



FACOLTA' DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

**APPROCCIO NUMERICO – SPERIMENTALE PER
ANALIZZARE LA DINAMICA DI UN VEICOLO
PESANTE DURANTE IL PASSAGGIO DIETRO LA
SCIA DELLA TORRE DI UN PONTE**

RELATORE

Prof. Edoardo Sabbioni

CANDIDATO

Riccardo Galeotti

Anno accademico 2010/2011

INDICE DELLA RELAZIONE

Abstract:	10
Capitolo 1: INTRODUZIONE	11
Capitolo 2: TEST SPERIMENTALI	13
- 2.1 Carichi aerodinamici agenti sul veicolo	13
- 2.2 Sistema di misurazione delle forze e dei momenti	15
- 2.2.1 Bilancia dinamometrica	16
- 2.2.2 Prese di pressione	16
- 2.3 Prove effettuate sul “Flat - Plate”	20
- 2.3.1 Polari per le singole sezioni	23
- 2.4 Prove effettuate sul “FRC”	27
- 2.4.1 Modello del ponte e della torre	27
- 2.4.2 Configurazione dei test	29
- 2.4.3 Coefficienti di forza e di momento globali	33
Capitolo 3: MODELLO DEL CAMION PER LE SIMULAZIONI NUMERICHE	37
- 3.1 Dati del veicolo	37
- 3.2 Modello multi – body del veicolo	39
- 3.2.1 Caratteristiche degli pneumatici	41
- 3.3 Modello del pilota	42
- 3.4 Caratterizzazione del veicolo	45
Capitolo 4: FORZE AERODINAMICHE	48
- 4.1 Determinazione del profilo di velocità del vento	49
- 4.1.1 Misure sperimentali di forze e momenti	50
- 4.1.2 Calcolo numerico di forze e momenti	50
- 4.1.3 Definizione della funzione d’errore	51
- 4.2 Profili di velocità	51
- 4.2.1 Configurazione 12	51
- 4.2.2 Configurazione 13	55
- 4.3 Applicazione del profilo di vento sul veicolo mobile	59

Capitolo 5: RISULTATI	62
- 5.1 Descrizione delle manovre	62
- 5.1.1 Ricostruzione dell'angolo di sterzo	65
- 5.2 Definizione delle "Critical Wind Curves" (CWC)	67
- Effetto del carico e delle barriere	67
- Effetto del pilota	70
- 5.3 Indici sintetici	76
- 5.4 Analisi delle configurazioni	77
- 5.4.1 Configurazione 12 – veicolo carico	78
- 5.4.2 Configurazione 12 – veicolo scarico	81
- 5.4.3 Configurazione 13 – veicolo carico	84
- 5.4.4 Configurazione 13 – veicolo scarico	92
Capitolo 6: CONCLUSIONI	95
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	99

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 geometria del camion: vista laterale	14
Figura 2 geometria del camion: vista dall'alto	14
Figura 3 sistema di riferimento del camion: vista dall'alto	15
Figura 4 sistema di riferimento del camion: vista laterale	15
Figura 5 bilancia Ruag SG 194-6	16
Figura 6 scanner ESP	17
Figura 7 PSI-system 8400	17
Figura 8 distribuzione delle prese di pressione sul modello del camion	18
Figura 9 mesh della fiancata modello del veicolo	19
Figura 10 confronto bilancia - pressioni CFx Vs α	20
Figura 11 confronto bilancia - pressioni CFy Vs α	21
Figura 12 confronto bilancia - pressioni CFz Vs α	21
Figura 13 confronto bilancia - pressioni CMx Vs α	22
Figura 14 confronto bilancia - pressioni CMy Vs α	22
Figura 15 confronto bilancia - pressioni CMz Vs α	23
Figura 16 divisione in sezioni del camion	24
Figura 17 polare CFx per tutte le sezioni	24
Figura 18 polare CFy per tutte le sezioni	25
Figura 19 polare CFz per tutte le sezioni	25
Figura 20 polare CMx per tutte le sezioni	26
Figura 21 polare CMy per tutte le sezioni	26
Figura 22 polare CMz per tutte le sezioni	27
Figura 23 schema strutturale del FRC	28
Figura 24 sezione impalcato del FRC	28
Figura 25 modello ponte – torre	29
Figura 26 schema della barriera vicino la torre	30
Figura 27 schema del cartellone segnaletico e della tettoia	30
Figura 28 posizioni -1,2,4,7	31
Figura 29 configurazione 12 (NDS + SG)	32
Figura 30 configurazione 13 (NDS + HS + SG)	32
Figura 31 confronto CFy bilancia - prese di pressione	34

Figura 32 confronto CMx bilancia - prese di pressione	34
Figura 33 confronto CMz bilancia - prese di pressione	35
Figura 34 configurazioni 12/13, posizione -1	35
Figura 35 configurazioni 12/13, posizione 2	36
Figura 36 configurazioni 12/13, posizione 4	36
Figura 37 configurazioni 12/13, posizione 7	36
Figura 38 modello multi - body del veicolo	39
Figura 39 schema sistema Multi – Body	40
Figura 40 confronto MU Vs α	42
Figura 41 dinamica neuro - muscolare del pilota	44
Figura 42 prova di sorpasso	45
Figura 43 steer - angle Vs A_y	46
Figura 44 angolo di deriva Vs A_y	46
Figura 45 Angolo di rollio Vs A_y	47
Figura 46 velocità relativa vento – camion	48
Figura 47 generico profilo parametrico	50
Figura 48 profilo di velocità del vento- configurazione 12	52
Figura 49 confronto distribuzione forze laterali sperimentali - numeriche cfg 12	53
Figura 50 confronto distribuzione momenti d'imbardata sperimentali – numerici cfg 12	53
Figura 51 confronto forza laterale totale sperimentale - numerica per le 9 posizioni - cfg 12	54
Figura 52 confronto momento d'imbardata totale sperimentale - numerico per le 9 posizioni – cfg 12	54
Figura 53 profilo di velocità del vento - cfg 13	56
Figura 54 confronto distribuzione forze laterali sperimentali-numeriche cfg 13	57
Figura 55 confronto distribuzione momenti d'imbardata sperimentali-numerici cfg 13	57
Figura 56 confronto forze laterali totali sperimentali - numeriche per le 9 posizioni - cfg 13	58
Figura 57 confronto momenti d'imbardata totali sperimentali – numerici per le 9 posizioni - cfg 13	58
Figura 58 velocità relativa veicolo – vento	59
Figura 59 polari per le diverse sezioni	60
Figura 60 blocco SimMechanics per il calcolo di forze e momenti aerodinamici	61
Figura 61 vento libero – traiettoria (1), δ (2), profilo di velocità (3), ψ (4)	63
Figura 62 veicolo su ponte – F_y aerodinamica (1), M_z aerodinamico (2), traiettoria (3), δ (4), ψ (5), A_y (6)	64
Figura 63 confronto F_y - M_x configurazioni 12/13	65

Figura 64 M_z - configurazione 12/13 _____	65
Figura 65 confronto angolo di sterzo misurato e ricostruito – configurazioni 12/13 - veicolo carico _____	66
Figura 66 confronto angolo di sterzo misurato e ricostruito – configurazioni 12/13 - veicolo carico _____	66
Figura 67 stabilità del veicolo al variare delle condizioni di prova – pilota normale _____	68
Figura 68 punto di ribaltamento - cfg 12 _____	69
Figura 69 punto di ribaltamento - cfg 13 _____	69
Figura 70 speed - up configurazione 12 _____	70
Figura 71 CWC configurazione 12 - veicolo carico _____	71
Figura 72 CWC configurazione 12 - veicolo scarico _____	71
Figura 73 CWC configurazione 13 - veicolo carico _____	72
Figura 74 CWC configurazione 13 - veicolo scarico _____	72
Figura 75 δ Vs distanza dalla torre al variare del pilota _____	73
Figura 76 δ Vs distanza dalla torre al variare del pilota - zoom _____	74
Figura 77 traiettoria al variare del pilota _____	74
Figura 78 spostamento laterale massimo _____	76
Figura 79 IY e NLT Vs distanza dalla torre _____	76
Figura 80 legenda per il grafico NLT Vs IY _____	77
Figura 81 NLT Vs IY, configurazione 12, veicolo carico _____	78
Figura 82 NLT Vs IY, configurazione 12, veicolo carico - zoom _____	78
Figura 83 IY Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 12 - veicolo carico _____	79
Figura 84 NLT Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 12 - veicolo carico _____	80
Figura 85 NLT Vs IY, configurazione 12, veicolo scarico _____	81
Figura 86 NLT Vs IY, configurazione 12, veicolo scarico – zoom _____	82
Figura 87 IY Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 12 - veicolo scarico _____	83
Figura 88 NLT Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 12 - veicolo scarico _____	84
Figura 89 NLT Vs IY, configurazione 13, veicolo carico _____	85
Figura 90 confronto angolo di sterzo 20 - 80 Km/h _____	86
Figura 91 confronto traiettoria 20 - 80 Km/h _____	86
Figura 92 confronto accelerazione laterale 20 - 80 Km/h _____	87
Figura 93 confronto trasferimento di carico 20 - 80 Km/h _____	87
Figura 94 velocità del camion che minimizza lo spostamento laterale _____	88
Figura 95 V^2_{rel} e CF_y Vs velocità del veicolo _____	89
Figura 96 confronto NLT Vs IY al variare del pilota _____	89

Figura 97 IY Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 13 - veicolo carico_____	90
Figura 98 NLT Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 13 - veicolo carico _____	91
Figura 99 NLT Vs IY, configurazione 13, veicolo scarico _____	92
Figura 100 IY Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 13 - veicolo scarico _____	93
Figura 101 NLT Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 13 - veicolo scarico _____	94

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 dimensioni del veicolo _____	14
Tabella 2 dati caratteristici del FRC _____	28
Tabella 3 posizioni del camion testate _____	31
Tabella 4 dati veicolo _____	39
Tabella 5 dati pneumatici _____	41
Tabella 6 coordinate parametriche del profilo del vento _____	49
Tabella 7 parametri iniziali configurazione 12 _____	51
Tabella 8 parametri configurazione 12 _____	52
Tabella 9 parametri iniziali configurazione 13 _____	55
Tabella 10 parametri configurazione 13 _____	55
Tabella 11 parametri ricostruzione angolo di sterzo, veicolo carico _____	67
Tabella 12 parametri ricostruzione angolo di sterzo, veicolo scarico _____	67

ABSTRACT

La stabilità dei veicoli pesanti investiti da vento laterale è un problema già affrontato in letteratura. Diversi studi hanno dimostrato come la variazione delle forze aerodinamiche possa influenzare le condizioni di sicurezza ed essere causa di ribaltamento. Ponti situati in campo aperto, ad un'elevata altezza, sono soggetti a venti di forte intensità; la presenza di ostacoli, come le torri di sostegno, modifica il campo di flusso del vento stesso rendendolo non stazionario e generando accelerazioni ai lati della torre che causano la presenza di speed – up. Per questo motivo la schermatura dei ponti è molto studiata. Solitamente il problema viene studiato staticamente, trascurando gli effetti della variazione delle forze aerodinamiche sulla dinamica del veicolo. L'obiettivo della tesi è di studiare l'interazione dinamica tra forze aerodinamiche, veicolo e pilota perché le cause del ribaltamento non sono solamente statiche, ma anche di tipo dinamico. Per far ciò, è stata condotta una campagna di prove sperimentali presso la Galleria del Vento del Politecnico di Milano per identificare i coefficienti aerodinamici del veicolo. Per analizzare il comportamento dinamico del veicolo, sono state condotte simulazioni utilizzando un modello multi – body di un veicolo pesante del tipo motrice semi – rimorchio. Il modello del veicolo è stato accoppiato ad un modello di pilota con risposta neuro – muscolare. Le prove sono state condotte al variare del tipo di barriera, del tipo di pilota, della velocità del veicolo e del vento. In questo lavoro si pone l'attenzione sui fenomeni, generati dalle barriere anti – vento, che disturbano la dinamica del veicolo. Lo scopo ultimo della tesi è di proporre degli indici sintetici in grado di valutare la bontà delle barriere.

1) INTRODUZIONE

La stabilità dei veicoli pesanti in marcia esposti a venti trasversali di forte intensità è un problema tutt'oggi di vivo interesse. Diversi studi hanno dimostrato come una variazione improvvisa delle forze aerodinamiche possa causare il ribaltamento del veicolo. Si sono verificati incidenti riconducibili all'effetto del vento laterale in cui sono coinvolti principalmente autoarticolati, soprattutto le configurazioni motrice-rimorchio e motrice-semirimorchio [3,4].

In questo studio viene considerata una condizione particolare: il passaggio del veicolo nella scia della torre di un ponte. In letteratura sono presenti studi riguardo la possibilità di analizzare la stabilità del veicolo [1,2], basandosi, però, solamente su criteri statici. Nessuno ha mai considerato in che maniera venga influenzata la dinamica del sistema veicolo – pilota. Questo lavoro ha l'obiettivo di studiare l'interazione dinamica tra forze aerodinamiche, veicolo e pilota. Il comportamento dinamico del sistema veicolo – pilota è molto importante perché, oltre il ribaltamento statico, può sorgere anche un'instabilità dinamica. Questo secondo aspetto, ad oggi, è completamente trascurato nella progettazione delle barriere anti – vento. Le barriere non devono solo schermare il vento, ma farlo anche in maniera opportuna. Questo significa che la barriera ha il compito di evitare il ribaltamento statico del veicolo ma, allo stesso tempo, evitare di modificare il profilo di velocità del vento troppo bruscamente per non causare l'instabilità dinamica del veicolo.

La tesi si propone di studiare l'interazione del sistema veicolo – pilota considerando due scenari: ponte con torre in presenza delle barriere e ponte con torre in assenza delle barriere.

Il presente lavoro s'inserisce nell'ambito del progetto “ Wind Shield Modelling for the Forth Replacement Crossing”. Scopo di tale progetto è di identificare efficaci barriere anti-vento che riescano a fornire un'adeguata copertura ai veicoli in transito, in grado da garantirne la stabilità durante la marcia. A tal proposito, sono state condotte prove sperimentali presso la galleria del vento del politecnico di Milano (GVPM), i cui risultati saranno utilizzati per sviluppare un modello per l'analisi dell'interazione dinamica tra forze aerodinamiche e sistema veicolo - pilota.

Lo studio si è concentrato sugli effetti dinamici, causati dalla variazione delle forze aerodinamiche, su un autoarticolato. Dalle misure sperimentali, eseguite presso la GVPM, è stato messo a punto un approccio numerico - sperimentale per valutare la bontà delle barriere anti-vento e in che modo esse influenzino la dinamica di un veicolo pesante.

I problemi che questo lavoro si prefigge di esaminare sono i seguenti:

- Variazione improvvisa delle forze aerodinamiche agenti sul camion durante il passaggio dietro la scia di una torre.
- Condizioni di pericolo che nascono a causa della variazione delle forze aerodinamiche:
 - Ribaltamento
 - Uscita dalla carreggiata
 - Perdita del controllo del mezzo da parte del pilota
- Tipologia di barriere antivento da utilizzare per evitare la nascita delle condizioni di pericolo sopracitate.
- Definizione di indici di sicurezza.

Esistono già in letteratura studi riguardanti le problematiche legate al ribaltamento dei mezzi pesanti, con particolare riferimento al passaggio dietro la scia di una torre. Tuttavia gli studi esistenti si sono concentrati solamente sulla variazione dei carichi aerodinamici, considerando test anche con veicolo mobile per validare l'approccio utilizzato, ma non tenendo conto dell'interazione dinamica tra veicolo e vento. Charuvisit [5] ha proposto una metodologia, per valutare analiticamente gli effetti aerodinamici legati al passaggio dietro la scia della torre di un ponte, basata su test sperimentali condotti in galleria del vento in condizioni stazionarie con un modello di veicolo statico.

Altri studi, circa il comportamento di camion soggetti a vento trasversale, sono stati condotti da Coleman e Baker [8]. Anche in questo caso l'approccio è di tipo statico e non viene trattato il problema dell'interazione dinamica tra veicolo, pilota e vento e non viene fornita alcuna indicazione circa le condizioni di ribaltamento.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è di investigare l'interazione tra veicolo, pilota e azioni aerodinamiche. Le analisi sono condotte utilizzando un modello Multi - Body di un autoarticolato, composto da una motrice e un semi-rimorchio, in grado di simulare la dinamica di handling del veicolo, accoppiato a un modello di pilota [6], in cui è stata anche prevista una risposta neuromuscolare [7]. Il sistema è completato con un modello che riproduce le azioni aerodinamiche agenti sul camion durante il suo percorso dietro la torre: le caratteristiche delle forze aerodinamiche sono state ricavate mediante studi su test effettuati in galleria del vento su veicolo fermo posto a differenti distanze dalla torre in presenza e assenza di barriere anti - vento [11].

Nel presente lavoro di tesi ci si propone di analizzare:

- Parametri che influenzano la progettazione di un'efficace barriera anti - vento.
- Stabilire in maniera univoca le condizioni di sicurezza per un veicolo che attraversa la scia della torre di un ponte.
- Determinare quali strumenti, numerici e sperimentali, siano necessari per analizzare il problema.
- Valutare la bontà di una barriera, in termini di schermatura e risposta dinamica del veicolo, a prescindere dalle capacità del pilota.

Lo scopo ultimo del lavoro è quello di proporre degli indici che in maniera sintetica riescano a descrivere le prestazioni della barriera e possano permettere di stabilire le condizioni di sicurezza per il transito dei veicoli.

Nel seguente lavoro di tesi, verranno descritte le prove sperimentali e il modello numerico utilizzato per poter simulare la dinamica di un veicolo pesante durante l'attraversamento dietro la scia di una torre.

Nel capitolo 2 verranno descritte le prove effettuate presso la GVPM e presentati i risultati ottenuti.

Nel capitolo 3 verrà descritto il modello numerico del veicolo utilizzato per effettuare le simulazioni; sempre nello stesso capitolo è descritto il modello del pilota utilizzato durante le prove.

Nel capitolo 4 è riportato il calcolo del profilo di velocità del vento per le diverse configurazioni di prova e il calcolo delle forze aerodinamiche da applicare al veicolo durante la simulazione.

Nel capitolo 5 sono riportati i risultati delle simulazioni. In questo capitolo vengono proposti 2 indici sintetici che descrivono il rischio di instabilità del veicolo: un indice si riferisce al ribaltamento del mezzo, mentre l'altro all'invasione della corsia adiacente a quella del veicolo.

Nel capitolo 6, infine, sono riportate le considerazioni sui risultati ottenuti e le conclusioni.

2) TEST SPERIMENTALI

Lo scopo delle misure effettuate presso la GVPM è di individuare i coefficienti aerodinamici, di forza e momento, che caratterizzano il veicolo. A tal proposito, sono state condotte prove specifiche utilizzando due diverse tecniche di misura. Le misure sono state effettuate sia con una bilancia dinamometrica che utilizzando una serie di prese di pressione. Le due misure forniscono un diverso tipo di informazioni: quelle effettuate con la bilancia dinamometrica, forniscono un' indicazione sulla forza globale agente sul camion e non permettono di individuare alcun tipo di distribuzione di forza e momento sul veicolo; le misure effettuate con le prese di pressione, invece, forniscono la distribuzione di pressione sulle superfici del camion da cui, tramite un processo di integrazione, è possibile determinare la distribuzione di forze agenti sul veicolo. Per il tipo di analisi che si vuole svolgere in questo lavoro, risulta fondamentale conoscere non solo la forza totale agente sul mezzo, ma anche la sua distribuzione. Come si vedrà in seguito, le prove che verranno utilizzate direttamente all'interno delle simulazioni sono quelle effettuate tramite le prese di pressione. Le prove effettuate con la bilancia dinamometrica, tuttavia, hanno la loro importanza: l'approccio che utilizza la distribuzione di pressione, sicuramente fornisce più informazioni, però è meno preciso rispetto alle prove effettuate con la bilancia dinamometrica. Queste misure, quindi, servono per validare l'integrazione delle pressioni e forniscono un' idea sul grado di approssimazione introdotto nel modello.

2.1) CARICHI AERODINAMICI AGENTI SUL VEICOLO

I carichi agenti sul camion sono espressi in termini di forze e momenti medi adimensionalizzati rispetto le grandezze caratteristiche del camion.

$$C_{Fi} = \frac{\overline{F}_i}{\overline{q}_h LH} \quad i = x, y, z;$$

$$C_{Mi} = \frac{\overline{M}_i}{\overline{q}_h LH^2} \quad i = x, y;$$

$$C_{Mz} = \frac{\overline{M}_z}{\overline{q}_h L^2 H}$$

In cui:

$\overline{q}_h = \frac{1}{2} \rho \overline{U}_h^2$ [Pa] : Pressione dinamica media all'altezza di riferimento

L, H : Lunghezza caratteristiche per adimensionalizzare i carichi aerodinamici

$\overline{F}_i, \overline{M}_i$: Forze e momenti misurati in direzione x,y,z tramite la bilancia

La geometria del veicolo è stata fornita dalla "Jacobs - Arup Joint Venture" (JAJV), Joint Venture designata dal governo scozzese per la gestione e il controllo dei lavori per la costruzione del FRC. Il modello presenta un rapporto di scala pari a:

$$\lambda = 1:40$$

In tabella 1 vengono riportate le grandezze geometriche del camion utilizzate per il calcolo dei coefficienti. Le figure 1 e 2, mostrano, invece, le dimensioni del modello utilizzato per le prove:

TRUCK		
	L_t	H_t
Modello in scala [m]	0.414	0.096
Modello reale [m]	16.56	3.84

Tabella 1 dimensioni del veicolo

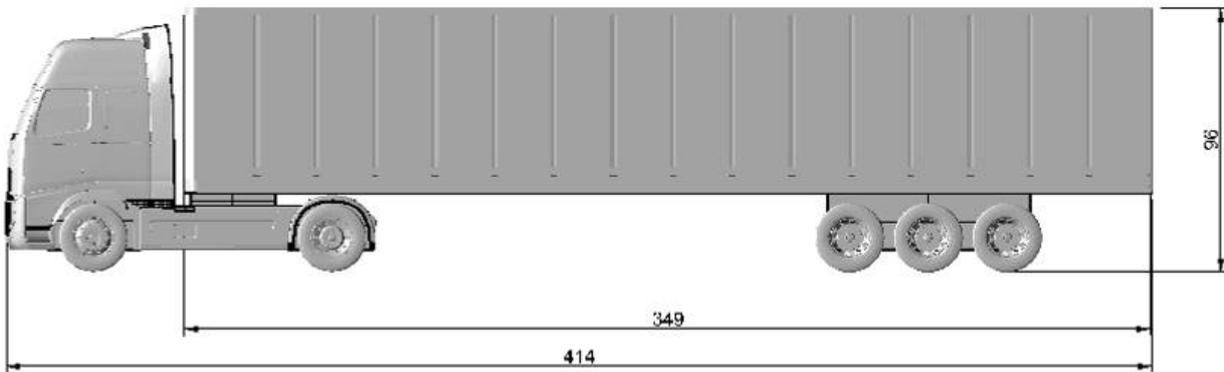


Figura 1 geometria del camion: vista laterale



Figura 2 geometria del camion: vista dall'alto

Per il calcolo, tutti i coefficienti sono stati ridotti nello stesso punto. Il punto di riduzione per il calcolo delle forze è posizionato a 192 cm dall'estremità posteriore del camion, a terra e al centro del camion in direzione y . La convenzione adottata, per il calcolo dei coefficienti, prevede che l'angolo d'incidenza del vento sia considerato pari a 0° quando è ortogonale alla superficie laterale del camion e pari a 90° quando è parallelo all'asse longitudinale del camion, ma indirizzato dal fronte verso il retro. La direzione degli assi è riportata in figura:

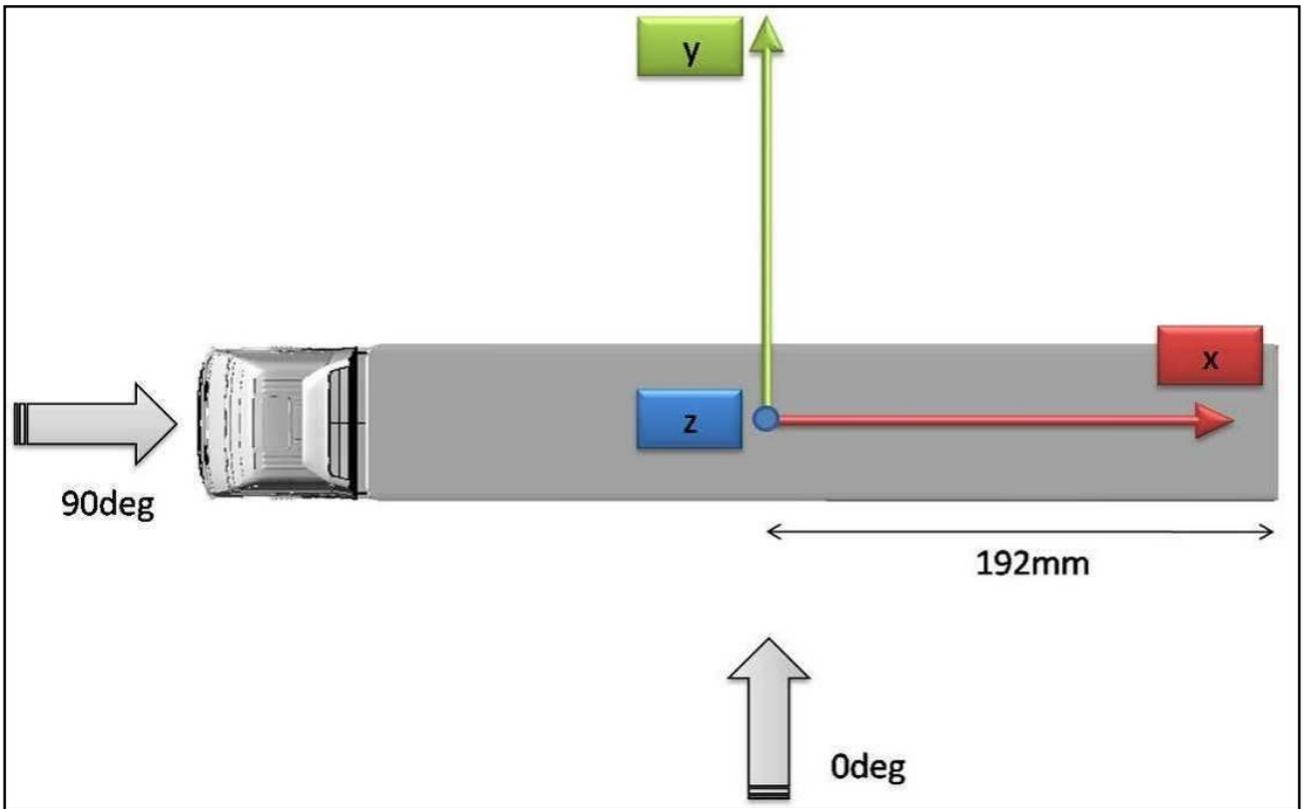


Figura 3 sistema di riferimento del camion: vista dall'alto

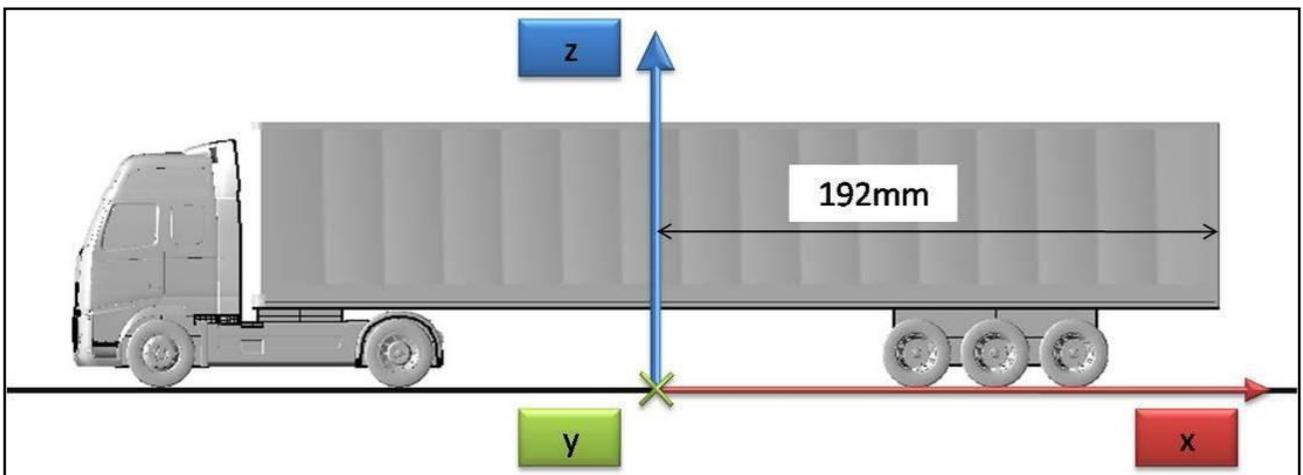


Figura 4 sistema di riferimento del camion: vista laterale

2.2) SISTEMI DI MISURAZIONE DELLE FORZE E DEI MOMENTI

Come è già stato detto in precedenza, sono stati adottati due metodi per la misurazione dei carichi aerodinamici agenti sul veicolo: la bilancia dinamometrica e le prese di pressione. All'inizio del capitolo sono già state illustrate le differenze tra le due metodologie. Vengono ora descritte la strumentazione e le metodologie stesse utilizzate per le misure.

2.2.1) BILANCIA DINAMOMETRICA

Durante le prove, a bordo del veicolo è stata installata una bilancia dinamometrica Ruag SG 194-6. Il collegamento tra bilancia e veicolo è effettuato mediante una cornice in alluminio. Il sistema complessivo camion – bilancia è poi collegato alla superficie del ponte garantendo il gioco corretto tra il fondo del camion e la strada. La bilancia è in grado di misurare le tre componenti di forza e le tre componenti di momento agenti sul camion. All'interno della bilancia è presente una massa nota collegata a 3 molle, direzionate secondo il sistema di riferimento sopra descritto, la cui rigidità è nota. Lo spostamento della massa nelle 3 direzioni, fornisce il valore di forza globale agente lungo quella direzione. Le misure effettuate tramite la bilancia possono essere considerate affidabili perché non introducono nel sistema di misura nessuna approssimazione. A partire dalle misure di forza, vengono poi calcolati i coefficienti aerodinamici con le formule illustrate precedentemente. La figura rappresenta la bilancia Ruag SG 194-6, utilizzata per le prove:

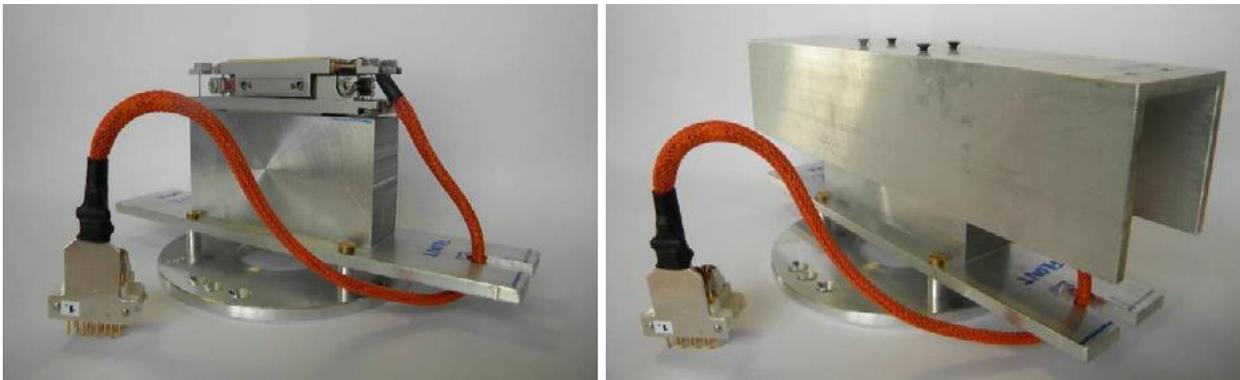


Figura 5 bilancia Ruag SG 194-6

2.2.2) PRESE DI PRESSIONE

Il carico agente viene calcolato a partire dalle misure, in punti discreti, della pressione agente sulla superficie del camion. Le misure sono effettuate attraverso lo scanner ad alta velocità PSI-system 8400; questo dispositivo supporta gli scanner di pressione miniaturizzati ESP.

Le dimensioni ridotte dello scanner permettano che sia installato direttamente all'interno del modello, vicino ai punti di misura, riducendo così la lunghezza dei tubi. Questo è molto importante perché il ritardo di fase del segnale campionato dipende dalla lunghezza dei tubi.

Il main frame del PSI – System 8400 comprende anche un'unità per la calibrazione della pressione; grazie a questo dispositivo è possibile mantenere l'accuratezza dell'ESP con calibrature periodiche on-line.

Le pressioni sono acquisite per una durata di 60 secondi ad una frequenza di 100 Hz.



Figura 6 scanner ESP



Figura 7 PSI-system 8400

Sul camion sono state posizionate 76 prese di pressione, collegate tramite 3 scanner EPS al PSI – System 8400. Sulla motrice sono state collocate 16 prese di pressione mentre sul rimorchio ve ne sono 60. Le figure sottostanti mostrano la disposizione delle prese di pressione:

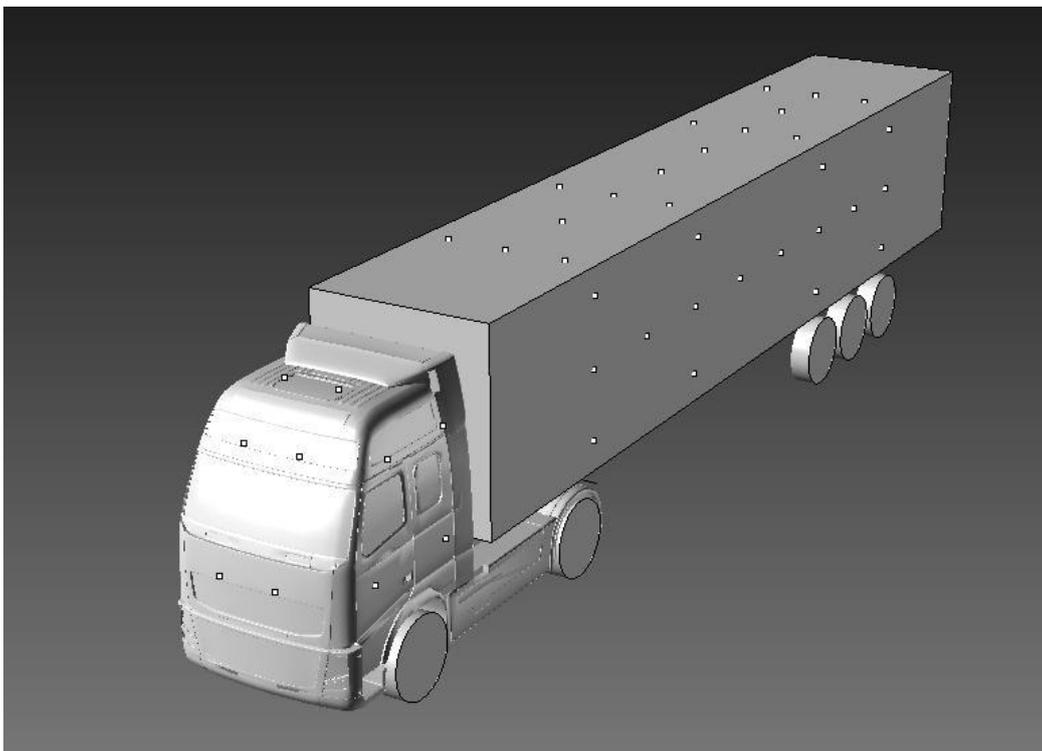
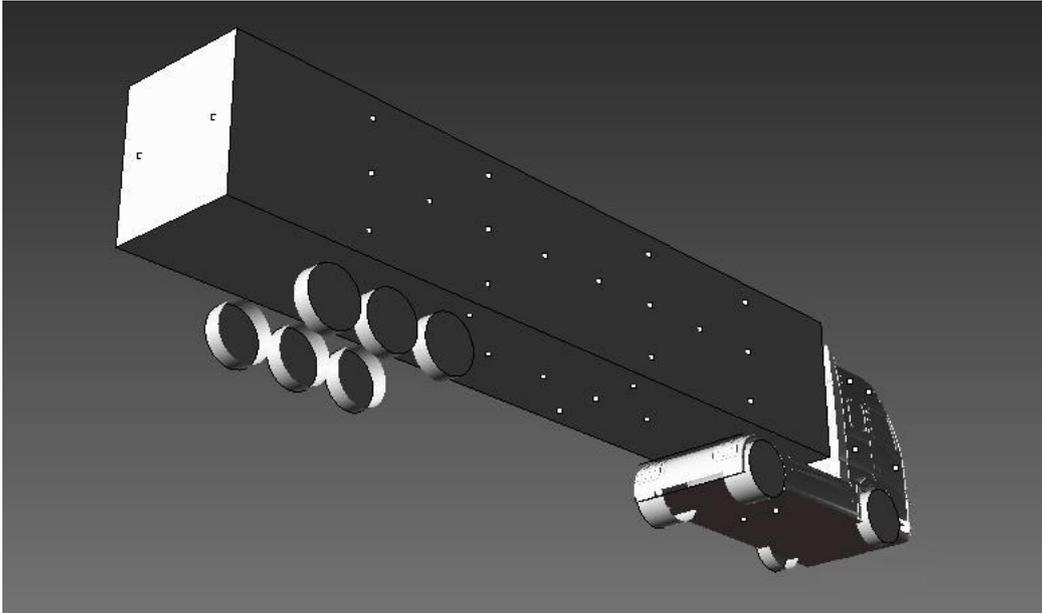


Figura 8 distribuzione delle prese di pressione sul modello del camion

Le misure delle pressioni vengono poi fornite adimensionalizzate in termini di coefficienti locali di pressione:

$$C_{p,i}(t) = \frac{p_i(t) - \bar{p}_s}{\bar{q}_h}$$

In cui:

- $p_i(t)$ [Pa] : pressione misurata dall' i-esima presa di pressione;
- \bar{p}_s [Pa] : pressione statica di riferimento nel flusso libero;
- \bar{q}_h [Pa] : pressione dinamica media all'altezza di riferimento;

INTEGRAZIONE DELLE PRESSIONI

Per calcolare le forze aerodinamiche agenti sul camion è necessario integrare le misure di pressione compiute. Per effettuare quest'operazione, è stata effettuata una mesh con elementi triangolari su tutta la superficie del camion. Nell'immagine sottoastante i cerchi blu (o) rappresentano la discretizzazione della superficie laterale mentre i quadrati rossi (□) rappresentano le prese di pressione, di cui si conosce il valore di pressione:

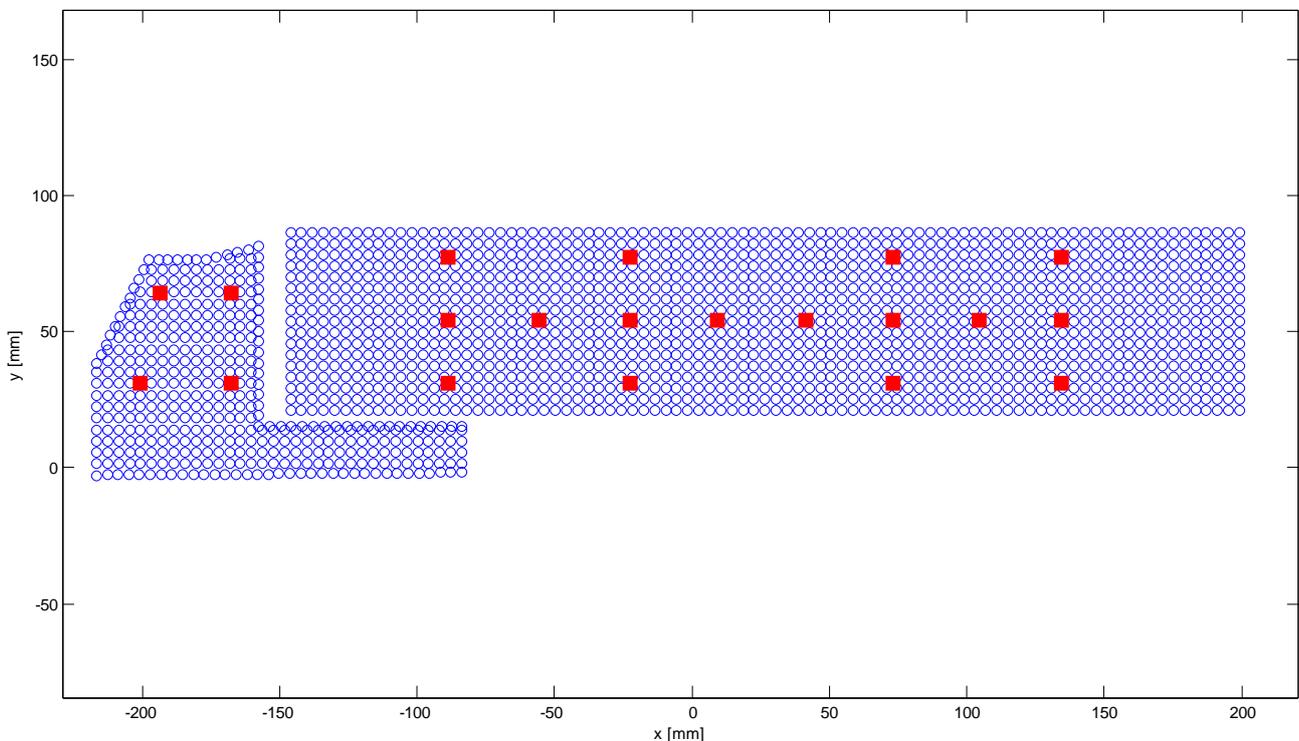


Figura 9 mesh della fiancata modello del veicolo

A ogni nodo viene assegnato il valore di pressione della presa più vicina. La pressione dell'elemento triangolare sarà, dunque, la media di quella dei vertici. La forza dell'i-esimo elemento si calcola moltiplicando la pressione agente per la sua area mentre il contributo a momento si calcola moltiplicando la forza i-esima per la distanza dal punto di riduzione.

