

SICUREZZA STRADALE E GEOMETRIA VERTICALE DEI TRACCIATI. OTTIMIZZAZIONE DEI CRITERI DI PROGETTO SULLA BASE DELLE PRESTAZIONI OPERATIVE DEI MEZZI PESANTI

Sascia Canale – Salvatore Leonardi

1. SOMMARIO

La sicurezza delle infrastrutture stradali è notoriamente condizionata dagli elementi geometrici componenti l'intero tracciato. In tale contesto, ha un ruolo determinante la conformazione altimetrica delle strade.

Le statistiche di incidentalità rivelano infatti che i sinistri accadono molto più frequentemente nei tratti di strada in pendenza che nei tratti piani; in particolare, frequenza e gravità degli incidenti sono più alte nei tronchi stradali in discesa che in quelli in salita, con maggiori complicazioni per i veicoli pesanti. Questi ultimi, infatti, a causa di caratteristiche costruttive e prestazionali differenti rispetto a quelle delle autovetture, sono soggetti a rischi maggiori quando percorrono le livellette in discesa, soprattutto durante la fase di rallentamento o quella di completo arresto del moto. Gli impianti di frenatura dei mezzi pesanti, quando sono sottoposti a ripetute e prolungate frenate, possono surriscaldarsi e perdere d'efficienza, con conseguenze ben più gravi di quelle che si avrebbero nel caso delle comuni utilitarie.

Partendo dalle considerazioni appena svolte, con il presente contributo, gli autori intendono fornire una metodologia per l'ottimizzazione della geometria verticale delle strade, adeguata a mettere in conto i livelli di rischio derivanti dalle differenti prestazioni dei veicoli commerciali presenti nei possibili contesti extraurbani.

La metodologia proposta, in particolare, permetterà di migliorare il livello di sicurezza delle livellette stradali, in funzione delle caratteristiche quali-quantitative dei mezzi pesanti (quelli cioè caratterizzati dal maggiore rischio di guasto all'impianto frenante).

Tramite la caratterizzazione ragionata della dipendenza delle condizioni di sicurezza dalla percentuale di veicoli a rischio, si perverrà alla formulazione di idonei criteri per la scelta degli accorgimenti di sicurezza più adeguati, sia in fase di verifica, per infrastrutture stradali esistenti, che in fase di progetto, per strade di nuova costruzione; nello specifico:

- nell'ambito della sicurezza attiva, sarà possibile intervenire sui valori dei parametri geometrici (lunghezza e pendenza della livelletta), e/o dei parametri caratteristici del veicolo (massa e velocità di percorrenza);
- nell'ambito della sicurezza passiva, si avranno gli strumenti per meglio valutare l'opportunità ed il posizionamento di idonei dispositivi quali, ad esempio, i letti di arresto.

2. SICUREZZA DEGLI ELEMENTI ALTIMETRICI DELLE STRADE

Il profilo altimetrico di una strada è costituito da tratti a pendenza costante (livellette) collegati da raccordi verticali concavi (sacche) e convessi (dossi).

I parametri che caratterizzano compiutamente la geometria verticale di un tracciato stradale, sono la pendenza (i) delle livellette ed il raggio (R_v) dei raccordi verticali.

Le pendenze massime adottabili per i diversi tipi di strada previsti dalla normativa italiana (D.M. 5/11/2001) sono indicate nella tabella 1.

Tipo di strada		Ambito urbano	Ambito extraurbano
Autostrada	A	6%	5%
Extraurbana principale	B	-	6%
Extraurbana secondaria	C	-	7%
Urbana di scorrimento	D	6%	-
Urbana di quartiere	E	8%	-
Locale	F	10%	10%

Tabella 1 – Pendenze longitudinali massime (D.M. 5/11/2001).

Secondo le Norme, inoltre, i valori della pendenza massima possono essere aumentati di una unità qualora, a seguito di verifiche da effettuare di volta in volta, risulti che lo sviluppo della livelletta sia tale da non

penalizzare eccessivamente la circolazione, in termini di riduzione delle velocità e della qualità del deflusso.

Riguardo poi ai raccordi verticali, occorre sottolineare che il valore minimo del raggio verticale deve essere scelto in modo tale che vengano soddisfatti i seguenti requisiti:

- soltanto le ruote dei veicoli devono avere un contatto con la superficie stradale (evitando cioè sfregamenti al suolo di altre parti della vettura, come paraurti, parafranghi, marmitta, etc.);
- devono essere garantite condizioni di comfort derivanti dall'instaurarsi di valori congrui dell'accelerazione verticale (cioè non superiori ad un valore limite);
- devono essere rispettati i criteri di visibilità indicati nella normativa (per il sorpasso, per l'arresto e per il cambio di corsia).

In ogni caso, occorre adottare raggi verticali minimi anche sensibilmente maggiori di quelli scaturenti dall'applicazione dei criteri suddetti, al fine di garantire una corretta percezione ottica del tracciato, in particolare nei casi di piccole variazioni di pendenza delle livellette e nei casi di sovrapposizione di curve verticali con curve orizzontali (torsione dell'asse).

Le prestazioni di sicurezza offerte dagli elementi verticali di un tracciato stradale, sono fortemente condizionate da una serie di aspetti, in gran parte riconducibili ai seguenti quattro casi:

- nel caso di livellette in salita: la differenza di velocità tra le autovetture ed i mezzi pesanti;
- nel caso di livellette in discesa: l'incremento della distanza di frenatura e la possibilità dei veicoli commerciali di rallentare e/o arrestarsi senza surriscaldamenti eccessivi dell'impianto frenante;
- nel caso di raccordi verticali convessi: la riduzione della distanza di visibilità;
- nel caso di raccordi verticali concavi: il problema dell'accumulo di acqua nelle sacche e l'accelerazione dell'erosione dei margini della carreggiata per effetto dei fenomeni di ruscellamento delle acque.

Numerosi studi condotti a livello internazionale, basati sulle tecniche di analisi dell'incidentalità, hanno permesso di stimare il grado di pericolosità associato alla geometria verticale dei tracciati stradali.

Le principali conclusioni di tali studi sono quelle di seguito riportate:

- la frequenza di incidenti stradali si incrementa con l'aumentare della pendenza longitudinale. In particolare, si manifesta un tasso di incremento degli incidenti pari all'1,6% per ogni variazione percentuale unitaria della pendenza delle livellette;
- la frequenza dei sinistri e la loro gravità sono maggiori nei tratti in discesa piuttosto che in quelli in salita (ciò è essenzialmente da ricondurre ai problemi di instabilità e di frenatura caratteristici dei mezzi pesanti). In particolare, sui tronchi in salita, la percentuale di incidente è circa il 75% più bassa rispetto alle livellette in discesa;
- la differenza di quota tra i due vertici di una stessa livelletta rappresenta un indicatore di rischio più significativo del valore percentuale della pendenza longitudinale.

Nella tabella 2 sono sintetizzati, inoltre, i risultati di altre ricerche, svolte in Svezia, in Gran Bretagna, in Australia ed in Nuova Zelanda, finalizzate a stimare gli effetti sulla variazione dei tassi di incidentali, conseguenti alla riduzione della pendenza delle livellette.

Tipo di intervento	Tipologia di incidente	Variazione percentuale del numero di incidenti	
		Stimatore puntuale	Intervallo di confidenza al 95%
Riduzione della pendenza da oltre il 7% al 5-7%	Tutti gli incidenti con veicoli a motore	-20	(-38, -1)
Riduzione della pendenza dal 5-7% al 3-5%	Tutti gli incidenti con veicoli a motore	-10	(-20, 0)
Riduzione della pendenza dal 3-5% al 2-3%	Tutti gli incidenti con veicoli a motore	-10	(-15, -5)
Riduzione della pendenza dal 2-3% al 1-2%	Tutti gli incidenti con veicoli a motore	-7	(-12, -1)
Riduzione della pendenza dall'1-2% a meno dell'1%	Tutti gli incidenti con veicoli a motore	-2	(-8, +6)

Tabella 2 – Effetti della pendenza longitudinale sulla sicurezza.

I dati mostrano come la diminuzione delle pendenze longitudinali comporti un abbattimento dei tassi di incidentalità. L'effetto è più rilevante per le riduzioni a partire dalle pendenze più elevate e si attenua con il diminuire delle pendenze.

Indagini sperimentali sulle velocità di percorrenza dei tracciati stradali, hanno poi evidenziato che nel caso di tronchi in salita con pendenza intorno al 4%, la velocità media è circa 7-8 km/h più bassa rispetto ai tronchi con pendenza ridotta (da meno dell'1% al 2%); in questi casi, infatti, la velocità è pari a 70-72 km/h nei tratti in salita e si attesta sui 78-79 km/h nelle livellette di lieve pendenza.

Sulle livellette in discesa, con pendenza intorno al 4%, la velocità media è circa 1-4 km/h più elevata di quella caratteristica delle strade a pendenza ridotta (76 - 77 km/h contro 73 - 76 km/h).

3. PROBLEMATICHE DI SICUREZZA SPECIFICHE DELLE LIVELLETTE IN DISCESA

Le condizioni di pericolosità delle livellette in discesa sono principalmente connesse con l'incremento di accelerazione indotto dalla forza di gravità. Ciò può dar luogo a problemi legati al rallentamento dei mezzi stradali e all'insorgere di complicazioni nell'esecuzione di un arresto completo del veicolo.

In linea di principio, dunque, dovrebbe essere ridotta al minimo (meglio se annullata), la presenza di elementi che possono accrescere le difficoltà appena esposte, quali:

- intersezioni a raso o altre tipologie di attraversamenti (linee ferrate, passaggi pedonali, piste ciclabili, etc.);
- curve orizzontali di piccolo raggio;
- restringimenti della carreggiata indotti da strutture come ponti, viadotti, gallerie, etc.

I rischi di incidenti risulterebbero amplificati se qualcuno degli elementi suddetti si trovasse posizionato proprio nel punto più basso della livelletta in discesa; in tale sezione, infatti, le velocità raggiunte dai veicoli sono in genere elevate ed è particolarmente significativa la probabilità che si verifichino problemi di frenatura soprattutto da parte dei mezzi pesanti.

La comprensione delle problematiche di sicurezza inerenti alle livellette in discesa, dunque, non può prescindere dall'analisi dei due seguenti aspetti:

- l'incremento della distanza di arresto;
- il surriscaldamento dei freni.

L'incremento della distanza di arresto con l'aumentare della pendenza delle livellette può assumere valori notevoli. Nella tabella 3 si riportano, a titolo d'esempio, le lunghezze delle distanze di arresto associate a diversi

valori della pendenza longitudinale con riferimento ad una velocità iniziale di 100 km/h e ai valori del coefficiente di aderenza longitudinale e del tempo di percezione e reazione (rispettivamente pari a 0,25 ed a 1,8 s) dedotti dalla Normativa italiana.

Pendenza della livelletta in discesa	Distanza di arresto	Incremento della distanza di arresto	Incremento percentuale della distanza di arresto
0	207 m	-	-
-2%	221 m	14 m	7 %
-4%	237 m	30 m	15 %
-6%	257 m	50 m	24 %
-8%	281 m	74 m	36 %
-10%	312 m	105 m	51 %

Tabella 3 – Distanze di arresto al variare della pendenza longitudinale (velocità iniziale = 100 km/h).

Si può notare come, all'aumentare della pendenza longitudinale rispetto alla condizione di livelletta orizzontale, si manifestino notevoli allungamenti delle distanze di frenatura, fino a raggiungere un incremento superiore al 50% nel caso della massima pendenza prevista dalla normativa (10%).

Per tener conto del secondo problema, cioè quello del surriscaldamento dei freni, bisogna considerare che, durante la frenatura dei veicoli, l'energia cinetica accumulata si trasforma in energia termica, la quale deve essere dissipata all'esterno dell'impianto frenante. Se tale dissipazione è insufficiente, si manifesta un aumento sostanziale della temperatura del materiale di frizione; conseguentemente si riduce il coefficiente di attrito e, proporzionalmente, la decelerazione. L'effetto principale e più immediato consiste nell'incremento della distanza di arresto; inoltre, considerando la proporzionalità tra l'energia termica e il prodotto tra la massa del veicolo e la sua velocità al quadrato, si capisce come il surriscaldamento dei freni possa divenire di notevole entità per i mezzi pesanti che percorrono strade in discesa particolarmente inclinate.

Quanto appena affermato giova a ribadire il fatto che il problema del surriscaldamento dei freni è tipico dei mezzi pesanti. Nei paragrafi seguenti verranno specificatamente analizzate le caratteristiche e le prestazioni di frenatura della suddetta categoria veicolare; tale disamina sarà utile per la successiva definizione delle condizioni di criticità associate alle livellette in discesa.

4. VEICOLI PESANTI

I veicoli pesanti presi in considerazione nel presente studio sono quelli “automotore”, cioè dotati di un proprio motore che ne consente il libero spostamento sul piano di rotolamento.

Tali veicoli, spesso indicati con il termine di “commerciali”, vengono generalmente distinti in autocarri, autotreni ed autoarticolati (Fig. 1). Sono sempre dotati di almeno due assi e vengono di norma mossi da un motore diesel, collegato alle ruote motrici per mezzo di una frizione, un cambio e una coppia differenziale. Con l'esclusione di alcuni modelli di furgone di piccole dimensioni, le ruote motrici dei veicoli commerciali sono sempre quelle posteriori. Negli autocarri a tre assi solitamente i due assi posteriori sono entrambi motori; nei veicoli industriali destinati all'impiego fuoristrada (ad esempio, nei cantieri e nelle cave) spesso si fa ricorso alla trazione integrale.

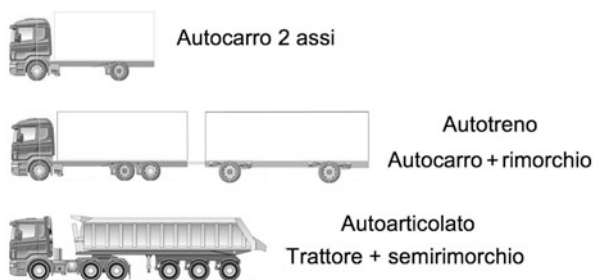


Figura 1 – Tipologie di veicoli commerciali.

