

2 CARATTERISTICHE ED AZIONI DEL TRAFFICO DA MONITORARE AI FINI DEL PROGETTO E DELLA MANUTENZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Una completa definizione delle caratteristiche ed azioni del traffico da monitorare costituisce una delle condizioni di riferimento necessarie ad un approccio al progetto e alla manutenzione delle pavimentazioni stradali che permetta di effettuare la stima delle prestazioni di una sovrastruttura contenendo l'errore massimo entro valori accettabili sotto prestabiliti livelli di confidenza.

In tale contesto è utile specificare come le informazioni relative ai dati di traffico richiesti sono quasi sempre le stesse indipendentemente dal tipo di pavimentazione (flessibile, rigida, ecc.) o dal tipo di progetto, sia esso una nuova realizzazione o un intervento di manutenzione. Un'eccezione può essere individuata, ad esempio, nella necessità di affiancare ai tradizionali rilievi dei veicoli commerciali quelli degli autoveicoli per la definizione delle curve di decadimento delle caratteristiche superficiali.

È altresì evidente come il dato da rilevare sia invece fortemente connesso con la metodologia di progettazione delle pavimentazioni stradali. In tal senso, le correnti metodologie di progettazione delle pavimentazioni stradali possono essere classificate in quattro categorie: metodi empirici, metodi di regressione basati sulle prestazioni delle pavimentazioni, metodi meccanicistici – empirici, metodi razionali [1].

I *metodi empirici* si basano sull'osservazione del comportamento di pavimentazioni esistenti, cosicché, definendo le caratteristiche di portanza della pavimentazione mediante la caratterizzazione dei materiali come estrapolazione dai materiali di riferimento, è possibile determinare lo spessore degli strati. Lo svantaggio dei metodi empirici è quello di poter essere applicati solo per uno specifico insieme di condizioni ambientali, di carico e di materiali utilizzati. Se queste condizioni cambiano, possono essere utilizzati dei coefficienti di regressione, ma il progetto perde la propria affidabilità ed un nuovo metodo deve essere messo a punto attraverso sperimentazioni da commisurare con nuove condizioni di riferimento.

L'approccio empirico è, in effetti, alla base anche dei cosiddetti *metodi di regressione basati sulla prestazione delle pavimentazioni*, l'esemplificazione più nota dei quali è la metodologia AASHTO Guide [2] formulata partendo dai risultati di test effettuati su strade di caratteristiche note (AASHTO Road Test). Lo svantaggio del metodo è che le equazioni di progetto possono essere applicate soltanto alle condizioni per le quali sono state sperimentate. Per condizioni differenti occorre utilizzare coefficienti di regressione basati sulla teoria e l'esperienza.

Nei metodi fin qui esposti l'incidenza del traffico viene quasi sempre considerata mediante una semplificata ed ampiamente accettata procedura basata sull'utilizzo di fattori di equivalenza che permettono di convertire ogni gruppo di carico in un singolo asse equivalente (ESAL). Successive modifiche alla metodologia AASHTO permettono di tenere in considerazione anche l'incertezza nella stima delle prestazioni di una pavimentazione

incrementando opportunamente il numero stimato di ESAL. Ciò è stato realizzato aggiungendo al logaritmo di stima degli ESAL, il prodotto della deviazione standard normale corrispondente al desiderato livello di affidabilità per l'errore standard nel prevedere il PSI (Present Serviceability Index). Ciò aumenta sensibilmente il numero di ESAL determinati dall'equazione empirica (es. 85% di livello di confidenza ed un errore standard nel predire il PSI di 0,5 incrementa il valore degli ESAL di circa 3 volte) determinando, però, frequenti sovradimensionamenti.

La procedura di progetto dell'AASHTO Guide rappresenta tuttora l'applicazione più diffusa pur presentando diverse limitazioni che relativamente ai dati di traffico possono essere ricondotte principalmente alle variazioni rispetto all'anno dell'esperimento (1961) dell'entità e tipologia del traffico:

- il livello di traffico dei mezzi pesanti è aumentato notevolmente (da 10 a 20 volte) rispetto a quello utilizzato nelle strade di prova: le pavimentazioni dell'esperimento furono progettate per una vita utile di 20 anni ed un traffico di 5-15 milioni di veicoli commerciali, mentre oggi dovrebbero essere progettate [3] per 50-200 milioni di veicoli commerciali ed una vita utile di 30-40 anni.
- le sospensioni dei veicoli, le configurazioni degli assi, i tipi di pneumatici e di pressioni hanno subito grossissime evoluzioni.

L'evoluzione della AASHTO Guide è rappresentata dal progetto NCHRP-1-37A "Guide for mechanistic-empirical design" [3]. La metodologia di calcolo è stata oggetto di notevoli approfondimenti che relativamente ai dati di traffico, permettono di caratterizzare gli input del carico in termini di numero di assi per tipologia e per frequenza di distribuzione del carico (es. spettri degli assi di carico). Ciò permette un approccio di progettazione meccanicistico-empirico, con un incremento dell'affidabilità nella progettazione, della validità di stima dei vari tipi di ammaloramento e della capacità di estrapolare i risultati a partire da quantità limitate di dati rilevati sul campo e in laboratorio.

I *metodi meccanicistici – empirici* (quali ad esempio il metodo della Shell o dell'Asphalt Institute) sono basati sulla correlazione degli input, come i carichi delle ruote, alle risposte della pavimentazione, quali tensioni e deformazioni, a loro volta utilizzati per stimare gli ammaloramenti sulla base di prove di laboratorio e dati prestazionali rilevati sul campo. Il legame con dati sperimentali è imprescindibile per garantire l'affidabilità della metodologia, che è sicuramente più elevata rispetto ai metodi fin qui analizzati. In tal senso l'accresciuto livello di sofisticatezza dei modelli di deterioramento delle pavimentazioni utilizzati nei metodi di progettazione meccanicistici richiede informazioni sul traffico più dettagliate al fine di avvantaggiarsi della loro accresciuta capacità predittiva. Allo stesso tempo, la velocità computazionale, l'immagazzinamento dei dati e l'accesso alle banche dati hanno reso più semplice la raccolta, la gestione e l'utilizzo delle informazioni sul traffico.

I metodi empirici sono basati sulle esperienze già acquisite mediante apposite indagini sul campo e/o in laboratorio dalle quali vengono estrapolate informazioni che costituiscono il cuore del processo di progettazione. Le informazioni ottenibili dalle sperimentazioni sono alla base anche dei metodi meccanicistico-empirici, che con esse verificano, ad esempio, i modelli di prestazione nel tempo delle pavimentazioni. In tal senso i metodi razionali rappresentano un'ulteriore evoluzione dei processi di modellazione posti a supporto della progettazione, ma necessitano anch'essi di dati sperimentali che permettano la validazione delle ipotesi formulate in tali schematizzazioni. È, tuttavia, importante evidenziare che il passaggio dai metodi empirici

a quelli meccanicistico-empirici e quindi a quelli razionali è contrassegnato da una affidabilità della progettazione sempre meno legata all'attinenza con la definizione delle condizioni ambientali, del carico e dei materiali che hanno caratterizzato le sperimentazioni effettuate per formulare tali metodologie.

