi	4,00 €

Classe	Lunghezza (m)	Δ1 (m)	Δ12 (m)	Δ23 (m)	Δ34 (m)	Δ45 (m)	Δ56 (m)
Classe 5 – 5 assi							
f. Autoarticolato	<16.5						
5.e.i 5 assi 		1.45	3.40	1.3	5.9	1.3	
5.e.ii 5 assi 		1.40	3.70	4.70	1.3	1.3	
g. Autotreno	<18.75						
5.g.ii 5 assi 		1.4	4.80	1.355	5.00	5.45	

DAL DATABASE NAZIONALE SI PASSA AD UN
DATABASE REGIONALE SCALATO IN PROPORZIONE
AL TOTALE NAZIONALE

CLASSE 2 3'777'997

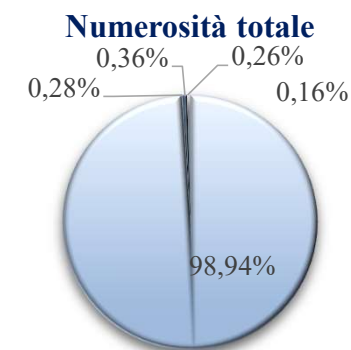
CLASSE 3 10'764

CLASSE 4 13'888

CLASSE 5 10'022

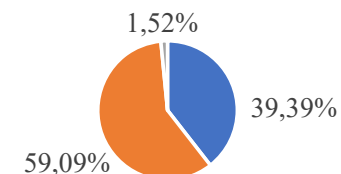
CLASSE 6 5'932

TOTALE 3'818'603



■ CLASSE 2 ■ CLASSE 3 ■ CLASSE 4
■ CLASSE 5 ■ CLASSE 6

Numerosità classe 5



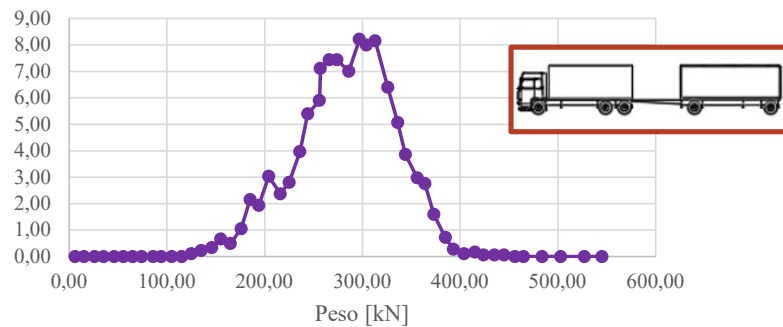
TOTALE 10'022

■ Autoarticolato(2+3) ■ Autoarticolato(3+2)
■ Autotreno

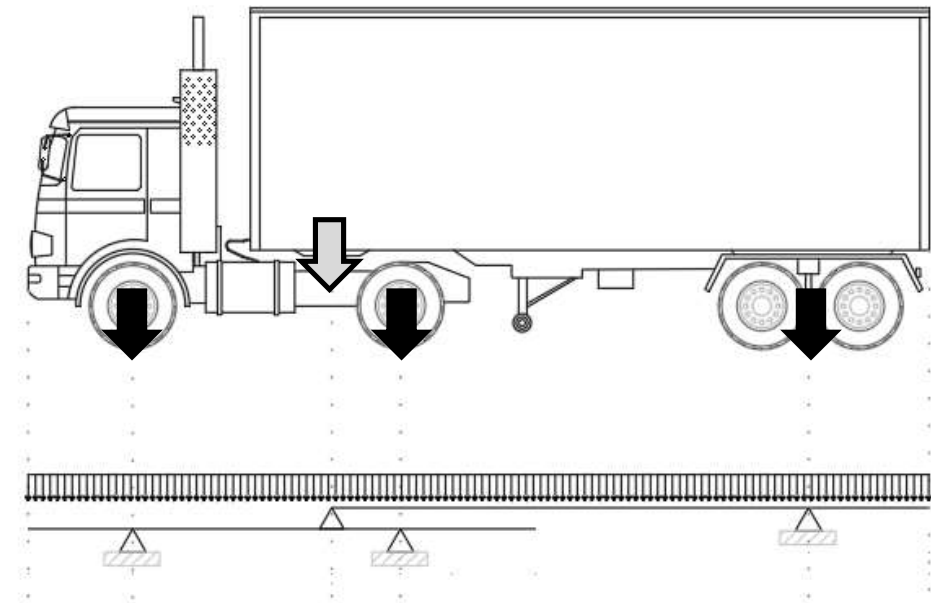
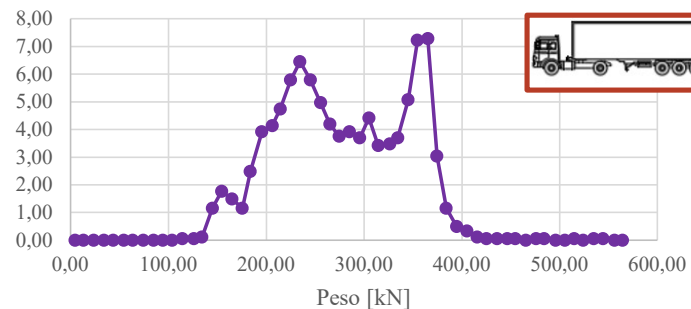
PESO DEI VEICOLI

PER CIASCUNA TIPOLOGIA DI VEICOLO TRANSITABILE E' NOTA DA LETTERATURA LA DISTRIBUZIONE DEL PESO TOTALE, CHE PUO' ESSERE RIPARTITO TRA GLI ASSI TRAMITE L'IMPIEGO DI SCHEMI STATICI NOTI.