Riguardo alle caratteristiche geometriche, di massa e di velocità limite a cui devono sottostare i mezzi pesanti, si fa riferimento alle indicazioni seguenti tratte dal Codice della Strada:

- **Sagoma limite:** ogni veicolo, compreso il suo carico, deve potersi inscrivere in una sagoma avente 2,50 m di larghezza e 4,00 m di altezza dal piano stradale.
- **Lunghezza totale massima** (compresi gli organi di traino):
 - Veicolo isolato: 12,00 m;
 - Autotreno: 18,75 m;
 - Autoarticolato: 16,50 m.
- **Peso massimo:** il massimo carico per asse singolo è previsto di 5 t per veicoli ad 1 asse, 8 t per veicoli a 2 assi e 10 t per veicoli a 3 o più assi. Per i veicoli a motore isolati dotati di pneumatici, tali che il carico unitario medio trasmesso dall'area di impronta sulla

strada non sia superiore a 8 daN/cm^2 e quando, se trattasi di veicoli a 3 o più assi, la distanza fra due assi contigui non sia inferiore a 1 metro, la massa complessiva a pieno carico del veicolo isolato non può eccedere 18 t se si tratta di veicoli a 2 assi e 25 t se si tratta di veicoli a 3 o più assi; 26 t e 32 t rispettivamente se si tratta di veicoli a tre o a quattro o più assi quando l'asse motore è munito di pneumatici accoppiati e di sospensioni pneumatiche. La massa complessiva di un autotreno a tre assi non può superare 24 t, quella di un autoarticolato o di un autosnodato a tre assi non può superare 30 t, quella di un autotreno o autoarticolato o autosnodato non può superare 40 t se a quattro assi e 44 t se a cinque o più assi;

- **Peso massimo rimorchio:** il massimo carico per rimorchio a 2 assi è pari a 18 t; per rimorchio a 3 assi tale peso è pari a 24 t.
- **Limiti di velocità:**
 - 80 km/h sulle strade extraurbane e 100 km/h sulle autostrade per i autoveicoli destinati al trasporto di cose o ad altri usi con massa a pieno carico compresa tra 3,5 e 12 tonnellate;
 - 70 km/h sulle strade extraurbane e 80 km/h sulle autostrade per gli autoveicoli destinati al trasporto di cose o ad altri usi con massa a pieno carico maggiore di 12 tonnellate;
 - 40 km/h sulle strade extraurbane e 60 km/h sulle autostrade per i mezzi d'opera.

5. EFFICIENZA DELL'IMPIANTO FRENANTE DEI VEICOLI COMMERCIALI SULLE LIVELLETTE IN DISCESA

Allo scopo di poter adeguatamente definire le prestazioni dei veicoli pesanti sulle livellette in discesa, non si può prescindere da una sintetica disamina preliminare sulle modalità di funzionamento del sistema di frenatura.

Gli impianti frenanti dei veicoli pesanti sono, in genere, integralmente pneumatici. Il sistema di frenatura è a disco per quanto riguarda i freni anteriori, e a tamburo a ganasce per quelli posteriori (o dei rimorchi).

Soltanto nel caso dei veicoli con alto tonnellaggio (come i mezzi d'opera), i freni sono di tipo a tamburo a ganasce sia nella parte anteriore che in quella posteriore del veicolo.

I veicoli commerciali di nuova generazione sono dotati di sistemi di frenatura più moderni (come ad esempio i dischi flottanti), che si avvalgono anche dell'elettronica integrata e dei microchip. Tali dispositivi fanno sì che il veicolo mantenga sempre un certo assetto in qualsiasi condizione di frenata, in ogni condizione di marcia su qualunque tipo di tracciato stradale. Il più comune di questi è l'ABS, il quale impedisce il blocco delle ruote al momento della frenata e permette di conservare la direzione del veicolo.

È importante sottolineare che i veicoli pesanti possono essere dotati, oltre che del comune freno di servizio e del freno di stazionamento, di freni ausiliari quali il freno motore e il rallentatore elettromagnetico.

Il *freno motore*, comandato dal pedale del freno nella prima parte della sua corsa, o mediante un apposito pulsante, chiude una valvola a farfalla situata nel collettore di scarico e provvede ad annullare la mandata della pompa di iniezione (Fig.2). In tale condizione il motore offre un maggiore effetto frenante dovuto alla compressione che effettua anche durante la fase di scarico. Il dispositivo è costituito da un interruttore che invia corrente ad una elettrovalvola e ad un elettromagnete. L'elettrovalvola consente l'invio dell'aria compressa nel cilindro di comando per la chiusura della valvola a farfalla; l'elettromagnete azzerla la mandata della pompa di iniezione attirando l'asta a cremagliera nella posizione di portata nulla. Quando il freno motore è inserito, per evitare che il motore si spenga all'arrestarsi del veicolo, un apposito dispositivo di regime basso applicato al regolatore dei giri esclude il freno motore stesso.

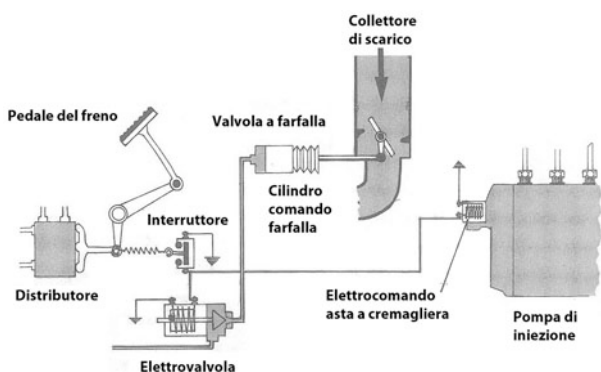


Figura 2 – Schema di funzionamento del freno motore.

Il *rallentatore elettromagnetico* è costituito da uno statore collegato al telaio, provvisto di quattro circuiti elettrici di eccitazione e da due rotori collegati uno all'albero di

uscita del cambio e l'altro all'albero di trasmissione (Fig. 3). L'azione frenante è ottenuta inviando corrente ai circuiti dello statore che eccitandosi generano un campo elettromagnetico; le correnti parassite generate nei rotori creano forze controelettromotrici che danno origine alla coppia di rallentamento.

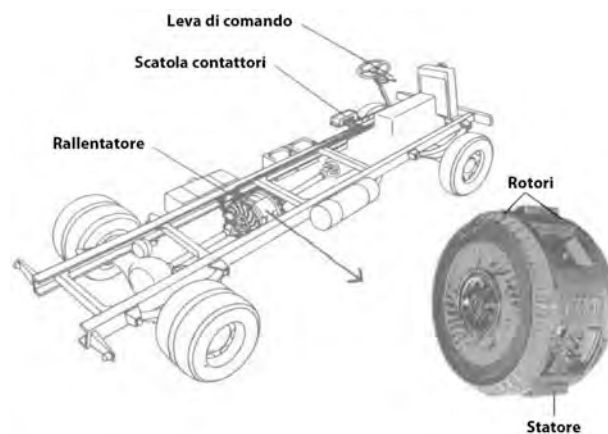


Figura 3 – Schema del rallentatore elettromagnetico.

A seguito dell'azione di frenatura, per effetto dell'attrito tra la pastiglia e il disco (o il tamburo), si sviluppa una certa quantità di calore, che è tanto più elevata quanto più intensa è l'azione frenante. Questo calore, accumulandosi nel tempo a causa di ripetute e prolungate frenate, può influire sulla funzionalità dei freni.

Una parziale perdita di efficienza dei freni per effetto dell'innalzamento della temperatura si verifica intorno ai 200 °C. Per temperature superiori a 260 °C si ha la completa inefficienza dell'impianto frenante. In questi casi il disco (o il tamburo) subirà una deformazione, per effetto della dilatazione termica dei metalli, che ad ogni rotazione eserciterà una forza pulsante sulla pastiglia, spingendola indietro e diminuendo così l'effetto frenante. Inoltre, il tipico materiale di attrito costituente le pastiglie, che può essere di tipo organico o asbestoso, è generalmente incollato al supporto metallico (i pattini o le ganasce) mediante resine di tipo fenolico. Queste ultime cominciano a danneggiarsi intorno alla temperatura di 200 °C, per poi disintegrarsi del tutto a temperature superiori ai 260 °C.

Il problema del surriscaldamento dei freni acquista ancora più importanza nel caso di veicoli pesanti che si trovano a percorrere lunghi tratti di strada in discesa.

Per meglio comprendere la suddetta asserzione occorre svolgere l'analisi energetica di un veicolo commerciale che effettua la frenatura in discesa.

È noto come l'energia totale di un veicolo che si trova all'inizio di una livelletta sia pari alla somma dell'energia cinetica e di quella potenziale.

Così come si evince dalle equazioni seguenti, l'energia cinetica è funzione della massa del veicolo e della velocità, mentre quella potenziale è funzione del dislivello della discesa e della massa del veicolo (Fig. 4):

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [1]$$

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot y \quad [2]$$

dove:

- E_{cin} = energia cinetica (J)
- v = velocità (m/s)
- E_{pot} = energia potenziale (J)
- y = dislivello (m)
- m = massa (kg)
- g = accelerazione di gravità (m/s^2)

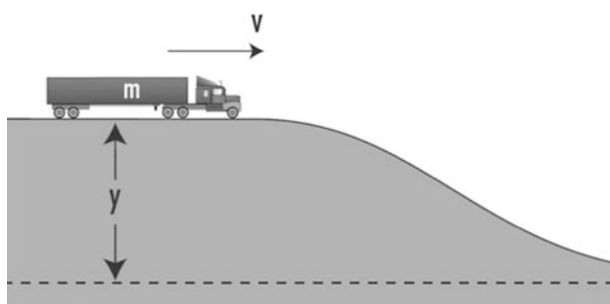


Figura 4 – Veicolo pesante in fase di approccio ad una discesa.

Secondo il principio di conservazione dell'energia, l'energia potenziale dovrebbe essere dissipata durante la discesa, a causa di un insieme di resistenze (di rotolamento, meccanica, di attrito dell'aria, di freno-motore) tra cui quella di frenatura.

Il sistema di frenatura trasforma una parte di questa energia in calore mediante l'aderenza tra due corpi metallici. Nel caso dei veicoli pesanti, contraddistinti da elevate masse, è dunque necessario che sia trasformata in calore una quantità più elevata di energia rispetto a quella delle comuni autovetture.

Questo problema non va sottovalutato, perché, anche se la percentuale di incidenti per rottura dei freni non è molto significativa (circa lo 0,2%), le conseguenze

diventano più gravi quando nei sinistri sono coinvolti i veicoli pesanti. Si pensi, ad esempio, a quali pericolosi effetti potrebbero manifestarsi nel caso in cui un mezzo pesante perda il controllo per la rottura dei freni in un tratto di strada trafficato o in una discesa che precede l'ingresso di un centro abitato.

6. NUOVO CONCETTO DI “LUNGHEZZA CRITICA DELLE LIVELLETTE IN DISCESA”

Nel paragrafo precedente si è riferito di come la temperatura critica dell'impianto frenante dei mezzi pesanti si aggiri mediamente intorno ai 260 °C. Al di sopra di tale valore, l'efficienza del sistema di frenatura si riduce a causa dell'innescarsi di vari fenomeni fisici (espansione, deformazione, etc.).

Partendo dalle suddette considerazioni, si è sviluppato un approccio teorico basato sul concetto di “lunghezza critica di livelletta” anche per le livellette in discesa. Si ricorda, in proposito, che le definizioni di “lunghezza critica delle livellette” e di “livelletta critica” sono state, fino ad oggi, riferite alle livellette in salita. La letteratura tecnica del settore fornisce infatti la seguente definizione: *la lunghezza critica di una livelletta è la massima lunghezza che quella livelletta (di quella pendenza) può raggiungere in salita senza che un autocarro pesante o un autotreno subiscano un rallentamento tale da compromettere la capacità e la stessa sicurezza del traffico.*

L'approccio teorico che gli autori propongono nel presente contributo, si fonda invece sull'ipotesi di base secondo cui *un veicolo pesante, caratterizzato da una certa massa ed un certo freno-motore, affrontando una livelletta in discesa ad una certa velocità, effettua continue e prolungate frenate per tutta la durata della livelletta, al fine di mantenere costante la sua velocità di percorrenza.* Si definisce, dunque, *lunghezza critica di una livelletta in discesa quella distanza per la quale la temperatura dei freni raggiunge il valore di 260 °C, corrispondente alla rottura dei freni.*

Esistono diversi modelli matematici che consentono di stimare la variazione di temperatura dei freni durante la percorrenza delle livellette in discesa. Una formulazione attendibile che può essere impiegata a tal fine è quella elaborata da Myers (1980); essa ha la seguente espressione:

$$T(t) = (T_i - T_a - K_2 \cdot P_F) \cdot e^{-K_1 t} + T_a + K_2 \cdot P_F \quad [3]$$

dove:

- T(t) = temperatura dei freni all'istante t (°C);
- t = tempo di riferimento (h);
- T_i = temperatura iniziale dei freni (valore suggerito: 65 °C);
- T_a = temperatura ambiente (valore suggerito: 32 °C);
- K₁ = 1,23 + 0,0159·V;
- K₂ = 0,0745+ 0,000962·V;
- V = velocità iniziale (km/h);
- P_F = potenza dissipata dai freni (kW).

La potenza dissipata dai freni si può determinare tramite la relazione sperimentale di seguito riportata:

$$P_F = \frac{W \cdot i - 205 - 4,85 \cdot V}{367} \cdot V - P_c \quad [4]$$

dove:

- P_F = potenza dissipata dai freni (kW);
- W = peso del veicolo (kg);
- i = pendenza della livelletta (%);
- V = velocità iniziale (km/h);
- P_c = Potenza di compressione del motore (*valori suggeriti sulla base dell'indagine svolta nel presente studio*: 180 kW per veicoli industriali di cilindrata minore o uguale a 9000 cm³, 250 kW per veicoli pesanti di cilindrata compresa tra 12000 cm³ e 16000 cm³, 300 kW per mezzi pesanti di cilindrata maggiore o uguale a 16000 cm³).

La relazione [3], come si vedrà in seguito, costituirà la formulazione di riferimento per la valutazione della lunghezza critica delle livellette. In essa, come è facile evincere dalla sua espressione analitica, figurano parametri, quali il peso e la potenza di compressione del motore, tipici dei veicoli commerciali. Da tale osservazione, scaturisce come logica conseguenza l'esigenza di dover acquisire i parametri che meglio descrivono le prestazioni operative dei veicoli commerciali che si trovano a circolare nel contesto in cui ci si trova ad operare. Il presente gruppo di ricerca, pertanto, ha svolto un'indagine preliminare sul parco veicolare dei mezzi pesanti circolante in Italia.