I *metodi razionali* basano il dimensionamento e i criteri di verifica su modelli matematici che schematizzano opportunamente la pavimentazione e la risposta alle sollecitazioni. Sono solitamente distinti secondo le caratteristiche dell'algoritmo di calcolo in metodi basati sulle equazioni indefinite di equilibrio e metodi agli elementi finiti, dipendendo l'adozione di uno o l'altro dei due algoritmi dal maggiore o minore grado di rispondenza del modello teorico di calcolo della realtà. Le pavimentazioni flessibili e semirigide, per esempio, potendo essere assimilate in genere a schemi indefinitamente estesi in piano si prestano ad essere studiate con le equazioni indefinite di equilibrio, mentre le pavimentazioni rigide, essendo schematizzabili in lastre di dimensioni finite, si calcolano meglio con il metodo agli elementi finiti.

In entrambi i casi vi è la possibilità di una modellazione precisa dei carichi che possono essere supposti verticali o inclinati, distribuiti su una o più aree di forma variabile. In generale, l'utilizzo sempre più diffuso dei metodi di calcolo razionali nasce dalla consapevolezza dei vantaggi che essi offrono rispetto a quelli basati su risultanze sperimentali, legati alla possibilità di previsione della rottura, dell'ormaiamento, alla possibilità di dimensionare le pavimentazioni anche in casi diversi da quelli sperimentati. L'applicazione di tali metodi ha evidenziato che:

- un elevato numero di passaggi di assi di carico leggeri produce un danno trascurabile;
- una significativa percentuale del danno è causata da pochi passaggi di assi di carico molto pesanti (spesso oltre il limite legale)
- lo spessore degli strati indiscutibilmente incide sull'accumulo del danno.

In tale contesto il criterio di dimensionamento adottato per la definizione delle sovrastrutture del Catalogo italiano delle pavimentazioni [4] prevede la verifica a fatica delle pavimentazioni mediante metodi di calcolo razionali oltre all'utilizzazione del metodo dell'AASHTO: l'utilizzo del Catalogo prevede la scelta di una pavimentazione in funzione del modulo resiliente del sottofondo e del livello di traffico in numero complessivo dei veicoli commerciali sulla corsia più caricata.

I metodi empirici, quelli di regressione, il catalogo stesso sono strumenti che presentano evidenti limiti di approssimazione, cosicché possono essere considerate metodologie utili soprattutto nelle prime fasi della progettazione. Tuttavia la semplicità delle procedure di dimensionamento e la possibilità di utilizzare tali metodi anche con informazioni non sempre dettagliate hanno reso tali approcci i più diffusi nella pratica corrente così da creare un gap considerevole con le metodologie progettuali più affidabili (metodi meccanicistici, razionali,...). La non indispensabilità di dati dettagliati per la progettazione seppure preliminare ha reso, nella pratica corrente, sempre più ampia la distanza con i metodi razionali o meccanicistici non imponendo agli enti gestori rilievi di traffico più dettagliati, fondamentali per l'applicazione di tali metodi.

In generale, i dati necessari per il progetto possono essere distinti in quattro ampie categorie: traffico e carico, ambiente, materiali e modelli di rottura. Riferendosi alla caratterizzazione del traffico e del carico i principali elementi sono:

- Dati relativi ai volumi di traffico
 - Volume annuale di traffico

- Fattori di distribuzione per corsia
- Fattori di distribuzione per direzione
- Classi di distribuzione dei veicoli
- Fattori di crescita del traffico
- Velocità media e operativa
- Dati relativi alla configurazione del carico
 - Fattori di distribuzione degli assi di carico
 - Configurazioni base degli assi e delle ruote
 - Caratteristiche del pneumatico
 - Pressione di gonfiaggio del pneumatico
 - Fattore di distribuzione trasversale

Il costo dell'acquisizione dei dati può essere molto elevato per cui la caratterizzazione del traffico veicolare deve comunque essere messa in relazione con il livello di dettaglio necessario per la specifica applicazione, così da determinare una combinazione tra tecnologia di rilievo e frequenza di rilievo, individuando le metodologie di rilievo più adatte.

I criteri suggeriti dalla World Bank [5] per la selezione dei dati da raccogliere ed utilizzare sono:

- *importanza*: ogni dato raccolto deve avere una influenza diretta sull'output, altri dati che potrebbero essere considerati interessanti, o possibilmente utili, nel futuro potrebbero essere omessi in favore di quelli che sono essenziali, pertinenti, o di utilizzo immediato;
- *adeguatezza*: il volume dei dati e la frequenza di aggiornamento degli stessi sono i fattori che determinano maggiormente i costi operativi del sistema di gestione. Il naturale entusiasmo di rilevare e inserire nel database ogni tipo di dato deve essere bilanciato in maniera pragmatica con il costo per la memorizzazione ed il trattamento. La frequenza con cui i dati sono aggiornati è strettamente correlata con il volume dei dati. I dati che non sono aggiornati sono poco utilizzabili soprattutto se il loro valore cambia rapidamente, ecco perché occorre fissare dei limiti tra il rilievo poco frequente di dati raccolti con precisione e la raccolta meno precisa di dati che devono essere aggiornati frequentemente;
- *affidabilità*: i livelli di accuratezza ed affidabilità richiesti dei dati possono variare considerevolmente tra le diverse applicazioni, per esempio l'accuratezza della misura del carico di ogni asse deve essere molto più precisa, se si ha l'obiettivo di multare i trasgressori, di quanto non sia necessario per l'analisi strutturale della pavimentazione;
- *realizzabilità*: l'ampiezza e la qualità di tutti i dati deve essere garantita in termini di risorse finanziarie e di personale disponibile.

La stessa World Bank per determinare le esigenze di informazione più appropriate introduce il concetto di livelli di qualità (IQL – Information Quality Levels), da poter associare a differenti tipologie di applicazioni.