Peso totale [kN] - veicolo classe 5

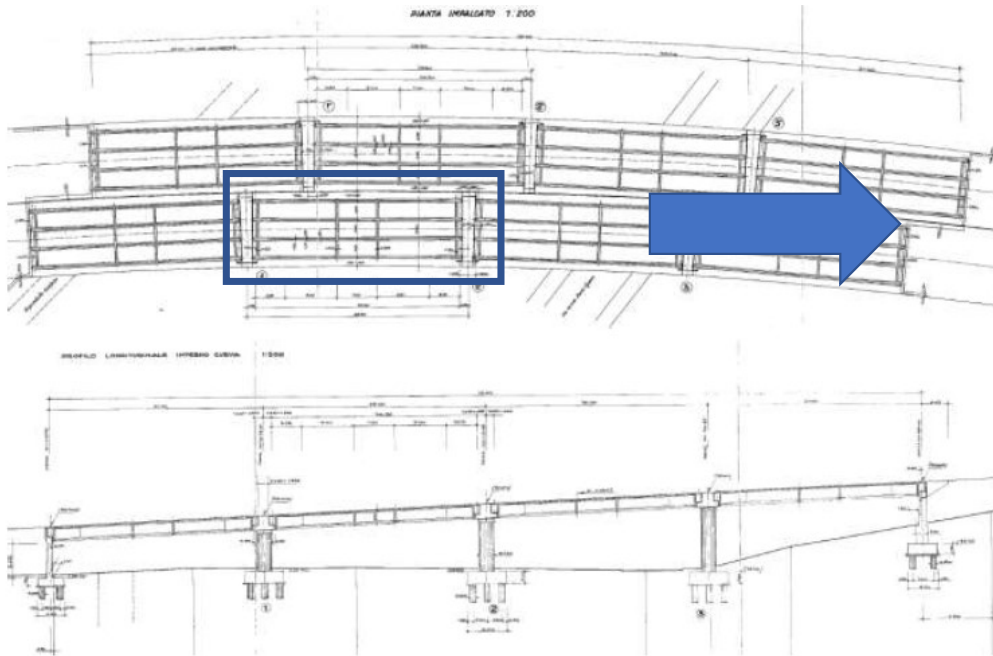


Peso totale (kN) - veicolo classe 5

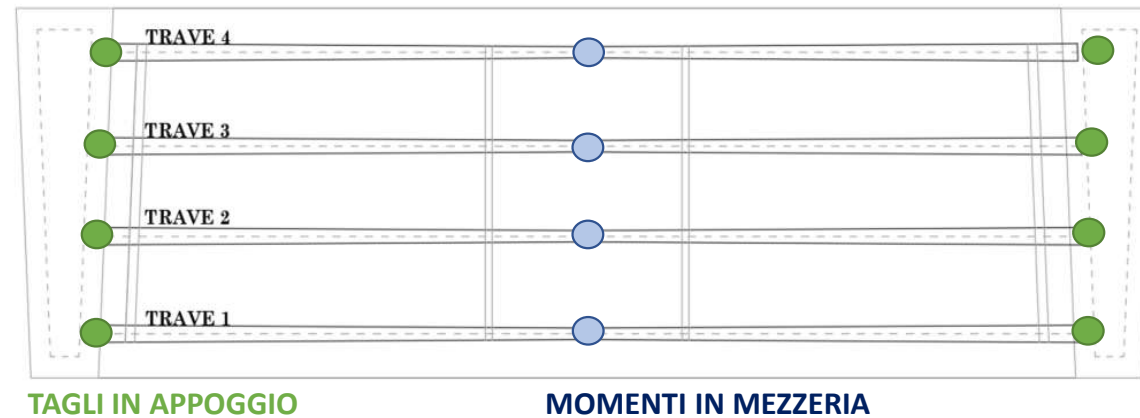


VIADOTTO MIANO - AGNANO

PROGETTO ORIGINALE

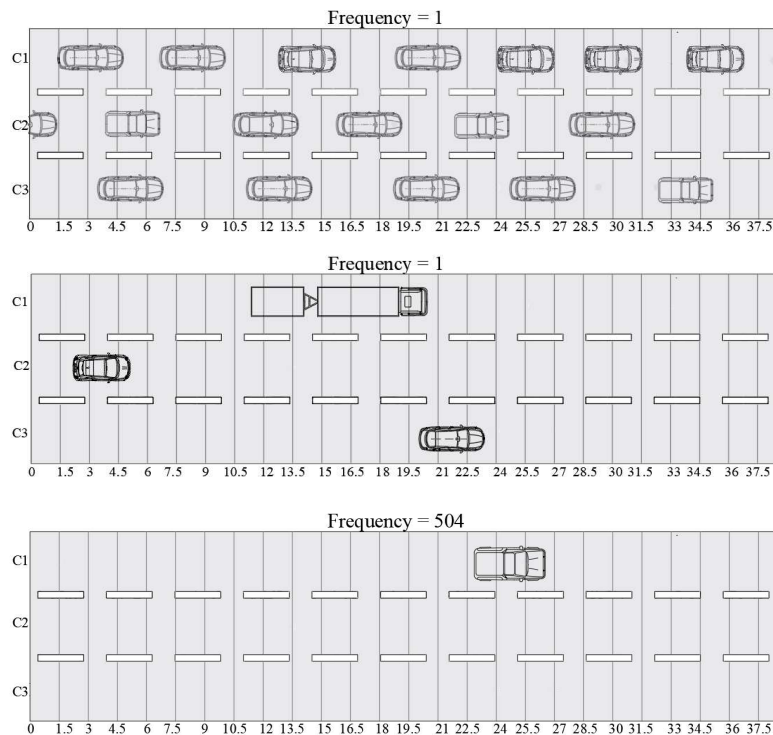


SEZIONI DI INTERESSE

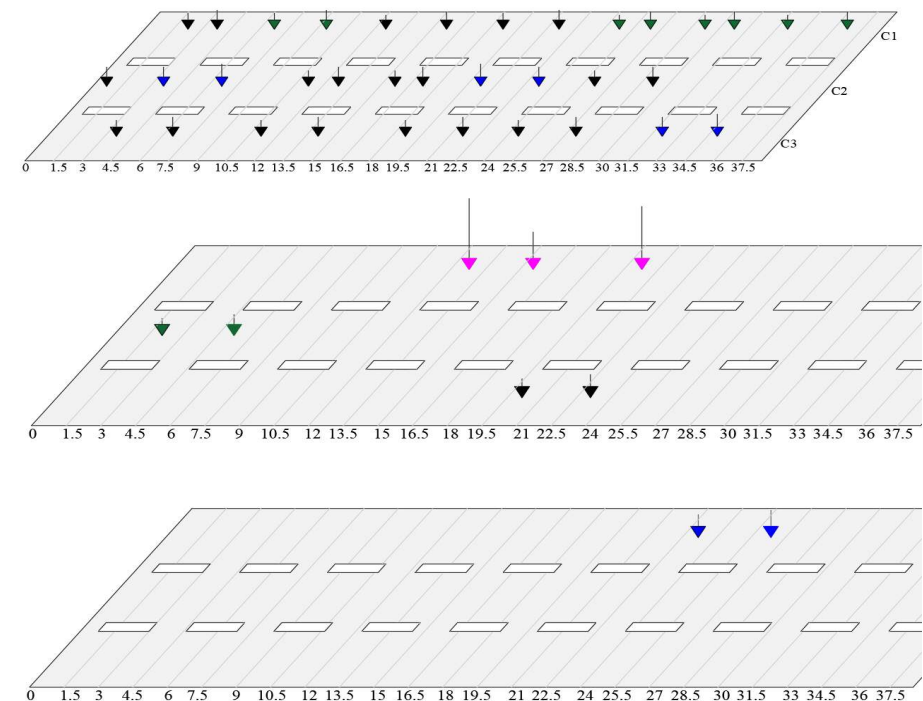


CONFIGURAZIONI DI CARICO DA SIMULAZIONE

Distribuzione assi

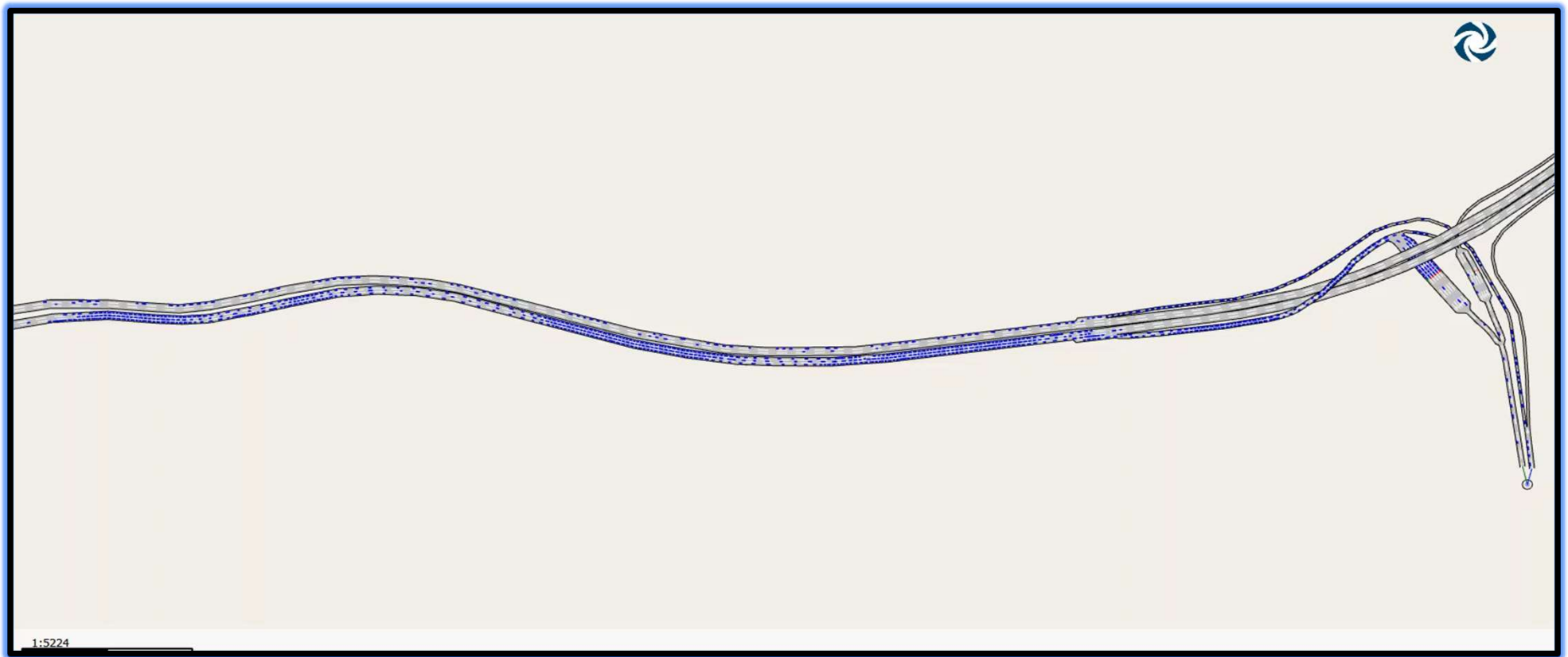


Distribuzione forze

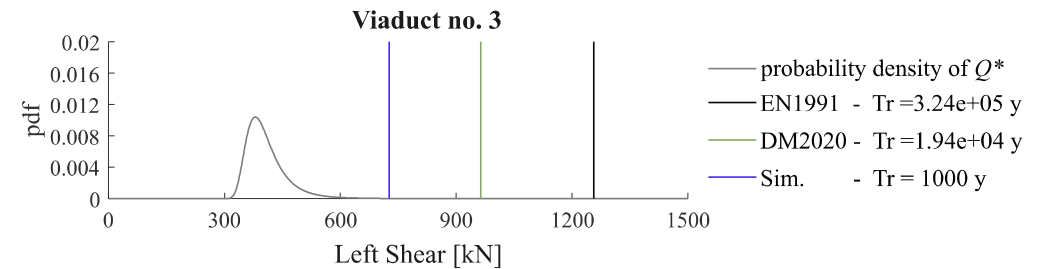
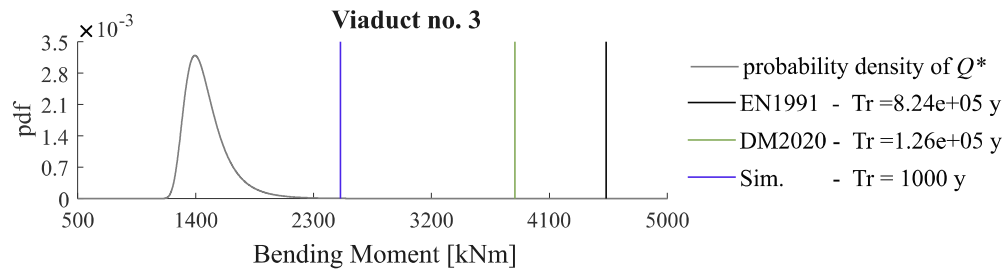
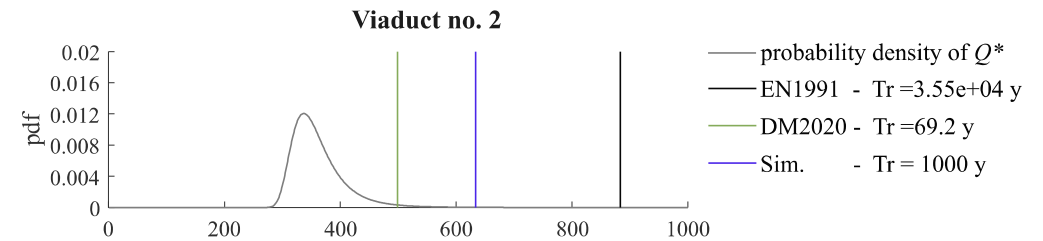
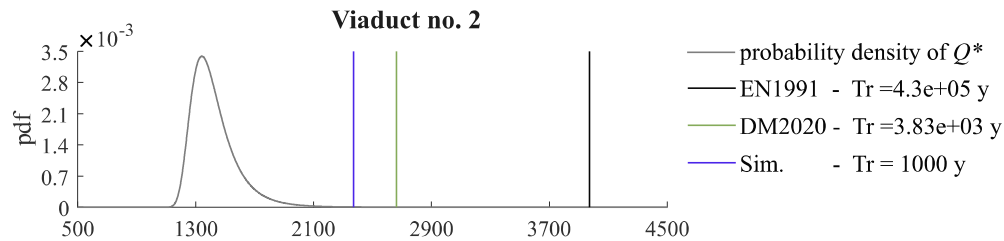
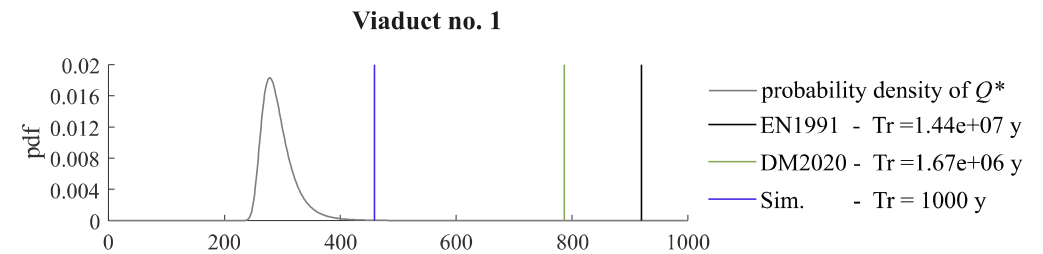
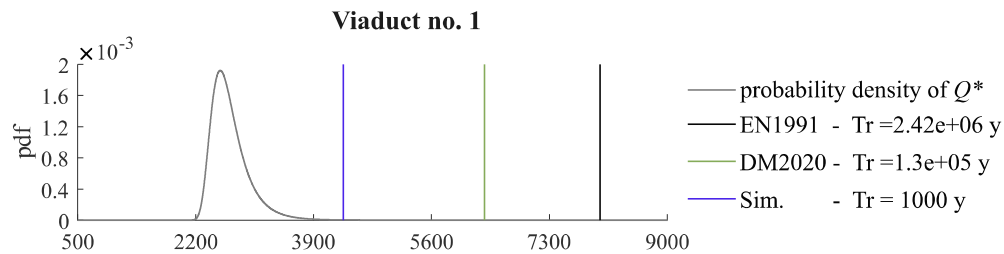


La frequenza corrisponde al numero di volte in cui la particolare configurazione di assi è stata osservata rispetto a tutti i giorni appartenenti alla stessa classe di giorno tipo (esempio: scolastico feriale).

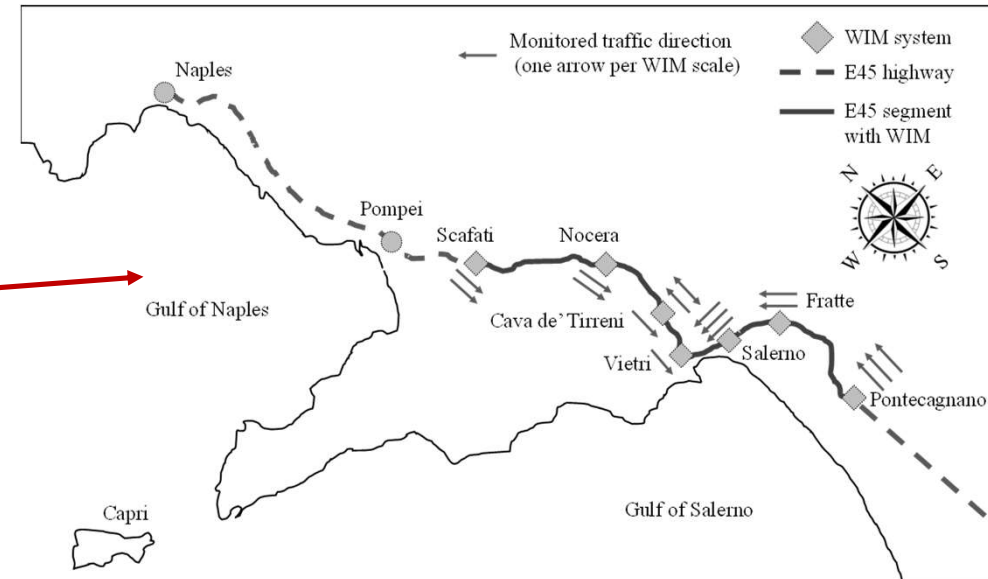
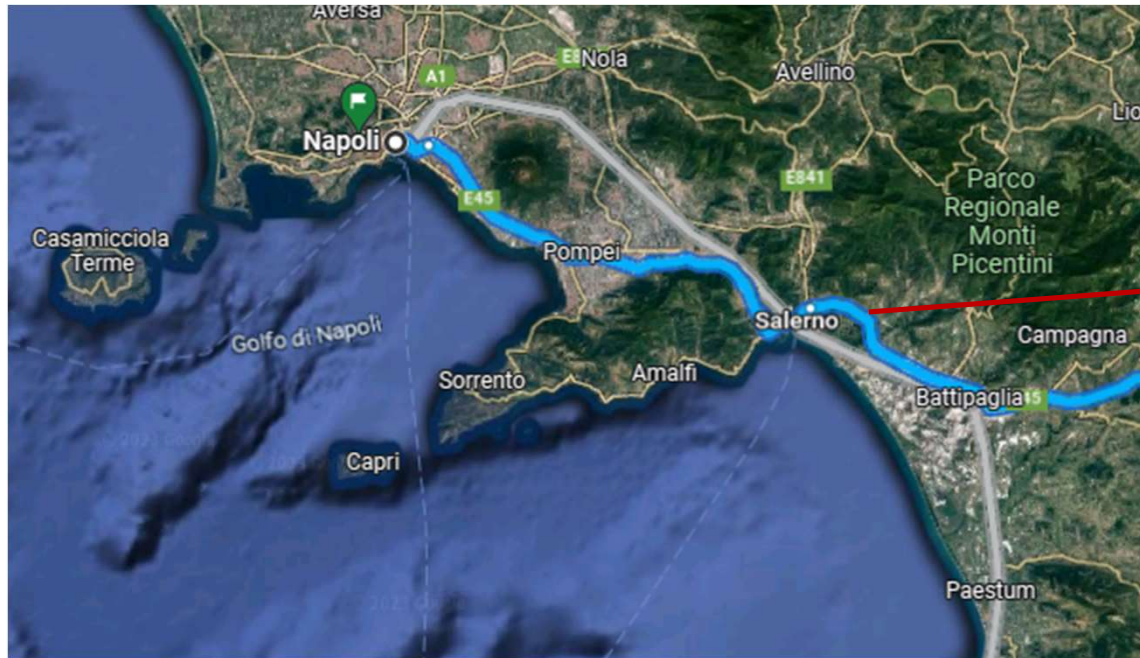
CONFIGURAZIONI DI CARICO DA SIMULAZIONE