Nello specifico, si è proceduto con l'acquisizione dei dati inerenti a diversi mezzi commerciali prodotti dalle seguenti case costruttrici: Iveco, Scania, Renault, Mercedes, Volvo, Astra. Tale attività di selezione dei dati, ha reso possibile la preventiva suddivisione dei veicoli analizzati in 4 categorie (distribuzione, lungo

raggio, costruzione, eccezionale) differenziate in relazione al numero di assi, alle masse, alla cilindrata ed alla potenza installata a bordo (Fig. 5).

Tipologia	Potenza motore (CV)	Motori [c.c.]	Freno motore (kW)	Massa complessiva (ton)	Massa rimorchiabile (ton)	Massa autotreno (ton)	Massa autoarticolato (ton)	
				14	16	22	34	
	230	9000	180	16				
	270			18	16	34		
	310				22	40		
	340			12000	250			
	270	9000	180	26	8	34		
	310			25	9			
	340			26	14			
	12000			250	25	15		
	340	12000	250	26		40		
	25			14				
	26			15				
	25			15				
	380	12000	250	8	36		44	
	420							
	480							
	500	16000	250					
	560							
	620							
		380	12000	250	10	34		44
		420						
		480						
		500	16000	300				
		560						
		620						
	380	12000	250	18	26	44		
	420							
	480							
	500	16000	300					
	560							
	620							
	380	12000	250	25	19	44		
	420							
	480							
	500	16000	300					
	560							
	620							
	380	12000	250	26	18	44		
	420							
	480							
	500	16000	300					
	560							
	620							
	340	12000	250	32	12	44		
	380							
	420							
	480	16000	300					
	500							
	560							
	340	12000	250	8	36		44	
	380							
	420							
	340	12000	250	10	46		56	
	380							
	420							
	500	16000	300					
	560							
	620							
		340	12000	250	20	24	44	
		380						
		420						
340		12000	250	33	11	44		
380								
420								
340	12000	250		4	44			
380								
420								
	480	16000	300	40	16	56		
	500							
	560							
	620	16000	300					
	500							
	560							
	420	12000	250	48				
	480							
	500							
	560	16000	300					
	620							
	620							
		420	12000	250	53			
		480						
		500						
		560	16000	300				44 (112)
		620						
		620						
	500	16000	300	10	170		44 (180)	
	560							
	620							
		560	16000	300	12	168		44 (180)
		620						
		620						
		500	16000	300	32	135-150	44 (180)	
		560						
		620						

Figura 5 – Suddivisione in classi dei veicoli commerciali.

In seconda analisi, si è realizzato un ulteriore accorpamento delle classi veicolari, selezionando, nel caso di veicoli con la stessa massa, quelli con la potenza frenante del motore minore, in modo tale da essere a vantaggio di sicurezza.

Così facendo, le classi di riferimento per il parco veicolare di mezzi pesanti circolante in Italia si sono ridotte a 17 (Fig. 6).

Tipo di veicolo		Classe	
		Massa [ton]	Freno motore [kW]
	Trattore a 2 assi	8	250
	Trattore a 3 assi	10	250
	Trattore a 4 assi	12	300
	Autocarro a 2 assi	14	180
		16	180
	Autocarro a 3 assi	18	180
	Autocarro a 2 assi	20	250
	Autocarro a 2 assi	25	180
		26	180
	Autocarro a 4 assi	32	250
	Autocarro a 3 assi	33	250
	Autotreno	34	180
	Autotreno	40	180
	Autoarticolato	44	250
	Trattore a 4 assi	48	250
	Autocarro a 5 assi	53	250
	Autotreno	56	250

Figura 6 – Classi di riferimento per i veicoli commerciali.

La valutazione della lunghezza critica di livelletta (L), dunque è stata eseguita tramite la relazione seguente, dedotta dall'equazione [3], ponendo come temperatura critica di riferimento il valore di 260 °C:

$$L = V \cdot 1000 \cdot \left(-\frac{1}{K_1} \cdot \ln \frac{260 - T_a - K_2 \cdot P}{T_i - T_a - K_2 \cdot P} \right) \quad [5]$$

dove L è espressa in metri.

Utilizzando, nella [5], i parametri associati alle 17 classi di veicoli indicate nella figura 6, e i valori di pendenza compresi tra l'1% ed il 10%, si sono ricavati gli abachi riportati nelle figure 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13. Ciascuno di tali abachi è associato ad un valore della velocità di riferimento che, coerentemente con le indicazioni del Codice della Strada è stata fatta variare – a step di 10 km/h – entro l'intervallo compreso tra 40 e 100 km/h.

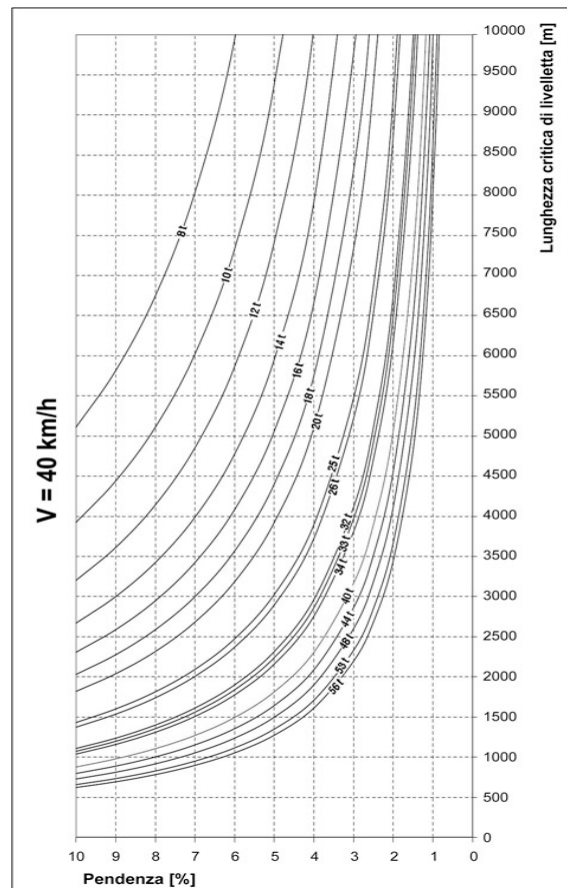


Figura 7 – Lunghezza critica di livelletta (V = 40 km/h).

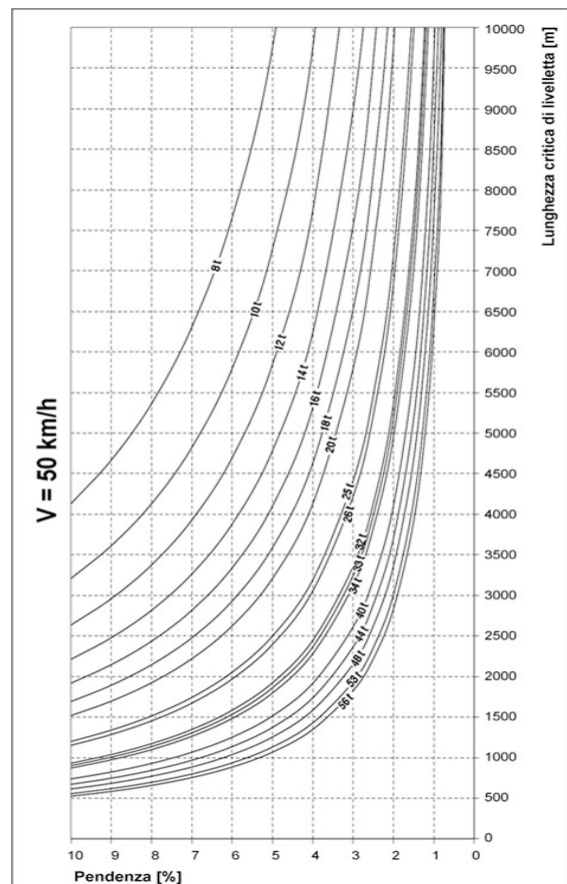


Figura 8 – Lunghezza critica di livelletta (V = 50 km/h).

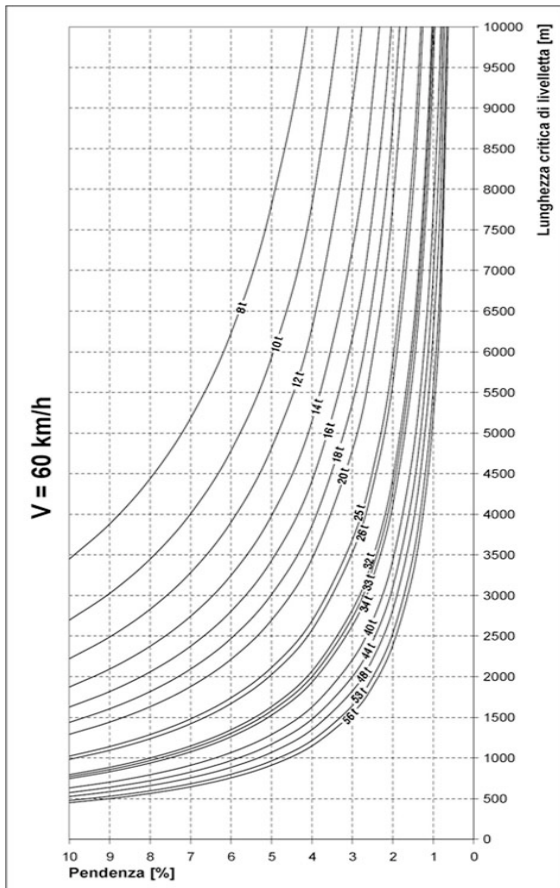


Figura 9 – Lunghezza critica di livelletta (V = 60 km/h).

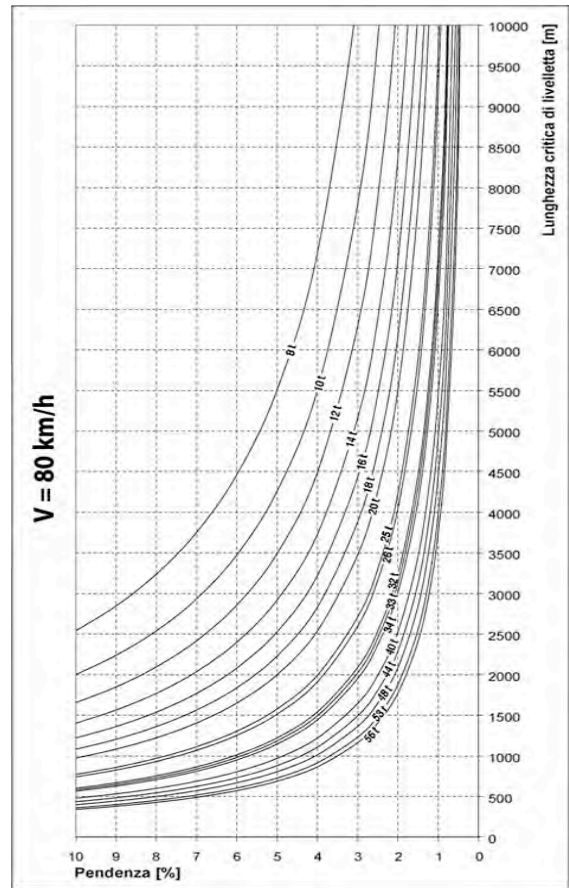


Figura 11 – Lunghezza critica di livelletta (V = 80 km/h).

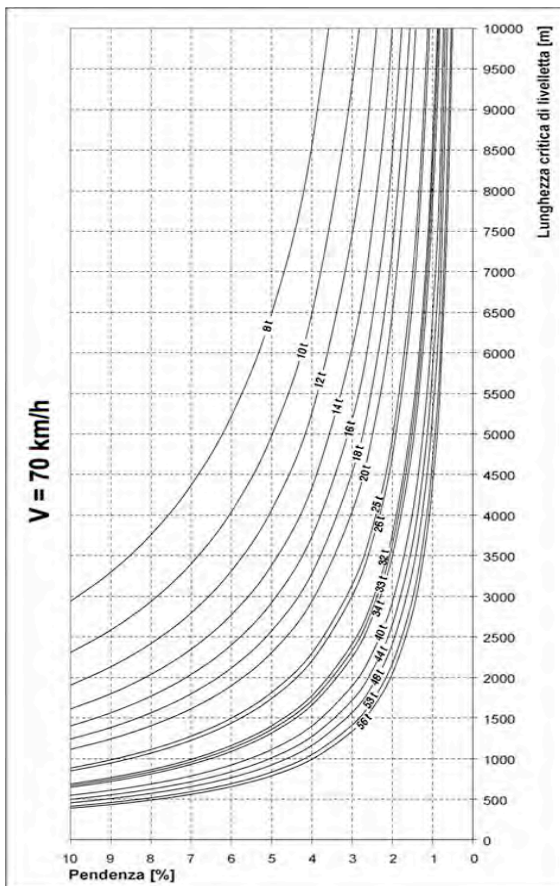


Figura 10 – Lunghezza critica di livelletta (V = 70 km/h).

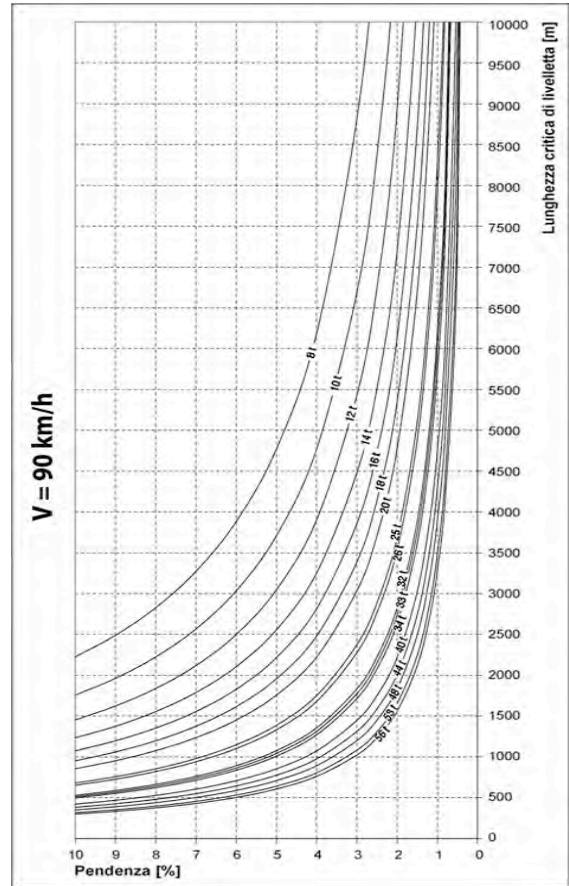


Figura 12 – Lunghezza critica di livelletta (V = 90 km/h).