In tal senso, riferendosi anche all'approccio mediante livelli di gerarchizzazione dei dati proposto dal progetto NCHRP-1-37A, a titolo di esempio, possono essere individuati tre IQL, schematizzabili secondo le seguenti linee essenziali:

IQL	Stima del traffico	Breve descrizione	Applicazioni	Dati da rilevare	Esempio
IQL – I	Buona	Livello più dettagliato e comprensivo	(1) Progetto esecutivo (2) Operatività (3) Ricerca (4) Diagnosi	Brevi tratti o campioni isolati con apparecchiature specializzate	1) Dati WIM
IQL – II	Media	Livello basato su valori dettagliati ma per categoria	(1) Progetto di massima (2) Programmazione (3) Pianificazione	Lunghezze limitate o copertura dell'intera rete con strumenti che garantiscono accuratezza più o meno elevata integrando il dato con stime regionali	1) Conteggio del traffico orario per una corsia 2) Statistiche regionali di carichi su asse 3) Fattori di correzione
IQL – III	Scarsa	Livello di minor dettaglio	(1) Statistiche di rete (2) Progetto strade a basso volume (3) Pianificazione e programmazione generale	Dati trattati e/o stimati	1) TGM annuo 2) % veicoli commerciali 3) Statistiche nazionali 4) Fattori di correzione

Tabella 2.1: Livelli di input nella stima del traffico veicolare

Le caratteristiche e le azioni del traffico precedentemente introdotte sono di seguito descritte in funzione del loro ruolo nel progetto, mettendo, inoltre, in evidenza, si ribadisce soltanto a titolo di esempio, le necessità e i livelli di dettaglio della raccolta dati in relazione ai tre livelli di qualità dell'informazione (IQL).

2.1. Dati relativi ai volumi di traffico

L'analisi e la progettazione di interventi sui sistemi di trasporto richiede la stima della domanda attuale e la previsione di quella futura. Tali stime possono essere ottenute utilizzando fonti di informazione e strumenti statistici diversi. Per stimare la domanda attuale è possibile effettuare delle indagini su di un campione di utenti e da queste, utilizzando le tecniche della statistica inferenziale, ottenere delle stime dirette della domanda. In alternativa si può stimare la domanda con dei modelli, opportunamente specificati, calibrati e validati.

Per la stima diretta della domanda e la specificazione e calibrazione dei modelli si possono utilizzare anche dati aggregati; questi sono di solito i flussi misurati su alcuni archi della rete rappresentativa del sistema di offerta in esame e possono integrare altri dati disaggregati ed i relativi metodi di stima.

I metodi di stima che utilizzano i conteggi di traffico negli ultimi anni hanno ricevuto una notevole attenzione considerando il costo e la complessità delle indagini campionarie sulla domanda nonché le inevitabili imprecisioni connesse alla stima dei modelli. D'altro canto i flussi misurati su alcuni archi della rete (conteggi di traffico) costituiscono una fonte di informazione

sulla domanda di trasporto economica e facilmente reperibile, anche in modo automatico. In letteratura esistono numerose tecniche di stima della domanda a partire dai rilievi di traffico [6].

Il dato di partenza per ogni tipologia di analisi è, in genere, il traffico giornaliero riferito alle due direzioni di percorrenza su tutte le corsie di marcia, cosicché al fine di ottenere il traffico iniziale sulla corsia di progetto devono essere introdotti dei fattori moltiplicatori che tengano conto della distribuzione direzionale e per corsia. Il dato di traffico da inserire nella fase di progettazione di una pavimentazione stradale è il traffico medio che si stima transiterà durante la vita utile della stessa, così il traffico iniziale dovrà essere ulteriormente moltiplicato per un fattore di crescita.

Se n_i è il numero totale di ripetizioni di carico che deve essere utilizzato nel progetto per lo i -mo gruppo di carico, si avrà:

$$n_i = (n_0)_i (G)(D)(L)(365)(Y)$$

in cui $(n_0)_i$ è il numero iniziale di ripetizioni per giorno per lo i -mo gruppo di carico, G è il fattore di crescita, D è il fattore di distribuzione direzionale, L è il fattore di distribuzione per corsia, Y è il periodo di progetto negli anni.

L'ipotesi di base nella costruzione dei modelli matematici del sistema dei trasporti è che la domanda di trasporto sia costante per periodi di tempo sufficientemente ampi da consentire al sistema di raggiungere un regime stazionario, durante il quale le caratteristiche rilevanti, quali i flussi di traffico e le condizioni di funzionamento del sistema di offerta, siano costanti almeno in valore medio ed indipendenti dal particolare istante in cui vengono misurati. Per lunghi periodi di analisi, la variazione negli anni dei volumi di traffico può essere simulata mediante modelli di crescita lineare o esponenziale, anche se più in generale esistono numerose procedure di stima delle variazioni di traffico negli anni, basate sulla regressione lineare a variabili multiple, sugli indicatori di crescita economica, sui modelli di domanda [7, 8].

Al di là dei modelli applicati, la tipologia delle informazioni utilizzate (strumentazione utilizzata, periodo di rilievo, stime nazionali, ...) influenza la stima del traffico cui sarà soggetta la pavimentazione durante la sua vita utile e quindi incide fortemente sulla progettazione degli interventi. È stato dimostrato [9, 10] come gli errori di stima della vita utile che possono essere commessi a causa di informazioni più o meno precise e complete (dati più o meno dettagliati) possono variare dall'8% al 50%, determinando previsioni di vita utile della pavimentazione fino a due volte maggiori di quelle effettive, con immaginabili conseguenze nella programmazione degli interventi di manutenzione. Ragionamenti simili sono stati condotti per tutti i tipi di ammaloramento ai quali è soggetta nel tempo la sovrastruttura [11], arrivando ad evidenziare, ad esempio, come nella stima del danno legato alla formazione di ormaie l'errore può essere anche del 200% al decrescere dei livelli di definizione degli input di traffico. In figura 2.1, a titolo di esempio, si riportano le differenti stime di ormaio negli anni che possono essere dedotte partendo da dati sul traffico aventi diverse peculiarità (valori medi di TGM, valori dedotti da correzioni mensili ovvero traffico dettagliato per assi).

