

Regione Veneto – Provincia di Verona

COMUNE DI VERONA

**OPERE DI URBANIZZAZIONE PRIMARIE (STRADE E
SOTTOSERVIZI) RELATIVE AL PERMESSO DI COSTRUIRE
CONVENZIONATO AI SENSI ART. 28-BIS DPR 380/2001 DI
VARIANTE ESSENZIALE ALLA SCIA N.06.03/006165/2020
RELATIVA ALLA REALIZZAZIONE DI UN POLO LOGISTICO
IN VIA STRADA DELLE TRINCEE**

**VERIFICA DI AMMISSIBILITA' DELLA
SOVRASTRUTTURA STRADALE**

MOBILITER SRL

Ing. Michele D'Alessandro

Milano, 19 luglio 2022



COMMITTENTE: **KRYALOS SGR SPA**

MOBILITER

MOBILITA' INFRASTRUTTURE TERRITORIO

MOBILITER SRL
VIA RIPAMONTI 2
20136 MILANO

INFO@MOBILITER.IT
TEL. 02.83471987
FAX 02.39293158
CF/P.IVA 04417630961

SOMMARIO

CONTENUTI E METODOLOGIA DI VERIFICA	3
1. TRATTI STRADALI.....	5
1.1 STRADA DELLE TRINCEE	5
1.1.1 Traffico commerciale pesante previsto	5
1.1.2 Portanza del sottofondo	6
1.1.2.1 Modulo resiliente	7
1.1.2.2 Modulo di deformazione	8
1.2 STRADA DELLA FERRIERA	10
1.2.1 Traffico commerciale previsto.....	10
1.2.2 Portanza del sottofondo	11
1.3 VIA GELMETTO	12
1.3.1 Traffico commerciale previsto.....	12
1.3.2 Portanza del sottofondo	13
1.4 VIA BIASI.....	14
1.4.1 Traffico commerciale previsto.....	14
1.4.2 Portanza del sottofondo	15
2. METODO EMPIRICO DELL'ASSHTO	16
2.1 CALCOLO DELLO "STRUCTURAL NUMBER" (SN)	17
2.2 CALCOLO DEL TRAFFICO IN ASSI STANDARD EQUIVALENTI (N8,2 Ton).....	20
2.3 CALCOLO DEL TRAFFICO SOPPORTABILE (W8,2)	23
2.3.1 Determinazione della Reliability "R"	23
2.3.2 Determinazione dell'Indice di Servizio "PSI"	24
2.4 VERIFICA	26

CONTENUTI E METODOLOGIA DI VERIFICA

Nella presente relazione si riporta la verifica della nuova sovrastruttura stradale (fondazione + pacchetto conglomerato bituminoso) che si prevede di realizzare all'interno del progetto delle opere viabilistiche connesse alla realizzazione degli interventi edilizi nelle aree delle ex fonderie di Verona.

PAVIMENTAZIONE STRADALE

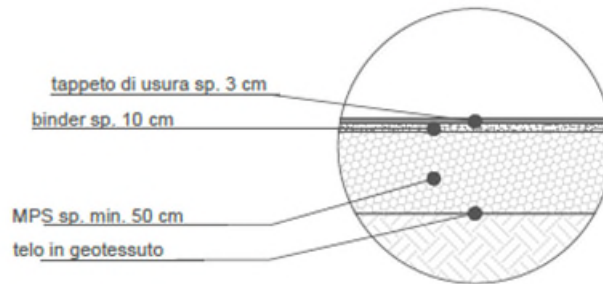


Figura 1 – Sovrastruttura stradale oggetto di verifica – stratigrafia e composizione

La sovrastruttura stradale in esame sarà impiegata lungo gli assi viari dove è previsto un allargamento della carreggiata; tali assi sono:

- STRADA DELLE TRINCEE, tratto Nord e tratto Sud
- STRADA DELLA FERRIERA
- VIA GELMETTO, tratto Est e tratto Ovest
- VIA BIASI

Tra gli elementi necessari da considerare nelle verifiche in oggetto, con particolare riguardo ai riscontri di portanza della pavimentazione stradale, vi è la consistenza dei transiti veicolari in gioco.

Sulla base dei dati di traffico disponibili sono stati stimati i flussi di traffico giornaliero, totali e commerciali pesanti, necessari ai fini delle correnti verifiche, come riepilogato nella seguente tabella.

strada	TGM feriale TOTALE	% COMMERCIALI
VIA GELMETTO OVEST	8.093	2,9%
VIA GELMETTO EST	5.092	0,5%
STRADA DELLE TRINCEE SUD	1.734	10,3%
STRADA DELLE TRINCEE NORD	1.605	1,7%
STRADA DELLA FERRIERA	2.426	7,4%
VIA BIASI	698	19,3%

Successivamente, si è passati al calcolo della portanze del sottofondo delle sezioni viabilistiche in esame, che sulla base delle informazioni a disposizione è caratterizzato dalle medesime caratteristiche geotecniche .

La verifica viene effettuata attraverso l'algoritmo di calcolo della "**AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES**" basato sui risultati dell'esperimento **AASHTO** (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Il modello di verifica considera i seguenti tre parametri di progetto:

- La **vita utile**, intesa come il numero di anni durante il quale la pavimentazione deve assicurare, attraverso normali operazioni di manutenzione, condizioni di funzionalità superiori allo stato limite, per il progetto in esame è stata posta pari a 30 anni;
- Lo **stato limite**, cioè il livello minimo di funzionalità della sovrastruttura ritenuto accettabile, superato il quale è necessario comunque intervenire; per il metodo empirico il parametro di riferimento è il PSI. Per quanto concerne la percentuale di area fessurata limite della profondità media delle ormaie è stata fissata, nel metodo empirico – meccanicistico dell'AASHTO 2002, pari a 1,2 cm per garantire adeguati livelli di sicurezza;
- L'**affidabilità**, cioè la probabilità che la sovrastruttura sia in grado di assicurare, con normali operazioni di manutenzione, condizioni di circolazione superiori allo stato limite per l'intera durata della vita utile; per il progetto in esame è stata posta pari all'85%.