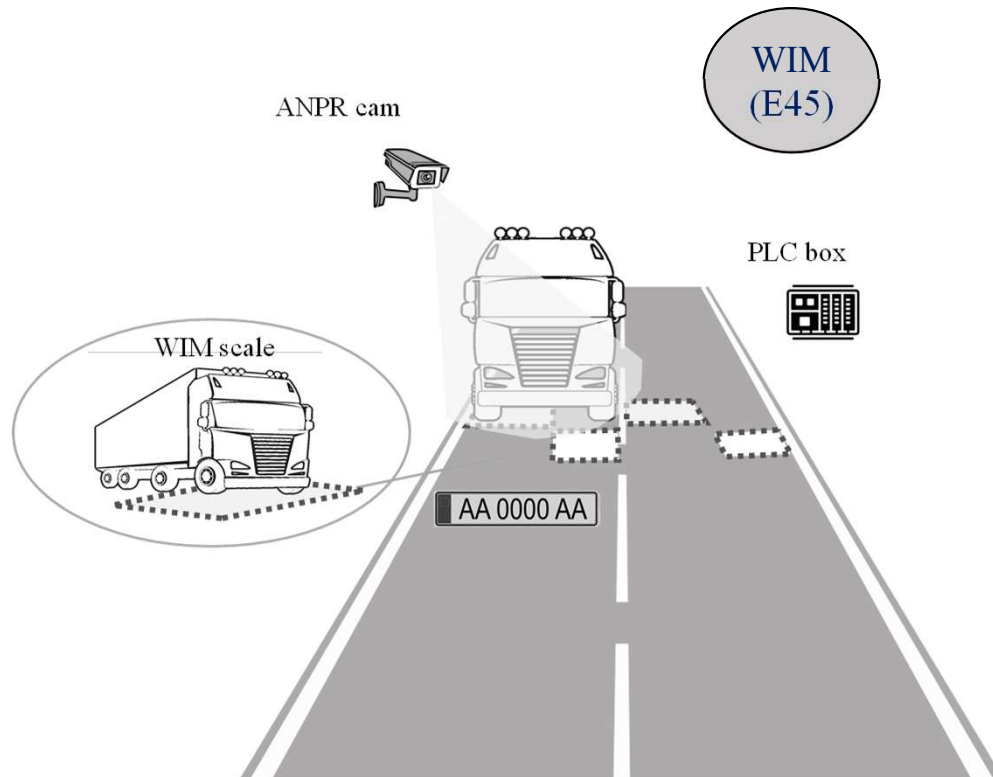
DISTRIBUZIONE DEL MASSIMO ANNUALE DELLE SOLLECITAZIONI



WIM – WEIGH IN MOTION

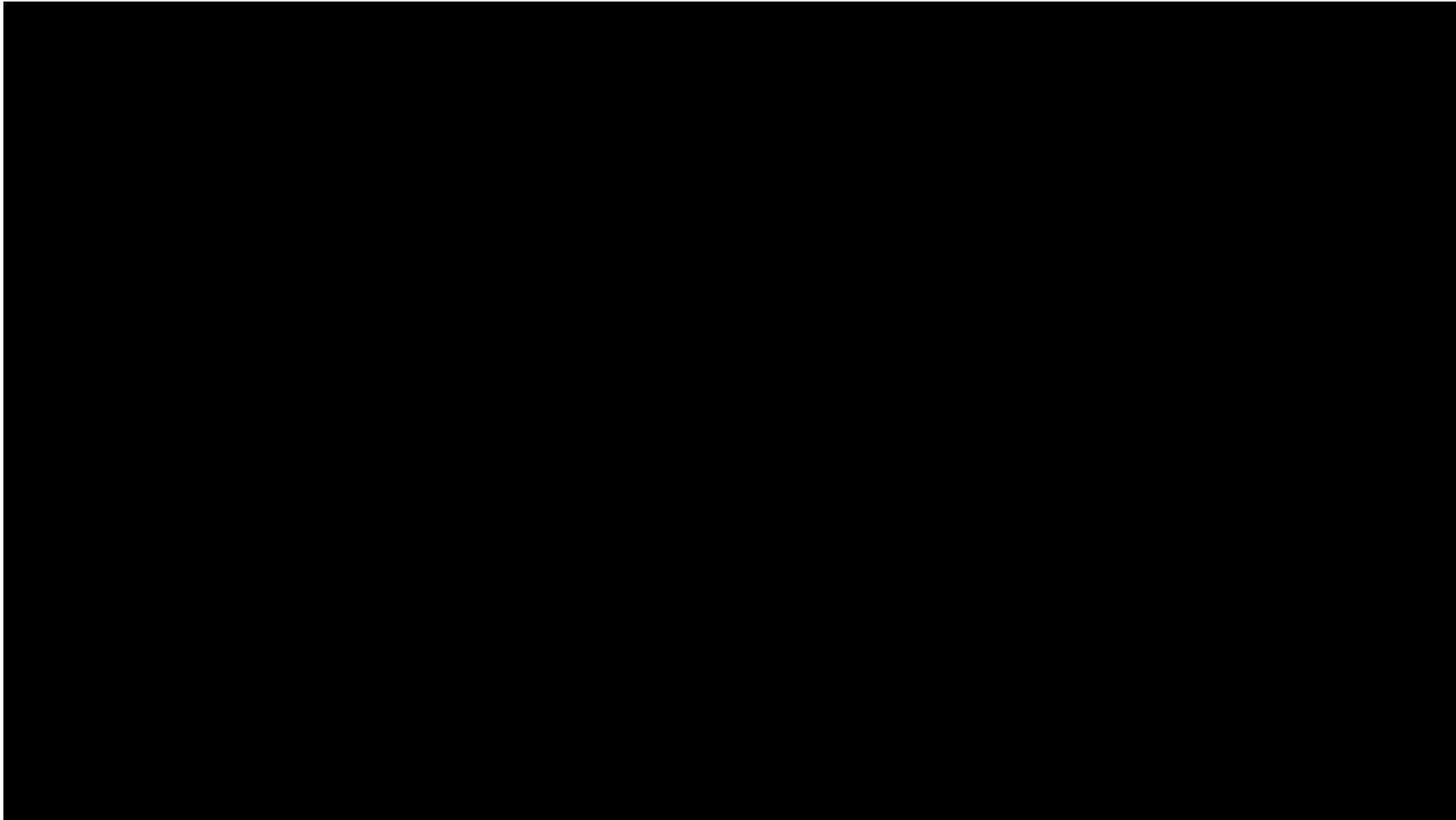


WIM – WEIGH IN MOTION



- **16** dispositivi di pesatura lungo la *E45 – Napoli – Pompei - Salerno*.
- **1 anno** di registrazioni: febbraio 2021 – gennaio 2022
- $\approx 36,000,000$ veicoli registrati in un anno.
- $\approx 17,000,000$ di dati processati.
- Tre tipologie di dati: OK, NL e NR.
- OK, NL: sigle dei dati ritenuti attendibili e utilizzati nelle elaborazioni.
- NR: sigla dei dati affetti da errori di codice.

WIM – WEIGH IN MOTION



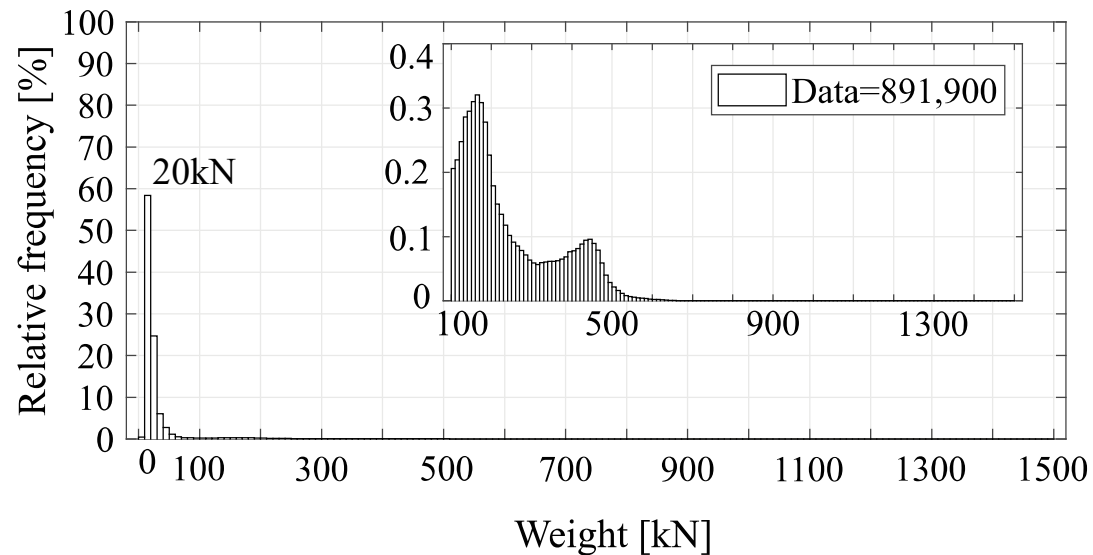
WIM – WEIGH IN MOTION

DATI PROCESSATI PER LE STATISTICHE RILEVANTI

- ☐ **Peso totale** del veicolo
- ☐ **Lunghezza** del veicolo
- ☐ **Larghezza** del veicolo
- ☐ **Classe** del veicolo
- ☐ **Scarico** di ciascun asse del veicolo
- ☐ **Scarico** dei mezzi *tandem* e *tridem*
- ☐ **Massimo scarico** giornaliero degli assi del veicolo

WIM – WEIGH IN MOTION

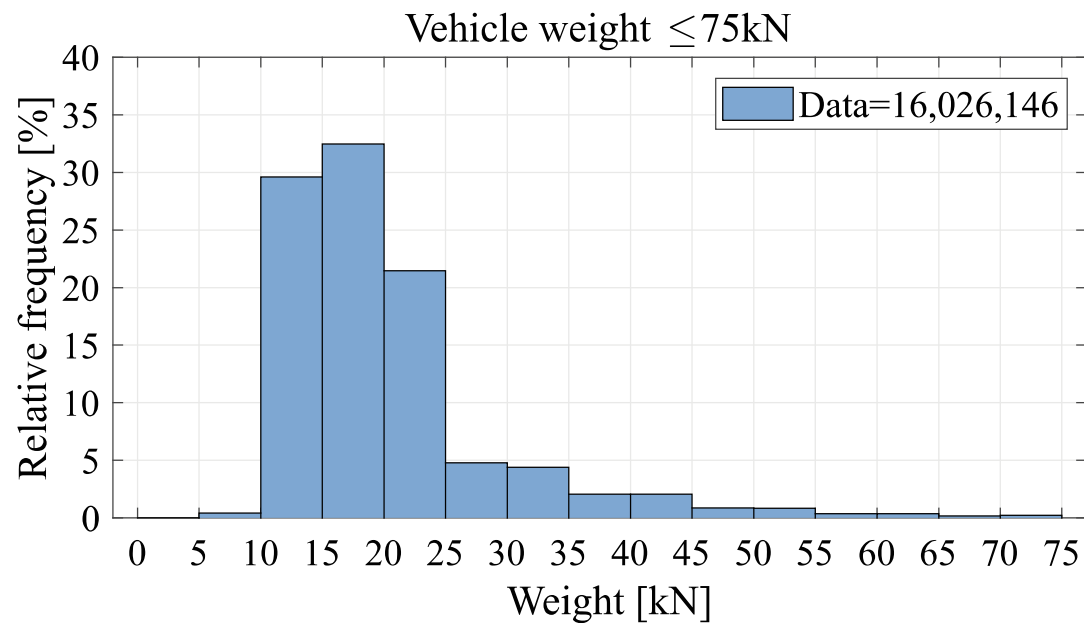
DISTRIBUZIONE DEL PESO TOTALE



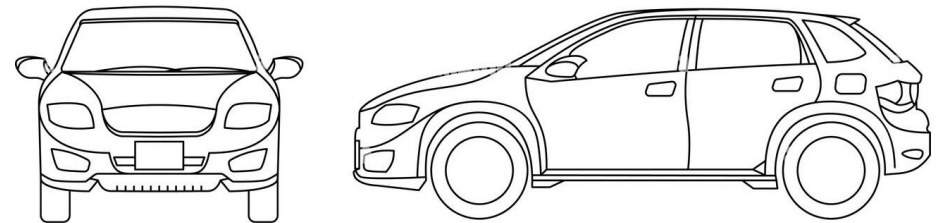
- La distribuzione del peso totale è sostanzialmente **unimodale**.
- Un ingrandimento sulla **coda della distribuzione** mostra un valore della moda corrispondente a circa **51000** veicoli con peso pari a 170kN.

WIM – WEIGH IN MOTION

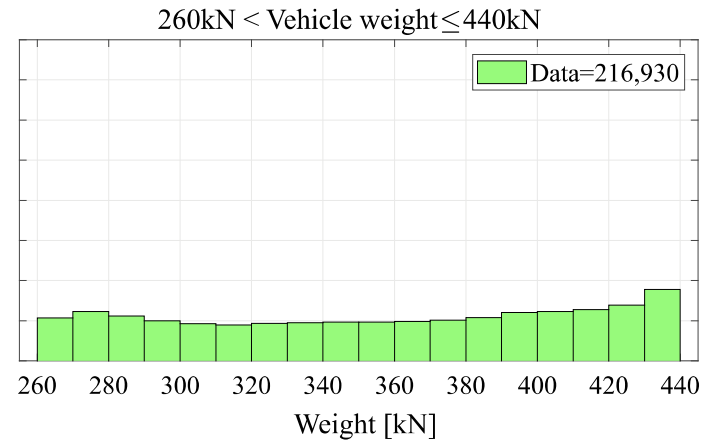
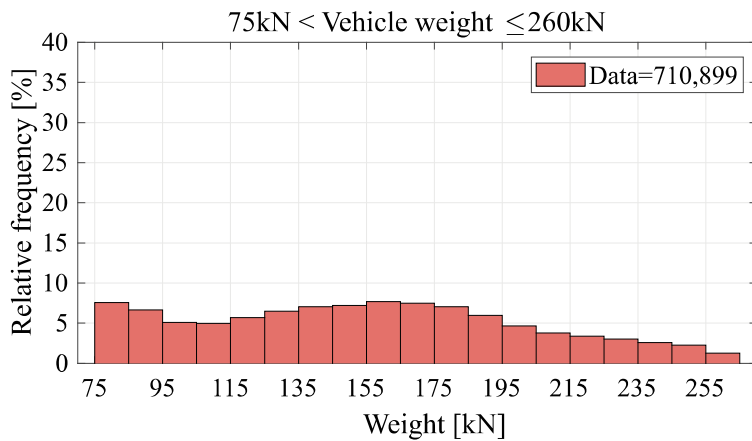
DISTRIBUZIONE DEI VEICOLI LEGGERI ($W \leq 75kN$)



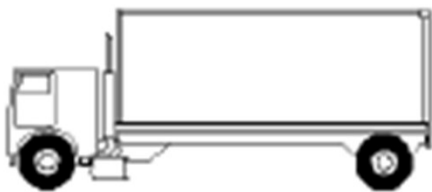
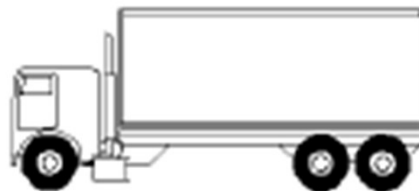
- I veicoli con $W \leq 75kN$ rappresentano il **94%** dei dati elaborati. La moda è chiaramente distinta nella distribuzione, con un valore compreso tra i 15kN e 20kN.