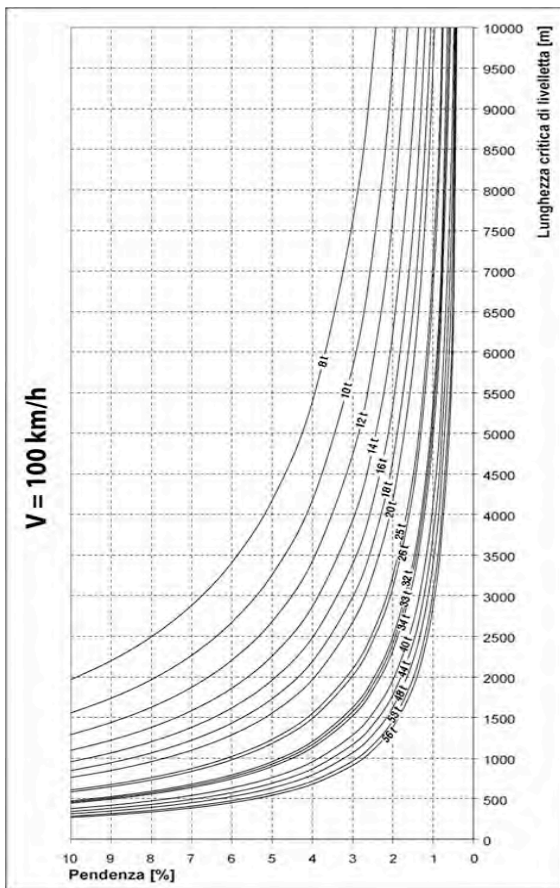


Figura 13 – Lunghezza critica di livelletta (V = 100 km/h).

Gli abachi riportati nelle figure precedenti, dunque, consentono di valutare la lunghezza critica di livelletta in tutte quelle configurazioni altimetriche per le quali è nota, o quantomeno ipotizzabile, la composizione della flotta dei mezzi pesanti.

Per meglio comprendere l'utilizzo degli abachi di calcolo, si propone di seguito il caso esemplificativo in cui si vuole stimare la criticità di una livelletta, lunga 3,00 km, di pendenza pari al 4,5%, appartenente ad un tracciato di tipo extraurbano principale ed interessata da un flusso veicolare di mezzi pesanti composto dalle categorie di mezzi pesanti riportate nella tabella 4.

Classe veicolare	Percentuale nel flusso di traffico
40 – 44 tonnellate	4%
32 tonnellate	6%
26 tonnellate	5%
20 tonnellate	23%
18 tonnellate	10%
14-16 tonnellate	34%
8-10-12 tonnellate	18%

Tabella 4 – Composizione del flusso di veicoli commerciali (esempio).

Trattandosi di una strada extraurbana, il limite di velocità è di 80 km/h per i mezzi pesanti con massa fino a 12 tonnellate, e 70 km/h per quelli con massa superiore a 12 tonnellate (in questo caso non sono presenti i mezzi d'opera).

Con riferimento all'abaco associato alla velocità di 80 km/h, si evince che, per la livelletta in esame, non sono a rischio i veicoli commerciali di massa inferiore o uguale a 14 tonnellate e, conseguentemente non sussistono condizioni di criticità per i veicoli di massa fino a 12 tonnellate aventi 80 km/h come limite di velocità massimo consentito. Dalla figura 14 si evince, infatti, che la lunghezza critica di livelletta associata ai veicoli di massa pari a 12 t è pari a 3900 m, ben al di sopra della lunghezza effettiva della livelletta presa in esame (3000 m).

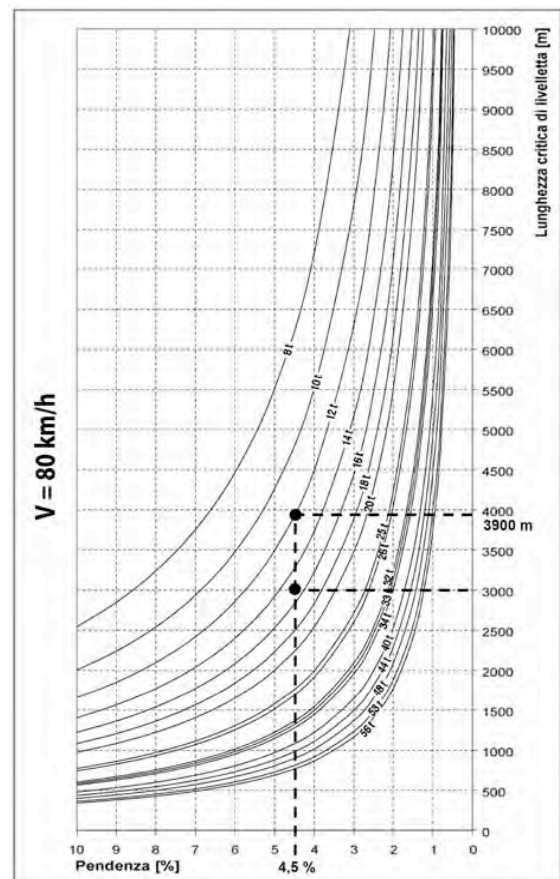


Figura 14 – Lunghezza critica di livelletta, V = 80 km/h (esempio).

Per quanto riguarda i veicoli con massa superiore a 12 tonnellate si deve considerare, in primo luogo, il diagramma relativo alla velocità di 70 km/h. Dalla figura 15, si deduce immediatamente come risultino a rischio tutti i mezzi pesanti aventi massa uguale o superiore a 18 tonnellate, che costituiscono il 48% del flusso totale

di veicoli commerciali; per essi, infatti viene superato il valore minimo della lunghezza critica di livelletta (2850 m).

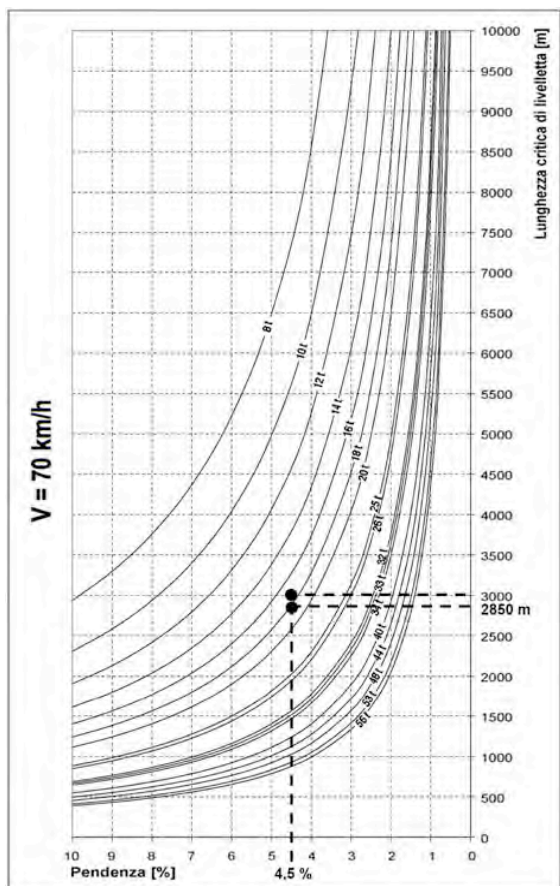


Figura 15 – Lunghezza critica di livelletta, V = 70 km/h (esempio).

Ripetendo la stessa verifica per gli altri tre valori di velocità (60 km/h, 50 km/h, 40 km/h), si ottengono i seguenti risultati:

- per V = 60 km/h, sono a rischio i veicoli di massa a partire da 20 tonnellate (il 38% del totale). Infatti, la curva relativa ai mezzi commerciali da 20 t è intercettata in corrispondenza del valore della lunghezza critica di livelletta pari a 2970 m, inferiore, anche se di poco, alla lunghezza reale (Fig. 16);
- per V = 50 km/h, le condizioni di rischio riguardano i mezzi pesanti di massa maggiore o uguale a 26 t (15% del flusso complessivo di veicoli commerciali); dalla figura 17, infatti, si evince come la livelletta critica, con i suoi 2700 m, si discosti significativamente in difetto, dalla lunghezza effettiva (3000 m);
- per V = 40 km/h, sono i mezzi commerciali di massa a partire da 32 t (pari al 10% del volume di traffico totale) ad essere soggetti al rischio di rottura dei

freni; si deve notare, infatti, che la livelletta critica associata a tale categoria di veicoli sia notevolmente più corta (2580 m) di quella reale (Fig. 18).

Nella tabella 5, sono indicate le percentuali dei veicoli a rischio in funzione delle velocità di riferimento.

Classi	Limite di velocità				
	80 km/h	70 km/h	60 km/h	50 km/h	40 km/h
	Percentuale di veicoli a rischio				
8 ton	0%				
10 ton	0%				
12 ton	0%				
14 ton		0%	0%	0%	0%
16 ton		0%	0%	0%	0%
18 ton		10%	0%	0%	0%
20 ton		23%	23%	0%	0%
26 ton		5%	5%	5%	0%
32 ton		6%	6%	6%	6%
40 ton		4%	4%	4%	4%
44 ton					
Totale	0%	48%	38%	15%	10%

Tabella 5 – Percentuali di veicoli a rischio (esempio).

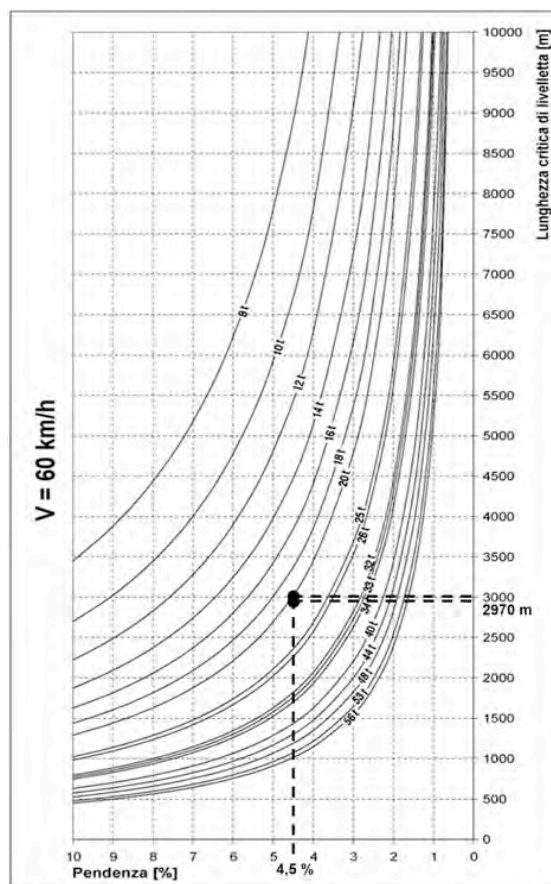


Figura 16 – Lunghezza critica di livelletta, V = 60 km/h (esempio).

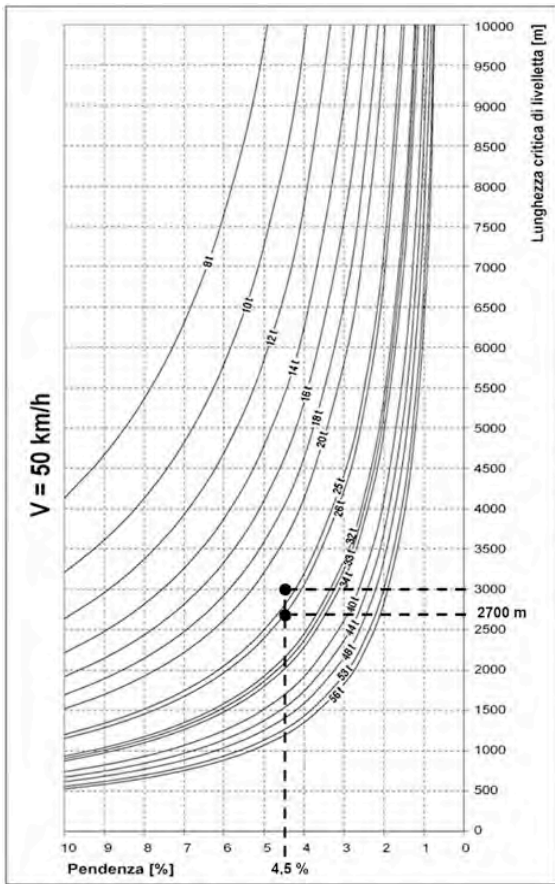


Figura 17 – Lunghezza critica di livelletta, V = 50 km/h (esempio).

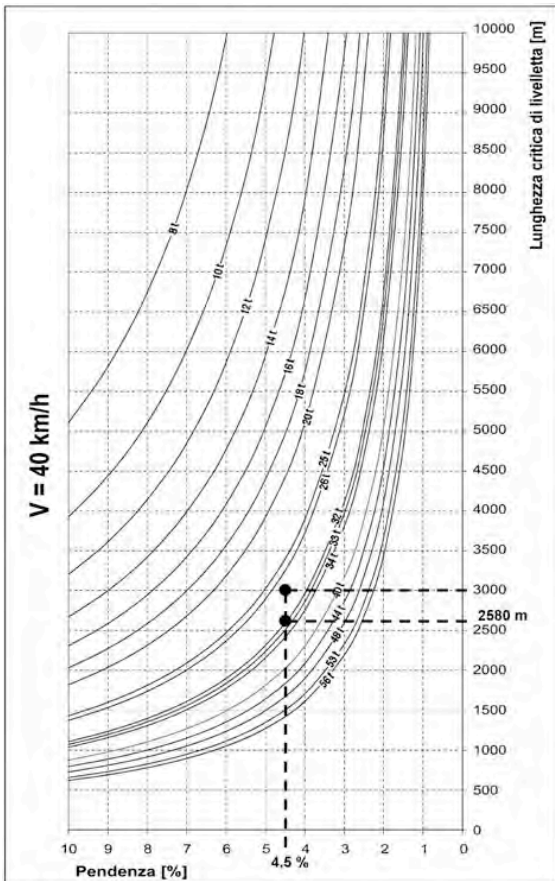


Figura 18 – Lunghezza critica di livelletta, V = 40 km/h (esempio).