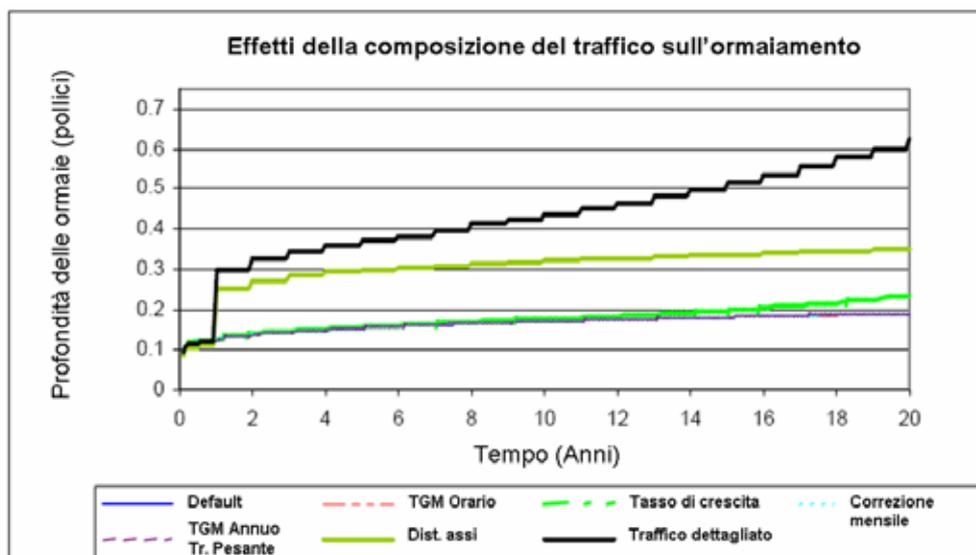


Figura 2.1: Danno (profondità delle ormaie) stimato al variare degli input di traffico [11]

D'altronde nei criteri generali di dimensionamento delle sovrastrutture del catalogo italiano delle pavimentazioni [12], al fine di effettuare i dimensionamenti dei pacchetti, vengono messi in relazione predefiniti livelli di traffico (sei) e la resistenza strutturale di una sovrastruttura (espressa in termini di Structural Number, SN), evidenziando come il passaggio da un livello di traffico a quello immediatamente successivo comporta un incremento di resistenza strutturale compreso tra 8% e 17%.

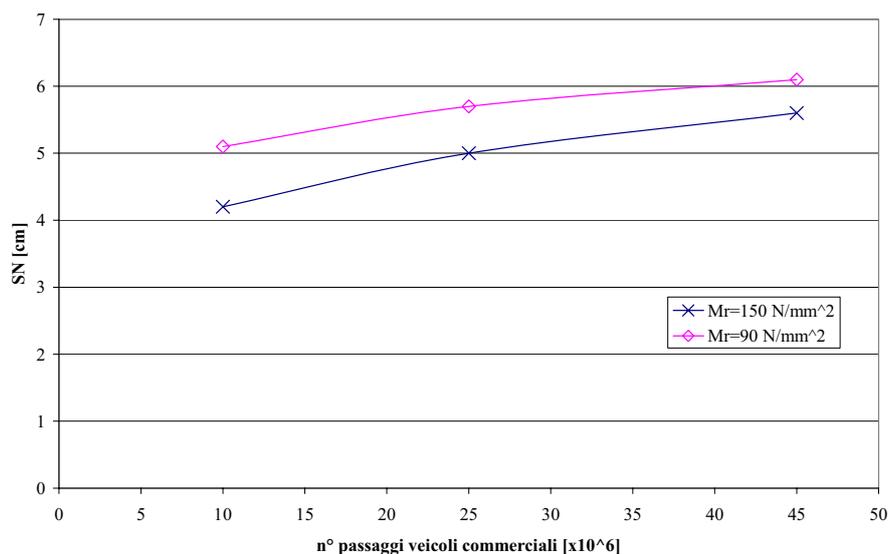


Figura 2.2: Andamento della resistenza strutturale SN delle sovrastrutture per le autostrade extraurbane in funzione del numero di passaggi dei veicoli commerciali [12]

Ulteriori considerazioni devono essere effettuate relativamente all'influenza che la velocità dei veicoli ha sugli effetti prodotti dai carichi di traffico delle sovrastrutture. Essa

interessa tanto per l'incremento di carico dinamico a cui può dar luogo, quanto perché da essa dipende la risposta alle sollecitazioni dei materiali visco-elastici costituenti gli strati, specialmente quelli legati con bitume, i quali subiscono i danni tanto più gravi quanto più bassa è la velocità.

L'effetto della velocità sulla risposta delle pavimentazioni è stato oggetto di numerosi studi, gli autori dei quali arrivano, però, a risultati non sempre uniformi: alcuni [13,14] hanno concluso che all'aumentare della velocità le tensioni indotte crescono, altri [14,15] hanno osservato che le deformazioni o gli spostamenti diminuiscono o che la rigidità della pavimentazione decresce. Alcuni lavori hanno mostrato che le tensioni in pavimentazioni soggette a carichi in movimento, crescono soltanto del 7% da 0 a 100 Km/h, ritenendo quindi non necessario includere l'influenza dell'effetto dinamico indotto dalla velocità nel calcolo della risposta delle pavimentazioni. Di contro, le misure delle deflessioni effettuate durante l'AASHO road test hanno permesso di rilevare che queste si riducono di circa il 40% da 0 a 60 Km/h.

Alcuni risultati possono sembrare non congruenti perché le conclusioni sono intrinsecamente legate ai modelli utilizzati, alla schematizzazione delle proprietà dei materiali, alla più o meno realistica applicazione degli spettri di frequenza caratterizzanti i carichi dinamici dei mezzi pesanti. In generale potrebbe essere affermato che l'aumento della velocità può incrementare significativamente il danno sulla sovrastruttura, anche se alle alte velocità tale danno potrebbe diminuire a causa di una riduzione della risposta deformativa [16].

Di seguito si riporta una sintesi dei principali elementi che caratterizzano il traffico veicolare, fornendo laddove possibile i relativi valori di riferimento.

2.1.1 Volume annuale di traffico

Il volume annuale di traffico è in genere valutato in termini di Traffico Giornaliero Medio Annuo (TGMA), cioè il traffico totale che transita per una sezione della strada durante un periodo di 24 ore. In genere, si ottiene mediante conteggio del traffico in un dato periodo (più di un giorno, meno di un anno), dividendo il traffico totale transitato per il numero di giorni del periodo di rilievo. L'onerosità e l'accuratezza dell'informazione sono fortemente influenzate dal periodo di rilievo che deve essere statisticamente significativo.

Una metodologia utilizzata in Italia, ad esempio, calcola i valori del TGMA in funzione di rilevamenti condotti in determinate sezioni dell'intera rete, durante sedici giorni opportunamente distribuiti durante l'anno in giornate diverse della settimana. I rilievi distinguono una fase diurna, dalle ore 7 alle ore 19, ed una notturna, dalle 19 alle 7.

L'approccio usuale negli Stati Uniti (Traffic Monitoring Guide, FHWA [17]) per la determinazione del TGMA prevede tre differenti, ma complementari, tipologie di conteggi di traffico.

I *conteggi continui* vengono svolti per 365 giorni l'anno su un ridotto numero di sezioni di rilievo. Essi forniscono le informazioni più utili e dettagliate e, generalmente, implicano l'uso di strumenti di conteggio permanenti, da parte di enti e agenzie preposti alla gestione del traffico.

I conteggi stagionali sono usualmente effettuati da 2 a 12 volte l'anno, per periodi temporali variabili da 24 ore a 2 settimane. Il principale scopo dei conteggi stagionali è quello di fornire un legame tra i conteggi di breve durata e i valori di TGMA.