1. TRATTI STRADALI

1.1 STRADA DELLE TRINCEE

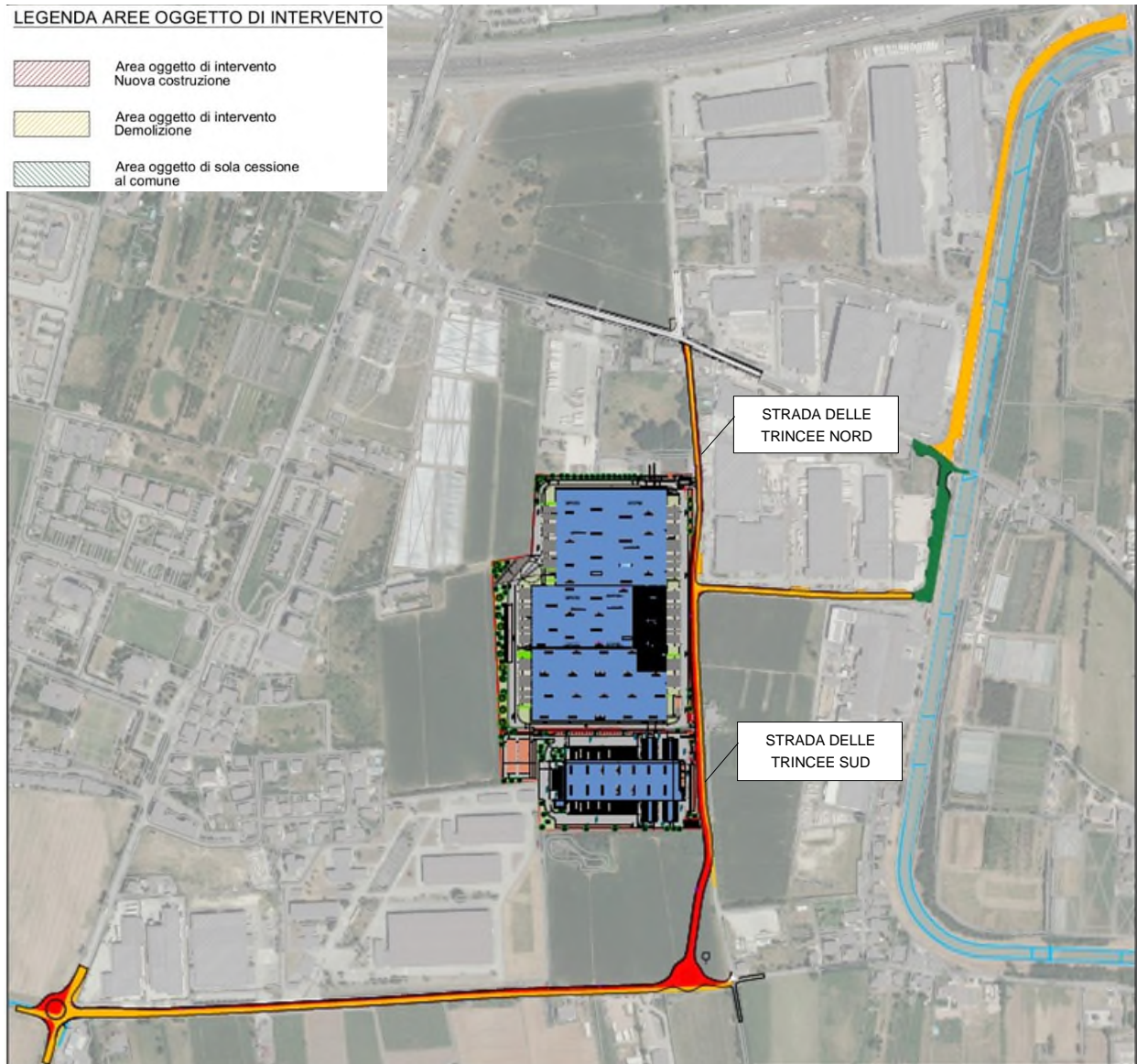


Figura 2 – Tratti stradali analizzati

1.1.1 Traffico commerciale pesante previsto

Il volume di traffico di veicoli commerciali che si prevede transiterà durante il primo anno di vita utile (30 anni) della sovrastruttura è definito da:

$$n_{vca} = TGM_{tot} \cdot p_c \cdot p_{sm} \cdot p_{corsia}$$

- TGM_{tot} = traffico giornaliero medio
- p_c = percentuale veicoli commerciali. Questa varia da valori nulli se il transito è interdetto a questa categoria di mezzi, fino ad assumere valori del 30 ed il 40%. Valori medi sono

compresi intorno tra 10 - 15%. I dati di traffico a disposizione sono divisi per i tratti Nord e Sud, per la verifica si è fatto riferimento al tratto più carico che risulta essere quello SUD con una p_c Pari al 10.33%;

- p_{sm} = percentuale del traffico totale per senso di marcia.
- p_{corsia} = Percentuale di traffico commerciale che transita nella corsia lenta. Non tutti i veicoli commerciali transitano nella corsia lenta; parte di questi, soprattutto quelli con minor carico, raggiungono velocità tali da impegnare anche le altre corsie. Si considera questo aspetto ipotizzando che generalmente il 95% di tutti i veicoli commerciali transiti sulla corsia lenta. Se si ha una corsia per senso di marcia il valore di questo parametro sarà uguale a 1.

STRADA	TGM_{tot}	p_c	p_{sm}	p_{corsia}	n_{vca}
STRADA DELLE TRINCEE SUD	1'734	10.33%	0.70	1	45'773.64
STRADA DELLE TRINCEE NORD	1'605	1.74%	1.00	1	10'195.00

Possiamo ora calcolare il numero di veicoli commerciali transitanti, nell'arco della vita utile (30 anni) sulla pavimentazione (o meglio sulla corsia più caricata) attraverso la seguente relazione:

$$T^N = n_{vca} \cdot \frac{(1 + R)^N - 1}{R}$$

Dove:

- N = vita utile della pavimentazione
- R = tasso d'incremento annuo del traffico commerciale fissato al 3% (valore indicativo per la tipologia di strada)

	N	R	T^N
STRADA DELLE TRINCEE SUD	30	4%	2'567'212
STRADA DELLE TRINCEE NORD	30	4%	571'786

1.1.2 Portanza del sottofondo

La "portanza" di un terreno è la sua capacità di sopportare i carichi senza che si verifichino eccessive deformazioni, che risultano essere di tipo elasto-plastico-viscoso.

Infatti, la necessità di avere contenute deformazioni nel sottofondo, al fine di garantire le regolarità del piano viabile e consentire un'accettabile vita utile della sovrastruttura, condiziona decisamente lo spessore complessivo della pavimentazione e quindi il relativo costo di costruzione.

La portanza dipende da una serie di fattori:

- Natura, porosità e contenuto d'acqua del terreno;
- Entità, area di impronta e velocità di applicazione del carico e numero di applicazioni del carico.

La capacità portante può essere rappresentata con più parametri, tra i vari si è scelto di utilizzare il modulo resiliente M_r e il modulo di deformazione M_d . Tali parametri dovrebbero essere ricavati dai risultati di opportune prove sperimentali. In mancanza di tali prove si sono utilizzate delle relazioni tra i vari parametri.

1.1.2.1 Modulo resiliente

Per la determinazione del modulo resiliente si parte dalla classifica per i terreni di sottofondo di Casagrande, dove in funzione del materiale, che costituisce il sottofondo, si ricava il CBR di laboratorio. Nel caso specifico, di "**Ghiaia o Ghiaia sabbiosa uniforme**", questo valore varia tra 25 e 60, come si evince dalla classificazione sotto riportata. Cautelativamente è stato posto:

$$CBR_{lab} = 40$$

Con tale valore è possibile calcolare il valore del modulo resiliente, attraverso il catalogo della "Portanza dei sottofondo", che risulta essere pari a:

$$M_r = 100 \text{ MPa}$$

tipo di terra	spiega	NOME	Comportamento come fondazione	Comportamento come tirato al base	lesione del gel	Compressibilita' ed espansione	Caratteristiche del drenaggio	Macchine per il consolidamento	Foto per unità di volume (N / m ³)	C B N	K (MPa/m)
terre e ghiaie sabbiose (terreni ghiaioso-sabbiosi) CTR	GV	Ghiaie e ghiaie sabbiose ben gradate	eccellente	buono	nessuna o lieve	prevalente nulla	eccellente	Rolli statici Rolli vibranti trattore cingolato	20.000 - 25.000	60-80	200
	GP	Ghiaie e ghiaie sabbiose poco gradate	da eccellente a buono	da scadente a discreto	nessuna o lieve	prevalente nulla	eccellente	Rolli statici Rolli vibranti trattore cingolato	19.000 - 25.000	35-60	200
	GS	Ghiaie e ghiaie sabbiose miste	buono	scadente	nessuna o lieve	prevalente nulla	eccellente	Rolli gommati trattore cingolato	18.500 - 20.000	25-40	200
	GH	Ghiaie limose o ghiaie sabbiose ricche in limo	da eccellente a buono	da discreto a buono	da lieve a media	molto lieve	da discreto a scadente	Rolli gommati trattore cingolato a piede di montone	21.000 - 23.000	10-20	200
	GC	Ghiaie argillose o ghiaie sabbiose argillose	buono	scadente	da lieve a media	lieve	da scadente a praticamente impermeabile	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	19.000 - 22.500	20-40	200
	GV	Sabbie o sabbie ghiaiose ben gradate	buono	scadente	nessuna o lieve	prevalente nulla	eccellente	Rolli gommati trattore cingolato	17.500 - 21.000	30-50	60-80
	GP	Sabbie o sabbie ghiaiose poco gradate	da discreto a buono	scadente o inadatto	nessuna o lieve	prevalente nulla	eccellente	Rolli gommati trattore cingolato	17.000 - 19.000	15-25	60-80
	GV	Sabbie o sabbie ghiaiose uniformi	da discreto a buono	non adatto	nessuna o lieve	prevalente nulla	eccellente	Rolli gommati trattore cingolato	16.000 - 19.500	10-20	60-80
	GH	Sabbie limose o sabbie limo-ghiaiose	buono	scadente	da lieve a buono	molto lieve	da discreto a scadente	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	19.000 - 21.500	20-40	60-80
	GC	Sabbie argillose o sabbie argillose-ghiaiose	da discreto a buono	non adatto	da lieve a buono	da lieve a media	da scadente a praticamente impermeabile	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	17.000 - 21.000	10-20	60-80
terre e ghiaie limose (terre limo-argillose) CTR	GL	limo, sabbie limose, limo ghiaioso	da discreto a scadente	non adatto	da media a molto buono	da lieve a media	da discreto a scadente	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	16.000 - 20.000	5-15	30-60
	CL	Argille magre argille sabbiose o ghiaiose	da discreto a scadente	non adatto	da media a buono	media	praticamente impermeabile	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	16.000 - 20.000	5-15	30-60
	GL	limi organici e argille organiche magre	scadente	non adatto	da media o buono	da media a buono	scadente	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	14.500 - 17.500	4-8	30-60
	HL	Argille ricche	scadente	non adatto	da media a molto buono	buono	da discreto a scadente	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	13.000 - 16.000	4-8	30-60
	CL	Argille grasse	scadente o molto scadente	non adatto	media	buono	praticamente impermeabile	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	15.000 - 17.500	3-5	15-30
	HL	Argille argillose grasse	scadente o molto scadente	non adatto	media	buono	praticamente impermeabile	Rolli gommati Rolli costip. a piede di montone	13.000 - 17.000	3-5	15-30
	PL	Terre, humus ed altro	non adatto	non adatto	lieve	molto basso	da discreto a scadente	non applicabile il consolidamento	---	---	---

Figura 3 – Classifica per i terreni di sottofondo di Casagrande

1.1.2.2 Modulo di deformazione

E' possibile ricavare il modulo di deformazione di progetto dalla seguente relazione:

$$M_d = \frac{CBR_{prog}}{0.2}$$

Sapendo che il CBR_{prog} si trova come:

$$CBR_{prog} = \frac{M_r}{10}$$

Risulta quindi che $M_d = 50$ Mpa.

$$M_d = 50 \text{ MPa}$$

1.2 STRADA DELLA FERRIERA

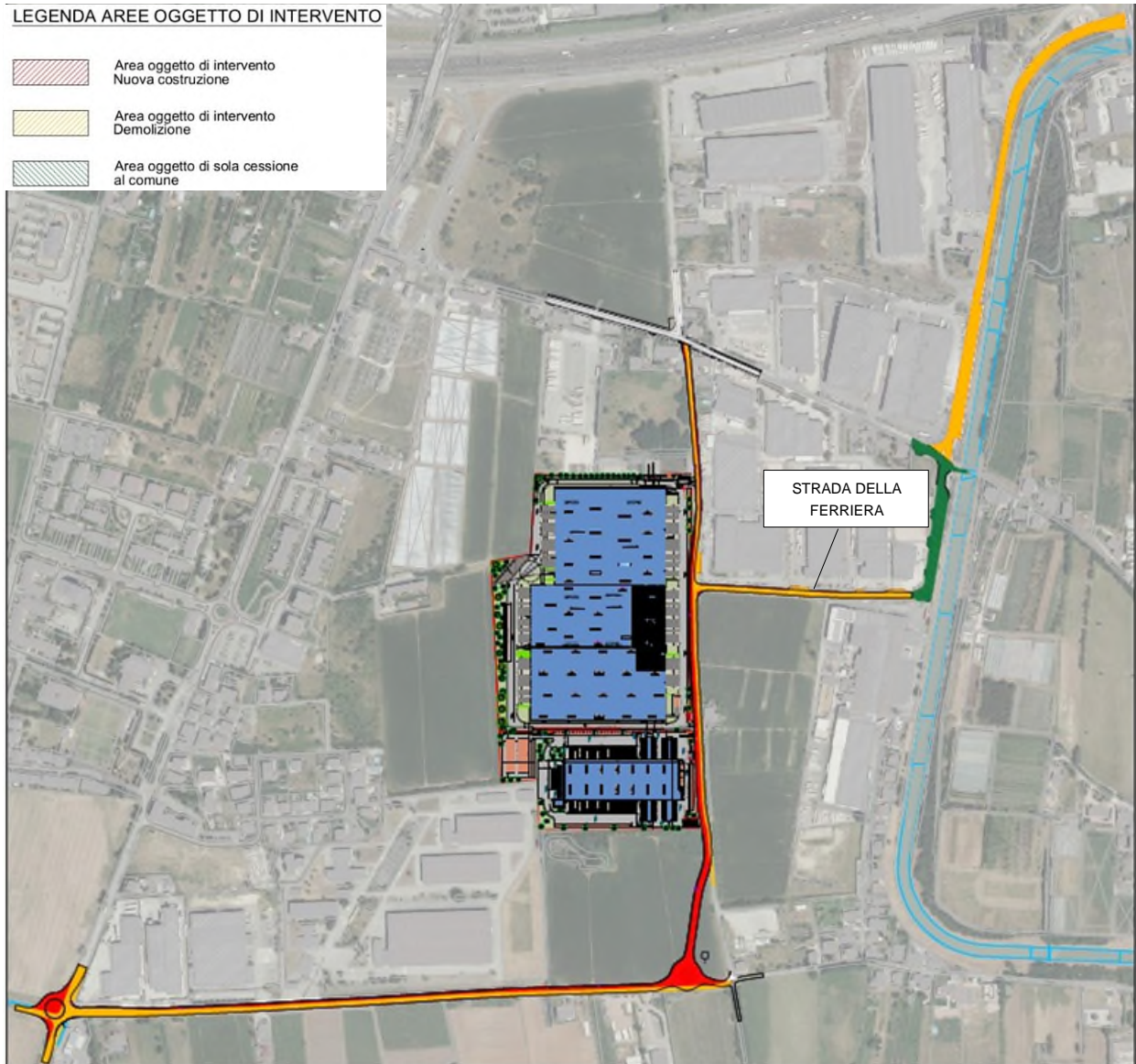


Figura 4 – Tratti stradali analizzati

1.2.1 Traffico commerciale previsto

Il volume di traffico di veicoli commerciali che si prevede transiterà durante il primo anno di vita utile (30 anni) della sovrastruttura è definito da:

$$n_{vca} = TGM_{tot} \cdot p_c \cdot p_{sm} \cdot p_{corsia}$$

- TGM_{tot} = traffico giornaliero medio
- p_c = percentuale veicoli commerciali. Questa varia da valori nulli se il transito è interdetto a questa categoria di mezzi, fino ad assumere valori del 30 ed il 40%. Valori medi sono compresi intorno tra 10 - 15%. I dati di traffico riportano una p_c Pari al 7.38%;
- p_{sm} = percentuale del traffico totale per senso di marcia.