L'esempio appena svolto, oltre a chiarire le modalità di utilizzo degli abachi di calcolo, serve a far riflettere sulle potenziali scelte progettuali o di adeguamento funzionale da parte dei tecnici del settore. Dal suesposto esempio, infatti, appare chiaro che se si imponesse, tramite apposita segnaletica, un limite di velocità indiscriminato di 40 km/h per tutti i mezzi pesanti, la percentuale dei veicoli a rischio si ridurrebbe al 10%; ciò significa che il livello di rischio di rottura dei freni sulla livelletta considerata risulterebbe estremamente ridotto. Così facendo, però, tutti i veicoli commerciali sarebbero costretti a limitare la propria velocità operativa, a tutto danno della qualità del servizio offerto (principalmente il trasporto merci). Addirittura, per i veicoli commerciali di massa inferiore a 14 tonnellate, l'imposizione del limite di velocità pari a 40 km/h, coinciderebbe con il dimezzamento della loro velocità operativa, e ciò potrebbe portare i conducenti di tali mezzi a ritenere troppo vessatorio il limite di velocità e, conseguentemente, a non rispettarlo.

Quanto detto, impone ulteriori riflessioni in merito al livello di rischio che può essere ritenuto accettabile, anche in relazione al regime di velocità che si vuole mantenere.

L'analisi della tabella 5 può aiutare a ragionare sulle scelte più opportune. Si può infatti notare che, fermo restando il limite di 80 km/h per le classi veicolari fino a 12 t, che non comporta nessun rischio per tale categoria di mezzi pesanti, qualora si mantenesse il limite di 70 km/h previsto dal CdS per i veicoli di massa compresa tra 14 t e 18 t, e si imponesse un limite di velocità di 50 km/h ai veicoli commerciali di classe uguale o maggiore di 20 t, si otterrebbe un totale di veicoli a rischio pari al 25% (Tab. 6).

Classi	Limite di velocità				
	80 km/h	70 km/h	60 km/h	50 km/h	40 km/h
	Percentuale di veicoli a rischio				
8 ton	0%				
10 ton	0%				
12 ton	0%				
14 ton		0%			
16 ton		0%			
18 ton		10%			
20 ton				0%	
26 ton				5%	
32 ton				6%	
40 ton				4%	
44 ton					
Totale	0%	10%		15%	

Tabella 6 – Percentuali di veicoli a rischio (esempio).

Se si pensasse, in alternativa alla soluzione precedente, di abbassare il limite di velocità a 40 km/h per le categorie di veicoli commerciali di massa uguale o superiore a 20 tonnellate, la percentuale di veicoli a rischio si ridurrebbe al 20% (Tab. 7). Rispetto all'ipotesi precedente, dunque, a fronte di una riduzione dei veicoli a rischio di solo il 5%, si avrebbe un'ulteriore penalizzazione di velocità (ben 10 km/h) per il 38% dei mezzi pesanti. Si tratta, dunque, di un'ipotesi che occorre ben ponderare, in quanto i vantaggi in termini di sicurezza sembrano poco significativi in relazione alla notevole riduzione delle prestazioni cinematiche e del conseguente livello di servizio complessivo.

Classi	Limite di velocità				
	80 km/h	70 km/h	60 km/h	50 km/h	40 km/h
	Percentuale di veicoli a rischio				
8 ton	0%				
10 ton	0%				
12 ton	0%				
14 ton		0%			
16 ton		0%			
18 ton		10%			
20 ton					0%
26 ton					0%
32 ton					6%
40 ton					
44 ton					4%
Totale	0%	10%			10%

Tabella 7 – Percentuali di veicoli a rischio (esempio).

Risulta dunque evidente come l'approccio progettuale derivante dalla metodologia indicata nel presente contributo si fondi essenzialmente sulla ricerca del giusto compromesso tra il livello di sicurezza offerto dall'infrastruttura stradale ed il corrispondente grado di funzionalità. Una progettazione moderna, pertanto, non può essere "assoluta" e non può prescindere dalla messa in conto dei parametri caratteristici del contesto in cui si sta operando (in questo caso, si sono considerate le caratteristiche quali-quantitative del flusso veicolare; in altri ambiti possono risultare fondamentali altri elementi tipici, quali le condizioni di luminosità, le caratteristiche climatiche, l'abitudine dei conducenti a percorrere l'itinerario, etc.).

Il passo successivo del presente studio è consistito nella elaborazione di un'altra serie di abachi dai quali, in funzione del tipo di contesto stradale (autostrada extraurbana, strada extraurbana principale, strada extraurbana secondaria), è possibile direttamente ricavare le percentuali di mezzi pesanti a rischio, associati ad una data configurazione di livelletta.

Partendo sempre dall'equazione [5], si sono calcolate le lunghezze critiche per le 17 classi di veicoli commerciali considerate, avendo mantenuta fissa la velocità e fatto variare la pendenza. Si sono ottenuti così tre gruppi di abachi: il primo riferito alle autostrade, il secondo alle strade extraurbane principali, ed il terzo alle strade extraurbane secondarie. Ogni gruppo comprende tanti diagrammi quanti sono i valori di velocità considerati (ovvero quelli compatibili, in base al Codice della Strada, con le diverse tipologie di mezzi pesanti).

Per la stesura dei suddetti abachi si è reso inizialmente necessario fissare una distribuzione percentuale delle varie classi di mezzi pesanti per ognuna delle tre tipologie stradali considerate. In tal modo, tra l'altro, si è inteso semplificare la questione relativa alla ricerca dell'esatta composizione del flusso veicolare di una determinata strada, problema ancora più grande soprattutto se ci si trova ad operare in fase di progettazione.

Nel presente studio, pertanto, si è fatto riferimento alla distribuzione percentuale dei mezzi pesanti adottata dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali redatto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche. Nel Catalogo sono presenti due tabelle: una distingue i veicoli commerciali in 16 categorie in funzione del numero di assi e della distribuzione dei carichi per asse (Tab. 8), e l'altra riporta i tipici spettri di traffico dei veicoli pesanti per ciascun tipo di strada (Tab. 9).

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

Tabella 8 – Classificazione dei veicoli commerciali in base al Catalogo delle Pavimentazioni (CNR).

Tipo di veicolo	Tipo di strada			
	1) Autostrade extraurbane	2) Autostrade urbane	3) Strade extraurbane principali e secondarie a forte traffico	4) Strade extraurbane secondarie ordinarie
	Spettri di traffico (%)			
1	12,2	18,2	-	-
2	-	18,2	13,1	-
3	24,4	16,5	39,5	58,8
4	14,6	-	10,5	29,4
5	2,4	-	7,9	-
6	12,2	-	2,6	5,9
7	2,4	-	2,6	-
8	4,9	-	2,5	2,8
9	2,4	-	2,6	-
10	4,9	-	2,5	-
11	2,4	-	2,6	-
12	4,9	-	2,6	-
13	0,1	1,6	0,5	0,2
14	-	18,2	-	-
15	-	27,3	-	-
16	12,2	-	10,5	2,9

Tipo di veicolo	Tipo di strada			
	5) Strade extraurbane secondarie turistiche	6) Strade urbane di scorrimento	7) Strade di quartiere e locali	8) Corsie preferenziali
	Spettri di traffico (%)			
1	24,5	18,2	80	-
2	-	18,2	-	-
3	40,8	16,5	-	-
4	16,3	-	-	-
5	-	-	-	-
6	4,15	-	-	-
7	-	-	-	-
8	2	-	-	-
9	-	-	-	-
10	-	-	-	-
11	-	-	-	-
12	-	-	-	-
13	0,05	1,6	-	-
14	-	18,2	20	47
15	-	27,3	-	53
16	12,2	-	-	-

Tabella 9 – Spettri di traffico dei veicoli commerciali in funzione del tipo di strada in base al Catalogo del CNR.

Dall'analisi della tabella 8, si può notare come le 16 categorie in cui il Catalogo delle Pavimentazioni suddivide i veicoli pesanti presentino caratteristiche, sia

in termini di numero di assi che di distribuzione dei carichi per asse, non perfettamente corrispondenti con quelle delle 17 classi ottenute dall'analisi del parco veicolare pesante circolante in Italia; si è reso pertanto necessario stabilire la corrispondenza tra le classi veicolari del Catalogo e quelle introdotte nel presente studio.

Il confronto tra le categorie del Catalogo e le 17 rappresentate nella figura 6, ha consentito l'individuazione delle corrispondenze riportate nelle tabelle 10, 11 e 12, le quali forniscono anche gli spettri di traffico associati a ciascuna delle tre tipologie di strade considerate.

Tipologia di strada: Autostrade extraurbane			
Catalogo delle Pavimentazioni		Parco veicolare circolante	
Categoria	Percentuale	Massa (ton)	Percentuale
3	24,4	8 – 10 – 12	32,3
4	14,6	14 – 16	19,3
5	2,4	18 – 20	3,2
6	12,2	25 – 26	16,1
7	2,4	32	3,2
8	4,9	34 – 40	6,5
9	2,4	33	3,2
10	4,9	44	16,1
11	2,4		
12	4,9		
13	0,1	48 – 53 - 56	0,1
Totale	75,6		100,0

Tabella 10 – Corrispondenza, in termini di categorie veicolari e di spettri di traffico, tra il Catalogo del CNR ed il parco dei veicoli commerciali circolante in Italia, per le Autostrade extraurbane.

Tipologia di strada: Strade extraurbane principali			
Catalogo delle Pavimentazioni		Parco veicolare circolante	
Categoria	Percentuale	Massa (ton)	Percentuale
3	39,5	8 – 10 – 12	51,70
4	10,5	14 – 16	13,74
5	7,9	18 – 20	10,34
6	2,6	25 – 26	3,40
7	2,6	32	3,40
8	2,5	34 – 40	3,27
9	2,6	33	3,40
10	2,5	44	10,10
11	2,6		
12	2,6		
13	0,5	48 – 53 - 56	0,65
Totale	76,4		100,0

Tabella 11 – Corrispondenza, in termini di categorie veicolari e di spettri di traffico, tra il Catalogo del CNR ed il parco dei veicoli commerciali circolante in Italia, per le Strade extraurbane principali.

Tipologia di strada: Strade extraurbane secondarie			
Catalogo delle Pavimentazioni		Parco veicolare circolante	
Categoria	Percentuale	Massa (ton)	Percentuale
3	58,8	8 – 10 – 12	60,5
4	29,4	14 – 16	30,3
6	5,9	25 – 26	6,1
8	2,8	34 – 40	2,9
13	0,2	48 – 53 - 56	0,2
Totale	76,4		100,0

Tabella 12 – Corrispondenza, in termini di categorie veicolari e di spettri di traffico, tra il Catalogo del CNR ed il parco dei veicoli commerciali circolante in Italia, per le Strade extraurbane secondarie.

Gli abachi ottenuti con il procedimento appena esposto, sono riportati nelle figure seguenti; nello specifico:

- abachi relativi alle autostrade extraurbane: dalla figura 19 alla figura 25;
- abachi relativi alle strade extraurbane principali: dalla figura 26 alla figura 30;
- abachi relativi alle strade extraurbane secondarie: dalla figura 31 alla figura 35.

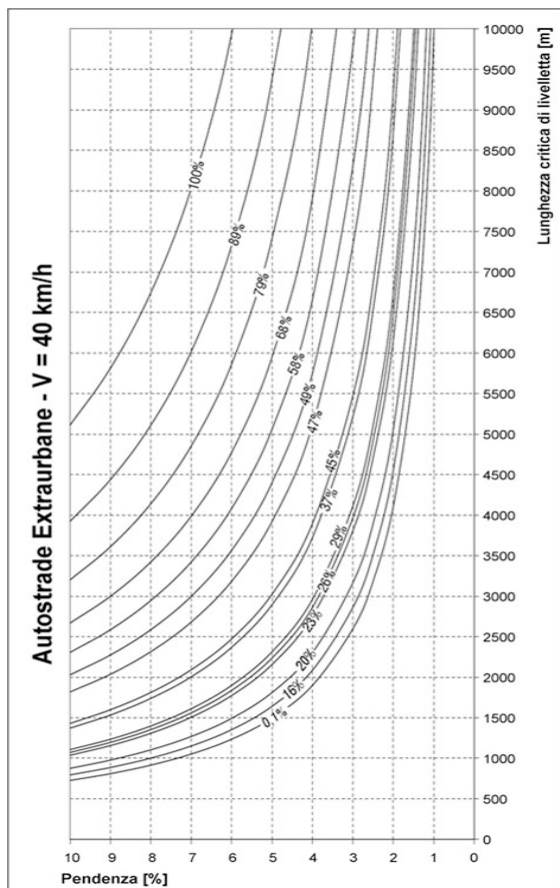


Figure 19 – Lunghezza critica di livelletta (Autostrade extraurbane - V = 40 km/h).

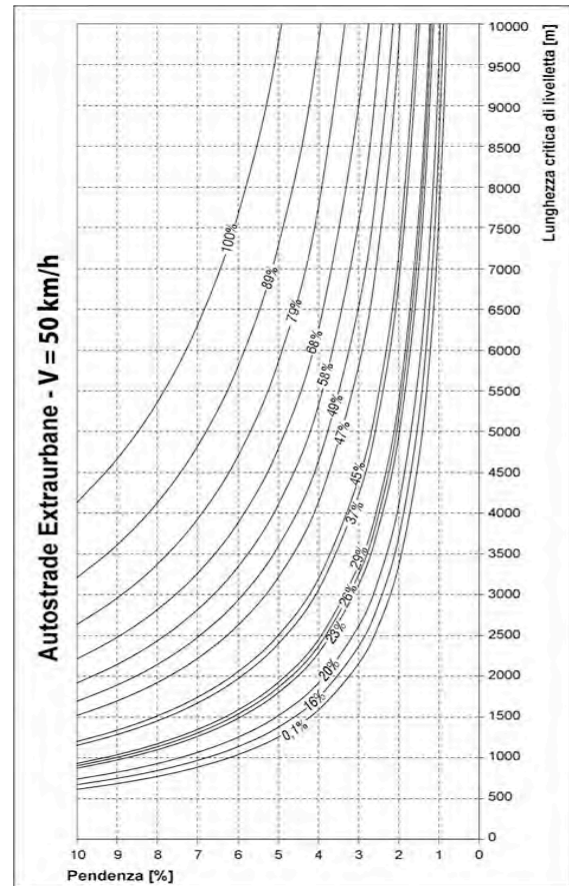


Figure 20 – Lunghezza critica di livelletta (Autostrade extraurbane - V = 50 km/h).