Il vantaggio della misura delle pressioni, rispetto alla misura delle forze totali tramite la bilancia, è rappresentato dal fatto che oltre a calcolare le forze e i momenti totali agenti lungo gli assi x,y,z , è possibile calcolare anche la distribuzione di forze e momenti lungo la superficie del camion. Quest'aspetto è fondamentale se si vuole analizzare l'interazione dinamica tra vento, veicolo e pilota: mentre il ribaltamento e lo spostamento laterale dipendono principalmente dalla forza laterale totale, l'imbardata e, quindi, la risposta del pilota dipendono dalla distribuzione della forza laterale.

Lo svantaggio che porta questo tipo di misura, è che le prese di pressione non riescono a fornire indicazioni esatte riguardo la distribuzione di pressione su tutta la superficie del camion: con questa metodologia, gli

effetti di bordo non possono essere considerati e la distribuzione di pressione, ottenuta tramite l'integrazione, non è ottenuta tramite un'interpolazione e quindi risultata approssimata.

2.3) PROVE EFFETTUATE SUL FLAT - PLATE

Per individuare i coefficienti di forza e momento globale, sono state effettuate prove, in condizione di "flat - plate", al variare dell'angolo d'attacco del vento. Per simulare le diverse condizioni di incidenza del vento, il modello in scala del veicolo è stato posto sulla tavola rotante, presente nella GVPM, e per ogni angolo è stata effettuata la misura di forze e momenti, grazie alle quali si sono calcolati i coefficienti adimensionalizzati, sia utilizzando la bilancia che le prese di pressione. Per la bilancia gli angoli che sono stati testati sono:

$$-90^\circ, -67.5^\circ, -45^\circ, -22.5^\circ, 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$$

Gli angoli di attacco, a cui sono state effettuate le misure con le prese di pressione, sono:

$$-35^\circ, -25^\circ, -15^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$$

I grafici mostrano il confronto tra i risultati ottenuti con la bilancia e con le prese di pressione. Come si può vedere, la differenza tra le misure effettuate con la bilancia e quelle effettuate con le prese di pressione, non sono molto evidenti. Per ridurre ulteriormente la differenza tra le due misure, si può pensare di aumentare il numero delle prese di pressione e modificare la tecnica di integrazione: la pressione è nota solo nei punti in cui sono presenti le prese; a partire da questi valori si potrebbe costruire una distribuzione di pressione per ogni superficie del camion interpolando le pressioni misurate. In questo modo la distribuzione di pressione ricostruita sulla superficie del veicolo rappresenterebbe meglio quella reale.

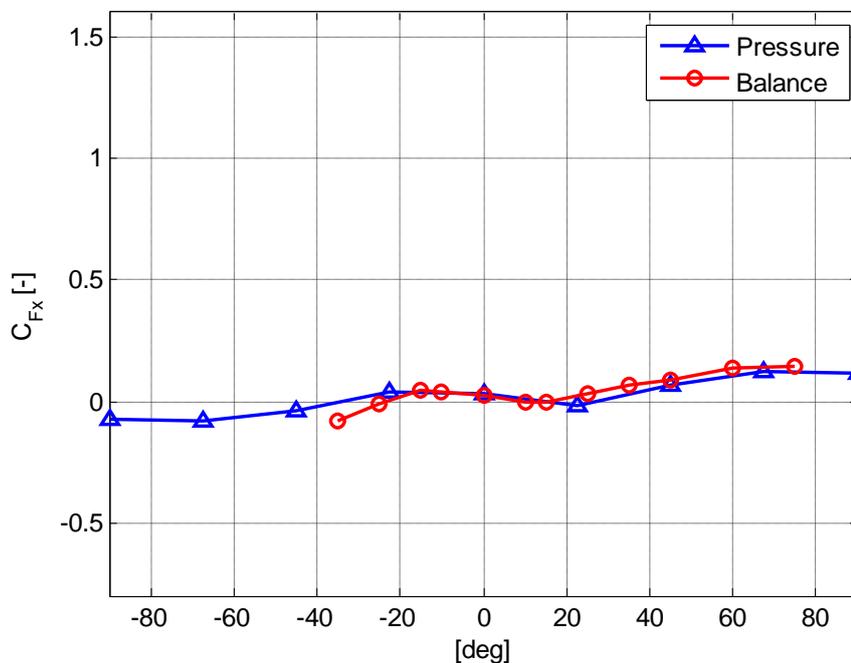


Figura 10 confronto bilancia - pressioni C_{Fx} Vs α

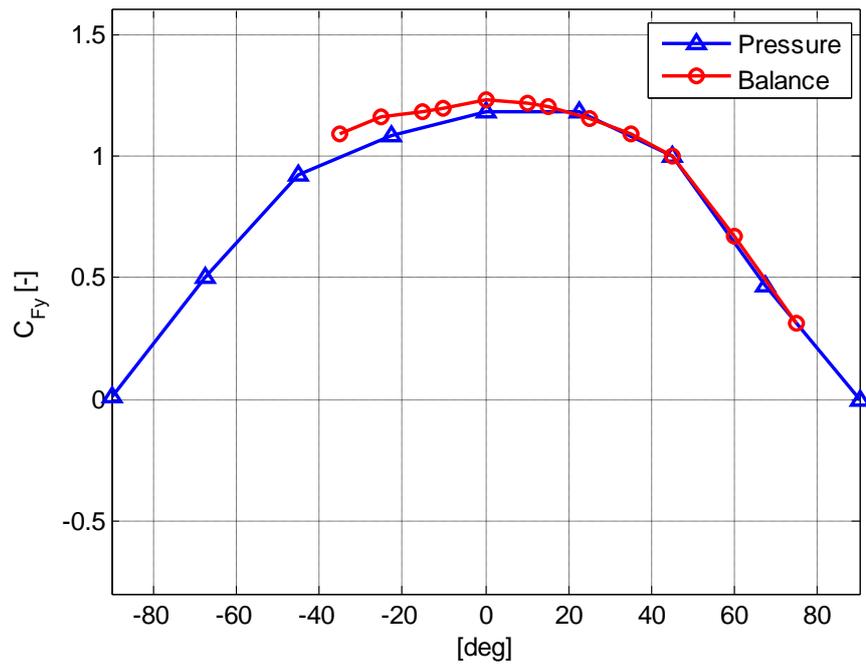


Figura 11 confronto bilancia - pressioni CFy Vs α

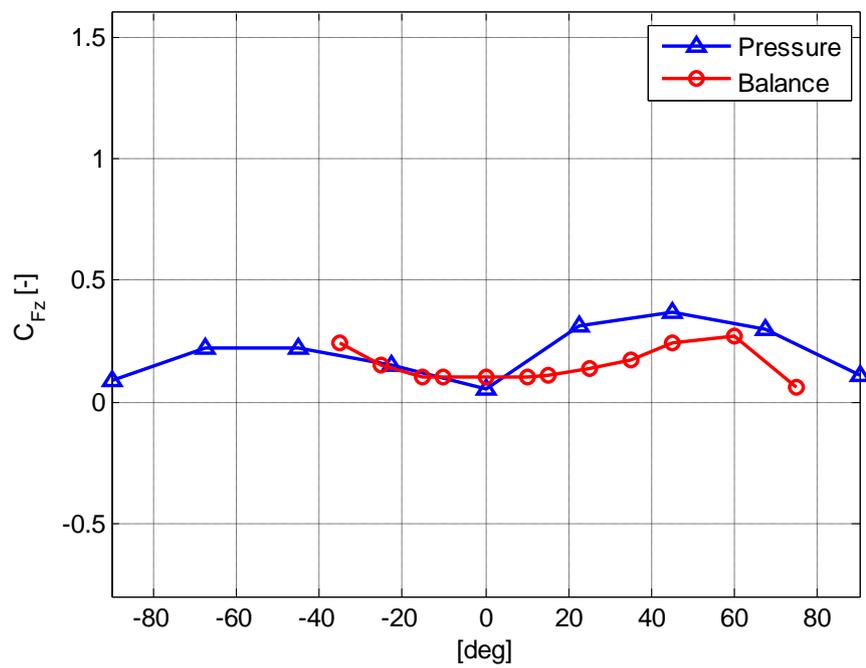


Figura 12 confronto bilancia - pressioni CFz Vs α

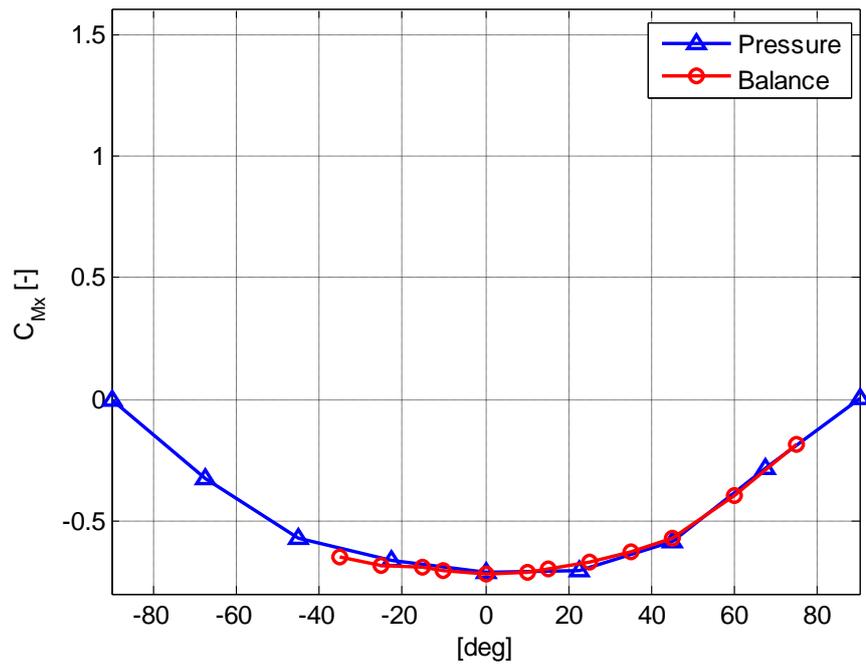


Figura 13 confronto bilancia - pressioni C_{Mx} Vs α

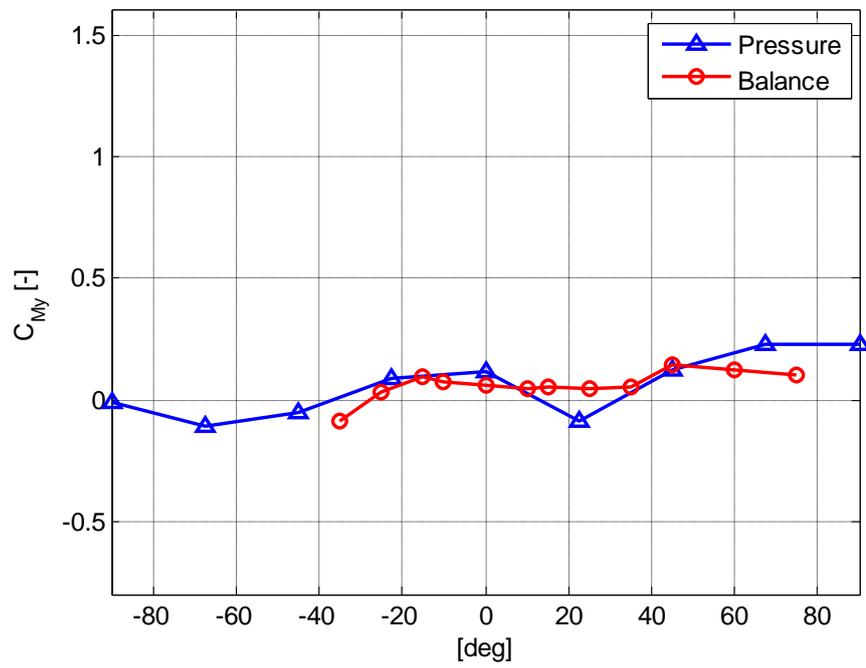


Figura 14 confronto bilancia - pressioni C_{My} Vs α

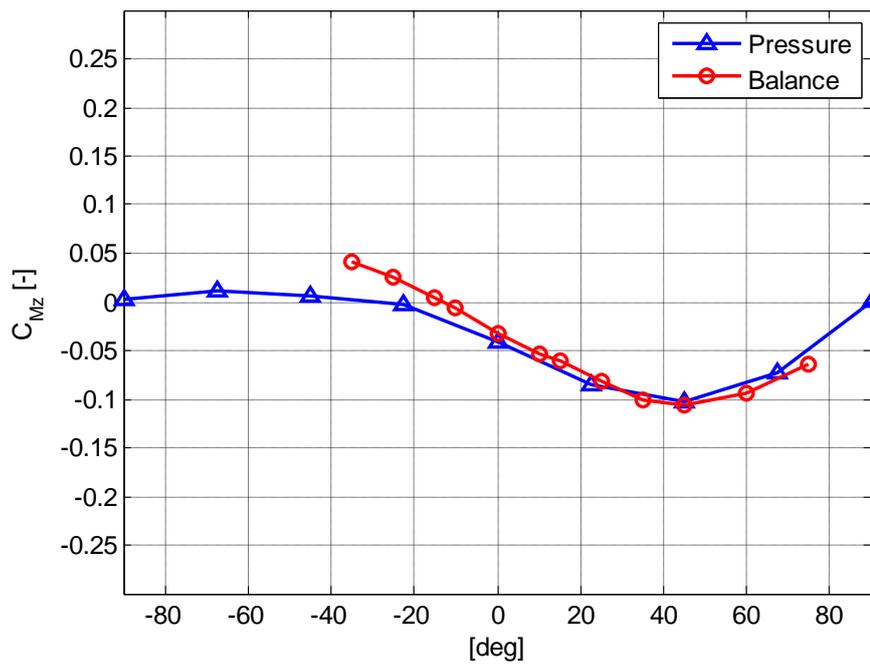


Figura 15 confronto bilancia - pressioni CMz Vs α

2.3.1) POLARI PER LE SINGOLE SEZIONI

I valori dei coefficienti che sono stati presentati nel paragrafo precedente sono dei valori mediati su tutta la superficie del camion. L'approccio utilizzato in questo studio, ossia quello di dividere il camion in 5 sezioni e considerare le forze locali agenti su ogni singola sezione, richiede tuttavia l'utilizzo di coefficienti locali e non medi.

Per questo motivo, attraverso prove successive realizzate in GVPM, sono stati misurati i coefficienti locali di forze e momenti agenti su ogni singola sezione del camion.

La figura mostra la divisione del camion nelle 5 sezioni:

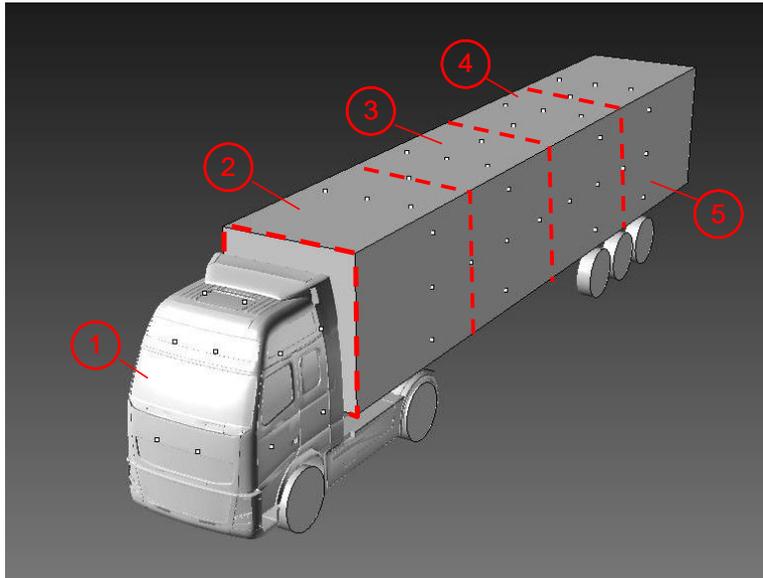


Figura 16 divisione in sezioni del camion

La motrice è costituita da un'unica sezione mentre il rimorchio è stato diviso in 4 zone. Il numero delle sezioni in cui dividere la superficie del camion dipende strettamente dal posizionamento e dal numero di prese di pressione a disposizione.

Vengono ora mostrate le polari per ciascuna sezione:

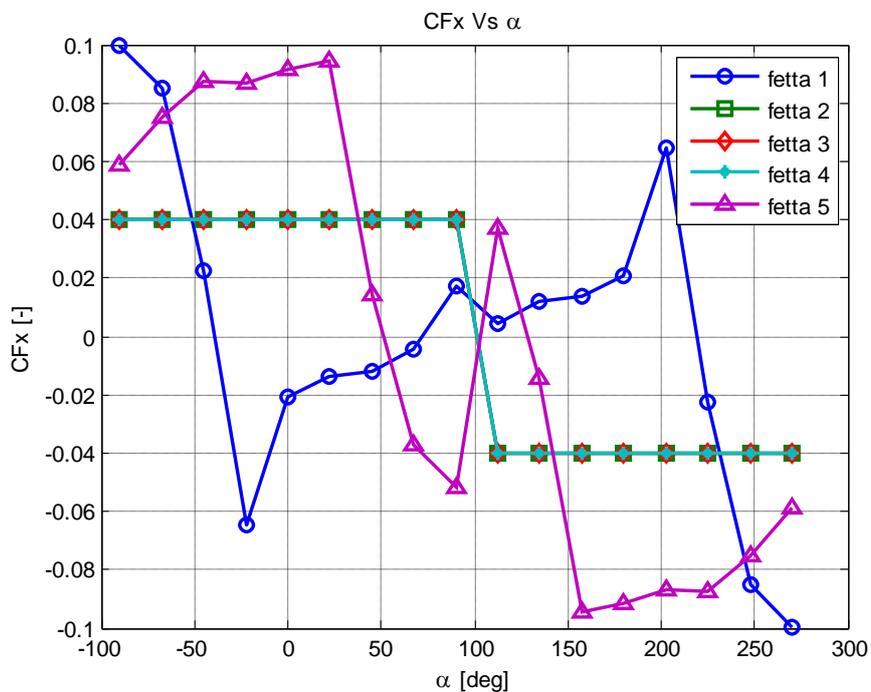


Figura 17 polare CFx per tutte le sezioni

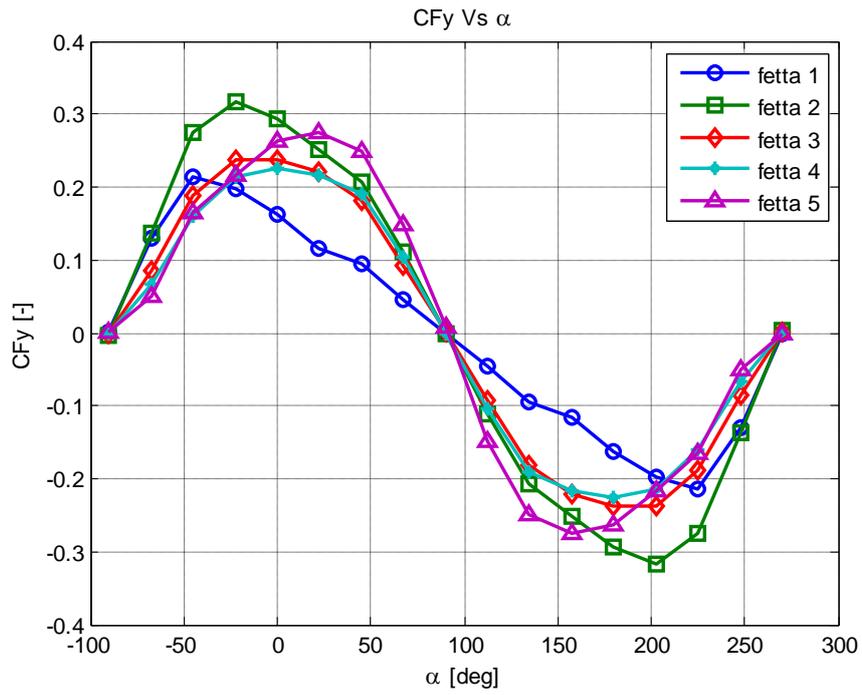


Figura 18 polare CFy per tutte le sezioni

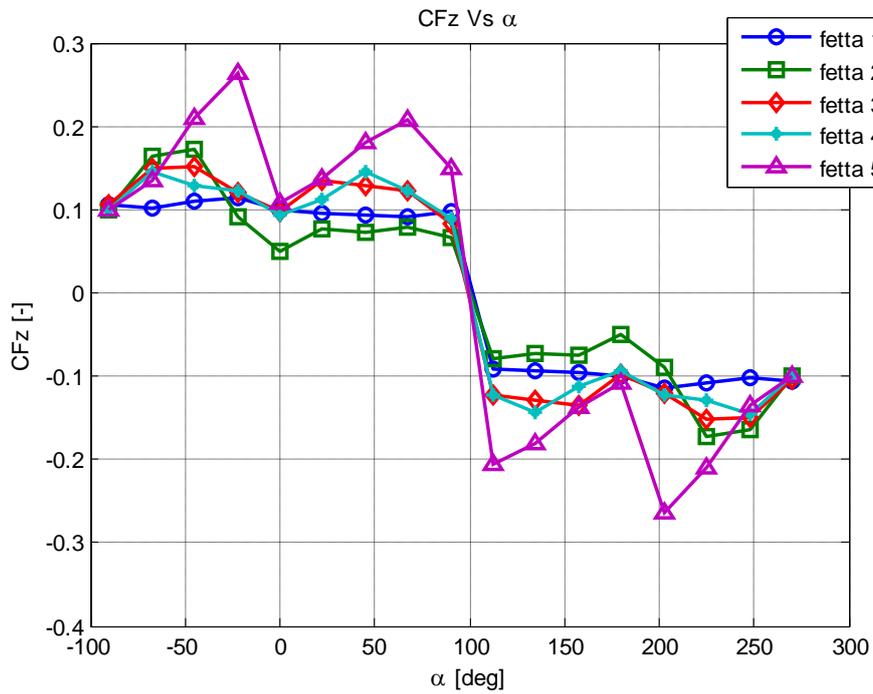


Figura 19 polare CFz per tutte le sezioni

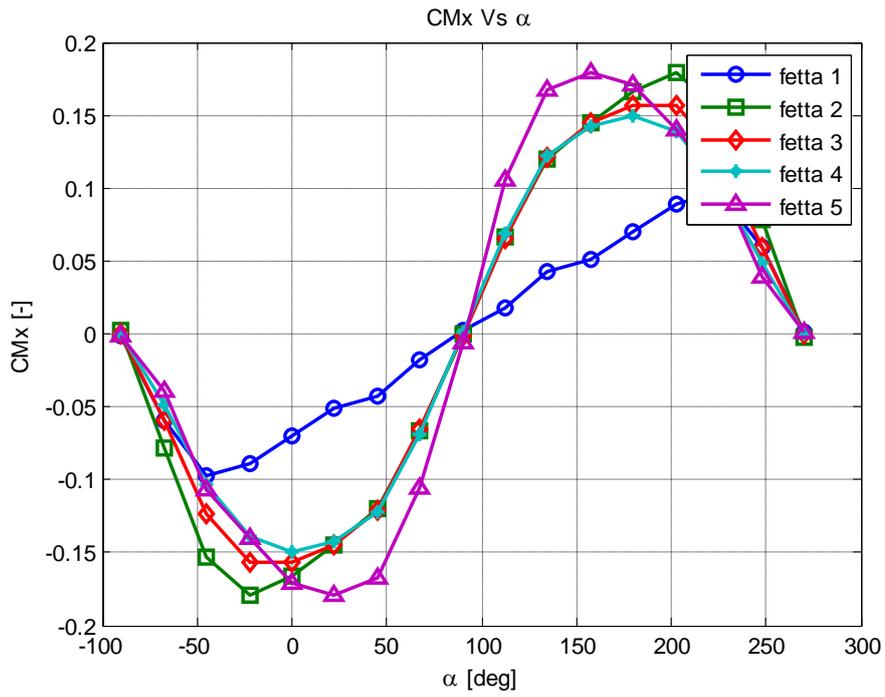


Figura 20 polare CMx per tutte le sezioni

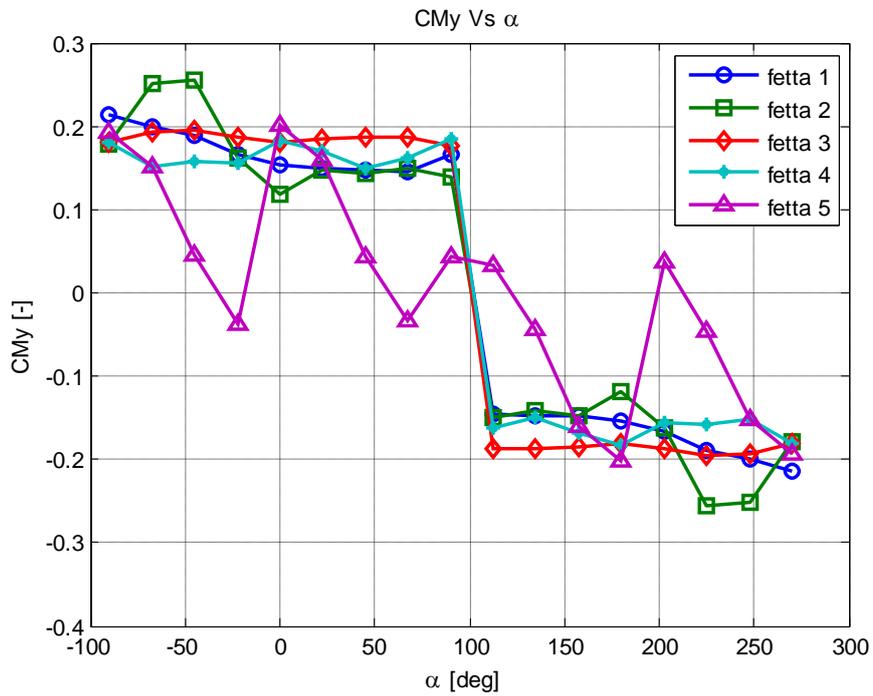


Figura 21 polare CMy per tutte le sezioni

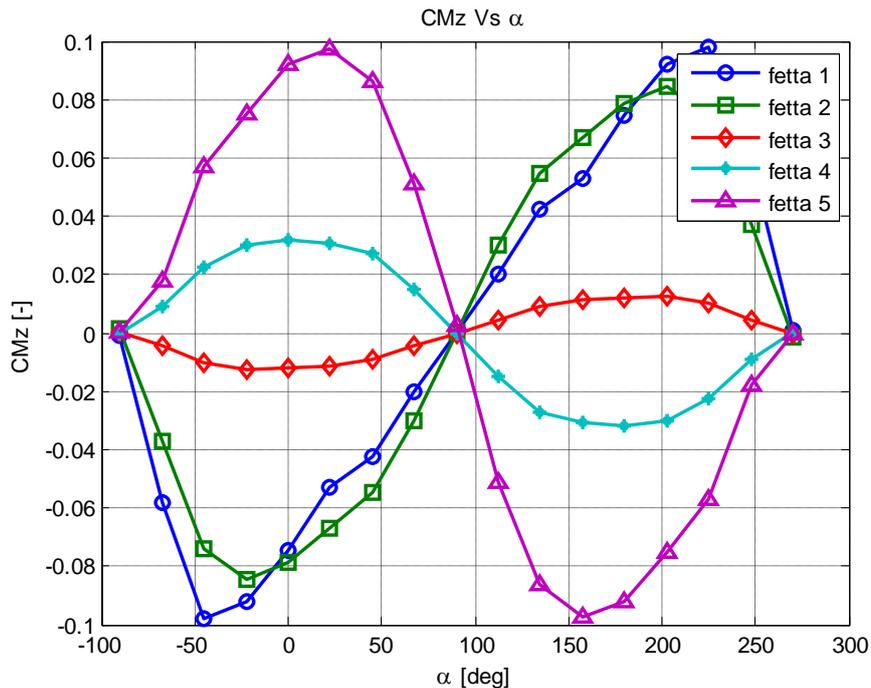


Figura 22 polare CMz per tutte le sezioni

2.4) PROVE EFFETTUATE SUL FRC

Prove sperimentali sono state effettuate anche posizionando il modello del veicolo, sul modello del ponte. Le prove sono state eseguite in diverse configurazioni variando la posizione del veicolo rispetto alla torre. Le misure effettuate sono servite per studiare in che maniera le barriere presenti sul ponte e la torre modifichino le forze aerodinamiche agenti sul camion. In questo paragrafo verranno descritte le diverse configurazioni del ponte, con cui sono state effettuate le prove, e le diverse posizioni del camion rispetto la torre che sono state testate. Come per le misure fatte sul flat – plate, anche in questo caso le misure sono state effettuate sia con la bilancia dinamometrica che con le prese di pressione.

2.4.1) MODELLO DEL PONTE E DELLA TORRE

Il modello del FRC è stato realizzato in scala 1:40; è composto di un telaio interno rigido fatto di travi di alluminio e ricoperto con pannelli di Alucobond per riprodurre la forma del ponte. La copertura esterna è supportata da travi di legno trasversali. La struttura è posizionata sulla tavola rotante situata sul pavimento della GVPM e sorretta da 4 coppie di paletti posti a intervalli regolari di 2 metri. Il modello del ponte è lungo (L) 6 metri e largo (C) 1.042 metri. Le figure mostrano il modello del ponte:

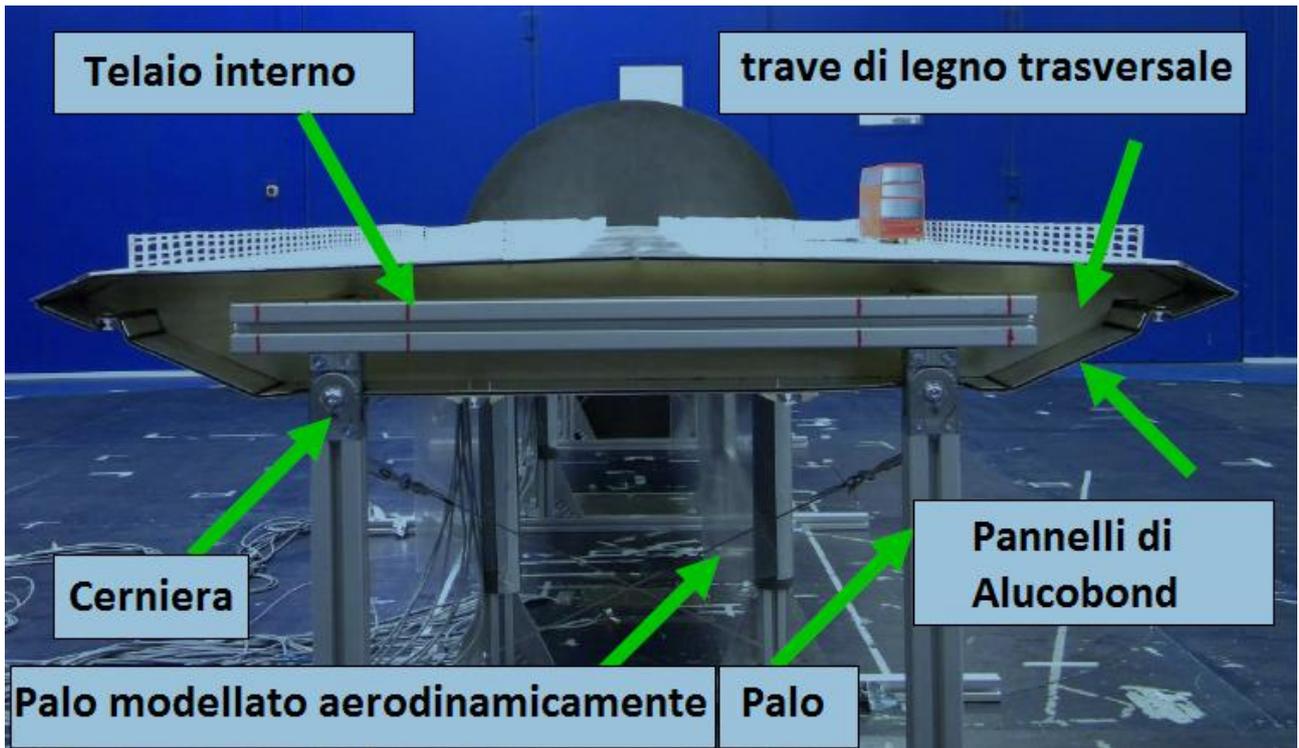


Figura 23 schema strutturale del FRC

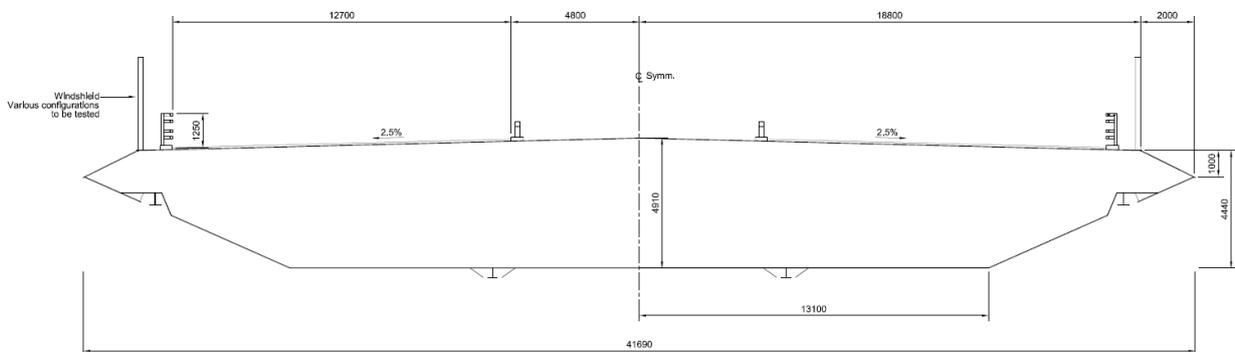


Figura 24 sezione impalcato del FRC

FRC			
	L	C	B
Modello in scala [m]	6	1.042	1.2
Modello reale [m]	240	41.69	48

Tabella 2 dati caratteristici del FRC

Il modello della torre è stato riprodotto in polistirene e rappresenta una parte della torre alta 2.88 m, 0.75m sotto la superficie inferiore del ponte e 2m sopra la superficie superiore del ponte. Il modello riproduce anche

la variazione della sezione della torre che è posta al centro del ponte. La seguente figura mostra il modello ponte – torre:



Figura 25 modello ponte – torre

2.4.2) CONFIGURAZIONE DEI TEST

Le prove in GVPM sono state condotte secondo 14 diverse configurazioni con diversi angoli d'attacco del vento: le configurazioni si distinguono per la presenza di:

- Barriera vicino la torre, che a sua volta si distingue in:
 - Nominale (Nominal Shield)
 - Più bassa (Low Shield)
 - Più alta (High Shield)
- Cartellone segnaletico (Signal Gantries)
- Tettoia sul cartellone segnaletico (Canopy)
- Barriera nominale del ponte (Nominal Deck Shield)

L'immagine sottostante mostra la struttura della barriera vicino la torre:

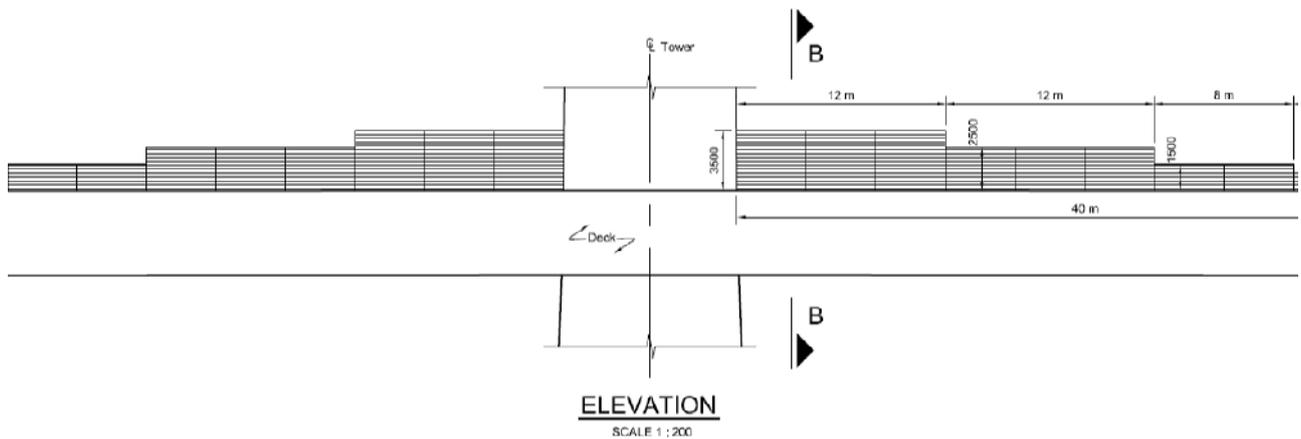


Figura 26 schema della barriera vicino la torre

Esistono 3 configurazioni per la barriera, che si differenziano per l'altezza; i valori sotto riportati sono riferiti all'altezza del primo pannello:

- ALTA : 4,4 m
- NOMINALE : 3,5 m
- BASSA : 2,5 m

Nella seguente figura, invece, sono riportate le dimensioni e la geometria del cartellone segnaletico e della tettoia:

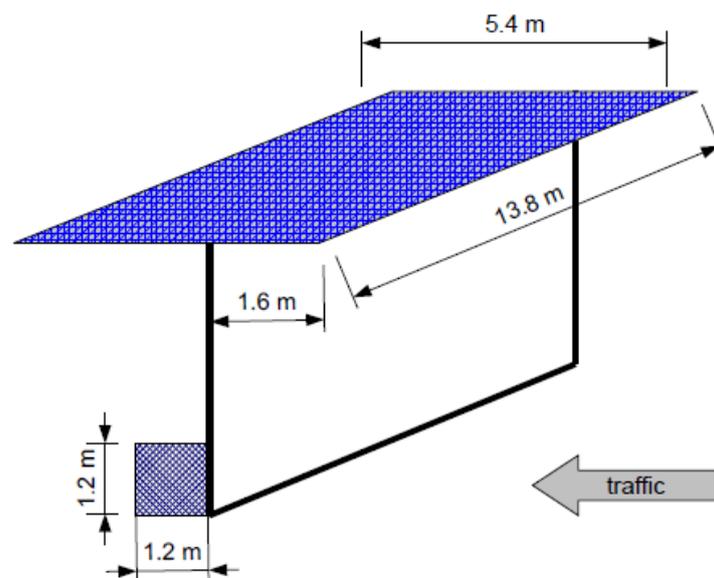


Figura 27 schema del cartellone segnaletico e della tettoia

Per valutare gli effetti aerodinamici della torre, le prove sono state fatte, per ogni configurazione, in 9 posizioni del camion rispetto la torre, facendolo avanzare progressivamente.