- p_{corsia} = Percentuale di traffico commerciale che transita nella corsia lenta. Non tutti i veicoli commerciali transitano nella corsia lenta; parte di questi, soprattutto quelli con minor carico, raggiungono velocità tali da impegnare anche le altre corsie. Si considera questo aspetto ipotizzando che generalmente il 95% di tutti i veicoli commerciali transiti sulla corsia lenta. Se si ha una corsia per senso di marcia il valore di questo parametro sarà uguale a 1.

STRADA	TGM_{tot}	p_c	p_{sm}	p_{corsia}	n_{vca}
STRADA DELLA FERRIERA	2'426	7.38%	0.70	1	45'743.78

Possiamo ora calcolare il numero di veicoli commerciali transitanti, nell'arco della vita utile (30 anni) sulla pavimentazione (o meglio sulla corsia più caricata) attraverso la seguente relazione:

$$T^N = n_{vca} \cdot \frac{(1 + R)^N - 1}{R}$$

Dove:

- N = vita utile della pavimentazione
- R = tasso d'incremento annuo del traffico commerciale fissato al 3% (valore indicativo per la tipologia di strada)

	N	R	T^N
STRADA DELLA FERRIERA	30	4%	2'565'537

1.2.2 Portanza del sottofondo

Essendo il terreno uguale per tutti gli interventi il modulo di deformazione è sempre uguale ed è pari:

$$M_d = 50 \text{ MPa}$$

1.3 VIA GELMETTO

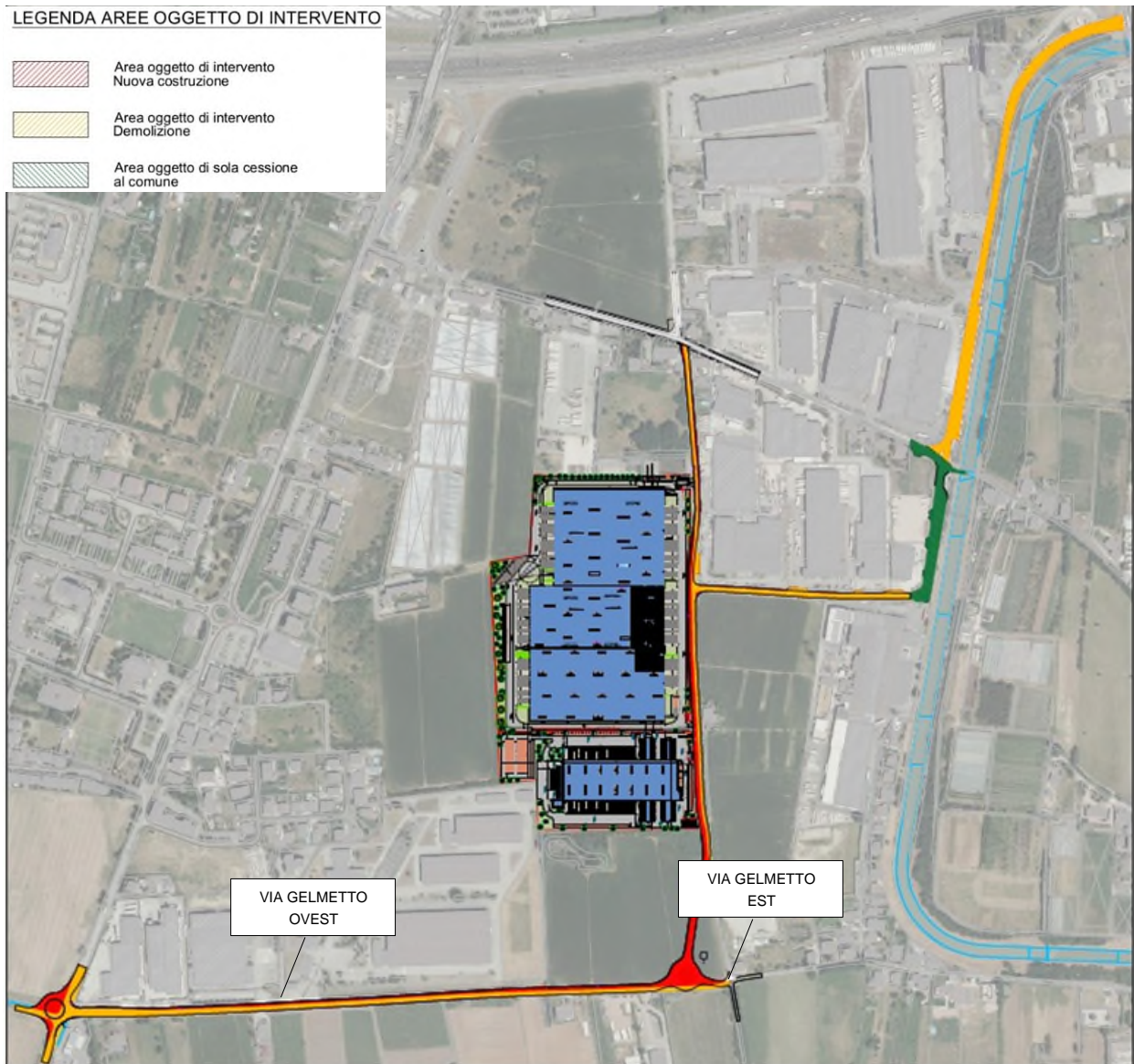


Figura 5 – Tratti stradali analizzati

1.3.1 Traffico commerciale previsto

Il volume di traffico, di veicoli commerciali, che, si prevede, transiterà durante il primo anno di vita utile (30 anni) della sovrastruttura è definito da:

$$n_{vca} = TGM_{tot} \cdot p_c \cdot p_{sm} \cdot p_{corsia}$$

- TGM_{tot} = traffico giornaliero medio
- p_c = percentuale veicoli commerciali. Questa varia da valori nulli se il transito è interdetto a questa categoria di mezzi, fino ad assumere valori del 30 ed il 40%. Valori medi sono compresi intorno tra 10 - 15%. I dati di traffico a disposizione sono divisi per i tratti Ovest

ed Est, per la verifica si è fatto riferimento al tratto più carico che risulta essere quello OVEST con una p_c pari al 2.93%;

- p_{sm} = percentuale del traffico totale per senso di marcia.
- p_{corsia} = Percentuale di traffico commerciale che transita nella corsia lenta. Non tutti i veicoli commerciali transitano nella corsia lenta; parte di questi, soprattutto quelli con minor carico, raggiungono velocità tali da impegnare anche le altre corsie. Si considera questo aspetto ipotizzando che generalmente il 95% di tutti i veicoli commerciali transiti sulla corsia lenta. Se si ha una corsia per senso di marcia il valore di questo parametro sarà uguale a 1.