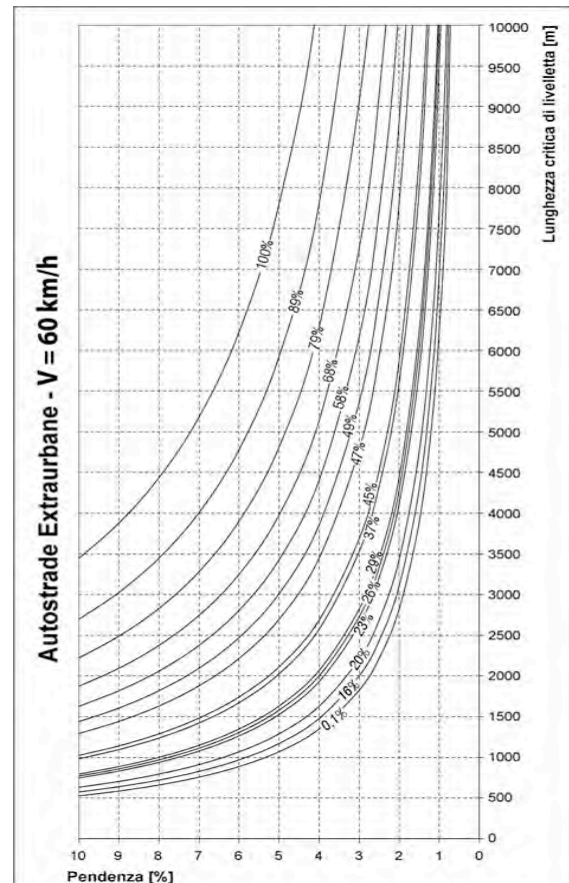


Figure 21 – Lunghezza critica di livelletta (Autostrade extraurbane - V = 60 km/h).

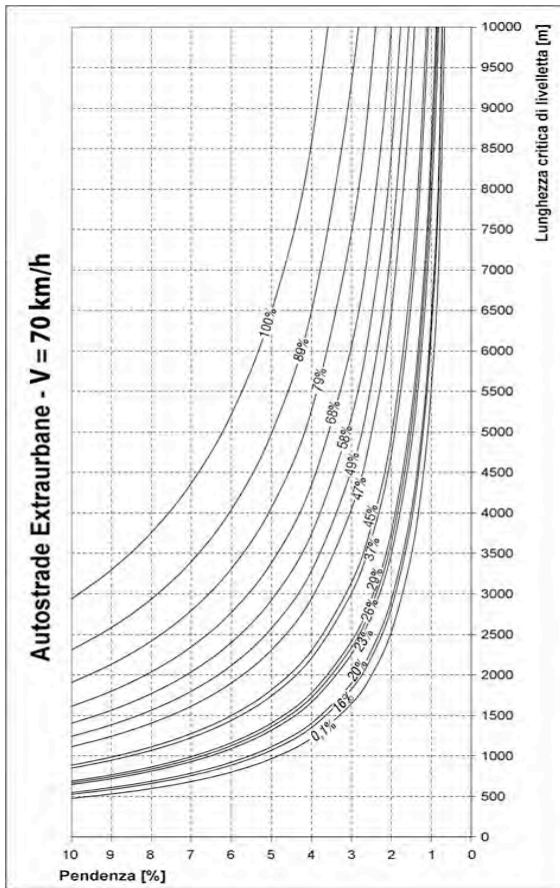


Figura 22 – Lunghezza critica di livelletta (Autostrade extraurbane - V = 70 km/h).

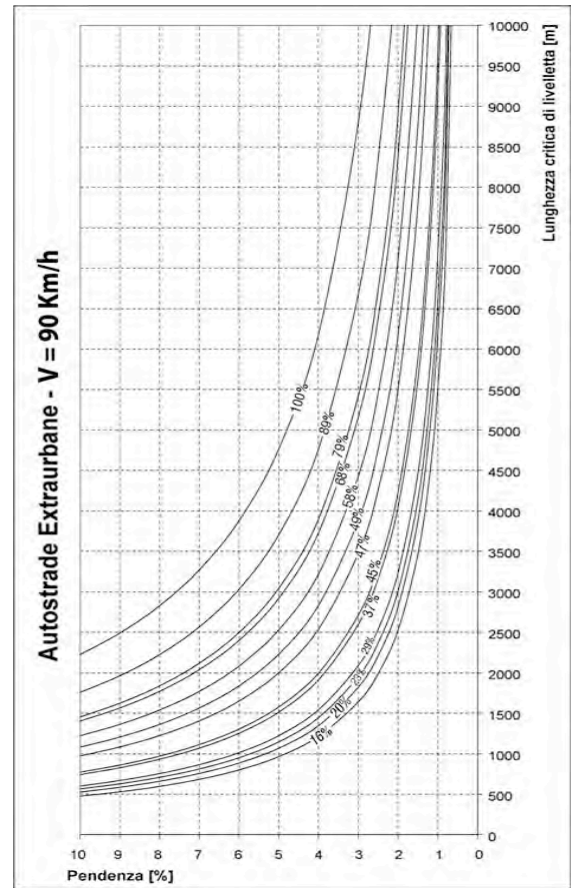


Figura 24 – Lunghezza critica di livelletta (Autostrade extraurbane - V = 90 km/h).

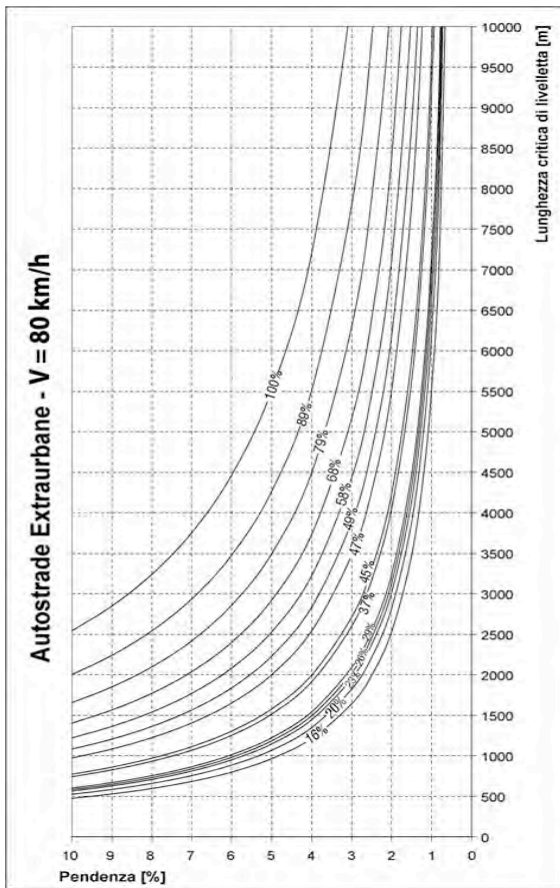


Figura 23 – Lunghezza critica di livelletta (Autostrade extraurbane - V = 80 km/h).

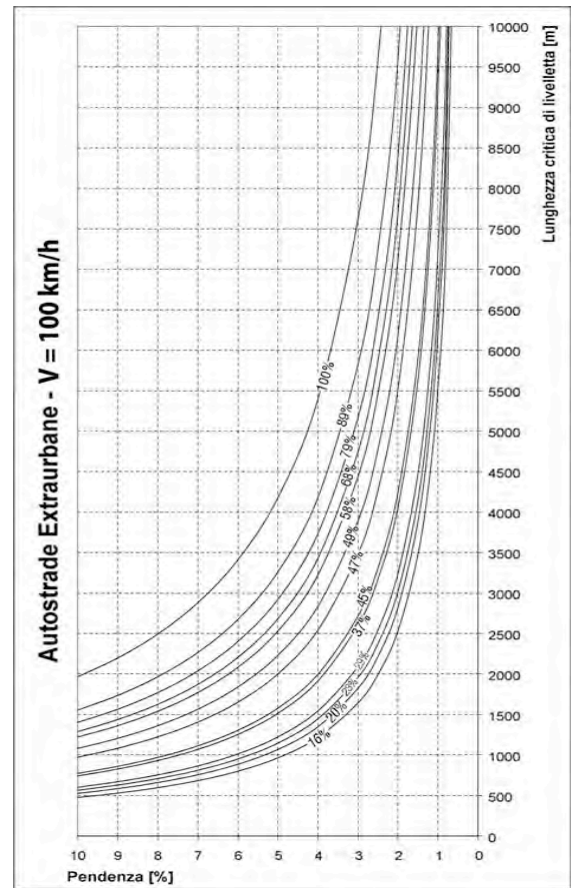


Figura 25 – Lunghezza critica di livelletta (Autostrade extraurbane - V = 100 km/h).

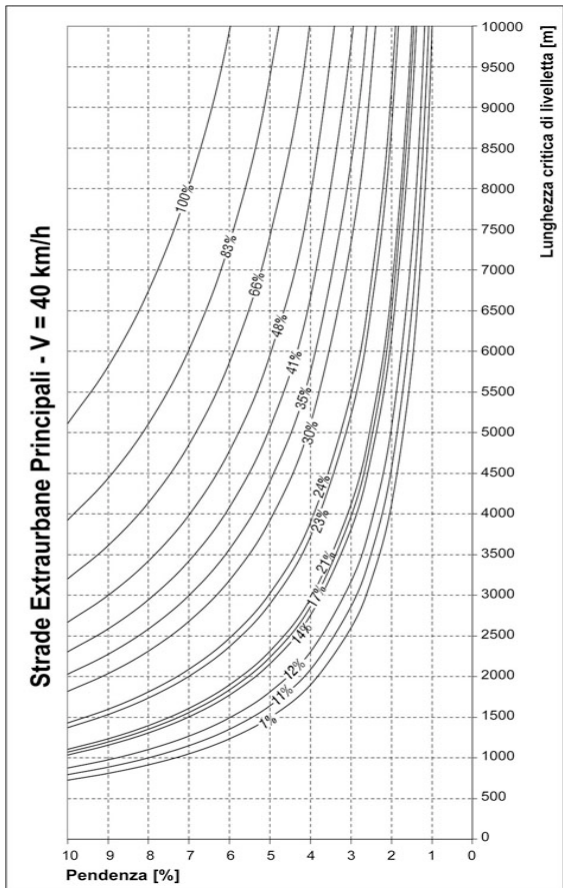


Figura 26 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane principali - V = 40 km/h).

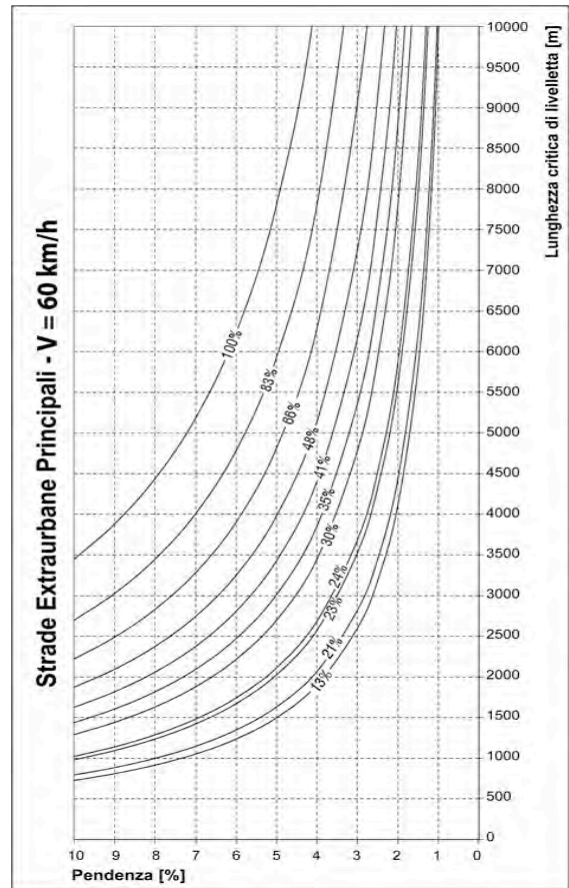


Figura 28 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane principali - V = 60 km/h).

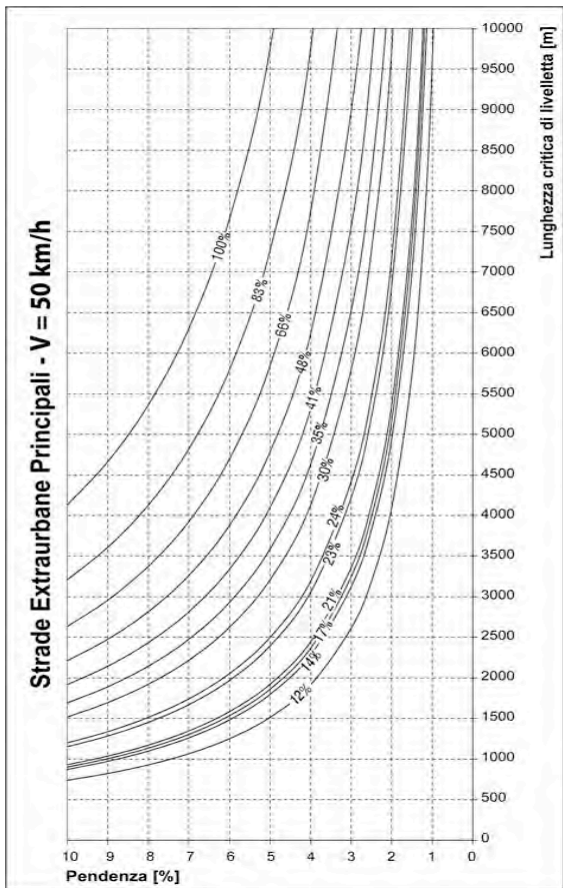


Figura 27 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane principali - V = 50 km/h).