WIM – WEIGH IN MOTION

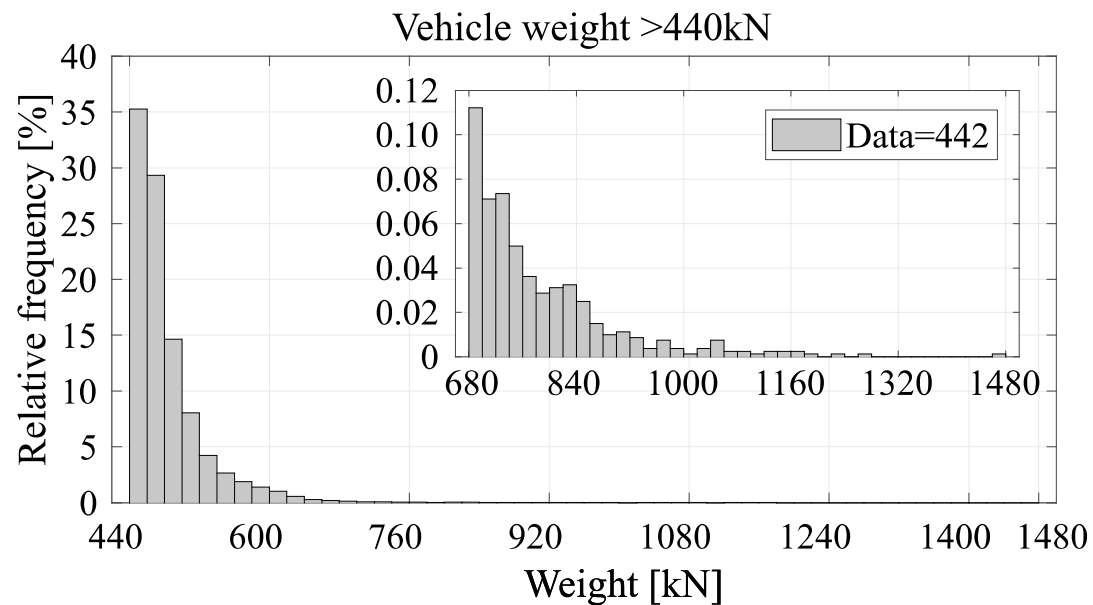
DISTRIBUZIONE DEI VEICOLI PESANTI ($75kN < W \leq 440kN$)

- I veicoli con $75kN < W \leq 440kN$ rappresentano il **5.5%** dei dati elaborati e presentano distribuzioni empiriche praticamente uniformi.

 $75kN < W < 260kN$  $260kN < W < 440kN$

WIM – WEIGH IN MOTION

DISTRIBUZIONE DEI VEICOLI PER IL TRASPORTO DEI CARICHI ECCEZIONALI ($W > 440\text{kN}$)

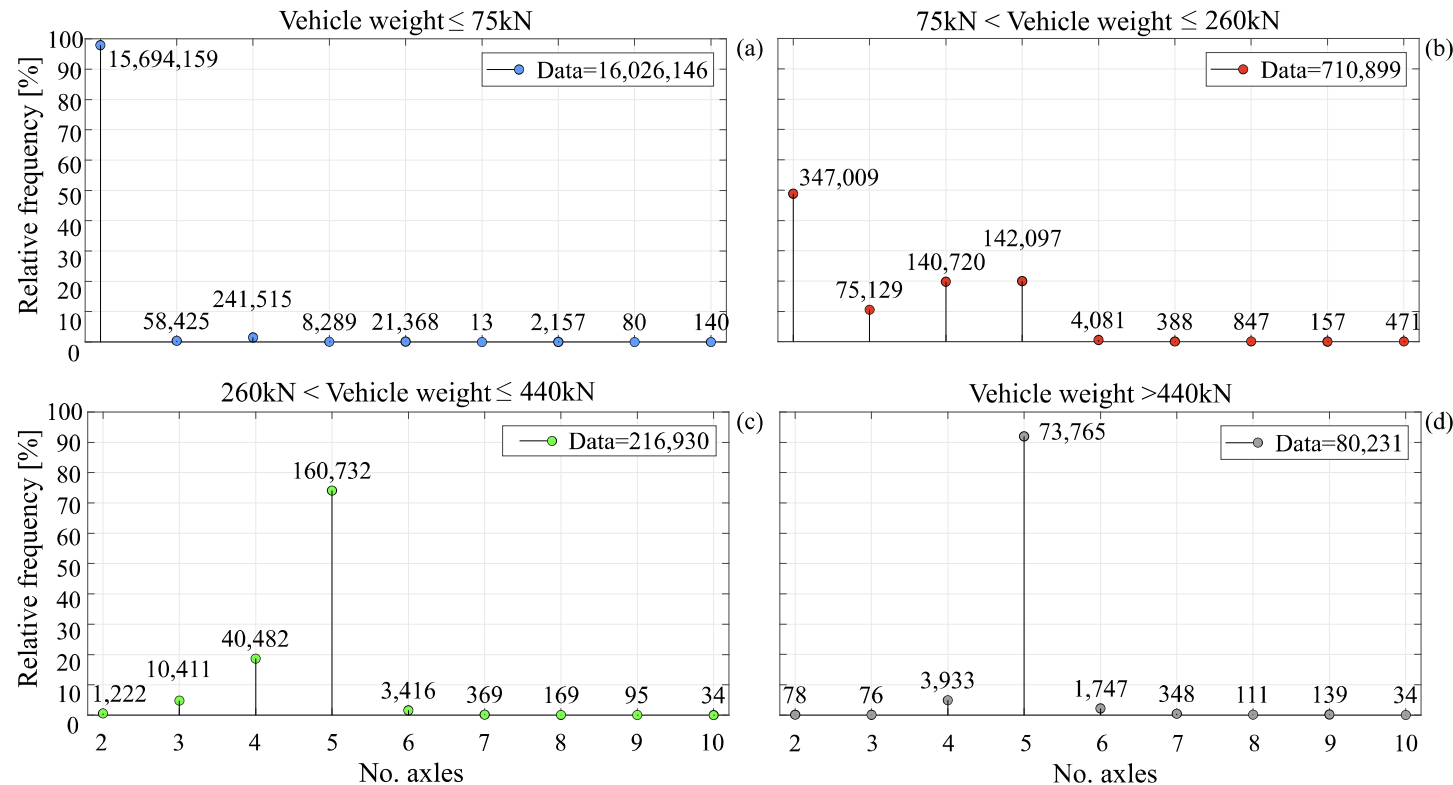


- I veicoli con $W > 440\text{kN}$ rappresentano lo **0.5%** dei dati elaborati e definiscono la categoria dei *trasporti eccezionali*.
- La moda è chiaramente distinta intorno a 440kN .
- Le statistiche dei mezzi pesanti influenzano notevolmente le applicazioni ingegneristiche.



WIM – WEIGH IN MOTION

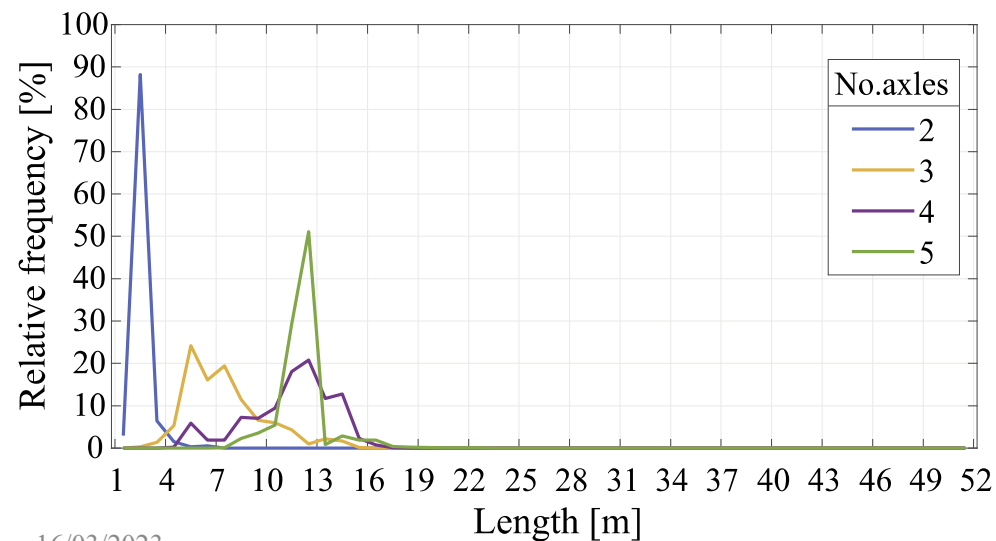
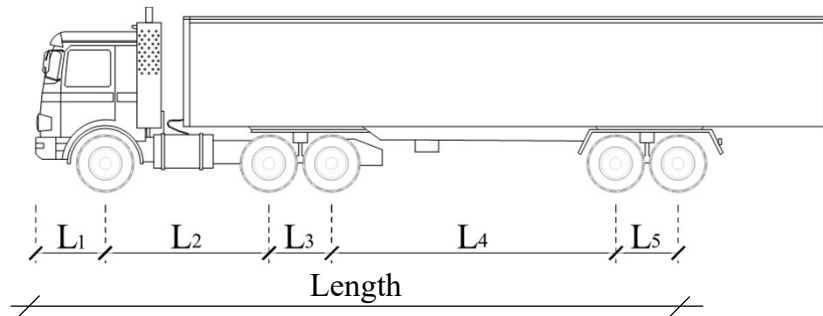
NUMERO DI ASSI (CLASSE DEL VEICOLO) DATA LA CLASSE DI PESO



- La categoria $W \leq 75\text{kN}$ è dominata da veicoli a due assi, $\approx 98\%$ dei dati totali.
- Circa l'80% del totale della categoria $75\text{kN} < W \leq 260\text{kN}$ è rappresentato da veicoli dai due ai 5 assi.
- Le categorie $W > 260\text{kN}$ sono caratterizzate essenzialmente da veicoli a cinque assi.

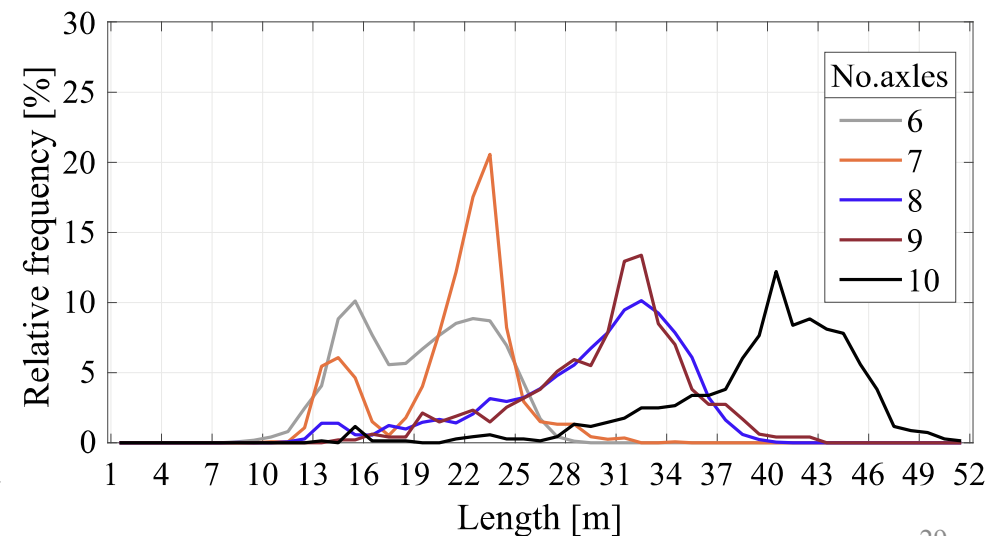
WIM – WEIGH IN MOTION

LUNGHEZZA DATO IL NUMERO DI ASSI (CLASSE DEL VEICOLO)



16/03/2023

- La **distribuzione della lunghezza** dei veicoli condizionata al numero di assi è generalmente unimodale, con una tendenza verso una maggiore eterogeneità quando il numero di assi supera due.
- Più dell'**80%** dei veicoli a due assi presentano un lunghezza intorno ai **due metri**.
- La **moda** del valore della lunghezza tende a **spostarsi verso destra** al crescere del numero di assi.

