

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR

:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA
LEGGE OBIETTIVO N. 443/01
LINEA A.V./A.C. TORINO – VENEZIA Tratta MILANO – VERONA
Lotto Funzionale Brescia-Verona
PROGETTO DEFINITIVO**

**SICUREZZA LINEA A.V./A.C. – AREA INTERCLUSA –
INFRASTRUTTURE STRADALI CONDIZIONI DI INTERFERENZA:
RELAZIONE ILLUSTRATIVA**

IL PROGETTISTA INTEGRATORE

saipem spa
Tommaso Tarantini

Dottore in Ingegneria Civile iscritto all'albo
degli Ingegneri della Provincia di Milano
al n. A23768 - Sez. A Settori:
a) civile e ambientale b) industriale c) dell'informazione
Tel. 02.52020531 Fax 02.52020509
CF. e P.IVA 0082749157

IL PROGETTISTA

saipem spa
Tommaso Tarantini

Dottore in Ingegneria Civile iscritto all'albo
degli Ingegneri della Provincia di Milano
al n. A23768 - Sez. A Settori:
a) civile e ambientale b) industriale c) dell'informazione
Tel. 02.52020531 Fax 02.52020509
CF. e P.IVA 0082749157

ALTA SORVEGLIANZA



Verificato	Data	Approvato	Data

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I	N	0	5	0	0	D	E	2	R	G	S	C	0	0	0	0	0	7	6	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

PROGETTAZIONE GENERAL CONTRACTOR									Autorizzato/Data
Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Consorzio Cepav due Project Director (Ing. F. Lombardi)
0	31.03.14	Emissione per CdS	M.T.	31.03.14	GHEFFI	31.03.14	LAZZARI	31.03.14	
									Data: _____

SAIPEM S.p.a. COMM. 032121

Data: 31.03.14

Doc. N.: 16076_01.doc



Progetto cofinanziato
dalla Unione Europea

CUP: F81H91000000008.

INDICE

1	PREMESSA	4
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
3	LA METODOLOGIA PROPOSTA PER LO STUDIO	6
3.1	SINTESI DELLE ATTIVITÀ CONDOTTE NELLE DIVERSE FASI	7
4	ANALISI BIBLIOGRAFICA	10
4.1	NORMATIVA SPECIFICA IN MATERIA	10
4.2	MODELLI NUMERICI	10
4.3	CRITERI PER LA DEFINIZIONE DEL RISCHIO	11
4.4	CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MEZZI	11
	FASE I: ANALISI DELLE CONDIZIONI DI INCIDENTALITÀ, DI TRAFFICO E DI CIRCOLAZIONE SULLE AUTOSTRADE	13
5	DATI DI INCIDENTALITA'	13
5.1	DATI FORNITI	13
6	DEFINIZIONI DELLE CLASSI VEICOLARI	14
7	DEFINIZIONE DELLE PROBABILITÀ DI SVIO	15
8	DEFINIZIONE TEMPO DI RITORNO PER LE SINGOLE INFRASTRUTTURE	16
	FASE II: IDENTIFICAZIONE DELLE CONDIZIONI DI POTENZIALE INTERFERENZA TRA LE INFRASTRUTTURE STRADALI E LA LINEA A.C./A.V.	17
9	I MODELLI DI SIMULAZIONE MESSI A PUNTO	17
9.1	STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEL VEICOLO SULLA SEDE STRADALE	17
9.2	STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEL VEICOLO IN SVIO NELL'AREA INTERCLUSA CON ZONE DI CONTATTO AL SUOLO ("MODELLO DINAMICO")	22
9.2.1	Descrizione generale dei modelli	22
9.2.2	Modello autovettura	22
9.2.2.1	Calcolo dello spazio di arresto.....	36
9.2.3	Modello camion	37
9.2.4	Modello camion con rimorchio	41
10	LE SIMULAZIONI NUMERICHE PER LA DETERMINAZIONE DELLE CONDIZIONI DI INTERFERENZA	47
10.1	AFFIANCAMENTO CON AUTOSTRADE IN PROGETTO.	47
10.1.1	Autostrada BRE-BE-MI.....	47
10.1.1.1	Dati di Traffico	47
10.1.1.2	Dati di velocità	48
10.1.1.3	Sintesi delle caratteristiche geometriche, di traffico, di incidentalità e di velocità considerate per le diverse classi veicolari, per l'autostrada BREBEMI.....	48
10.1.2	Autostrada ACP.....	50
10.1.2.1	Dati di Traffico	50
10.1.2.2	Dati di velocità	51
10.1.2.3	Sintesi delle caratteristiche geometriche, di traffico, di incidentalità e di velocità considerate per le diverse classi veicolari, per l'autostrada ACP.....	51
11	DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI SIMULATE	54
12	INDIVIDUAZIONE DELLE DISTANZE DI INTERFERENZA	58

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N. 01-IR-E-16076_01

Progetto
IN05

Lotto
00

Codifica Documento
DE2 R G SC 0000 076

Rev.
0

Foglio
3 di 70

13	CRITERI PER LA DEFINIZIONE DELLE AREE DI NON INTERFERENZA	61
13.1	PRINCIPI PER LA DEFINIZIONE DELLE DIVERSE AREE.....	61
13.2	PROCEDURA PER LA DEFINIZIONE DELLE DISTANZE LP DI INTERFERENZA	62
13.3	AFFIANCAMENTO CON L'AUTOSTRADA A4 (ESISTENTE).....	63
	ALLEGATO 1: CONDIZIONI DI CALCOLO RELATIVE ALLE SIMULAZIONI NUMERICHE	65
	APPENDICE A.1: EQUAZIONI DELLA DINAMICA LONGITUDINALE E VERTICALE DEL MODELLO DI AUTOVETTURA.....	67
	APPENDICE A.2: EQUAZIONI DELLA DINAMICA LONGITUDINALE E VERTICALE DEL MODELLO DI CAMION.....	68
	APPENDICE A.3: EQUAZIONI DELLA DINAMICA LONGITUDINALE E VERTICALE DEL MODELLO DI CAMION CON RIMORCHIO (AUTOTRENO).....	69

NB: TUTTI GLI ELABORATI DI RIFERIMENTO CITATI ALL'INTERNO DEL DOCUMENTO SONO DA INTENDERSI CON CODICE COMMESSA "IN05" IN LUOGO DI "A202"

1 PREMESSA

Il presente rapporto riguarda lo studio delle condizioni di interferenza dovute all'affiancamento della linea AC Milano – Verona tra le progressive 68+135 e 131+120e l'interconnessione di Treviglio con le autostrade A4, BRE-BE-MI e "ACP" (ex SP19).

Le diverse autostrade che corrono in affiancamento alla linea AC si presentano come sostanzialmente distinte in quanto:

- La A4-Serenissima: è una autostrada in esercizio a tre corsie per senso di marcia;
- La BRE-BE-MI: è una autostrada in costruzione a due corsie per senso di marcia già predisposta per l'ampliamento a tre corsie;
- La "ACP": è una autostrada in parte in esercizio e in parte in progetto a due corsie che costituisce il potenziamento della attuale SP19;

Per quanto riguarda l'A4, ovvero l'autostrada esistente, si è ipotizzato di non affidare in alcun modo la protezione della linea AV alle barriere di sicurezza eventualmente presenti al margine della autostrada. La situazione si configura quindi come sostanzialmente analoga a quanto già analizzato nello studio relativo all'affiancamento tra la linea AV e l'autostrada A1 nel tratto Milano - Bologna (cfr. Doc. "Sicurezza Linea AV - Area Interclusa - Autostrada A1 - Relazione Generale" cod. A10100VE1SDIA000002 del 01.02.2003), sebbene quest'ultimo fosse riferito ad una sezione autostradale a quattro corsie.

Nella definizione delle condizioni di interferenza nelle zone di affiancamento con la A4 sono stati quindi considerati a favore di sicurezza, i parametri relativi alle interdistanze determinati nel citato studio riferito alla A1.

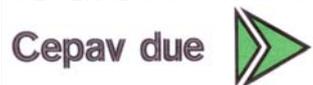
Per quanto attiene le autostrade in progetto si è invece fatto riferimento alle indicazioni contenute nelle sezioni tipo che prevedono, nelle configurazioni in rilevato, la presenza di barriere da bordo laterale. Queste ultime possono essere, ai sensi del vigente D.M. 2367 del 2004, di classe H2 o H3 e si è quindi ritenuto, cautelativamente, opportuno far riferimento alla classe H2 considerando l'effetto di contenimento delle stesse ai fini della definizione delle condizioni di interferenza.

La presenza di barriere di classe non inferiore ad H₂ consente il totale contenimento delle autovetture e l'analisi, per le sezioni in rilevato, sarà quindi limitata al solo studio del comportamento dei mezzi pesanti.

Le indicazioni fornite in questo documento consentono di definire le distanze minime per le quali un veicolo in svio non dovrebbe invadere la sede ferroviaria, in assenza di protezioni nell'area interclusa.

Queste indicazioni fanno riferimento alle condizioni di marcia di ciascuna delle autostrade interferenti. Tali indicazioni non si applicano quindi ai tratti nei quali la linea AV si trovi in prossimità di rampe di svincolo autostradali; in questi casi specifici dovranno essere condotte verifiche ad hoc.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N. 01-IR-E-16076_01

Progetto
IN05

Lotto
00

Codifica Documento
DE2 R G SC 0000 076

Rev.
0

Foglio
5 di 70

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Sicurezza Linea AV - Area Interclusa - Autostrada A1 - Relazione Generale”
(cod. A10100VE1SDIA000002 del 01.02.2003).

3 LA METODOLOGIA PROPOSTA PER LO STUDIO

L'obiettivo primario dello studio è quello di identificare le configurazioni dell'area interclusa per le quali possa esserci una interferenza tra la linea A.V. e le autostrade adiacenti.

L'identificazione della potenziale interferenza è basata su una stima del livello di rischio associata ad una data configurazione dell'area interclusa, valutato in termini di "tempo di ritorno" di uno dei seguenti eventi:

- fuoriuscita di un veicolo con mantenimento del contatto al suolo e potenziale risalita del mezzo sul corpo del rilevato ferroviario (problema associabile sia ad un veicolo leggero che ad un veicolo pesante);
- fuoriuscita di un veicolo o di parte di esso dalla sede stradale con perdita di contatto dal suolo e possibile collisione con la linea ferroviaria (problema potenzialmente associabile allo svio di un veicolo leggero o alla perdita di carico);

La massa critica al di sotto della quale una eventuale invasione della linea ferroviaria non costituisce un problema per la funzionalità della stessa è stata definita come quella associabile ad una autovettura (circa 1500 kg). Non è stato quindi considerato il possibile svio di un motociclo.

Per identificare la probabilità (espressa come un "tempo di ritorno" dell'evento) che avvenga uno dei due eventi sopra descritti è necessario definire:

- la traiettoria, la massa e la velocità che deve avere un veicolo in svio affinché possa avvenire una invasione della linea ferroviaria, per una data configurazione dell'area interclusa;
- il tasso di incidentalità associato ai soli incidenti riconducibili ad uno svio laterale del veicolo distinti in funzione delle diverse classi veicolari coinvolte nell'evento incidentale;
- il volume di traffico nel tratto in esame ed il tasso di crescita da considerare per la previsione del traffico futuro;
- la distribuzione delle velocità e delle potenziali collocazioni dei veicoli in carreggiata (considerando che un veicolo in svio possa avere un angolo di impatto differente in base alla propria velocità, alle caratteristiche fisiche e alla corsia nella quale transita al momento della perdita di controllo).

Lo studio si articola su tre fasi distinte:

FASE I: analisi delle condizioni di incidentalità, di traffico e di circolazione sulle autostrade interferenti;

FASE II: identificazione delle condizioni di potenziale interferenza tra le diverse autostrade e la linea A.V.;

FASE III: studio di possibili interventi di protezione della linea A.V. in presenza di interferenza con tempi di ritorno non accettabili.

Il presente rapporto riguarda i risultati della FASE I e della FASE II dello studio.

3.1 Sintesi delle attività condotte nelle diverse fasi

FASE I: analisi delle condizioni di incidentalità, di traffico e di circolazione sulle autostrade interferenti

Lo scopo di questa fase dello studio è quello di comprendere quale sia la probabilità che avvenga un evento incidentale con caratteristiche tali da costituire un potenziale pericolo per la linea A.V. Le “caratteristiche” dell’evento incidentale sono state definite come una combinazione di angolo di svio, velocità del mezzo, massa e tipo di mezzo.

Per la definizione del possibile angolo di svio da utilizzare nelle successive simulazioni è stata analizzata la presumibile traiettoria percorsa da un veicolo in svio che proviene da una delle corsie che compongono la carreggiata. La probabilità che un tipo di veicolo si trovi in una data corsia è stata definita a partire dai seguenti dati:

- Per la A4 e la BRE-BE-MI si è fatto riferimento ai dati rilevati sulla spira di Piacenza in occasione del citato studio relativo all’interferenza con l’A1;
- Per la Bretella e per la “ACP” si sono invece utilizzati dati relativi ad una sezione autostradale a due corsie per senso di marcia con prevalenza di traffico pendolare, già a disposizione del Progettista.

Per quanto riguarda la velocità è stata definita la distribuzione delle velocità tenute dagli utenti sul tratto in esame, distinta per classi veicolari. Questa analisi è stata basata sui medesimi dati illustrati con riferimento alla distribuzione dei veicoli per corsia.

Per quanto riguarda il tasso di incidentalità si è fatto riferimento ai dati già utilizzati per lo studio dell’affiancamento con l’A1 ovvero gli incidenti avvenuti in carreggiata Nord tra l’Allacciamento A1/A22 e Milano Sud/Lodi che hanno interessato il margine destro, rilevati su un arco temporale di cinque anni.

Il dato specificatamente riferito alle diverse classi di veicoli pesanti, normalizzato rispetto alla percorrenza complessiva dei mezzi pesanti in cinque anni, è stato considerato rappresentativo anche dell’incidentalità potenziale sulle infrastrutture di nuova realizzazione.

FASE II: identificazione delle condizioni di potenziale interferenza tra le diverse autostrade e la linea A.V.

L’obiettivo principale di questa fase è definire le condizioni per le quali si possa considerare che le autostrade non abbiano una interferenza con la linea A.V.

In questa fase sono state definite le configurazioni per le quali le diverse condizioni di possibile svio non sembrano poter interessare la linea A.V., ovvero quelle per le quali il tempo di ritorno dell’evento è considerato accettabile. In queste configurazioni infatti non vi è necessità di studiare interventi ad hoc per la protezione della linea A.V. Possono quindi essere mantenute le sezioni già previste in progetto, senza ulteriori verifiche, in tutte le aree dove queste configurazioni si applicano.

Per comprendere la dinamica del potenziale svio di un mezzo che, dalla sede autostradale, va ad invadere la linea ferroviaria occorre definire la traiettoria del mezzo in svio in relazione alla configurazione dell’area interclusa.

A tal fine sono stati identificati i parametri geometrici dell'area interclusa necessari per definire la configurazione della stessa ai fini dello svio:

- altezza del rilevato ferroviario sul piano campagna (H_F),
- altezza del rilevato stradale sul piano campagna (H_S),
- proiezione orizzontale della distanza tra la piattaforma ferroviaria e il limite invalicabile della linea ferroviaria (L_P),
- presenza o meno del fosso di guardia al piede del rilevato stradale.

Il limite da considerare come invalicabile per la linea ferroviaria (definito in seguito: "limite ferroviario") è stato individuato nel limite del Gabarit ferroviario, come da indicazioni Italferr per l'affiancamento tra la linea AV e l'autostrada A1 - Tratta MI-BO.

Analisi della possibile fuoriuscita di un veicolo con mantenimento del contatto al suolo e potenziale risalita del mezzo sul corpo del rilevato ferroviario (problema associabile sia ad un veicolo leggero che ad un veicolo pesante).

Per questo tipo di analisi sono stati appositamente messi a punto una serie di modelli dinamici (descritti nel successivo capitolo 9) in grado di rappresentare un veicolo che percorre una data geometria costituita dalle scarpate dei rilevati e dalla configurazione dell'area interclusa.

Lo studio è stato effettuato simulando diverse configurazioni dell'area interclusa ovvero diverse altezze dei rilevati (quello stradale e quello ferroviario), della trincea autostradale assumendo invece sempre presente il fosso di guardia al piede dei rilevati stradali e ferroviari.

Tutti i rilevati sono stati assunti avere una pendenza delle scarpate pari a 2/3, conformemente alle configurazioni standard di progetto sia le autostrade sia per la linea ferroviaria A.V.

Le condizioni di svio (velocità del mezzo e corsia da cui avviene lo svio) sono state definite in modo da ottenere una probabilità dell'evento associato ad un dato tempo di ritorno di 100 anni sull'intera tratta in affiancamento.

Il tempo di ritorno dell'evento è definito come quel numero di anni T tale che:

$$\sum_{K=1}^T PS_k = 1$$

dove PS_k rappresenta la "probabilità di svio" ovvero la probabilità che avvenga un evento incidentale, per una data classe veicolare e corsia, con una velocità uguale o superiore a quella fissata. Maggiori indicazioni sulla modalità di definizione della probabilità di svio sono fornite nel paragrafo 7.

Da questa prima analisi è stato possibile definire la distanza minima tra le piattaforme autostradali ed il limite ferroviario tale che non si abbia invasione della linea da parte di un veicolo in svio.

Analisi della possibile fuoriuscita di un veicolo dalla sede stradale con perdita di contatto dal suolo e possibile collisione con la linea ferroviaria (problema potenzialmente associabile allo svio di un veicolo leggero o alla perdita di carico).

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N. 01-IR-E-16076_01

Progetto
IN05

Lotto
00

Codifica Documento
DE2 R G SC 0000 076

Rev.
0

Foglio
9 di 70

Per le configurazioni che risultano non avere interferenza sulla base delle simulazioni descritte al precedente punto è stato verificato che un veicolo in svio dalla sede stradale con perdita di contatto dal suolo non vada ad invadere il limite ferroviario.

Questa verifica è stata condotta inserendo nel modello che studia il moto del veicolo nell'area di svio la possibilità di un distacco dal suolo al momento dell'uscita dalla sede stradale o dopo il superamento di un fosso di guardia così come descritto nel successivo capitolo 9.

Le distanze d'interferenza, calcolate come descritto in precedenza, tengono quindi già conto di questa verifica.

4 ANALISI BIBLIOGRAFICA

4.1 Normativa specifica in materia

La ricerca bibliografica condotta ha evidenziato la carenza di una normativa specificatamente riferita alla protezione delle linee ferroviarie nei confronti del possibile svio di un mezzo da una infrastruttura stradale in affiancamento.

Il comitato CEN TC256 “Railway applications” ha nel suo piano di lavoro due norme sull’argomento:

- WI 00256123 “Railway applications – passive safety – full size crash test and numerical simulation requirements”;
- WI 00256155 “Railway applications – lateral protection – protection of fences, detection of vehicle fallen on tracks”

Allo stato attuale dei lavori del TC256, i Work Item sopra descritti non sono stati ancora avviati e non sono quindi disponibili documenti da usare come riferimento.

4.2 Modelli numerici

Per l’analisi del comportamento dei mezzi nell’area interclusa tra autostrada e linea ferroviaria ad alta velocità si sono utilizzati i seguenti testi o articoli:

- “Giornata di studio sul tema: La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali”, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Roma 20-21 febbraio 1997; Articolo di M. Perneti, “Indagine sul comportamento del veicolo e della barriera in una prova di crash mediante analisi numerica”. Questo articolo illustra un’indagine effettuata mediante analisi numerica su ciò che accade nel corso dell’urto tra veicoli pesanti, barriere di protezione ed eventuali ostacoli. Lo studio è condotto sulla base di un modello agli elementi finiti appositamente sviluppato. Per lo studio dell’interferenza tra la A1 e la linea AV si è analizzato il procedimento per la verifica allo scavalco ai fini della valutazione dell’effetto dei fossi di guardia.
- Funaioli, Maggiore, Meneghetti, “Lezioni di meccanica applicata alle macchine” Vol.1. Questo testo illustra il modello quasi statico del veicolo con masse sospese valutando, la risposta a rollio con forze variabili nel tempo, la risposta ad un gradino di forza ed il limite di ribaltamento in funzione dello smorzamento delle sospensioni. Per lo studio dell’interferenza tra la A1 e la linea AV si è partiti da tale testo per la definizione del modello dinamico e per la valutazione dell’effetto dei fossi di guardia ed il comportamento del veicolo in presenza di rilevati.
- Ariano R., “Circolazione e costruzioni stradali”, Ed. Milano: G.G.Gorlich. Questo testo contiene una schematizzazione analitica per la modellazione dell’urto di un “veicolo molleggiato con ruota rigida su ostacolo”. Questo studio è stato analizzato in fase di definizione dell’effetto dissipativo connesso a con la presenza di un fosso di guardia al piede del rilevato.

- “Le stadi”, Marzo/Aprile 1994 n°1301 Anno XCVI; Articolo di Antonio D’Andrea, “Traiettorie dei veicoli stradali in assenza di aderenza”.
Assimilato il veicolo a un punto materiale dotato di massa, vincolato ad appartenere al piano del moto e avente velocità iniziale non nulla, viene risolto il problema della determinazione della traiettoria in assenza di aderenza per ciascuna delle molteplici forme teoriche della superficie stradale.
Per lo studio dell’interferenza tra la A1 e la linea AV il procedimento è stato implementato in modo da poter tenere conto anche di un’aderenza trasversale.
- “2nd International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction”, “Friction potential and safety: prediction of handling behavior”, Firenze 23 febbraio 2001; Articolo di Bérange Galindo, “Simulating potentially dangerous situations”.
Questo articolo tratta la potenziale instabilità di un veicolo stradale in relazione alle condizioni di aderenza.
Nel presente lavoro si è fatto riferimento a questo studio per definire gli angoli di deriva da considerare nell’implementazione del modello che studio il comportamento del veicolo sulla sede stradale.
- “A policy on geometric design of highways and streets”, 1994, American association of state highway and transportation officials.
Questo manuale è stato utilizzato per la fase di definizione della resistenza a rotolamento necessaria per implementare il “modello dinamico”.
- “Studio sulla resistenza al rotolamento e relativi coefficienti condotto dalla MAN”, www1.mn.man.de/manted/aufbaurichtlinien
Questo studio contiene utili riferimenti per la definizione della resistenza al rotolamento su superfici diverse dalle pavimentazioni stradali.

4.3 Criteri per la definizione del rischio

- Alfredo H-S. Ang, Wilson H.Tang, “Probability concepts in engineering planning & design”, Vol. I-Basic Principles, Vol.II-Decision, risk and reliability, Editrice John Wiley & sons.
Questo testo contiene i principi base e le applicazioni specifiche relative alle analisi del rischio nel campo dell’ingegneria civile.

4.4 Caratteristiche meccaniche dei mezzi

- D. Min. LL.PP 3 giugno 1998 “ Ulteriore aggiornamento delle istruzioni tecniche per la progettazione, l’omologazione e l’impiego delle barriere stradali di sicurezza e delle prescrizioni tecniche per le prove ai fini dell’omologazione”.
Per lo studio dell’interferenza tra la A1 e la linea AV è stato utilizzato per definire le masse delle diverse classi veicolari considerate.
- D. L.vo 30 aprile 1992 n°285 “Nuovo Codice della Strada”.
Per lo studio dell’interferenza tra la A1 e la linea AV è stato utilizzato per definire le masse limite di legge, le lunghezze massime ed il numero di assi, delle diverse classi veicolari considerate.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N. 01-IR-E-16076_01

Progetto
IN05

Lotto
00

Codifica Documento
DE2 R G SC 0000 076

Rev.
0

Foglio
12 di 70

- “Schede tecniche”, Scania, Marzo 2002.
Le schede tecniche riportano i valori relativi a: massa, carico trasportabile, ingombri cinematici, caratteristiche geometriche e prestazioni riferiti a tutto il parco veicoli della Scania.
- Giancarlo Genta, “Meccanica dell’autoveicolo”, marzo 2000, Levrotto & Bella Torino;
Questo testo contiene indicazioni relative ai dati aerodinamici, inerziali e meccanici dei veicoli necessari per implementare il “modello dinamico”. Il medesimo testo contiene anche le formulazioni analitiche necessarie per definire le resistenze al rotolamento e le indicazioni relative al comportamento dinamico del veicolo.