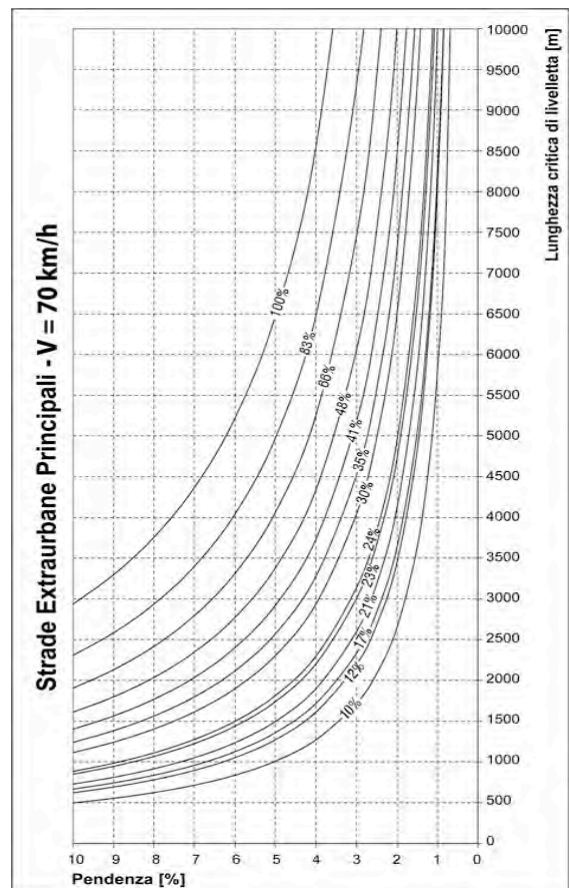


Figura 29 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane principali - V = 70 km/h).

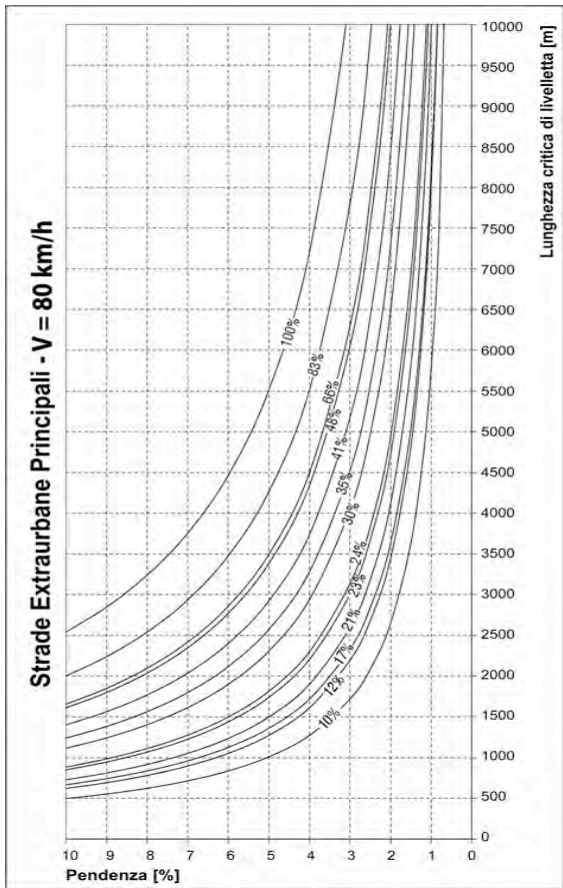


Figura 30 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane principali - V = 80 km/h).

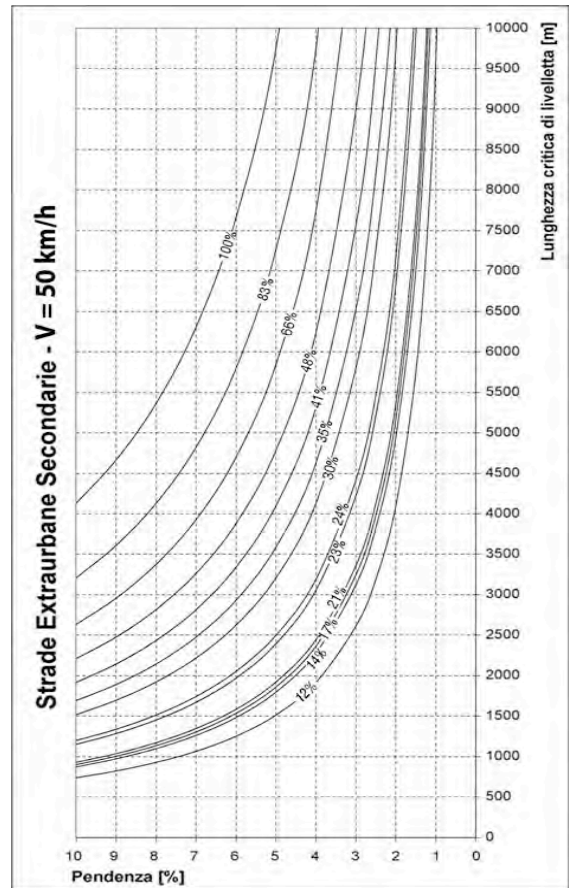


Figura 32 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane secondarie - V = 50 km/h).

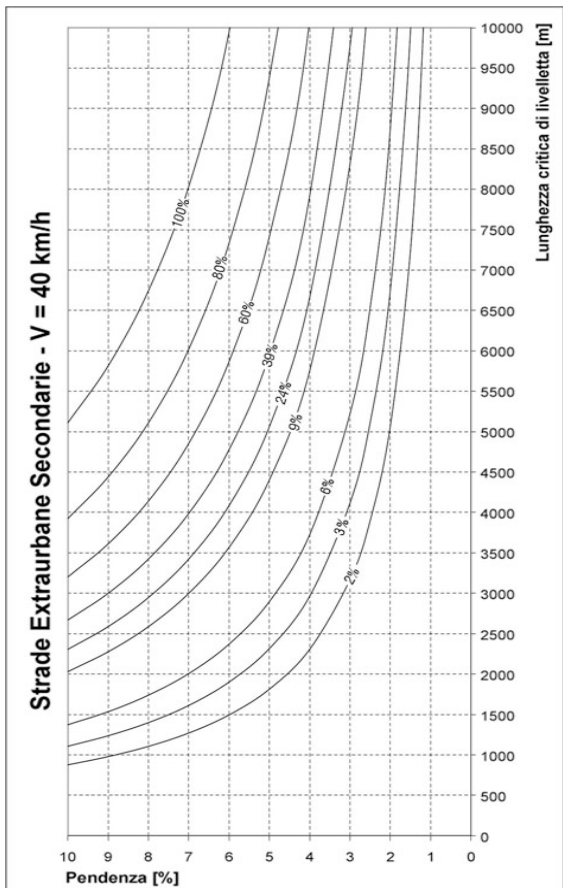


Figura 31 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane secondarie - V = 40 km/h).

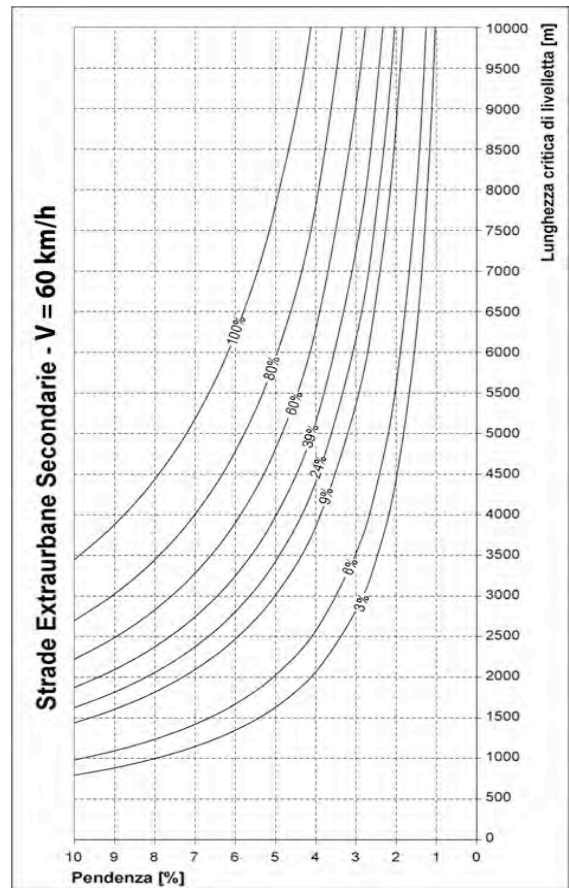


Figura 33 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane secondarie - V = 60 km/h).

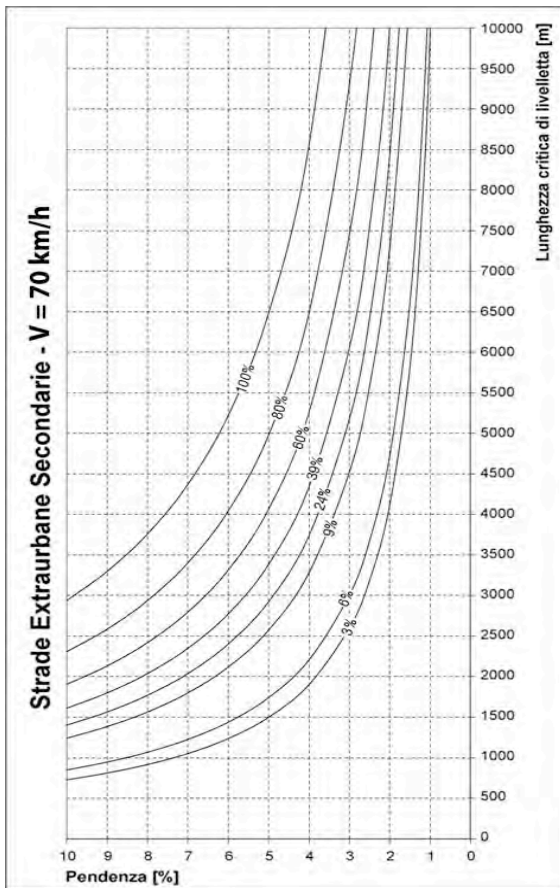


Figura 34 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane secondarie - V = 70 km/h).

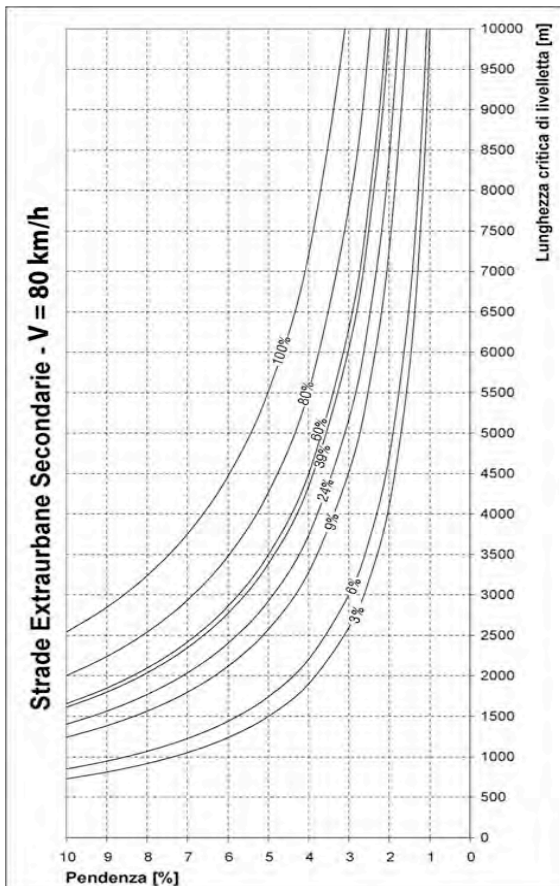


Figura 35 – Lunghezza critica di livelletta (Strade extraurbane secondarie - V = 80 km/h).

Per rendere maggiormente comprensibili ai progettisti stradali ed ai tecnici del settore le modalità di impiego della serie di abachi elaborata con la procedura appena esposta, analogamente a quanto già fatto per i diagrammi prodotti nella prima parte del presente studio, si procederà con l'illustrazione di un esempio applicativo appositamente predisposto.

L'esempio che si propone riguarda la stima delle condizioni di rischio associate ad una livelletta stradale, appartenente ad una direttrice classificata come extraurbana principale, di lunghezza pari a 2,7 km e con pendenza del 6,2%.

Nelle figure 36, 37, 38, 39 e 40 sono rappresentati gli abachi utilizzati per la verifica della criticità della livelletta considerata. In particolare si sono evidenziate, con apposita campitura di colore grigio, le fasce comprese tra due curve consecutive all'interno delle quali ricadono i valori delle percentuali dei veicoli a rischio associati alle diverse velocità operative (da 40 km/h ad 80 km/h) compatibili con la direttrice stradale extraurbana presa in esame.

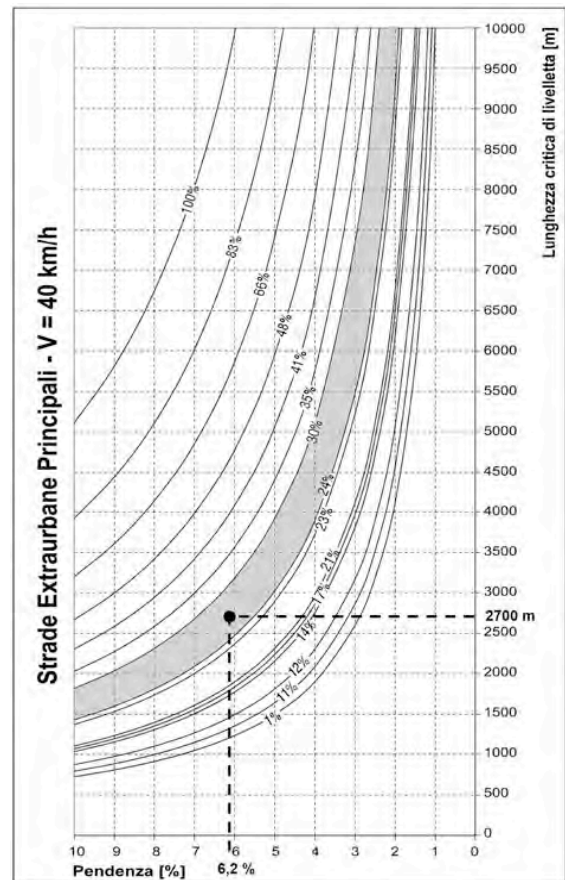


Figura 36 – Lunghezza critica di livelletta, V = 40 km/h, Strade extraurbane principali (esempio).