POSIZIONE DEL MODELLO	
Posizione	Distanza dal fronte del camion al centro della torre [m]
-1	-10
0	-5
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30

Tabella 3 posizioni del camion testate

A titolo di esempio, vengono mostrate le posizioni -1, 2, 4 e 7:

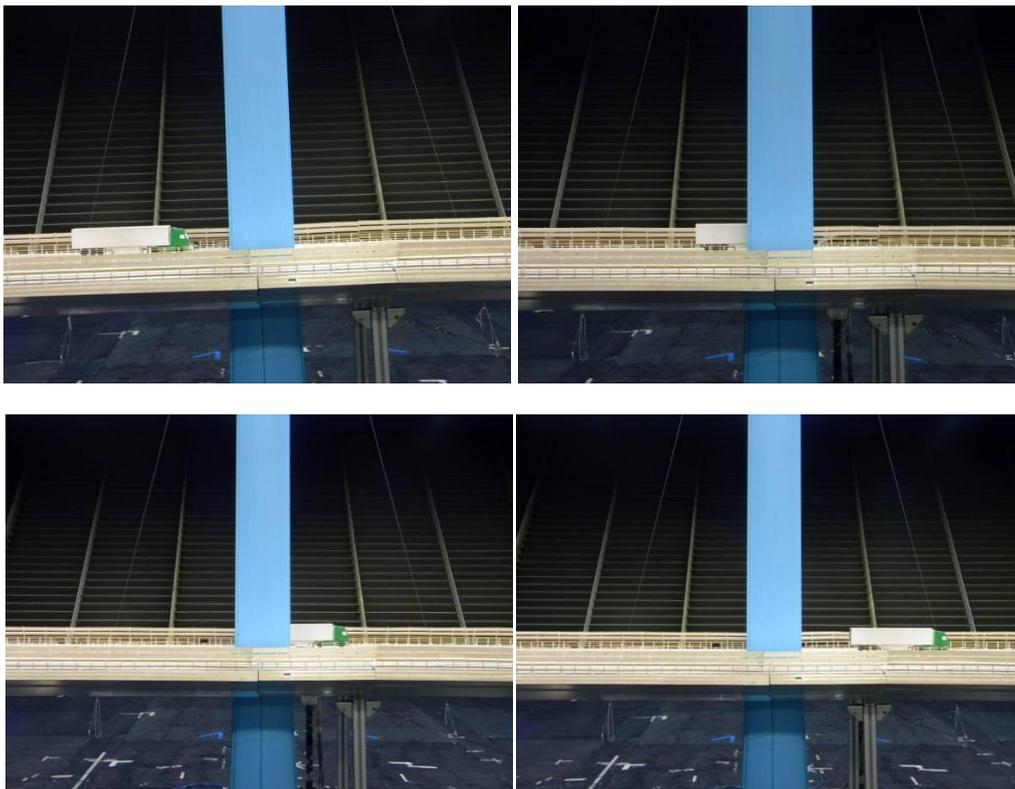


Figura 28 posizioni -1,2,4,7

Le configurazioni che sono state usate per effettuare i test con le misure di pressione sono:

- Configurazione 12 NDS + SG (tutte le posizioni); prevede la presenza della barriera nominale del ponte (Nominal Deck Shielding) , del cartellone segnaletico (Sign Gantries) e nessuna barriera vicino la torre
- Configurazione 13 NDS + HS + SG (tutte le posizioni); prevede la presenza della barriera nominale del ponte, del cartellone segnaletico e delle barriere più alte (High Shield) vicino la torre

Le immagini mostrano le configurazioni testate:

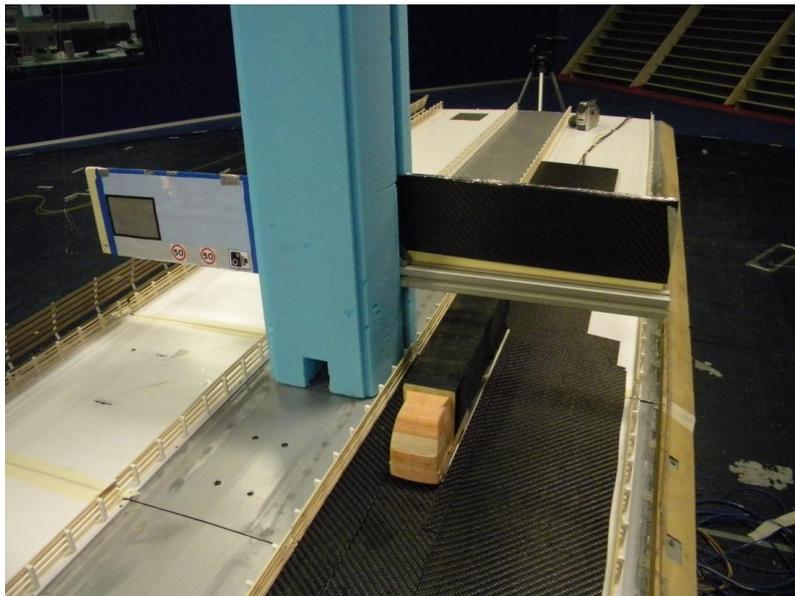


Figura 29 configurazione 12 (NDS + SG)



Figura 30 configurazione 13 (NDS + HS + SG)

2.4.3) COEFFICIENTI DI FORZA E DI MOMENTO GLOBALI

Per ognuna delle 9 posizioni, sono state misurate forza laterale e momento di imbardata globali agenti sul camion tramite la bilancia dinamometrica e le prese di pressione. In questa maniera è possibile valutare il carico totale agente durante l'attraversamento della torre. Tutte le prove sono state eseguite con un angolo d'attacco pari a 0° . Come si può vedere dai grafici la presenza della torre influisce sulle azioni aerodinamiche, ma la presenza della barriera vicino la torre modifica ulteriormente i carichi agenti. Nel caso del momento ad imbardata, l'effetto dominante è legato alla presenza della torre che, schermato il veicolo durante il suo attraversamento, causa un momento di imbardata orario, durante l'ingresso dietro la scia della torre, e un momento antiorario quando il camion esce dalla scia della torre. La presenza delle barriere vicino la torre non modifica la natura di questo fenomeno, ma ne diminuisce l'intensità, come si può vedere dal grafico. Diverso è il discorso per quanto riguarda la forza laterale e il momento a ribaltamento. Innanzitutto va detto che le due grandezze sono strettamente correlate e quindi le considerazioni valgono per entrambe le azioni. Si nota che in assenza delle barriere, la forza laterale è sempre positiva. La torre, infatti, produce un doppio effetto: scherma la parte del veicolo che copre ma in ingresso e in uscita dalla torre, il profilo di velocità del vento presenta degli speed – up. Poiché il veicolo è più lungo della torre, in ogni configurazione una parte del camion sarà schermata dal vento, ma un'altra parte subirà l'effetto degli speed – up; questo fenomeno verrà illustrato in maniera più esaustiva nel capitolo 4. Per quanto riguarda la configurazione con le barriere vicino la torre, si nota che la forza laterale è sempre inferiore rispetto il caso precedente e che dalla posizione 1 alla 4, ossia quando il camion si trova dietro la torre, diventa addirittura negativa. Questo fenomeno è dovuto all'assenza degli speed – up, che caratterizzavano la configurazione precedente. La torre e le barriere, schermato il veicolo, creano un effetto di risucchio del veicolo verso la torre stessa.

I fenomeni appena descritti vengono evidenziati anche dalle distribuzioni di pressione che sono state ricavate a partire dalle prese di pressione. Si osserva che, nel caso in cui siano presenti le barriere, il veicolo tenda ad essere in depressione mentre, quando non sono presenti le barriere, la pressione sulla superficie resti positiva. La distribuzione delle pressioni mostra la differenza dell'effetto aerodinamico sulla superficie del veicolo quando è coperto dalla torre e quando non lo è: risultata evidente, allora, quanto sia importante non solo conoscere la forza totale ma anche la sua distribuzione. Nel caso in cui non siano presenti le barriere, si nota come la parte coperta dalla torre sia in depressione mentre il resto del veicolo subisca una pressione positiva: questa distribuzione di pressione spiega l'andamento del momento ad imbardata del veicolo, giustificando anche i valori di modulo più elevato per la configurazione 12. Il coefficiente globale dice solamente che la forza complessiva è positiva ma non da altre informazioni su quello che sta accadendo al veicolo. Per quanto riguarda la configurazione 13, il fenomeno è in totale accordo con il cambio di segno della forza laterale per la configurazione con le barriere.

Nei seguenti grafici, è proposto il confronto tra le misure effettuate con la bilancia e quelle tramite le prese di pressione.

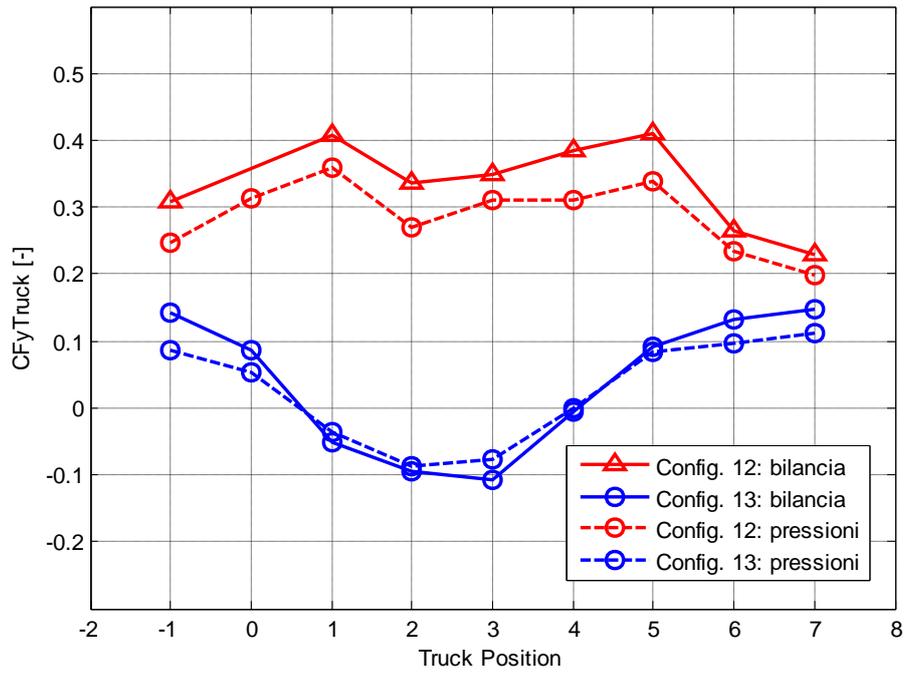


Figura 31 confronto CFy bilancia - prese di pressione

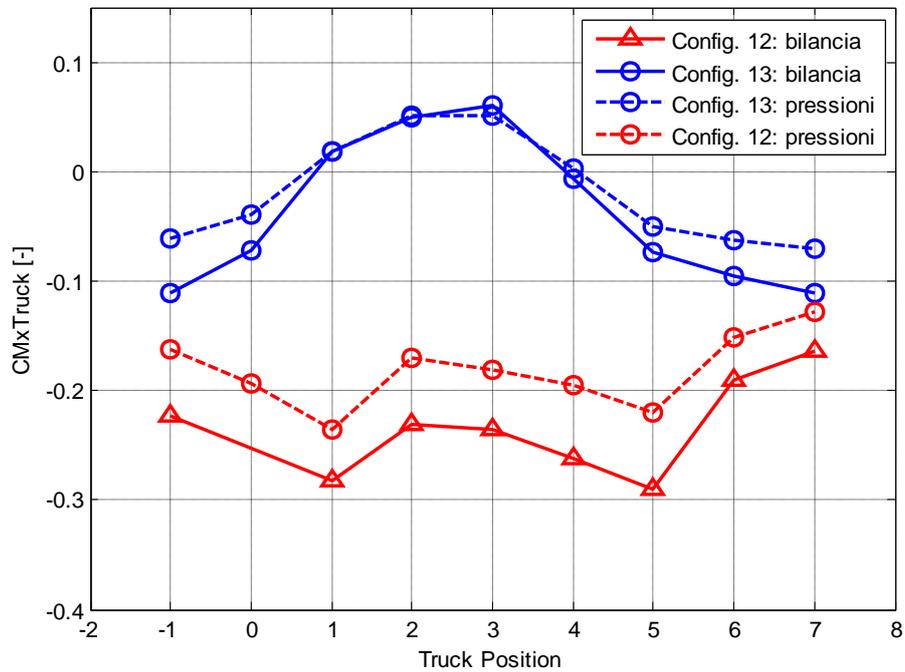


Figura 32 confronto CMx bilancia - prese di pressione

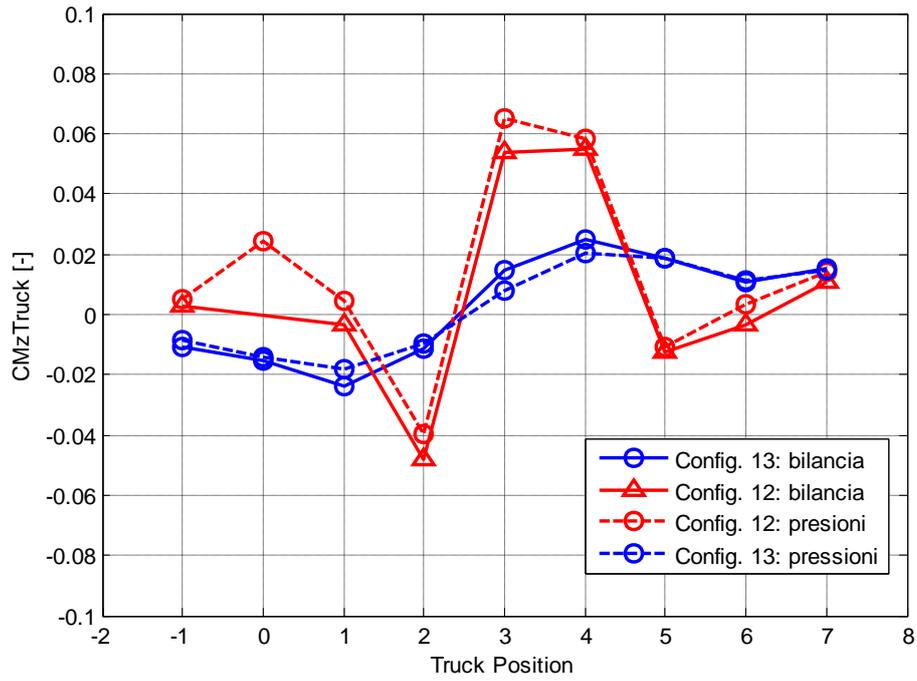


Figura 33 confronto CMz bilancia - prese di pressione

Le figure riportano le distribuzioni di pressione ottenute con le prese di pressione, per le posizioni -1, 2, 4, 7:

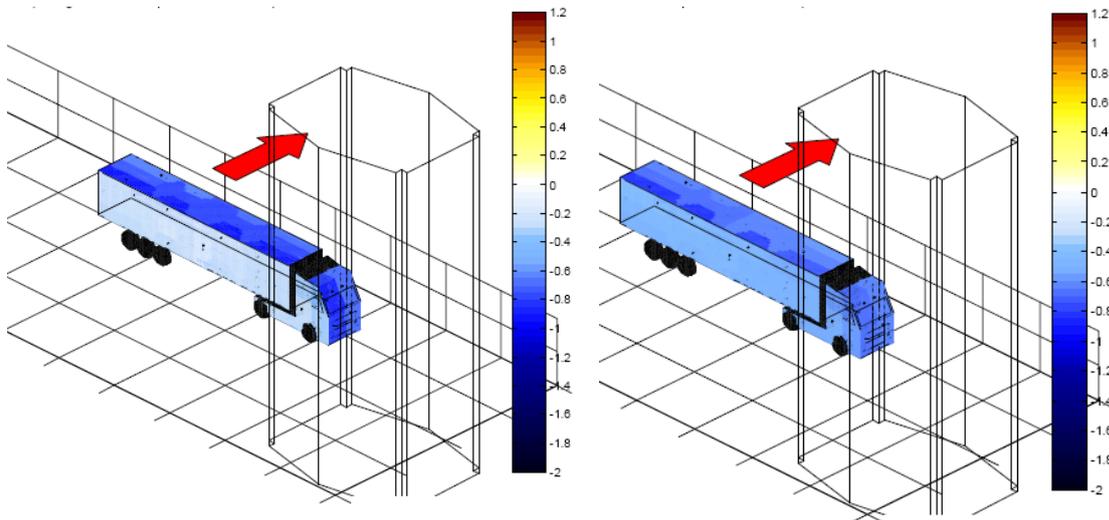


Figura 34 configurazioni 12/13, posizione -1

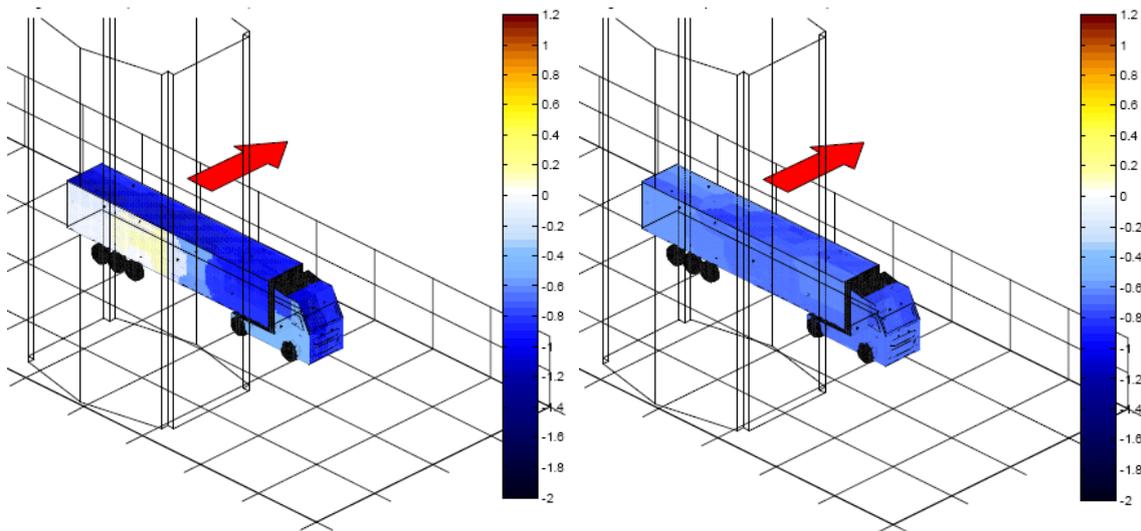


Figura 35 configurazioni 12/13, posizione 2

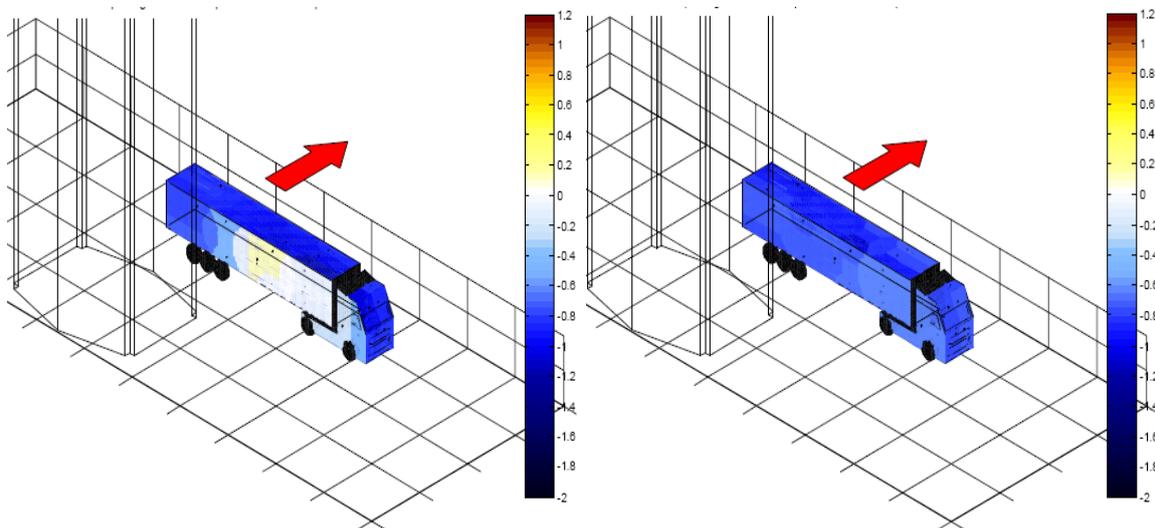


Figura 36 configurazioni 12/13, posizione 4

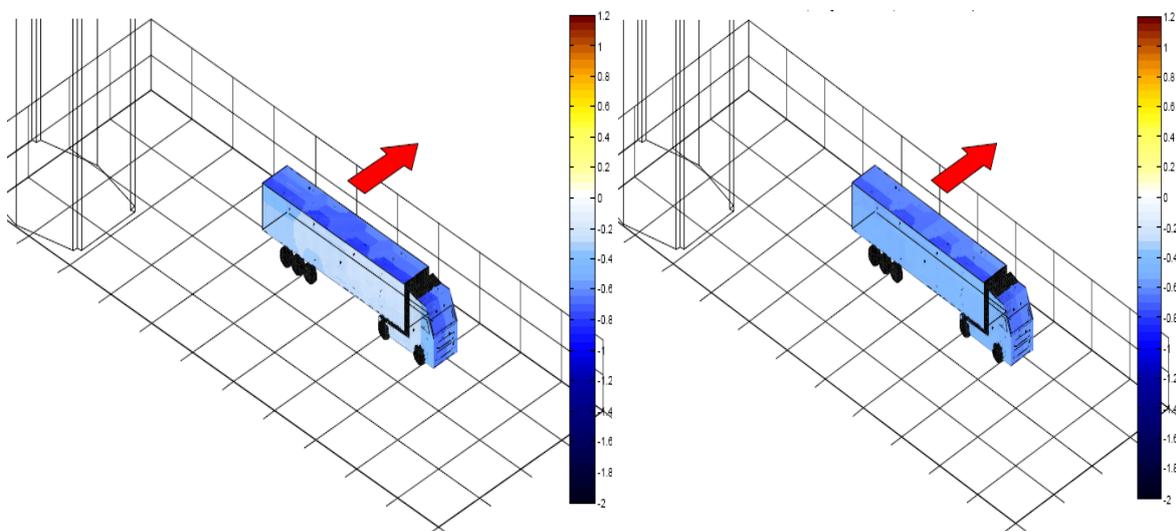


Figura 37 configurazioni 12/13, posizione 7

3) MODELLO DEL CAMION PER LE SIMULAZIONI NUMERICHE

3.1) DATI DEL VEICOLO

L'analisi numerica è stata condotta utilizzando un modello multi – body dell'autoarticolato utilizzato per le prove in galleria del vento. Il modello è composto da una motrice a 2 assi e un semi – rimorchio, avente 3 assi, collegato alla motrice tramite un accoppiamento meccanico ralla - perno. L'asse posteriore della motrice è quello traente e ha ruote gemellate.

Il modello della motrice è caratterizzato da 18 gradi di libertà mentre il semi – rimorchio presenta 24 gradi di libertà. La motrice e il semi – rimorchio sono collegate tramite una ralla schematizza come un giunto sferico, dotato di una rigidità e smorzamento torsionale.

I dati necessari per descrivere il modello, quindi, sono quelli relativi alla caratteristiche inerziali dei corpi rigidi, rigidità e smorzamento dei collegamenti e le principali grandezze geometriche.

Il modello del veicolo è stato caratterizzato sulla base di prove sperimentali svolte durante studi precedenti [9]. I dati del veicolo sono riportati in tabella 4.

MOTRICE	-----
Massa asse anteriore	300 kg
Massa asse posteriore	600 Kg
Tensore d'inerzia asse anteriore	$Diag([50 \ 10 \ 50]) \text{ Kg} * \text{m}^2$
Tensore d'inerzia asse posteriore	$Diag([100 \ 10 \ 100]) \text{ Kg} * \text{m}^2$
Raggio pneumatico anteriore	0.54 m
Raggio pneumatico posteriore	0.54 m
Passo	3.7 m
Semi – passo anteriore	2.886 m
Semi – passo posteriore	0.814 m
Semi – carreggiata anteriore	1.025 m
Semi – carreggiata posteriore	0.92 m
Distanza ralla – asse anteriore	3.125 m
Rigidezza verticale sospensione anteriore	$2.22 * 10^5 \text{ N/m}$
Rigidezza verticale sospensione posteriore	$2.26 * 10^5 \text{ N/m}$
Smorzamento verticale sospensione anteriore	$1 * 10^4 \text{ Ns/m}$
Smorzamento verticale sospensione posteriore	$1 * 10^4 \text{ Ns/m}$
Lunghezza iniziale sospensione anteriore	0.5263 m
Lunghezza iniziale sospensione posteriore	0.5921 m
Rigidezza torsionale barra anti – rollio anteriore	$1.8 * 10^5 \text{ N/rad}$
Rigidezza torsionale barra anti – rollio posteriore	$3.54 * 10^5 \text{ N/rad}$
Rigidezza verticale pneumatico anteriore	$1 * 10^6 \text{ N/m}$
Rigidezza verticale pneumatico posteriore	$2 * 10^6 \text{ N/m}$
Smorzamento verticale pneumatico anteriore	$1 * 10^3 \text{ Ns/m}$
Smorzamento verticale pneumatico posteriore	$2 * 10^3 \text{ Ns/m}$
Tensore d'inerzia	$Diag([5000 \ 20000 \ 20000]) \text{ Kg} * \text{m}^2$
VEICOLO SCARICO	-----
Carico asse anteriore	6222 Kg

Carico asse posteriore	3625 Kg
Massa totale	8953 Kg
Altezza baricentro	0.9 m
VEICOLO CARICO	-----
Carico asse anteriore	7900 Kg
Carico asse posteriore	12258 Kg
Massa totale	8953 Kg
Altezza baricentro	0.9 m
SEMI – RIMORCHIO	-----
Massa asse 1	300 Kg
Massa asse 2	300 Kg
Massa asse 3	300 Kg
Tensore d'inerzia asse 1	$Diag([50 \ 10 \ 50]) \text{ Kg} * \text{m}^2$
Tensore d'inerzia asse 2	$Diag([50 \ 10 \ 50]) \text{ Kg} * \text{m}^2$
Tensore d'inerzia asse 3	$Diag([50 \ 10 \ 50]) \text{ Kg} * \text{m}^2$
Distanza ralla – asse 1	6.23 m
Distanza ralla – asse 2	7.54 m
Distanza ralla – asse 3	8.85 m
Distanza ralla – baricentro	3.68 m
Semi – carreggiata	1.025 m
Raggi degli pneumatici	0.54 m
Rigidezza verticale sospensione 1	$1.56 * 10^5 \text{ N/m}$
Rigidezza verticale sospensione 2	$1.56 * 10^5 \text{ N/m}$
Rigidezza verticale sospensione 3	$1.56 * 10^5 \text{ N/m}$
Smorzamento verticale sospensione 1	$1 * 10^4 \text{ Ns/m}$
Smorzamento verticale sospensione 2	$1 * 10^4 \text{ Ns/m}$
Smorzamento verticale sospensione 3	$1 * 10^4 \text{ Ns/m}$
Lunghezza iniziale sospensione 1	0.4953 m
Lunghezza iniziale sospensione 2	0.4886 m
Lunghezza iniziale sospensione 3	0.4819 m
Rigidezza torsionale barra anti – rollio asse 1	$2.5 * 10^5 \text{ N/rad}$
Rigidezza torsionale barra anti – rollio asse 2	$2.5 * 10^5 \text{ N/rad}$
Rigidezza torsionale barra anti – rollio asse 3	$2.5 * 10^5 \text{ N/rad}$
Rigidezza verticale pneumatico	$1 * 10^6 \text{ N/m}$
Smorzamento verticale pneumatico	$1 * 10^3 \text{ Ns/m}$
SEMI – RIMORCHIO SCARICO	-----
Carico asse 1	1161 kg
Carico asse 2	1010 Kg
Carico asse 3	1016 Kg
Massa totale	4147 Kg
Tensore d'inerzia	$Diag([1000 \ 18000 \ 20000]) \text{ Kg} * \text{m}^2$
Altezza baricentro	1.548 m
SEMI – RIMORCHIO CARICO	-----
Carico asse 1	6867 Kg
Carico asse 2	6981 Kg
Carico asse 3	7096 Kg
Massa totale	32177 Kg
Tensore d'inerzia	$Diag([7300 \ 24300 \ 26325]) \text{ Kg} * \text{m}^2$
Altezza baricentro	2 m
RALLA	-----
Altezza	1.14 m

Rigidezza torsionale	$3.5 * 10^5 \text{ N/rad}$
Smorzamento torsionale	$1 * 10^4 \text{ Ns/rad}$

Tabella 4 dati veicolo

3.2) MODELLO MULTI – BODY DEL VEICOLO

Come è già stato accennato, il modello del veicolo si divide in motrice e semi – rimorchio; entrambi sono stati modellati in maniera simile. Entrambe le parti sono costituite dalla cassa, schematizzata come un corpo rigido a 6 gradi di libertà, sulla quale vengono applicate le forze aerodinamiche. La cassa si collega agli assi tramite le sospensioni, schematizzate come un elemento molla – smorzatore. Inoltre, tramite un vincolo, è consentito solamente lo spostamento verticale e il rollio, tra la cassa e l’asse. Gli assi delle ruote vengono schematizzati come corpi rigidi, ognuno avente 6 gradi di libertà. L’accoppiamento tra asse – ruota e strada avviene tramite gli pneumatici, che vengono considerati, anch’essi, come un elemento molla – smorzatore in parallelo. Per lo scambio delle forze tra pneumatico e strada si utilizza un modello di Pacejca per le forze laterali, mentre si è scelto di non modellare lo scambio di forze longitudinali. In figura viene riportato il modello multi – body utilizzato per le simulazioni. Nella figura si possono distinguere i centri di massa dei corpi rigidi e i sistemi di riferimento relativi dei punti notevoli.

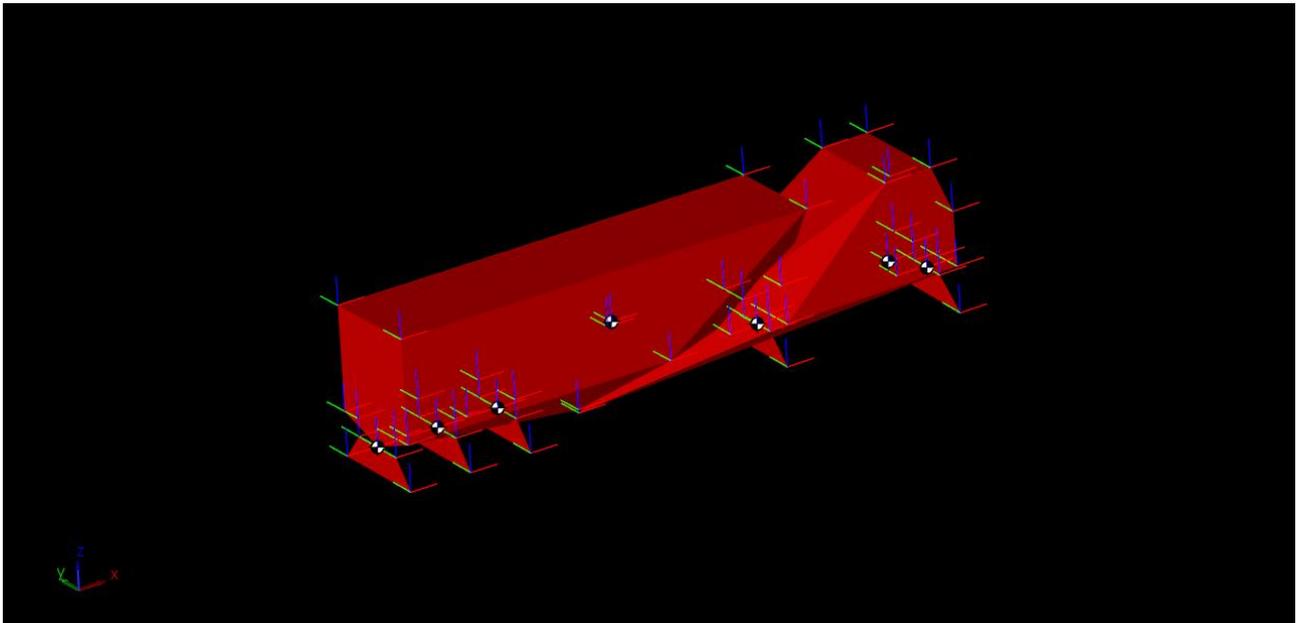


Figura 38 modello multi - body del veicolo

Viene ora riportato lo schema a blocchi utilizzato per rappresentare il modello multi – body del veicolo:

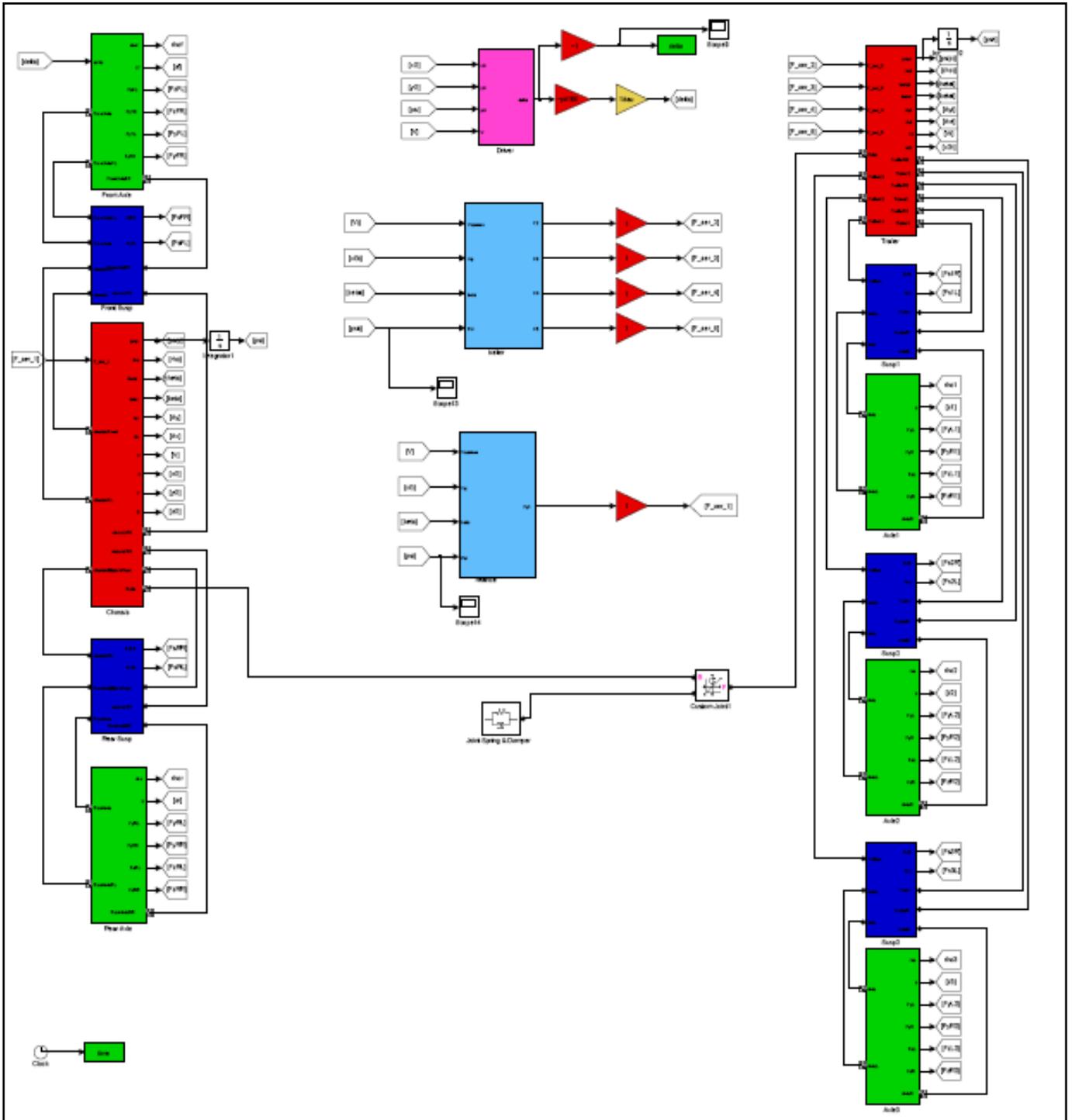


Figura 39 schema sistema Multi – Body

La figura mostra lo schema multi – body utilizzato per le simulazioni numeriche: sulla sinistra si trovano i blocchi relativi alla motrice mentre sulla destra ci sono quelli del semi – rimorchio.