FASE I: ANALISI DELLE CONDIZIONI DI INCIDENTALITÀ, DI TRAFFICO E DI CIRCOLAZIONE SULLE AUTOSTRADE

5 DATI DI INCIDENTALITA'

5.1 Dati forniti

Per definire la probabilità di svio nelle diverse condizioni si rende necessario definire il tasso di incidentalità da associare alle singole classi veicolari.

Ai fini del presente studio è stato definito un tasso di incidentalità TINC, associato ai soli incidenti che hanno coinvolto il margine destro in cui è coinvolto un mezzo di una data classe "C" ovvero:

$$TIN_c = \frac{\sum_{j=1997}^{2001} (N_{jc}) \cdot 100 \cdot 10^6}{\sum_{j=1997}^{2001} \sum_i (L_i \cdot TGM_{ij}) \cdot 365}$$

dove:

N_{jc} è il numero di veicoli di classe c coinvolti in incidenti nell'anno j,

L_i è la lunghezza dell'i-esima tratta elementare che costituisce il tratto studiato (da Milano a Bologna era diviso in un totale di 10 tratte elementari),

TGM_{ij} è il traffico giornaliero medio relativo alla tratta i-esima e all'anno j (dal 1997 al 2001).

Per l'analisi delle infrastrutture in progetto è stato definito invece l'indice TINC,V in cui il tasso di incidentalità è riferito al solo traffico di mezzi pesanti e non al TGM complessivo ovvero:

$$TIN_{c,v} = \frac{\sum_{j=1997}^{2001} (N_{jc}) \cdot 100 \cdot 10^6}{\sum_{j=1997}^{2001} \sum_i \left(L_i \cdot \frac{V_{P-ij}}{100} \cdot TGM_{ij} \right) \cdot 365}$$

dove:

V_{P-ij} è la percentuale di mezzi pesanti nella mix.

6 DEFINIZIONI DELLE CLASSI VEICOLARI

Per lo studio di tutte le autostrade in affiancamento alla linea AC si sono utilizzate 9 classi veicolari distinte in 7 intervalli di lunghezza:

- 1) lunghezza $L < 5$ m,
- 2) lunghezza $5 < L \leq 7.5$ m,
- 3) lunghezza $7.5 < L \leq 8.5$ m,
- 4) lunghezza $8.5 < L \leq 10$ m,
- 5) lunghezza $10 < L \leq 12$ m,
- 6) lunghezza $12 < L \leq 15$ m,
- 7) lunghezza $L > 15$ m,

suddividendo poi la classe di lunghezza $8.5 < L \leq 10$ m e la classe $10 < L \leq 12$ m in ulteriori due classi. Ad ogni classe veicolare è stato associato un veicolo tipo di lunghezza, numero di assi, caratteristiche fisiche e massa fissate. Per la definizione della massa si è fatto riferimento alle masse previste, per veicoli con caratteristiche fisiche confrontabili, dalla norma UNI 1317 relativa alle prove di crash su barriere di sicurezza stradale.

Per le classi C2 e C5, per le quali non è prevista una classe equivalente nella citata norma la massa è stata desunta riducendo per analogia la massima prevista dall'art.62 del Nuovo Codice della Strada del '92.

Le caratteristiche fisiche dei mezzi non espressamente indicate nelle citate norme UNI sono state definite in base ai dati contenuti nelle schede tecniche della SCANIA, per i mezzi pesanti, o reperibili in letteratura, per le autovetture.

Sono state pertanto individuate le nove classi veicolari descritte in Tabella 1 a cui è associata la rispettiva massa:

	Tipologia di mezzo	Massa (kg)	Lunghezza (m)	Altezza del baricentro (m)	Carreggiata delle ruote (m)
Classe C1	Autovetture	1500	$L < 5$	0.53	1.5
Classe C2	Autocarri piccoli a due assi	6000	$5 < L \leq 7.5$	1.5	2
Classe C31	Autocarri a due assi	13000	$7.5 < L \leq 8.5$	1.5	2
Classe C32	Autocarri a due assi	13000	$8.5 < L \leq 10$	1.5	2
Classe C41	Autocarri a tre assi	16000	$8.5 < L \leq 10$	1.5	2
Classe C42	Autocarri a tre assi	16000	$10 < L \leq 12$ m	1.5	2
Classe C5	Autoarticolati e Autotreni	26000	$12 < L \leq 15$ m	1.9	2
Classe C6	Autoarticolati e Autotreni	38000	$L > 15$ m	1.4	2
Classe C7	autobus	13000	$10 < L \leq 12$ m	1.9	2

Tabella 1: definizione delle classi veicolari per le simulazioni

7 DEFINIZIONE DELLE PROBABILITÀ DI SVIO

La probabilità di svio (PS) rappresenta la probabilità che avvenga un evento incidentale, per una data classe veicolare e corsia, con una velocità uguale o superiore a quella fissata.

Per una determinata classe veicolare si può calcolare la velocità associata ad un determinato percentile nota la velocità media, la deviazione standard e Z_R (coefficiente di deviazione normale tabellato) tramite la seguente relazione:

$$V_{x\%} = V_{media} + Z_R \cdot \sigma$$

Per l'analisi delle condizioni di affiancamento con le infrastrutture in progetto, conoscendo:

- i chilometri complessivamente percorsi dai mezzi pesanti in un anno nel tratto in esame:

$$L_V = \sum_i \left(L_i \cdot TGM_i \cdot \frac{V_P}{100} \right) \cdot 365$$

dove:

L_i è la lunghezza della i -esima tratta elementare,
 TGM_i rappresenta il traffico nella medesima tratta,
 V_P è la percentuale di mezzi pesanti,

- il tasso d'incidentalità riferito ai soli mezzi pesanti relativo alla classe ($TIN_{c,v}$),
- la probabilità che un veicolo della data classe si trovi in una data corsia (P_{corsia})
- l'affidabilità (R_{vel}) ovvero il percentile rispetto al quale è stata calcolata la velocità,

si può quindi calcolare la probabilità di svio con la seguente espressione:

$$PS = L_V \cdot \left[(1 - R_{vel}) \cdot P_{corsia} \cdot TIN_{c,v} \right]$$

8 DEFINIZIONE TEMPO DI RITORNO PER LE SINGOLE INFRASTRUTTURE

Il tempo di ritorno dell'evento incidentale è stato fissato pari a 100 anni, per l'intera tratta in affiancamento tra la linea AV e le infrastrutture interferenti, come da indicazioni Italferr per l'affiancamento tra la linea AV e l'autostrada A1 - Tratta MI-BO.

Essendo quattro le infrastrutture in affiancamento per ognuna di esse si è calcolato il tempo di ritorno che compete.

Essendo p il numero di eventi incidentali annuo per km, che si assume debba restare uguale per tutte le infrastrutture analizzate, P gli eventi l'anno e $T_R = \frac{1}{PS}$ il tempo di ritorno che è fissato pari a 100 anni per l'intera tratta abbiamo:

$$\frac{1}{PS} = 100 \Rightarrow P = 0.01 \text{ ma } PS = \sum_{k=1}^4 p \cdot l_k = p \cdot l_{tot} = 0.01$$

dove:

l_k è la lunghezza della generica autostrada considerata

$$PS_k = p \cdot l_k = \frac{0.01}{l_{TOT}} \cdot l_k \text{ da cui } T_{Rk} = \frac{1}{0.01} \cdot \frac{l_{TOT}}{l_k}$$

Si ricavano così i tempi di ritorno da considerare per ciascuna autostrada in progetto che risultano:

$$\begin{aligned} T_R^{\text{brebemi}} &= 250 \text{ anni} \\ T_R^{\text{ACP}} &= 550 \text{ anni} \\ T_R^{\text{bretella}} &= 5000 \text{ anni} \end{aligned}$$

Per la A4 sono state utilizzate, come detto in precedenza, le soluzioni studiate con riferimento alla A1.

FASE II: IDENTIFICAZIONE DELLE CONDIZIONI DI POTENZIALE INTERFERENZA TRA LE INFRASTRUTTURE STRADALI E LA LINEA A.C./A.V.

9 I MODELLI DI SIMULAZIONE MESSI A PUNTO

9.1 Studio del comportamento del veicolo sulla sede stradale

Per la valutazione del comportamento di un veicolo in svio dall'autostrada è necessario determinare la velocità e l'angolo con cui il veicolo abbandona la sede stradale.

Se da un lato si può definire, la distribuzione delle velocità di marcia per i diversi tipi di mezzi circolanti e la distribuzione dei mezzi nelle diverse corsie che compongono la carreggiata, non è possibile reperire dati circa il possibile angolo di svio e la velocità con cui il mezzo esce dalla sede stradale.

Tali parametri sono stati allora determinati mettendo a punto uno specifico modello per la valutazione delle condizioni di moto sulla piattaforma stradale basato sulle seguenti ipotesi:

- l'utente perde il controllo del mezzo e non applica alcuna azione frenante;
- il mezzo arriva al margine della piattaforma percorrendo una traiettoria parabolica al limite di stabilità (vedi Figura 1).

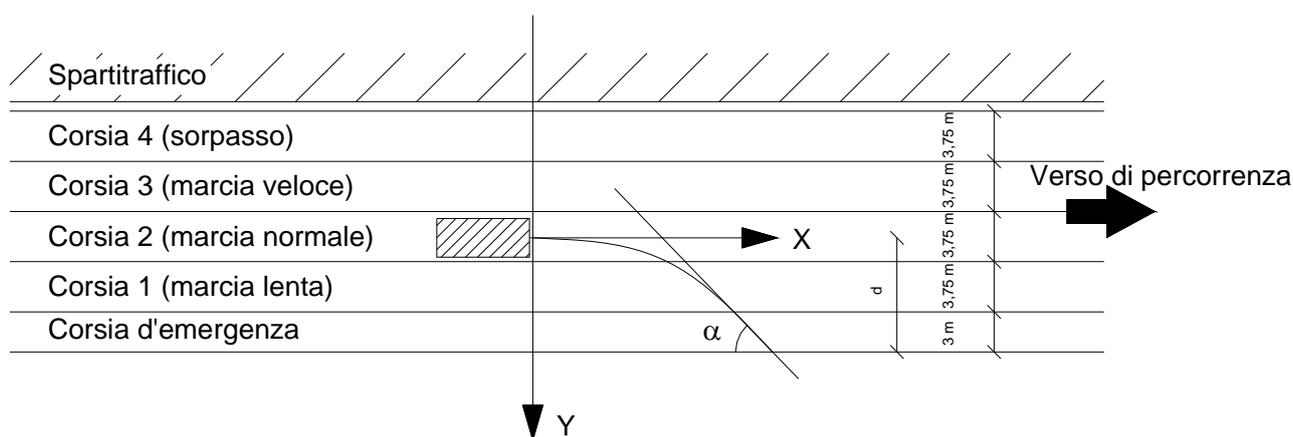


Figura 1: schematizzazione della traiettoria percorsa dal mezzo in carreggiata

La forma della parabola è stata definita ipotizzando che la curvatura massima (nel punto in cui il mezzo comincia a divergere dalla sua traiettoria rettilinea) sia tale da non superare le seguenti condizioni limite:

- il limite di ribaltamento del mezzo;
- il limite di aderenza impegnabile per un dato valore di deriva.

L'equazione della parabola è stata quindi definita come segue:

$$y = a \cdot x^2 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{con } y'' = \frac{1}{R(x=0)} = 2a \text{ da cui } y = \frac{1}{2 \cdot R(x=0)} \cdot x \quad \text{Eq. 2}$$

$$\text{dove } R(x=0) = \max \left\{ \begin{array}{l} R_{\text{min_scorrimento}} \\ R_{\text{min_ribaltamento}} \end{array} \right\} \quad \text{Eq. 3}$$

In queste condizioni l'angolo di svio assunto dal mezzo al limite della piattaforma stradale è individuato come:

$$\alpha = \arctan \left(\sqrt{\frac{2 \cdot d}{R(x=0)}} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

Dove:

d è la distanza tra l'asse della corsia da cui avviene lo svio ed il limite esterno della corsia di emergenza.

Nell'Eq. 3 $R_{\text{min_scorrimento}}$ è il valore limite del raggio di curvatura al di sotto del quale la forza tangenziale supera la aderenza massima disponibile al contatto pneumatico pavimentazione (il mezzo comincia a slittare lateralmente) ovvero:

$$R_{\text{min_scorrimento}} = \frac{v^2}{g \cdot f_{t_max}} \quad \text{Eq. 5}$$

dove:

v è la velocità del mezzo in m/s;

g è l'accelerazione di gravità ($\cong 9.81 \text{ m/s}^2$)

f_{t_max} è l'aderenza trasversale massima nelle date condizioni in cui avviene il moto

Il valore di aderenza massima è fortemente variabile in funzione di diversi parametri ed in particolare:

- caratteristiche del manto;
- condizioni dell'interfaccia pneumatico/pavimentazione;
- velocità del mezzo;
- tipo di pneumatico;
- scolpitura del battistrada;
- angolo di deriva.

Per lo studio, la condizione più critica è quella che fornisce valori di aderenza maggiori, pertanto si è considerato una pavimentazione asciutta e con buone caratteristiche di tessitura superficiale.

In queste condizioni l'effetto della velocità diventa marginale e può essere trascurato, così come l'effetto della scolpitura del battistrada.

Le curve di aderenza su una pavimentazione tipo nelle suddette condizioni sono state definite prendendo i risultati delle sperimentazioni condotte nel progetto VERT (Progetto BRPR-CT97-0461 finanziato dalla EU per il triennio 1997-2000 in cui sono stati coinvolti gli scriventi) su una pavimentazione con buone caratteristiche di tessitura (altezza in sabbia paria a 0.96 mm, che può essere definita una macro-rugosità superficiale "grossa", secondo le indicazioni della CNR B.U. 94/1983, "Norme per la misura delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni - Metodo di prova per la misura della macro-rugosità superficiale con il sistema della altezza in sabbia").

In Figura 2 sono riportate alcune curve di aderenza trasversale estratte dal database del progetto VERT riferite a diversi tipi di pneumatici commerciali che viaggiano sulla pavimentazione sopra descritta. Per quanto visto in precedenza, le condizioni più critiche sono quelle associabili ai valori di aderenza maggiori si è ritenuto opportuno fare riferimento al pneumatico che offre i valori massimi di aderenza (pneumatico normale, con larghezza del battistrada pari a 225 mm).

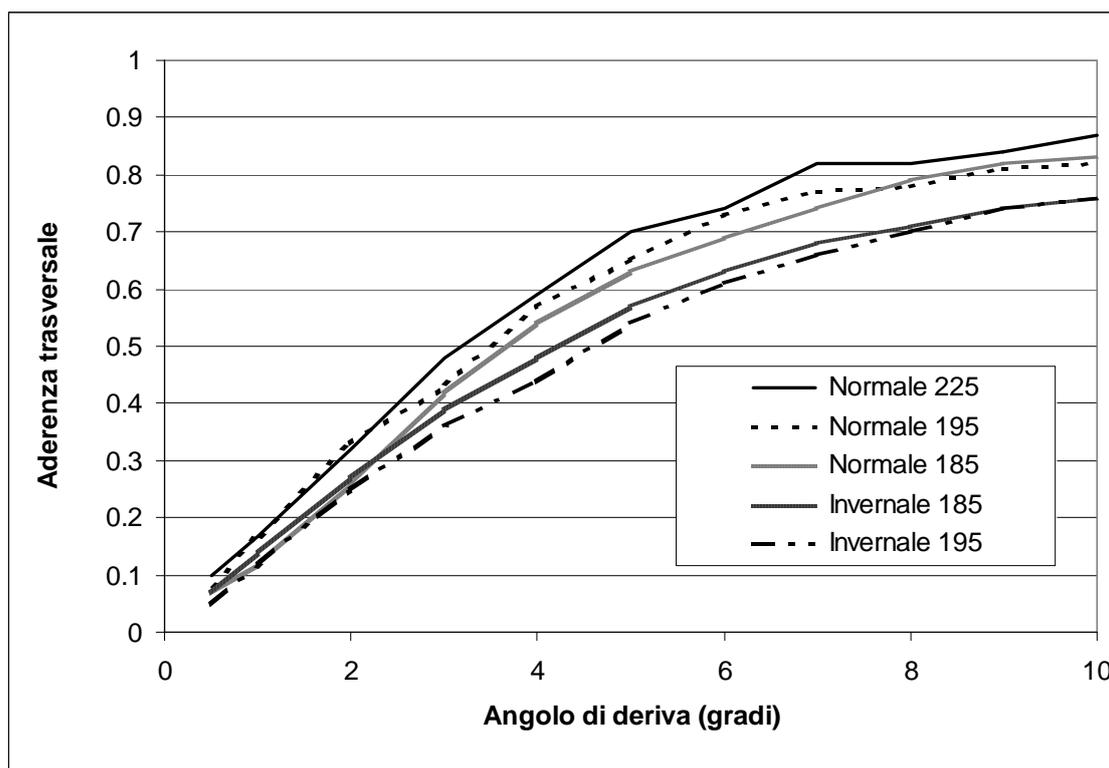


Figura 2: curve di deriva considerate (per diversi tipi di pneumatici) estratte dal database del progetto VERT (BRPR-CT97-0461).

Come si può notare dal diagramma di Figura 2 l'aderenza cresce fortemente al crescere dell'angolo di deriva (ϕ) e per definire il valore di f_{t_max} da adottare nell'Eq. 5 occorre fissare il limite massimo di deriva con cui il veicolo può percorrere la parabola illustrata in Figura 1.

Nel citato progetto VERT sono state definite 4 classi di deriva (Galindo, 2001) corrispondenti alle seguenti soglie:

- I. angolo di deriva massimo durante la manovra minore di 1°

- II. angolo di deriva massimo durante la manovra tra 1° e 5°
- III. angolo di deriva massimo durante la manovra tra 5° e 10°
- IV. angolo di deriva massimo durante la manovra superiore a 10°

Dal citato lavoro di Galindo, si desume che la maggior parte delle manovre (anche quelle in condizioni di potenziale pericolo simulate nel progetto VERT), si risolve con angoli di deriva minori di 1° (233 su 284 situazioni considerate, pari all'82%). Il 16.5% delle simulazioni ha portato ad angoli tra 1 e 5% e solo 4 simulazioni (1.4%) hanno mostrato angoli tra 5° e 10°. Le simulazioni con angoli di deriva maggiori hanno spesso portato al blocco del modello di simulazione per una probabile perdita di controllo del mezzo.

I risultati sopra illustrati confermano che situazioni con angoli tra 1° e 5° corrispondono già a condizioni di potenziale pericolo mentre per angoli superiori si ha generalmente una perdita di controllo del veicolo che non segue quindi più la traiettoria attesa.

Le verifiche sono state allora condotte ipotizzando una deriva massima per il veicolo in svio di 5° da cui, considerando la curva di aderenza migliore di Figura 2, il coefficiente di aderenza massima da utilizzare nella Eq. 5 risulta pari a 0.72.

Per quanto riguarda la definizione del raggio minimo affinché non si inneschi un fenomeno di ribaltamento del mezzo ($R_{min_ribaltamento}$ di Eq. 3) questo può essere determinato, una volta definite le caratteristiche geometriche dei diversi mezzi considerati, come segue:

$$R_{min_ribaltamento} = \frac{2 \cdot v^2 \cdot h_G}{g \cdot b_r} \quad \text{Eq. 6}$$

dove:

h_G è l'altezza del baricentro del mezzo considerato

b_r è la carreggiata (distanza trasversale tra gli assi delle ruote)

Una volta definita la traiettoria percorsa dal veicolo in svio la velocità assunta dal mezzo al momento dell'uscita di carreggiata è stata stimata considerando che, durante il percorso, il mezzo perda energia per effetto dei seguenti meccanismi dissipativi:

- lavoro compiuto dalle forze di contatto tra pneumatico e pavimentazione per effetto dello strisciamento (L_f);
- lavoro compiuto dalla resistenza aerodinamica (L_a);
- lavoro compiuto dal freno motore (ipotizzando che il guidatore smetta di accelerare al momento della perdita di controllo) (L_m).

Il lavoro compiuto dalle forze di contatto può essere stimato, in un intervallo di tempo infinitesimo (dt) nel quale il veicolo percorre uno spazio ds a velocità costante ($v(t)$), come:

$$dL_f = m \cdot \frac{v(t)^2}{R} \cdot \sin(\varphi(v(t))) \cdot dS \quad \text{Eq. 7}$$

L'angolo di deriva da considerare (φ) varia istante per istante in quanto è quello che, per una data curva di aderenza, porta ad avere una aderenza trasversale tale da equilibrare la forza centrifuga associabile alla velocità del mezzo in quel dato istante. Poiché la velocità si riduce lungo il percorso per effetto delle forze resistenti tale valore di angolo di deriva si deve ridurre lungo la traiettoria percorsa dal veicolo.

Il lavoro compiuto dalla resistenza aerodinamica nel medesimo intervallo dt , per un mezzo di massa m , è definibile come:

$$dL_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v(t)^2 \cdot dS \quad \text{Eq. 8}$$

dove:

ρ è la massa volumica dell'aria in condizioni standard,

C_x è il coefficiente di resistenza aerodinamica,

S è la superficie maestra del mezzo in direzione ortogonale alla forza resistente che si vuole considerare.

Per i diversi mezzi sono state assunti i seguenti valori per i diversi parametri:

	Autovetture	Autocarri piccoli (massa fino a 6T)	Autocarri grandi (massa superiore a 6 T), autotreni ed autoarticolati
ρ	1.15 kg/m ³		
C_x	0.35	0.45	0.65
S	2.1 m ²	4 m ²	5.14 m ²

Il lavoro compiuto dal freno motore, infine, è stato valutato considerando che la decelerazione dovuta all'azione frenante del motore (d_m) può essere espressa come una funzione linearmente crescente della velocità da cui il lavoro può essere espresso come:

$$dL_m = k \cdot v(t) \cdot 3.6 \cdot m \cdot dS \quad \text{Eq. 9}$$

dove:

$k=0.07$ per autovetture (con motori a benzina)

$k=0.1$ per camion (con motori diesel)

Al termine dell'intervallo infinitesimo dt la velocità assunta dal mezzo può essere valutata come:

$$v(t + dt) = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(\left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v(t)^2 \right) - dL_f - dL_a - dL_m \right)}{m}} \quad \text{Eq. 10}$$

Il lavoro complessivamente speso nel percorso tra il momento dello svio e l'uscita dalla piattaforma, di lunghezza complessiva S_p , può quindi essere espresso come:

$$L = \int_0^{S_p} \left(\left(m \cdot \frac{v(t)^2}{R} \cdot \sin(\varphi(v(t))) \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v(t)^2 \right) + (k \cdot v(t) \cdot 3.6 \cdot m) \right) \cdot dS \quad \text{Eq. 11}$$

9.2 Studio del comportamento del veicolo in svio nell'area interclusa con zone di contatto al suolo ("modello dinamico")

9.2.1 Descrizione generale dei modelli

Sono stati realizzati tre distinti modelli per caratterizzare il comportamento dinamico di un'autovettura, di un camion o di un autoarticolato.

I modelli realizzati hanno l'obiettivo di studiare il moto di un veicolo che esce di strada e si trova a percorrere la scarpata oltre il ciglio della strada stessa, facendo riferimento alla dinamica longitudinale. Per questo motivo si è scelto di simulare il comportamento del veicolo con un sistema piano a parametri concentrati. Con questo tipo di modello è possibile valutare la dinamica longitudinale e verticale del mezzo, trascurando, invece, gli effetti connessi con la dinamica trasversale del mezzo.

I modelli proposti consentono di stimare, a partire dalle condizioni iniziali del moto, cioè quelle di uscita dalla piattaforma stradale, il moto del veicolo nell'area interclusa che viene definita fornendo al modello le lunghezze caratteristiche della sezione.