I *conteggi di breve durata* sono effettuati per periodi variabili da 6 ore a 7 giorni, distribuiti all'interno delle aree da monitorare in modo da fornire specifiche informazioni puntuali.

È evidente che la tipologia di conteggio è strettamente connessa con le necessità di utilizzo dell'informazione rilevata. Ogni ente gestore ha la necessità di programmare i propri rilievi in funzione delle risorse a disposizione e delle successive applicazioni.

Volendo continuare a titolo esemplificativo la suddivisione della tipologia di dettaglio della raccolta dati in relazione ai tre livelli di qualità dell'informazione (IQL) potrebbe essere effettuata la seguente classificazione: per IQL-I il valore dovrebbe essere ottenuto dai rilievi effettuati negli ultimi tre anni, alternando conteggi continui, stagionali e di breve durata in modo da ottenere una precisione contenuta al di sotto del $\pm 10\%$ con il 95% di livello di confidenza, per IQL-II possono essere utilizzate stime regionali e modelli di generazione degli spostamenti al fine di valutare la variazione temporale in tre anni del TGMA calcolato in un solo anno con la precisione del 10% ed il livello di confidenza del 95%, per IQL-III potrebbero essere assegnati valori ottenuti su strade localizzate nella stessa area geografica, con la stessa classificazione funzionale e con caratteristiche simili di traffico. Per IQL-I i rilievi potrebbero essere utilizzati per il calcolo del fattore dell'ora di punta e del fattore di variazione mensile.

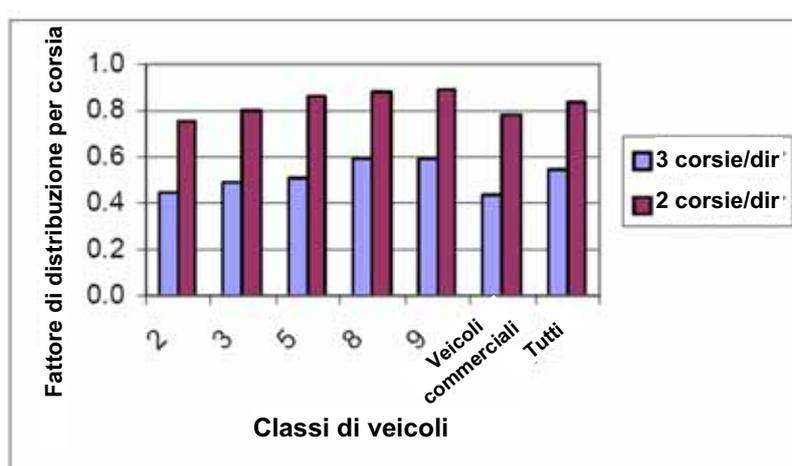
2.1.2 Fattori di distribuzione per corsia

La distribuzione del traffico per corsia è legata al numero di corsie per direzione di marcia che caratterizzano l'infrastruttura. Per strade con una sola corsia per direzione questo fattore è ovviamente pari all'unità, altrimenti dipende dal traffico giornaliero medio annuo (TGMA), dalla percentuale di veicoli commerciali, dalla geometria. A titolo di esempio si riporta quanto osservato da alcuni studi empirici [18]: per una strada a quattro corsie con due corsie per direzione di marcia i fattori di distribuzione variano dal 66% (TGM = 60000 veicoli) al 94% (TGM = 2000 veicoli) al decrescere del traffico. Per una strada con tre o più corsie in ogni direzione le percentuali variano dal 49% (TGM = 100000 veicoli) al 82% (TGM = 2000 veicoli). La normativa americana [2] fornisce come riferimento i seguenti fattori di distribuzione del traffico in una direzione di marcia:

n° di corsie	% veicoli commerciali nella corsia di progetto
1	100
2	80-100
3	60-80
4	80-75

Tabella 2.2 – Fattori di distribuzione per corsia

In effetti ogni classe di veicoli sarà caratterizzata da un fattore di distribuzione del traffico per corsia (vedi esempio in fig. 2.3) che varia ulteriormente al variare del numero di corsie per senso di marcia, quindi il dato può essere anche molto disaggregato.

**Figura 2.3: Distribuzione di differenti classi di traffico per corsia [3]**

In base a quanto precedentemente evidenziato è possibile affermare che per IQL-I dovrebbero essere utilizzati i dati provenienti da rilievi effettuati sulla specifica sezione distinti per classe di veicoli; per IQL-II potrebbero essere utilizzati valori, anche mediati, provenienti da rilievi effettuati in strade localizzate nelle vicinanze e caratterizzate da simili condizioni di traffico; per IQL-III potrebbero essere utilizzati valori stimati empiricamente.

2.1.3 Fattori di distribuzione per direzione

Quando il Traffico Giornaliero Medio Annuo è riferito al traffico complessivo nelle due direzioni (condizioni usuale nelle strade a carreggiata unica) occorre definire un fattore di distribuzione di tale traffico per direzione. Usualmente tale fattore viene assunto pari a 0,5 (50% in ogni direzione), restando inteso che condizioni specifiche sono da riferirsi alla peculiare funzione dell'infrastruttura nella rete stradale. In termini di IQL valgono le considerazioni effettuate nel precedente paragrafo.

2.1.4 Classi di distribuzione dei veicoli

La classificazione dei veicoli è in genere effettuata in funzione del numero di assi e del peso per asse. La procedura di classificazione più utilizzata è standardizzata dalla norma ASTM E1572-93 [19] per la classificazione dei veicoli partendo dal numero e dalla interdistanza degli assi.

Riferendosi ai veicoli commerciali (massa complessiva, corrispondente al peso totale a terra, maggiore o uguale a 3 t) il catalogo italiano delle pavimentazioni stradali adotta la

seguente classificazione (fig. 2.4), associando ad essa opportuni spettri di traffico per tipologia di strada.

Tipo di veicolo	N° Assi	Distribuzione dei carichi per asse in KN			
1) autocarri leggeri	2	↓10	↓20		
2) " "	"	↓15	↓30		
3) autocarri medi e pesanti	"	↓40	↓80		
4) " " "	"	↓50	↓110		
5) autocarri pesanti	3	↓40	↓80	↓80	
6) " "	"	↓60	↓100	↓100	
7) autotreni e autoarticolati	4	↓40	↓90	↓80	↓80
8) " "	"	↓60	↓100	↓100	↓100
9) " "	5	↓40	↓80	↓80	↓80
10) " "	"	↓60	↓90	↓90	↓100
11) " "	"	↓40	↓100	↓80	↓80
12) " "	"	↓60	↓110	↓90	↓90
13) mezzi d'opera	"	↓50	↓120	↓130	↓130
14) autobus	2	↓40	↓80		
15) " "	2	↓60	↓100		
16) " "	2	↓50	↓80		

Figura 2.4: Distribuzione dei carichi per asse

Per IQL-I dovrebbero essere utilizzati i dati provenienti dai rilievi appositamente effettuati, per IQL-II potrebbero anche essere utilizzati valori mediati, provenienti da rilievi effettuati in strade localizzate nelle vicinanze e caratterizzate da simili condizioni di traffico ovvero da stime regionali; per IQL-III potrebbero essere utilizzati valori di riferimento su scala nazionale come ad esempio gli spettri di traffico forniti dal catalogo delle pavimentazioni.