- I blocchi rossi rappresentano la motrice e il semi – rimorchio;
- I blocchi blu rappresentano gli assi;
- I blocchi verdi rappresentano gli pneumatici;
- La ralla è schematizzata con un giunto sferico, al quale è stata conferita una rigidità e smorzamento torsionale;
- Il blocco magenta rappresenta il pilota
- I blocchi ciano rappresentano le forze aerodinamiche agenti sul veicolo

3.2.1) CARATTERISTICHE DEGLI PNEUMATICI

Poiché lo studio pone l'attenzione sulla dinamica laterale del veicolo, gli pneumatici sono stati modellati utilizzando un modello semplificato di Pacejka per le forze laterali, mentre, per la direzione longitudinale, gli pneumatici non sono in grado di fornire forza. L'ipotesi fatta in fase di modellazione è del tutto lecita in quanto gli scorrimenti longitudinali sono sempre molto piccoli.

In fase di modellazione si è dovuto anche tener conto che gli pneumatici posteriori della motrice fossero gemellati: per questo motivo rigidità e smorzamento verticale sono raddoppiati rispetto alle altre ruote; inoltre, sono caratterizzati da un diversa curva $\mu - \alpha$.

Anche in questo caso, i dati sono stati ricavati dal progetto VERTEC [9].

Vengono ora proposte le curve $\mu - \alpha$ degli pneumatici.

L'equazione di Pacejka utilizzata è:

$$\mu = D * \sin(C * \operatorname{atan}(B * \alpha - E * (B * \alpha - \operatorname{atan}(B * \alpha))))$$

In cui i valori delle costanti sono:

Costanti	Non gemellato	Gemellato
B	0.167	0.3
C	1.7	1.7
D	0.750	0.750
E	0.240	0.240

Tabella 5 dati pneumatici

La differenza tra le due curve, è legata al valore della costante B. Da questa costante dipende, infatti, il valore della pendenza della curva nel primo tratto lineare. Avere due pneumatici gemellati aumenta la rigidità a deriva, come viene evidenziato dal grafico:

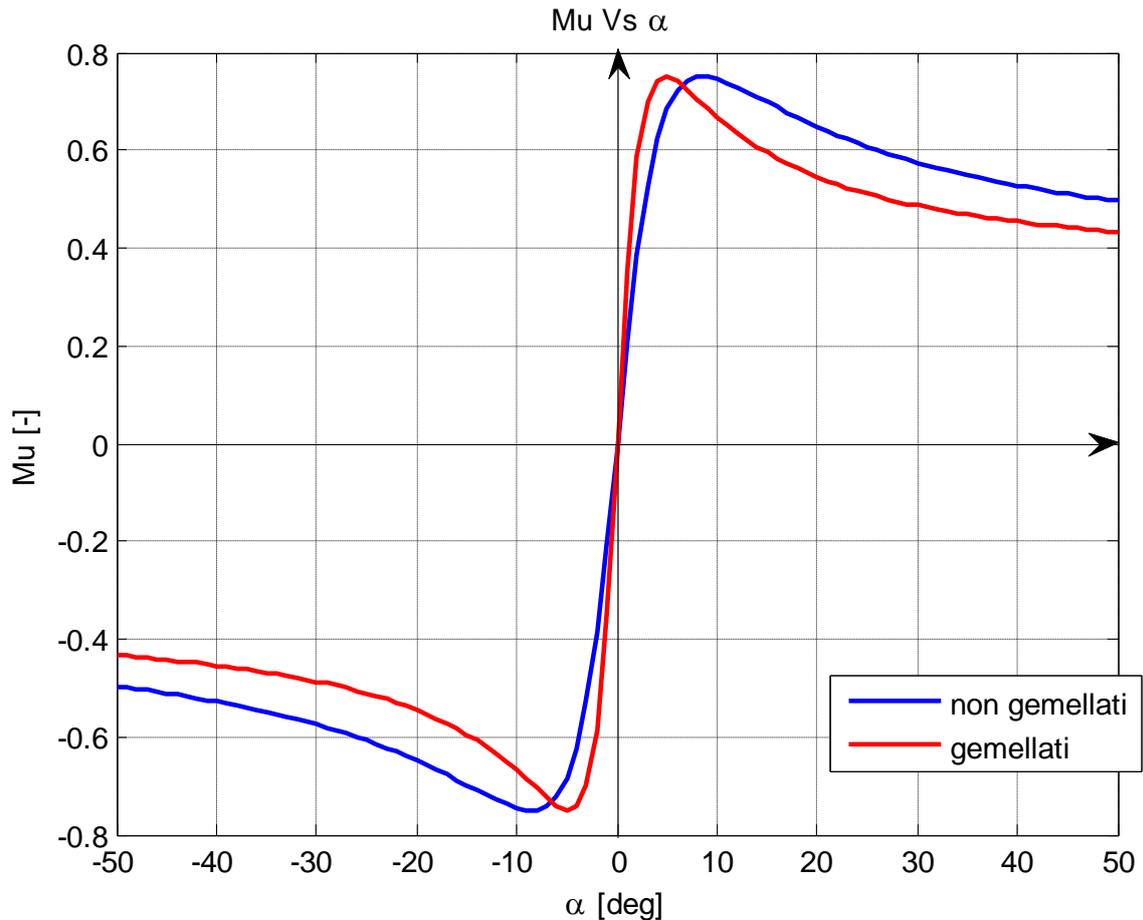


Figura 40 confronto MU Vs α

3.3) MODELLO DEL PILOTA

La dinamica del veicolo dipende fortemente dalle azioni di controllo introdotte dal pilota: esso, infatti, è in grado di modificare la stabilità del sistema non controllato. Ciò significa che può evitare situazioni di instabilità, come può anche esserne causa. Risulta evidente come il modello di pilota possa influenzare la risposta del veicolo alle forzanti aerodinamiche.

Il modello del pilota deve garantire:

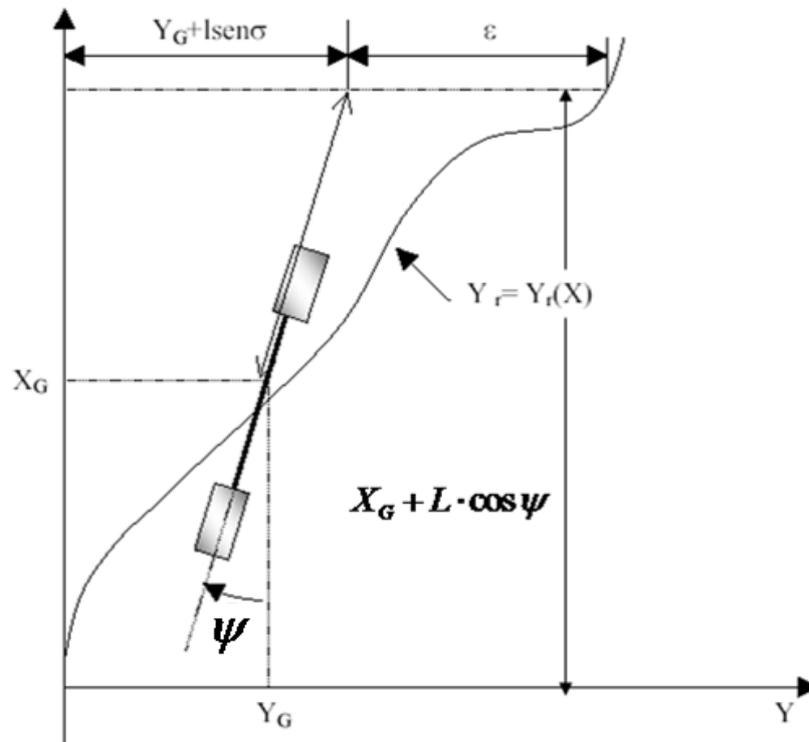
- Mantenimento della velocità desiderata;
- Inseguimento della traiettoria desiderata;

Il mantenimento della velocità è necessario perché tutte le manovre sono eseguite a velocità costante. Per questo motivo si usa un controllore proporzionale – derivativo con i seguenti guadagni:

$$K_p = 10000 \text{ N/m}$$

$$K_d = 4000 \text{ Ns/m}$$

Per mantenere la traiettoria, invece, si usa un modello di inseguimento di traiettoria. Tale modello prevede un controllore proporzionale – derivativo sull'errore di traiettoria lungo la coordinata Y: una volta definita una traiettoria di riferimento Y_r , si definisce una funzione d'errore calcolata ad una certa distanza dal veicolo, definita come lunghezza di previsione.



L'errore è calcolato come:

$$\epsilon = [(Y_g + L \cdot \sin \Psi) - Y_r(X_g + L \cdot \cos \Psi)]$$

L'angolo di sterzo è definito come:

$$\delta = K_p \cdot \epsilon + K_d \cdot \dot{\epsilon}$$

I guadagni e la lunghezza di previsione utilizzati sono:

$$K_p = 25 \text{ N/m}$$

$$K_d = 10 \text{ Ns/m}$$

$$L_p = 5 \text{ m}$$

Si è, inoltre, introdotto un modello per la risposta neuro – muscolare del pilota, proposto da Hault e Cole [7]. Lo schema è raffigurato in figura 47:

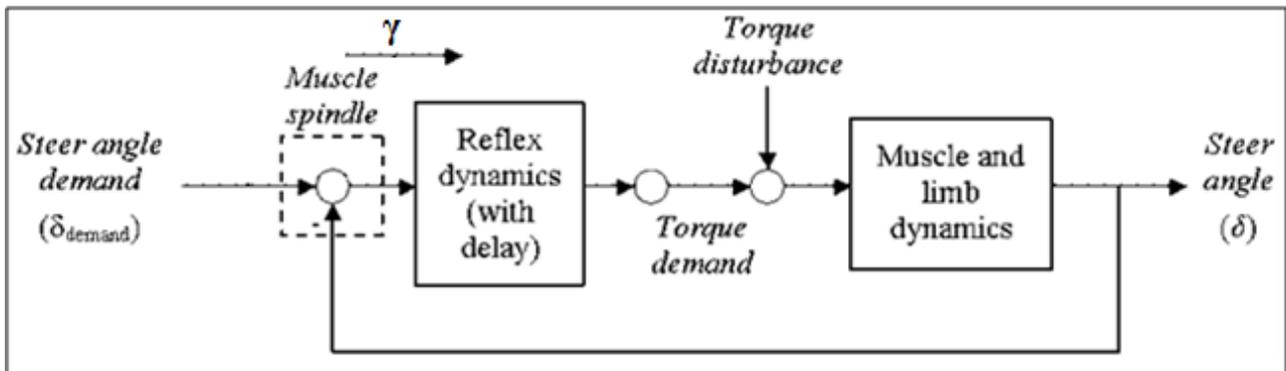


Figura 41 dinamica neuro - muscolare del pilota

Il sistema è composto da due funzioni di trasferimento:

- la prima riceve in ingresso l'angolo di sterzo richiesto, calcolato con l'inseguitore di traiettoria. L'input, chiamato segnale γ , è di tipo neurale, legato all'aspetto sensoriale. Per questo motivo la prima funzione di trasferimento descrive la risposta neurale del pilota, includendo anche un ritardo temporale legato ai riflessi del pilota stesso. La funzione di trasferimento è:

$$H(s) = \frac{30 k_r (s + 5)e^{-sT_r}}{s + 30}$$

In cui:

$$T_r = 0.04s;$$

$$k_r = 1;$$

In uscita da questo blocco, si ottiene la richiesta di coppia necessaria per ottenere l'angolo di sterzo desiderato. In aggiunta al momento richiesto, potrebbero esserci alcuni disturbi esterni, ma in questo modello non vengono considerati.

- La seconda funzione di trasferimento descrive, tramite un modello del secondo ordine, la dinamica degli arti e della colonna sterzante. L'input è la richiesta di coppia e l'uscita è rappresentata dall'angolo di sterzo effettivo. La funzione di trasferimento è:

$$G_s(s) = \frac{K_{0dr}}{J_{dr}S^2 + B_{dr}s + K_{dr}}$$

In cui inerzia, smorzamento e rigidità del pilota sono rispettivamente:

$$J_{dr} = 0.098 \text{ Kg } m^2;$$

$$B_{dr} = 0.55 \text{ Nm s rad}^{-1} ;$$

$$K_{dr} = 3.7 \text{ Nm rad}^{-1} ;$$

$$K_{0dr} = 0.25 \text{ Nm rad}^{-1};$$

Variando T_r , K_{0dr} e K_{dr} è possibile simulare piloti con diverse abilità. A partire dai valori di riferimento sono stati testati piloti meno abili caratterizzati da un tempo di reazione maggiore del 50% e del 100%. Inoltre anche la frequenza del sistema rappresentante gli arti del pilota e la colonna sterzante è stata diminuita del 67% e del 50%. Nella figura viene riportata una prova di sorpasso ,eseguita a 70 Km/h, con veicolo carico, con i 3 diversi piloti:

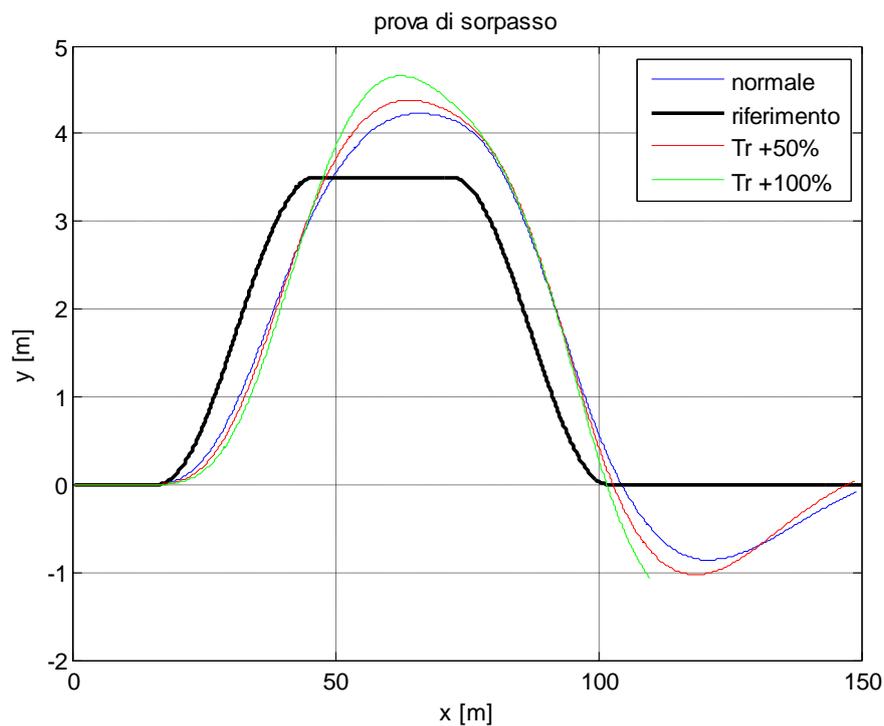


Figura 42 prova di sorpasso

3.4) CARATTERIZZAZIONE DEL VEICOLO

Le caratteristiche statiche del veicolo sono state ricavate attraverso prove a raggio costante, in accordo alla normativa ISO 14792. Il raggio della curva è di 45 metri e la velocità è fatta aumentare progressivamente, fino al ribaltamento del veicolo. In figura 49 l'angolo di sterzo, depurato dell'angolo di sterzo dinamico, è graficato contro l'accelerazione centripeta . Si ricorda che l'angolo di sterzo cinematico si definisce come:

$$\delta - \delta_0 = \alpha_1 - \alpha_2$$

La prova è stata eseguita mantenendo l'angolo di sterzo costante, con un valore pari a l/ρ , dove l è il passo della motrice e ρ è il raggio della curva, facendo aumentare progressivamente la velocità della vettura.

L'accelerazione laterale si riferisce alla motrice.

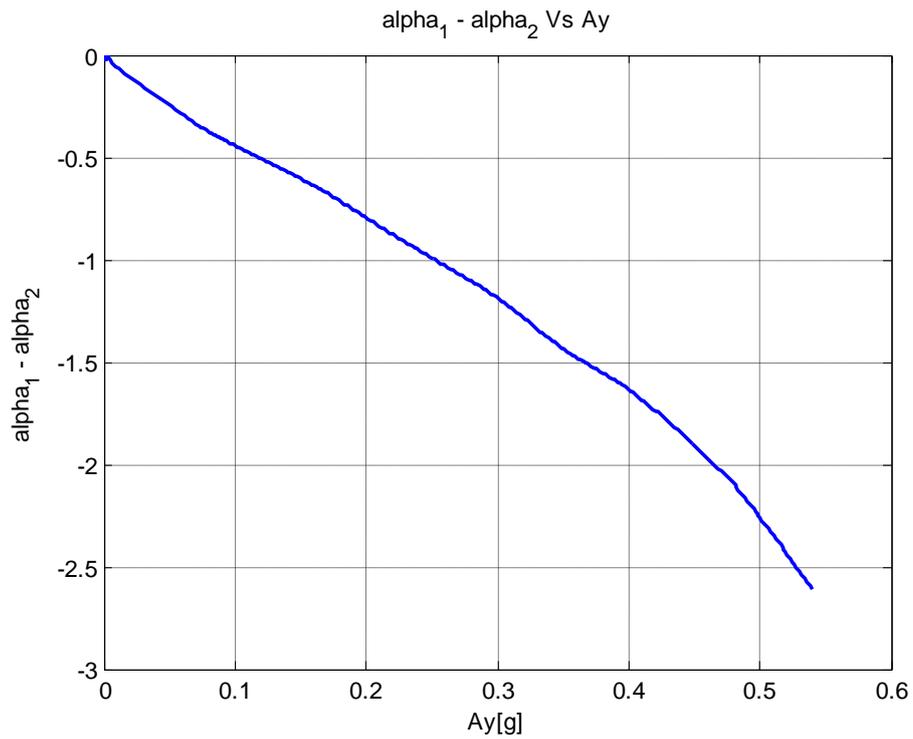


Figura 43 steer - angle Vs Ay

La figura 50 rappresenta gli angoli di deriva per ogni asse mentre la figura 51 rappresenta l'angolo di rollio della motrice e del semi - rimorchio, entrambe al variare dell'accelerazione laterale.

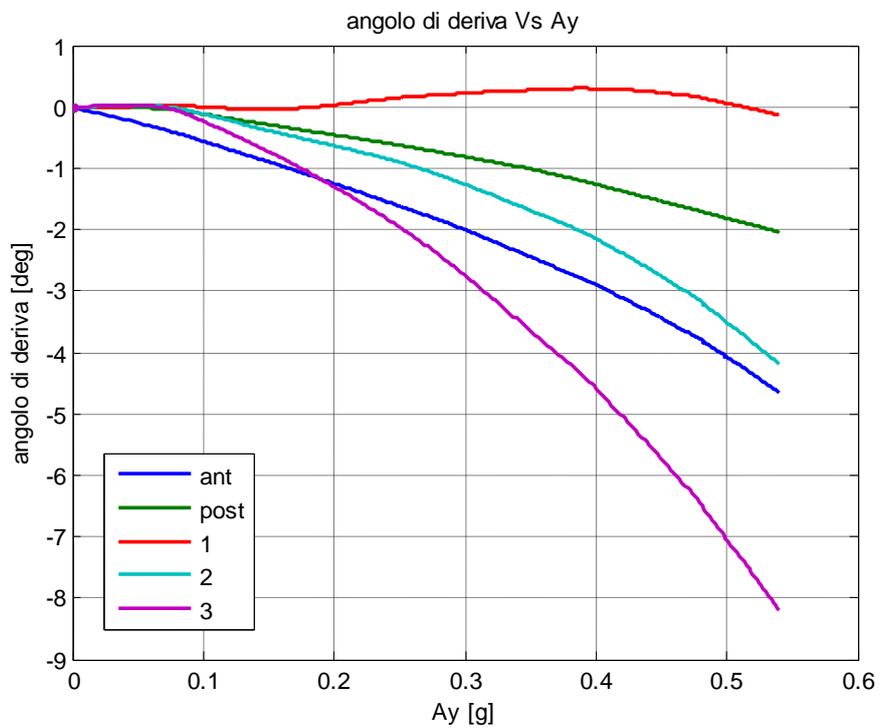


Figura 44 angolo di deriva Vs Ay

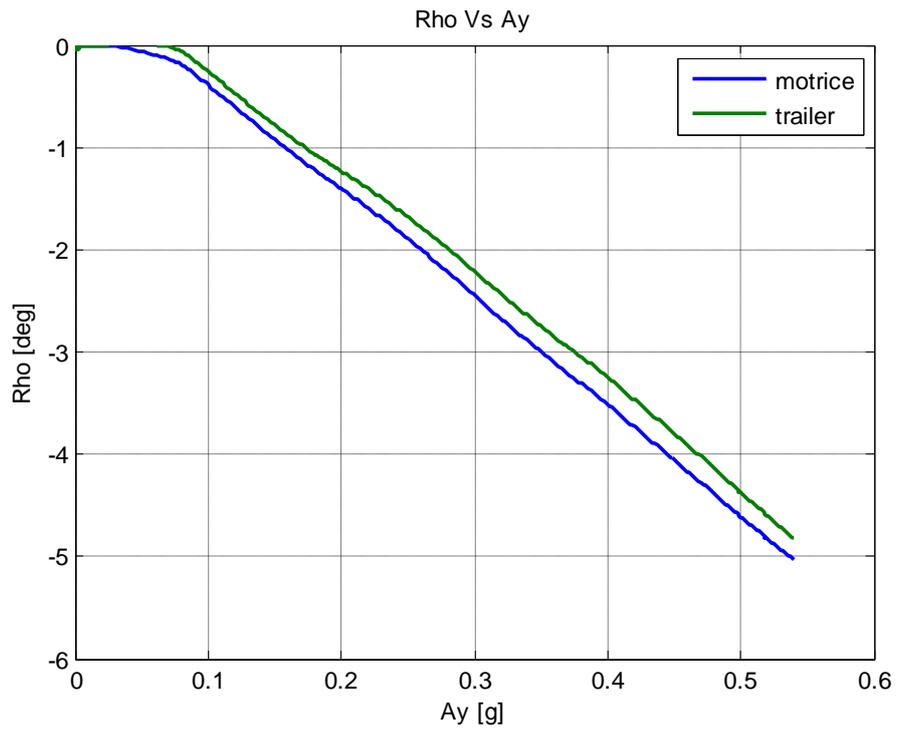


Figura 45 Angolo di rollio Vs Ay

I grafici che caratterizzano il veicolo sono stati confrontati con altre prove effettuate durante studi precedenti e si nota che i risultati ottenuti sono confrontabili.

4) FORZE AERODINAMICHE

Per tener conto degli effetti dinamici generati dalle forze aerodinamiche si è diviso il veicolo in 5 sezioni. In questo modo, è possibile calcolare la velocità del vento incidente su ogni singola sezione per poterne ottenere la forza laterale agente. Questa metodologia è già stata validata da studi condotti da Charuvisit [10]. Il contributo a momento d'imbardata aerodinamico di ogni sezione è calcolato moltiplicando la rispettiva forza laterale per la distanza dal punto di riduzione. Un approccio di questo tipo permette di studiare i fenomeni dinamici che nascono a causa della variazione delle forze aerodinamiche. In figura viene riportata la velocità relativa, per ogni sezione, ottenuta con una velocità del veicolo di 50 Km/h. Quello che si nota è in che maniera, durante il passaggio dietro la torre, il profilo di velocità del vento modifichi il modulo e la direzione della velocità relativa.

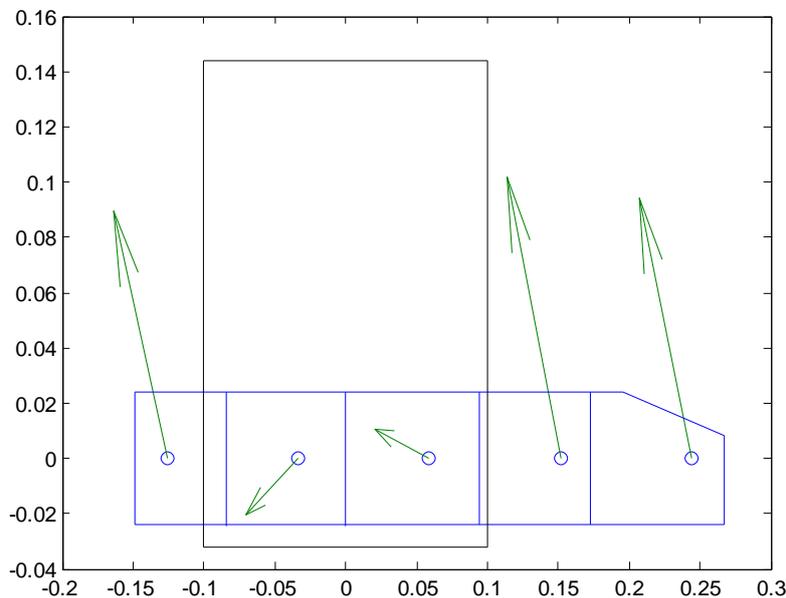


Figura 46 velocità relativa vento – camion

La forza laterale si può calcolare una volta noti:

- Velocità del vento su ciascuna sezione
- Coefficienti aerodinamici di ciascuna sezione
- Velocità del veicolo

La velocità del vento su ogni sezione si ottiene tramite la ricostruzione del profilo di velocità del vento, mentre i coefficienti aerodinamici sono ottenuti dalle prove sperimentali effettuate in GVPM; la velocità del veicolo invece si ipotizza essere costante. L'angolo di attacco del vento si determina una volta note velocità del vento e quella del veicolo.

Si è messa a punto una procedura numerica per ricostruire il profilo di velocità del vento a partire da prove statiche effettuate con misure di pressione.

4.1) DETERMINAZIONE DEL PROFILO DI VELOCITA' DEL VENTO

Per il calcolo delle forze e dei momenti numerici è stato necessario creare un profilo di velocità parametrizzato, in modo tale che agendo su pochi parametri fosse possibile modificarlo per ottenere le forze desiderate. La parametrizzazione del profilo è stata fatta senza imporre al profilo il passaggio attraverso alcun punto notevole conosciuto a priori, se non la velocità media del vento ad una distanza sufficientemente lontana dalla torre. In questa maniera si ottengono 2 vantaggi:

- Durante il processo di confronto con le forze sperimentali il profilo è libero di far variare i punti notevoli, attraverso i quali costruisce la curva senza alcun vincolo.
- Un profilo così parametrizzato acquista valenza generale e può essere utilizzato per la determinazione della distribuzione di velocità per ogni tipo di configurazione presente sul ponte, senza la necessità di utilizzare ogni volta un profilo 'ad hoc'; l'unico elemento di differenziazione tra diverse configurazioni del ponte sono i parametri iniziali imposti.

Per determinare la forma del profilo, ci si è riferiti a studi esistenti in letteratura [10]: in caso di assenza di barriere vicino la torre, sono presenti degli incrementi di velocità del vento, in ingresso e in uscita dalla torre, mentre dietro la torre la velocità del vento diminuisce, assumendo anche valori negativi. Nel caso in cui il vento sia ortogonale all'asse del ponte, la distribuzione di velocità è simmetrica. Inoltre, la forma del profilo, qualitativamente, assomiglia alla distribuzione di forza laterale misurate con le prese di pressioni.

A partire da queste informazioni, sono stati definiti 12 punti che descrivono il profilo del vento. I punti sono stati parametrizzati rispetto la larghezza della torre e la velocità del vento nominale, cioè lontano dalla torre. I punti sono stati scelti in modo da poter descrivere sia lo speed – up in ingresso alla torre, che la zona di depressione dietro la torre. I parametri che possono essere variati per identificare il profilo di velocità sono 9. Una volta definiti i punti notevoli, il profilo di velocità si ottiene collegando con delle spezzate i punti adiacenti ed effettuando una media mobile per evitare la presenza di variazioni di velocità troppo brusche. Per definire i coefficienti iniziali, si cerca di costruire un profilo di velocità del vento che assomigli il più possibile, come forma, a quello della distribuzione della forza laterale della configurazione in esame.

In tabella sono riportate le coordinate parametriche dei 12 punti notevoli:

x	Y
$-20*f5*D$	vm
$-f5*D$	vm
$-f3*D$	$f1*vm$
$-f9*D$	$f8*vm$
$-f6*D$	$f4*vm$
$-f7*D$	$f2*vm$
$f7*D$	$f2*vm$
$f6*D$	$f4*vm$
$f9*D$	$f8*vm$
$f3*D$	$f1*vm$
$f5*D$	vm
$20*f5*D$	vm

Tabella 6 coordinate parametriche del profilo del vento

La figura sottostante mostra un esempio di profilo parametrico:

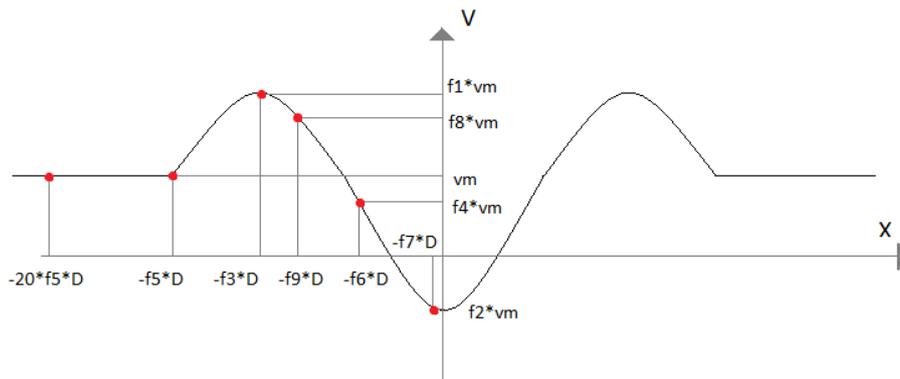


Figura 47 generico profilo parametrico

I nove parametri si ottengono minimizzando l'errore tra la distribuzione di forza laterale misurata sperimentalmente, con le prese di pressione, e quella calcolata numericamente con il profilo di velocità del vento da identificare. Solamente in questa fase del lavoro, si è scelto di dividere la superficie del veicolo in 9 sezioni, per riuscire a descrivere in maniera migliore la distribuzione delle forze aerodinamiche agenti sul veicolo.

4.1.1) MISURE SPERIMENTALI DI FORZE E MOMENTI

Le misure di forza e di momento utilizzate, sono quelle ottenute a partire dalle misure effettuate con le prese di pressione, di cui si è già discusso nel capitolo 2. Per calcolare la forza laterale $F_{ysper, i}$ agente sulla i -esima sezione del camion, durante il processo di integrazione delle pressioni viene posto a 0 il valore di pressione sulle prese che non fanno parte della sezione considerata, in modo tale che la forza e il momento totale che vengono misurati siano riferiti alla singola sezione e non a tutto il veicolo.

4.1.2) CALCOLO NUMERICO DI FORZE E MOMENTI

La forza laterale agente sulla i -esima sezione è stata calcolata come:

$$F_{y,i} = \frac{1}{2} \rho S_i V_{rel,i}^2 CF_y$$

Ogni sezione è caratterizzata da una velocità del veicolo nulla, in quanto le prove sono state eseguite in condizioni statiche, e una velocità del vento pari a quella del baricentro della sezione. Poiché le prove sono state fatte con veicolo fermo, la velocità relativa è pari a quella del vento mentre l'angolo d'attacco è pari a 0° , nel caso in cui la velocità del vento sia positiva, mentre vale 180° quando la velocità del vento è negativa. Il valore di CF_y è di 1.21 con angolo d'attacco pari a 0° , mentre -1.21 nel caso di angolo d'attacco di 180° . Il valore della densità dell'aria, ρ , è considerato costante pari a $1.18 \text{ Kg} / \text{m}^3$.

Per calcolare numericamente il contributo di ogni sezione al momento d'imbardata è sufficiente moltiplicare la $F_{y,i}$ per la distanza del baricentro della sezione dal punto di riduzione delle forze.

Con questa metodologia è possibile calcolare la distribuzione di forza laterale e di momento d'imbardata per le 9 posizioni veicolo - torre. Sommando algebricamente le forze agenti sulle 9 sezioni, è possibile trovare forza laterale e momento d'imbardata totale agente sul camion per le 9 configurazioni.

4.1.3) DEFINIZIONE DELLA FUNZIONE D'ERRORE

Una volta definite le forze e i momenti numerici e sperimentali è possibile definire una funzione errore da minimizzare per determinare il profilo di velocità. Quello che si è osservato è che, poiché la F_y dipende da V_{rel}^2 , è ragionevole definire l'errore soltanto a partire dalla forza laterale; considerando che il momento di imbardata non si calcola in maniera indipendente dalle forze laterali, ma semplicemente moltiplicando quest'ultime per un braccio, definire la funzione errore a partire anche da M_z non solo risulta poco utile, ma presenta anche la possibilità di introdurre un'impresione, legata al fatto che i bracci utilizzati nelle prove numeriche e in quelle sperimentali non coincidano perfettamente. L'errore si definisce come:

$$\varepsilon = \sum_{pos=1}^9 \left(\sum_{i=1}^9 (F_{ysper,i} - F_{y,i})^2 \right)_{pos}$$

4.2) PROFILI DI VELOCITA'

In questo studio sono stati determinati i profili di velocità per 2 diverse configurazioni di prova:

- Configurazione 12 (NDS + SG): barriera nominale del ponte, cartellone segnaletico, assenza barriera vicino la torre.
- Configurazione 13 (NDS + HS + SG): barriera nominale del ponte, cartellone segnaletico, barriere più alte vicino la torre.

4.2.1) CONFIGURAZIONE 12

In tale configurazione, in cui manca la barriera protettiva posta nella vicinanza della torre, il profilo atteso [10] presenta degli speed – up in ingresso e in uscita dalla torre, e una zona in cui la velocità del vento decresce, con la possibilità di poter diventare negativa, dietro la torre stessa. La forma del profilo di velocità atteso può essere ricavata, inoltre, osservando la distribuzione delle forze laterali sperimentali lungo le 9 posizioni di prova. A partire dalla forma attesa, vengono scelti i parametri iniziali, in modo tale da evitare che durante la minimizzazione della funzione errore, il sistema possa trovare minimi locali e considerarli come minimi assoluti, restituendo un profilo non corretto. I parametri iniziali scelti sono:

f01	1,2
f02	-0,32
f03	1
f04	1
f05	1,5
f06	0,33
f07	0,15
f08	1,2
f09	0,5

Tabella 7 parametri iniziali configurazione 12

I parametri ottenuti minimizzando la funzione errore, attraverso i quali è stato costruito il profilo di velocità, sono:

f1	1,5652
f2	-0,3773
f3	0,7278
f4	0,7922
f5	2,2127
f6	0,1688
f7	0,1670
f8	1,3599
f9	0,5999

Tabella 8 parametri configurazione 12

Il profilo ottenuto con questi parametri è il seguente:

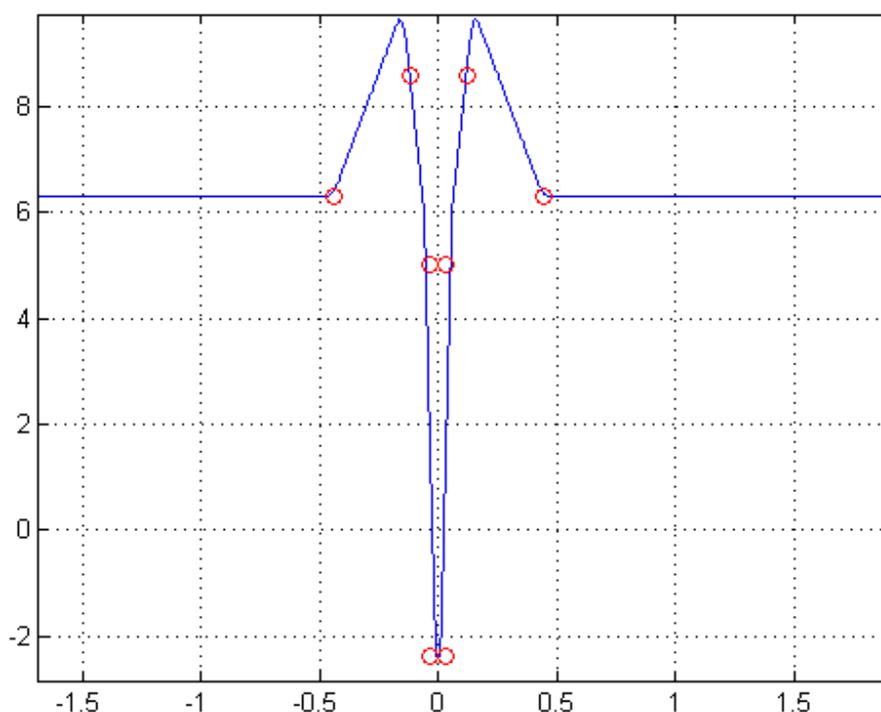


Figura 48 profilo di velocità del vento- configurazione 12

Come detto in precedenza, nel profilo si distinguono gli speed – up in ingresso e uscita dalla torre, e il decremento di velocità, che assume anche valori negativi, dietro la torre. Viene ora proposto il confronto tra forze laterali e momenti d’imbardata sperimentali e numerici. In linea continua sono rappresentate le forze calcolate con il modello numerico mentre, in linea tratteggiata, quelle misurate sperimentalmente. I primi due grafici mostrano il confronto tra le distribuzioni di forza laterale e momento d’imbardata per le nove posizioni torre – veicolo; gli ultimi due grafici, invece, mostrano il confronto tra la forza laterale ed il momento d’imbardata totale, per le nove posizioni torre – veicolo.