9.2.2 Modello autovettura

Il veicolo è modellato con tre corpi rigidi mutuamente collegati tre di loro e con il terreno (come descritto nello schema di Figura 3):

- Ruota anteriore: simula il comportamento nel piano del moto dell'intero asse anteriore; le proprietà inerziali dell'asse sono fornite al modello mediante le costanti m_{1_auto} e J_{1_auto} rispettivamente massa e momento d'inerzia baricentrico rispetto ad un asse normale al piano del moto.

La ruota anteriore è connessa al corpo vettura mediante un dispositivo elastico di costante K_{1_auto} ed uno viscoso C_{1_auto} posti in parallelo e atti a simulare il comportamento delle sospensioni anteriori del veicolo.

La ruota è inoltre in grado di scambiare forze in direzione verticale con la superficie stradale attraverso un dispositivo elastico di costante $K_{a_pneu_a}$ ed uno smorzatore di costante $C_{a_pneu_a}$, monolateri e posti in parallelo, che simulano il comportamento degli pneumatici.

Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro z_1 e la rotazione intorno al proprio asse φ_1 .

- Ruota posteriore: simula il comportamento nel piano del moto dell'intero asse anteriore; le proprietà inerziali dell'asse sono fornite al modello mediante le costanti m_{2_auto} e J_{2_auto} rispettivamente massa e momento d'inerzia baricentrico rispetto ad un asse normale al piano del moto.

La ruota anteriore è connessa al corpo vettura mediante un dispositivo elastico di costante K_{2_auto} ed uno viscoso C_{2_auto} monolateri e posti in parallelo e atti a simulare il comportamento delle sospensioni posteriori del veicolo e anch'essa scambia forze col terreno attraverso il dispositivo elastico viscoso già descritto per la ruota anteriore.

Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro z_2 e la rotazione intorno al proprio asse \square_2 .

- Corpo vettura: simula nel piano del moto il comportamento dell'intero veicolo, ad esclusione degli assi già considerati.

Le proprietà d'inerzia del corpo vettura sono fornite mediante i valori M_{3_auto} e J_{3_auto} , rispettivamente massa e momento d'inerzia rispetto all'asse baricentrico normale al piano del moto.

La geometria del veicolo viene definita introducendo nel modello l'altezza del baricentro rispetto al piano del moto e le distanze degli attacchi delle due sospensioni rispetto al baricentro. In questo modo è dunque possibile simulare il comportamento di veicoli con passo e altezza diversi.

Viene inoltre definita la posizione del centro di spinta delle forze aerodinamiche mediante la sua distanza rispetto al baricentro h_{c_spinta} e quella del punto di azione della forza di tipo impulsivo; tale forza viene introdotta per tenere conto degli urti durante l'attraversamento dei fossi di guardia.

Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro lungo le tre direzioni coordinate e la rotazione \square_3 nel piano del moto.

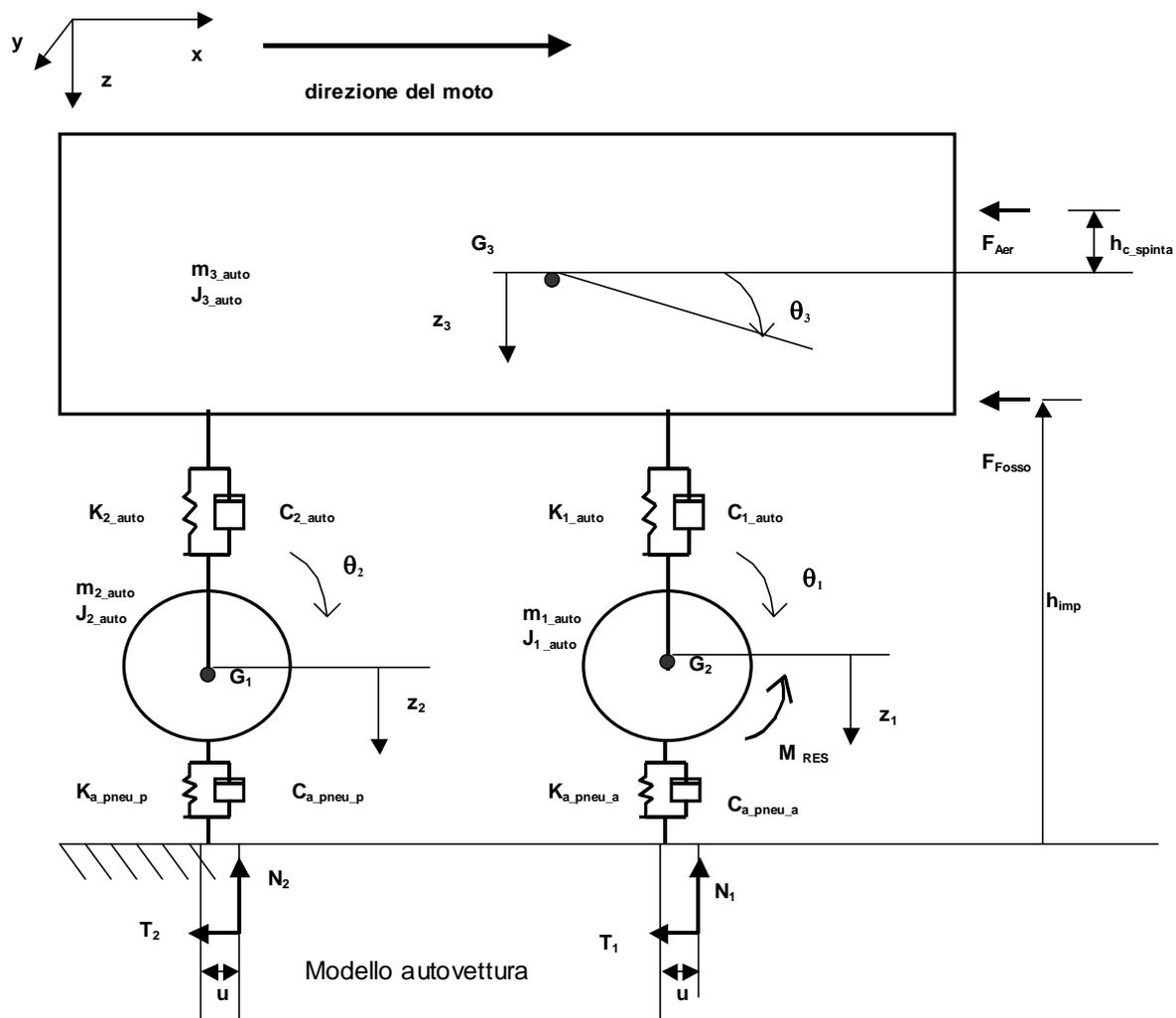


Figura 3: schema di funzionamento del modello di autovettura

In appendice A.1 è riportata la formulazione in termini matriciali del modello per la dinamica longitudinale e verticale.

I valori delle costanti descritte ai punti precedenti che sono adottati per le simulazioni numeriche sono stati ricavati con la seguente procedura:

- dall'analisi di numerosi modelli presenti in letteratura (ad esempio: G. Genta "Meccanica dell'autoveicolo, M. Guiggiani "Dinamica del veicolo") sono stati dedotti alcuni set di possibili valori che sono stati introdotti di volta in volta nel modello appena descritto.
- I risultati di alcune simulazioni tipo (tratti piani con aderenza costante e velocità di svio variabile), al variare degli insiemi di valori introdotti nel modello, sono stati confrontati tra di loro e con i risultati di alcune simulazioni condotte con modelli 3D multibody di vetture realmente esistenti.
- Si è quindi scelto quell'insieme di valori che permettesse una accurata ricostruzione della dinamica longitudinale del sistema e, al contempo, conferisse stabilità al modello al variare delle condizioni iniziali.

I valori introdotti nella versione finale sono riassunti nelle seguenti tabelle:

Valori proprietà inerziali:

m_1 auto	J_1 auto	m_2 auto	J_2 auto	m_3 auto	J_3 auto
20 kg	1.3 kgm ²	20 kg	1.3 kgm ²	1460 kg	1630 kgm ²

Rigidezze e smorzamento delle sospensioni:

K_1 auto	C_1 auto	K_2 auto	C_2 auto
155e3 N/m	15e3 Ns/m	155e3 N/m	15e3 Ns/m

Rigidezze e smorzamento degli pneumatici:

K_a pneu a	C_a pneu a	K_a pneu p	C_a pneu p
155e4 N/m	50e3 Ns/m	155e4 N/m	50e3 Ns/m

Il sistema è in movimento a causa delle condizioni iniziali, (velocità del veicolo) e viene decelerato dalle forze descritte al punto seguente.

Forze agenti sul sistema

Reazioni col terreno

Il modello, risolvendo la dinamica verticale del sistema, è in grado di calcolare le componenti della forza peso N_1 e N_2 che si scaricano sulla ruota anteriore e posteriore rispettivamente.

Le reazioni verticali dovute al terreno N_1 e N_2 non sono applicate sulla verticale passante per il centro della ruota, ma sono spostate in avanti nel senso del moto del parametro di attrito volvente "u" e, quindi, tendono a decelerare il veicolo.

Il parametro di attrito volvente introdotto nel modello fissato in 0.25 x raggio della ruota in base ai riferimenti reperiti in letteratura.

Le reazioni longitudinali T_1 e T_2 sono funzione oltre che del carico verticale agente sulle ruote, dello scorrimento assoluto della ruota stessa secondo una legge opportunamente imposta.

E' inoltre prevista la possibilità che le ruote si distacchino dal terreno, per esempio all'inizio della discesa della scarpata o dopo l'attraversamento di un fosso di guardia: le azioni del terreno non agiscono, come già evidenziato, direttamente sulle ruote, ma sono mutate da un elemento elastico-

viscoso monolatero che modella la rigidità e lo smorzamento del pneumatico. In questo modo si realizza un vincolo tra suolo e ruota di tipo monolatero, cioè, per esemplificare, il suolo è in grado di sostenere la ruota ma non di attrarla a sé.

Forza dovuta all'attraversamento di un fosso di guardia

Poiché nel modello proposto le ruote sono rigidamente collegate al corpo vettura in direzione longitudinale, si è pensato di approssimare l'effetto dovuto all'urto subito dalle ruote durante l'attraversamento di un fosso di guardia con una forza impulsiva direttamente agente sul corpo vettura che tende a decelerare il veicolo.

Il modulo di tale forza è valutato per via indiretta: si è stimata la perdita di energia cinetica dovuta alle brusche variazioni della direzione della velocità del mezzo nel momento in cui le ruote entrano ed escono dal fosso di guardia (funzione della geometria del fosso e del raggio della ruota), considerando un coefficiente di restituzione elastica pari a 0.8.

Il modulo della forza impulsiva è quindi tale da dissipare un lavoro pari alla perdita di energia cinetica per uno spazio di percorrenza pari all'attraversamento del fosso.

Forza aerodinamica

La forza aerodinamica è direttamente applicata al corpo vettura nel centro di spinta.

La posizione del centro di spinta, riferita al baricentro del veicolo, è, come già ricordato, individuata dalla variabile h_{c_spinta} .

Il valore introdotto nel modello è $h_{c_spinta}=0.27m$, cioè un valore tipico di autovetture di media cilindrata.

Il modulo della resistenza aerodinamica viene valutato secondo la seguente espressione:

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v(t)^2$$

come già illustrato nel paragrafo 9.1

Freno motore

Il contributo alla decelerazione del veicolo dovuto al freno motore, in una prima versione del modello è stato direttamente considerato come momento frenante applicato alla ruota anteriore; sebbene tale approccio sia sicuramente più corrispondente alla realtà fisica del problema, per non complicare eccessivamente il modello e poiché le finalità del modello sono lo studio della dinamica longitudinale dell'intero veicolo e non lo studio della dinamica della ruota frenata, nella versione finale si è tenuto conto di tale contributo come forza direttamente applicata al corpo vettura.

Il modulo della forza resistente introdotta è stato valutato con una legge dipendente linearmente dalla velocità del veicolo, secondo la seguente espressione:

$$F_{freno_m} = k \cdot v(t) \cdot 3.6 \cdot m$$

Tutte le simulazioni sono state fatte considerando autovetture con motori a benzina, ponendo $k=0,007$.

Forza peso

La forza peso nei tratti di tracciato piani viene equilibrata dalle reazioni verticali del suolo, ma nei tratti in discesa o salita deve essere opportunamente scomposta in tre direzioni:

- una componente in direzione normale al piano del moto che viene equilibrata dalle reazioni normali del terreno,
- una componente istantaneamente diretta come la traiettoria del veicolo, che tende ad accelerare o a decelerare la vettura
- una componente diretta istante per istante secondo la normale alla traiettoria che tende a far curvare la traiettoria stessa.

Per descrivere gli effetti della forza peso sul comportamento del veicolo e necessario descrivere le modalità con le quali la topografia dell'area interclusa è stata considerata nel modello.

Modello del tracciato con strada in rilevato

Facendo riferimento alla sezione tipo riportata in Figura 4:

la sezione viene descritta dalla seguenti variabili:

A_c = Larghezza carreggiata;

D_d = Dislivello rampa in discesa;

A_p = Ampiezza tratto piano tra le rampe;

D_s = Dislivello rampa in salita.

Le pendenze delle scarpate sia lato autostrada, sia lato ferrovia sono fissate a $2\backslash 3$, quindi i valori dell'ampiezza in pianta delle due rampe sono forniti da:

$A_d = D_d/2*3$ = Ampiezza (in pianta) della rampa in discesa lato autostrada;

$A_s = D_s/2*3$ = Ampiezza (in pianta) della rampa in salita lato ferrovia.

Vista in sezione

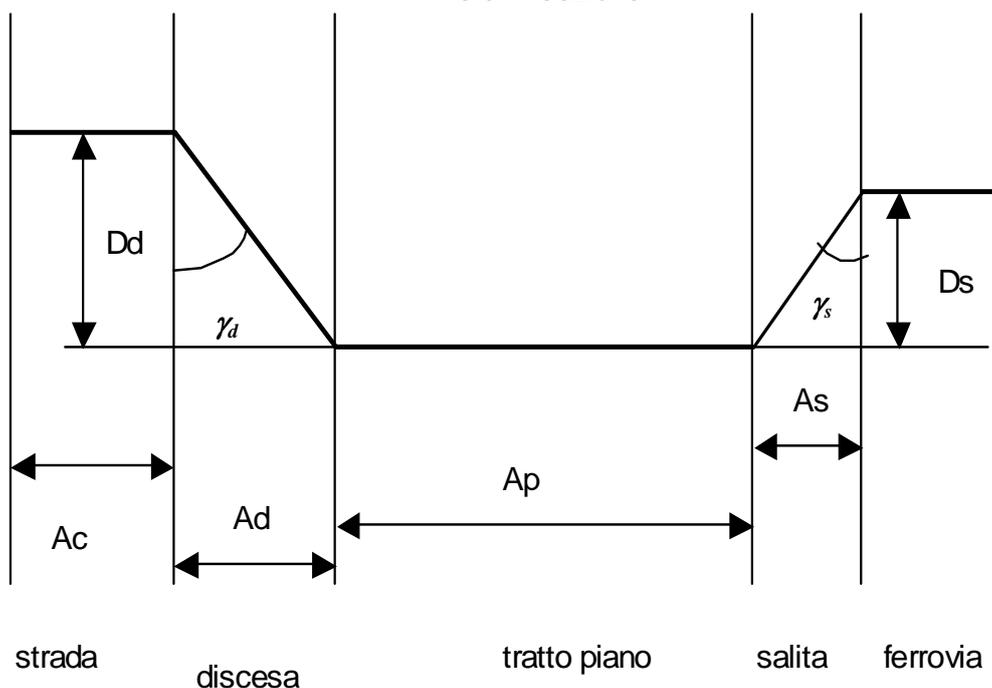


Figura 4: schematizzazione della sezione trasversale dell'area interclusa per autostrada in rilevato.

Modello del tracciato con strada in trincea

Fa riferimento alla sezione tipo riportata in Figura 5

In cui le variabili sono le stesse della strada in rilevato, con l'eccezione di considerare D_{ts} = Dislivello rampa trincea stradale, con il segno negativo essendo salita.

Vista in sezione

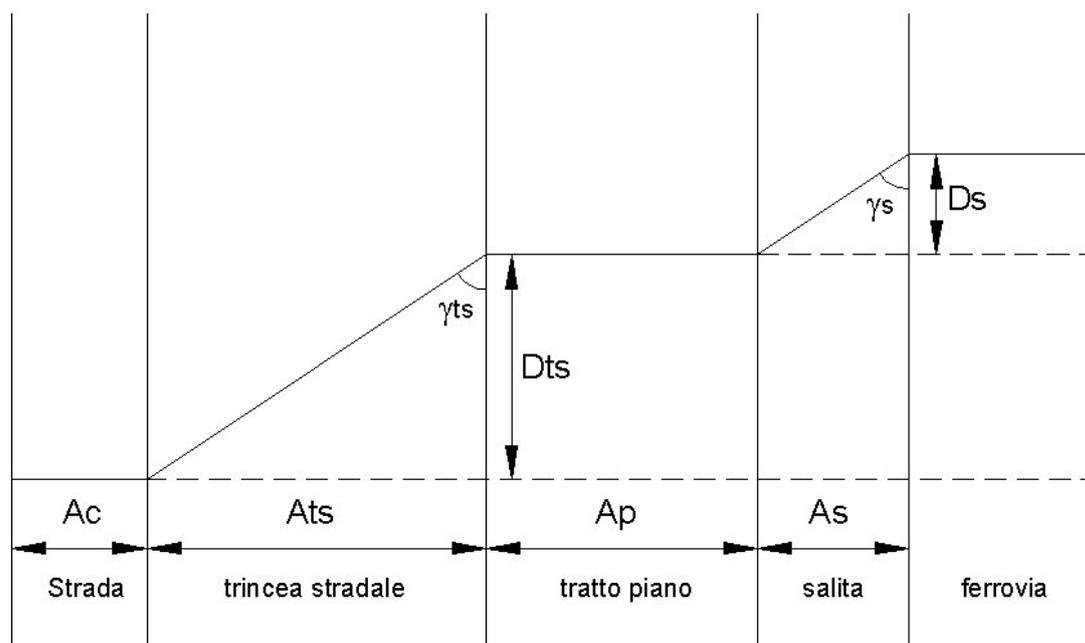


Figura 5: schematizzazione della sezione trasversale dell'area interclusa per autostrada in trincea.

Il comportamento del veicolo nei tratti di discesa, piano o salita sono gestiti in maniera differente.

Tratto in discesa

Al momento dell'uscita di strada il veicolo possiede una velocità v ed un angolo di svio α rispetto all'asse longitudinale dell'autostrada, come schematizzato in Figura 6.

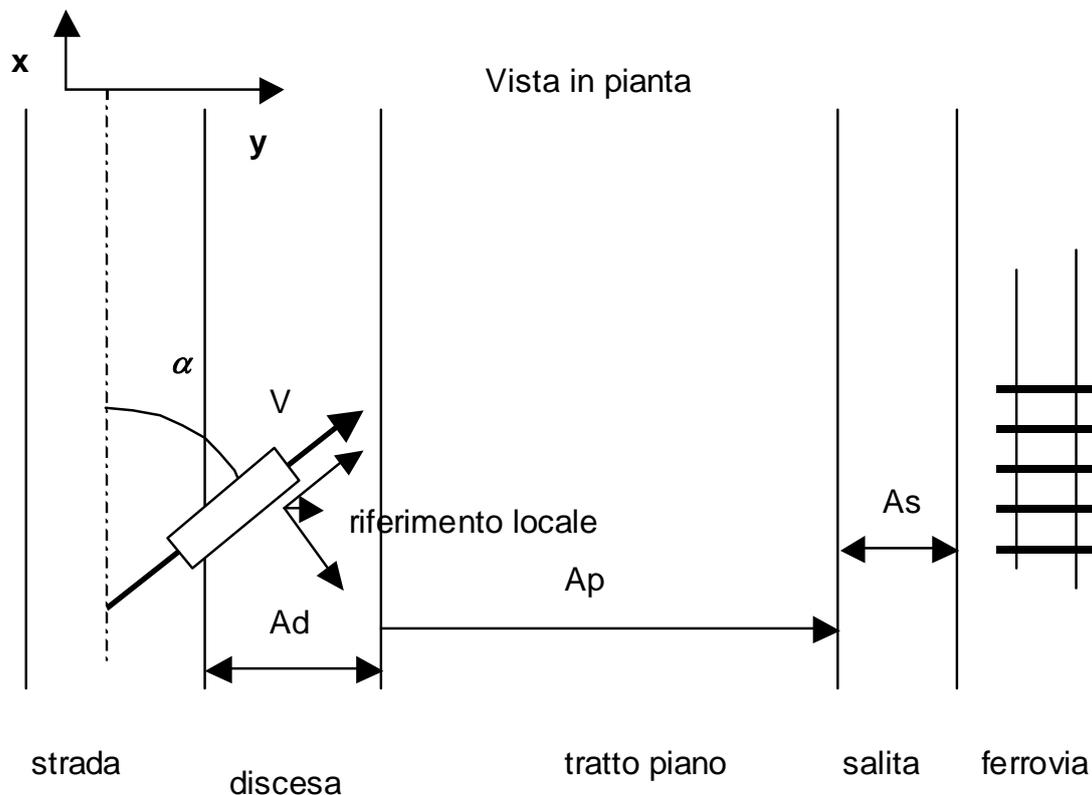


Figura 6: schematizzazione in pianta dell'area interclusa

Quando il veicolo si trova a dover percorrere un tratto di discesa, nell'ipotesi che le ruote siano a contatto col terreno, la forza di gravità agente sul veicolo viene scomposta secondo le tre direzioni del sistema di riferimento locale indicato in figura precedente:

- la componente nella direzione di v tende ad accelerare il veicolo.
- la componente normale alla direzione di v , contenuta nel piano parallelo al piano del moto tende a far curvare il veicolo.
- la componente normale al piano del moto è equilibrata dalle reazioni con il terreno.

Se ipotizziamo in un primo momento che la componente della forza peso che tende a far curvare il veicolo sia nulla, possiamo calcolare la traiettoria del veicolo considerando che uno spostamento generico della macchina può essere pensato come somma di un moto *in pianta* (sul piano x - y) e di uno *verticale*.

Si prende come riferimento l'angolo α tra la direzione ideale del veicolo (quella della strada) e quella attuale (intesa come la tangente alla traiettoria).

Poiché, come detto, lo scorrimento laterale è supposto per il momento nullo, l'angolo α rimane costante come pure l'angolo γ_d che lo spostamento totale risulta composto da:

- un abbassamento Dd (altezza totale della discesa) pari a $Dd = \frac{Ad}{\tan(\gamma_d)}$;
- uno spostamento in pianta pari a $Sp = \frac{Ad}{\sin(\alpha)}$.

Lo spostamento totale può quindi essere espresso come:

$$S = \sqrt{Sp^2 + Dd^2} = \sqrt{\left(\frac{Ad}{\sin(\alpha)}\right)^2 + \left(\frac{Ad}{\tan(\gamma_d)}\right)^2} = Ad \sqrt{\left(\frac{1}{\sin(\alpha)}\right)^2 + \left(\frac{1}{\tan(\gamma_d)}\right)^2} = Ad \sqrt{\frac{\tan^2(\gamma_d) + \sin^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_d)\sin^2(\alpha)}} =$$

$$= \frac{Ad}{\tan(\gamma_d)\sin(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_d) + \sin^2(\alpha)} = \frac{Dd}{\sin(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_d) + \sin^2(\alpha)}$$

Il rapporto spostamento verticale (verso il basso) su spostamento totale risulta quindi:

$$\frac{S}{S_z} = \frac{S}{Dd} = -\frac{1}{\sin(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_d) + \sin^2(\alpha)} = -\sqrt{\frac{\tan^2(\gamma_d)}{\sin^2(\alpha)} + 1}.$$

Il rapporto spostamento in pianta su spostamento totale risulta inoltre:

$$\frac{S}{Sp} = \frac{1}{\tan(\gamma_d)} \sqrt{\tan^2(\gamma_d) + \sin^2(\alpha)} = \sqrt{1 + \frac{\sin^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_d)}}.$$

Poiché inoltre lo spostamento in pianta è costituito da uno spostamento lungo la direzione x ed uno lungo la direzione y pari a:

$$S_x = Sp \cdot \cos(\alpha)$$

$$S_y = Sp \cdot \sin(\alpha)$$

Si ha quindi che:

$$\frac{S}{S_x} = \frac{S}{Sp \cdot \cos(\alpha)} = \frac{1}{\cos(\alpha)} \sqrt{1 + \frac{\sin^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_d)}};$$

$$\frac{S}{S_y} = \frac{S}{Sp \cdot \sin(\alpha)} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \sqrt{1 + \frac{\sin^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_d)}}.$$

Si deve a questo punto valutare l'effetto della componente della forza peso normale alla direzione di v sulla traiettoria del veicolo e, quindi, sull'angolo α □ supposto fin qui costante e coincidente col valore di svio.