STRADA	TGM_{tot}	p_c	p_{sm}	p_{corsia}	n_{vca}
VIA GELMETTO OVEST	8'093	2.93%	0.55	1	47'600.67
VIA GELMETTO EST	5'092	0.49%	0.55	1	5'008.55

Possiamo ora calcolare il numero di veicoli commerciali transitanti, nell'arco della vita utile (30 anni) sulla pavimentazione (o meglio sulla corsia più caricata) attraverso la seguente relazione:

$$T^N = n_{vca} \cdot \frac{(1 + R)^N - 1}{R}$$

Dove:

- N = vita utile della pavimentazione
- R = tasso d'incremento annuo del traffico commerciale fissato al 3% (valore indicativo per la tipologia di strada)

	N	R	T^N
VIA GELMETTO OVEST	30	4%	2'669'680
VIA GELMETTO EST	30	4%	280'904

1.3.2 Portanza del sottofondo

Essendo il terreno uguale per tutti gli interventi il modulo di deformazione è sempre uguale ed è pari:

$$M_d = 50 \text{ MPa}$$

1.4 VIA BIASI

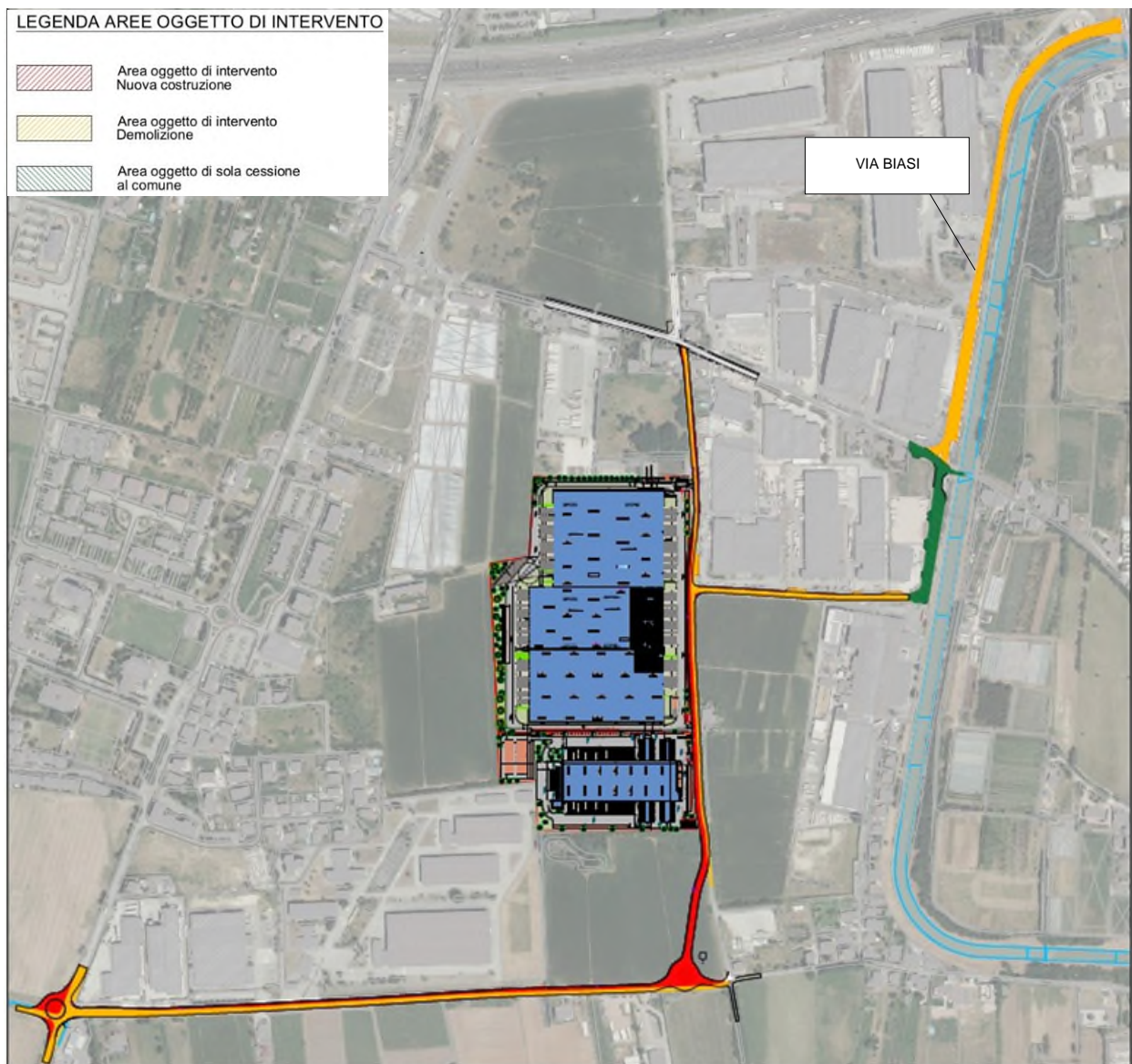


Figura 6 – Tratti stradali analizzati

1.4.1 Traffico commerciale previsto

Il volume di traffico, di veicoli commerciali, che, si prevede, transiterà durante il primo anno di vita utile (30 anni) della sovrastruttura è definito da:

$$n_{vca} = TGM_{tot} \cdot p_c \cdot p_{sm} \cdot p_{corsia}$$

- TGM_{tot} = traffico giornaliero medio
- p_c = percentuale veicoli commerciali. Questa varia da valori nulli se il transito è interdetto a questa categoria di mezzi, fino ad assumere valori del 30 ed il 40%. Valori medi sono compresi intorno tra 10 - 15%. I dati di traffico riportano una p_c Pari al 19.28%;
- p_{sm} = percentuale del traffico totale per senso di marcia.

- p_{corsia} = Percentuale di traffico commerciale che transita nella corsia lenta. Non tutti i veicoli commerciali transitano nella corsia lenta; parte di questi, soprattutto quelli con minor carico, raggiungono velocità tali da impegnare anche le altre corsie. Si considera questo aspetto ipotizzando che generalmente il 95% di tutti i veicoli commerciali transiti sulla corsia lenta. Se si ha una corsia per senso di marcia il valore di questo parametro sarà uguale a 1.

STRADA	TGM_{tot}	p_c	p_{sm}	p_{corsia}	n_{vca}
VIA BIASI	698	19.28%	0.50	1	24'563.05

Possiamo ora calcolare il numero di veicoli commerciali transitanti, nell'arco della vita utile (30 anni) sulla pavimentazione (o meglio sulla corsia più caricata) attraverso la seguente relazione:

$$T^N = n_{vca} \cdot \frac{(1 + R)^N - 1}{R}$$

Dove:

- N = vita utile della pavimentazione
- R = tasso d'incremento annuo del traffico commerciale fissato al 3% (valore indicativo per la tipologia di strada)

	N	R	T^N
VIA BIASI	30	4%	1'377'617

1.4.2 Portanza del sottofondo

Essendo il terreno uguale per tutti gli interventi il modulo di deformazione è sempre uguale ed è pari:

$$M_d = 50 \text{ MPa}$$

2. METODO EMPIRICO DELL'ASHTO

Il metodo è empirico – statistico, cioè basato su osservazioni sperimentali dei parametri presi in considerazione, i quali sono opportunamente correlati da funzioni di regressione in modo che i legami funzionali siano corretti.

Questo procedimento consiste nel determinare il numero di assi standard (**W8,2 ton**) che la pavimentazione può sopportare, raggiungendo un fissato grado di ammaloramento finale (PSI_f). Tale valore è funzione di vari parametri, come le caratteristiche meccaniche dei materiali, gli spessori dei vari strati della pavimentazione, portanza del sottofondo, etc. (resistenza strutturale **SN**)

Questi assi devono essere confrontati con il traffico commerciale che si stima passerà durante la vita utile della pavimentazione sulla corsia più carica. Poiché il traffico commerciale transitante si differenzia per il numero di assi, per il carico degli assi e per la tipologia è necessario determinare il numero di assi standard equivalenti, ovvero il numero di assi standard che determinano lo stesso danno alla pavimentazione degli assi dei veicoli realmente transitanti (**N8,2 ton**). Per determinare il numero di assi standard che transiteranno è necessario stabilire preliminarmente i coefficienti di equivalenza tra ciascun asse reali e quello standard. Anche questi coefficienti sono funzione di alcuni parametri, come le caratteristiche meccaniche dei materiali, gli spessori dei vari strati della pavimentazione, la portanza del sottofondo. Noti questi coefficienti, si calcola quello medio, che è funzione delle composizioni del traffico sulla strada in esame. Infine, per determinare il numero di assi equivalenti che transiteranno sulla corsia più carica occorre moltiplicare il coefficiente di equivalenza medio per il numero di veicoli commerciali che si stima transiteranno durante la vita utile della pavimentazione sulla corsia più critica.