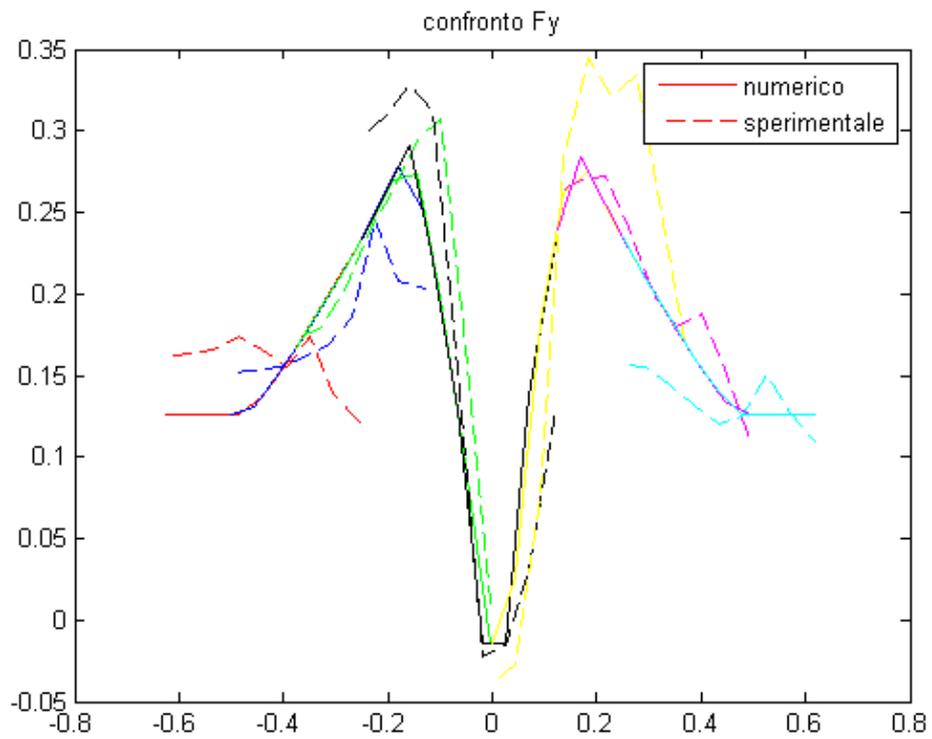


Figura 49 confronto distribuzione forze laterali sperimentali - numeriche cfg 12

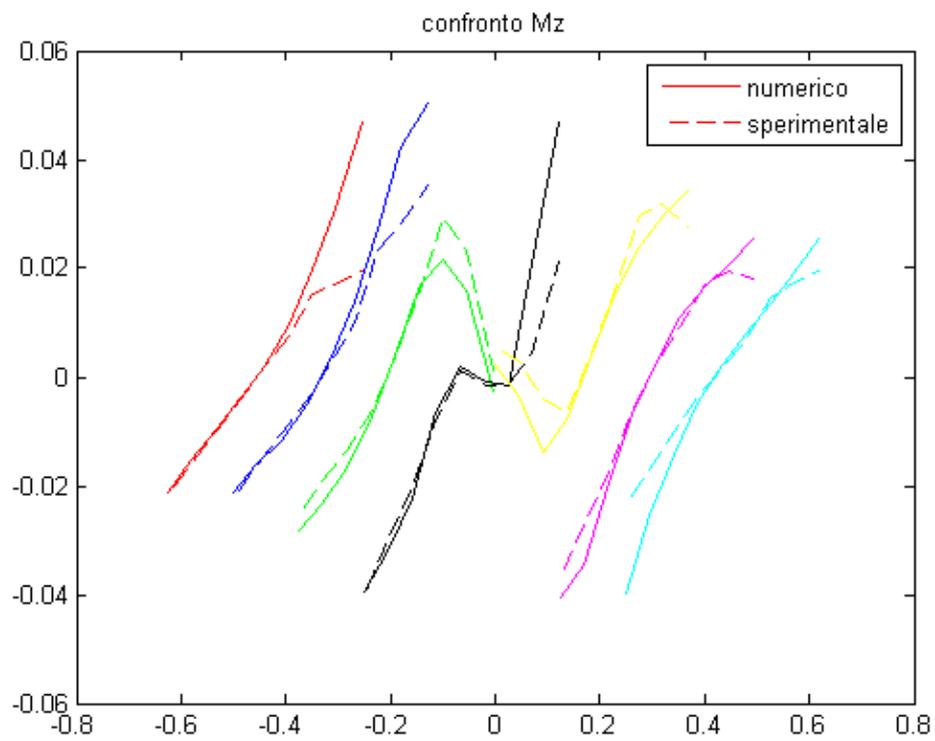


Figura 50 confronto distribuzione momenti d'imbardata sperimentali - numerici cfg 12

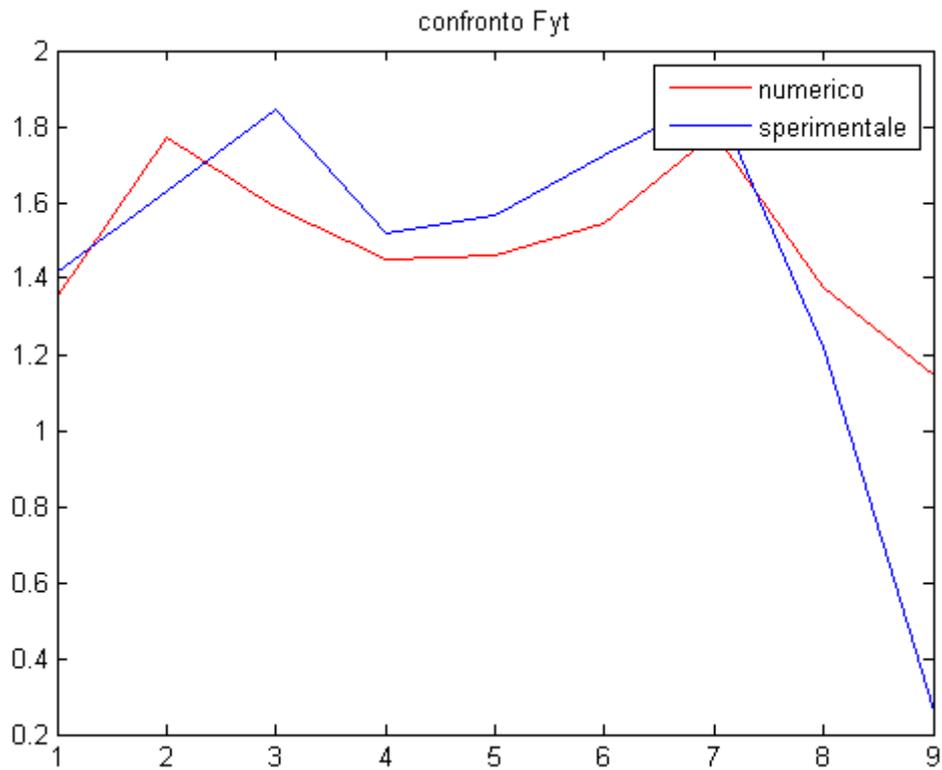


Figura 51 confronto forza laterale totale sperimentale - numerica per le 9 posizioni - cfg 12

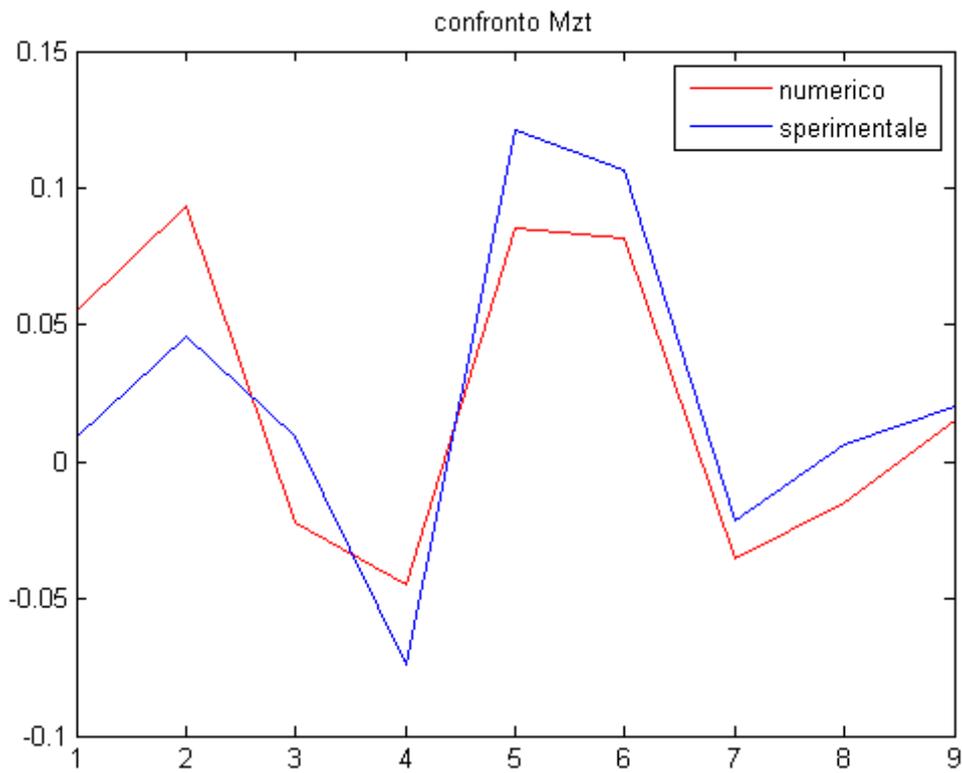


Figura 52 confronto momento d'imbardata totale sperimentale - numerico per le 9 posizioni - cfg 12

Come si può osservare, la forma del profilo di velocità del vento, è molto simile a quella della distribuzione di forza laterale per le nove posizioni. Osservando, invece, la distribuzione del momento d'imbardata, si nota come le maggiori differenze tra il calcolo numerico e le misure sperimentali, sono sulle sezioni anteriori del veicolo: questa differenza è dovuta alla difficile misurazione e modellazione degli effetti aerodinamici di bordo.

4.2.2) CONFIGURAZIONE 13

In tale configurazione, la barriera protettiva posizionata in prossimità della torre fa in modo che non ci siano gli speed – up evidenziati nella configurazione precedente, ma solamente un decremento di velocità del vento dietro la torre, con valori che, anche in questo caso, possono diventare negativi. I parametri iniziali scelti sono:

f01	-0,5
f02	-1,7
f03	2,3
f04	-1,3
f05	2,8
f06	1,1
f07	0,3
f08	-0,9
f09	1,7

Tabella 9 parametri iniziali configurazione 13

I parametri ottenuti minimizzando la funzione errore, attraverso i quali è stato costruito il profilo di velocità, sono:

f1	-0,4993
f2	-0,5872
f3	0,8088
f4	0,6459
f5	4,1769
f6	1,6726
f7	0,8021
f8	-0,2734
f9	0,8119

Tabella 10 parametri configurazione 13

Il profilo ottenuto con questi parametri è il seguente:

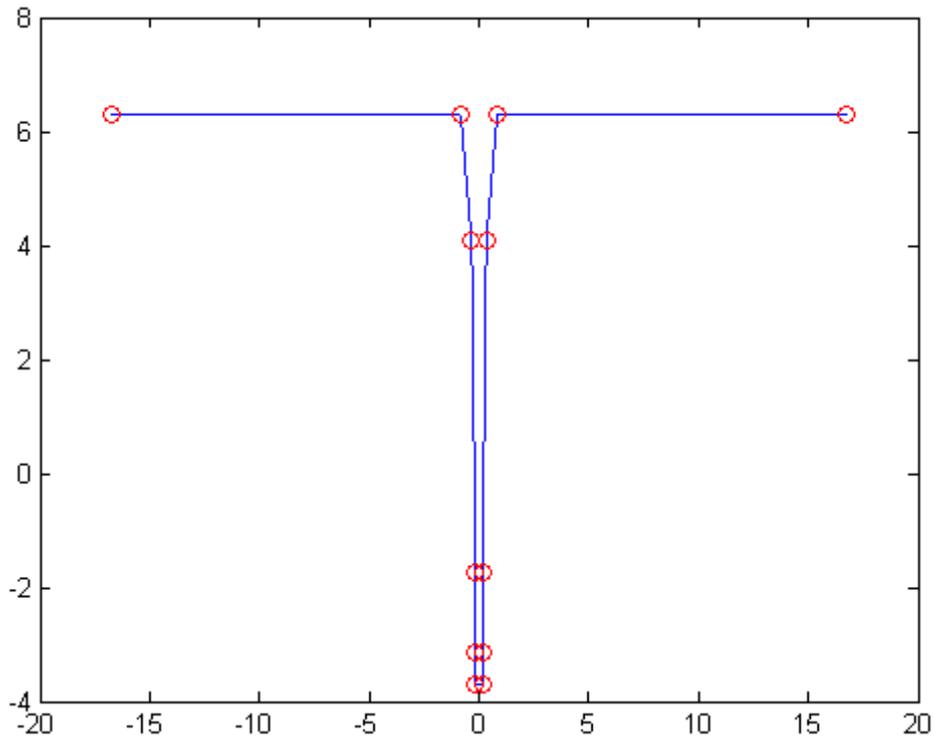


Figura 53 profilo di velocità del vento - cfg 13

La figura evidenzia la mancanza degli speed – up, che invece erano presenti nel caso precedente; tuttavia, la velocità raggiunta al centro della torre, di segno negativo, ha un valore assoluto circa doppio di quella della configurazione 12.

Viene ora proposto il confronto tra forze laterali e momenti d’imbardata sperimentali e numerici. Anche in questo caso vengono mostrati i confronti sia della distribuzione delle forze aerodinamiche, che delle forze totali per le nove posizioni. Quello che si nota è che anche in questo caso la forma del profilo di velocità del vento è molto simile a quella della distribuzione della forza laterale per le 9 posizioni. L’assenza degli speed – up è giustificata dai valori della forza laterale totale: il valore massimo per questa configurazione è circa tre volte più basso di quello della configurazione 12, in cui sono presenti gli speed – up.

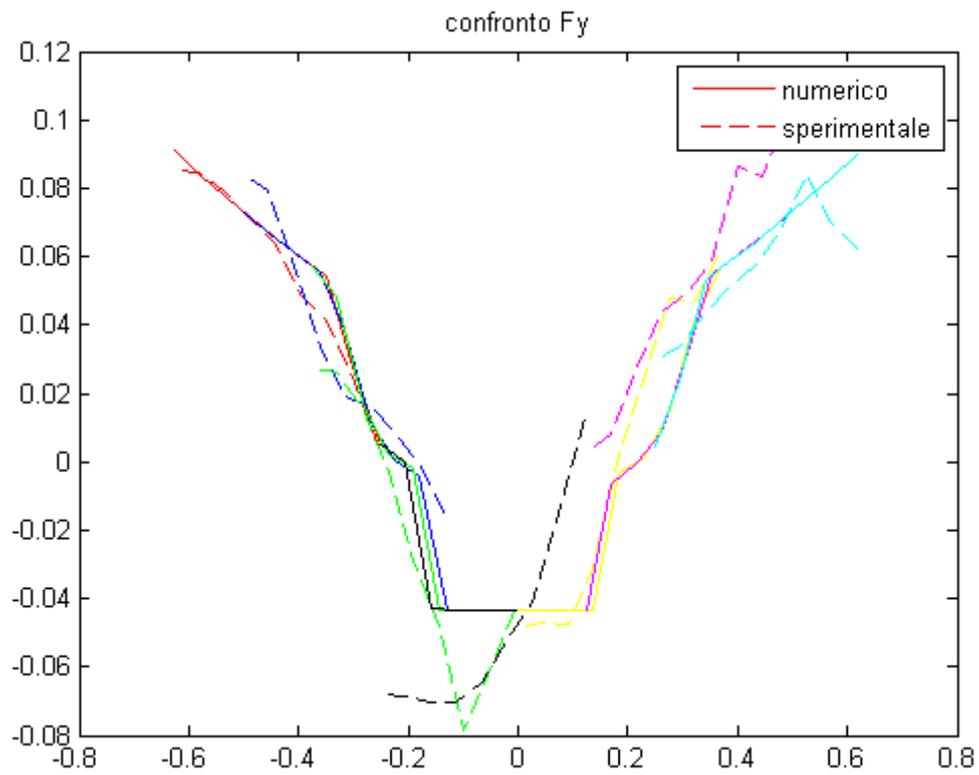


Figura 54 confronto distribuzione forze laterali sperimentali-numeriche cfg 13

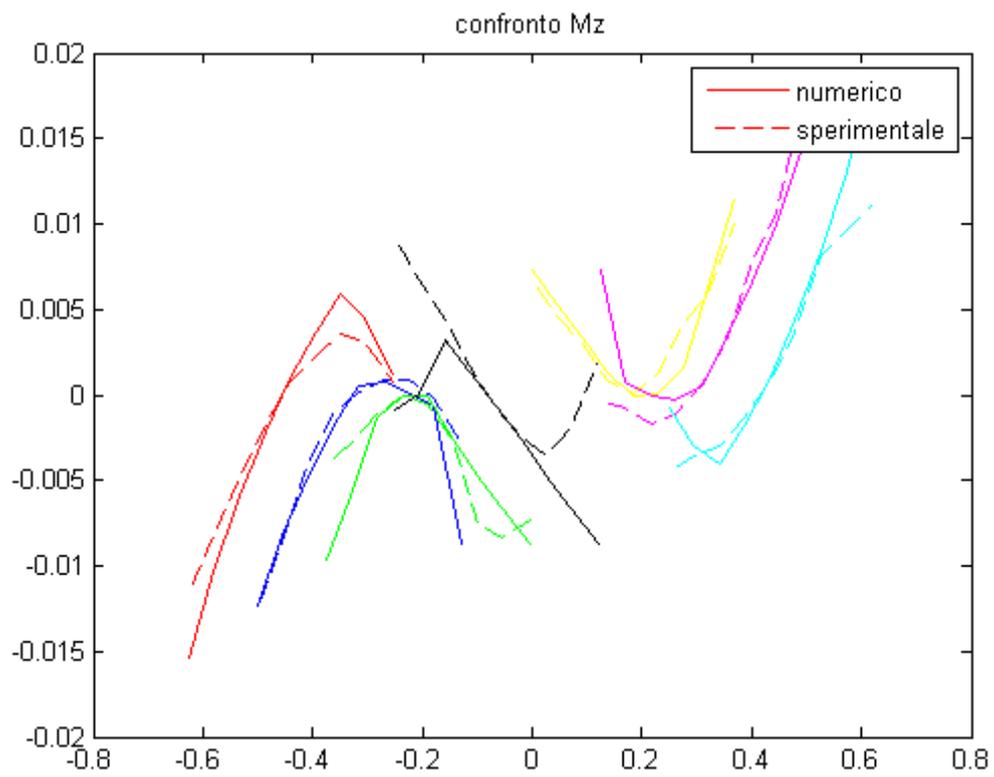


Figura 55 confronto distribuzione momenti d'imbardata sperimentali-numerici cfg 13

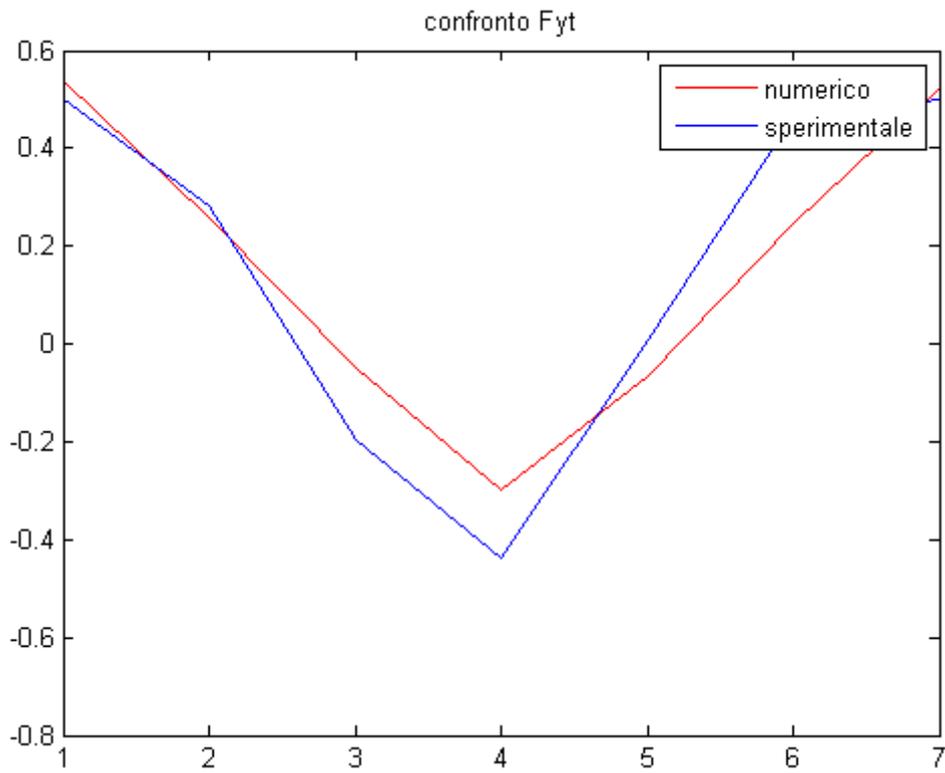


Figura 56 confronto forze laterali totali sperimentali - numeriche per le 9 posizioni - cfg 13

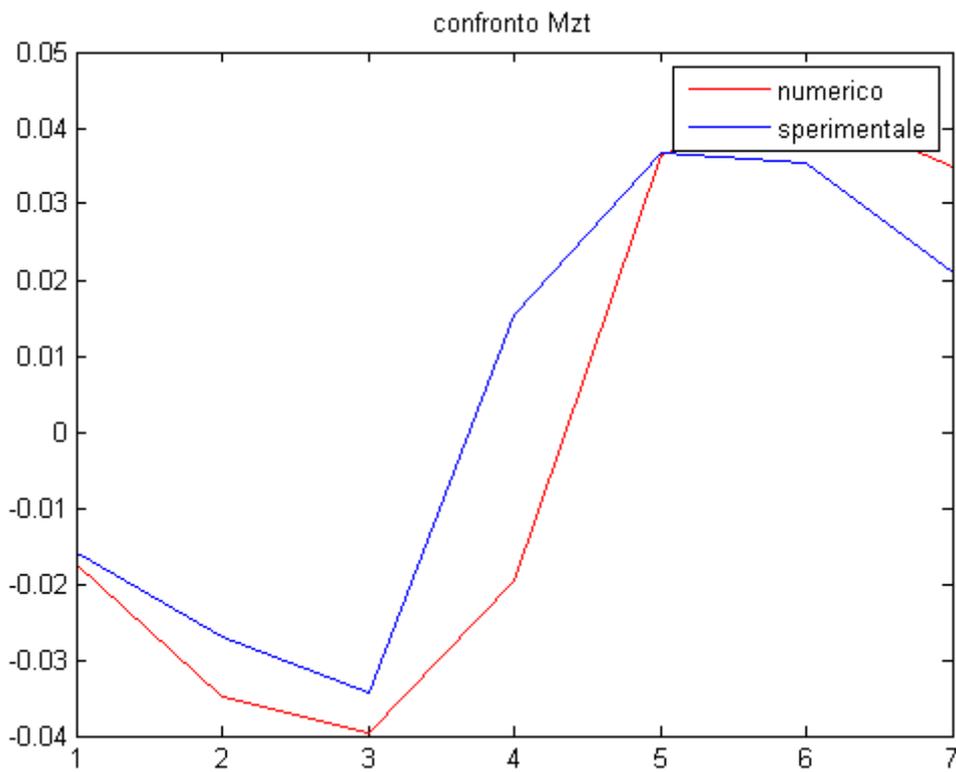


Figura 57 confronto momenti d'imbardata totali sperimentali - numerici per le 9 posizioni - cfg 13

4.3) APPLICAZIONE DEL PROFILO DI VENTO SUL VEICOLO MOBILE

Una volta identificato il profilo di vento agente sul veicolo, è necessario calcolare le forze aerodinamiche che determinano il comportamento dinamico del veicolo. Per calcolare le forze aerodinamiche bisogna, innanzitutto, ricavare modulo e direzione della velocità relativa veicolo – vento. In figura è riportato lo schema per il calcolo della velocità relativa:

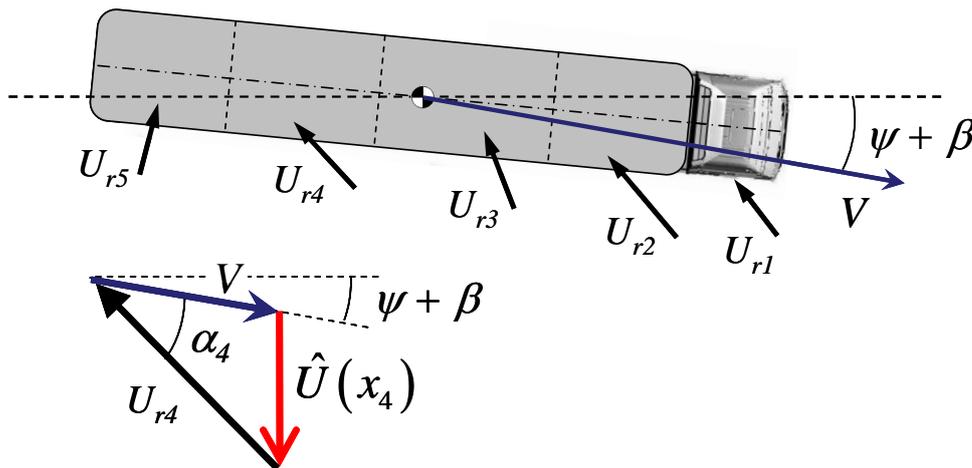


Figura 58 velocità relativa veicolo – vento

Le componenti longitudinali e trasversali della velocità relativa, per ogni sezione, si ottengono dalla composizione della velocità del veicolo e quella del vento. Per ogni sezione, la velocità legata all'avanzamento del veicolo è la stessa, mentre quella legata al vento dipende sia dal profilo del vento che dalla posizione della sezione rispetto la torre. Le componenti di velocità vengono poi proiettate in direzione longitudinale e trasversale:

$$V_{y,i} = -U_{r,i} * \cos(\alpha_i) + V * \sin(\beta + \psi)$$

$$V_{x,i} = U_{r,i} * \sin(\alpha_i) + V * \cos(\beta + \psi)$$

$$|V_{rel}| = \sqrt{V_y^2 + V_x^2}$$

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{V_y}{V_x}\right)$$

Dove:

U_r = velocità del vento incidente;

V = velocità del veicolo;

β = angolo d'assetto;

ψ = angolo d'imbardata;

V_y = componente trasversale della velocità relativa

V_x = componente longitudinale della velocità relativa

$|V_{rel}|$ = modulo della velocità relativa

α = angolo d'attacco

Una volta calcolato l'angolo d'attacco, è possibile calcolare il valore dei coefficienti aerodinamici $CF_{y,i}$, $CM_{x,i}$, $CM_{z,i}$, utilizzando le polari per l'i-esima sezione:

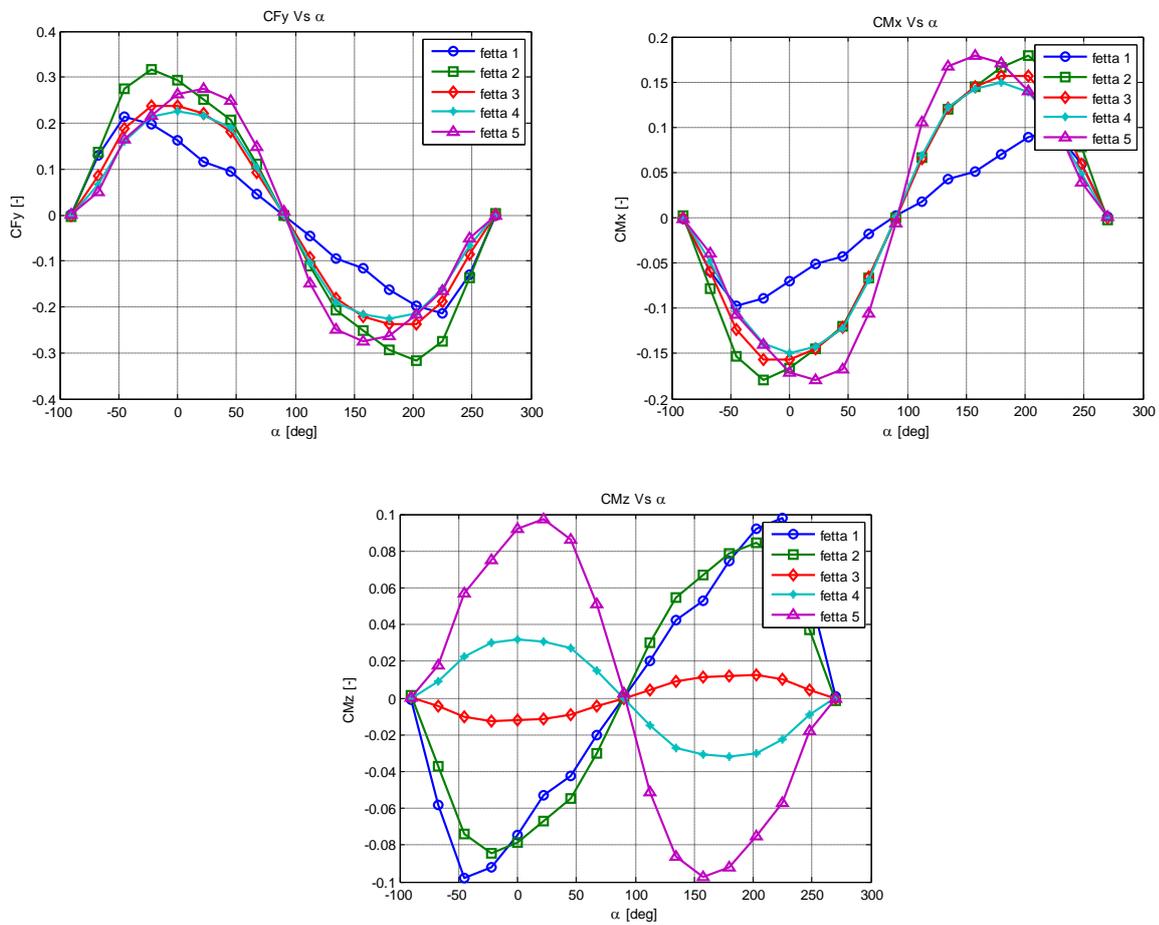


Figura 59 polari per le diverse sezioni

Le forze e i momenti aerodinamici vengono così calcolati:

$$F_{y,i} = \frac{1}{2} \rho CF_y(\alpha_i) L * H |V_{rel}^2|$$

$$M_{x,i} = \frac{1}{2} \rho CM_x(\alpha_i) L * H^2 |V_{rel}^2|$$

$$M_{z,i} = \frac{1}{2} \rho CM_z(\alpha_i) L^2 * H |V_{rel}^2|$$

Le forze e i momenti di ogni sezione, così calcolati, vengono applicati al punto di riduzione utilizzato per il calcolo delle polari per le singole sezioni.

La figura mostra il blocco SimMechanics per il calcolo delle forze e dei momenti aerodinamici:

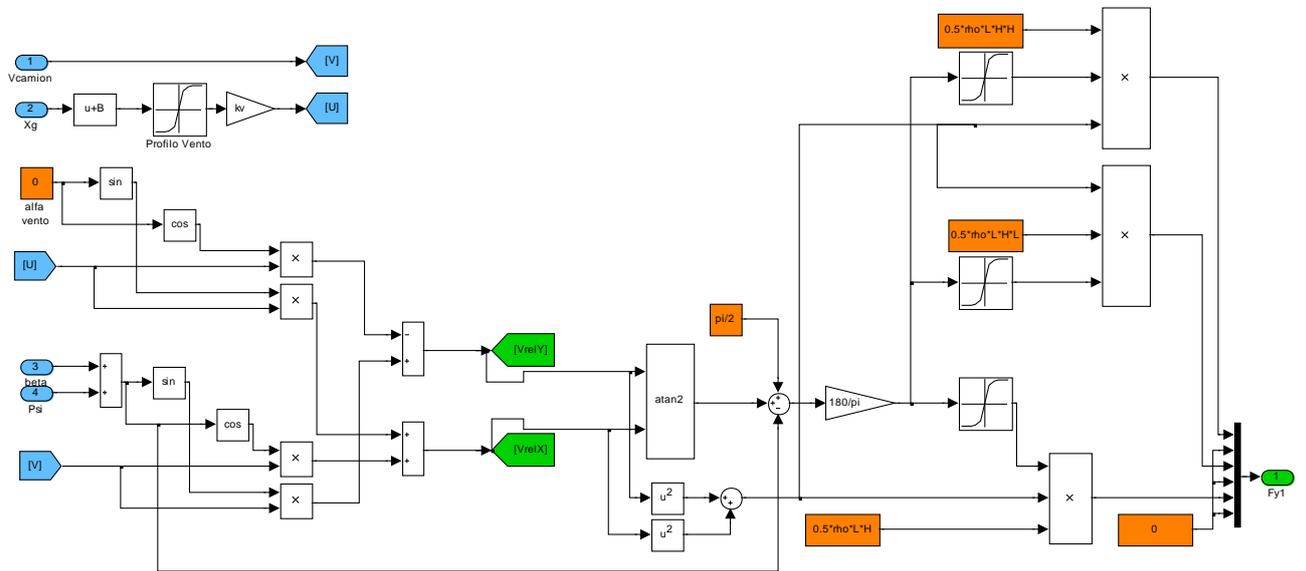


Figura 60 blocco SimMechanics per il calcolo di forze e momenti aerodinamici

5) RISULTATI

5.1) DESCRIZIONE DELLE MANOVRE

Attraverso il modello del veicolo e delle forze aerodinamiche sono state condotte simulazioni numeriche per studiare le condizioni di instabilità del veicolo stesso e stabilire quali siano i fattori responsabili. Le prove sono state effettuate applicando il profilo di velocità ottenuto, al modello del camion. Il profilo di velocità del vento ha un valore iniziale nullo e dopo qualche secondo, attraverso una rampa, raggiunge il valore nominale; il passaggio dietro la torre è simulato a partire dalle condizioni di regime, una volta esaurito il transitorio iniziale. Le prove simulano tre scenari differenti:

- Veicolo in marcia investito da vento libero
- Passaggio sul ponte dietro la torre nella configurazione 12 (barriera nominale del ponte, ma senza barriera vicino la torre)
- Passaggio sul ponte dietro la torre nella configurazione 13 (barriera nominale del ponte e barriera vicino la torre)

Per ogni configurazione sono fatte prove al variare dei parametri che influenzano la stabilità del sistema:

- Condizioni di carico: le prove sono state effettuate con il veicolo carico e il veicolo scarico
- Velocità del camion: per ogni simulazione la velocità del veicolo è mantenuta costante e varia da 20 Km/h fino a 100 Km/h , aumentando progressivamente di 5 Km/h .
- Velocità del vento: le prove sono fatte facendo variare la velocità nominale del vento da 20 m/s a 40 m/s per il veicolo carico; da 13 m/s a 26 m/s per il veicolo scarico.
- Risposta del pilota: sono state effettuate prove aumentando del 50% e del 100% il tempo di reazione del pilota e la frequenza del sistema dinamico, rappresentante gli arti e la colonna sterzante. Si sono scelti questi valori in quanto rappresentativi di una condizione più critica rispetto a quella nominale e quindi cautelativa dal punto di vista della valutazione della sicurezza stradale.

Per ogni prova è possibile analizzare la risposta dinamica del veicolo per capire quali siano le cause che mettono a rischio la sicurezza del traffico o del veicolo stesso. Le condizioni di rischio derivano principalmente da due fattori:

- Ribaltamento dovuto alle azioni aerodinamiche.
- Invasione della corsia adiacente dovuto alla instabilità dinamica del sistema veicolo – pilota

Riuscire a determinare la natura dell'instabilità del sistema può diventare molto importante ai fini dell'analisi del problema.

Le simulazioni possono essere interpretate analizzando l'andamento nel tempo delle caratteristiche dinamiche del sistema. Le grandezze che descrivono la risposta dinamica del veicolo sono:

- Traiettoria della motrice e del semi – rimorchio
- Angolo di sterzo
- Angolo di imbardata
- Angolo d'assetto
- Angolo di rollio
- Forza laterale aerodinamica
- Momento di imbardata aerodinamico

- Momento a ribaltamento aerodinamico
- Forza laterale generata da ogni pneumatico
- Carico verticale per ogni pneumatico
- Accelerazione laterale della motrice e del semi – rimorchio

A titolo dimostrativo, vengono proposti gli andamenti nel tempo delle principali grandezze dinamiche, per le 3 configurazioni di prova. Le prove scelte sono state eseguite con veicolo carico a 50 Km/h e velocità del vento di 26 m/s. La manovra eseguita con vento libero viene mostrata separatamente mentre le manovre effettuate sul ponte, con il passaggio dietro la torre, vengono proposte insieme.

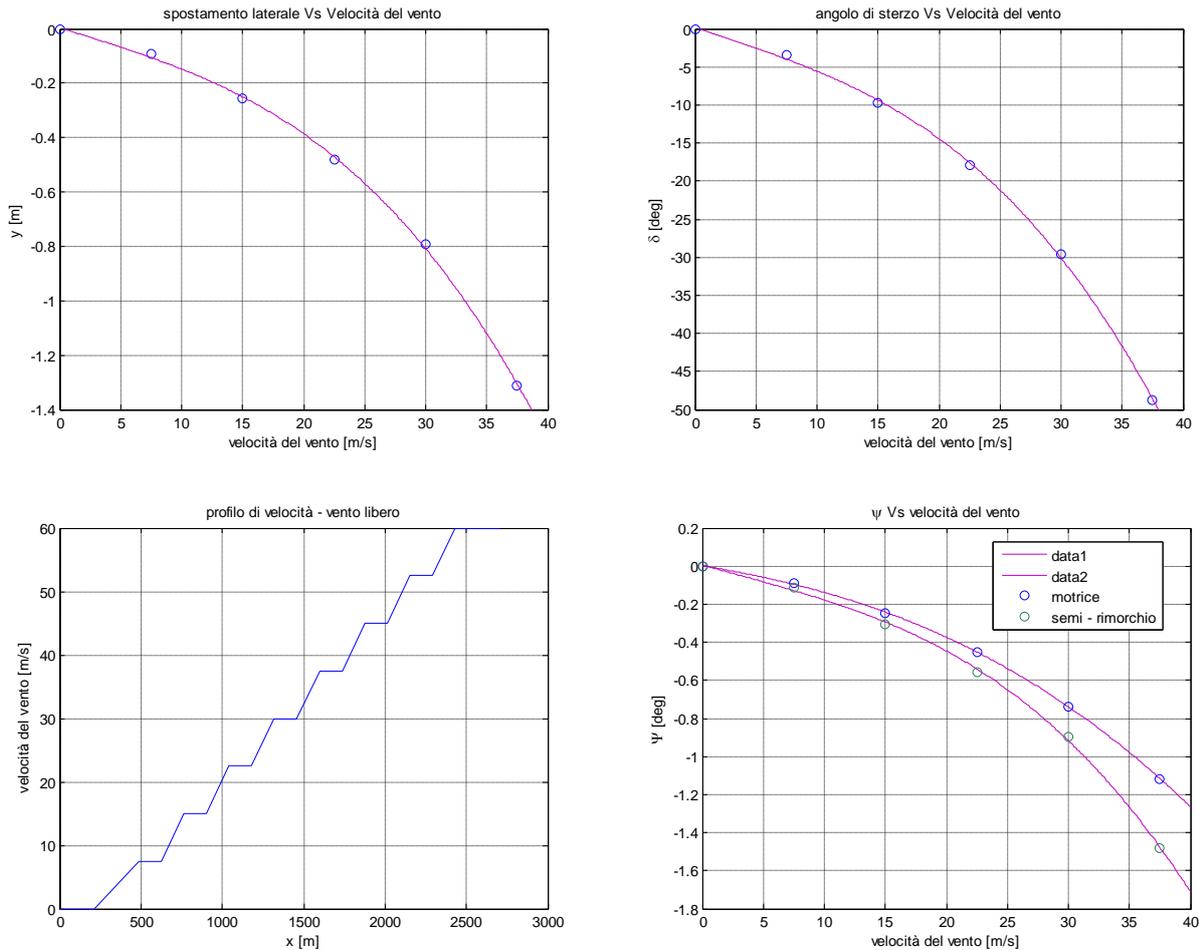


Figura 61 vento libero – traiettoria (1), angolo di sterzo δ (2), profilo di velocità (3), angolo d'imbardata ψ (4)

Il veicolo è soggetto ad una rampa di vento costruita nella seguente maniera: la velocità del vento aumenta di 7,5 m/s ogni 10 secondi; dopo di che resta costante per altri 10 secondi per permettere al veicolo di stabilizzarsi. La manovra prosegue fino a che il veicolo non arriva alla condizione di ribaltamento. I grafici relativi alla risposta del veicolo sono stati costruiti utilizzando i valori raggiunti a regime per ogni velocità del vento considerata.