Prendiamo in considerazione per il momento un moto di slittamento laterale puro della macchina (ortogonalmente alla direzione definita dall'angolo α); lo spostamento normale S_n totale (fino a fin discesa) è ancora composto da:

- un abbassamento **Dd** (altezza totale della discesa) pari a $Dd = \frac{Ad}{\tan(\gamma_d)}$;
- uno spostamento in pianta pari a $S_{np} = \frac{Ad}{\cos(\alpha)}$.

Analogamente a quanto fatto sopra, lo spostamento normale totale può quindi essere espresso come:

$$S = \sqrt{Snp^2 + Dd^2} = \sqrt{\left(\frac{Ad}{\cos(\alpha)}\right)^2 + \left(\frac{Ad}{\tan(\gamma_d)}\right)^2} = Ad \sqrt{\left(\frac{1}{\cos(\alpha)}\right)^2 + \left(\frac{1}{\tan(\gamma_d)}\right)^2} = Ad \sqrt{\frac{\tan^2(\gamma_d) + \cos^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_d)\cos^2(\alpha)}} =$$

$$= \frac{Ad}{\tan(\gamma_d)\cos(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_d) + \cos^2(\alpha)} = \frac{Dd}{\cos(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_d) + \cos^2(\alpha)}$$

Il rapporto spostamento verticale (verso il basso) su spostamento totale (normale) risulta quindi:

$$\frac{S_n}{S_{nz}} = \frac{S}{Dd} = \frac{1}{\cos(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_d) + \cos^2(\alpha)} = \sqrt{\frac{\tan^2(\gamma_d)}{\cos^2(\alpha)} + 1}.$$

Il rapporto spostamento in pianta su spostamento totale risulta inoltre:

$$\frac{S_n}{S_{np}} = -\frac{1}{\tan(\gamma_d)} \sqrt{\tan^2(\gamma_d) + \cos^2(\alpha)} = -\sqrt{1 + \frac{\cos^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_d)}}.$$

Poiché inoltre lo spostamento in pianta è costituito da uno spostamento lungo la direzione x ed uno lungo la direzione y pari a:

$$S_{nx} = -S_{np} \cdot \sin(\alpha)$$

$$S_{ny} = S_{np} \cdot \cos(\alpha)$$

Si ha quindi che:

$$\frac{S_n}{S_{nx}} = \frac{S_n}{-S_{np} \cdot \sin(\alpha)} = -\frac{1}{\sin(\alpha)} \sqrt{1 + \frac{\cos^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_d)}};$$

$$\frac{S_n}{S_{ny}} = \frac{S_n}{S_{np} \cdot \cos(\alpha)} = \frac{1}{\cos(\alpha)} \sqrt{1 + \frac{\cos^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_d)}}.$$

Le precedenti relazioni che legano lo spostamento in direzione normale al moto (se non ci fossero slittamenti trasversali) valgono localmente (per spostamenti infinitesimi) anche se l'angolo α varia in conseguenza ad una variazione del moto della macchina.

Invertendo le relazioni precedenti, dopo aver calcolato a parte gli spostamenti tangenziali e normali, è possibile ricavare la posizione assoluta del veicolo e la sua traiettoria in pianta per aggiornare il coefficiente α .

$$X = \left(\frac{S_x}{S}\right)S + \left(\frac{S_{nx}}{S_n}\right)S_n$$

$$Y = \left(\frac{S_y}{S}\right)S + \left(\frac{S_{ny}}{S_n}\right)S_n$$

$$Z = \left(\frac{S_z}{S}\right)S + \left(\frac{S_{nz}}{S_n}\right)S_n$$

Poiché le relazioni precedenti sono da considerarsi valide anche in forma differenziale (o meglio, discreta) si ha che:

$$dX = \left(\frac{Sx}{S}\right)dS + \left(\frac{Snx}{Sn}\right)dSn$$

$$dY = \left(\frac{Sy}{S}\right)dS + \left(\frac{Sny}{Sn}\right)dSn$$

$$dZ = \left(\frac{Sz}{S}\right)dS + \left(\frac{Snz}{Sn}\right)dSn$$

E quindi ad ogni passo di integrazione, sapendo gli spostamenti S e Sn , e conoscendo le funzioni $\frac{Sx}{S}$,

$\frac{Sy}{S}$, $\frac{Snx}{Sn}$ e $\frac{Sny}{Sn}$ è possibile aggiornare la direzione del moto.

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{dY}{dX}\right) = \text{atan}\left(\frac{\left(\frac{Sy}{S}\right)dS + \left(\frac{Sny}{Sn}\right)dSn}{\left(\frac{Sx}{S}\right)dS + \left(\frac{Snx}{Sn}\right)dSn}\right)$$

La rappresentazione grafica di quanto appena discusso è riportata in Figura 7.

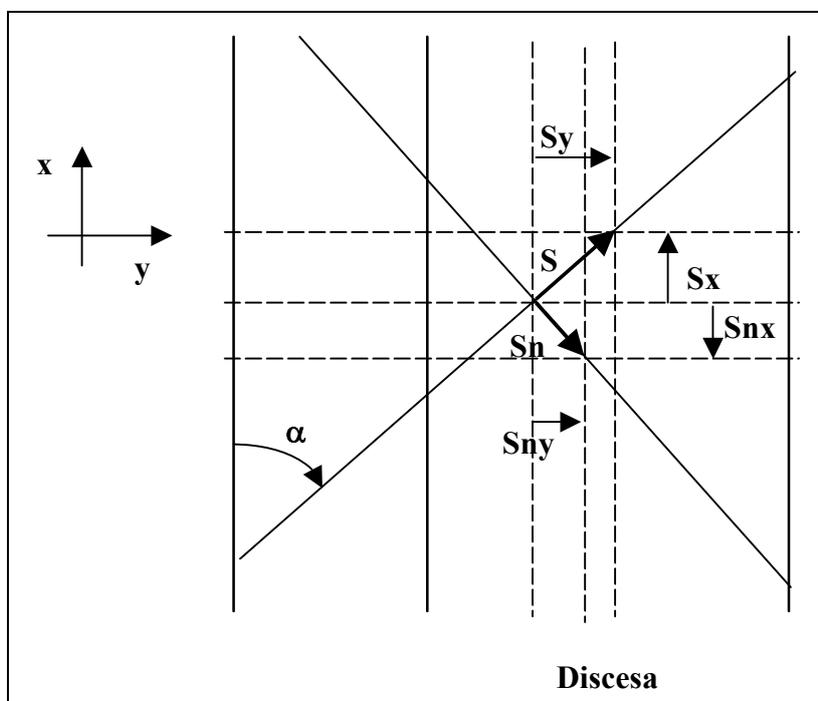


Figura 7: Diagramma degli spostamenti in discesa

Ora, mentre lo spostamento S , relativo alla dinamica longitudinale del veicolo, è fornito dal modello piano fin qui descritto, lo spostamento Sn essendo relativo alla dinamica laterale del veicolo, non può essere calcolato con lo stesso modello.

E' stato dunque necessario costruire in parallelo un nuovo modulo che risolvesse la dinamica laterale del veicolo.

Modulo per la trattazione della dinamica laterale

Nota la posizione del veicolo in un certo istante di tempo, si calcola la componente della forza peso in direzione normale alla traiettoria e parallela al piano di moto.

Tale componente ha in realtà effetto sulla traiettoria del veicolo solo se si verificano le seguenti condizioni:

- le ruote sono a contatto col terreno; se così non fosse la forza di gravità avrebbe come unico effetto quello di accelerare verso il basso il veicolo, tendendo cioè a ripristinare le condizioni di contatto delle ruote.
- La componente trasversale della forza peso è maggiore della forza laterale esercitata dal terreno sulle ruote.

Il modulo in oggetto calcola la componente trasversale della forza peso e la confronta col prodotto dell'aderenza laterale (fissata, per questo specifico modulo in 0.25, ovvero pari alla resistenza al rotolamento di una superficie in terra con erba) per il carico complessivo sulle due ruote calcolato dal modello per la dinamica verticale; controlla che almeno una delle ruote sia a contatto col terreno; se le due condizioni di cui sopra sono verificate, risolve la dinamica di un semplice sistema costituito da una massa di valore pari alla massa complessiva del veicolo e soggetto ad una forza pari alla differenza tra la componente trasversale della forza peso e la reazione laterale delle ruote.

A questo punto il modulo può ricavare lo spostamento S_n e passarlo al modello principale che calcola la nuova traiettoria, risolve la dinamica longitudinale per la successiva posizione e fornisce la nuova posizione al modulo per la dinamica laterale.

Tratto in piano

Finita la discesa il veicolo si trova a dover affrontare il tratto pianeggiante fino all'inizio del rilevato ferroviario.

Nei tratti piani tutte le forze agenti sul veicolo sono longitudinali o verticali, per cui il modulo per la dinamica laterale non è chiamato in causa.

La traiettoria del veicolo viene calcolata dal modello principale e l'angolo α rimane costante e pari al valore calcolato a fine discesa.

Tratto in salita

La gestione del calcolo della traiettoria è del tutto simile a quella vista per il calcolo della traiettoria dei tratti in discesa, variando esclusivamente il segno di alcune componenti.

Tuttavia, per completezza, si riportano qui di seguito le relazioni utilizzate.

Se non ci fosse scorrimento laterale l'angolo α rimarrebbe costante come pure l'angolo γ_s quindi si avrebbe che lo spostamento totale complessivo sarebbe composto da:

- un innalzamento D_s (altezza totale della discesa) pari a $D_s = \frac{A_s}{\tan(\gamma_s)}$;
- uno spostamento in pianta pari a $S_p = \frac{A_s}{\sin(\alpha)}$.

Lo spostamento totale può quindi essere espresso come:

$$S = \sqrt{Sp^2 + Ds^2} = \sqrt{\left(\frac{As}{\sin(\alpha)}\right)^2 + \left(\frac{As}{\tan(\gamma_s)}\right)^2} = As \sqrt{\left(\frac{1}{\sin(\alpha)}\right)^2 + \left(\frac{1}{\tan(\gamma_s)}\right)^2} = As \sqrt{\frac{\tan^2(\gamma_s) + \sin^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_s)\sin^2(\alpha)}} =$$

$$= \frac{As}{\tan(\gamma_s)\sin(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_s) + \sin^2(\alpha)} = \frac{Ds}{\sin(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_s) + \sin^2(\alpha)}$$

Il rapporto spostamento verticale (verso l'alto) su spostamento totale risulta quindi:

$$\frac{S}{Sz} = \frac{S}{Ds} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_s) + \sin^2(\alpha)} = \sqrt{\frac{\tan^2(\gamma_s)}{\sin^2(\alpha)} + 1}.$$

Il rapporto spostamento in pianta su spostamento totale risulta inoltre:

$$\frac{S}{Sp} = \frac{1}{\tan(\gamma_s)} \sqrt{\tan^2(\gamma_s) + \sin^2(\alpha)} = \sqrt{1 + \frac{\sin^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_s)}}.$$

Poiché inoltre lo spostamento in pianta è costituito da uno spostamento lungo la direzione x ed uno lungo la direzione y pari a:

$$Sx = Sp \cdot \cos(\alpha)$$

$$Sy = Sp \cdot \sin(\alpha)$$

Si ha quindi che:

$$\frac{S}{Sx} = \frac{S}{Sp \cdot \cos(\alpha)} = \frac{1}{\cos(\alpha)} \sqrt{1 + \frac{\sin^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_s)}};$$

$$\frac{S}{Sy} = \frac{S}{Sp \cdot \sin(\alpha)} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \sqrt{1 + \frac{\sin^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_s)}}.$$

Le precedenti relazioni che legano lo spostamento lungo la direzione del moto (se non ci fossero slittamenti trasversali) valgono localmente (per spostamenti infinitesimi) anche se l'angolo α varia in conseguenza ad una variazione del moto della macchina.

Nel caso di slittamento laterale puro della macchina (ortogonalmente alla direzione definita dall'angolo α) si ha che lo spostamento normale S_n totale (fino a fine salita) sarebbe ancora composto da:

- un abbassamento Ds (altezza totale della discesa) pari a $Ds = \frac{As}{\tan(\gamma_s)}$;
- uno spostamento in pianta pari a $S_{np} = \frac{As}{\cos(\alpha)}$.

Analogamente a quanto in precedenza, lo spostamento normale totale può quindi essere espresso come:

$$S = \sqrt{Snp^2 + Ds^2} = \sqrt{\left(\frac{As}{\cos(\alpha)}\right)^2 + \left(\frac{As}{\tan(\gamma_s)}\right)^2} = As \sqrt{\left(\frac{1}{\cos(\alpha)}\right)^2 + \left(\frac{1}{\tan(\gamma_s)}\right)^2} = As \sqrt{\frac{\tan^2(\gamma_s) + \cos^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_s)\cos^2(\alpha)}} =$$

$$= \frac{As}{\tan(\gamma_s)\cos(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_s) + \cos^2(\alpha)} = \frac{Ds}{\cos(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_s) + \cos^2(\alpha)}$$

Il rapporto spostamento verticale su spostamento totale (normale) risulta quindi:

$$\frac{Sn}{S_{nz}} = \frac{S}{Ds} = \frac{1}{\cos(\alpha)} \sqrt{\tan^2(\gamma_s) + \cos^2(\alpha)} = \sqrt{\frac{\tan^2(\gamma_s)}{\cos^2(\alpha)} + 1}.$$

Il rapporto spostamento in pianta su spostamento totale risulta inoltre:

$$\frac{Sn}{S_{np}} = \frac{1}{\tan(\gamma_s)} \sqrt{\tan^2(\gamma_s) + \cos^2(\alpha)} = \sqrt{1 + \frac{\cos^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_s)}}.$$

Poiché inoltre lo spostamento in pianta è costituito da uno spostamento lungo la direzione x ed uno lungo la direzione y pari a:

$$S_{nx} = -S_{np} \cdot \sin(\alpha)$$

$$S_{ny} = S_{np} \cdot \cos(\alpha).$$

ed osservando che il segno dello spostamento orizzontale dovuto alla azione della forza peso, in salita è negativo,

si ha che:

$$\frac{Sn}{S_{nx}} = \frac{Sn}{S_{np} \cdot \sin(\alpha)} = -\frac{1}{\sin(\alpha)} \sqrt{1 + \frac{\cos^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_s)}},$$

$$\frac{Sn}{S_{ny}} = \frac{Sn}{-S_{np} \cdot \cos(\alpha)} = \frac{1}{\cos(\alpha)} \sqrt{1 + \frac{\cos^2(\alpha)}{\tan^2(\gamma_s)}},$$

Le precedenti relazioni che legano lo spostamento in direzione normale al moto (se non ci fossero slittamenti trasversali) valgono localmente (per spostamenti infinitesimi) anche se l'angolo α varia in conseguenza ad una variazione del moto della macchina.

Invertendo le relazioni precedenti, dopo aver calcolato a parte gli spostamenti tangenziali e normali, è possibile ricavare la posizione assoluta del veicolo e la sua traiettoria in pianta per aggiornare il coefficiente α .

$$X = \left(\frac{Sx}{S}\right)S + \left(\frac{S_{nx}}{S_n}\right)S_n$$

$$Y = \left(\frac{Sy}{S}\right)S + \left(\frac{S_{ny}}{S_n}\right)S_n$$

$$Z = \left(\frac{S_z}{S} \right) S + \left(\frac{S_{nz}}{S_n} \right) S_n$$

Poiché la precedenti sono da considerarsi valide anche in forma differenziale (o meglio, discreta) si ha che:

$$dX = \left(\frac{S_x}{S} \right) dS + \left(\frac{S_{nx}}{S_n} \right) dS_n$$

$$dY = \left(\frac{S_y}{S} \right) dS + \left(\frac{S_{ny}}{S_n} \right) dS_n$$

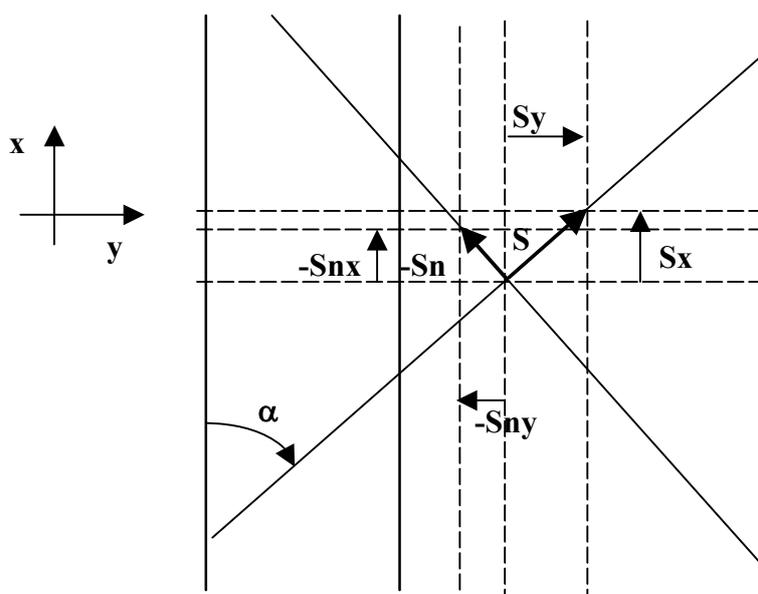
$$dZ = \left(\frac{S_z}{S} \right) dS + \left(\frac{S_{nz}}{S_n} \right) dS_n$$

E quindi ad ogni passo di integrazione, sapendo gli spostamenti S e S_n , e conoscendo le funzioni $\frac{S_x}{S}$,

$\frac{S_y}{S}$, $\frac{S_{nx}}{S_n}$ e $\frac{S_{ny}}{S_n}$ è possibile aggiornare la direzione del moto.

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{dY}{dX} \right) = \text{atan} \left(\frac{\left(\frac{S_y}{S} \right) dS + \left(\frac{S_{ny}}{S_n} \right) dS_n}{\left(\frac{S_x}{S} \right) dS + \left(\frac{S_{nx}}{S_n} \right) dS_n} \right)$$

La rappresentazione grafica di quanto appena discusso è riportata in Figura 8.



Salita

Figura 8: Diagramma degli spostamenti in salita

Nelle successive Figura 9 e Figura 10 è riportato un esempio di traiettoria calcolata col modello appena descritto.

Si osserva che nel tratto in discesa, poiché per effetto dell'elevata velocità iniziale le ruote non sono praticamente mai a contatto, la traiettoria del veicolo risulta pressoché rettilinea.

Nella fase di salita, viceversa, essendo le ruote sempre a contatto la variazione di traiettoria dovuta alla componente trasversale della forza peso risulta più evidente.

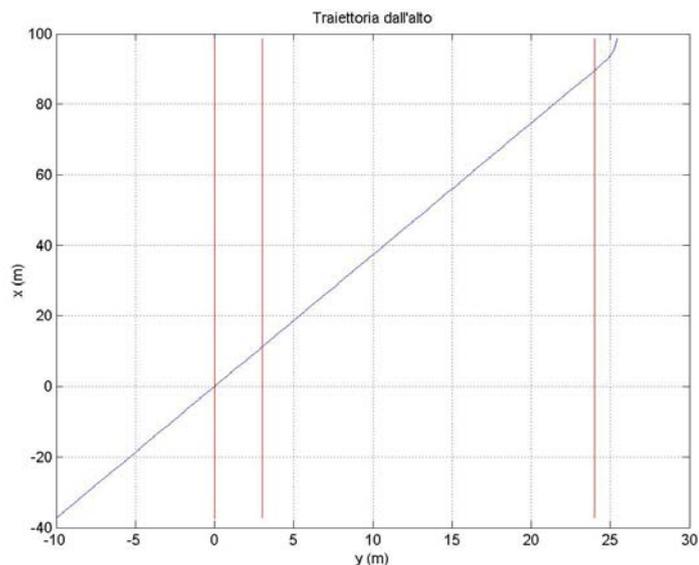


Figura 9: Traiettorie del veicolo vista dall'alto

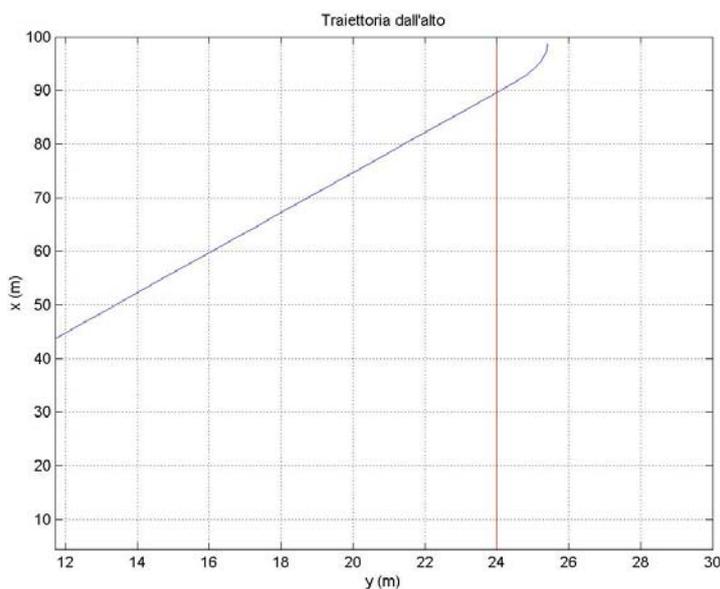


Figura 10: Traiettorie del veicolo vista dall'alto: particolare della salita

9.2.2.1 Calcolo dello spazio di arresto

Il modello fin qui descritto è stato utilizzato per calcolare lo spazio di arresto di un veicolo che esce di strada in funzione della velocità di uscita, dell'angolo di svio e delle altezze dei rilevati stradale e ferroviario, al variare della lunghezza del tratto piano compreso tra i due rilevati.

Per far ciò è stato necessario implementare un'apposita procedura incrementale nel modello.

La sezione dell'area interclusa viene infatti definita una sola volta all'inizio della simulazione e il modello calcola in funzione di tale sezione la traiettoria del veicolo; la simulazione termina quando:

- il veicolo si ferma;
- la velocità del veicolo è diretta secondo l'asse stradale;
- il veicolo è giunto alla fine della salita del rilevato ferroviario.

Non è dunque possibile, col semplice utilizzo del modello, calcolare lo spazio di arresto se non per tentativi.

Per questo motivo il modello realizzato è stato utilizzato come "core" di un programma che calcola per via iterativa lo spazio di arresto secondo la seguente procedura:

1. Si fornisce al programma (oltre a tutti gli altri dati necessari) una lunghezza iniziale per il tratto piano tra i due rilevati.
2. Il programma esegue una simulazione con la sezione così definita:
 - 2.1. Se la velocità del veicolo alla fine della simulazione è diversa da zero e se la direzione della traiettoria non è parallela all'asse stradale la lunghezza del tratto piano viene incrementata di 1 metro per le autostrade a tre corsie avendo velocità più alte ed incremento di 0,5 per quelle a due corsie dove le velocità sono più basse.
 - 2.2. Il programma esegue una nuova simulazione con la sezione modificata.
3. Si ripetono i punti 2.1 e 2.2 finché una delle due condizioni al punto 2.1 non è verificata
4. Il programma termina con la scrittura su file dello spazio d'arresto.