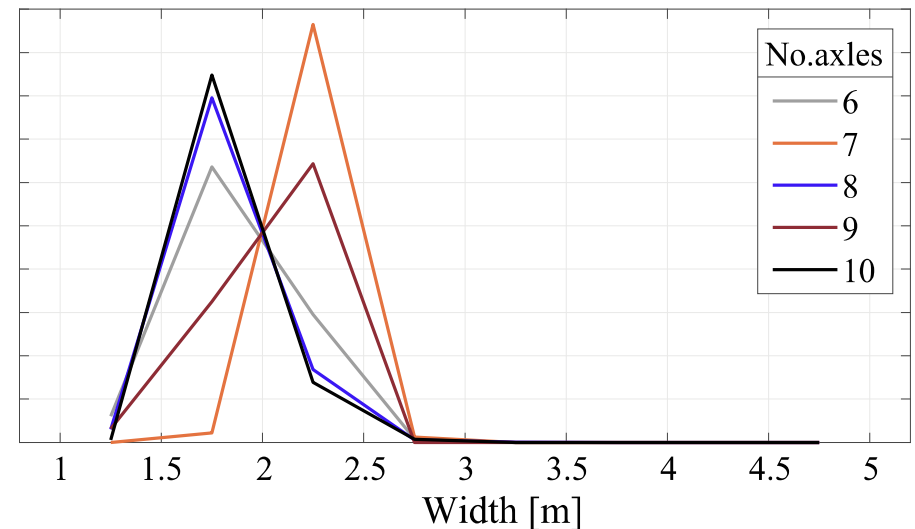
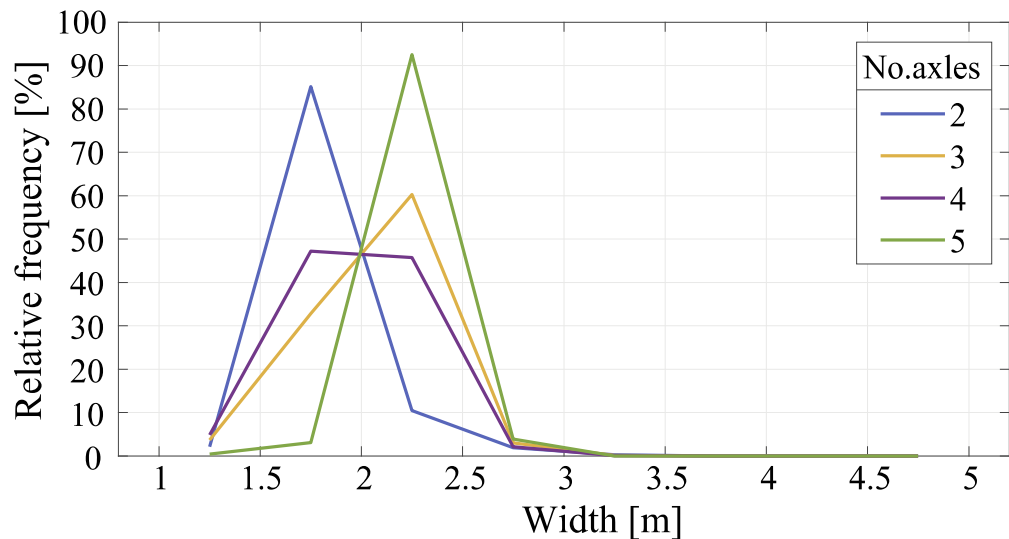


29

WIM – WEIGH IN MOTION

LARGHEZZA DATO IL NUMERO DI ASSI (CLASSE DEL VEICOLO)

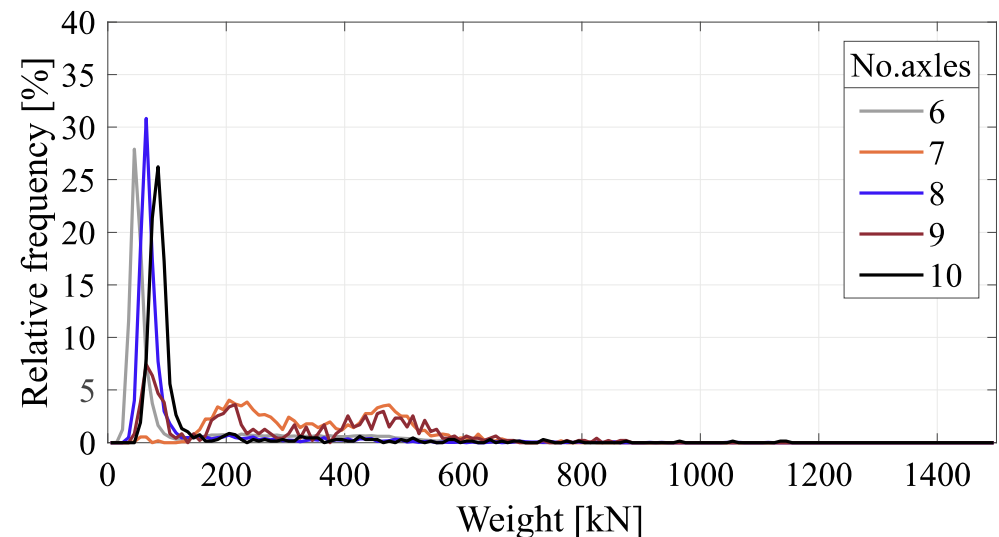
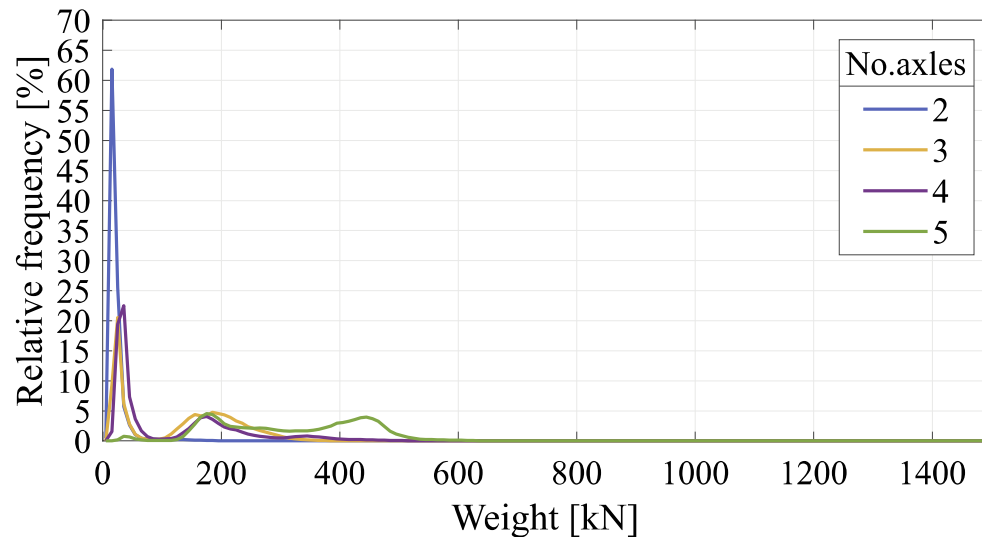
- Nelle distribuzioni più dell'**80%** dei veicoli a due assi presentano larghezza compresa tra **un metro e mezzo e due metri**.
- Nelle distribuzioni più dell'**90%** dei veicoli a cinque e sette assi presentano larghezza compresa tra **due metri e due metri e mezzo**.



WIM – WEIGH IN MOTION

DISTRIBUZIONE DEL PESO TOTALE, W , DATO IL NUMERO DI ASSI (CLASSE DEL VEICOLO)

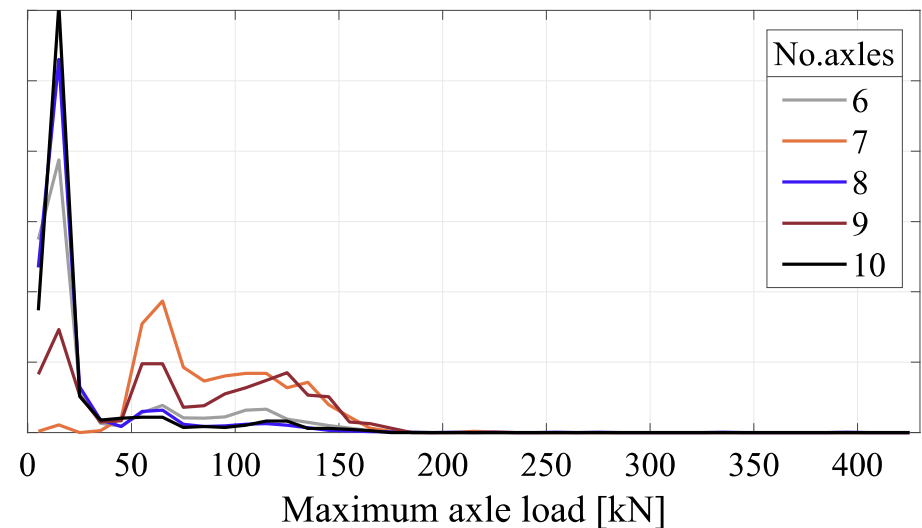
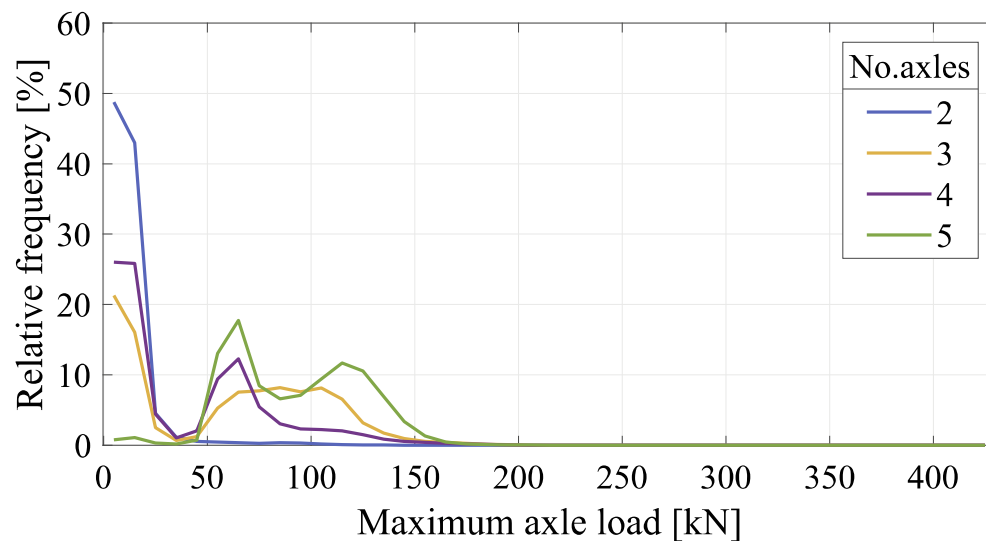
- Le distribuzioni del **peso totale**, condizionatamente al numero di assi, tendono ad essere sostanzialmente **multimodali**, ad eccezione dei veicoli a due, sei, otto e dieci assi.



WIM – WEIGH IN MOTION

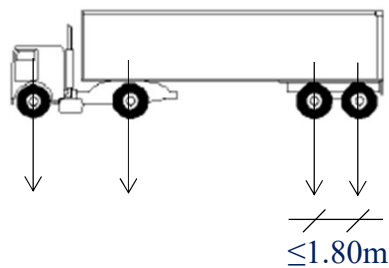
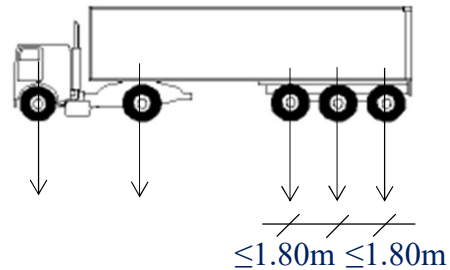
DISTRIBUZIONE DEL MASSIMO SCARICO DATO IL NUMERO DI ASSI (CLASSE DEL VEICOLO)

- Le distribuzioni del **massimo scarico dell'asse** del veicolo, condizionatamente al numero di assi, tendono ad essere sostanzialmente **multimodali**, ad eccezione dei veicoli a due, otto e dieci assi.

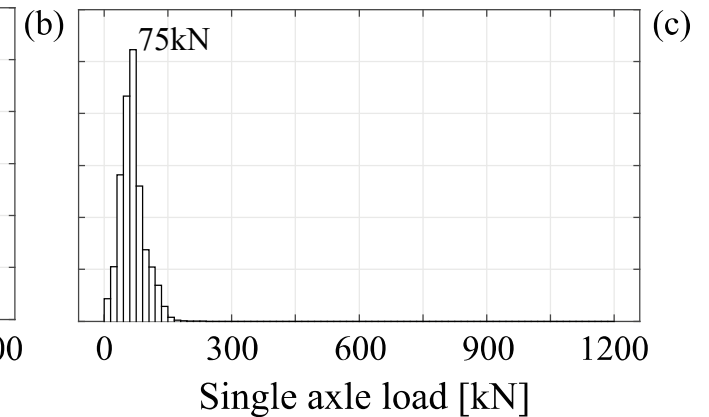
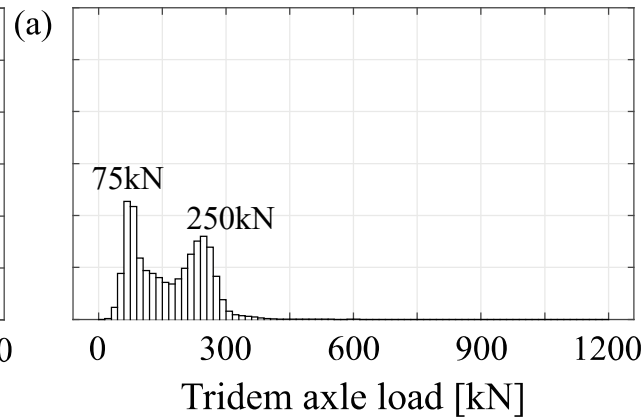
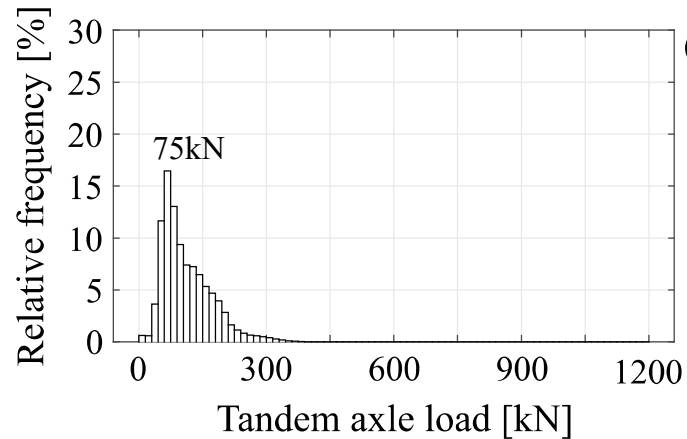


WIM – WEIGH IN MOTION

SCARICO DEGLI ASSI DEI MEZZI TANDEM E TRIDEM

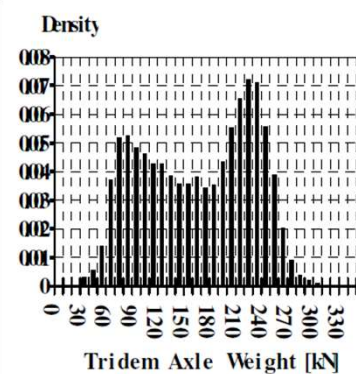
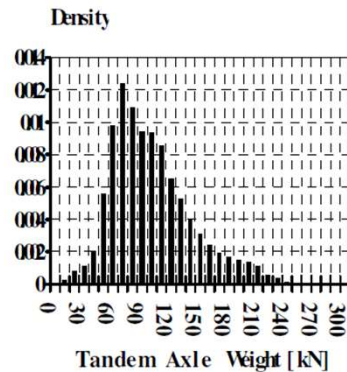
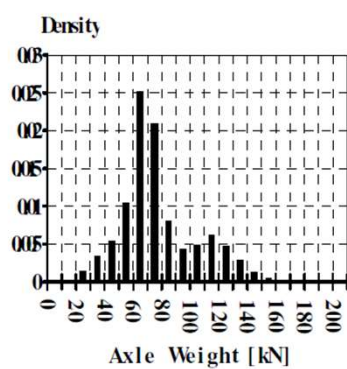
TANDEM*TRIDEM*

- Le tre distribuzioni presentano un valore modale compreso tra 75kN e 90kN.
- La coda della distribuzione dei carichi tandem è molto più marcata di quella dei scarichi del singolo asse.
- La distribuzione dei carichi tridem è **bimodale**.