Vengono ora proposti i grafici relativi alle manovre relative al passaggio dietro la torre:

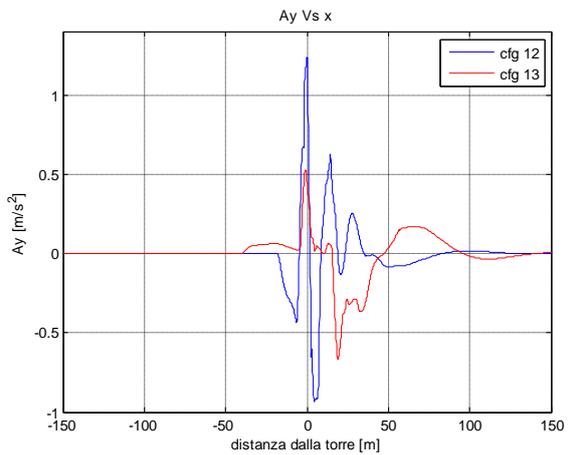
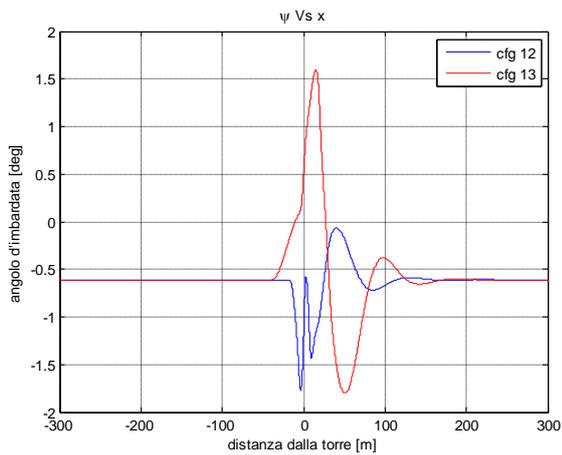
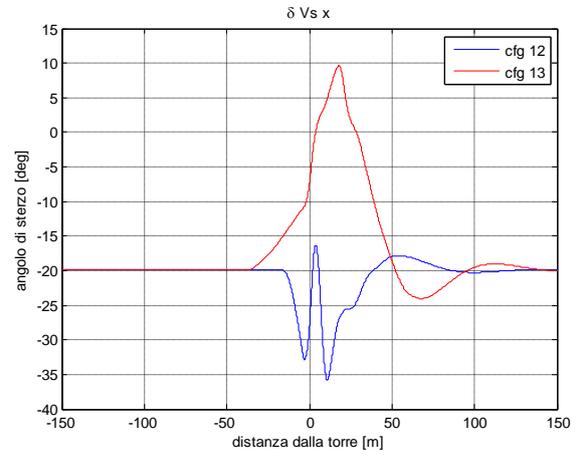
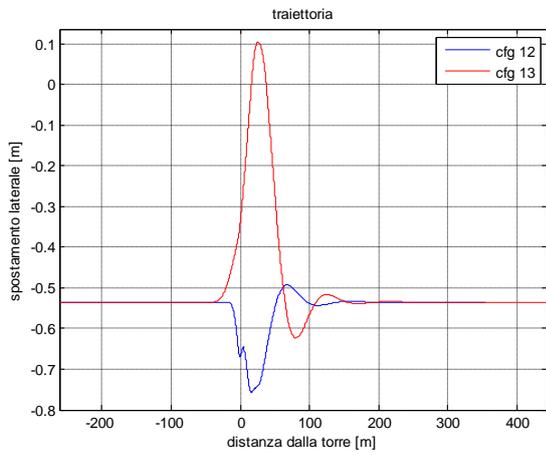
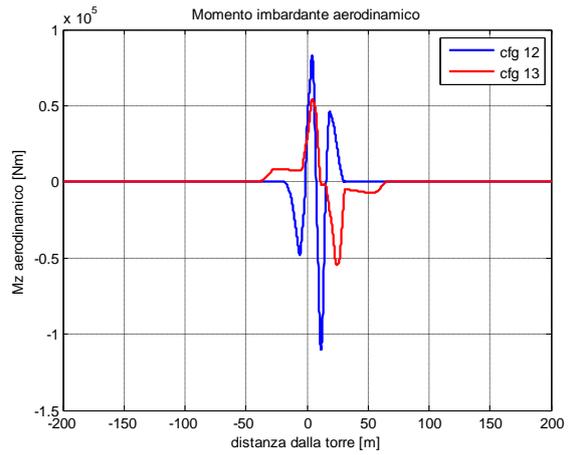
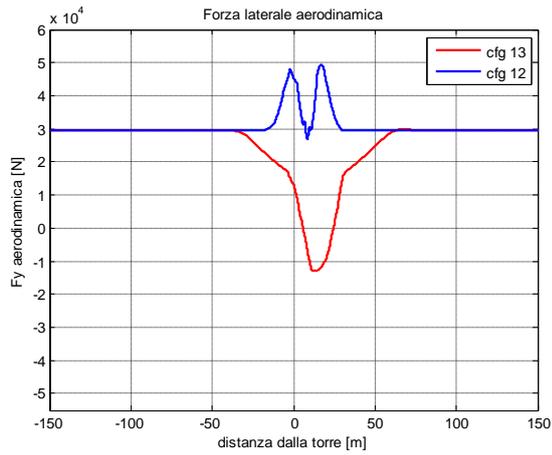


Figura 62 veicolo su ponte – F_y aerodinamica (1), M_z aerodinamico (2), traiettoria (3), δ (4), ψ (5), A_y (6)

Come si nota dai grafici, il comportamento del veicolo nei due casi è completamente diverso. Si vede chiaramente come nel caso in cui sono assenti le barriere, le forze aerodinamiche tendono a spingere il veicolo lungo la direzione con cui arriva il vento; nella configurazione con le barriere, l'effetto principale è legato alla zona di depressione dietro la torre, che tende a risucchiare il veicolo verso la torre stessa.

5.1.1) RICOSTRUZIONE DELL'ANGOLO DI STERZO

Come mostrano i grafici, le forze applicate sono molto diverse per le due configurazioni provate. Le azioni aerodinamiche che possono causare instabilità sono:

- Forza laterale
- Momento di rollio (o di ribaltamento)
- Momento d'imbardata

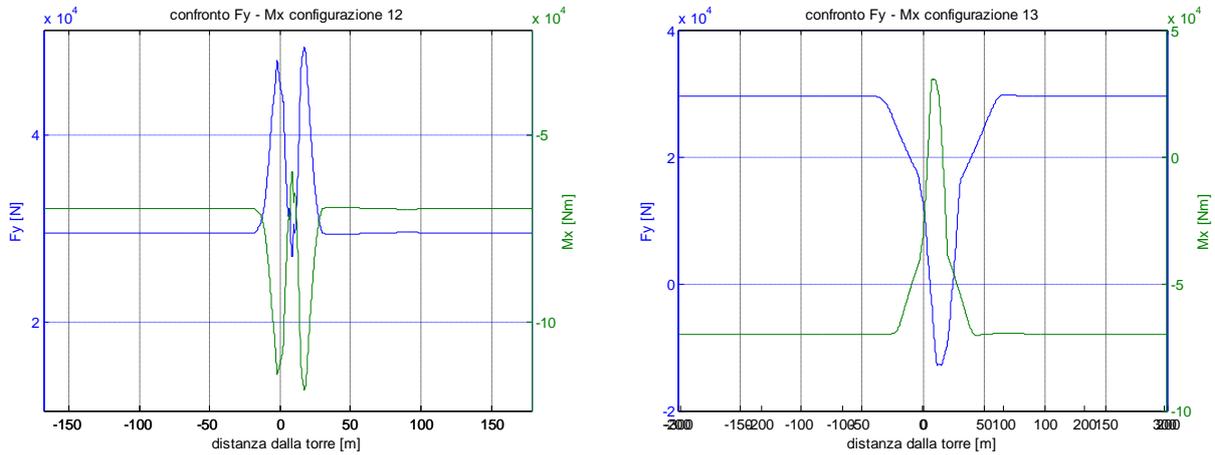


Figura 63 confronto $F_y - M_x$ configurazioni 12/13

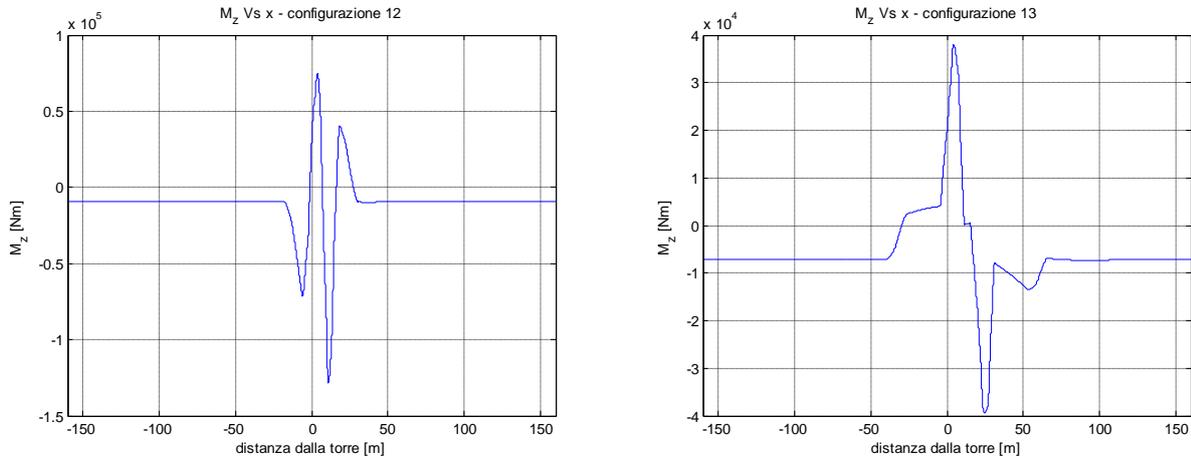


Figura 64 M_z - configurazione 12/13

Nei grafici sono riportate la forza laterale, momento di ribaltamento e momento d'imbardata. Per agevolare il confronto, F_y e M_x sono stati riportati utilizzando due scale differenti. Si nota immediatamente che, a meno di un fattore di scala, entrambe le grandezze rappresentano lo stesso fenomeno. Poiché il momento di ribaltamento è strettamente legato alla forza laterale, le considerazioni che seguono sono riferite solamente alla forza laterale e al momento d'imbardata.

La forza laterale ed il momento d'imbardata svolgono un ruolo diverso nel caso in cui siano presenti o meno le barriere vicino la torre. Per valutare e stimare il contributo delle azioni aerodinamiche si è deciso di osservare la risposta del pilota.

In prima approssimazione possiamo considerare l'angolo di sterzo come combinazione lineare delle forze aerodinamiche. Secondo questa ipotesi possiamo ricostruire l'angolo di sterzo mediante due coefficienti:

$$\delta_{ric} = K_1 * F_y + K_2 * M_z$$

Confrontando l'angolo di sterzo ricostruito con quello misurato durante la simulazione, è possibile ricavare il valore dei coefficienti che minimizzano l'errore quadratico medio. Le grandezze in gioco ovviamente hanno unità di misura differenti: per diventare confrontabili, sono state normalizzate rispetto il modulo del proprio valore massimo. L'errore quadratico medio (*MSE*) è stato definito come:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_i - \delta_{ric\ i})^2}{N}}$$

Dove *N* rappresenta la lunghezza dei vettori.

Il confronto tra i due coefficienti indica quale componente di forza è preponderante nella configurazione analizzata. Il rapporto tra angolo di sterzo e azioni aerodinamiche, ovviamente, non è lineare. Ciò significa che l'approssimazione introdotta non è trascurabile; diventa accettabile soltanto se si ragiona in termini qualitativi. Lo scopo non è quello di ricostruire correttamente l'angolo di sterzo ma di vedere quale componente aerodinamica abbia il ruolo più importante durante le simulazioni.

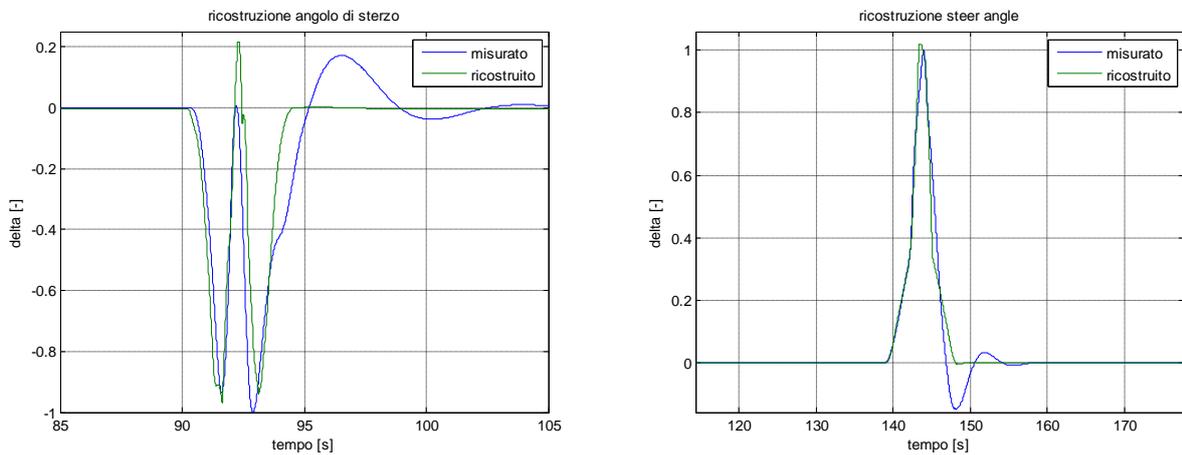


Figura 65 confronto angolo di sterzo misurato e ricostruito – configurazioni 12/13 - veicolo carico

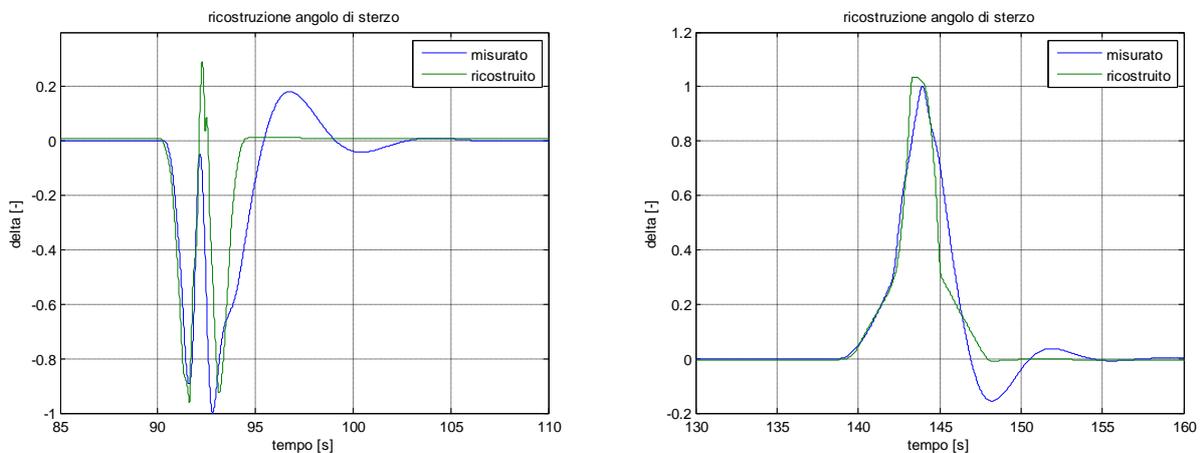


Figura 66 confronto angolo di sterzo misurato e ricostruito – configurazioni 12/13 - veicolo carico

Per determinare l'effetto delle forze aerodinamiche, è stata scelta una configurazione in cui non si raggiungesse l'instabilità e il pilota fosse in grado di gestire il veicolo. La prova è stata fatta con il veicolo carico e scarico, per vedere se le caratteristiche inerziali del veicolo potessero modificare l'influenza delle forze aerodinamiche. Si osserva come, nel caso di prova con barriere vicino la torre, l'angolo di sterzo abbia una forma molto simile a quella della forza laterale mentre, nel caso di prova senza barriere, si nota come la forma dell'angolo di sterzo dipenda sia dal contributo legato alla forza laterale che da quello legato al momento d'imbardata. Il calcolo dei coefficienti (normalizzati nell'intervallo 0-1) conferma le osservazioni appena fatte. Per la configurazione 12, K_1 varia dal 60% al 65% mentre K_2 varia dal 35% al 40%. Per la configurazione 13, invece, K_1 è molto maggiore di K_2 : K_1 varia dal 90% al 95% mentre K_2 varia dal 5% al 10%.

Il valore dei coefficienti con veicolo carico è riportato nella tabella:

	Configurazione 12	Configurazione 13
K_1	0.61	0.95
K_2	0.39	0.05

Tabella 11 parametri ricostruzione angolo di sterzo, veicolo carico

Il valore dei coefficienti con veicolo scarico è riportato nella tabella:

	Configurazione 12	Configurazione 13
K_1	0.64	0.89
K_2	0.36	0.11

Tabella 12 parametri ricostruzione angolo di sterzo, veicolo scarico

Osservando i coefficienti e il confronto tra l'angolo di sterzo ricostruito e quello misurato, si possono trarre due conclusioni, valide per entrambe le condizioni di carico:

- 1) In assenza di barriere vicino la torre, sia la forza laterale che il momento d'imbardata danno un contributo paragonabile
- 2) Con le barriere vicino la torre, l'effetto aerodinamico dominante è la forza laterale

5.2) DEFINIZIONE DELLE "CRITICAL WIND CURVES" (CWC)

Per valutare l'effetto schermante delle barriere utilizzate, sono state calcolate le CWC per le diverse configurazioni. Tali curve sono state ottenute effettuando simulazioni con velocità del camion costante e velocità del vento che aumenta gradualmente fino ad arrivare alla condizione di ribaltamento. La velocità del vento, per le prove con il passaggio dietro la torre, aumenta discretamente con un passo di 2m/s mentre, per quanto riguarda le simulazioni relative al vento libero, aumenta in maniera continua perché il profilo di vento applicato è rappresentato da una rampa (vedi Figura 67).

Nel grafico si distinguono le prove fatte a veicolo scarico, caratterizzate da velocità più basse, e a veicolo carico, con velocità di ribaltamento più alte. Per valutare l'influenza del pilota sulla stabilità del veicolo, vengono mostrati gli andamenti ottenuti con il pilota normale, il pilota con risposta più lenta del 50% e quello con risposta più lenta del 100%.

5.2.1) EFFETTO DEL CARICO E DELLE BARRIERE

Per analizzare l'effetto del carico e delle barriere sulle CWC, vengono proposte le curve ottenute con il pilota nominale.

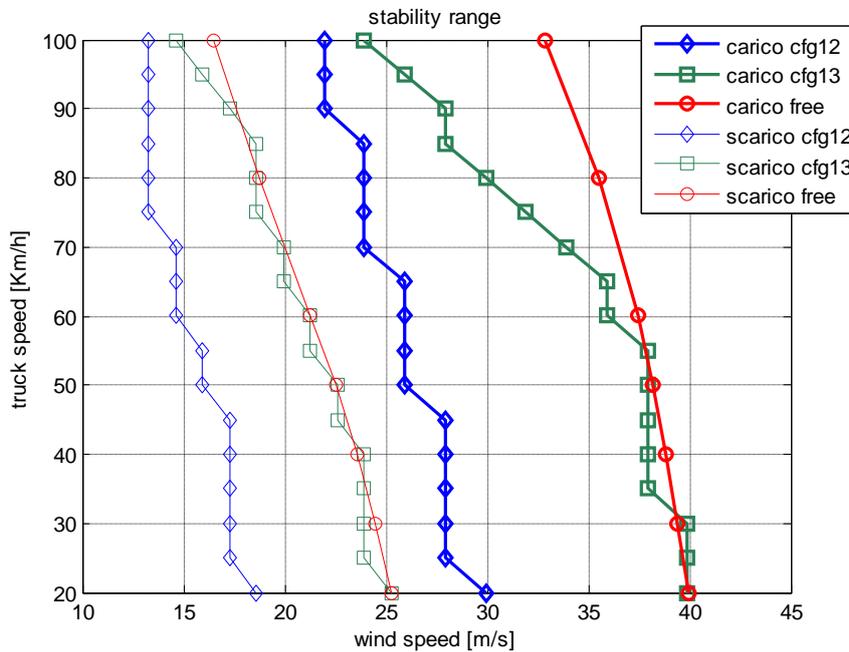


Figura 67 stabilità del veicolo al variare delle condizioni di prova – pilota normale

Il grafico mostra chiaramente come l'introduzione delle barriere vicino la torre migliori le condizioni di stabilità rispetto la configurazione senza barriere. Ad alte velocità la differenza tra la configurazione 12 e 13 tende a diminuire. Le barriere vicino la torre, a basse velocità, riescono a compensare gli effetti aerodinamici introdotti dalla torre: lo si vede in maniera evidente perché, nel caso di veicolo scarico, la curva relativa alla configurazione 13 e quella al caso di vento libero coincidono fino alla velocità di 90 Km/h. Per quanto riguarda il caso di veicolo carico, le due curve coincidono fino a 60 - 65 Km/h. Ad alte velocità, la barriera non riesce più a compensare gli effetti introdotti dalla torre e peggiorano le condizioni di stabilità rispetto il caso di vento libero.

Questo fenomeno può essere spiegato osservando il punto di ribaltamento del veicolo rispetto la torre, per le due configurazioni. I grafici mostrano il punto di ribaltamento rispetto la torre, per le condizioni riportate sulle CWC. Sulle ordinate è rappresentata la velocità del veicolo considerata, mentre i diversi colori rappresentano per quale valore di velocità del vento avviene il ribaltamento. Inoltre, attraverso marker differenti, viene mostrata la differenza tra veicolo carico e scarico.

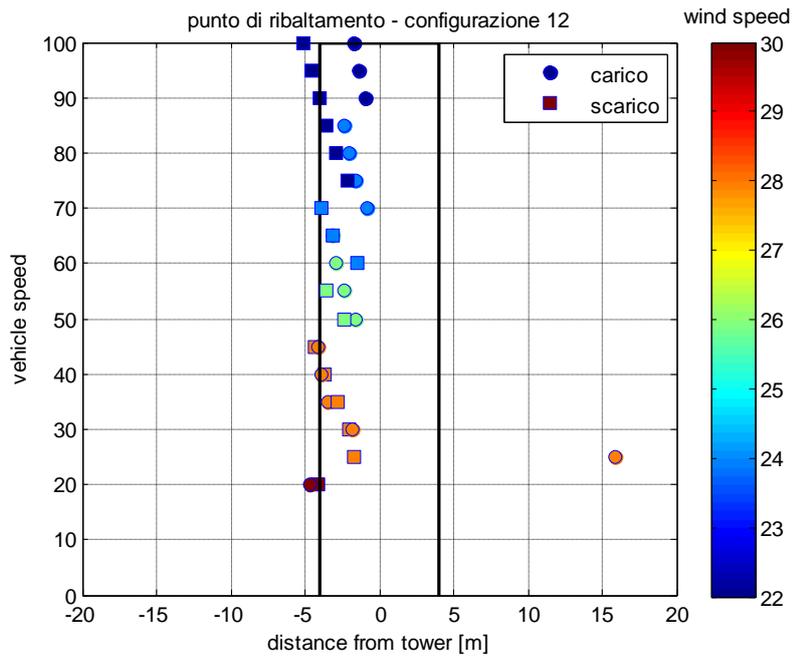


Figura 68 punto di ribaltamento - cfg 12

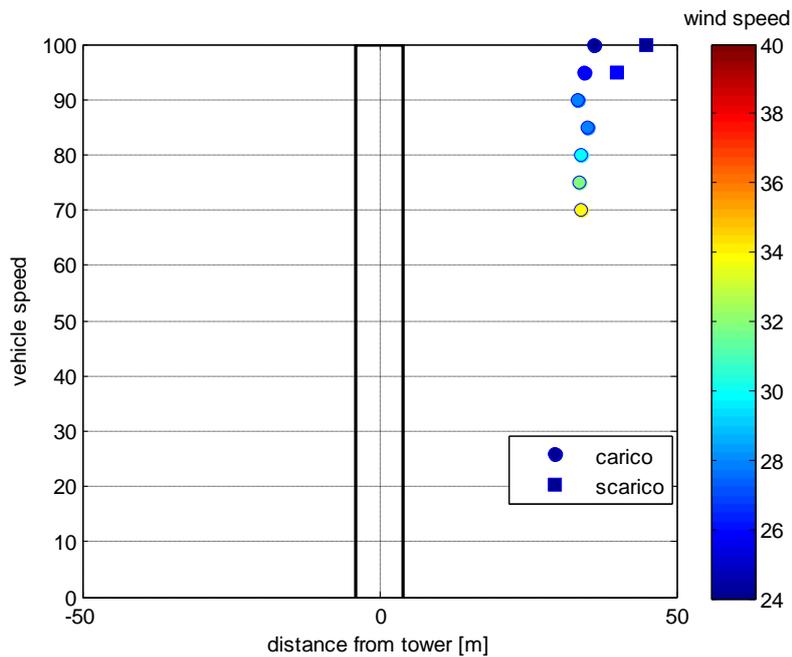


Figura 69 punto di ribaltamento - cfg 13

- Nella configurazione senza barriere, il ribaltamento avviene all'ingresso della torre, non appena il veicolo è stato investito dal primo speed – up; questo fenomeno si riscontra per tutte le velocità del veicolo. L'instabilità in questo caso è di tipo statico. Dalla figura è evidente come il veicolo scarico si ribalti prima del veicolo carico, proprio perché la causa del ribaltamento è la forza aerodinamica laterale e il veicolo scarico, avendo una massa inferiore, oppone meno resistenza. La presenza dello

speed – up, causa il ribaltamento senza permettere al pilota di intervenire. Osservando le dimensioni della raffica in ingresso dietro la torre, si osserva che riesce a coprire quasi tutta la superficie laterale del camion.

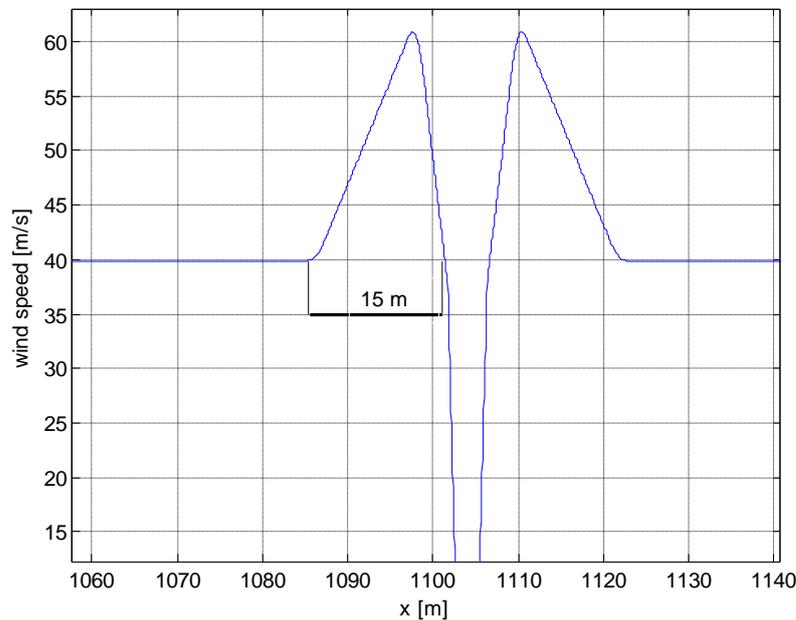


Figura 70 speed - up configurazione 12

- Nella configurazione con barriere, invece, osserviamo che il camion si ribalta vicino la torre solo dopo una certa velocità del veicolo. Nel caso di veicolo carico per velocità inferiori ai 70 Km/h, mentre nel caso di veicolo scarico per velocità inferiori ai 95 Km/h, il veicolo si ribalta lontano dalla torre, quando il profilo di velocità del vento è costante. Questo significa che, entro queste velocità, le barriere riescono ad annullare l'effetto della torre. Osservando la figura 74, relativa alle condizioni di stabilità, si vede che, fino a queste velocità limite, la curva della configurazione 13 coincide con quella della configurazione con vento libero. Una volta superate queste velocità, gli effetti aerodinamici introdotti dalla torre acquistano importanza e il veicolo si ribalta in prossimità della torre, a velocità più basse rispetto il caso di vento libero. Rispetto la configurazione 12, il ribaltamento non avviene in ingresso o dietro la torre, ma diversi metri dopo la torre. Il motivo di questo fenomeno va ricercato nelle cause che portano il veicolo al ribaltamento: questa volta il veicolo non si ribalta a causa delle forze aerodinamiche introdotte dalla variazione del profilo di velocità del vento, bensì per la perdita di controllo del veicolo da parte del pilota. Il passaggio dietro la torre obbliga il pilota ad intervenire bruscamente sullo sterzo per mantenere la traiettoria rettilinea. I trasferimenti di carico non sono dovuti alle forzanti esterne, ma al comportamento dinamico del veicolo e alla risposta del pilota. Un'ulteriore conferma di quanto appena detto deriva dal fatto che il veicolo scarico è caratterizzato da una velocità limite più alta e, anche per velocità superiori di quella limite, il veicolo scarico si ribalta più lontano dalla torre rispetto il veicolo carico. Questo perché il veicolo scarico ha un'inerzia inferiore e il pilota deve gestire forze inerziali minori.

5.2.2) EFFETTO DEL PILOTA

Per le diverse configurazioni e condizioni di carico, sono state ricavate le CWC per valutare l'effetto del pilota sulla stabilità del veicolo.

- CONFIGURAZIONE 12

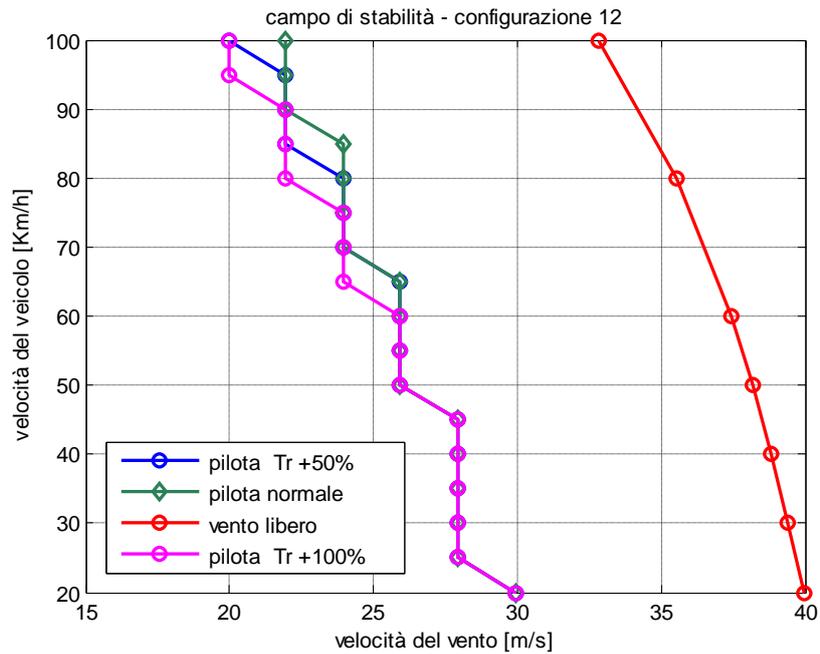


Figura 71 CWC configurazione 12 - veicolo carico

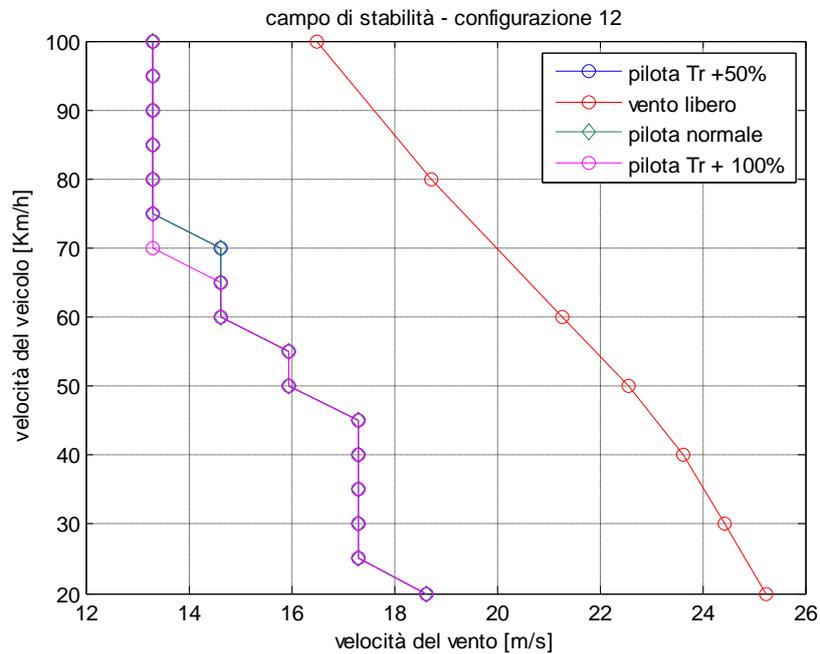


Figura 72 CWC configurazione 12 - veicolo scarico

Per alte velocità del veicolo, si nota che la velocità limite del vento diminuisce al diminuire delle prestazioni del pilota; tuttavia si nota come la diversa tipologia di pilota non modifichi in maniera decisiva il comportamento del veicolo, in nessuno dei due casi. I grafici sono in accordo con le considerazioni fatte precedentemente: nella configurazione 12, il ribaltamento non avviene a causa dell'azione del pilota, ma per le forze aerodinamiche. Questo significa che la condizione di ribaltamento non è influenzata in maniera

decisiva dalla risposta del pilota. E' corretto, quindi, osservare che le CWC varino pochino al variare delle prestazioni del pilota.

- CONFIGURAZIONE 13

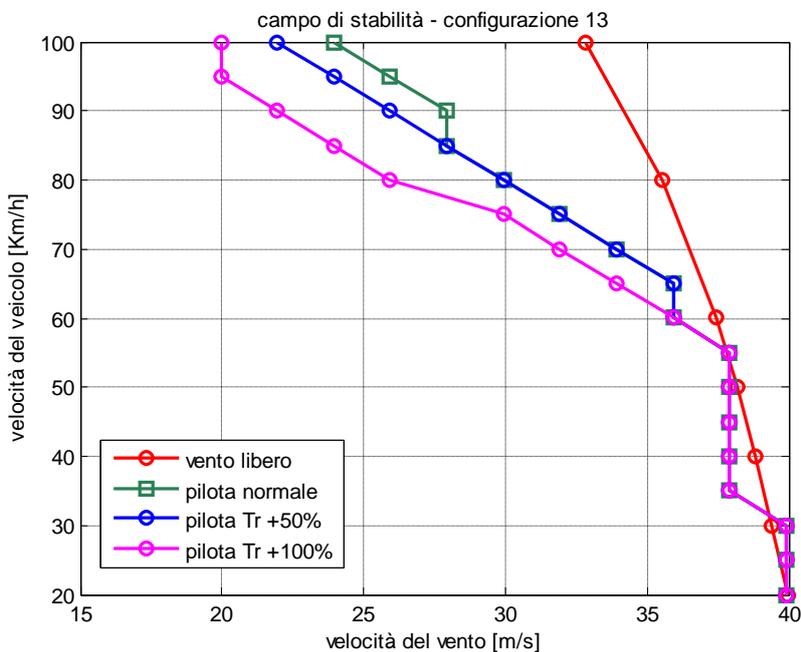


Figura 73 CWC configurazione 13 - veicolo carico

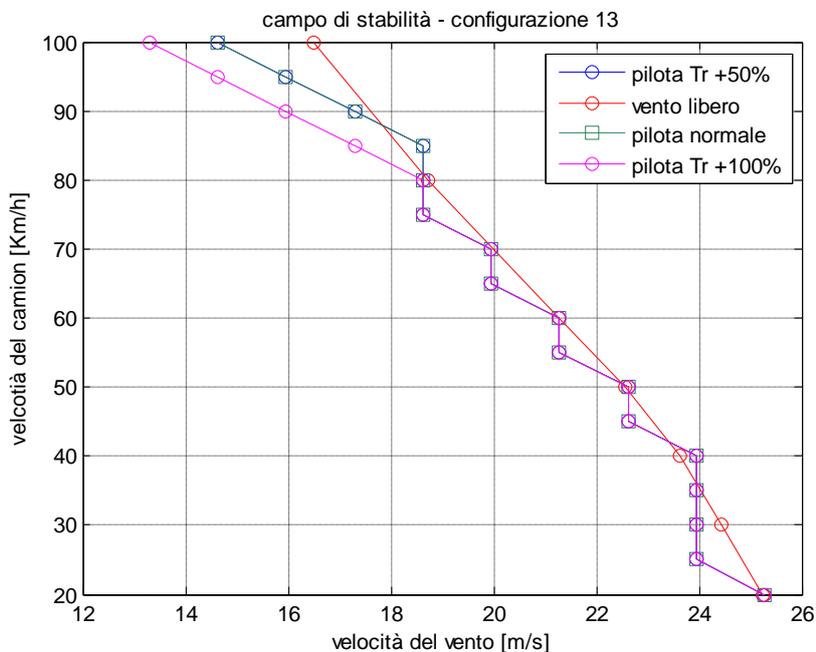


Figura 74 CWC configurazione 13 - veicolo scarico

Per il caso di manovre con barriere, lo scenario è completamente diverso. Innanzitutto va osservato che, per entrambe le condizioni di carico, la velocità del veicolo limite, sotto la quale la barriera compensa l'effetto della torre, non viene modificata. Una volta superata tale velocità, l'effetto del pilota diventa evidente. Per

quanto riguarda il caso di veicolo scarico, le differenze non sono molto evidenti perché la velocità del veicolo limite è molto alta; nel caso di veicolo carico, invece, le differenze diventano importanti. Il pilota con un tempo di reazione maggiore del 50%, si comporta come il pilota normale fino alla velocità del veicolo di 85 Km/h; il pilota con tempo di reazione più alto del 100%, si comporta in maniera peggiore già a 65 Km/h. Anche in questo caso, i grafici confermano quanto ipotizzato nei paragrafi precedenti: nel caso di barriere vicino la torre, il ribaltamento è legato alla dinamica del sistema veicolo – pilota. Quest’ultimo quindi, influenza, in maniera diretta, le condizioni di stabilità del sistema. All’aumentare della velocità del camion, la dinamica del veicolo diventa più veloce di quella del pilota che, quindi, non è più in grado di controllare il veicolo.

Per analizzare il comportamento del sistema veicolo – pilota durante l’attraversamento della torre, vengono proposti gli andamenti dell’angolo della traiettoria e dell’angolo di sterzo per la simulazione con velocità del veicolo pari a 65 Km/h, velocità del vento di 34 m/s, con veicolo carico; vengono confrontati gli andamenti per i 3 diversi piloti:

la seguente configurazione rappresenta una condizione di incipiente ribaltamento per il pilota normale e quello con tempo di reazione maggiore del 50% mentre si osserva come il pilota con tempo di reazione maggiore del 100% arrivi già al ribaltamento. Osservando l’ingrandimento della fase iniziale in cui inizia la sterzata, si nota come il pilota più lento abbia un ritardo di circa 2 metri. A causa di questo ritardo, il pilota subirà uno spostamento laterale maggiore e dovrà applicare un angolo di sterzo maggiore, arrivando alla condizione di ribaltamento. Si osserva che il pilota cerca di controsterzare, ma il veicolo continua a spostarsi lateralmente fino ad arrivare al ribaltamento.