La verifica consiste, pertanto, nel controllare che il numero di passaggi di assi standard **N8,2 ton**, risulti inferiore al numero massimo di passaggi di assi standard sopportabili dalla pavimentazione **W8,2 ton**.

2.1 CALCOLO DELLO “STRUCTURAL NUMBER” (SN)

Lo “*structural number*” **SN** è un parametro che tiene conto della “resistenza strutturale” della pavimentazione. Esso è funzione degli spessori degli strati s_i , della “resistenza” dei materiali impiegati rappresentata, attraverso i “coefficienti strutturali di strato” a_i , e della loro sensibilità all’acqua rappresentata attraverso i “coefficienti di drenaggio” m_i .

$$SN = \sum_i a_i \cdot m_i \cdot s_i$$

Dove:

- i è il numero degli strati costituenti la sovrastruttura stradale;
- a_i è un coefficiente che esprime la capacità relativa dei materiali impiegati nei vari strati della pavimentazione a contribuire come componenti strutturali alla funzionalità della sovrastruttura. Tali coefficienti sono funzione del tipo e proprietà del materiale. Nello specifico i coefficienti strutturali relativi agli strati di usura (a_1) e di base (a_3) si ricavano direttamente dai monogrammi presenti sull’AASHTO GUIDE in funzione della stabilità Marshall scelta per i rispettivi strati. Il valore del coefficiente relativo allo strato di collegamento (a_2) si ricava per interpolazione lineare dei parametri a_1 e a_3 , ricavati sempre dall’AASHTO GUIDE però con il valore della stabilità Marshall ridotti del 5-10%, in quanto negli Stati Uniti non è previsto tale strato.
- Infine, lo strato relativo alla fondazione a_4 in misto granulare, cioè per uno strato non legato, si ricava in funzione del CBR della fondazione, in questo caso posto pari a 50 Mpa. I valori tipici per le prove di stabilità Marshall a 75 colpi per i diversi strati assumono i seguenti valori:

PROVA DI STABILITA'	Strato di usura	Strato di collegamento	Strato di base
75 colpi [kg]	1000÷1200	800÷1000	600÷800

Il metodo AASHTO utilizza un valore della stabilità Marshall a 50 colpi, risulta quindi:

- $S_{75_{usura}} = 1100 \text{ kg}$ - $S_{50_{usura}} = 916,66 \text{ kg}$
- $S_{75_{binder}} = 1000 \text{ kg}$ - $S_{50_{binder}} = 833,33 \text{ kg}$
- $S_{75_{base}} = 800 \text{ kg}$ - $S_{50_{base}} = 667,663 \text{ kg}$

Convertendo i valori così ottenuti in libbre si ottiene:

- $S_{50_{usura}} = 916,67 \text{ kg}$ - $S_{50_{usura}} = 2016,67 \text{ lib}$
- $S_{50_{binder}} = 833,33 \text{ kg}$ - $S_{50_{binder}} = 1833,33 \text{ lib}$
- $S_{50_{base}} = 667,67 \text{ kg}$ - $S_{50_{base}} = 1466,67 \text{ lib}$

Da cui discendono i relativi coefficienti:

- $a_{usura} = 0,43$;

- $a_{binder} = 0,40$;
- $a_{base} = 0,28$;
- $a_{fond}(CBR=50) = 0,12$.

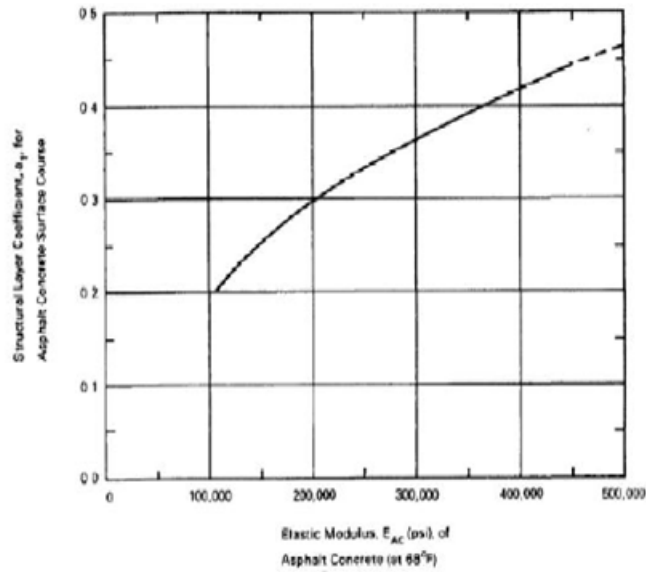


Figura 7 Coefficiente "a" per i conglomerati bituminosi

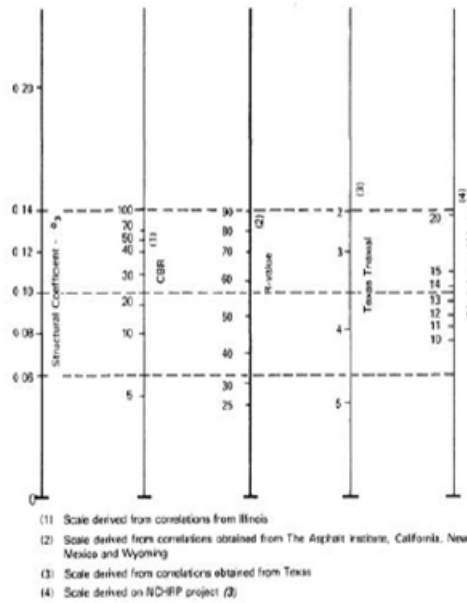
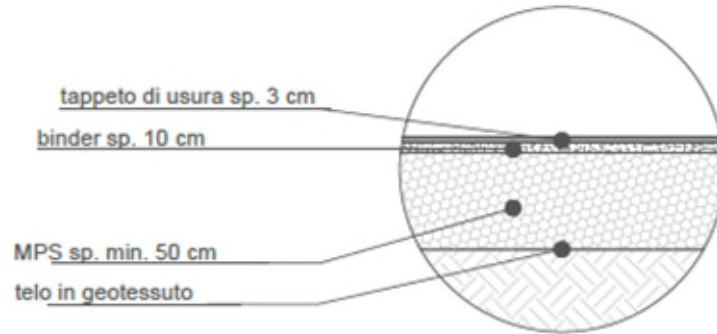


Figura 8 Coefficiente "a" per lo strato di base

- si è lo spessore dello strato i-esimo. Il pacchetto stradale prevede:

PAVIMENTAZIONE STRADALE



strato di usura	sp. 3 cm;
strato di collegamento (binder)	sp. 10 cm;
fondazione	sp. 50 cm.

- m_i è un coefficiente funzione della quantità del drenaggio e della percentuale di tempo durante il quale la pavimentazione è esposta a livelli di umidità prossimi alla saturazione. L'effetto che l'acqua ha sui materiali legati è limitato infatti assume i seguenti valori:

$m=1,00$	→	strati legati in misto granulare;
$m=0,98$	→	strati in misto cementato;
$m=0,95$	→	strati in misto granulare.

Di seguito il calcolo dello **SN**

	s_i	a_i	m_i	sn_i	
Usura	3	0.43	1	1.29	
Binder	10	0.38	1	3.8	
Base	0	0.28	1	0	
Fondazione	50	0.12	0.95	5.7	
				10.79	cm
				4.25	in

2.2 CALCOLO DEL TRAFFICO IN ASSI STANDARD EQUIVALENTI (N8,2 Ton)

Noto il numero di veicoli commerciali transitanti sulla corsia più lenta, alla fine della vita utile, per calcolare il numero di assi equivalenti, si è fatto ricorso ai coefficienti di equivalenza e allo spettro di traffico suggerito dal “Catalogo delle pavimentazioni”.