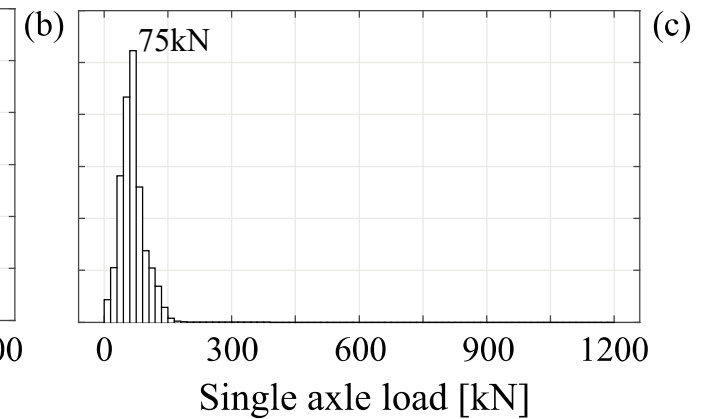
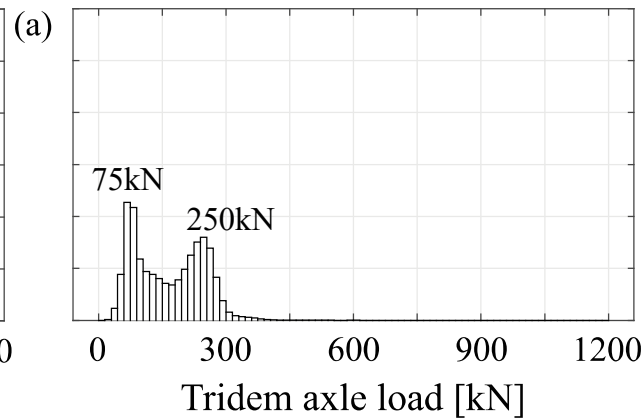
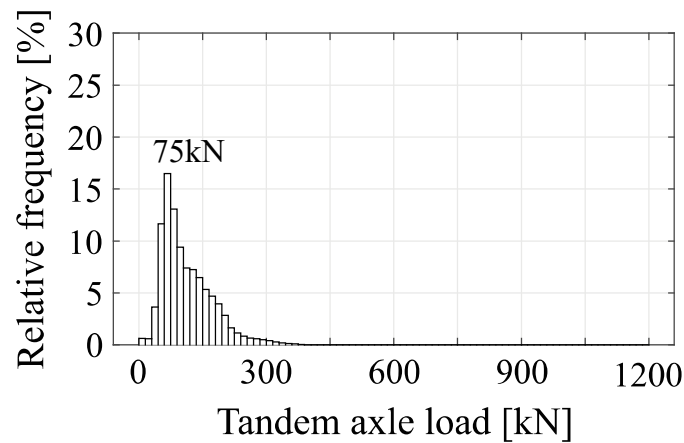
WIM – WEIGH IN MOTION

SCARICO DEGLI ASSI DEI MEZZI TANDEM E TRIDEM



O'Connor, A., Jacob, B., O'Brien, E. & Prat, M. Effects of traffic loads on road bridges - preliminary studies for the recalibration of the traffic load model for Eurocode 1 part 3. in *2nd European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles* (1998).

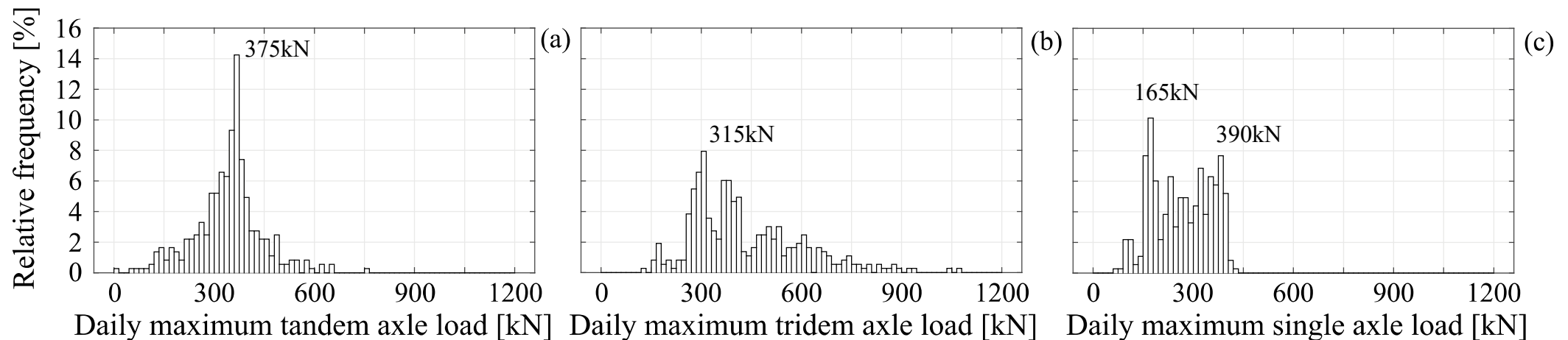
- Corrispondenza con la forma delle distribuzioni di letteratura.
- Differenza per il tempo di registrazione dei dati (settimana vs anno).



WIM – WEIGH IN MOTION

DISTRIBUZIONE DEL MASSIMO GIORNALIERI DEI MEZZI TANDEM , TRIDEM E AD ASSE SINGOLO

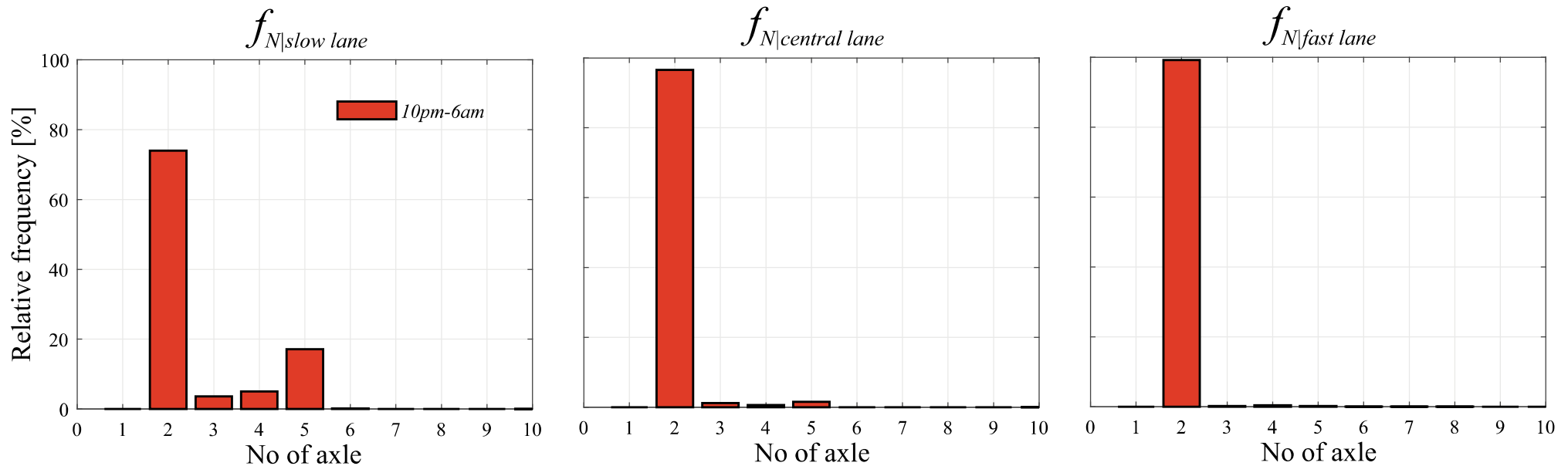
- Le distribuzioni dei massimi scarichi giornalieri fanno riferimento a veicoli **tandem**, **tridem** e ad **assi singoli**.
- La distribuzione del massimo giornaliero dei mezzi tandem presenta **una moda ben definita** intorno a 370kN.
- La distribuzione del massimo giornaliero dei mezzi tridem presenta **una moda** intorno a 300kN.
- La distribuzione del massimo giornaliero dei mezzi ad assi singoli presenta **una moda** intorno a 150kN.
- Le distribuzioni relative ai mezzi tridem e ad assi singoli presentano **un secondo valore modale** intorno a 400kN.
- La distribuzione del massimo giornaliero dei **mezzi tridem** presenta una coda più accentuata rispetto alle altre due.



WIM – WEIGH IN MOTION

DISTRIBUZIONE NUMERO DI ASSI (CLASSE DEL VEICOLO) DATA LA CORSIA DI TRANSITO

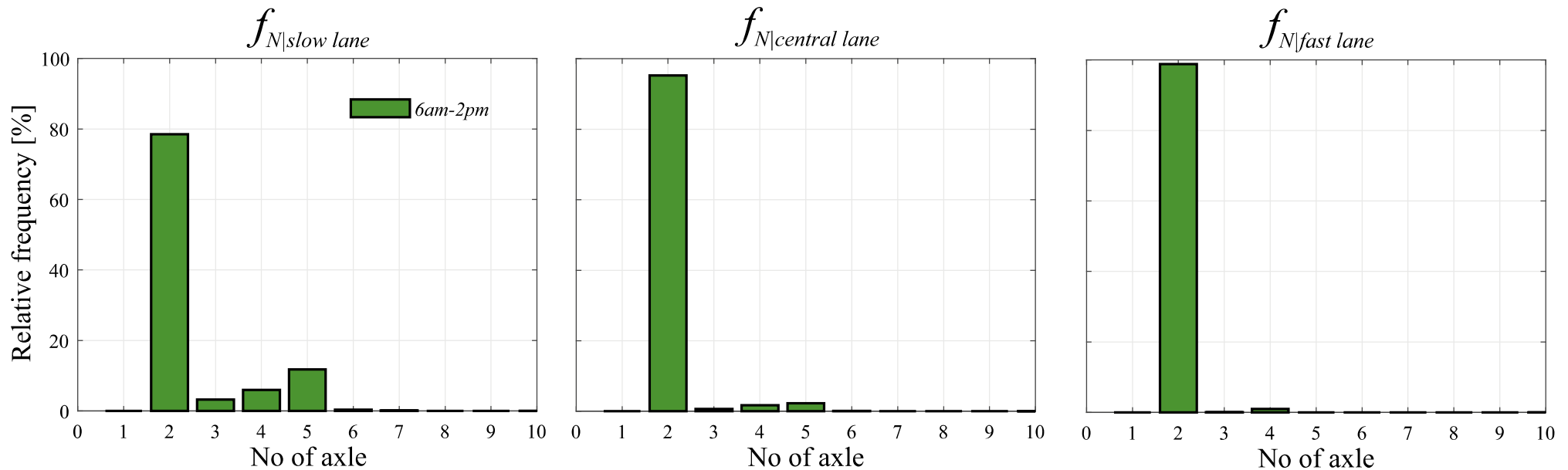
- Le distribuzioni della classe del veicolo condizionata alla corsia di transito e alla **fascia oraria notturna**, presentano una moda per i veicoli a **due assi**, raggiungendo quasi il **100% nella corsia di sorpasso**.
- I veicoli a **cinque assi** presentano una frequenza relativa pari a **circa il 20%** nella **fascia oraria notturna** nella corsia di transito lenta.
- I veicoli con numero di **assi maggiori di cinque** sono sostanzialmente assenti.



WIM – WEIGH IN MOTION

DISTRIBUZIONE NUMERO DI ASSI (CLASSE DEL VEICOLO) DATA LA CORSIA DI TRANSITO

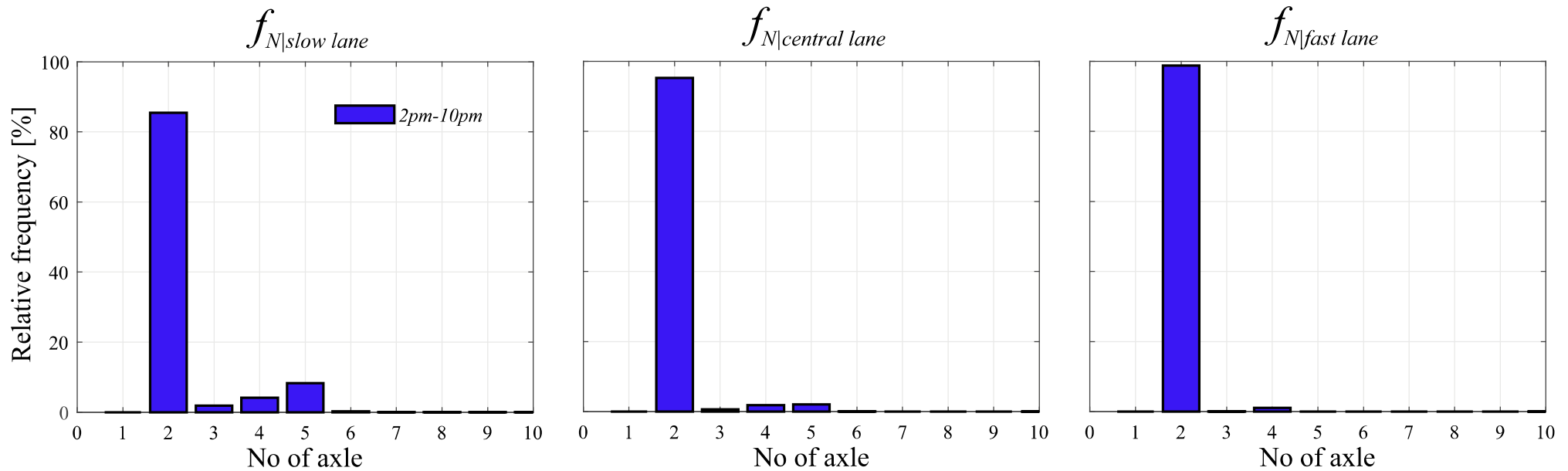
- Le distribuzioni della classe del veicolo condizionata alla corsia di transito e alla **fascia oraria mattutina**, presentano una moda per i veicoli a **due assi**, raggiungendo quasi il **100% nella corsia di sorpasso**.
- I veicoli a **cinque assi** presentano una frequenza relativa pari a **circa il 10%** nella **fascia oraria mattutina** nella corsia di transito lenta.
- I veicoli con numero di **assi maggiori di cinque** sono sostanzialmente assenti.