9.2.3 Modello camion

Il camion è schematizzato ancora con tre corpi rigidi mutuamente collegati tre di loro e con il terreno (come illustrato in Figura 11).

- Ruota anteriore: simula il comportamento nel piano del moto dell'intero asse anteriore; le proprietà inerziali dell'asse sono fornite al modello mediante le costanti m_{1c} e J_{1c} rispettivamente massa e momento d'inerzia baricentrico rispetto ad un asse normale al piano del moto. La ruota anteriore è connessa al corpo vettura mediante un dispositivo elastico di costante K_{1c} ed uno viscoso C_{1c} posti in parallelo e atti a simulare il comportamento delle sospensioni anteriori del veicolo. La ruota è inoltre in grado di scambiare forze in direzione verticale con la superficie stradale attraverso un dispositivo elastico di costante $K_{c_pneu_a}$ ed uno smorzatore di costante $C_{c_pneu_a}$, monolateri e posti in parallelo, che simulano il comportamento degli pneumatici. Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro z_1 e la rotazione intorno al proprio asse θ_1 .
- Ruota posteriore: simula il comportamento nel piano del moto dell'intero asse anteriore; le proprietà inerziali dell'asse sono fornite al modello mediante le costanti m_{2c} e J_{2c} rispettivamente massa e momento d'inerzia baricentrico rispetto ad un asse normale al piano del moto.

La ruota anteriore è connessa al corpo vettura mediante un dispositivo elastico di costante K_{2c} ed uno viscoso C_{2c} monolateri e posti in parallelo e atti a simulare il comportamento delle sospensioni posteriori del veicolo e anch'essa scambia forze col terreno attraverso il dispositivo elastico viscoso già descritto per la ruota anteriore.

Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro z_2 e la rotazione intorno al proprio asse θ_2 .

- Corpo veicolo: simula nel piano del moto il comportamento dell'intero veicolo, ad esclusione degli assi già considerati.

Le proprietà d'inerzia del corpo vettura sono fornite mediante i valori M_{3c} e J_{3c} , rispettivamente massa e momento d'inerzia rispetto all'asse baricentrico normale al piano del moto.

La geometria del veicolo viene definita introducendo nel modello l'altezza del baricentro rispetto al piano del moto e le distanze degli attacchi delle due sospensioni rispetto al baricentro. In questo modo è dunque possibile simulare il comportamento di veicoli con passo e altezza diversi.

Viene inoltre definita la posizione del centro di spinta delle forze aerodinamiche mediante la sua distanza rispetto al baricentro h_{c_spinta} e quella del punto di azione della forza di tipo impulsivo; tale forza viene introdotta per tenere conto degli urti durante l'attraversamento dei fossi di guardia. Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro lungo le tre direzioni coordinate e la rotazione θ_3 nel piano del moto.

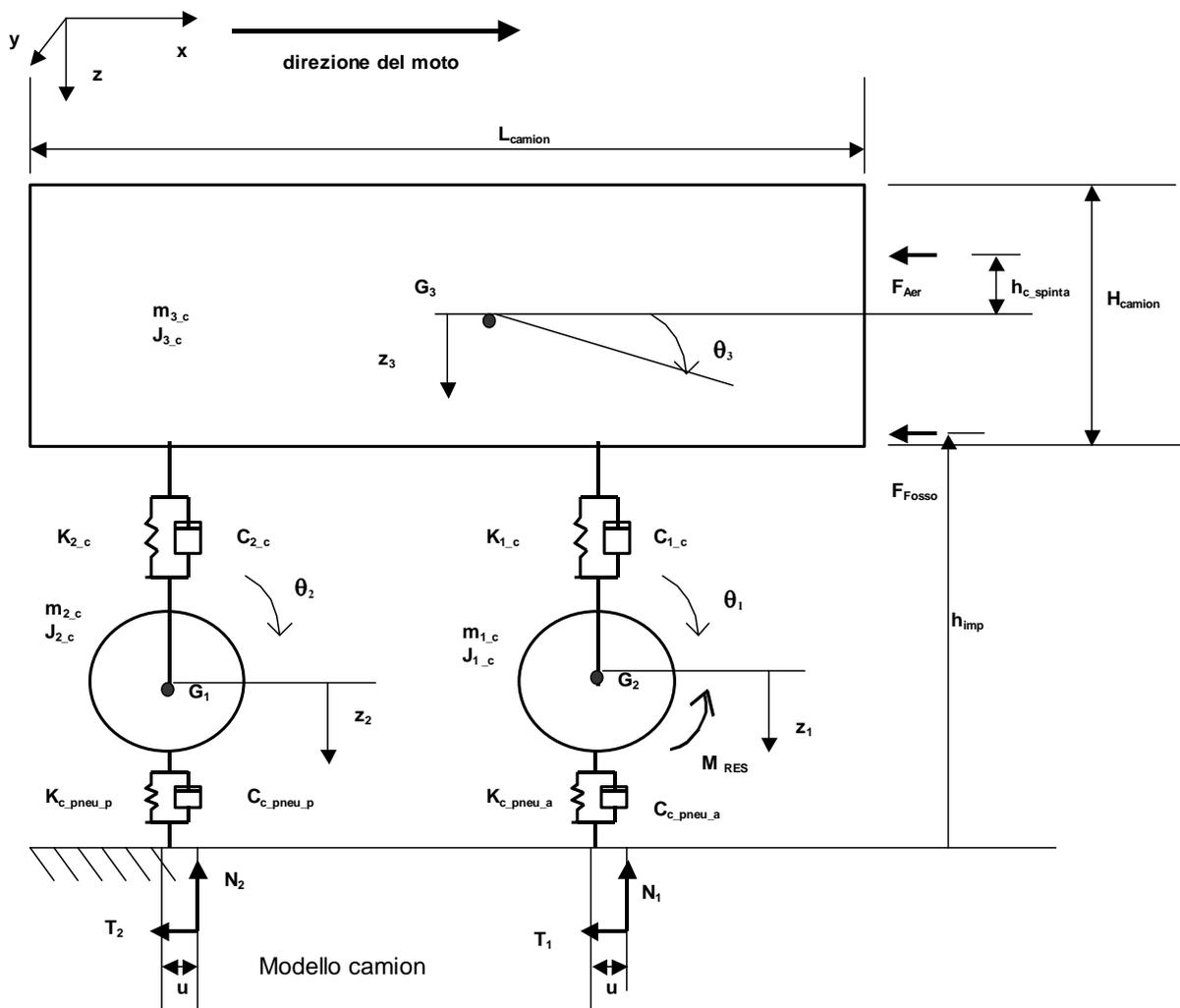


Figura 11: schema di funzionamento del modello di camion

In appendice A.2 è riportata la formulazione in termini matriciali del modello per la dinamica longitudinale e verticale.

I valori delle costanti descritte ai punti precedenti che sono stati effettivamente introdotti nel modello, sono stati ricavati con una procedura del tutto simile a quella già adottata per il modello dell'autovettura;

Il modello sviluppato non si riferisce ad uno specifico mezzo, ma vuole essere uno strumento per simulare il comportamento dinamico di automezzi pesanti con caratteristiche di dimensioni e massa notevolmente diverse, pur rimanendo la struttura meccanica inalterata.

Per questo motivo è stato necessario rendere parametrico il modello rispetto alla massa complessiva del mezzo da simulare, sia per quanto riguarda le proprietà d'inerzia che le proprietà di smorzamento e rigidità; la variabile introdotta è stata denominata "massa".

Per calcolare delle proprietà d'inerzia del corpo vettura si è dovuto introdurre due ulteriori variabili, la lunghezza e l'altezza del mezzo, per mezzo delle quali il momento d'inerzia J_{3c} è stato stimato considerando una distribuzione di massa uniforme; si è dunque introdotto un coefficiente "c_m_in" che va a moltiplicare la massa m_{3c} del corpo veicolo.

Le espressioni introdotte sono riassunte nelle seguenti tabelle:

Valori proprietà inerziali:

massa	m_{1c}	J_{1c}	m_{2c}	J_{2c}	m_{3c}	J_{3c}
variabile (kg)	$0.073 * \text{massa}$ (kg)	2.5 (kgm ²)	$0.073 * \text{massa}$ (kg)	2.5 (kgm ²)	$\text{massa} - m_{1c} - m_{2c}$ (kg)	$c_m_in * m_{3c}$ (kgm ²)

Rigidezze e smorzamento delle sospensioni:

K_{1c}	C_{1c}
$236 * m_3$ (N/m)	$9.4 * m_3$ (Ns/m)

Rigidezze e smorzamento degli pneumatici:

$K_{c \text{ pneu a}}$	$C_{c \text{ pneu a}}$	$K_{c \text{ pneu p}}$	$C_{c \text{ pneu p}}$
155e4 N/m	50e3 Ns/m	155e4 N/m	50e3 Ns/m

Il sistema è in movimento a causa delle condizioni iniziali, (velocità del veicolo) e viene decelerato dalle forze descritte al punto seguente.

Forze agenti sul sistema

Reazioni col terreno

Il modello, risolvendo la dinamica verticale del sistema, è in grado di calcolare le componenti della forza peso N_1 e N_2 che si scaricano sulla ruota anteriore e posteriore rispettivamente.

Le reazioni verticali dovute al terreno N_1 e N_2 non sono applicate sulla verticale passante per il centro della ruota, ma sono spostate in avanti nel senso del moto del parametro di attrito volvente "u" e, quindi, tendono a decelerare il veicolo.

Anche in questo caso l'attrito volvente è stato fissato in $0.25 \times$ raggio della ruota.

Le reazioni longitudinali T_1 e T_2 sono funzione oltre che del carico verticale agente sulle ruote, dello scorrimento assoluto della ruota stessa secondo una legge opportunamente imposta.

È stata, anche per il modello di camion, implementata la possibilità che le ruote si distacchino dal terreno, per esempio all'inizio della discesa della scarpata o dopo l'attraversamento di un fosso di guardia: le azioni del terreno non agiscono, come già evidenziato, direttamente sulle ruote, ma sono mutate da un elemento elastico-viscoso monolatero che modella la rigidità e lo smorzamento del pneumatico. In questo modo si realizza un vincolo tra suolo e ruota di tipo monolatero, cioè, per esemplificare, il suolo è in grado di sostenere la ruota ma non di attrarla a sé.

Forza dovuta all'attraversamento di un fosso di guardia

Poiché nel modello proposto le ruote sono rigidamente collegate al corpo vettura in direzione longitudinale, si è pensato di approssimare l'effetto dovuto all'urto subito dalle ruote durante l'attraversamento di un fosso di guardia con una forza impulsiva direttamente agente sul corpo vettura che tende a decelerare il veicolo.

Il modulo di tale forza è valutato per via indiretta: si è stimata la perdita di energia cinetica dovuta alle brusche variazioni della direzione della velocità del mezzo nel momento in cui le ruote entrano ed escono dal fosso di guardia (funzione della geometria del fosso e del raggio della ruota), considerando un coefficiente di restituzione elastica pari a 0.8.

Il modulo della forza impulsiva è quindi tale da dissipare un lavoro pari alla perdita di energia cinetica per uno spazio di percorrenza pari all'attraversamento del fosso.

Forza aerodinamica

La forza aerodinamica è direttamente applicata al corpo veicolo nel centro di spinta.

La posizione del centro di spinta, riferita al baricentro del veicolo, è, come già ricordato, individuata dalla variabile h_{c_spinta} .

Il valore introdotto nel modello è $h_{c_spinta} = 0.8m$, cioè un valore medio per automezzi pesanti.

Il modulo della resistenza aerodinamica viene valutato secondo la seguente espressione:

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v(t)^2$$

Come illustrato nel paragrafo 9.1

Freno motore

Come per il modello dell'autovettura, si è introdotta una forza resistente il cui modulo è stato valutato con una legge dipendente linearmente dalla velocità del veicolo, secondo la seguente espressione:

$$F_{freno_m} = k \cdot v(t) \cdot 3.6 \cdot m$$

Dove m è la massa dell'intero veicolo e k è il coefficiente illustrato nel paragrafo 9.1 che nel modello è stato fissato in 0.1.

Forza peso

La forza peso nei tratti di tracciato piani viene equilibrata dalle reazioni verticali del suolo, ma nei tratti in discesa o salita deve essere opportunamente scomposta in tre direzioni:

una componente in direzione normale al piano del moto che viene equilibrata dalle reazioni normali del terreno, una componente istantaneamente diretta come la traiettoria del veicolo, che tende ad accelerare o a decelerare la vettura e, infine una componente diretta istante per istante secondo la normale alla traiettoria che tende a far curvare la traiettoria stessa.

Anche in questo caso si deve far riferimento al modello del tracciato e al modulo per la valutazione della dinamica laterale, che sono stati strutturati nel modello di camion, in modo sostanzialmente analogo a quanto già descritto per il modello diautovettura.

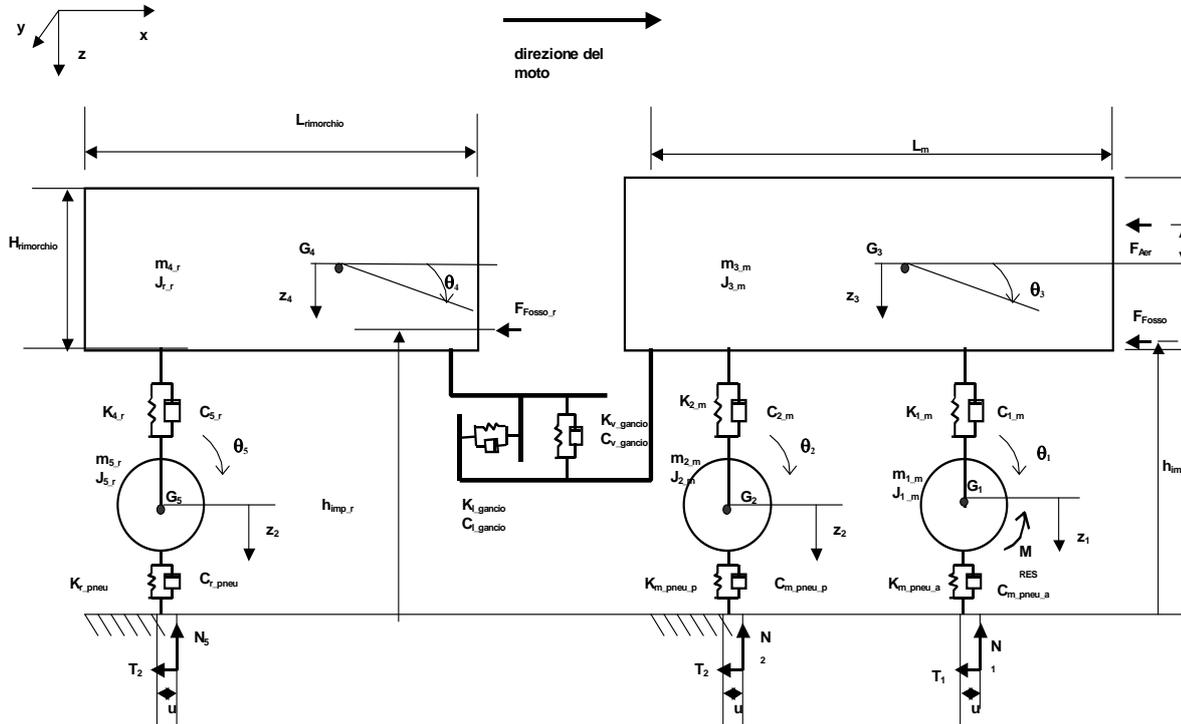
Anche la procedura per la determinazione dello spazio d'arresto è stata articolata come già per le autovetture.

9.2.4 Modello camion con rimorchio

Il modello di autotreno risulta estremamente più complesso essendo formato da due sottomodelli a parametri concentrati piani, che interagiscono per mezzo del sistema di attacco del rimorchio (Figura 12).

Il sistema di attacco del rimorchio ("gancio") collega i due sottosistemi della motrice e del rimorchio per mezzo di due sistemi elastico-viscosi in parallelo, agenti l'uno in direzione verticale e l'altro in direzione longitudinale; con questo approccio tra motrice e rimorchio sono permessi spostamenti relativi sia in direzione verticale che orizzontale e rotazioni relative rispetto ad un asse perpendicolare al piano del moto; non sono invece ammessi spostamenti relativi in direzione perpendicolare al piano del moto o altre rotazioni relative.

La posizione del gancio è, peraltro, completamente libera e può essere definita nel modello per mezzo di quattro lunghezze caratteristiche (non riportate in figura).



Modello camion con rimorchio

Figura 12: schema di funzionamento di un camion con rimorchio (autotreno)

MODELLO DELLA MOTRICE

E' costituito da tre corpi rigidi:

- Ruota anteriore: simula il comportamento nel piano del moto dell'intero asse anteriore; le proprietà inerziali dell'asse sono fornite al modello mediante le costanti m_{1m} e J_{1m} rispettivamente massa e momento d'inerzia baricentrico rispetto ad un asse normale al piano del moto. La ruota anteriore è connessa al corpo vettura mediante un dispositivo elastico di costante K_{1m} ed uno viscoso C_{1m} posti in parallelo e atti a simulare il comportamento delle sospensioni anteriori del veicolo. La ruota è inoltre in grado di scambiare forze in direzione verticale con la superficie stradale attraverso un dispositivo elastico di costante $K_{m_pneu_a}$ ed uno smorzatore di costante $C_{m_pneu_a}$, monolateri e posti in parallelo, che simulano il comportamento degli pneumatici. Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro z_1 e la rotazione intorno al proprio asse θ_1 .
- Ruota posteriore: simula il comportamento nel piano del moto dell'intero asse anteriore; le proprietà inerziali dell'asse sono fornite al modello mediante le costanti m_{2m} e J_{2m} rispettivamente massa e momento d'inerzia baricentrico rispetto ad un asse normale al piano del moto. La ruota anteriore è connessa al corpo vettura mediante un dispositivo elastico di costante K_{2m} ed uno viscoso C_{2m} monolateri e posti in parallelo e atti a simulare il comportamento delle sospensioni posteriori del veicolo e anch'essa scambia forze col terreno attraverso il dispositivo elastico viscoso già descritto per la ruota anteriore.

Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro z_2 e la rotazione intorno al proprio asse θ_2 .

- Corpo veicolo: simula nel piano del moto il comportamento dell'intero veicolo, ad esclusione degli assi già considerati.

Le proprietà d'inerzia del corpo vettura sono fornite mediante i valori M_{3m} e J_{3m} , rispettivamente massa e momento d'inerzia rispetto all'asse baricentrico normale al piano del moto.

La geometria del veicolo viene definita introducendo nel modello l'altezza del baricentro rispetto al piano del moto e le distanze degli attacchi delle due sospensioni rispetto al baricentro. In questo modo è dunque possibile simulare il comportamento di veicoli con passo e altezza diversi.

Viene inoltre definita la posizione del centro di spinta delle forze aerodinamiche mediante la sua distanza rispetto al baricentro h_{c_spinta} e quella del punto di azione della forza di tipo impulsivo; tale forza viene introdotta per tenere conto degli urti durante l'attraversamento dei fossi di guardia.

Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro lungo le tre direzioni coordinate e la rotazione θ_3 nel piano del moto.

Per rendere parametrico il modello rispetto alla massa complessiva della motrice da simulare, sia per quanto riguarda le proprietà d'inerzia che le proprietà di smorzamento e rigidità; la variabile introdotta è stata denominata "massa1".

Per il calcolare delle proprietà d'inerzia del corpo vettura si è dovuto introdurre due ulteriori variabili, la lunghezza e l'altezza della motrice, per mezzo delle quali il momento d'inerzia J_{4r} è stato stimato considerando una distribuzione di massa uniforme; si è dunque introdotto un coefficiente "c_m_in_m" che va a moltiplicare la massa m_{3c} del corpo veicolo.

MODELLO DEL RIMORCHIO

E' costituito da due corpi rigidi:

- Ruota: simula il comportamento nel piano del moto dell'intero asse del rimorchio; le proprietà inerziali dell'asse sono fornite al modello mediante le costanti m_{5r} e J_{5r} rispettivamente massa e momento d'inerzia baricentrico rispetto ad un asse normale al piano del moto.

La ruota anteriore è connessa al corpo vettura mediante un dispositivo elastico di costante K_{5r} ed uno viscoso C_{5r} posti in parallelo e atti a simulare il comportamento delle sospensioni anteriori del veicolo.

La ruota è inoltre in grado di scambiare forze in direzione verticale con la superficie stradale attraverso un dispositivo elastico di costante K_{r_pneu} ed uno smorzatore di costante C_{r_pneu} , monolateri e posti in parallelo, che simulano il comportamento degli pneumatici.

Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro z_5 e la rotazione intorno al proprio asse θ_5 .

- Corpo rimorchio: simula nel piano del moto il comportamento dell'intero rimorchio, ad esclusione degli assi già considerati.

Le proprietà d'inerzia del corpo vettura sono fornite mediante i valori M_{3m} e J_{3m} , rispettivamente massa e momento d'inerzia rispetto all'asse baricentrico normale al piano del moto.

La geometria del veicolo viene definita introducendo nel modello l'altezza del baricentro rispetto al piano del moto e le distanze degli attacchi delle due sospensioni rispetto al baricentro. In questo modo è dunque possibile simulare il comportamento di veicoli con passo e altezza diversi.

Le variabili del moto sono lo spostamento del baricentro lungo le tre direzioni coordinate e la rotazione θ_4 nel piano del moto.

Poiché anche il modello del rimorchio non si riferisce ad uno specifico mezzo, ma vuole essere uno strumento per simulare il comportamento dinamico di automezzi pesanti con caratteristiche di dimensioni e massa notevolmente diverse, pur rimanendo la struttura meccanica inalterata.

Per questo motivo è stato necessario rendere parametrico il modello rispetto alla massa complessiva del mezzo da simulare, sia per quanto riguarda le proprietà d'inerzia che le proprietà di smorzamento e rigidità; la variabile introdotta è stata denominata "massa2".

Per il calcolare delle proprietà d'inerzia del corpo vettura si è dovuto introdurre due ulteriori variabili, la lunghezza e l'altezza del mezzo, per mezzo delle quali il momento d'inerzia J_{4r} è stato stimato considerando una distribuzione di massa uniforme; si è dunque introdotto un coefficiente "c_m_in_r" che va a moltiplicare la massa m_{3c} del corpo veicolo.

In appendice A.3 è riportata la formulazione in termini matriciali del modello per la dinamica longitudinale e verticale.

I valori delle costanti descritte ai punti precedenti che sono stati effettivamente introdotti nel modello sono stati ricavati con una procedura del tutto simile a quella già adottata per il modello dell'autovettura;

Le espressioni introdotte nel modello sono riassunte nelle seguenti tabelle:

Valori proprietà inerziali della motrice:

Massa1	m_{1m}	J_{1m}	m_{2m}	J_{2m}	m_{3m}	J_{3m}
variabile (kg)	$0.073 * massa1$ (kg)	2.5 (kgm ²)	$0.073 * massa1$ (kg)	2.5 (kgm ²)	$Massa1 - m_{1m} - m_{2m}$ (kg)	$c_m_in_m * m_{3m}$ (kgm ²)

Rigidezze e smorzamento delle sospensioni della motrice:

K_{1c}	C_{1c}	K_{2c}	C_{2c}
$236 * m_{3m}$ (N/m)	$9.4 * m_{3m}$ (Ns/m)	$236 * m_{3m}$ (N/m)	$9.4 * m_{3m}$ (Ns/m)

Rigidezze e smorzamento degli pneumatici della motrice:

$K_{m_pneu_a}$	$C_{m_pneu_a}$	$K_{m_pneu_p}$	$C_{m_pneu_p}$
155e4 N/m	50e3 Ns/m	155e4 N/m	50e3 Ns/m

Valori proprietà inerziali del rimorchio:

Massa2	M_{5r}	J_{5r}	M_{4r}	J_{4r}
variabile (kg)	$0.073 * massa2$ (kg)	2.5 (kgm ²)	$Massa2 - m_{1m}$ (kg)	$c_m_in_m_r * m_{4r}$ (kgm ²)

Rigidezze e smorzamento delle sospensioni del rimorchio:

K_{1r}	C_{1r}
$236 * m_{4r}$ (N/m)	$9.4 * m_{4r}$ (Ns/m)

Rigidezze e smorzamento degli pneumatici del rimorchio:

$K_{m_pneu_a}$	$C_{m_pneu_a}$
155e4 N/m	50e3 Ns/m

Il sistema è in movimento a causa delle condizioni iniziali, (velocità del veicolo) e viene decelerato dalle forze descritte al punto seguente.