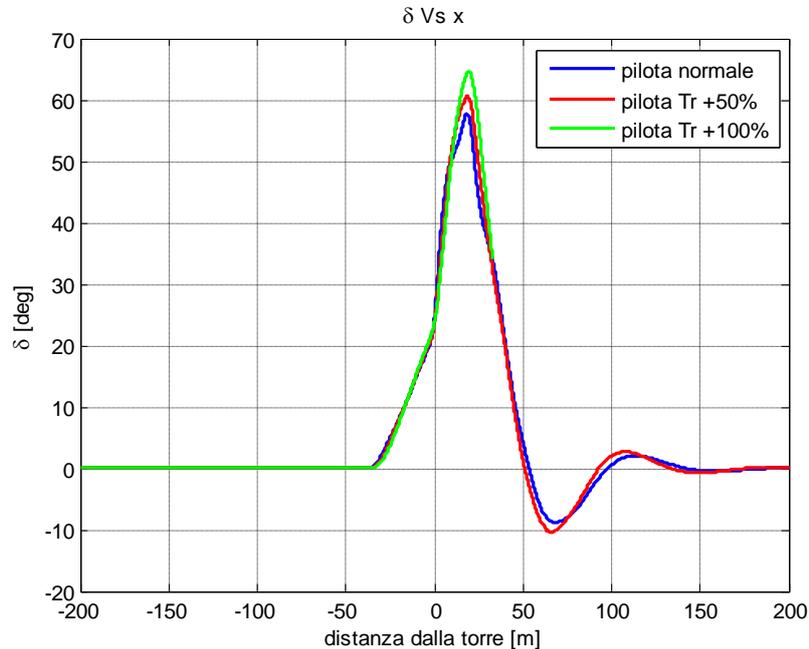


Figura 75 δ Vs distanza dalla torre al variare del pilota

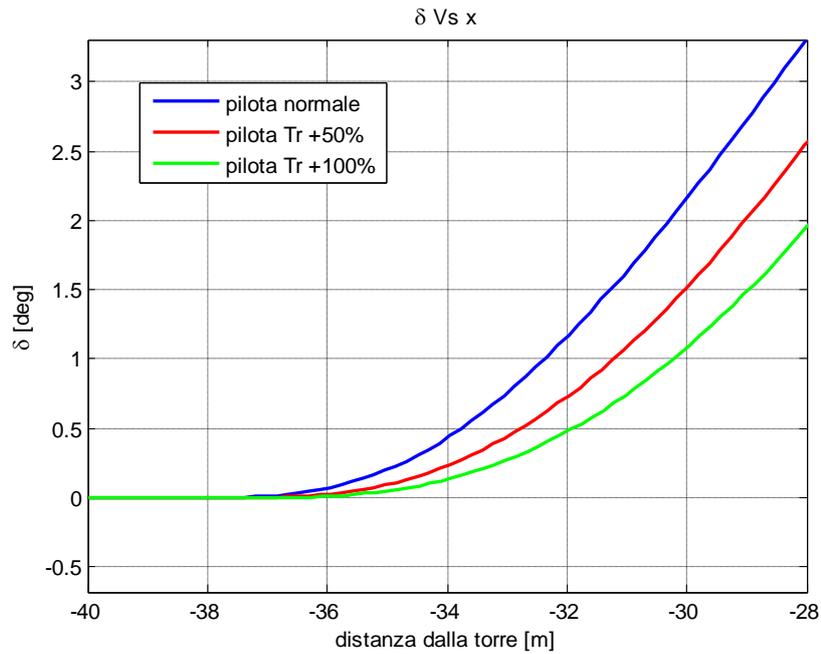


Figura 76 δ Vs distanza dalla torre al variare del pilota - zoom

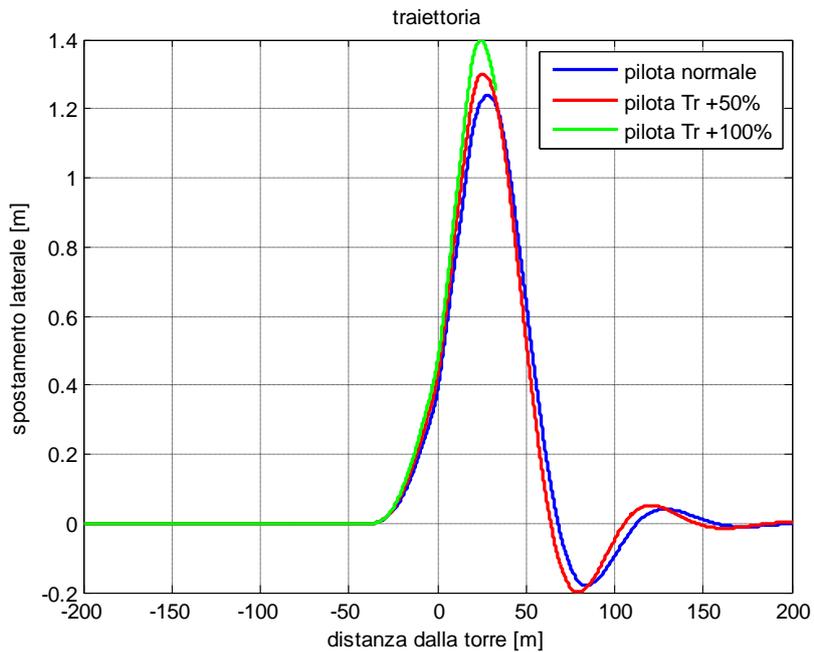


Figura 77 traiettoria al variare del pilota

5.3) INDICI SINTETICI

Per valutare le prestazioni della barriera risulta scomoda, tuttavia, l'analisi delle caratteristiche dinamiche del veicolo. Per questo motivo si è scelto di utilizzare indici sintetici che, in maniera più semplice, possano descrivere le prestazioni della barriera e del veicolo. Gli indici esprimono un fattore di rischio relativo al ribaltamento e all'invasione di corsia. In letteratura sono stati proposti alcuni indici sintetici: in maniera

particolare Soon-Duck Kwon [12], propone il seguente indice per il rischio di invasione della corsia adiacente:

$$CF = \sqrt{\frac{1}{1 - (2y_{t=0.8}/y_{allow})}} - 1$$

In cui:

- $y_{t=0.8}$ è lo spostamento laterale dopo un tempo di 0.8 secondi da quando il veicolo è investito dal vento
- y_{allow} è lo spostamento laterale massimo

Tale indice risulta di difficile lettura in quanto vale 0 nelle condizioni nominali ed vale infinito nelle condizioni di instabilità. Ciò significa che è molto difficile stabilire le condizioni di incipiente ribaltamento perché è impossibile rapportare il valore del coefficiente con quello massimo che si ha in caso di instabilità. Inoltre non esiste un indice per valutare il rischio di ribaltamento del veicolo.

Per questo motivo sono stati proposti due nuovi indici che possano sintetizzare meglio le condizioni di sicurezza del veicolo:

$$NLT = \frac{N_0 - \min(N)}{N_0}$$

$$IY = \frac{\max(Y) - Y_0}{Y_{allow}}$$

Il primo indice (NLT) rappresenta il rischio di ribaltamento:

- N_0 rappresenta il carico nominale per ciascuno pneumatico
- $\min(N)$ rappresenta il carico più basso che si raggiunge su uno degli pneumatici. In caso di distacco dal terreno il carico sullo pneumatico diventa nullo e il coefficiente NLT diventa pari a 1. Questa è la condizione di ribaltamento

Il secondo indice (IY) rappresenta il rischio di invasione dell'altra corsia:

- Y_0 rappresenta il valore di spostamento laterale a regime, una volta superata la rampa iniziale di applicazione del vento. Va ricordato che il modello del pilota per l'inseguimento della traiettoria è del tipo proporzionale – derivativo. Ciò significa che a regime, è sempre presente un certo errore rispetto la traiettoria di riferimento.
- $\max(Y)$ rappresenta lo spostamento laterale massimo che subisce il veicolo a causa delle forze aerodinamiche.
- Y_{allow} rappresenta il massimo spostamento laterale consentito al veicolo per non invadere l'altra corsia. Il codice della strada prevede che la larghezza della corsia sia di 3,6 metri; considerando che la carreggiata massima del veicolo è di 2,05 metri, lo spostamento laterale massimo del veicolo affinché non invada la corsia adiacente, è di 0,8 metri.

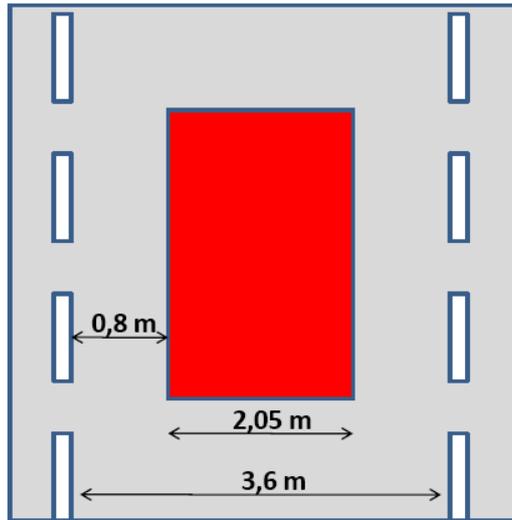


Figura 78 spostamento laterale massimo

Al fine del calcolo dell'indice di spostamento laterale, lo spostamento laterale massimo consentito è: $Y_{allow} = 1\text{ m}$ che corrisponde a tollerare un'invasione temporanea di corsia per un massimo di 0,2 m.

A titolo di esempio, vengono proposti gli andamenti spaziali dei due coefficienti, dove la posizione 0 corrisponde alla mezzeria della torre; la prova scelta è:

configurazione 13, veicolo carico, velocità del veicolo 50 K/h, velocità del vento 24 m/s

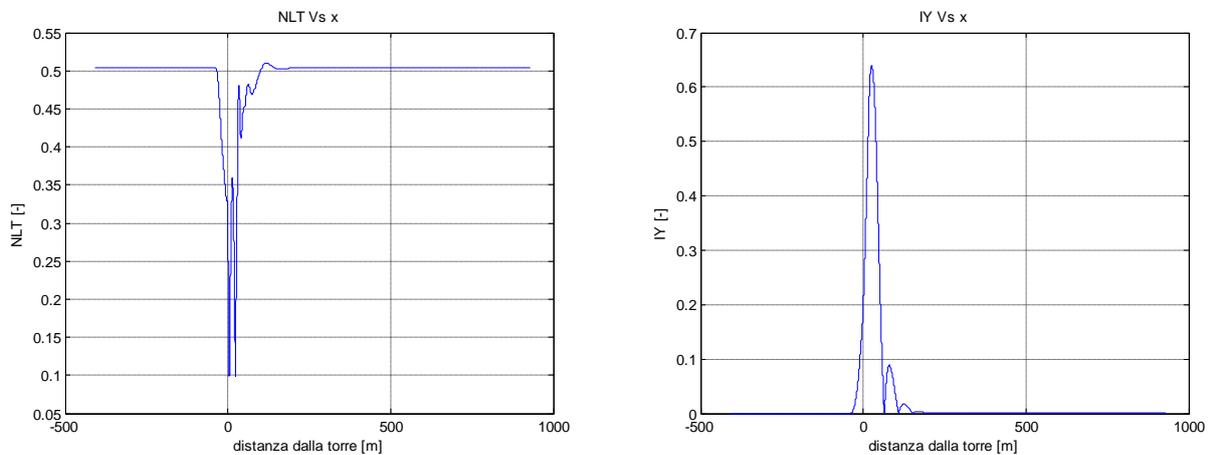


Figura 79 IY e NLT Vs distanza dalla torre

5.4) ANALISI DELLE CONFIGURAZIONI

Una volta osservato l'effetto delle barriere sulla stabilità del veicolo, è interessante vedere quali siano i fattori che determinano la stabilità del veicolo e in che maniera siano modificati dalla presenza delle barriere. Per questo motivo vengono analizzate, attraverso la risposta dinamica e gli indici sintetici le 4 configurazioni testate:

- Configurazione 12 – veicolo carico
- Configurazione 12 – veicolo scarico
- Configurazione 13 – veicolo carico
- Configurazione 13 – veicolo scarico

Per ciascuna configurazione, gli indici sintetici vengono presentati in 5 grafici:

NLT Vs IY; viene generato uno spazio 2-D, in cui per ogni prova, viene riportato il valore di entrambi gli indici. Ciascuna simulazione è identificata da un marker e un colore differente: la variazione della velocità del camion è rappresentata dalla variazione del colore del marker; è stata usata una colormap di tipo "jet" in cui il blu corrisponde alla velocità di 20 Km/h e il rosso a una velocità di 100 Km/h. Le diverse velocità del vento, invece, sono rappresentate con dei marker differenti. Le prove con lo stesso marker, ma con colore differente, rappresentano le simulazioni a velocità del vento costante facendo aumentare la velocità del camion; quelle con marker diversi, ma dello stesso colore, rappresentano le prove a velocità del camion costante al variare della velocità del vento. La figura riporta la legenda che verrà usata per la descrizione del grafico.

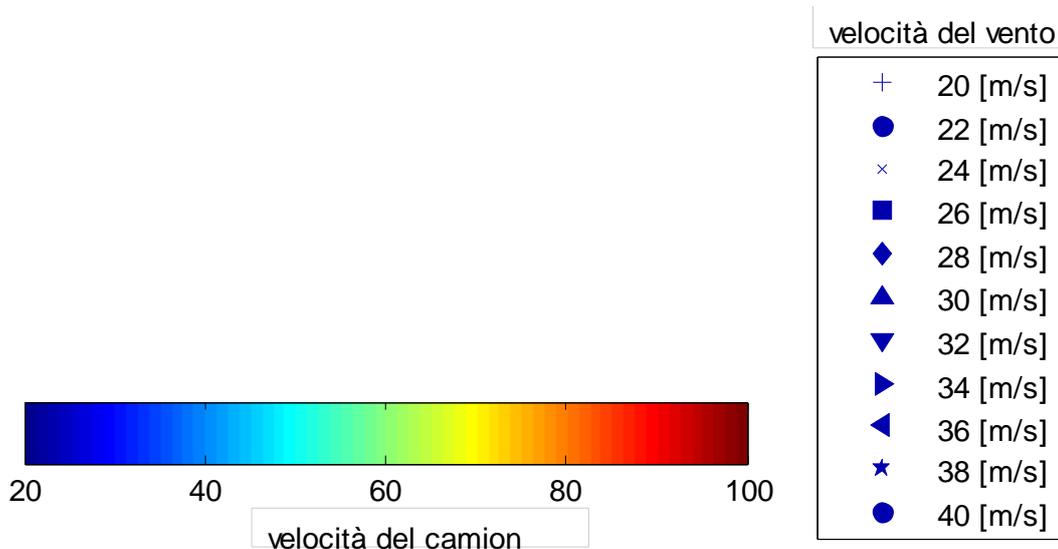


Figura 80 legenda per il grafico NLT Vs IY

- NLT Vs velocità del camion; viene mostrato l'andamento dell'indice relativo al ribaltamento al variare della velocità del camion, parametrizzando la velocità del vento.
- NLT Vs velocità del vento; viene mostrato l'andamento dell'indice relativo al ribaltamento al variare della velocità del vento, parametrizzando la velocità del camion.
- IY Vs velocità del camion; viene mostrato l'andamento dell'indice relativo all'invasione di corsia al variare della velocità del camion, parametrizzando la velocità del vento.
- IY Vs velocità del vento; viene mostrato l'andamento dell'indice relativo all'invasione di corsia al variare della velocità del vento, parametrizzando la velocità del camion.

5.4.1) CONFIGURAZIONE 12 – VEICOLO CARICO

- In figura viene riportato il grafico NLT Vs IY:

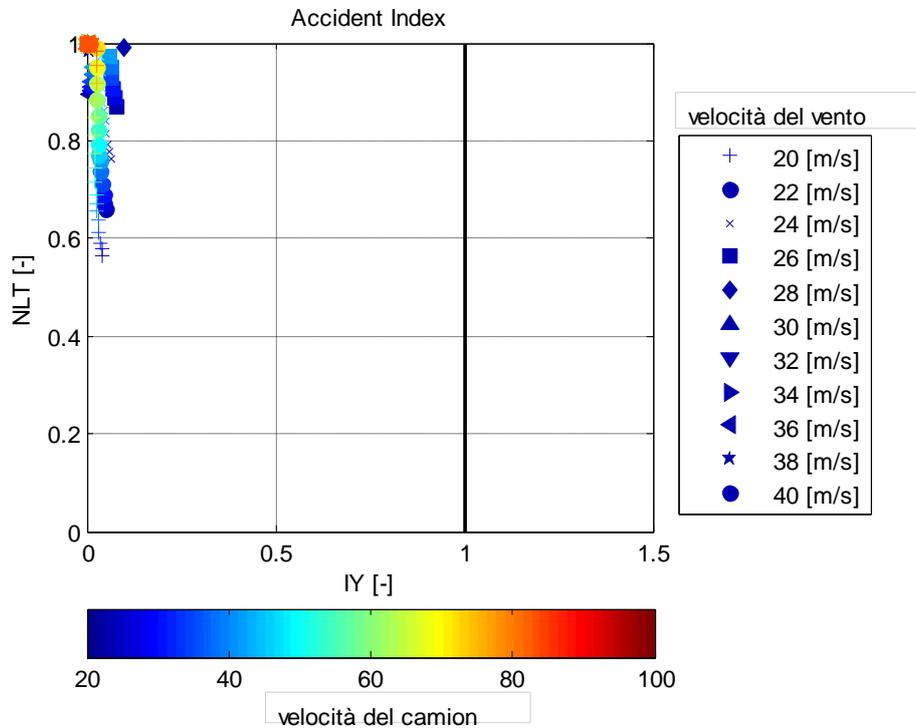


Figura 81 NLT Vs IY, configurazione 12, veicolo carico

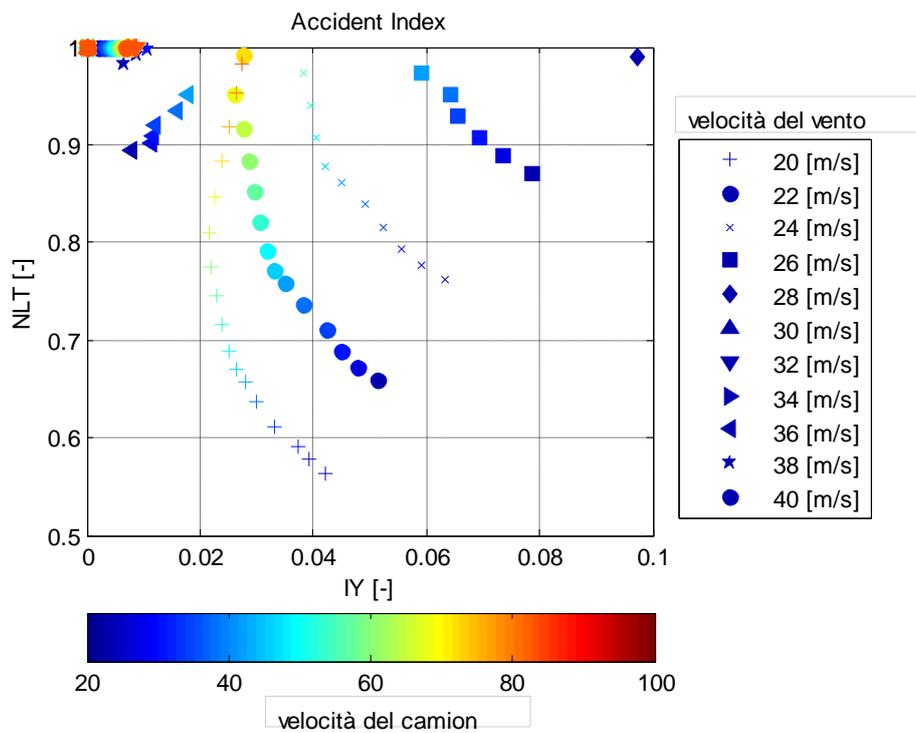


Figura 82 NLT Vs IY, configurazione 12, veicolo carico - zoom

La prima indicazione macroscopica che il grafico fornisce è che, in questa configurazione, il rischio principale è rappresentato dal ribaltamento e non dall'invasione di corsia. Andando a concentrarci solo nella zona del grafico di nostro interesse, possiamo osservare che all'aumentare della velocità del camion, il valore dell'indice NLT aumenta fino a raggiungere il valore unitario. Al variare della velocità del vento, il trend osservato resta qualitativamente lo stesso, con valori dei due indici più elevati, perché la velocità del vento fa variare quasi linearmente sia NLT che IY.

- IY Vs velocità del camion & velocità del vento:

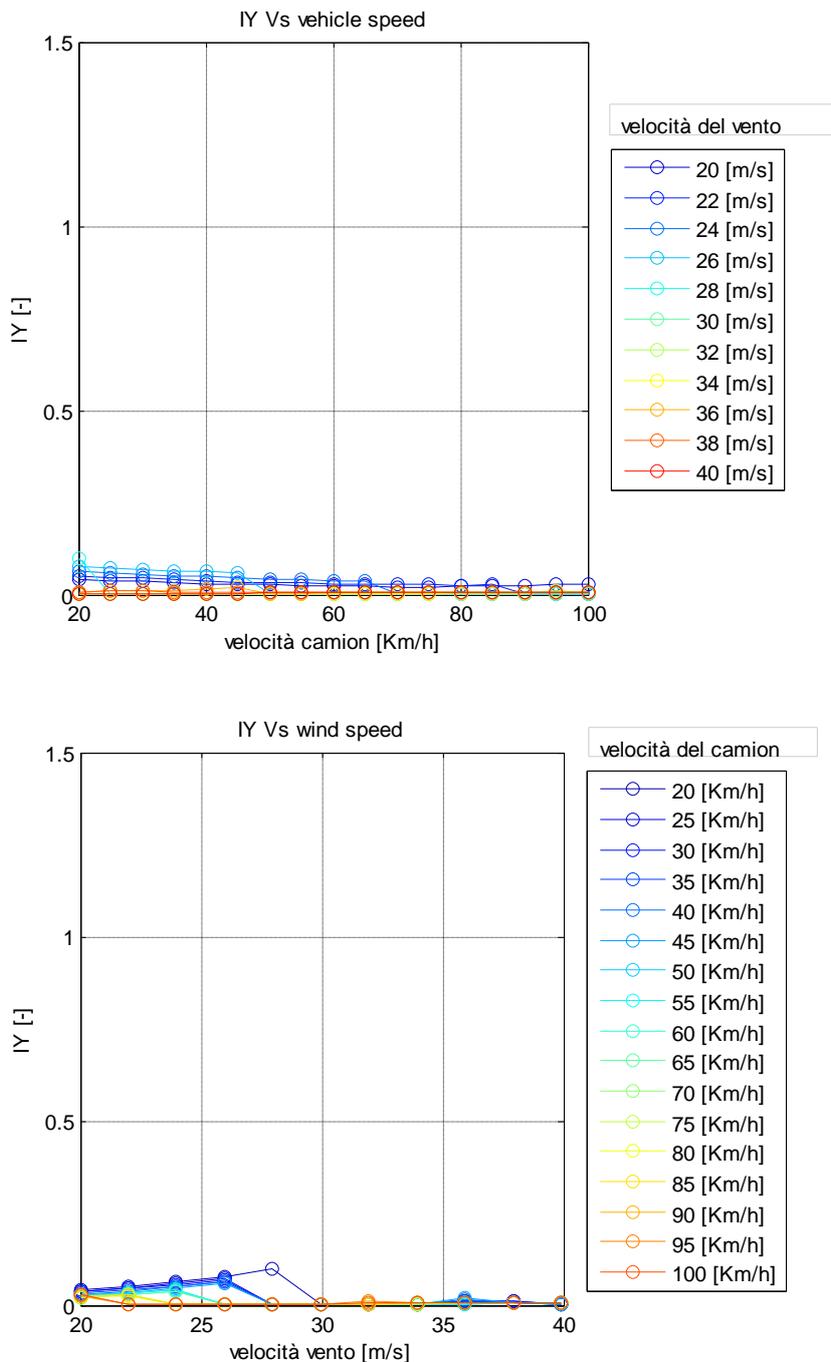


Figura 83 IY Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 12 - veicolo carico

Entrambi i grafici mostrano chiaramente quanta poca importanza abbia il rischio di spostamento laterale durante le prove senza barriere vicino la torre. L'andamento qualitativo che si può osservar è che

all'aumentare della velocità del camion, IY tende a diminuire; all'aumentare della velocità del vento, invece, lo spostamento laterale tende ad aumentare.

- NLT Vs velocità del camion & velocità del vento

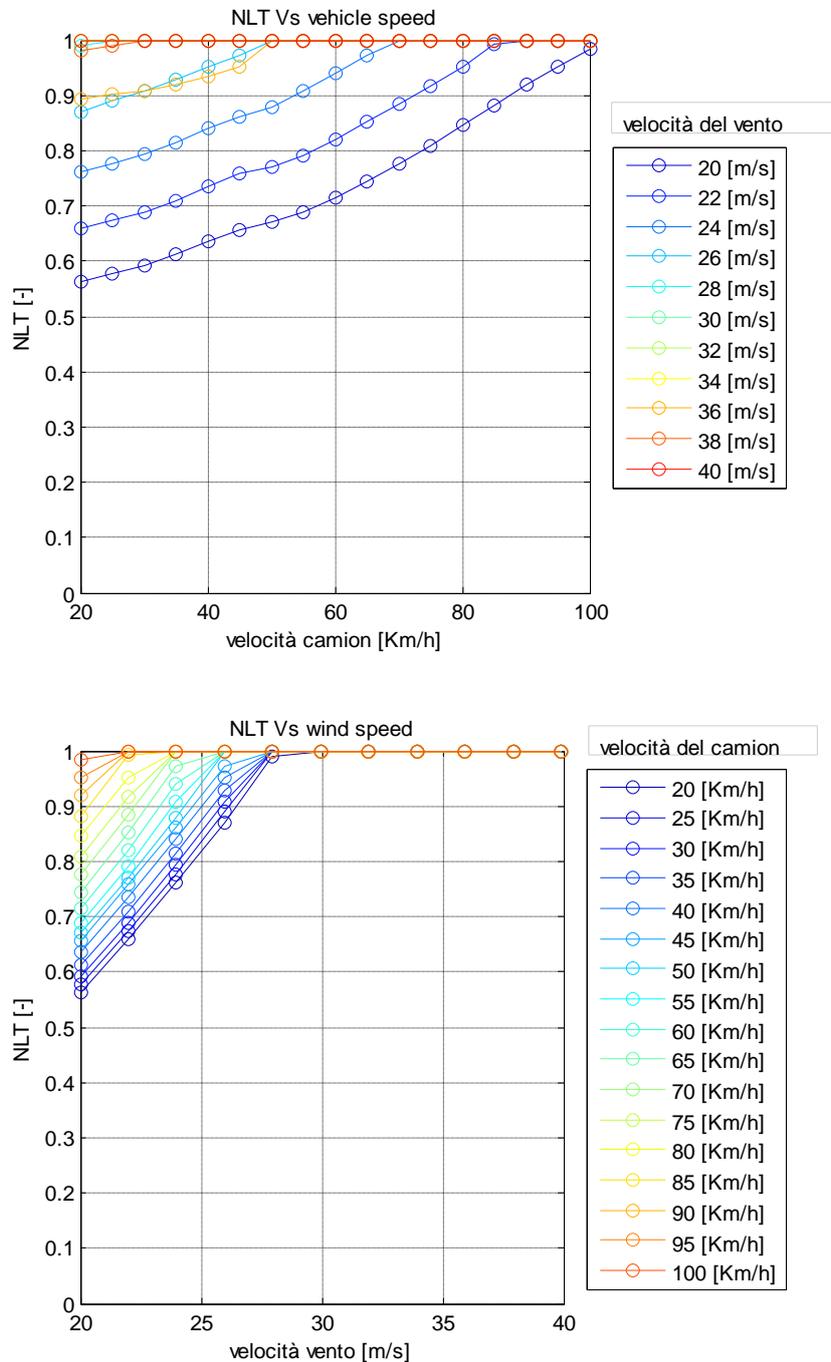


Figura 84 NLT Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 12 - veicolo carico

I grafici mostrano come, per basse velocità del vento, il veicolo riesce ad attraversare la torre senza ribaltarsi; all'aumentare della velocità del vento esiste una velocità limite del veicolo, oltre la quale avviene il ribaltamento. All'aumentare della velocità del vento, il veicolo arriva al ribaltamento, anche per basse velocità del veicolo.

Si può notare come l'indice di ribaltamento, aumenti in maniera lineare all'aumentare sia della velocità del camion, sia di quella del vento. Si vede, comunque, che l'indice vari più velocemente al variare della velocità del vento: NLT varia con una velocità di $0.018 [s/m]$ rispetto la velocità del veicolo mentre varia con una pendenza di $0.0563 [s/m]$. Come già accennato in precedenza è logico aspettarsi che il rischio di ribaltamento dipenda principalmente dalla velocità del vento: all'aumentare di quest'ultima, aumenta sia il valore di $|V_{rel}^2|$ che di CF_y , perché l'angolo d'attacco tende a diminuire; all'aumentare della velocità del veicolo, $|V_{rel}^2|$ aumenta ma il valore di CF_y diminuisce, compensando l'aumento della velocità relativa.

5.4.2) CONFIGURAZIONE 12 – VEICOLO SCARICO

- In figura viene riportato il grafico NLT Vs IY:

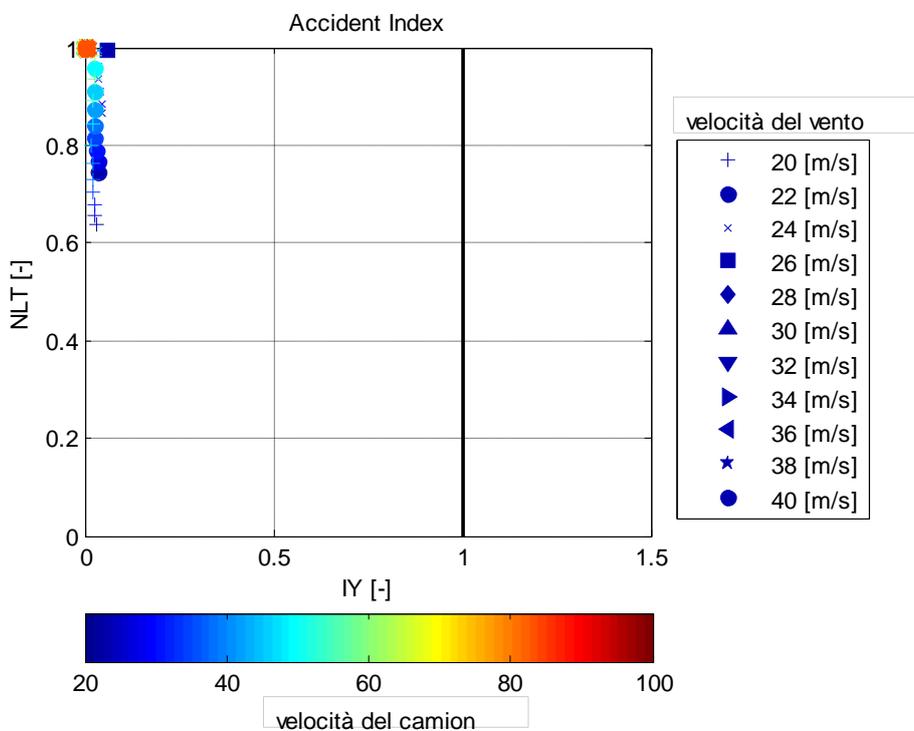


Figura 85 NLT Vs IY, configurazione 12, veicolo scarico

Il trend che si osserva è lo stesso del veicolo carico: spostamento laterale molto piccolo, che garantisce la mancanza di rischio di invasione di corsia ma elevato rischio di ribaltamento. La differenza con il veicolo carico è rappresentata dal fatto che l'instabilità si verifica a velocità più basse, sia del camion ma soprattutto del vento. Come detto in precedenza, infatti, diminuendo la massa del camion diminuisce il momento che si oppone al ribaltamento che avviene, quindi, per forze laterali più basse.

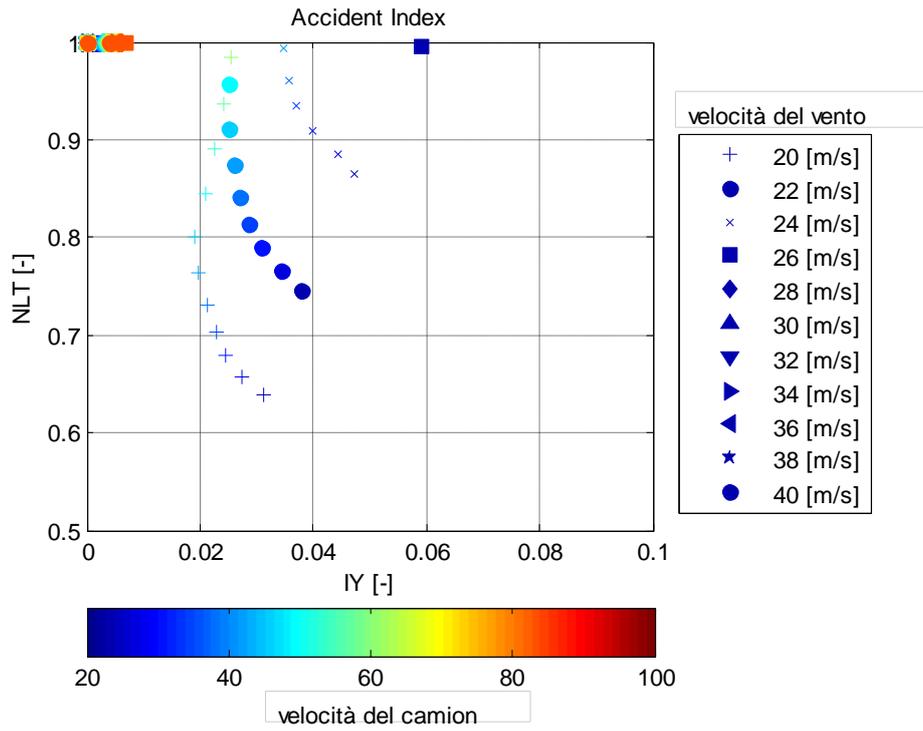
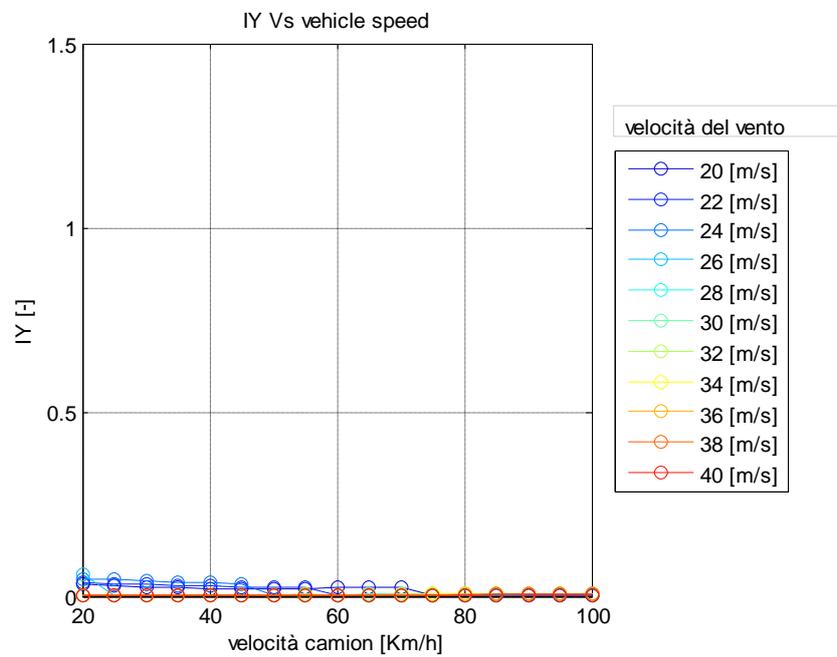


Figura 86 NLT Vs IY, configurazione 12, veicolo scarico – zoom

- IY Vs velocità del camion & velocità del vento:



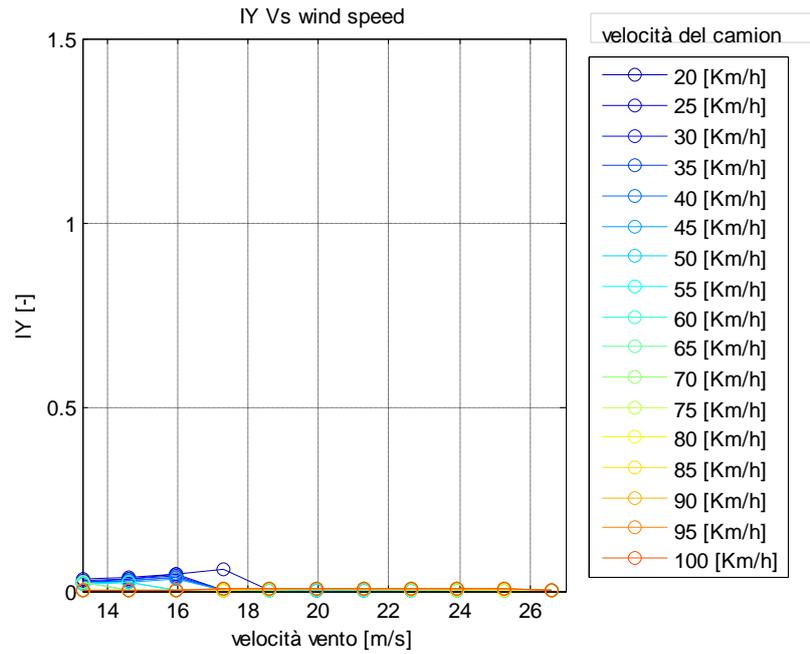
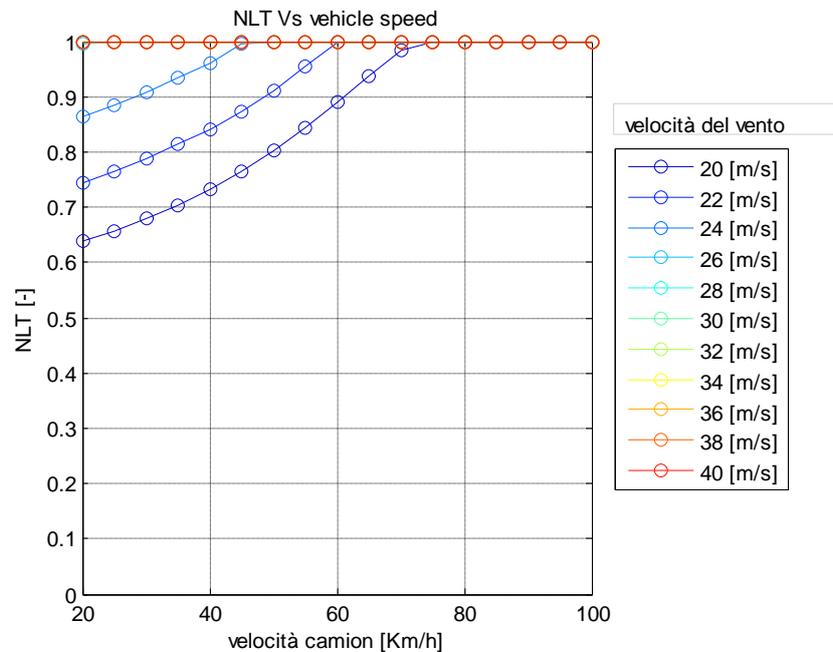


Figura 87 IY Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 12 - veicolo scarico

Anche in questa configurazione l'andamento dell'indice di spostamento laterale è lo stesso del caso precedente. L'unica differenza con il caso di veicolo carico è rappresentata dalla valore più basso della velocità limite.