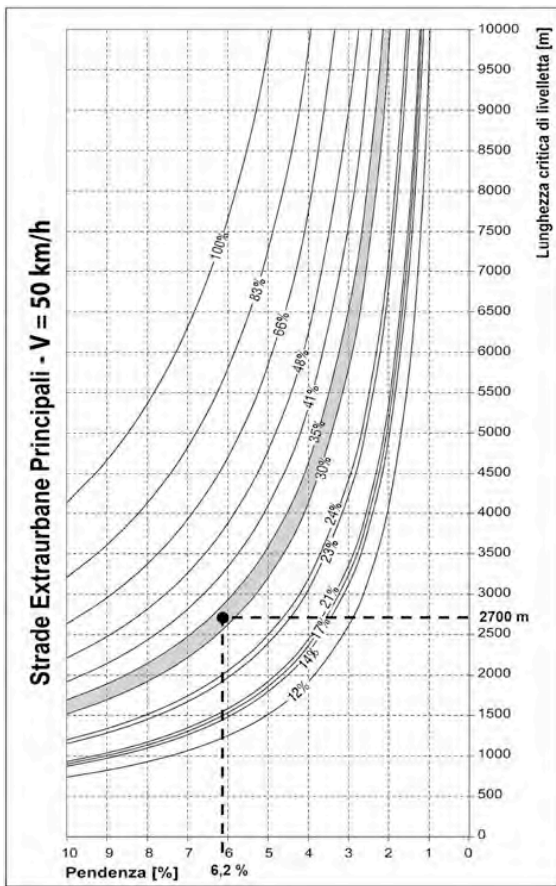


Figura 37 – Lunghezza critica di livelletta, V = 50 km/h, Strade extraurbane principali (esempio).

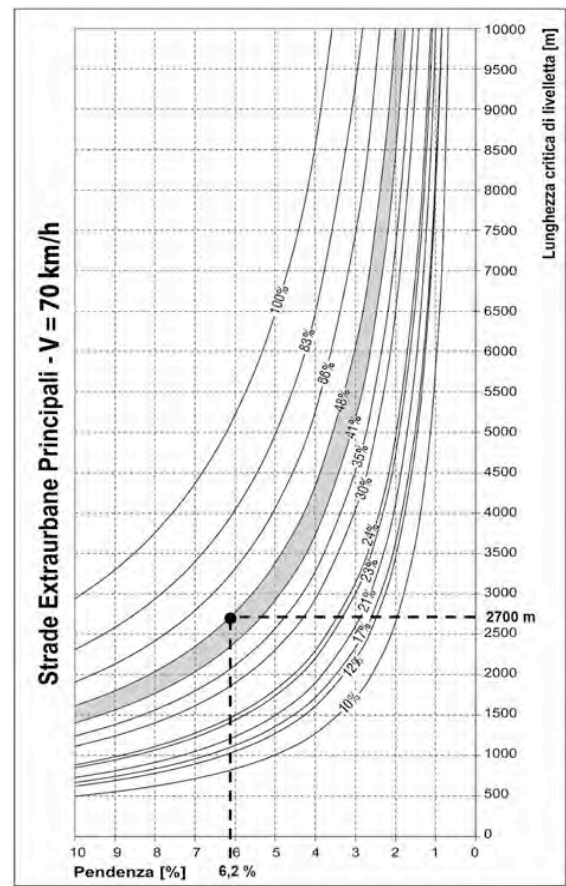


Figura 39 – Lunghezza critica di livelletta, V = 70 km/h, Strade extraurbane principali (esempio).

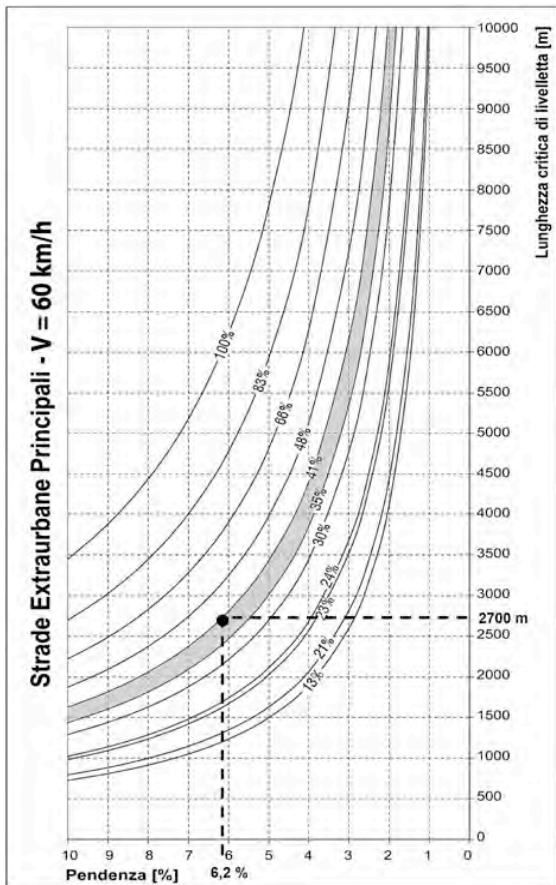


Figura 38 – Lunghezza critica di livelletta, V = 60 km/h, Strade extraurbane principali (esempio).

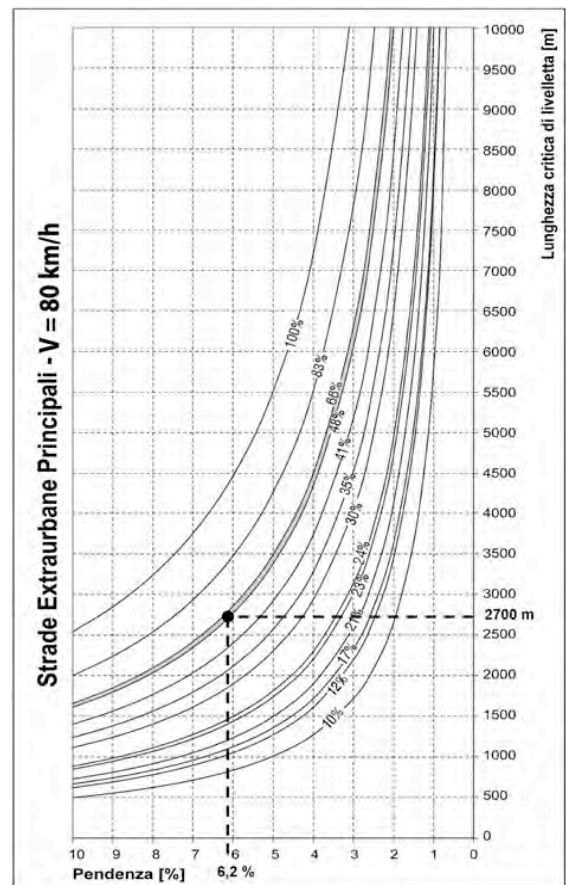


Figura 40 – Lunghezza critica di livelletta, V = 80 km/h, Strade extraurbane principali (esempio).

Nella tabella 13 sono sintetizzati i risultati complessivi dell'analisi svolta.

Livellotta su strada extraurbana principale. L = 2700 m, p = 6,2 %		
Velocità operativa	Intervallo di variabilità delle percentuali di veicoli a rischio	Valore di riferimento della percentuale di veicoli a rischio
40 km/h	(24% ÷ 30%)	26%
50 km/h	(30% ÷ 35%)	32%
60 km/h	(35% ÷ 41%)	40%
70 km/h	(41% ÷ 48%)	47%
80 km/h	(48% ÷ 66%)	57%

Tabella 13 – Percentuali di veicoli commerciali a rischio per la livellotta in esame (esempio).

Ancora una volta, al termine dell'esempio applicativo, occorre ribadire le considerazioni in merito all'approccio progettuale che scaturisce dalla metodologia proposta. Si può infatti notare che le condizioni di rischio minori, e potenzialmente più accettabili, sono quelle legate a valori di velocità compresi tra 40 km/h e 50 km/h, in corrispondenza dei quali si hanno percentuali di veicoli a rischio variabili intorno al 25-30%. Per velocità superiori, anche il livello di rischio si incrementa, fino ad arrivare ad una percentuale di veicoli commerciali a rischio prossima al 60% nel caso di V = 80 km/h.

Il progettista, dunque, nella situazione prospettata dall'esempio ed in tutte quelle analoghe ad essa, si troverà di fronte a tre possibili scelte:

- 1) adottare il minor rischio possibile (quello cioè associato a velocità dell'ordine dei 40-50 km/h), penalizzando però il livello di servizio complessivo del sistema di trasporto;
- 2) scegliere una soluzione di "compromesso", adottando limiti di velocità differenziati per le diverse categorie di mezzi commerciali. Analogamente all'esempio svolto all'inizio del presente paragrafo, si potrebbe pensare di imporre limiti di velocità maggiormente restrittivi per i veicoli di massa più elevata (ad es., quelli di peso superiore a 20 tonnellate);
- 3) accettare il massimo rischio possibile, prevedendo tuttavia quegli accorgimenti di sicurezza passiva, quali i letti di arresto, necessari a fronteggiare l'innescarsi delle situazioni di pericolo susseguenti al guasto del sistema di frenatura dei mezzi pesanti. In tale contesto, però, occorre valutare attentamente le condizioni al contorno (orografia del terreno,

presenza di idonei spazi al margine della strada, conformazione planimetrica del tracciato, etc.).

7. CONCLUSIONI

L'analisi delle prestazioni operative dei mezzi pesanti durante la percorrenza dei tronchi stradali in discesa ha permesso di comprendere come i malfunzionamenti del sistema di frenatura non siano assolutamente eventi da trascurare (il fatto che il numero di incidenti associati al guasto dei freni dei veicoli commerciali sia alquanto ridotto, non deve trarre in inganno), soprattutto in considerazione della gravità delle conseguenze che si potrebbero innescare a seguito della perdita di controllo di un veicolo pesante causata dalla rottura dei freni.

Il presente gruppo di ricerca, da sempre attento alle questioni di sicurezza stradale, si è così voluto dedicare alla caratterizzazione ragionata delle condizioni di criticità attinenti alla percorribilità dei tronchi stradali in discesa. In particolare è stato introdotto il concetto di *lunghezza critica delle livellette in discesa*. Si tratta di un concetto che si può definire senz'altro innovativo, specialmente alla luce del fatto che, fino ad oggi, il giudizio sulla criticità delle livellette era formulato esclusivamente sulla base dei valori della pendenza in salita.

L'approccio adottato per lo studio delle problematiche di sicurezza relative ai tronchi stradali in discesa e, conseguentemente, per la proposta di criteri di progetto/verifica funzionali, si è basato sulla presa in considerazione degli elementi tipici del contesto in cui deve inserirsi il progetto o deve eseguirsi la verifica di sicurezza di un tracciato esistente.

Nello specifico, si sono elaborate due serie di abachi di calcolo attraverso le quali è possibile determinare la criticità delle livellette appartenenti ad un qualsivoglia tracciato stradale extraurbano, adeguatamente qualificato in funzione della composizione qualitativa del flusso di veicoli commerciali.

Si capisce, pertanto, come la metodologia elaborata si discosti significativamente da quegli indirizzi procedurali che possiamo definire "assoluti" o "statici" che hanno condotto, e conducono tuttora, a soluzioni progettuali talvolta inadeguate dal punto di vista della sicurezza (caso emblematico è quello della scelta del raggio planimetrico delle curve circolari, effettuata attraverso criteri che utilizzano come parametri di input valori

talmente bassi del coefficiente di aderenza, da indurre i conducenti dei veicoli a percorrere le curve a velocità maggiore, spesso anche di tanto, di quella di progetto, ma coerente con l'aderenza realmente disponibile ed effettivamente percepita dagli utenti durante la marcia). Nella consapevolezza che il presente contributo si inserisce a pieno titolo all'interno della metodologia dell'analisi del rischio, gli autori si propongono, attraverso studi successivi, di aggiungere nuovi tasselli alla loro procedura attraverso la messa in conto di ulteriori aspetti peculiari dell'ambiente stradale in cui si deve operare.

In particolare, si ritiene che per meglio definire le condizioni di criticità delle livellette stradali in discesa, si debbano prendere in considerazione anche le caratteristiche meteo-climatiche dei siti d'indagine; queste ultime, infatti, determinano la frequenza delle situazioni in cui la marcia su strada avviene in condizioni di pioggia, e, di conseguenza influenzano il rischio che si manifesti il fenomeno di aquaplaning da fusione, tipico dei mezzi pesanti che effettuano la frenatura su fondo stradale bagnato. Si tratta dunque di un aspetto che, in un futuro non lontano, sarà meglio approfondito ed adeguatamente trasposto, sotto forma di procedura di calcolo, all'interno della metodologia esposta nella presente memoria.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. 5/11/2001 – **Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade** – Gazzetta ufficiale n. 3 del 04/01/2002.
- [2] AIPCR (World Road Association) – **Road Safety Manual** – Published by Route Market – 2003.
- [3] CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) – **Catalogo delle pavimentazioni stradali** – Bollettino n° 178 – 1995.
- [4] S. Canale, N. Distefano, S. Leonardi – **Progettare la sicurezza stradale. Criteri e verifiche di sicurezza per la progettazione e l'adeguamento degli elementi delle infrastrutture viarie: intersezioni, tronchi, sovrastrutture, gallerie, opere idrauliche, barriere di sicurezza, illuminazione, segnaletica ed interventi di traffic calming** – EPC Libri – Maggio 2009.
- [5] R. Elvik, T. Vaa – **The handbook of road safety measures** – Elsevier – 2006.
- [6] P. Ferrari, F. Giannini – **Ingegneria stradale. Geometria e progetto di strade** – ISEDI – Settembre 1991.
- [7] E. Hauer, B. Persaud – **Safety analysis of roadway geometric and ancillary features** – Transportation Association of Canada – Ottawa – Canada – 1996.
- [8] R. Lamm, B. Psarianos, T. Mailaender – **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook** – Ed. Mc Graw Hill – 1999.
- [9] S. Leonardi – **Sicurezza stradale e geometrica verticale dei tracciati. Deduzione di una correlazione tra tassi di incidentabilità e pendenze longitudinali delle livellette** – Atti del XII Convegno SIIV – Parma 30-31/10/2002.
- [10] G. Rouchon – **Descentes de forte pente et de grande longueur sur les routes de type autoroute** – Note d'information 52 – Centre de la sécurité et des techniques routières – France – 1997.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l'ing. Marco Messina per la preziosa collaborazione.

AUTORI

Sascia Canale. Professore ordinario in "Strade Ferrovie e Aeroporti" (S.S.D. ICAR/04) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (Sezione: Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti) dell'Università degli Studi di Catania.

E-Mail: scanale@dica.unict.it

Tel. 095/7382202. Fax: 095/7382247.

Salvatore Leonardi. Ricercatore confermato in "Strade Ferrovie e Aeroporti" (S.S.D. ICAR/04) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (Sezione: Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti) dell'Università degli Studi di Catania.

E-Mail: sleona@dica.unict.it

Tel. 095/7382202. Fax: 095/7387912.