2.1.5 Fattori di crescita del traffico

La variazione nel tempo del traffico in un tronco stradale è determinata in maniera ottimale soltanto se sono disponibili conteggi continui di traffico, assumendo che il dato rilevato sia affidabile e che le differenze trovate di anno in anno possano essere attribuite soltanto ad un effettiva variazione: ciò può essere affermato con quanta più sicurezza tanto più è esteso il campione temporale di riferimento. Mediante i conteggi di breve durata si ottengono stime meno affidabili.

Sia per conteggi in continuo che per quelli di breve durata l'affidabilità della stima del fattore di crescita è legata al numero di anni per i quali si dispongono i conteggi. Occorre, inoltre, evidenziare che non esiste una sola procedura che meglio si adatta a definire una funzione di crescita del traffico. Piuttosto che concentrarsi su una specifica procedura (conteggi di breve durata piuttosto che continui o conteggi in sezioni specifiche piuttosto che dati regionali), si ritiene, quindi, più utile cercare di utilizzare quante più informazioni possibili (anche se non provenienti da unica fonte) così da arrivare a differenti fattori di crescita da cui derivare il più appropriato. Scendendo nel livello di qualità dell'informazione ci si affiderà sempre più a stime su scala regionale (IQL-2) o nazionale (IQL-3).

2.1.6 Velocità media e operativa

La velocità con cui si effettuano gli spostamenti dipende da moltissimi fattori, quali la tipologia della strada, l'andamento plano-altimetrico del tracciato, la percentuale dei veicoli commerciali nella corrente di traffico, le condizioni ambientali, il paesaggio circostante.

La complessità del sistema è tale per cui le velocità risultano disperse in maniera casuale e non è possibile definire dei criteri generali ed assoluti se non riferendosi a singoli aspetti preponderanti.

Nella progettazione stradale il concetto di velocità assume diversi significati in relazione alle finalità che si intendono raggiungere. Si è già detto che la velocità di percorrenza di un carico, ovvero la frequenza di applicazione dello stesso, incide sulle prestazioni della pavimentazione. In particolare si ritiene rilevante ai fini del progetto e della manutenzione delle pavimentazioni la valutazione della velocità media e della velocità operativa.

Entrambe le velocità si ricavano da misure di velocità istantanea. Una descrizione dettagliata della metodologia per determinarle è riportata nel Highway Capacity Manual [20] o nel Green Book [21].

In termini di dato da rilevare, come esempio, è possibile affermare che per IQL-I dovrebbero essere utilizzati i dati distinti per classe di veicoli; per IQL-II potrebbero anche essere utilizzati valori mediati, provenienti da rilievi effettuati in strade localizzate nelle vicinanze e caratterizzate da simili condizioni di traffico; per IQL-III potrebbero essere utilizzati valori medi su scala nazionale ovvero i limiti di velocità imposti per le singole infrastrutture.

2.2. Dati relativi alla configurazione del carico

La modellazione del comportamento delle sovrastrutture stradali è fortemente condizionata dalle ipotesi ad essa associate connesse alla schematizzazione dei carichi trasmessi dai veicoli.

I carichi applicati alla sovrastruttura sono, infatti, molto diversi per entità e modo di applicazione. Gli assi di un veicolo possono essere distanti tra loro di una lunghezza tale che non si verifichi mai la sovrapposizione delle rispettive deformate (assi singoli), ovvero essere caratterizzati da un'interdistanza più elevata (assi tandem, tridem, ecc.) tale da determinare una deformazione di trazione inferiore a quella dovuta all'asse singolo. Le ruote che compongono ogni asse possono poi essere singole o gemellate ingenerando differenti comportamenti sulla sovrastruttura.

Gli attuali strumenti di calcolo consentono di conoscere lo stato tensionale e di deformazione prodotto, in qualsiasi punto di ciascun strato della pavimentazione, dal passaggio di qualsiasi tipologia di asse. È così più semplice da applicare una configurazione del carico che sia più vicina alla realtà, superando l'approccio empirico dell'asse singolo equivalente (80 kN).

Convenzionalmente, nel calcolo razionale delle sovrastrutture, il carico trasmesso da una ruota viene rappresentato attraverso una distribuzione di tipo cilindrico, ipotizzando un area di

carico di tipo circolare ed una tensione verticale costante. Il valore di tale tensione è posto pari alla pressione di gonfiaggio delle ruote, che può raggiungere nei casi più severi anche 7-8 daN/cm², assumendo che la rigidità della carcassa del pneumatico sia ininfluente ai fini della distribuzione delle pressioni di contatto. Nel caso di ruota gemellata si possono considerare, ai fini operativi, due distinte aree di contatto ma più frequentemente si fa riferimento ad un'unica area circolare di tipo fittizio ricavata dividendo il carico verticale totale, computato cioè complessivamente sull'insieme delle ruote gemellate, per la stessa pressione di gonfiaggio. Il problema pertanto si riduce nell'individuare, in funzione dello specifico carico verticale trasmesso dalla ruota, la corrispondente pressione di gonfiaggio in base alle prescrizioni della casa costruttrice dei pneumatici. Occorre inoltre osservare che di solito non viene ipotizzata alcuna componente di tipo tangenziale.

Nella realtà il sistema di forze scambiato tra pneumatico e pavimentazione è assai complesso potendosi individuare numerose e sostanziali differenze rispetto alla schematizzazione precedentemente descritta in relazione alle seguenti considerazioni:

- l'area di impronta non è circolare ma assume una forma pseudo-ellittica per i pneumatici convenzionali o pseudo-rettangolare per i pneumatici di tipo radiale;
- la reale area di impronta non è computabile attraverso il rapporto tra il carico verticale e la pressione di gonfiaggio, in quanto interviene anche la rigidità della carcassa responsabile di una redistribuzione delle pressioni stesse; per effetto di questo fattore l'area di impronta reale è di solito minore di quella stimata con l'approccio precedentemente esposto. Semplificando il problema, si può affermare che l'ampiezza di tale area dipende dalla pressione di contatto che è più grande della pressione di gonfiaggio per pneumatici a bassa pressione (per l'equilibrio alle forze verticali la pressione di contatto è pari alla somma della pressione del pneumatico e della pressione cui sono soggette le pareti della carcassa), mentre il rapporto è inverso per pneumatici ad alta pressione, essendo in questo caso le pareti del pneumatico in tensione (figura 2.5).