TIPO DI STRADA	TIPO DI VEICOLI															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 Autostrada extraurbana	12,2	0	24,4	14,6	2,4	12,2	2,4	4,9	2,4	4,9	2,4	4,9	0,1	0	0	12,2
2 Autostrade urbane	18,2	18,2	16,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,6	18,2	27,3	0
3 Strade extraurbana principale e secondaria a forte traffico	0	13,1	39,5	10,5	7,9	2,6	2,6	2,5	2,6	2,5	2,6	2,6	0,5	0	0	10,5
4 Strade extraurbana secondaria ordinaria	0	0	58,8	29,4	0	5,9	0	2,8	0	0	0	0	0,2	0	0	2,9
5 Strade extraurbana secondaria turistiche	24,5	0	40,8	16,3	0	4,15	0	2	0	0	0	0	0,05	0	0	12,2
6 Strade urbane di scorrimento	18,2	18,2	16,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,6	18,2	27,3	0
7 Strade urbane di quartiere e locali	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0
8 Corsie preferenziali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	53	0

Al fine della prudenzialità della verifica la strada in esame è stata considerata come “strada urbana di scorrimento”.

Utilizzando il criterio definito dall’AASHTO, il traffico viene convertito in un numero di passaggi di assi standard equivalenti tramite la relazione:

$$N_{8,2} = T^N \cdot C_{SN}$$

dove:

- T^N rappresenta il numero di veicoli commerciali transitante durante la vita utile dell’opera;
- C_{SN} è un coefficiente di equivalenza tra il generico asse reale, caratterizzato da un peso P_i e tipologia T_i e l’asse singolo standard da 8,2 ton ed è definito dalla seguente relazione:

$$C_{SNi} = C_{SN}(P_i, T_i, PSI_f) = 10^{-A}$$

$$A = \left\{ 4.79 \cdot [\log(18+1) - \log(0.225 \cdot P_i + T_i)] + 4.33 \cdot \log(T_i) + \frac{G}{B_i} - \frac{G}{B^*} \right\}$$

dove:

$$G = \log \frac{PSI_i - PSI_f}{2.7} \quad B_i = 0.40 + \frac{0.081 \cdot (0.225 \cdot P_i + T_i)^{3.23}}{\left(\frac{SN}{2.54} + 1 \right)^{5.19} \cdot T_i^{3.23}}$$

- $PSI_i - PSI_f$ = indice di servizio iniziale e finale (Present Serviceability Index), rappresenta il grado di ammaloramento della sovrastruttura flessibile, in termini di sicurezza e comfort e varia da 0 a 5:
- PSI_i viene assunto pari a 4,2 per tenere conto delle inevitabili imperfezioni costruttive,
- PSI_f per strade di media importanza si assume un valore pari a 2,0.
- B^* è il valore che B_i assume per gli assi da 8,2 ton
- SN è l'indice strutturale pari a $\sum_i a_i \cdot m_i \cdot s_i$

Per la tipologia di strada e le caratteristiche della sovrastruttura da verificare si sono svolti i calcoli e si riportano di seguito i risultati ottenuti.

STRADA	T^N	C_{SN}	$N_{8.2}$
VIA GELMETTO OVEST	2'669'680	1.518643864	3'439'154
VIA GELMETTO EST	280'904	1.518643864	361'869
STRADA DELLE TRINCEE SUD	2'567'212	1.518643864	3'307'151
STRADA DELLE TRINCEE NORD	571'786	1.518643864	736'589
STRADA DELLA FERRIERA	2'565'537	1.518643864	3'304'994
VIA BIASI	1'377'617	1.518643864	1'774'683

Con riferimento alla categoria "strade urbane di scorrimento":

Tipo di veicolo	n	Pi (kN)	Ti	Bi	B*	G	Ai	CSNi	(n/100) x CSNi	
Autocarri leggeri	1)	18	10	1	0.4006685	0.534	-0.20091484	3.447295979	0.00035703	6.49794E-05
	1)	18	20	1	0.4036566	0.534	-0.20091484	2.356592014	0.00439955	0.000800718
	2)	18	15	1	0.4017461	0.534	-0.20091484	2.830277411	0.00147816	0.000269026
	2)	18	30	1	0.4110700	0.534	-0.20091484	1.652150568	0.02227663	0.004054346
Autocarri medi e pesanti	3)	17	40	1	0.4252176	0.534	-0.20091484	1.138167465	0.07274992	0.012003737
	3)	17	80	1	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.05915208	1.14591415	0.189075834
	4)	0	50	1	0.4485717	0.534	-0.20091484	0.740595418	0.18172078	0
	4)	0	110	1	0.9351974	0.534	-0.20091484	-0.57179341	3.73072648	0
Autocarri pesanti	5)	0	40	1	0.4252176	0.534	-0.20091484	1.138167465	0.07274992	0
	5)	0	160	2	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.19762588	1.57625283	0
	6)	0	60	1	0.4837379	0.534	-0.20091484	0.422375425	0.37811558	0
	6)	0	200	2	0.7983389	0.534	-0.20091484	-0.5568886	3.60486161	0
Autotreni e autoarticolati	7)	0	40	1	0.4252176	0.534	-0.20091484	1.138167465	0.07274992	0
	7)	0	90	1	0.6877881	0.534	-0.20091484	-0.24950027	1.77623438	0
	7)	0	80	1	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.05915208	1.14591415	0
	7)	0	80	1	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.05915208	1.14591415	0
	8)	0	60	1	0.4837379	0.534	-0.20091484	0.422375425	0.37811558	0
	8)	0	100	1	0.7983389	0.534	-0.20091484	-0.4184148	2.62068485	0
	8)	0	100	1	0.7983389	0.534	-0.20091484	-0.4184148	2.62068485	0
	8)	0	100	1	0.7983389	0.534	-0.20091484	-0.4184148	2.62068485	0
	9)	0	40	1	0.4252176	0.534	-0.20091484	1.138167465	0.07274992	0
	9)	0	160	2	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.19762588	1.57625283	0
	9)	0	160	2	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.19762588	1.57625283	0
	10)	0	60	1	0.4837379	0.534	-0.20091484	0.422375425	0.37811558	0
	10)	0	180	2	0.6877881	0.534	-0.20091484	-0.38797407	2.44328467	0
	10)	0	200	2	0.7983389	0.534	-0.20091484	-0.5568886	3.60486161	0
	11)	0	40	1	0.4252176	0.534	-0.20091484	1.138167465	0.07274992	0
	11)	0	100	1	0.7983389	0.534	-0.20091484	-0.4184148	2.62068485	0
11)	0	240	3	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.27862786	1.89944997	0	
12)	0	60	1	0.4837379	0.534	-0.20091484	0.422375425	0.37811558	0	
12)	0	110	1	0.9351974	0.534	-0.20091484	-0.57179341	3.73072648	0	
12)	0	270	3	0.6877881	0.534	-0.20091484	-0.46897605	2.94425925	0	
Mezzi d'opera	13)	1.6	50	1	0.4485717	0.534	-0.20091484	0.740595418	0.18172078	0.002907532
	13)	1.6	120	1	1.1014940	0.534	-0.20091484	-0.71362272	5.17157375	0.08274518
	13)	1.6	390	3	1.3004228	0.534	-0.20091484	-1.0659836	11.6408207	0.186253132
Autobus	14)	18	40	1	0.4252176	0.534	-0.20091484	1.138167465	0.07274992	0.013240486
	14)	18	80	1	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.05915208	1.14591415	0.208556375
	15)	27	60	1	0.4837379	0.534	-0.20091484	0.422375425	0.37811558	0.103225554
	15)	27	100	1	0.7983389	0.534	-0.20091484	-0.4184148	2.62068485	0.715446965
	16)	0	50	1	0.4485717	0.534	-0.20091484	0.740595418	0.18172078	0
	16)	0	80	1	0.6004831	0.534	-0.20091484	-0.05915208	1.14591415	0

CSN	1.518643864
------------	--------------------

2.3 CALCOLO DEL TRAFFICO SOPPORTABILE (W8,2)

2.3.1 Determinazione della Reliability “R”

L'affidabilità “R” esprime la probabilità che il numero di applicazioni del carico N_t che una pavimentazione può sopportare prima di raggiungere un prefissato PSI_{fin} (parametro che rappresenta il grado di ammaloramento della sovrastruttura) sia maggiore o uguale al numero di applicazioni di carico NT che realmente sono applicati.