WIM – WEIGH IN MOTION

DISTRIBUZIONE NUMERO DI ASSI (CLASSE DEL VEICOLO) DATA LA CORSIA DI TRANSITO

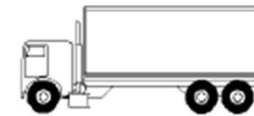
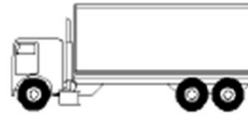
- Le distribuzioni della classe del veicolo condizionata alla corsia di transito e alla **fascia oraria pomeridiana**, presentano una moda per i veicoli a **due assi**, raggiungendo quasi il **100% nella corsia di sorpasso e di marcia**.
- I veicoli a **cinque assi** presentano una frequenza relativa pari a **circa il 10%** nella **fascia oraria pomeridiana** nella corsia di transito lenta.
- I veicoli con numero di **assi maggiori di cinque** sono sostanzialmente assenti.



WIM – WEIGH IN MOTION

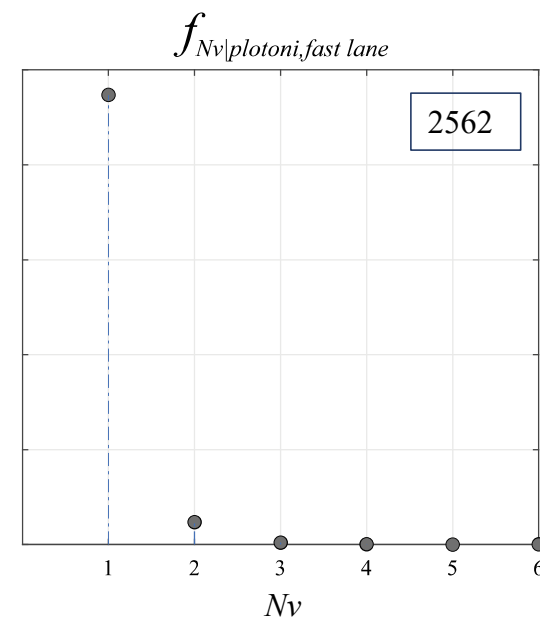
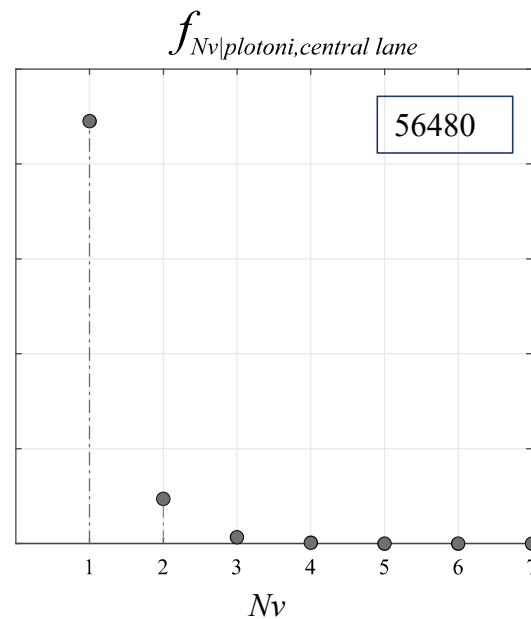
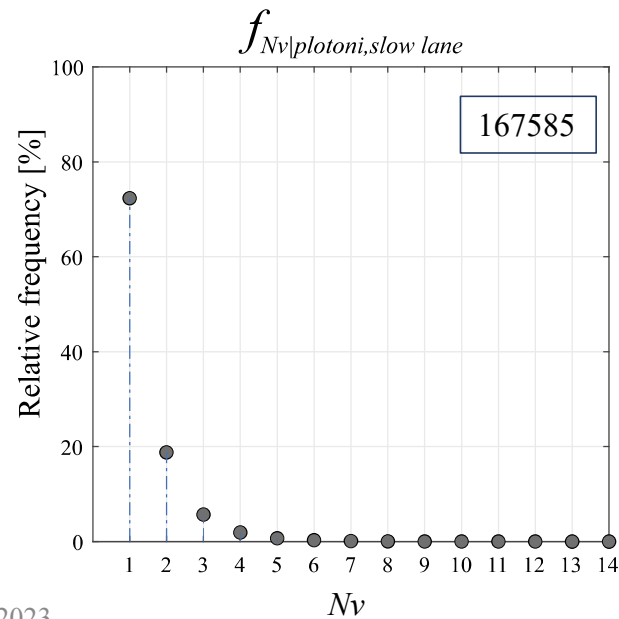
DISTRIBUZIONE NUMERO DEI VEICOLI NEI PLOTONI DI MEZZI

N_v = numero dei veicoli

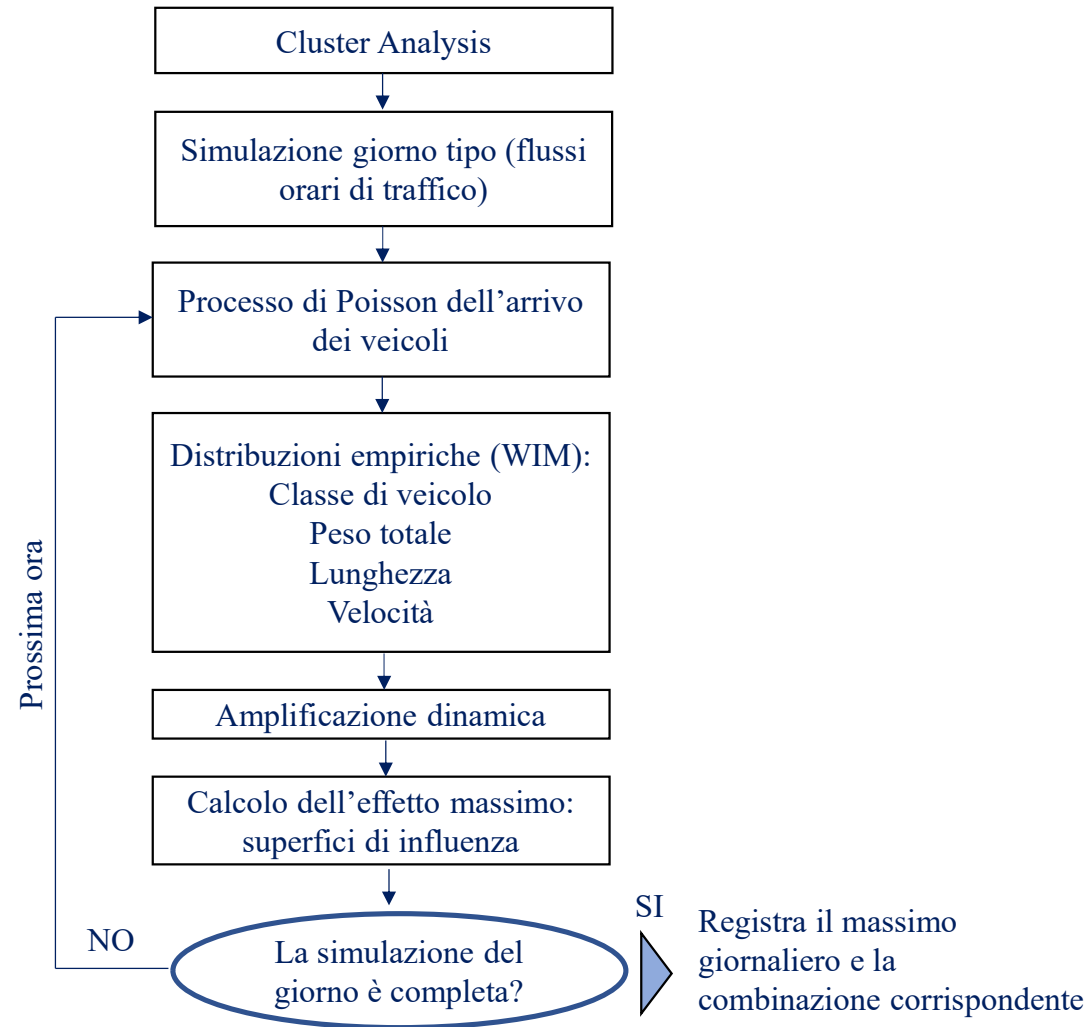


Plotone, $N_v=2$

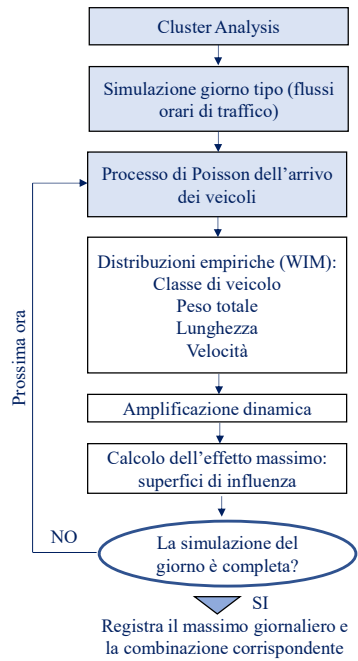
Plotone, $N_v=1$



SIMULAZIONE SEMPLIFICATA DEL TRAFFICO

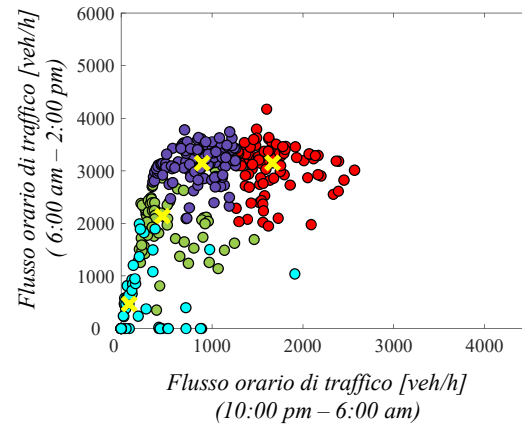


CLUSTER ANALYSIS

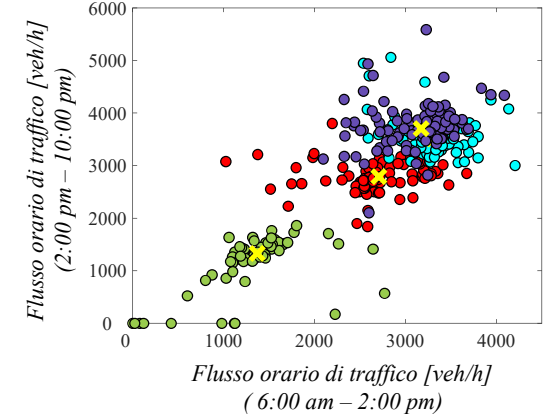
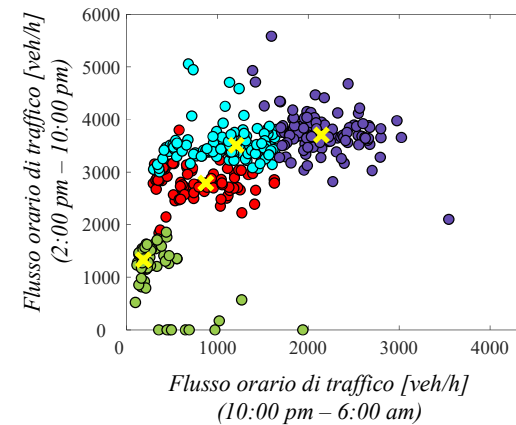
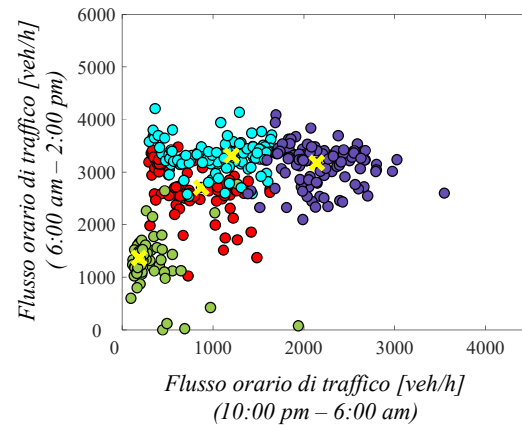
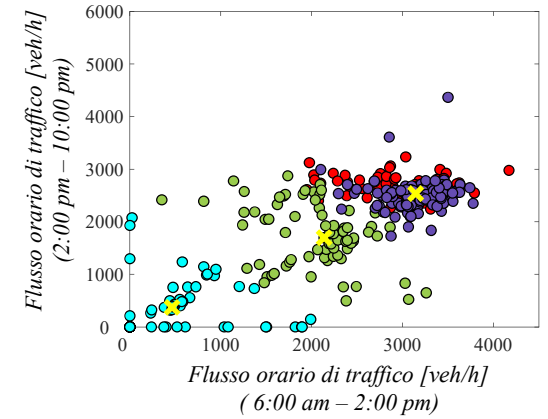
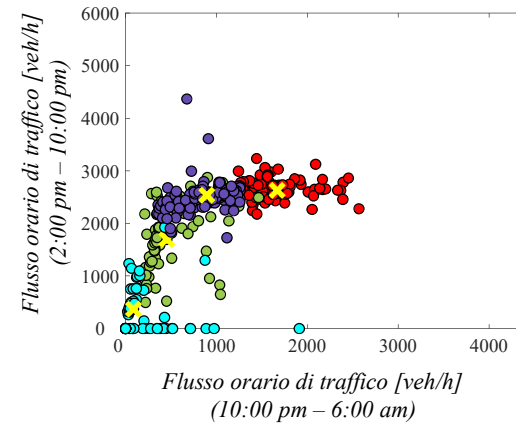


GIORNI TIPO

- Autunno-inverno.
- Feriale primavera-estate
- Festivo primavera-estate.