Forze agenti sul sistema

Reazioni col terreno

Il modello, risolvendo la dinamica verticale del sistema completo, costituito dalla motrice e dal rimorchio, è in grado di calcolare le componenti della forza peso N_1 , N_2 e N_3 che si scaricano sulla ruota anteriore e posteriore rispettivamente.

Le reazioni verticali dovute al terreno N_1 , N_2 e N_3 non sono applicate sulla verticale passante per il centro della ruota, ma sono spostate in avanti nel senso del moto del parametro di attrito volvente "u" e, quindi, tendono a decelerare il veicolo.

L'attrito volvente è stato ancora fissato in 0.25 x raggio della ruota.

Le reazioni longitudinali T_1 , T_2 e T_3 sono funzione oltre che del carico verticale agente sulle ruote, dello scorrimento assoluto della ruota stessa secondo una legge opportunamente imposta (l'aderenza massima e pari a 0.25 nei casi fin qui affrontati, ma è comunque una variabile del modello).

Anche questo modello più complesso tiene conto della possibilità che le ruote si distacchino dal terreno, per esempio all'inizio della discesa della scarpata o dopo l'attraversamento di un fosso di guardia: le azioni del terreno non agiscono, come già evidenziato, direttamente sulle ruote, ma sono mutate da un elemento elastico-viscoso monolatero che modella la rigidità e lo smorzamento del pneumatico. In questo modo si realizza un vincolo tra suolo e ruota di tipo monolatero, cioè, per esemplificare, il suolo è in grado di sostenere la ruota ma non di attrarla a sé.

Forza dovuta all'attraversamento di un fosso di guardia

Anche in questo caso l'effetto degli urti dovuti agli attraversamenti dei fossi di guardia sono simulati con due forze impulsive, agenti l'una sulla motrice e l'altra sul rimorchio.

Tali forze sono attivate al momento del passaggio delle ruote corrispondenti sulla posizione nella quale è previsto un fosso di guardia nel modello della strada; in questo modo i due impulsi sulla motrice e sul rimorchio sono sfasati.

Il modulo delle due forze è valutato per via indiretta: si è stimata la perdita di energia cinetica dovuta alle brusche variazioni della direzione della velocità del mezzo nel momento in cui le ruote entrano ed escono dal fosso di guardia sia per la motrice che per il rimorchio, considerando un coefficiente di restituzione elastica pari a 0.8.

Il modulo della forza impulsiva è quindi tale da dissipare un lavoro pari alla perdita di energia cinetica per uno spazio di percorrenza pari all'attraversamento del fosso.

Forza aerodinamica

La forza aerodinamica è direttamente applicata al corpo motrice nel centro di spinta.

La posizione del centro di spinta, riferita al baricentro del veicolo, è, come già ricordato, individuata dalla variabile h_{c_spinta} .

Il valore introdotto nel modello è $h_{c_spinta}=0.8m$, cioè un valore medio per automezzi pesanti.

La forza aerodinamica non agisce sul rimorchio.

Il modulo della resistenza aerodinamica viene valutato, anche per l'autotreno, mediante l'espressione:

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v(t)^2$$

Freno motore

Come per il modello dell'autovettura e di camion, si è introdotta una forza resistente il cui modulo è stato valutato con una legge dipendente linearmente dalla velocità del veicolo, secondo la seguente espressione:

$$F_{freno_m} = k \cdot v(t) \cdot 3.6 \cdot m$$

Con il valore di $k=0.01$ caratterizzante i mezzi pesanti con il motore diesel.

Forza peso

La forza peso nei tratti di tracciato piani viene equilibrata dalle reazioni verticali del suolo, ma nei tratti in discesa o salita deve essere opportunamente scomposta in tre direzioni:

una componente in direzione normale al piano del moto che viene equilibrata dalle reazioni normali del terreno, una componente istantaneamente diretta come la traiettoria del veicolo, che tende ad accelerare o a decelerare la vettura e, infine una componente diretta istante per istante secondo la normale alla traiettoria che tende a far curvare la traiettoria stessa.

Anche in questo caso si è strutturato il modello del tracciato e il modulo per la valutazione della dinamica laterale, in modo analogo a quanto già visto per l'autovettura.

Anche la procedura per il calcolo delle distanze di arresto ricalca quella già discussa per le autovetture.

10 LE SIMULAZIONI NUMERICHE PER LA DETERMINAZIONE DELLE CONDIZIONI DI INTERFERENZA

10.1 Affiancamento con autostrade in progetto.

10.1.1 Autostrada BRE-BE-MI

10.1.1.1 Dati di Traffico

Per la definizione dei tempi di ritorno associati ad un dato evento, secondo la procedura illustrata nel capitolo 9, occorre definire la percorrenza annua dei mezzi pesanti nella tratta oggetto di studio.

A tal fine sono stati acquisiti i dati di traffico dal “Quadro di riferimento progettuale” ed in particolare sono stati estratti i seguenti dati:

- TGM per tratte omogenee di traffico
- Percentuale di mezzi pesanti per tratte omogenee di traffico

basati sulle previsioni di traffico al 2015.

Mediante questi dati, note le lunghezze delle singole tratte omogenee, è stato possibile definire la percorrenza complessiva annua dei mezzi pesanti sul tratto di BRE-BE-MI che corre in affiancamento alla linea A.V./A.C., come sintetizzato in Tabella 2.

Da	A	L (m)	VP (al giorno)	Km_percorsi-anno (10 ⁶)
Inizio affiancamento	Caravaggio	7'800	7'800	22.207
Caravaggio	Bariano	5'050	7'700	14.193
Bariano	Romano di Lombardia	4'550	8'200	13.618
Romano di Lombardia	Calcio	6'900	7'600	19.141
Calcio	Chiari	7'350	6'500	17.438
Chiari	Fine affiancamento	10'140	7'200	26.648
TOTALE		41'790		113.244

Tabella 2: definizioni della percorrenza media annua dei mezzi pesanti sulla BRE-BE-MI nel tratto in affiancamento.

Per quanto riguarda la definizione della probabilità che un utente si trovi a percorrere una data corsia si è fatto riferimento ai dati già utilizzati per lo studio dell'affiancamento tra la A1 e la linea A.V., riferiti ad un monitoraggio condotto su una sezione in rettilineo a tre corsie per senso di marcia.

Da tali dati è stato possibile desumere la distribuzione per corsie, per le diverse classi veicolari riportata in Tabella 3

CLASSE VEICOLARE	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
Prob. 1 ^a corsia	58	58	58	58	84.4	84.4	84.4	84.4
Prob. 2 ^a corsia	34	34	34	34	15.3	15.3	15.3	15.3
Prob. 3 ^a corsia	8	8	8	8	0.3	0.3	0.3	0.3

Tabella 3: distribuzione del traffico per corsie per le diverse classi veicolari – BRE-BE-MI.

10.1.1.2 Dati di velocità

Non essendo possibile rilevate le velocità di un'autostrada in progetto, per la BRE-BE-MI si sono utilizzati i dati già considerati nello studio dell'interferenza con la A1, relativi ad una sezione autostradale a tre corsie in rettilineo.

I dati di velocità media e deviazione standard considerati nell'analisi della BRE-BE-MI sono sintetizzati in Tabella 4.

	Autovettura	Autocarri piccoli (2 assi)		Autocarri grandi (3 assi)		Autobus	Autoarticolati e Autotreni	Autoarticolati e Autotreni	
	C1	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
V media	136	115	101	95	95	95	95	89	91
σ	21.4	24.4	22.5	17	17	15.5	15.5	12.3	9.9

Tabella 4: Velocità media e deviazione standard relative ad ogni classe veicolare considerati per l'autostrada – BRE-BE-MI.

10.1.1.3 Sintesi delle caratteristiche geometriche, di traffico, di incidentalità e di velocità considerate per le diverse classi veicolari, per l'autostrada BREBEMI

Sulla base delle ipotesi e delle analisi sopra descritte è stato possibile associare a ciascuna classe veicolare le caratteristiche geometriche, di distribuzione sulla piattaforma, d'incidentalità e di velocità riportate nella Tabella 5

	5<L<=10 m				L>10			
	5-7.5	7.5-8.5	8.5-10	8.5-10	10-12	12-15	>15	
	Autocarri (2 assi)		Autocarri (3 assi)		Autobus	Autoart. e Autotreni	Autoart. e Autotreni	
	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
Massa (kg)	6000	13000	13000	16000	16000	13000	26000	38000
altezza baricentro	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.9	1.9
carreggiata veicolo	2	2	2	2	2	2	2	2
V _{media}	115	101	95	95	95	95	89	91
Dev. st. σ	24.4	22.5	17	17	15.5	15.5	12.3	9.9
Prob. 1 ^a corsia	58	58	58	58	84.4	84.4	84.4	84.4
Prob. 2 ^a corsia	34	34	34	34	15.3	15.3	15.3	15.3
Prob. 3 ^a corsia	8	8	8	8	0.3	0.3	0.3	0.3
TIN _{c,v} (x 100 mil.di veic/km)	1.069	0.270	0.547	0.336	0.781	0.073	0.648	1.586

Tabella 5: Tabella riassuntiva delle caratteristiche associate a ciascuna classe veicolare – BRE-BE-MI.

In base ai criteri descritti nel capitolo 7 sono state definite le velocità di svio dall'asse di ciascuna corsia e la corrispondente probabilità di superamento di detta velocità. In Tabella 6 sono riportate i valori corrispondenti a percentili che vanno dal 50-esimo al 99.97-esimo calcolati per ciascuna classe veicolare e corsia da cui origina lo svio.

	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
V ₅₀	115	101	95	95	95	95	89	91
V ₈₅	140	124	113	113	111	111	102	101
V ₉₀	146	130	117	117	115	115	105	104
V ₉₅	155	138	123	123	120	120	109	107
V ₉₉	172	153	135	135	131	131	118	114
V _{99,9}	190	171	148	148	143	143	127	122
V _{99,97}	199	179	154	154	148	148	131	125
Probabilità 1[^] corsia								
Prob ₅₀	3.35E-01	8.47E-02	1.71E-01	1.05E-01	3.56E-01	3.34E-02	2.95E-01	7.23E-01
Prob ₈₅	1.00E-01	2.54E-02	5.14E-02	3.16E-02	1.07E-01	1.00E-02	8.86E-02	2.17E-01
Prob ₉₀	6.70E-02	1.69E-02	3.42E-02	2.11E-02	7.12E-02	6.68E-03	5.91E-02	1.45E-01
Prob ₉₅	3.35E-02	8.47E-03	1.71E-02	1.05E-02	3.56E-02	3.34E-03	2.95E-02	7.23E-02
Prob ₉₉	6.70E-03	1.69E-03	3.42E-03	2.11E-03	7.12E-03	6.68E-04	5.91E-03	1.45E-02
Prob _{99,9}	6.70E-04	1.69E-04	3.42E-04	2.11E-04	7.12E-04	6.68E-05	5.91E-04	1.45E-03
Prob _{99,97}	1.88E-04	4.74E-05	9.59E-05	5.90E-05	1.99E-04	1.87E-05	1.65E-04	4.05E-04
Probabilità 2[^] corsia								
Prob ₅₀	1.96E-01	4.96E-02	1.00E-01	6.18E-02	6.45E-02	6.05E-03	5.35E-02	1.31E-01
Prob ₈₅	5.89E-02	1.49E-02	3.01E-02	1.85E-02	1.94E-02	1.82E-03	1.61E-02	3.93E-02
Prob ₉₀	3.93E-02	9.93E-03	2.01E-02	1.24E-02	1.29E-02	1.21E-03	1.07E-02	2.62E-02
Prob ₉₅	1.96E-02	4.96E-03	1.00E-02	6.18E-03	6.45E-03	6.05E-04	5.35E-03	1.31E-02
Prob ₉₉	3.93E-03	9.93E-04	2.01E-03	1.24E-03	1.29E-03	1.21E-04	1.07E-03	2.62E-03
Prob _{99,9}	3.93E-04	9.93E-05	2.01E-04	1.24E-04	1.29E-04	1.21E-05	1.07E-04	2.62E-04
Prob _{99,97}	1.10E-04	2.78E-05	5.62E-05	3.46E-05	3.61E-05	3.39E-06	3.00E-05	7.34E-05
Probabilità 3[^] corsia								
Prob ₅₀	4.62E-02	1.17E-02	2.36E-02	1.45E-02	1.27E-03	1.19E-04	1.05E-03	2.57E-03
Prob ₈₅	1.39E-02	3.50E-03	7.08E-03	4.36E-03	3.80E-04	3.56E-05	3.15E-04	7.71E-04
Prob ₉₀	9.24E-03	2.34E-03	4.72E-03	2.91E-03	2.53E-04	2.37E-05	2.10E-04	5.14E-04
Prob ₉₅	4.62E-03	1.17E-03	2.36E-03	1.45E-03	1.27E-04	1.19E-05	1.05E-04	2.57E-04
Prob ₉₉	9.24E-04	2.34E-04	4.72E-04	2.91E-04	2.53E-05	2.37E-06	2.10E-05	5.14E-05
Prob _{99,9}	9.24E-05	2.34E-05	4.72E-05	2.91E-05	2.53E-06	2.37E-07	2.10E-06	5.14E-06
Prob _{99,97}	2.59E-05	6.54E-06	1.32E-05	8.14E-06	7.08E-07	6.65E-08	5.88E-07	1.44E-06

Tabella 6: Tabella riassuntiva delle probabilità di svio associate alle diverse classi veicolari ed ai diversi percentili di velocità per l'autostrada – BRE-BE-MI.

In considerazione dell'ipotesi alla base dello studio di analizzare le condizioni di affiancamento tra le infrastrutture in progetto e la linea A.V. tenendo conto della dissipazione di energia associata all'urto contro una barriera da bordo laterale la velocità di svio dopo l'urto è stata calcolata a partire dall'energia residua (Energia prima dell'impatto. Energia assorbita dalla barriera H2) ipotizzando, cautelativamente, che l'angolo di svio rimanga invariato dopo l'urto.

Si osservi che nel caso di impatto con autoarticolato, l'energia assorbita dalla barriera H2 è stata assunta pari a 365 kJ in luogo dei 288 kJ fissati dalla Norma UNI 1317 applicando lo stesso coefficiente di amplificazione delle energie di contenimento, nel passaggio da autocarro ad autoarticolato, fissato dalla citata Norma UNI per il livello di contenimento H4 (DA 572 A 724 kJ).

Le velocità residue dopo l'impatto con la barriera, utilizzate nelle successive analisi, sono quelle riportate in Tabella 7, dove si è già tenuto conto anche della energia dissipata dal mezzo tra il momento dello svio ed il momento dell'impatto con la barriera.

	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
Velocità residua dopo l'urto con la barriera 1^ corsia								
V ₅₀	0	35	31	48	48	37	47	63
V ₈₅	0	48	42	60	58	47	56	70
V ₉₀	0	51	44	62	60	49	58	73
V ₉₅	0	55	47	66	64	51	60	75
V ₉₉	0	60	52	72	71	57	65	80
V _{99,9}	0	68	59	81	78	64	71	86
V _{99,97}	0	73	62	84	81	67	73	88
Velocità residua dopo l'urto con la barriera 2^ corsia								
V ₅₀	0	63	58	65	65	60	62	71
V ₈₅	0	79	72	79	77	72	73	79
V ₉₀	0	84	75	82	80	75	75	82
V ₉₅	0	90	79	87	84	79	78	84
V ₉₉	0	100	87	96	93	87	85	90
V _{99,9}	0	113	97	105	102	96	92	97
V _{99,97}	0	118	100	110	105	99	95	99
Velocità residua dopo l'urto con la barriera 3^ corsia								
V ₅₀	41	70	65	70	70	66	67	73
V ₈₅	56	88	80	84	83	79	78	82
V ₉₀	59	93	83	88	86	82	80	85
V ₉₅	65	99	87	92	90	86	83	87
V ₉₉	73	110	96	102	99	95	91	93
V _{99,9}	83	124	107	112	109	104	98	100
V _{99,97}	88	130	111	117	112	108	102	103

Tabella 7: Velocità residua dopo l'impatto per le diverse classi veicolari, corsie di svio e percentili di velocità – BRE-BE-MI.

Si può evidenziare dalla Tabella 6 che la presenza della barriera di sicurezza stradale ha portato all'eliminazione, per le prime due corsie, del mezzo di classe C2 dovuta al non superamento della barriera stessa.

10.1.2 Autostrada ACP

10.1.2.1 Dati di Traffico

Per la definizione delle condizioni di traffico sulla ACP si è fatto riferimento al documento "Analisi dell'impatto sulla qualità dell'aria" (doc. SEA_RT_18/03) del dicembre 2003.

In modo del tutto analogo a quanto già illustrato con riferimento alla BRE-BE-MI sono stati individuati i valori di TGM e le percentuali di veicoli pesanti, riferiti per la ACP all'anno 2020.

La percorrenza complessiva dei mezzi pesanti nelle diverse tratte è sintetizzata in Tabella 8.

Da	A	L (m)	VP (al giorno)	Km_percorsi-anno (10 ⁶)
Inizio affiancamento	Navate	900	4'900	1.610
Navate	Castelmella	4'200	5'750	8.815
Castelmella	Fenili Belasi	2'500	5'600	5.110
Fenili Belasi	Poncarale/A21	4'600	5'750	9.654
Poncarale/A21	Fine Affiancamento	5'600	4'700	9.607
	TOTALE	17'800		34.795

Tabella 8: Definizione della percorrenza media annua dei mezzi pesanti sulla ACP nel tratto in affiancamento.

Per quanto riguarda invece la probabilità che un veicolo di una data classe si trovi a viaggiare in corsia di marcia ovvero in corsia di sorpasso si è fatto riferimento, come già detto in precedenza, ai dati già disponibili presso il Progettista relativi al rilievo effettuato su una sezione autostradale a due corsie. In base a tali dati è stata tessuta la disposizione del traffico per corsie riportata in Tabella 9.

CLASSE VEICOLARE	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
Prob. 1 ^a corsia	78.2	89.6	88.9	88.9	85.8	85.8	91.1	87.4
Prob. 2 ^a corsia	21.8	10.4	11.1	11.1	14.2	14.2	8.9	12.6

Tabella 9: Distribuzione del traffico per corsie per le diverse classi veicolari – ACP

10.1.2.2 Dati di velocità

Anche per la definizione delle distribuzioni di velocità per le diverse classi veicolari è stato utilizzato il rilievo di traffico già disponibile presso il Progettista le velocità medie e le deviazioni standard utilizzate nell'analisi sono quelle riportate in Tabella 10.

	Autocarri piccoli (2 assi)			Autocarri grandi (3 assi)		Autobus	Autoarticolati e Autotreni	Autoarticolati e Autotreni
	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
V media	92.9	84.3	83.9	83.9	86.3	86.3	81.7	82.7
σ	16.7	12.2	9.4	9.4	11.4	11.4	8.8	12.5

Tabella 10: Velocità media e deviazione standard relative ad ogni classe veicolare per l'autostrada ACP.

10.1.2.3 Sintesi delle caratteristiche geometriche, di traffico, di incidentalità e di velocità considerate per le diverse classi veicolari, per l'autostrada ACP

Sulla base delle ipotesi e delle analisi sopra descritte è stato possibile associare a ciascuna classe veicolare le caratteristiche geometriche, di distribuzione sulla piattaforma, d'incidentalità e di velocità riportate nella Tabella 11.

	5<L<=10 m				L>10			
	5-7.5	7.5-8.5	8.5-10	8.5-10	10-12		12-15	>15
	Autocarri (2 assi)			Autocarri (3 assi)		Autobus	Autoart. e Autotreni	Autoart. e Autotreni
	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
Massa (kg)	6000	13000	13000	16000	16000	13000	26000	38000
altezza baricentro	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.9	1.9
carreggiata veicolo	2	2	2	2	2	2	2	2
V _{media}	92.9	84.3	83.9	83.9	86.3	86.3	81.7	82.7
Dev. st. σ	16.7	12.2	9.4	9.4	11.4	11.4	8.8	12.5
Prob. 1 ^a corsia	78.2	89.6	88.9	88.9	85.8	85.8	91.1	87.4
Prob. 2 ^a corsia	21.8	10.4	11.1	11.1	14.2	14.2	8.9	12.6
TIN _{c,v} (x 100 mil.di veic/km)	1.462	0.329	0.251	0.251	0.264	0.264	1.063	1.428

Tabella 11: Tabella riassuntiva delle caratteristiche associate a ciascuna classe veicolare per l'autostrada ACP.

Per la ripartizione dell'incidentalità associata ai mezzi pesanti tra le diverse classi si è fatto riferimento alla rappresentatività della data classe nella mix di traffico.

Analogamente alla BRE-BE-MI anche per la ACP sono state determinate le velocità di svio dalle diverse corsie associate alle diverse probabilità di superamento di dette condizioni (Tabella 12) nonché le velocità residue dopo l'impatto con le barriere di classe H2 (Tabella 13).

	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
V ₅₀	92.9	84.3	83.9	83.9	86.3	86.3	81.7	82.7
V ₈₅	110	97	94	94	98	98	91	96
V ₉₀	114	100	96	96	101	101	93	99
V ₉₅	120	104	99	99	105	105	96	103
V ₉₉	132	113	106	106	113	113	102	112
V _{99,9}	145	122	113	113	122	122	109	121
V _{99,97}	151	126	116	116	126	126	112	126
Probabilità 1 ^a corsia								
Prob ₅₀	2.00E-01	5.16E-02	3.90E-02	3.90E-02	3.96E-02	3.96E-02	1.70E-01	2.18E-01
Prob ₈₅	6.00E-02	1.55E-02	1.17E-02	1.17E-02	1.19E-02	1.19E-02	5.09E-02	6.55E-02
Prob ₉₀	4.00E-02	1.03E-02	7.80E-03	7.80E-03	7.93E-03	7.93E-03	3.39E-02	4.37E-02
Prob ₉₅	2.00E-02	5.16E-03	3.90E-03	3.90E-03	3.96E-03	3.96E-03	1.70E-02	2.18E-02
Prob ₉₉	4.00E-03	1.03E-03	7.80E-04	7.80E-04	7.93E-04	7.93E-04	3.39E-03	4.37E-03
Prob _{99,9}	4.00E-04	1.03E-04	7.80E-05	7.80E-05	7.93E-05	7.93E-05	3.39E-04	4.37E-04
Prob _{99,97}	1.12E-04	2.89E-05	2.18E-05	2.18E-05	2.22E-05	2.22E-05	9.49E-05	1.22E-04
Probabilità 2 ^a corsia								
Prob ₅₀	5.58E-02	5.99E-03	4.87E-03	4.87E-03	6.56E-03	6.56E-03	1.66E-02	3.15E-02
Prob ₈₅	1.67E-02	1.80E-03	1.46E-03	1.46E-03	1.97E-03	1.97E-03	4.97E-03	9.44E-03
Prob ₉₀	1.12E-02	1.20E-03	9.74E-04	9.74E-04	1.31E-03	1.31E-03	3.31E-03	6.30E-03
Prob ₉₅	5.58E-03	5.99E-04	4.87E-04	4.87E-04	6.56E-04	6.56E-04	1.66E-03	3.15E-03
Prob ₉₉	1.12E-03	1.20E-04	9.74E-05	9.74E-05	1.31E-04	1.31E-04	3.31E-04	6.30E-04
Prob _{99,9}	1.12E-04	1.20E-05	9.74E-06	9.74E-06	1.31E-05	1.31E-05	3.31E-05	6.30E-05
Prob _{99,97}	3.12E-05	3.36E-06	2.73E-06	2.73E-06	3.67E-06	3.67E-06	9.27E-06	1.76E-05

Tabella 12 Tabella riassuntiva delle probabilità di svio associate alle diverse classi veicolari ed ai diversi percentili di velocità per l'autostrada ACP.