L'AASHTO Guide propone dei suggerimenti in merito il livello di affidabilità da assumere nel calcolo della pavimentazione. Dette indicazioni sono essenzialmente in funzione del tipo e della ubicazione della strada e vengono riportate nella tabella “**Livelli di Affidabilità per Differenti tipologie di Strade. AASHTO Guide**” che segue:

Classificazione Funzionale	Livelli di Affidabilità Suggesti	
	Urbane [%]	Extraurbane [%]
Autostrade	85 – 99,9	80 – 99,9
Arterie Principali	80 – 99	75 – 95
Strade di Scorrimento	80 – 95	75 – 95
Strade Locali	50 – 80	50 – 80

Nella relazione di calcolo proposta dalla “**AASHTO Guide**” non compare direttamente l'affidabilità “R”, ma il prodotto di due parametri ad essa legati, quali Z_R ed S_0 , in cui:

- S_0 : deviazione standard della variabile $d_0 = \log N_t - \log N_T$, che per pavimentazioni flessibili assume un valore compreso tra **0,40** e **0,50**;
- Z_R : valore della variabile standardizzata d_0 al quale corrisponde la probabilità **R%** che si abbiano valori ad esso superiori.

Per un fissato livello di affidabilità, il valore che assume la variabile Z_R è riportato nella tabella “**Valori di Z_R in Funzione del Livello di Affidabilità “R” Scelto**” che segue:

Affidabilità “R” [%]	Z_R [adim]
50	0,000
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751

97	-1,881
98	-2,054
99	-2,327
99,9	-3,090
99,99	-3,750

Gli assi oggetto di verifica sono stati classificati funzionalmente come “Strade di Scorrimento” per le quali possiamo stimare un livello di affidabilità, compreso quindi tra il 80% e l’95%, pari a **R=85%** al quale corrisponde il valore del parametro **Z_R** pari a -1.037

Stimato il livello di affidabilità, “**R**”, e valutato il parametro “**Z_R**”, si procede alla definizione dell’**“Indice di Servizio PSI”**.

Si riportano di seguito i dati ricavati ai fini della verifica funzionale del corpo stradale.

- *Classificazione Funzionale: **Starda di scorrimento**;*
- *Livello di Affidabilità Suggesto: **R=85%**;*
- *Deviazione Standard della Variabile **d₀**: **S₀ = 0,45** (Valore Medio 0,40 – 0,50);*
- *Valore della Variabile Standardizzata **d₀**: **Z_R = -1.037**.*

2.3.2 Determinazione dell’Indice di Servizio “PSI”

L’indice di servizio **PSI**, come è noto, esprime il grado di ammaloramento delle pavimentazioni e varia da un valore massimo pari a **5**, (cinque = pavimentazioni in ottime condizioni) ad un valore minimo pari a **0** (zero = pavimentazioni in pessime condizioni).

All’inizio della “**Vita Utile**” della pavimentazione tale indice viene mediamente assunto uguale a **4,2** per tener conto delle inevitabili imperfezioni costruttive, mentre a termine della vita utile il valore del **PSI** da assumere dipende essenzialmente dal tipo di strada. Generalmente si considera un **PSI_F** pari a **2** per le strade di media importanza e di **2,5** per le strade di grande importanza. Per il tipo di strada in oggetto si sceglie di adottare un grado di ammaloramento iniziale e finale pari a:

$$(PSI_I = 4.2) - (PSI_F = 2.5) = 1.7$$

Al termine della prova “AASHTO Road Test”, una commissione di esperti elaborò i risultati ottenuti e mise a punto una correlazione tra PSI della pavimentazione ed il numero di passaggi di assi. La formula di calcolo proposta lega il numero dei passaggi di assi singoli equivalenti, **W_{8,2}** da 8,2 tonnellate con la **Reliability, R**, il modulo resiliente, **M_r**, del sottofondo, lo **Structural Number, SN**, e la differenza tra l’indice di servizio iniziale e quello finale, indicato come **ΔPSI**;

L’equazione per il traffico sopportabile in termini di assi standard equivalenti da 8,2 ton delle pavimentazioni flessibili è la seguente:

$$\text{Log}W_{8,2} = Z_R * S_0 + 9,36 * \log\left(\frac{SN}{2,54} + 1\right) - 0,20 + \frac{\log\frac{PSI_i - PSI_f}{4,2 - 1,5}}{0,40 + \frac{1094}{\left(\frac{SN}{2,54} + 1\right)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}M_R - 3,056$$

dove:

- **W_{8,2}** è il numero di passaggi di assi singoli equivalenti da 18 Kpounds (8,2 ton o 80 kN) sopportabile;
- **Z_R** è il valore della variabile standardizzata legata all'affidabilità R=85% (che è la probabilità che il numero di ripetizioni di carico Nt(max) che portano il valore PSI= PSI_F sia maggiore o uguale al numero di ripetizioni NT realmente applicati alla sovrastruttura); e corrisponde un valore pari a **-1.032**;
- **S₀** è la deviazione standard che tiene conto dall'errore che si commette nelle previsioni dei volumi di traffico e delle prestazioni della pavimentazione; per le pavimentazioni flessibili, assume un valore compreso tra 0,40 e 0,50 quando si tiene conto dell'errore che si commette sia sul traffico sia sulla pavimentazione, in questo caso è stato scelto un valore pari a 0,45;
- **PSI_i - PSI_f** = indice di servizio iniziale e finale (Present Serviceability Index);
- **M_r** è il modulo resiliente del sottofondo misurato in psi;
- **SN** è lo structural number misurato in pollici.

Risulta, quindi che il numero di passaggi di assi standard sopportabili dalla pavimentazione è:

$$\log W_{8,2} = 7.322604602 \rightarrow W_{8,2} = 10^{7.322604602} = 21'018'640$$

2.4 VERIFICA

Il metodo empirico si conclude verificando che il numero di passaggi di assi standard $N_{8,2}$, risulti inferiore al numero massimo di passaggi di assi standard sopportabili dalla pavimentazione $W_{8,2}$.

$$N_{8,2} < W_{8,2}$$

STRADA	$N_{8,2}$	$W_{8,2}$	VERIFICA
VIA GELMETTO OVEST	3'439'154	21'018'640	VERO
VIA GELMETTO EST	361'869	21'018'640	VERO
STRADA DELLE TRINCEE SUD	3'307'151	21'018'640	VERO
STRADA DELLE TRINCEE NORD	736'589	21'018'640	VERO
STRADA DELLA FERRIERA	3'304'994	21'018'640	VERO
VIA BIASI	1'774'683	21'018'640	VERO

Dalla verifica risulta che per tutti gli assi in progetto analizzati, la pavimentazione resiste lungo tutta la vita utile senza mai raggiungere il $PSI_{F,}$