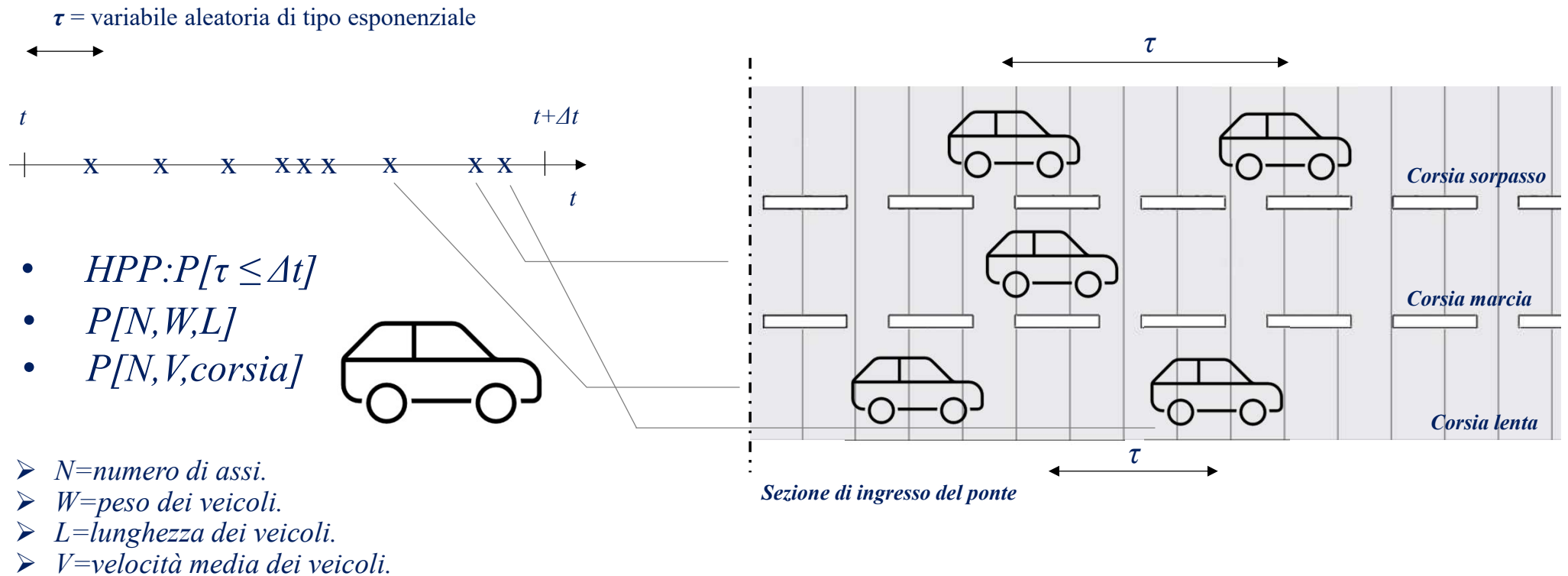


Pesa dinamica in direzione sud (Vietri)

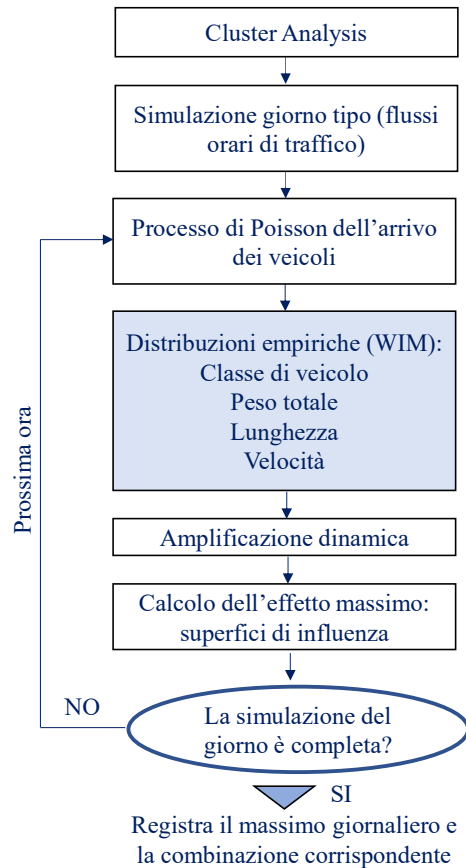


Pesa dinamica in direzione nord (Salerno 1)

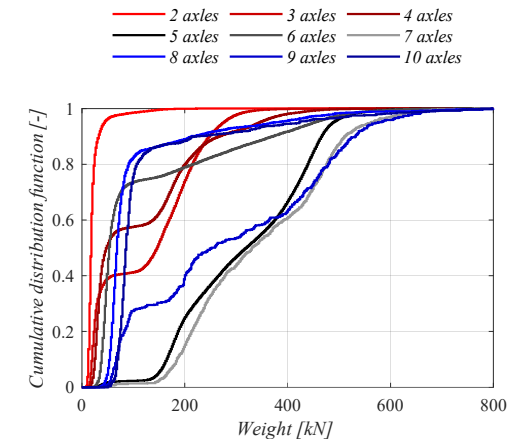
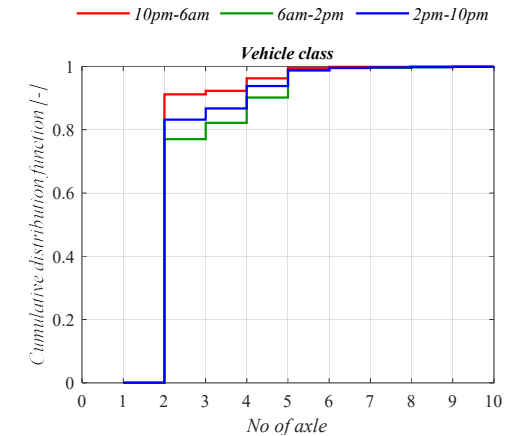
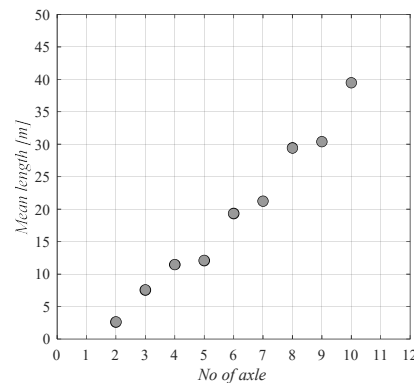
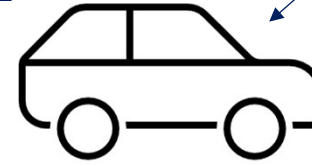
PROCESSO DI POISSON DELL'ARRIVO DEI VEICOLI



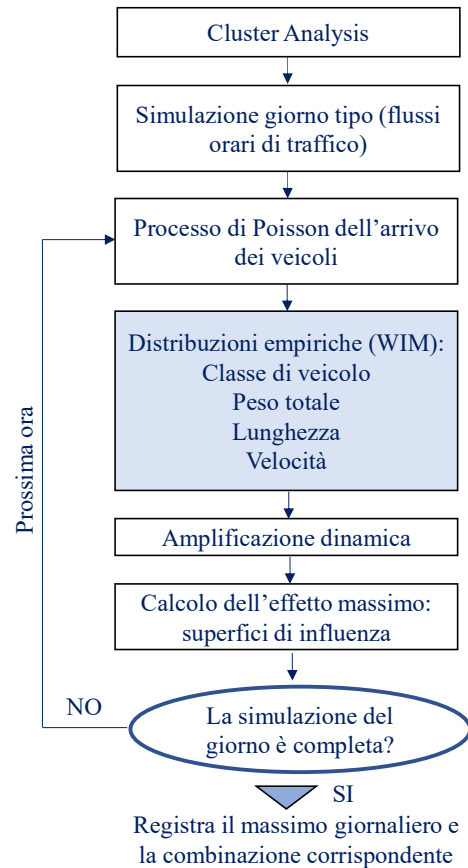
DISTRIBUZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEI VEICOLI



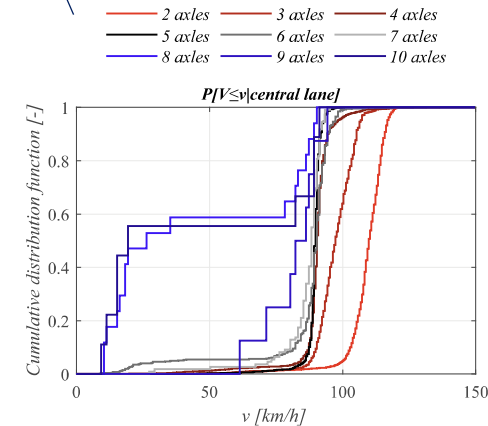
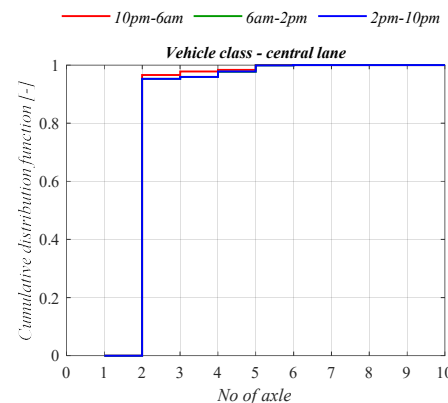
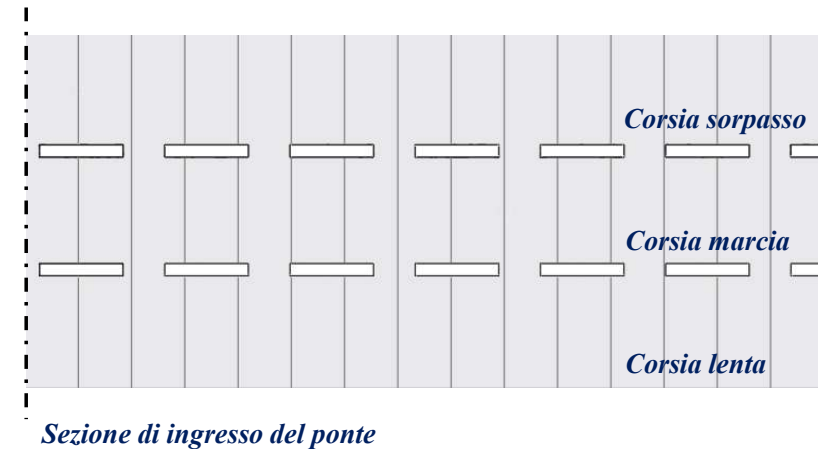
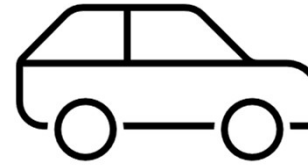
ASSEGNAZIONE DELLE CARATTERISTICHE OTTENUTE DALLE STATISTICHE WIM



DISTRIBUZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEI VEICOLI

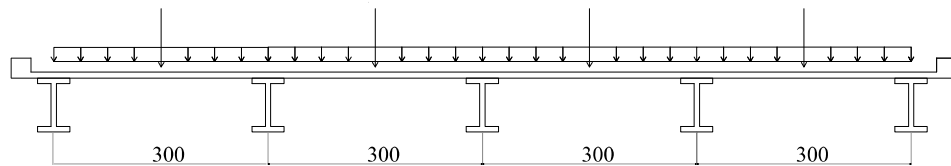


ASSEGNAZIONE DEL VEICOLO
GENERATO ALLA **CORSIA DI
MARCIA**

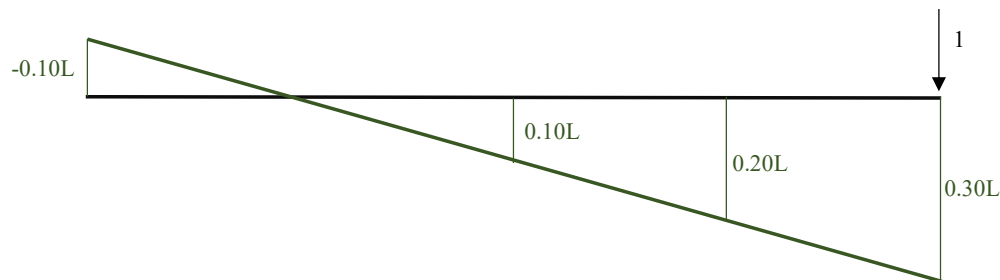


CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI SULLA TRAVE DI BORDO

❑ CARICHI DISPOSTI SULLA SEZIONE DI IMPALCATO



❑ SEZIONE TRASVERSALE DELL'AREA D'INFLUENZA IN MEZZERIA



DALLA SIMULAZIONE SEMPLIFICATA

- Sollecitazione massima flettente e tagliente nelle sezioni critiche, per ogni istante di tempo.
- Distribuzione delle massime sollecitazioni.

CONCLUSIONI

- Si ottiene la distribuzione del massimo annuale degli effetti dovuto al carico da traffico.
- L'accuratezza dei risultati è fortemente dipendente dalla qualità dei dati di input ottenuti dalla sintesi di quanto recepito dal sistema WIM con cui è stimata la domanda.
- I risultati in termini di configurazioni di traffico sono rete specifici.
- I risultati in termini di sollecitazione sono struttura-dipendente.