	C2	C31	C32	C41	C42	C7	C5	C6
Velocità residua dopo l'urto con la barriera 1^ corsia								
V ₅₀	0	25	25	41	42	32	43	57
V ₈₅	0	33	31	47	50	39	49	67
V ₉₀	0	34	33	49	52	41	50	69
V ₉₅	0	37	34	51	54	43	52	72
V ₉₉	0	42	38	55	60	48	56	78
V _{99,9}	0	47	42	60	65	53	60	85
V _{99,97}	0	49	43	61	68	55	61	89
Velocità residua dopo l'urto con la barriera 2^ corsia								
V ₅₀	0	50	50	56	58	53	57	64
V ₈₅	0	60	58	64	67	62	64	75
V ₉₀	0	62	59	66	69	65	66	78
V ₉₅	0	65	61	68	73	68	68	81
V ₉₉	0	72	66	73	79	74	73	89
V _{99,9}	0	78	72	79	86	80	78	96
V _{99,97}	0	81	74	81	89	83	81	100

Tabella 13: Velocità residue dopo l'impatto per le diverse classi veicolari, corsie di svio e percentili di velocità – ACP.

Si può evidenziare dalla Tabella 12 che la presenza della barriera di sicurezza stradale di classe H2 ha portato alla eliminazione completa, per la configurazione della ACP a due corsie, del mezzo C2.

11 DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI SIMULATE

Per valutare le condizioni di interferenza tra le autostrade BRE-BE-MI, ACP e Bretella con la linea AV è stato seguito il seguente criterio:

- è stato simulato il comportamento dei diversi tipi di mezzi pesanti (camion ed autoarticolati) essendo le auto fermate dalla barriera autostradale. Considerando per ciascuno tutte le condizioni (rappresentate da uno svio con velocità tra il 50-esimo e il 99.97-esimo percentile);
- è stato poi simulato il comportamento di un'autovettura per i soli tratti in cui l'autostrada è in trincea, non essendo previste le barriere di sicurezza stradali.

Per la combinazione di velocità ed angoli si sono utilizzati, in via cautelativa, quelle corrispondenti ad uno svio con una velocità pari al 99.97-esimo percentile dalla corsia più lontana dal margine prospiciente la linea A.V.

Ai fini della analisi del comportamento delle autovetture nelle configurazioni in trincea sono stati quindi considerati i seguenti dati:

	V _{media} (km/h)	Dev. ST (KM/H)	V _{99.97} (km/h) ^(*)	α(°) (angolo svio)
BRE-BE-MI	136	21.4	191	12.8
ACP/	109.7	19.7	164	12.6

(*) Calcolata tenendo conto delle dissipazioni in carreggiata prima dello svio.

Il modello di simulazione illustrato nel paragrafo 9.2 consente di definire la distanza in sezione (Lp) tra il ciglio del rilevato dall'autostrada ed il limite della sede ferroviaria considerato come invalicabile secondo la schematizzazione illustrata in Figura 13 per l'autostrada in rilevato ed in Figura 14 per i casi in cui l'autostrada è in trincea.

L'area di svio risulta univocamente determinata quando si definiscano:

- l'altezza del rilevato stradale H_s;
- l'altezza del rilevato ferroviario (H_f), intesa come la differenza di quota tra il piano di appoggio delle rotaie ed il piano campagna;
- la presenza o meno del fosso di guardia al piede del rilevato stradale;
- la presenza o meno del fosso di guardia al piede del rilevato ferroviario.

Il limite di invalicabilità ferroviaria è costituito da un "punto virtuale" che si trova alla medesima quota del piano di appoggio delle rotaie ma sull'ideale prosecuzione della scarpata del rilevato ferroviario. Questa ipotesi, resasi necessaria per l'impossibilità di simulare il moto su una porzione piana di ridotte dimensioni qual'è quella tra il ballast ed il margine del rilevato, porta a soluzioni a favore di sicurezza in quanto il limite del gabarit, richiesto come limite di invalicabilità da ITF, si trova più arretrato rispetto al punto virtuale considerato nelle simulazioni.

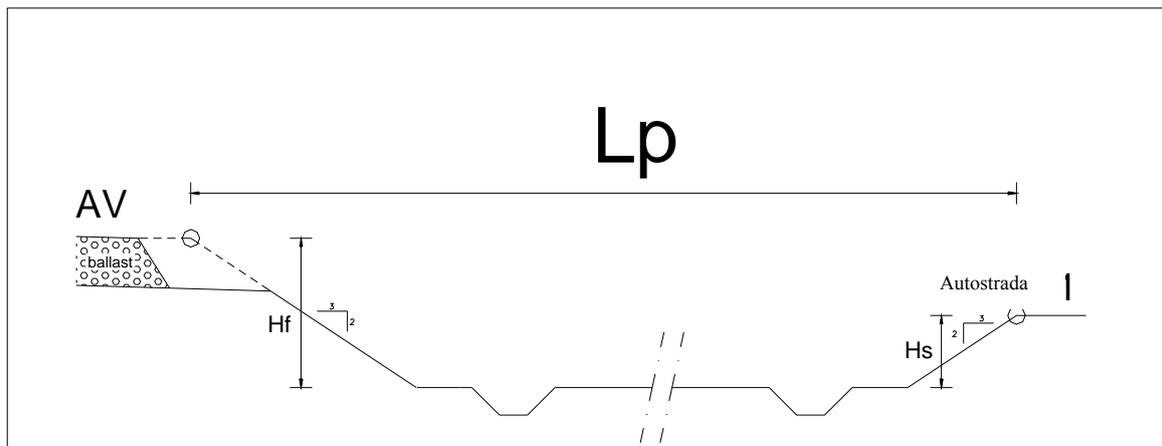


Figura 13: schematizzazione dell'area di svio per le simulazioni numeriche con autostrade in rilevato.

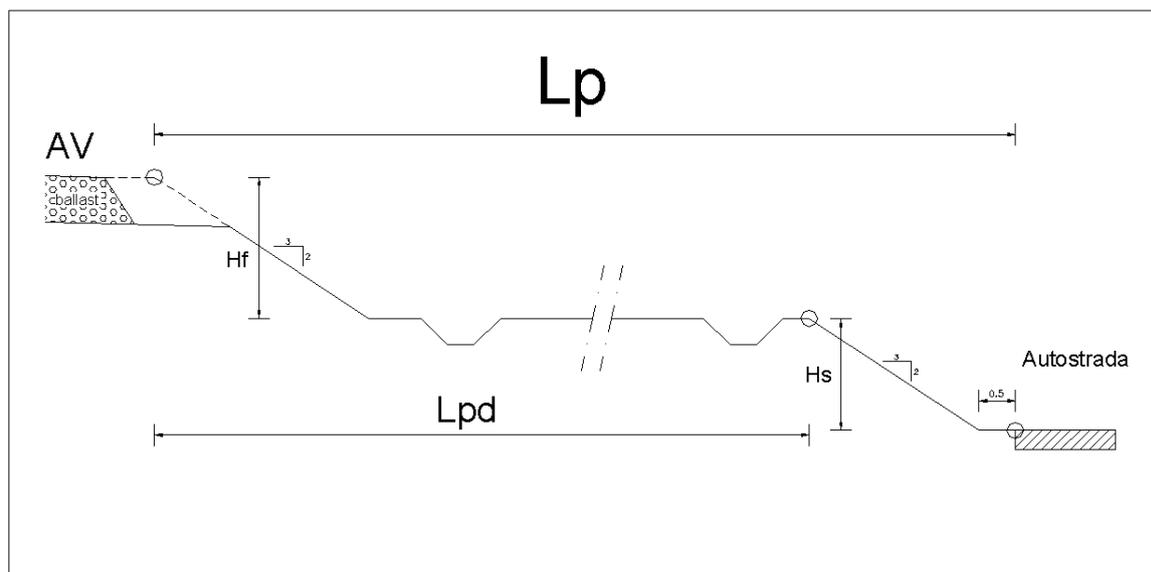


Figura 14: schematizzazione dell'area di svio per le simulazioni numeriche con autostrada in trincea.

Nel modello messo a punto per lo studio delle distanze di interferenza, in assenza quindi di elemento di protezione nell'area interclusa, la pendenza delle scarpate è stata fissata in 2/3 ed il coefficiente di resistenza al rotolamento è assunto costante e pari a 0.25.

Per la definizione della distanza L_P che viene raggiunta solo con un dato tempo di ritorno occorre tener presente che, alla medesima distanza, possono arrivare mezzi diversi con probabilità diversa.

La probabilità complessiva di superamento di una data L_P potrà quindi essere definita solo dopo aver simulato diversi percentili di velocità per tutti i mezzi che sviano dalle diverse corsie ed andando a sommare le probabilità di tutti gli eventi che hanno superato quella specifica L_P .

A titolo di esempio si riporta in Figura 15 il diagramma di calcolo relativo alla BRE-BE-MI ed altezza stradale $H_S=2$ m dove, per diverse combinazioni di altezza dei rilevati autostradali e ferroviari, è riportato il tempo di ritorno risultante per ciascun valore L_P .

Entrando nel diagramma con il tempo di ritorno richiesto si è determinato il valore di LP corrispondente al limite delle condizioni di non interferenza.

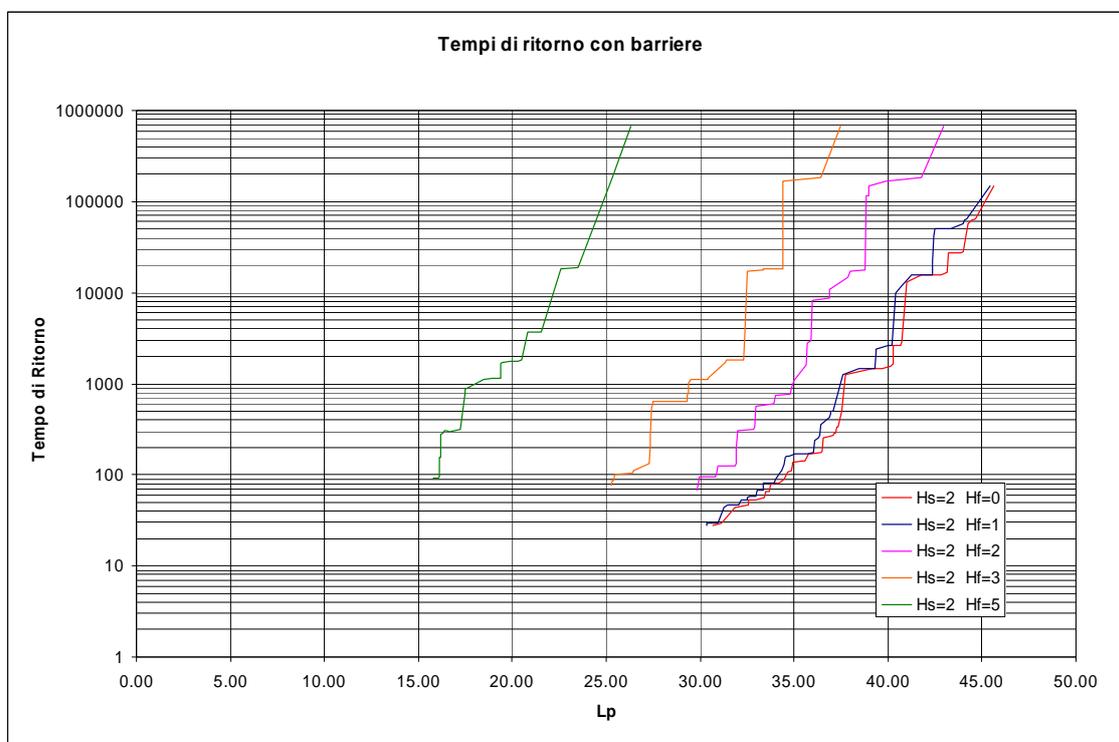


Figura 15: Esempio di diagramma per il calcolo del valore di LP da associare ad un dato tempo di ritorno.

Per effettuare tali analisi sono state effettuate 6821 simulazioni, analiticamente descritte nell'Allegato 1, corrispondenti alle seguenti situazioni:

Autostrada "BRE-BE-MI" con tre corsie in rilevato:

- 112 simulazioni corrispondenti allo svio di un autocarro con velocità tra il 50-esimo e 99.97-esimo percentile, da tutte e tre le corsie;
- 42 simulazioni corrispondenti allo svio di un autoarticolato con velocità comprese tra il 50-esimo e 99.97-esimo percentile da tutte e tre le corsie;
- presenza di fosso al piede del rilevato stradale e ferroviario;
- con altezza dei rilevati stradali (H_s) pari a 0, 2, 5 e 8 m;
- con altezza dei rilevati ferroviari (H_f) pari a 0, 1, 2, 3, 5, 8 e 11 m.

Autostrada "BRE-BE-MI" con tre corsie in trincea (autovetture):

- velocità associata al 99.97-esimo percentile (191 km/h);
- angolo di svio corrispondente al limite di svio della terza corsia ($12,8^\circ$);
- presenza di fosso in testa alla trincea stradale ed al piede del rilevato ferroviario;
- con altezza delle trincee stradali (H_s) pari a -1, -3, -5, -8 e -10 m;
- con altezza dei rilevati ferroviari (H_f) pari a 0, 1, 2, 3 e 5 m.

Autostrada "ACP" con due corsie in rilevato:

- 70 simulazioni corrispondenti allo svio di un autocarro con velocità tra il 50-esimo e 99.97-esimo percentile, da tutte e due le corsie;

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N. 01-IR-E-16076_01

Progetto
IN05

Lotto
00

Codifica Documento
DE2 R G SC 0000 076

Rev.
0

Foglio
57 di 70

- 28 simulazioni corrispondenti allo svio di un autoarticolato con velocità comprese tra il 50-esimo e 99.97-esimo percentile dalle due corsie;
- presenza di fosso al piede del rilevato stradale e ferroviario;
- con altezza dei rilevati stradali (H_s) pari a 0, 2, 5 e 8 m;
- con altezza del rilevato ferroviario (H_f) pari a 0, 1, 2, 3, 5 e 8 m.

Autostrada "ACP" con due corsie in trincea (autovetture):

- velocità associata al 99,97-esimo percentile = 185 km/h;
- angolo di svio corrispondente al limite di svio della terza corsia = 14,8°;
- presenza di fosso in testa al rilevato stradale ed al piede del rilevato ferroviario;
- con altezza dei rilevati stradali (H_s) pari a -1, -3, -5, -8 m (il - indica che è trincea quindi in salita);
- con altezza dei rilevati ferroviari (H_f) pari a 0, 1, 2, 3 e 5 m.

12 INDIVIDUAZIONE DELLE DISTANZE DI INTERFERENZA

Sulla base dei risultati delle simulazioni sopra descritte è stato possibile ricavare per le singole autostrade i diagrammi di Figura 16, Figura 17 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, dove sono riportate le distanze di interferenza (L_p) calcolate con riferimento ai mezzi pesanti (autocarri + autoarticolati) in condizioni associabili ai tempi di ritorno indicati al capitolo 8.

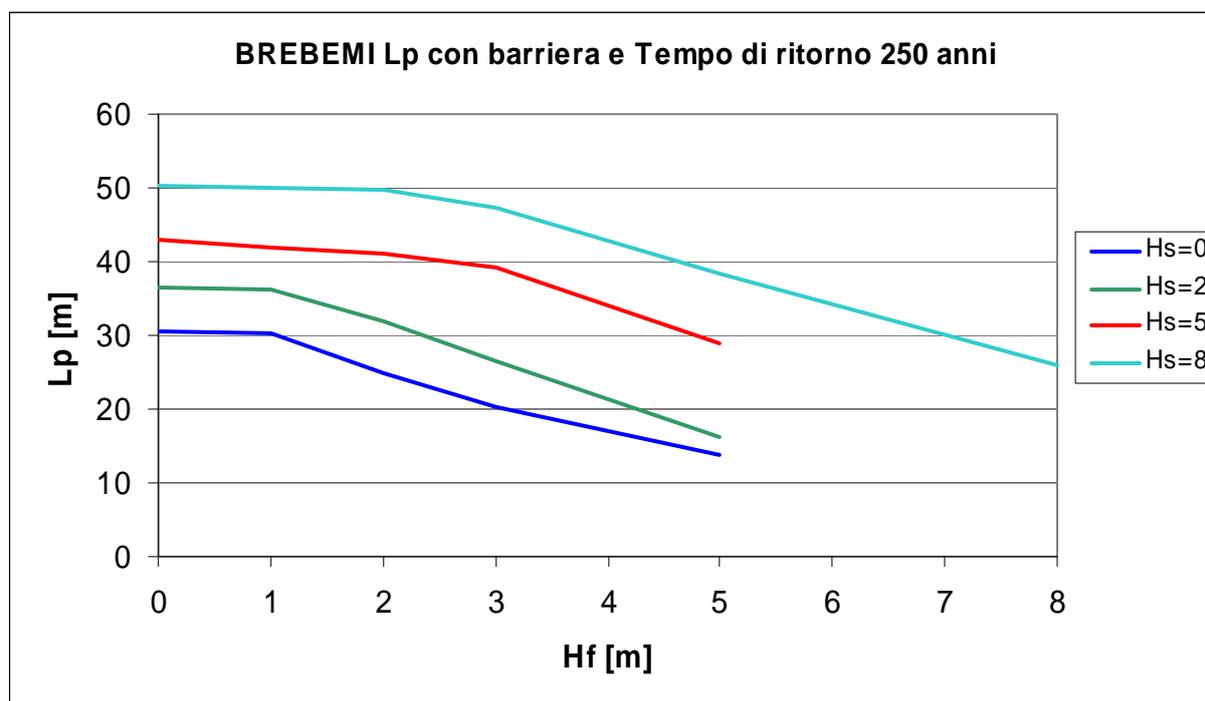


Figura 16: distanze di interferenza calcolate per l'autostrada BRE-BE-MI

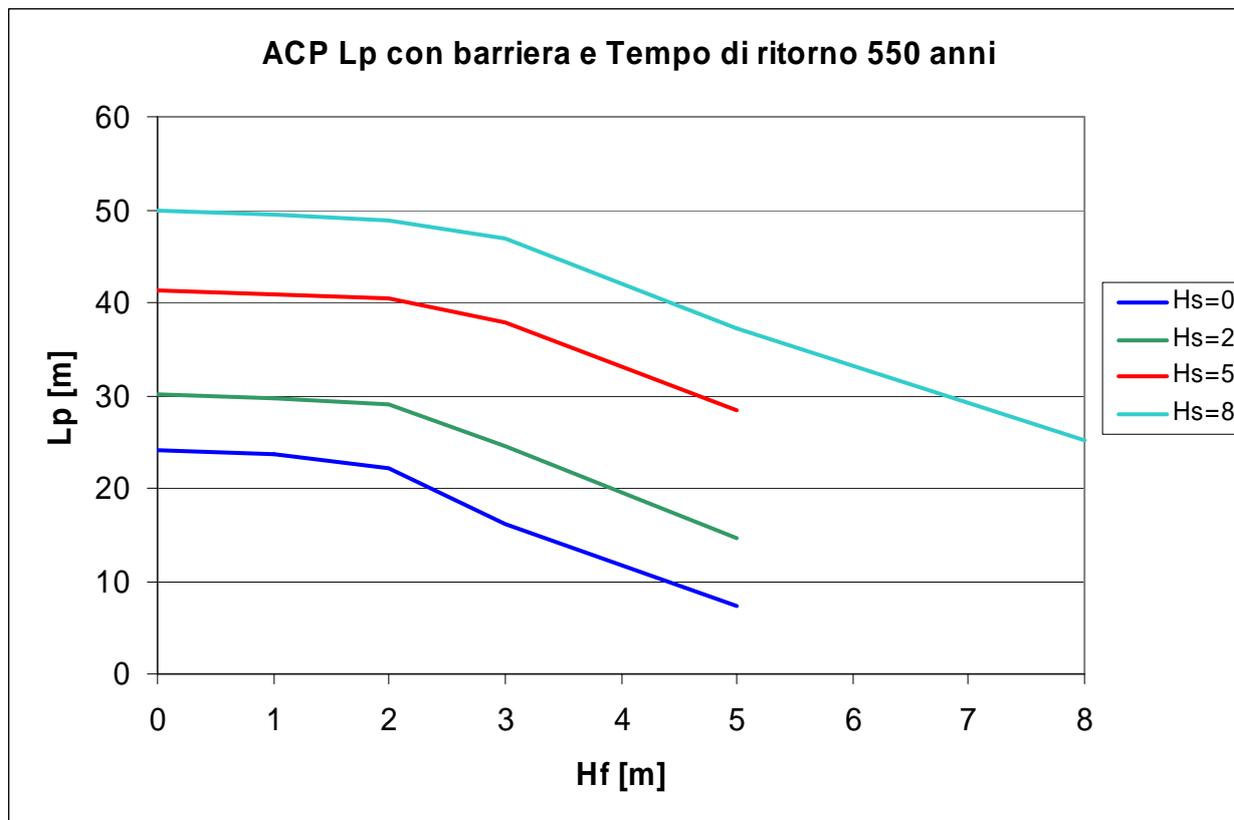


Figura 17: distanze di interferenza calcolata per l'autostrada "ACP"

Dalle simulazioni relative alle sezioni in trincea sono stati invece ricavati i diagrammi riportati in Figura 18 per l'autostrada BRE-BE-MI ed in Figura 19 per le autostrade ACP e Bretella.

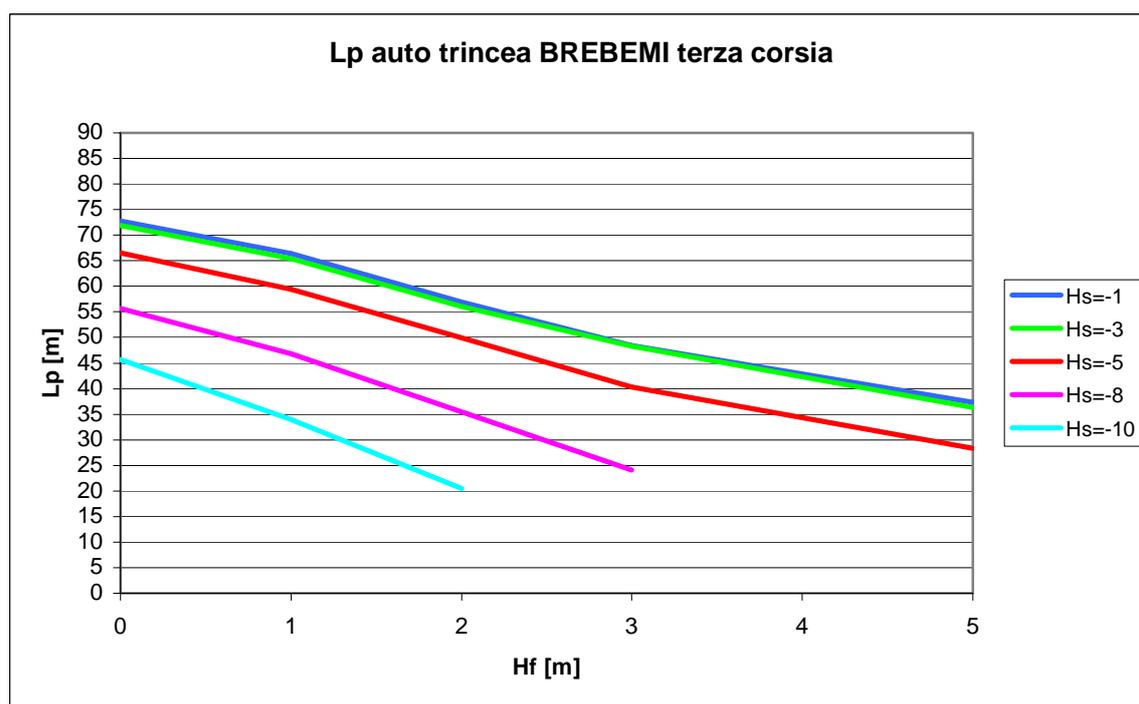


Figura 18: distanze di interferenza calcolata per l'autostrada BRE-BE-MI in trincea.