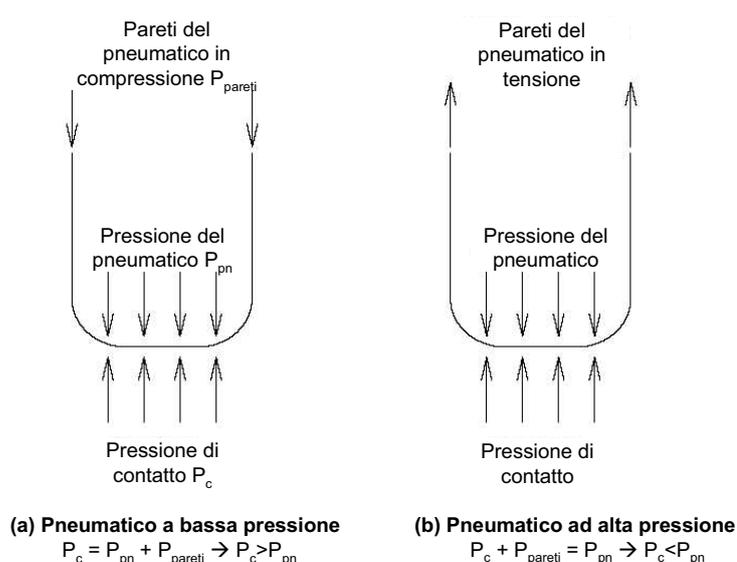


Figura 2.5: Legame tra la pressione di gonfiaggio e quella di contatto [22]

- per la presenza delle scolpiture del battistrada in corrispondenza delle quali avviene il contatto, l'area di impronta è in realtà riconducibile ad un insieme di areole discrete; pertanto, a parità di carico verticale e di dimensioni della superficie in cui si inscrive l'area di impronta stessa, le tensioni verticali esercitate in corrispondenza delle scolpiture sono evidentemente maggiori di quelle medie calcolate su tutta la superficie;
- la distribuzione delle tensioni verticali di contatto non è uniforme; in particolare in corrispondenza delle pareti/bordi del pneumatico assume valori maggiori mentre in corrispondenza della zona centrale dell'area di contatto assume valori minori (figura 2.6); inoltre la forma di distribuzione risulta fortemente dipendente dalla pressione di gonfiaggio in relazione al carico verticale trasmesso dalla ruota; in particolare, a parità di carico verticale, una diminuzione della pressione di gonfiaggio esaspera l'effetto di bordo incrementando le tensioni verticali in corrispondenza delle pareti, mentre un aumento della pressione di gonfiaggio riduce l'effetto di bordo incrementando le pressioni nella zona centrale dell'area di impronta;

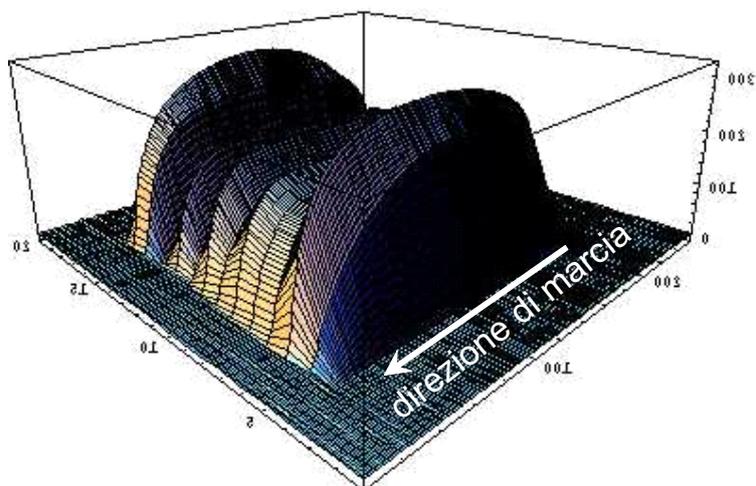


Figura 2.6: Esempio di distribuzione delle pressioni di contatto [23].

- anche la distribuzione delle tensioni tangenziali (longitudinali se esercitate nella direzione del moto e trasversali se ortogonali a questa) non è uniforme e dipende principalmente dalle condizioni di moto del pneumatico; quando il pneumatico è fermo, in corrispondenza dell'area di contatto in virtù dell'effetto Poisson tenderebbe a dilatarsi nella direzione radiale; ne viene impedito dalla reazione della superficie della strada e pertanto risulta sottoposto ad un campo di tensioni tangenziali dirette radicalmente dal bordo esterno verso il centro; quando il pneumatico è in movimento a questo campo si sovrappone quello indotto dagli scorrimenti che si manifestano all'interfaccia pneumatico-pavimentazione che mobilitano la forza di aderenza longitudinale (figura 2.7); in curva, si aggiunge un ulteriore campo di tensioni dirette in senso ortogonale al piano di rotolamento indotte per effetto degli scorrimenti che si accompagnano alla deriva del pneumatico e che mobilitano la forza di aderenza trasversale.

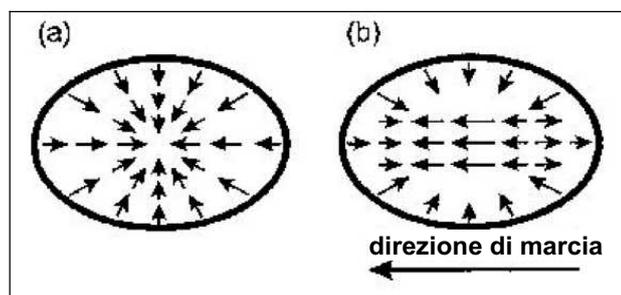


Figura 2.7: Distribuzione delle tensioni tangenziali di contatto per un pneumatico fermo (a) ed uno in movimento – ruota motrice (b)

Accanto a tali considerazioni, ha contribuito a rinnovare l'interesse dalla comunità scientifica su questo aspetto anche il recente ingresso sul mercato di una nuova serie di pneumatici per veicoli industriali progettati per sostituire il tradizionale sistema di ruote gemellate e caratterizzati da una fascia battistrada più larga (*wide-base*) (vedi figura 2.8) per i quali non esistevano indicazioni sull'aggressività nei confronti delle sovrastrutture [24].



Figura 2.8: Esempi di pneumatici con battistrada largo (wide base).

Pertanto, numerosi ricercatori hanno incominciato a studiare gli effetti sul comportamento delle pavimentazioni dovuti ad una più realistica distribuzione dei carichi, in relazione alle seguenti tipologie di degrado:

- fessurazione per fatica [25-27];
- ormaiamento [25-27];
- degradazioni superficiali quali lucidatura (polishing) o perdita di inerti (ravelling) [28];

- instabilità superficiale della miscela¹ [29-30];
- fessurazione superficiale [29-30].

Partendo da tali riflessioni, di seguito si riporta una sintesi dei principali elementi che caratterizzano il carico veicolare, fornendo laddove possibile i relativi valori di riferimento.

2.2.1 Fattori di distribuzione degli assi di carico

Rappresentano la percentuale di applicazioni totali degli assi di carico, per ogni intervallo di carico, per ogni specifico tipo di asse (singolo, tandem, tridem, quad) e per ogni classe di veicolo. La distribuzione normalizzata degli assi di carico può essere determinata esclusivamente con strumentazioni WIM [31], presupponendo un elevato grado di conoscenza della tipologia di veicoli transitanti (IQL-I). La distribuzione dei carichi per ogni tipologia di asse varia notevolmente al variare della tipologia di veicoli commerciali considerati portando ad errori nel calcolo della vita utile che possono essere anche macroscopici (stime anche tre volte differenti del comportamento effettivo della pavimentazione).

Come già detto, invece di analizzare le tensioni e deformazioni dovute ad ogni asse di carico, una semplificata ed ampiamente accettata procedura è quella di utilizzare fattori di equivalenza e convertire ogni gruppo di carico in un singolo asse equivalente. Occorrerebbe comunque notare come l'equivalenza tra due diversi carichi dipende anche dal modello di rottura utilizzato, per cui fattori di equivalenza basati sulla fessurazione a fatica sono differenti da quelli basati sulle deformazioni permanenti. Le tecnologie informatiche permettono ormai senza problemi di considerare nei calcoli il numero di ripetizioni di carico per ogni asse e valutare il danno da esso prodotto.

2.2.2 Configurazioni base degli assi e delle ruote

Alcune informazioni sono necessarie per descrivere le tipiche configurazioni delle ruote e degli assi di carico in quanto la risposta della pavimentazione è connessa sia alla posizione delle singole ruote che alla loro interazione. Un incremento di carico determina, infatti, un aumento delle tensioni e deformazioni sulla pavimentazione, crescita che può essere contrastata incrementando l'area di carico con un aumento dell'impronta del pneumatico o utilizzando ruote multiple.

Le grandezze che permettono una configurazione funzionale del carico sono:

- ampiezza media dell'asse, cioè la distanza tra le estremità di un asse;

¹ Si intende, con questa dizione, il fenomeno di ornaimento osservato in diversi siti, a cui si accompagna un sensibile rifluimento laterale della miscela confinato al solo strato superficiale, [29-30].

- interdistanza di un tandem, cioè la distanza tra i centri delle due ruote che compongono il tandem;
- distanza degli assi, cioè la distanza tra due assi consecutivi di un tandem, tridem, quad.
- passo del veicolo, distinguibile in corto, medio e lungo.

È evidente che anche queste informazioni possano essere ottenute con l'adeguato dettaglio soltanto mediante rilievi con le strumentazioni più sofisticate (IQL-I), potendo, altresì, utilizzare dati aggregati (IQL-II) e di riferimento (IQL-III).

Per un generico veicolo commerciale, tipici valori per tali grandezze potrebbero essere 260 cm come ampiezza dell'asse, 30 cm come interdistanza di due ruote gemellate, 130 cm come distanza tra due assi tandem, 125 cm come distanza tra due assi tridem o quad.

2.2.3 Caratteristiche e pressione di gonfiaggio del pneumatico

Come è stato ampiamente trattato nell'introduzione al paragrafo, le dimensioni del pneumatico incidono sulle tensioni applicate sulla pavimentazione e quindi influenzano i modelli di stima delle prestazioni delle stesse.

In tal senso, la tabella seguente mostra come esempio usuali larghezze della sezione per pneumatici nuovi e larghezze totali per pneumatici che hanno raggiunto la loro massima crescita nelle dimensioni per via dell'utilizzo. Queste distanze servono, ad esempio, per determinare la distanza minima tra due pneumatici nelle applicazioni tandem.

Tipo	Minima distanza in tandem [cm]	Larghezza del pneumatico [cm]	
		Sezione (nuovo)	Intero (max.)
295/75R22.5	34,3	29,7	31,8
11R22.5	31,8	27,9	30,5
11R24.5	31,8	27,9	30,5
285/75R24.5	31,8	28,2	29,7
225/70R19.5	25,4	22,6	24,1
255/70R22.5	29,2	25,4	26,7

Tabella 2.3: Larghezza e minima distanza in tandem per alcuni pneumatici [32]

È stato, inoltre, evidenziato che all'aumentare della pressione di gonfiaggio del pneumatico diminuisce l'area di contatto, ovvero ipotizzando un carico costante sul pneumatico, l'effetto dell'incremento di pressione determina tensioni più elevate dovute alla riduzione dell'area di contatto. Si è già visto come l'ampiezza di tale area dipende dalla pressione di contatto, che è più grande della pressione del pneumatico per pneumatici a bassa pressione, mentre il rapporto è inverso per pneumatici ad alta pressione. In genere comunque nel progetto delle pavimentazioni la pressione di contatto è assunta uguale a quella del pneumatico. Poiché assi di carico più pesanti hanno una più elevata pressione dei pneumatici ed effetti più dannosi

sulle pavimentazioni, l'utilizzo della pressione del pneumatico come pressione di contatto è a vantaggio di sicurezza.

In tabella vengono riportati i valori massimi ammissibili per i carichi e le pressioni di gonfiaggio a freddo (quelle a caldo hanno valori tipicamente più elevati di circa il 10-15%) per alcuni pneumatici.

Tipo	Pressione di gonfiaggio [kg/cm ²]	Carico massimo [kg]
295/75R22.5	7,6	2815
11R22.5	7,2	2815
11R24.5	7,2	2996
285/75R24.5	7,6	2815
225/70R19.5	6,6	1634
255/70R22.5	8,3	2497

Tabella 2.4: Massimi Carichi e pressioni di gonfiaggio a freddo per differenti pneumatici [32]

2.2.4 Fattori di distribuzione trasversale

Rappresenta la dispersione delle traiettorie dei veicoli ovvero la deviazione standard degli spostamenti trasversali del traffico. È utilizzata per determinare il numero di applicazioni di assi di carico su un punto.

Per applicazioni meno dettagliate questa informazione potrebbe essere non necessaria ovvero potrebbe essere utilizzato un valore di riferimento pari ad una deviazione standard di 25 cm.