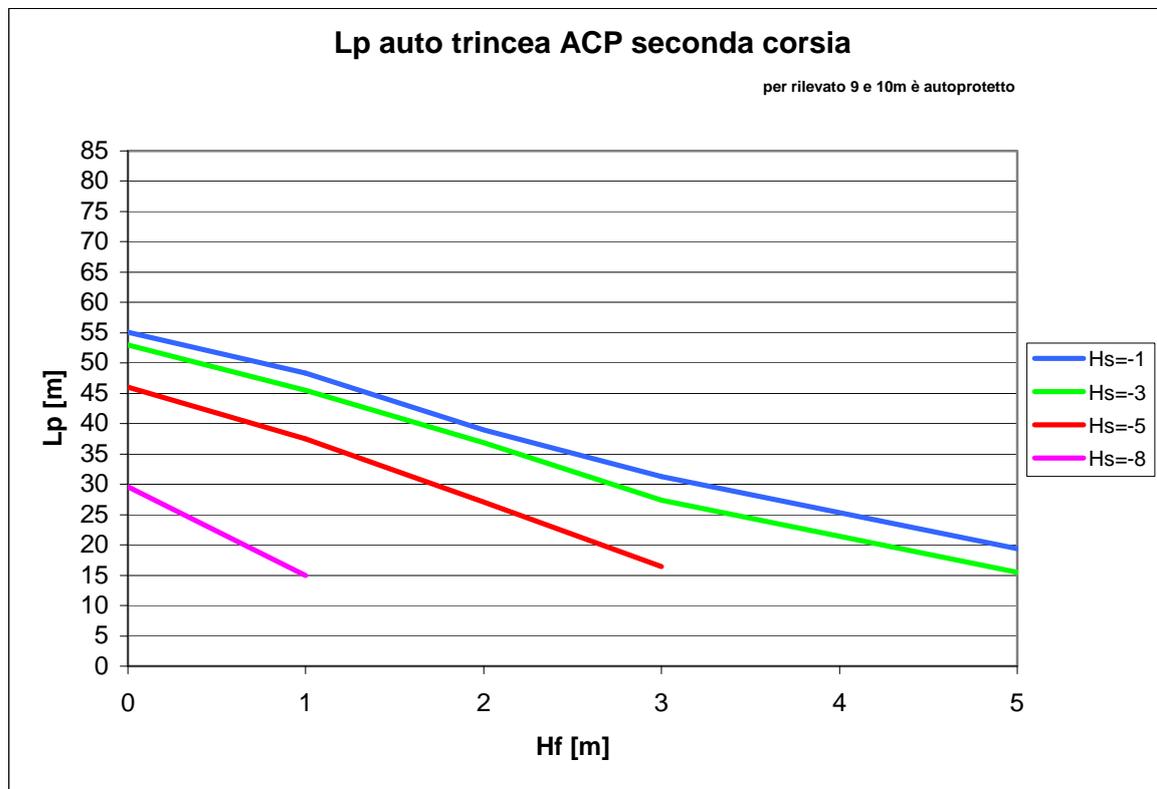


Figura 19: distanze di interferenza calcolata per l'autostrada ACP e Bretella in trincea.

13 CRITERI PER LA DEFINIZIONE DELLE AREE DI NON INTERFERENZA

13.1 Principi per la definizione delle diverse aree

In relazione al valore assunto dal parametro L_p , descritto nel capitolo 11, ed alla altezza dei due rilevati (quello stradale e quello ferroviario) si possono avere le seguenti situazioni progettuali:

- **Situazione A - di non interferenza:** si applica in quelle zone nelle quali la distanza tra il ciglio del rilevato stradale e quello del rilevato ferroviario (inteso come il punto virtuale descritto in Figura 13 è maggiore del valore di L_p di interferenza calcolato per una data altezza dei due rilevati¹ mediante il diagramma di Figura 16 e Figura 18 per l'autostrada BRE-BE-MI, Figura 17 e Figura 19 per l'autostrada ACP e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e Figura 19 per la Bretella (il valore di L_p indicato nei grafici di interferenza nel seguito sarà indicato con il simbolo L_{p6});
- **Situazione B - di "affiancamento":** in queste zone la distanza tra i rilevati (L_p) è minore di L_{p6} ed una autovettura in svio può invadere la sede ferroviaria. La larghezza dell'area interclusa è però sufficiente per affidare la protezione della linea AV a dune (di diverso tipo a seconda dello spazio disponibile);
- **Situazione C - di "stretto affiancamento":** in queste zone vi può essere ancora invasione della linea AV ma lo spazio disponibile non è sufficiente ad inserire dune e la protezione è affidata alla presenza di muri in c.a.

La presente relazione fornisce le indicazioni per la definizione del valore di L_p di interferenza che costituisce il limite tra la situazione A e la B.

In Figura 20 sono schematizzate in pianta le diverse situazioni progettuali in relazione alla distanza tra i due cigli dei rilevati.

¹ Ovvero per le sezioni in trincea, considerando le stesse come dei rilevati con altezza minore di 0.

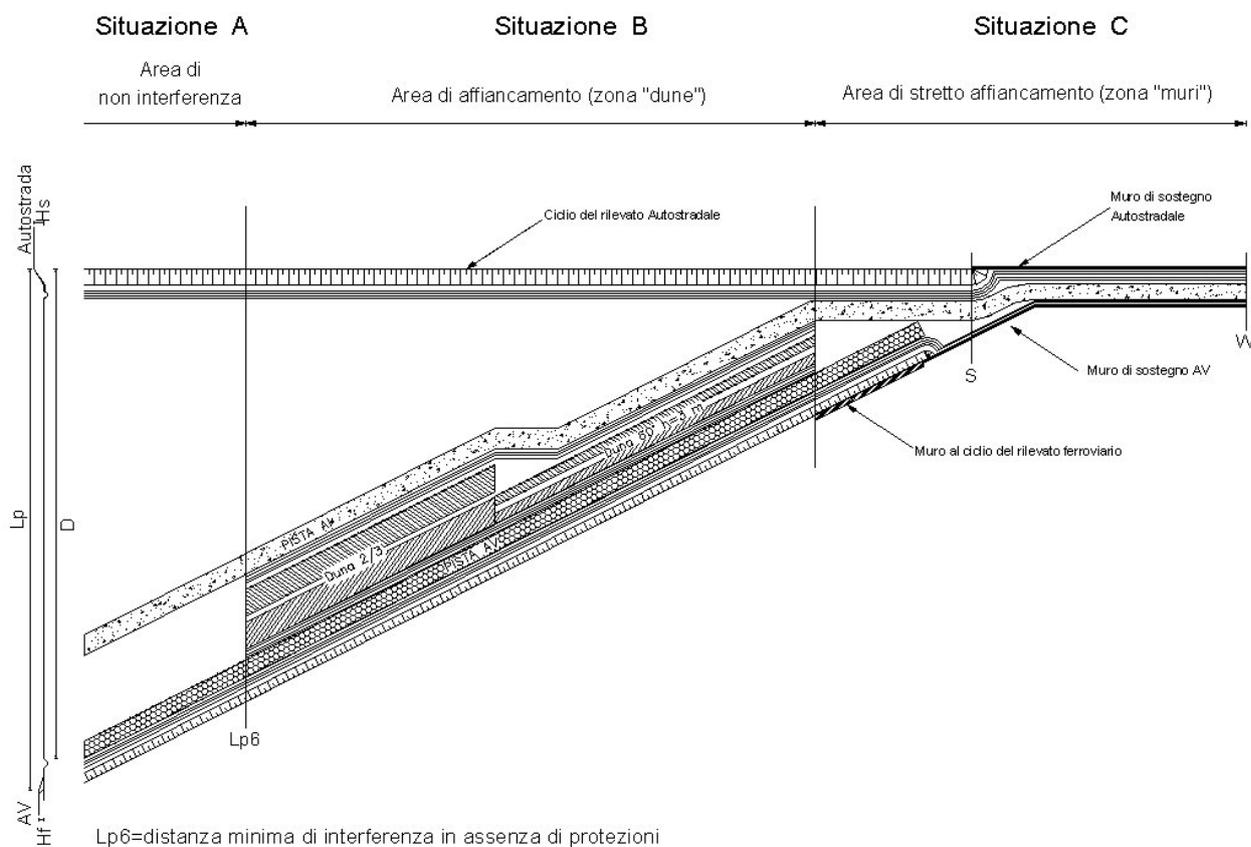


Figura 20: schematizzazione planimetrica delle diverse situazioni di interferenza

13.2 Procedura per la definizione delle distanze L_p di interferenza

Per valutare se in una data situazione progettuale è necessario disporre di protezioni può essere adottata la seguente procedura:

- definire l'altezza del rilevato ferroviario (H_f);
- definire l'altezza del rilevato stradale (H_s) ed approssimare all'unità per eccesso;
- definire la distanza L_p tra la sede ferroviaria e la sede stradale secondo la schematizzazione di Figura 13 e Figura 14;
- entrare in uno dei diagrammi da Figura 16 a Figura 19 e, in base al valore di H_s ed H_f , definire L_{p6} (distanza di interferenza in assenza di protezioni).

Se L_p della sezione esaminata è maggiore di L_{p6} non occorrono protezioni per la linea AV e la sezione sarà del tipo di quella schematicamente riportata in Figura 21. Se L_p è invece minore di L_{p6} devono essere inseriti nell'area interclusa elementi di protezione.

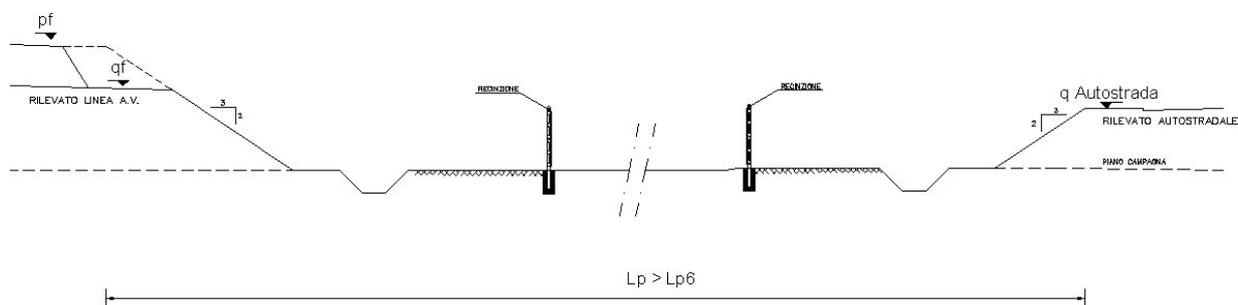


Figura 21: rappresentazione schematica della sezione trasversale dell'area interclusa nelle zone di non interferenza

13.3 Affiancamento con l'Autostrada A4 (esistente)

Ai fini della definizione delle condizioni di interferenza tra la A4 e la linea A.V./A.C. sono stati adottati gli standard definiti per l'affiancamento con la A1 (cfr. doc. A10100VE1SRIA000001).

Per comodità di lettura i valori di LP corrispondenti alle diverse altezze dei rilevati stradali e ferroviari sono sintetizzati nel diagramma di Figura 22.

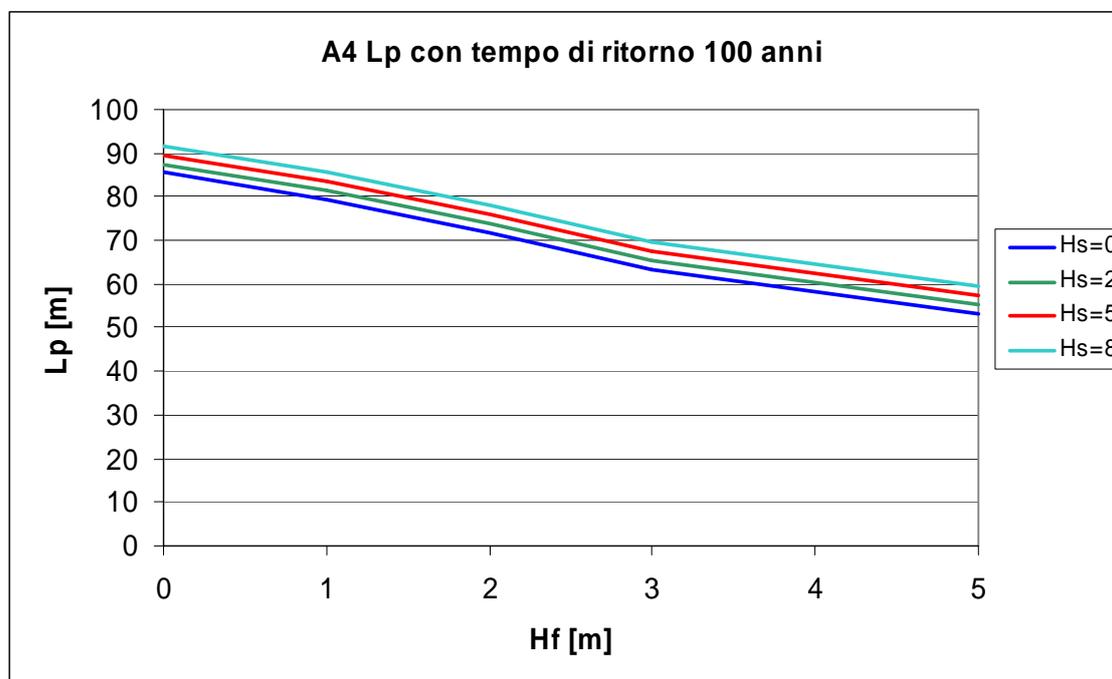


Figura 22: distanze di interferenza adottate per lo studio della interferenza con la A4. sezioni in rilevato.

In relazione alla presenza nella A4 di sezioni in trincea i diagrammi di calcolo sono stati estesi mediante l'esecuzione di 20 ulteriori simulazioni numeriche effettuate considerando le stesse ipotesi di calcolo su cui è basato il diagramma di Figura 22.

Tali analisi hanno portato a definire i valori di LP illustrati in Figura 23.

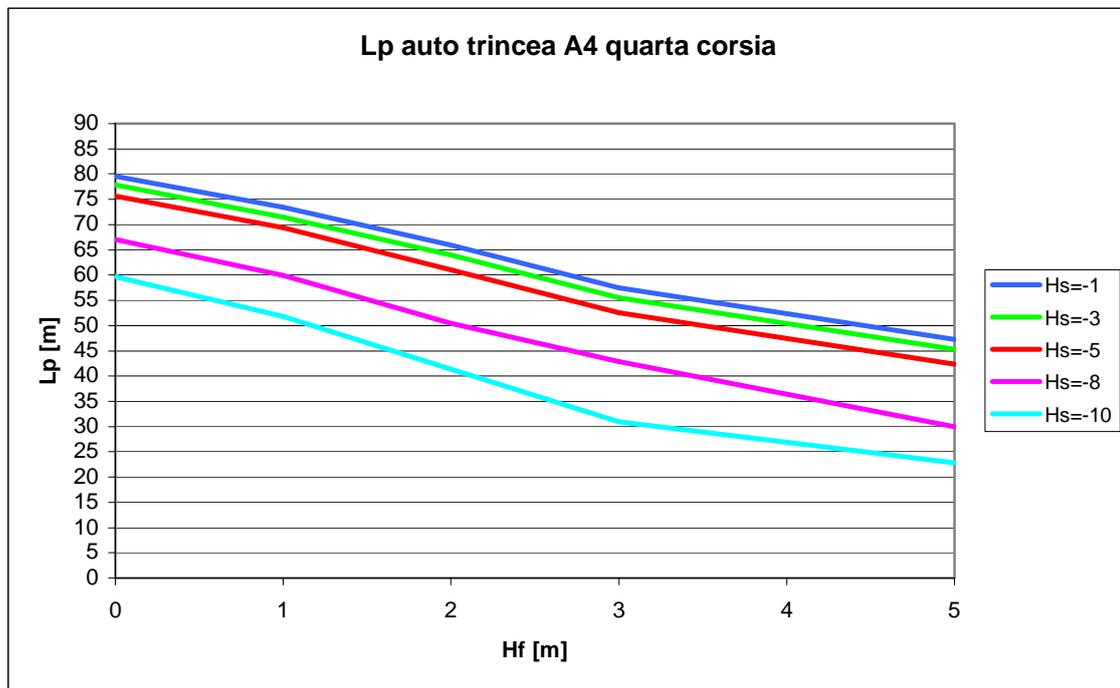


Figura 23: distanze di interferenza adottate per lo studio della interferenza con la A4 – sezioni in trincea.

ALLEGATO 1: CONDIZIONI DI CALCOLO RELATIVE ALLE SIMULAZIONI NUMERICHE

BREBEMI Veicoli Pesanti "Camion"						
	$H_{ril}^{BREB}=0\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=2\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=5\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=8\text{ m}$		TOT
$H_{ril}^{AV}=0\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=1\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=2\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=3\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=5\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=8\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=11\text{ m}$	x	x	x	x		3136
BREBEMI Veicoli Pesanti "Autoarticolati"						
	$H_{ril}^{BREB}=0\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=2\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=5\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=8\text{ m}$		
$H_{ril}^{AV}=0\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=1\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=2\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=3\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=5\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=8\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=11\text{ m}$	x	x	x	x		1176
BREBEMI trincea "Autovetture"						
	$H_{ril}^{BREB}=-1\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=-3\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=-5\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=-8\text{ m}$	$H_{ril}^{BREB}=-10\text{ m}$	
$H_{ril}^{AV}=0\text{ m}$	x	x	x	x	x	
$H_{ril}^{AV}=1\text{ m}$	x	x	x	x	x	
$H_{ril}^{AV}=2\text{ m}$	x	x	x	x	x	
$H_{ril}^{AV}=3\text{ m}$	x	x	x	x	x	
$H_{ril}^{AV}=5\text{ m}$	x	x	x	x	x	25
ACP Veicoli Pesanti "Camion"						
	$H_{ril}^{ACP}=0\text{ m}$	$H_{ril}^{ACP}=2\text{ m}$	$H_{ril}^{ACP}=5\text{ m}$	$H_{ril}^{ACP}=8\text{ m}$		
$H_{ril}^{AV}=0\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=1\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=2\text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV}=3\text{ m}$	x	x	x	x		

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA

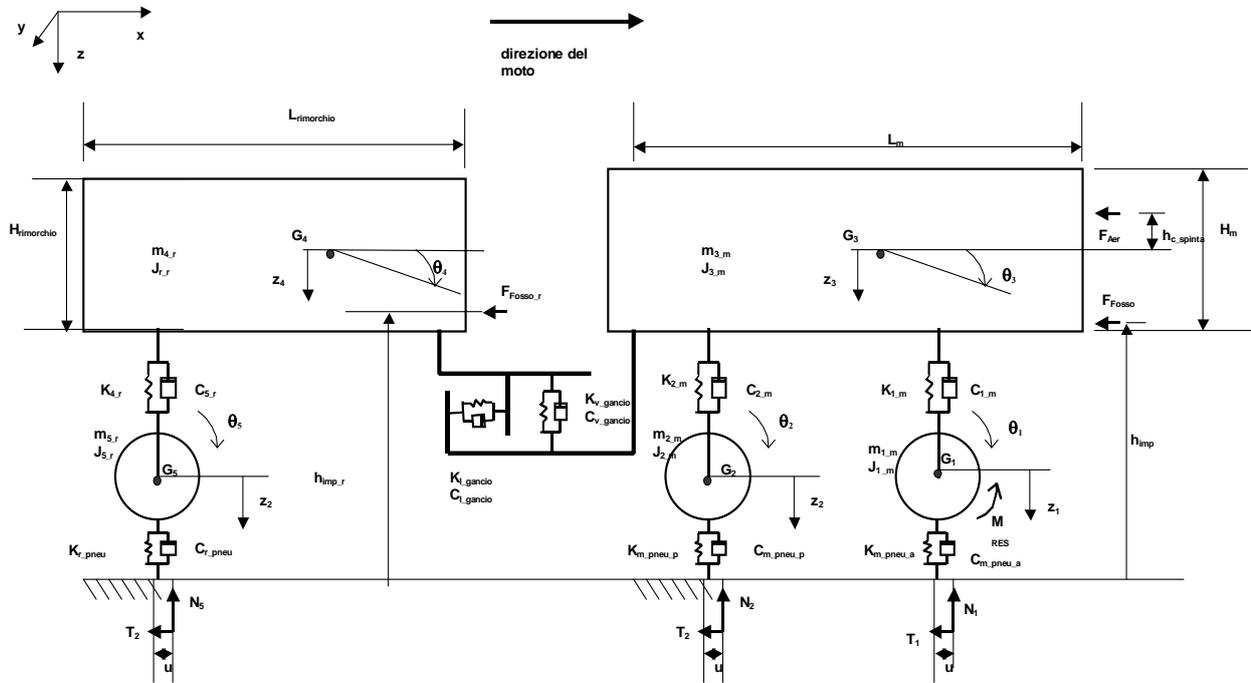


Doc. N. 01-IR-E-16076_01

Progetto
IN05Lotto
00Codifica Documento
DE2 R G SC 0000 076Rev.
0Foglio
66 di 70

$H_{ril}^{AV} = 5 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 8 \text{ m}$	x	x	x	x		1680
ACP Veicoli Pesanti "Autoarticolati"						
	$H_{ril}^{ACP} = 0 \text{ m}$	$H_{ril}^{ACP} = 2 \text{ m}$	$H_{ril}^{ACP} = 5 \text{ m}$	$H_{ril}^{ACP} = 8 \text{ m}$		
$H_{ril}^{AV} = 0 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 1 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 2 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 3 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 5 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 8 \text{ m}$	x	x	x	x		784
ACP trincea "Autovetture"						
	$H_{ril}^{ACP} = -1 \text{ m}$	$H_{ril}^{ACP} = -3 \text{ m}$	$H_{ril}^{ACP} = -5 \text{ m}$	$H_{ril}^{ACP} = -8 \text{ m}$		
$H_{ril}^{AV} = 0 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 1 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 2 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 3 \text{ m}$	x	x	x	x		
$H_{ril}^{AV} = 5 \text{ m}$	x	x	x	x		20
						6821

APPENDICE A.3: EQUAZIONI DELLA DINAMICA LONGITUDINALE E VERTICALE DEL MODELLO DI CAMION CON RIMORCHIO (AUTOTRENO)



Modello camion con rimorchio

Motrice

$$M=[\begin{array}{cccccc} m1 & 0 & 0 & 0 & 0 & J3 \\ 0 & m2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \quad (m1+m2+m3+(J1+J2)/Rr^2)]$$

$$K=[\begin{array}{cccccc} k1 & 0 & -k1 & 0 & 0 & -k1*I1 \\ 0 & k2 & -k2 & 0 & 0 & k2*I2 \\ -k1 & -k2 & k1+k2 & 0 & 0 & k1*I1-k2*I2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I1*k1 & I2*k2 & I1*k1-I2*k2 & 0 & 0 & k1*I1^2+k2*I2^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}]$$

$$C=[\begin{array}{cccccc} c1 & 0 & -c1 & 0 & 0 & -c1*I1 \\ 0 & c2 & -c2 & 0 & 0 & c2*I2 \\ -c1 & -c2 & c1+c2 & 0 & 0 & c1*I1-c2*I2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I1*c1 & I2*c2 & I1*c1-I2*c2 & 0 & 0 & c1*I1^2+c2*I2^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}]$$

Rimorchio

$$M1=[\begin{array}{cccc} m5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \quad (m4+m5+J5/(R5^2)]$$

$$K1=[\begin{array}{cccc} k5 & 0 & -k5 & -k5*I_{tr3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k5 & 0 & k5 & k5*I_{tr3} \\ -k5*I_{tr3} & 0 & k5*I_{tr3} & k5*I_{tr3}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}]$$

$$C1=[\begin{array}{cccc} c5 & 0 & -c5 & -c5*I_{tr3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c5 & 0 & c5 & c5*I_{tr3} \\ -c5*I_{tr3} & 0 & c5*I_{tr3} & c5*I_{tr3}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}]$$