- NLT Vs velocità del camion & velocità del vento



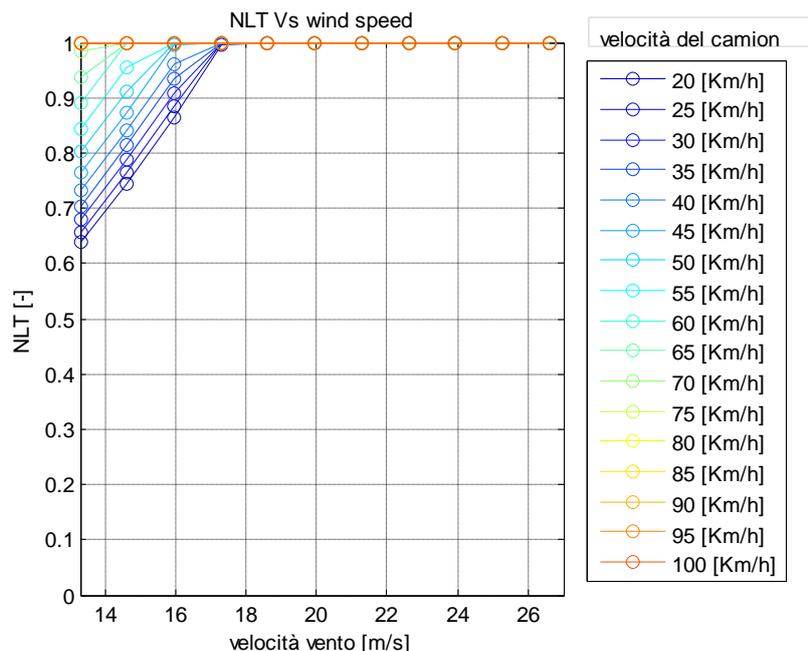


Figura 88 NLT Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 12 - veicolo scarico

Anche in questo caso non si notano differenze qualitative rispetto il caso di veicolo carico: il coefficiente NLT aumenta sia all'aumentare della velocità del camion che di quella del vento. Come nel caso precedente aumenta, però più velocemente con la velocità del vento. La pendenza dell'indice NLT rispetto la velocità del camion non cambia, è sempre di $0.018 [s/m]$; la pendenza di NLT con la velocità del vento, però, aumenta fino a $0.0875 [s/m]$: l'aumento di pendenza è dovuto alla minor resistenza del veicolo scarico. In questa configurazione, infatti, le velocità limite sono più basse del caso con veicolo carico.

5.4.3) CONFIGURAZIONE 13 – VEICOLO CARICO

- NLT Vs IY:

Si nota immediatamente che l'introduzione delle barriere sposta l'attenzione sul rischio di invasione di corsia. Il motivo, come detto nei paragrafi precedenti, è legato alla mancanza dello speed – up nel profilo del vento, che causa un'elevata forza laterale che porta il veicolo al ribaltamento. In questa configurazione l'instabilità è di tipo dinamico; il pilota prova ad intervenire ma il sistema diventa instabile arrivando al ribaltamento.

Nel grafico la variazione di colore rappresenta la variazione di velocità del camion, mentre i diversi marker rappresentano le differenti velocità del vento. Si nota che all'aumentare della velocità del vento, aumentano, in maniera pressoché lineare, sia IY che NLT, ma con pendenze diverse. All'aumentare della velocità del camion, invece, l'indice NLT aumenta mentre IY varia molto meno.

In figura è riportato il grafico NLT Vs IY:

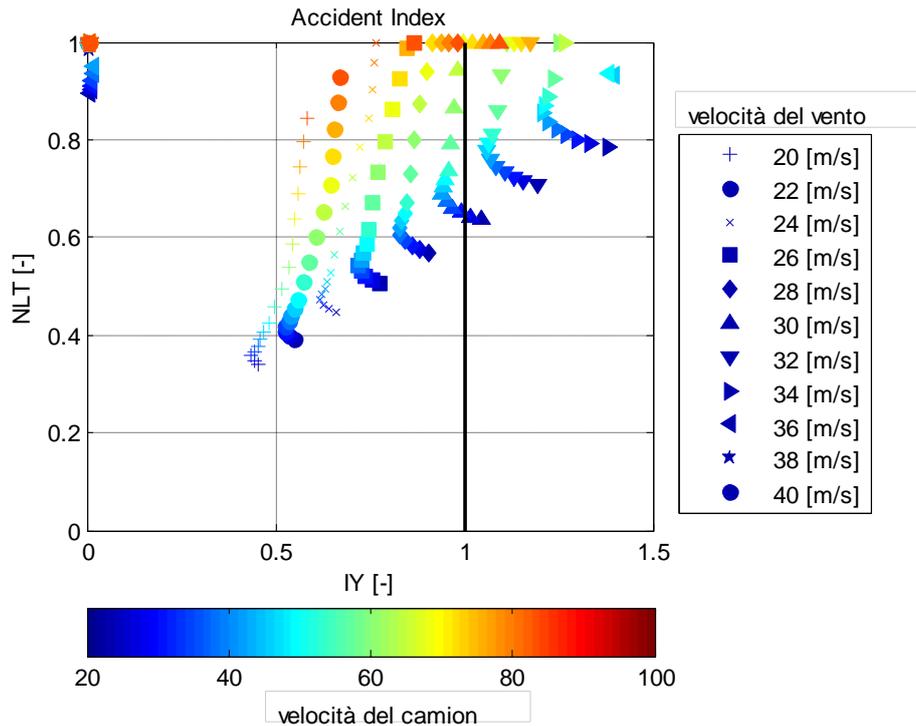


Figura 89 NLT Vs IY, configurazione 13, veicolo carico

Si può osservare l'esistenza di un tipo di instabilità che nella configurazione 12 non era presente: per velocità del vento superiori ai 30 m/s, il veicolo invade l'altra corsia, ma il pilota riesce ad evitare il ribaltamento. Per analizzare il fenomeno e capire quali siano i fattori che determinano il tipo di instabilità, è utile osservare la risposta dinamica, sia nel caso in cui il veicolo invada l'altra corsia, sia nel caso in cui si ribalti. Si nota che per una velocità del vento di 30 m/s, il veicolo invade l'altra corsia se la sua velocità è inferiore ai 30 Km/h; se la velocità supera i 80 Km/h, il veicolo si ribalta. I grafici riportano la traiettoria, l'angolo di sterzo e l'accelerazione laterale, del veicolo a 20 e a 80 Km/h, ad una velocità del vento pari a 30 m/s. Osservando la traiettoria e l'angolo di sterzo, il veicolo esegue una manovra molto simile al cambio di corsia. Le manovre sono eseguite dallo stesso pilota che però, a velocità maggiore, è costretto a sterzare di più. Considerando il caso a velocità maggiore, si osserva che il pilota cerca di mantenere il veicolo in traiettoria, provando a controsterzare una volta uscito dalla scia della torre; il veicolo tuttavia continua a spostarsi lateralmente e raggiunge il ribaltamento per lo spostamento laterale e l'accelerazione laterale massima.

La differenza principale tra i due casi sta nel trasferimento di carico; se osserviamo infatti l'angolo di sterzo e la traiettoria, le due condizioni si somigliano: nel caso a 20 Km/h, il veicolo per un istante invade l'altra corsia ma il pilota è in grado di richiamare il veicolo, tornando sulla propria corsia e evitando il ribaltamento. Nel caso di veicolo a 80 Km/h, le accelerazioni laterali sono decisamente più alte. Questo comporta un maggior trasferimento di carico dovuto alla dinamica del sistema, fino ad arrivare al ribaltamento del veicolo.

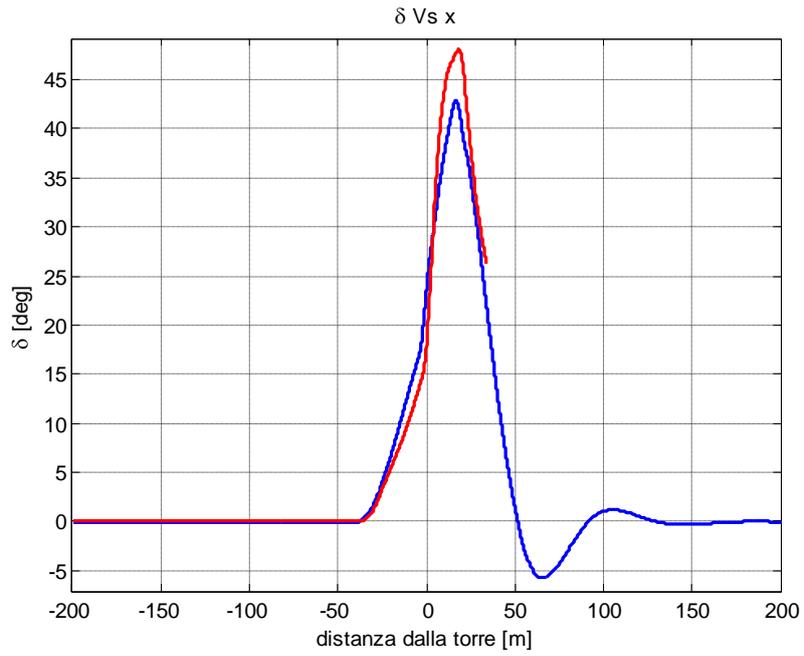


Figura 90 confronto angolo di sterzo 20 - 80 Km/h

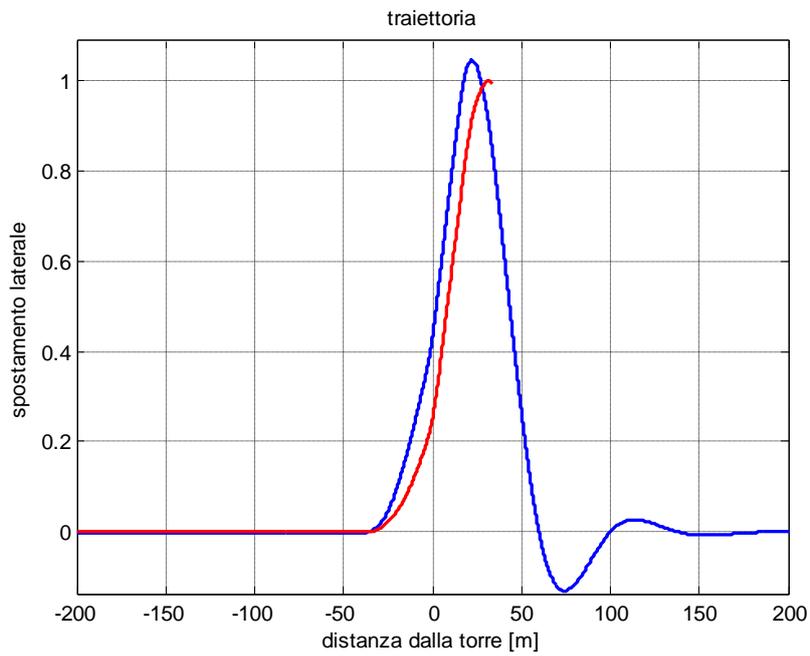


Figura 91 confronto traiettoria 20 - 80 Km/h

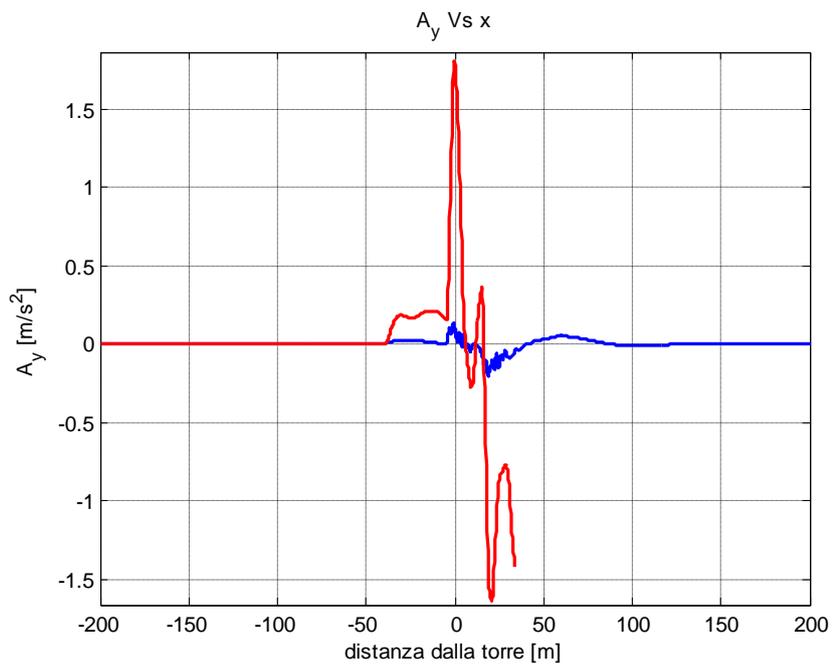


Figura 92 confronto accelerazione laterale 20 - 80 Km/h

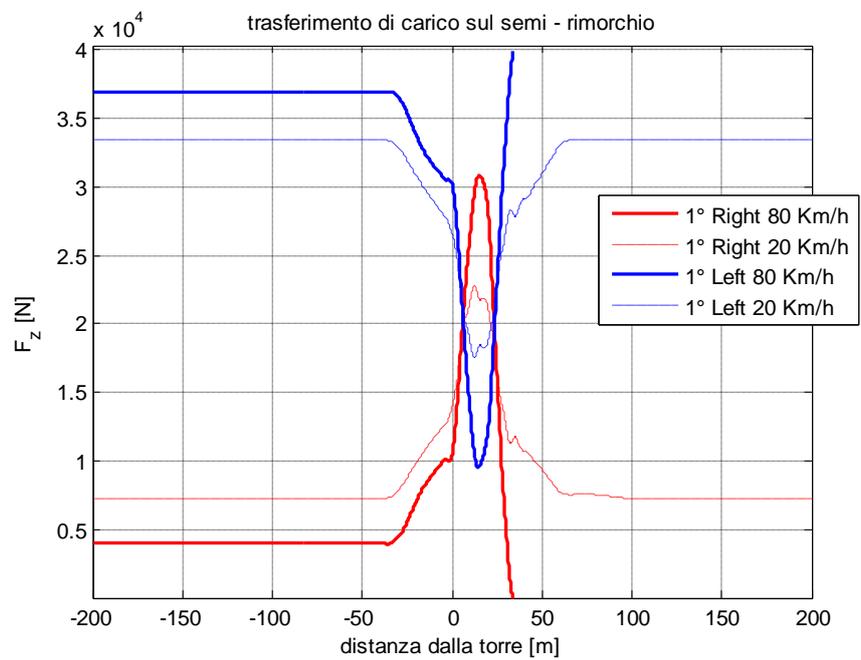


Figura 93 confronto trasferimento di carico 20 - 80 Km/h

Tornando al grafico NLT Vs IY, è interessante osservare che esiste una velocità del veicolo che minimizza lo spostamento laterale. Nella figura i pallini blu rappresentano le combinazioni di velocità del vento e del veicolo che minimizzano lo spostamento laterale.

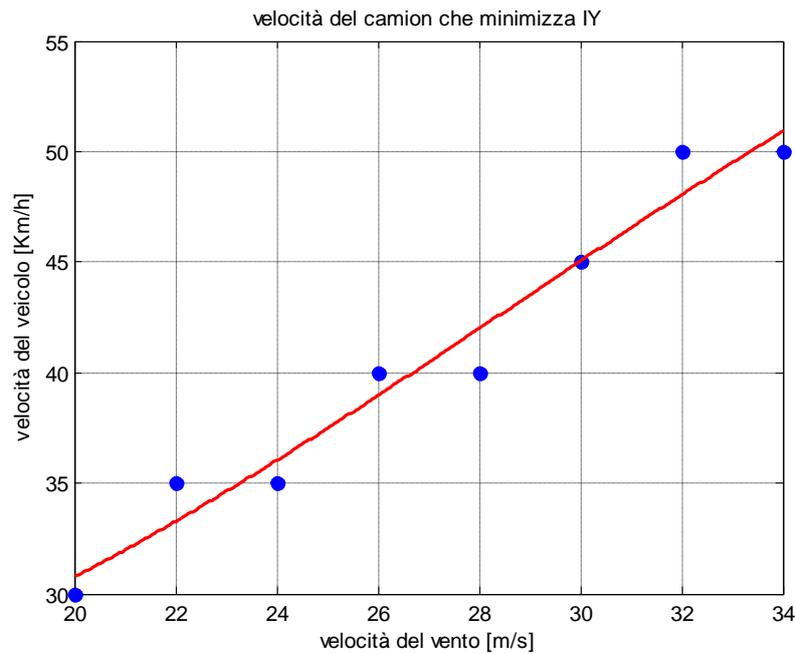


Figura 94 velocità del camion che minimizza lo spostamento laterale

L'andamento reale è rappresentato dalla curva rossa in figura. Tale curva è caratterizzata da un angolo d'attacco costante pari a: $\varphi = 68,35^\circ$

Il motivo di questo fenomeno è che esiste una velocità del veicolo, per ogni velocità del vento che minimizza il prodotto:

$$|V_{rel}^2| * CF_y(\alpha)$$

Il grafico mostra l'andamento di CF_y e di $|V_{rel}^2|$, su due scale differenti, al variare della velocità del veicolo, per una velocità del vento di 20 m/s. Si nota come all'aumentare della velocità del veicolo, $|V_{rel}^2|$ cresca mentre il coefficiente $CF_y(\alpha)$ diminuisca.

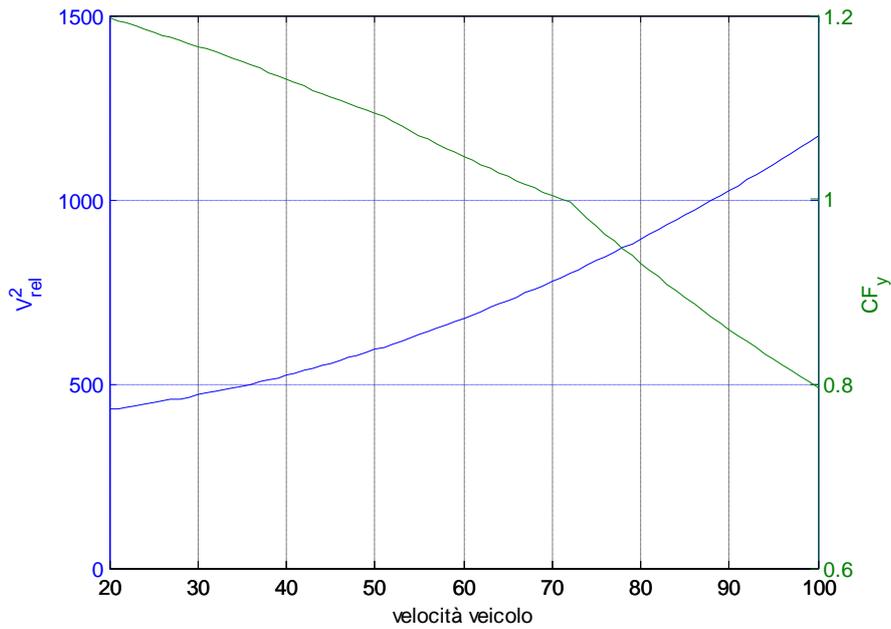


Figura 95 V^2_{rel} e CF_y Vs velocità del veicolo

In questa configurazione, si è vista l'importanza del pilota. Viene ora proposto il confronto, attraverso i grafici NLT Vs IY, tra il pilota normale e quello con un tempo di ritardo di reazione del 100%:

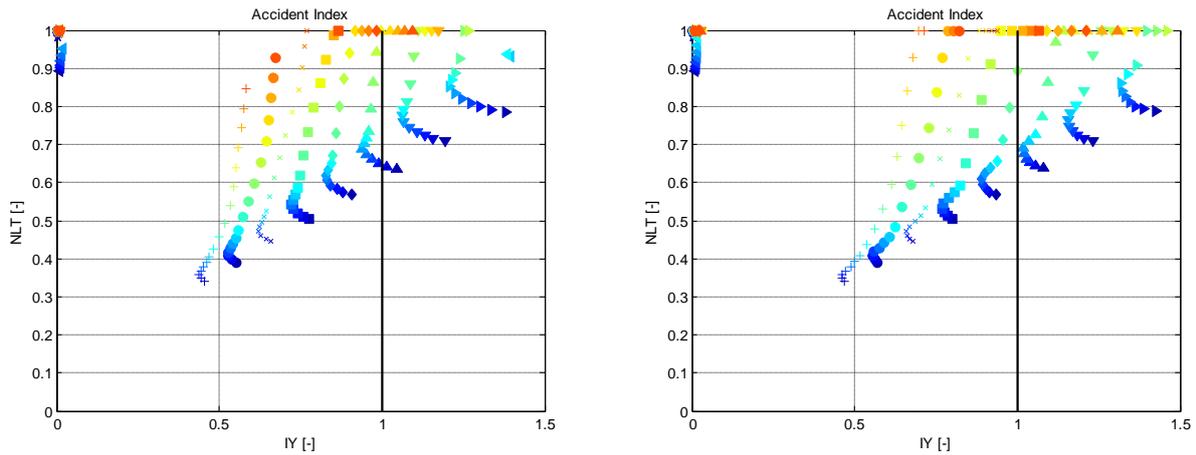


Figura 96 confronto NLT Vs IY al variare del pilota

Osservando i grafici si nota come, al peggiorare delle prestazioni del pilota, peggiorino anche le condizioni di stabilità del veicolo. Le differenze principali sono dovute al ribaltamento a bassa velocità del vento, che avviene a velocità del veicolo inferiori e, per quanto riguarda lo spostamento laterale, l'invasione dell'altra

corsia avviene dalla velocità del vento di 30 m/s, mentre il pilota normale riusciva a tenere il veicolo nella propria corsia fino a questa velocità del vento.

- IY Vs velocità del camion & velocità del vento:

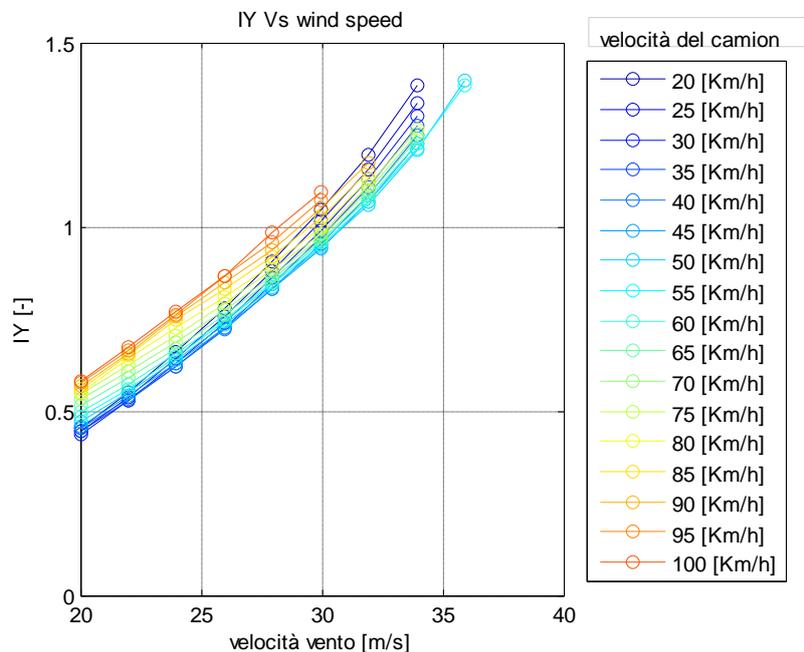
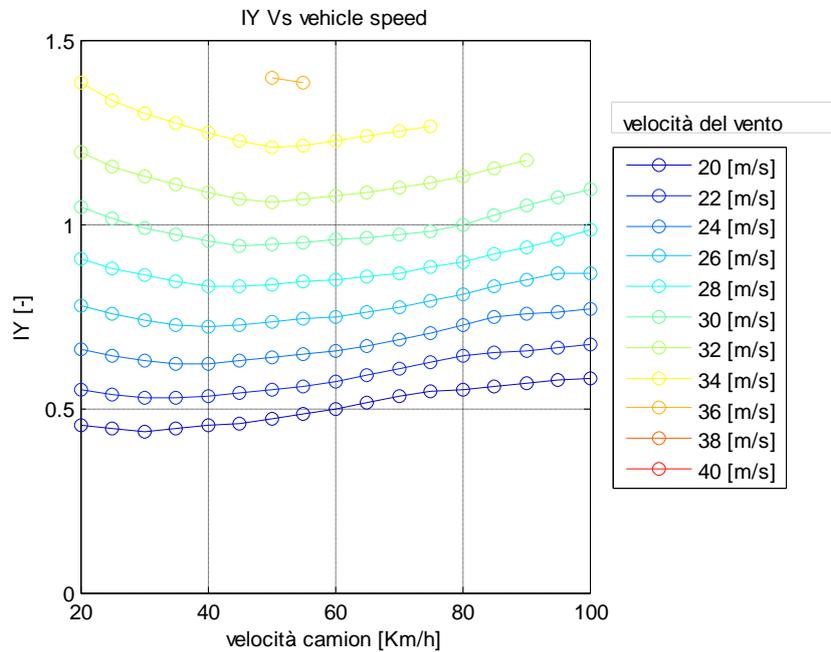


Figura 97 IY Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 13 - veicolo carico

I grafici mostrano che il rischio di spostamento laterale è poco sensibile alle variazioni della velocità del veicolo ma varia in maniera più che lineare con la velocità del vento. Ovviamente, oltre un certo valore, sia

della velocità del camion che del vento, il veicolo si ribalta. Si noti come il coefficiente IY sia praticamente insensibile alla variazione della velocità del veicolo, mentre varia più che linearmente con la velocità del vento; il motivo è già stato discusso nei paragrafi precedenti: l'aumento della velocità del veicolo fa crescere $|V_{rel}^2|$ ma al tempo stesso fa diminuire il valore del CF_y . L'aumento della velocità del vento, invece, fa crescere sia $|V_{rel}^2|$ che CF_y .

- NLT Vs velocità del camion & velocità del vento:

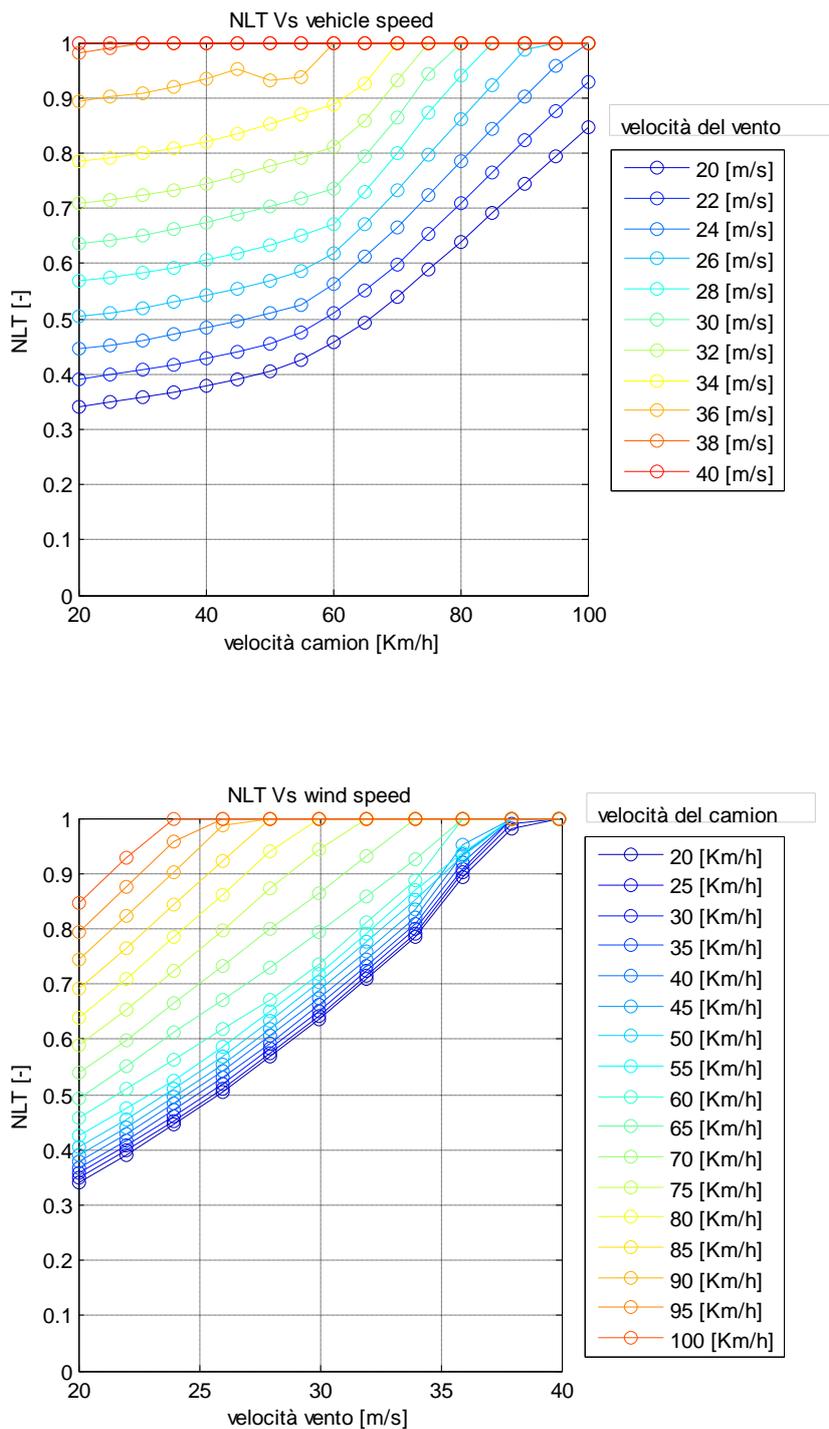


Figura 98 NLT Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 13 - veicolo carico

In entrambi i grafici, si nota come NLT aumenti sia con la velocità del vento, sia con quella del veicolo. È interessante osservare che la dipendenza di NLT dalla velocità del vento è sostanzialmente lineare; per quanto riguarda, invece, il rapporto con la velocità del camion, nel grafico posso essere individuate due zone:

- la prima, fino a 60 Km/h, in cui l'indice cresce lentamente;
- la seconda, per velocità superiori ai 60 Km/h, in cui l'indice cresce più velocemente;

All'aumentare della velocità del vento, la velocità in cui si verifica il cambio di pendenza è sempre la stessa. Questo fenomeno è dovuto all'effetto della barriera vicino la torre: come mostrato in precedenza con le CWC (Figura 67), per velocità inferiori ai 65 Km/h, barriera riesce a compensare l'effetto aerodinamico della torre; il ribaltamento, infatti, avviene lontano dalla torre. Per velocità superiori, invece, il disturbo sulle azioni aerodinamiche introdotto dalla torre non è più compensato dalla barriera e il veicolo si ribalta in uscita della torre. Il grafico mostra chiaramente questo comportamento: nel momento in cui la barriera non scherma più correttamente il veicolo, il rischio di ribaltamento aumenta più velocemente.

5.4.4) CONFIGURAZIONE 13 – VEICOLO SCARICO

- In figura viene riportato il grafico NLT Vs IY:

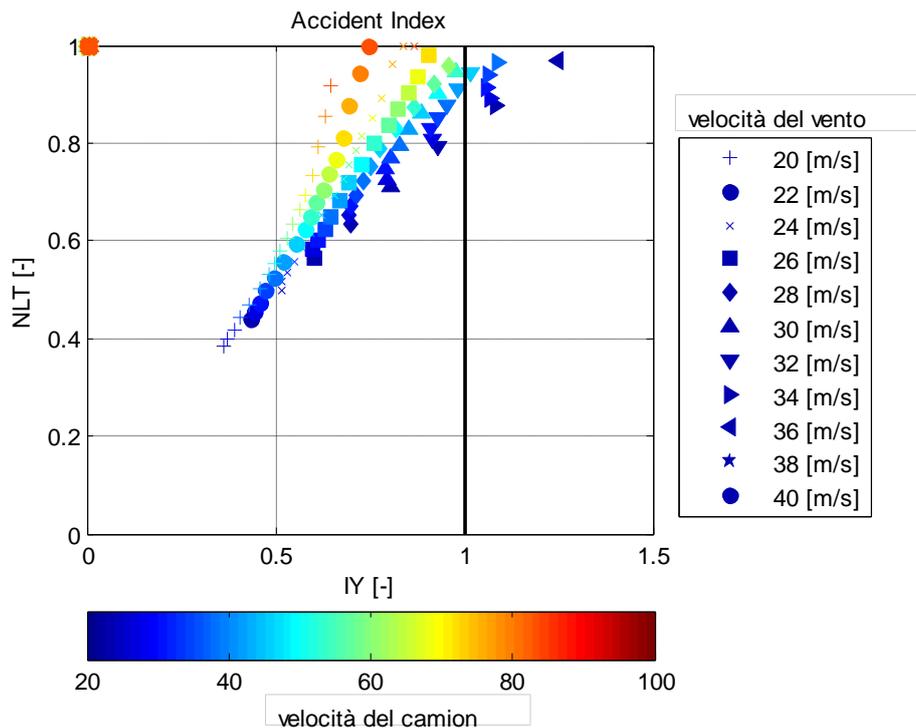


Figura 99 NLT Vs IY, configurazione 13, veicolo scarico

Il fenomeno osservato, qualitativamente, è del tutto analogo a quello del caso precedente. Quello che cambia è che le velocità limite di ribaltamento e di invasione dell'altra corsia, sia del veicolo che del vento, sono inferiori rispetto al veicolo carico. In precedenza abbiamo detto che nel caso di veicolo scarico, il pilota riesce a gestire meglio il controllo del camion a pari velocità del veicolo: questo è vero, ma bisogna sempre ricordare che l'effetto della forza aerodinamica laterale rappresenta un contributo molto importante per quanto riguarda la stabilità del veicolo. Quindi anche se le forze inerziali diminuiscono, le forze laterali assumono un'importanza maggiore.

Anche in questo caso è presente una velocità del camion che minimizza lo spostamento laterale: tale velocità, però, si osserva solo per elevate velocità del vento; per velocità del vento inferiori, la velocità del camion che minimizza lo spostamento laterale è inferiore ai 20 Km/h.

- IY Vs velocità del camion & velocità del vento:

Anche nel caso di veicolo scarico, si osserva che IY resta quasi costante al variare della velocità del camion mentre varia molto con la velocità del vento: il fenomeno è lo stesso del caso di veicolo carico. Le velocità limite, sia del vento che del veicolo, sono più basse. Si nota anche che il valore massimo del coefficiente IY è diminuito rispetto il caso precedente: ciò accade perché il veicolo scarico ha un'inerzia minore e il pilota riesce a gestire meglio le forze inerziali che nascono durante la manovra.

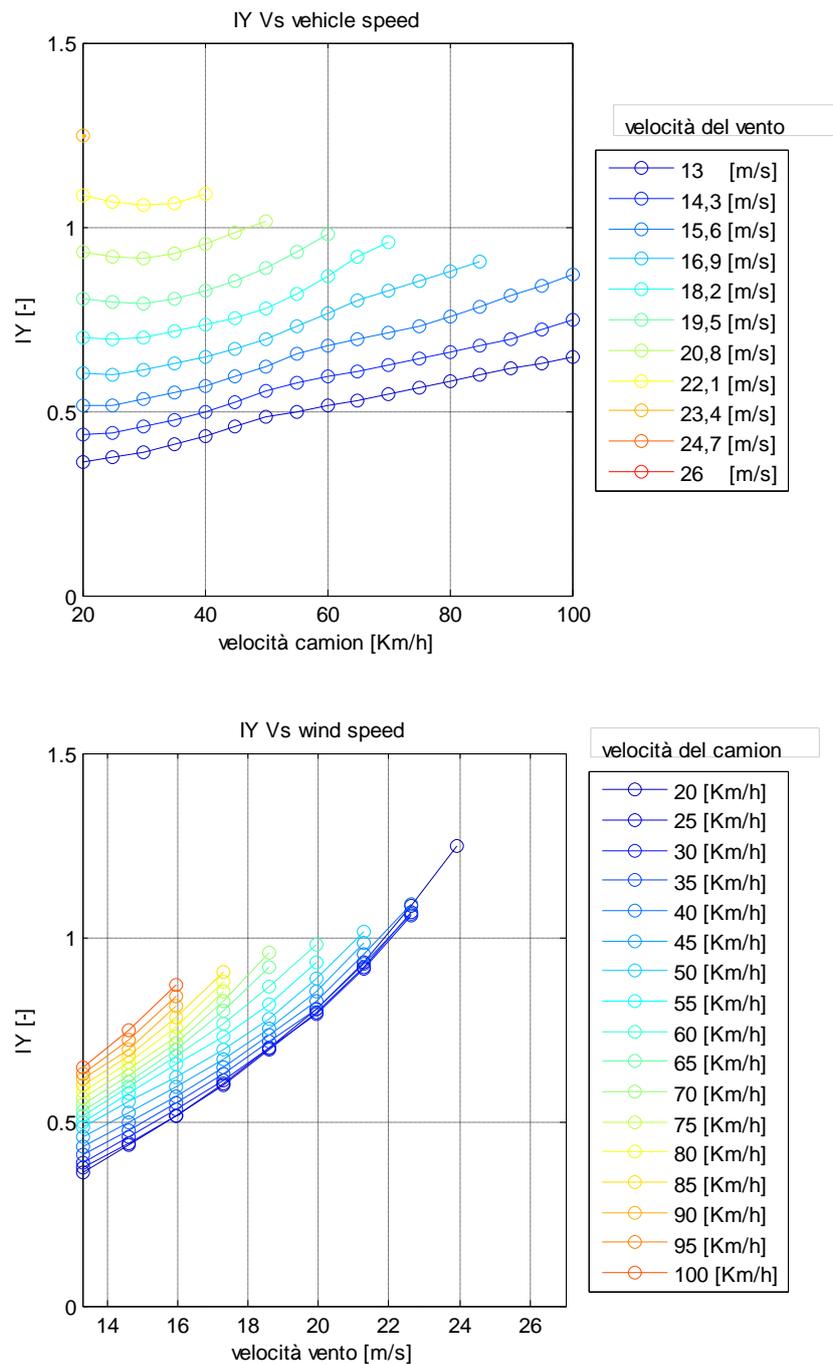


Figura 100 IY Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 13 - veicolo scarico

- NLT Vs velocità del camion & velocità del vento:

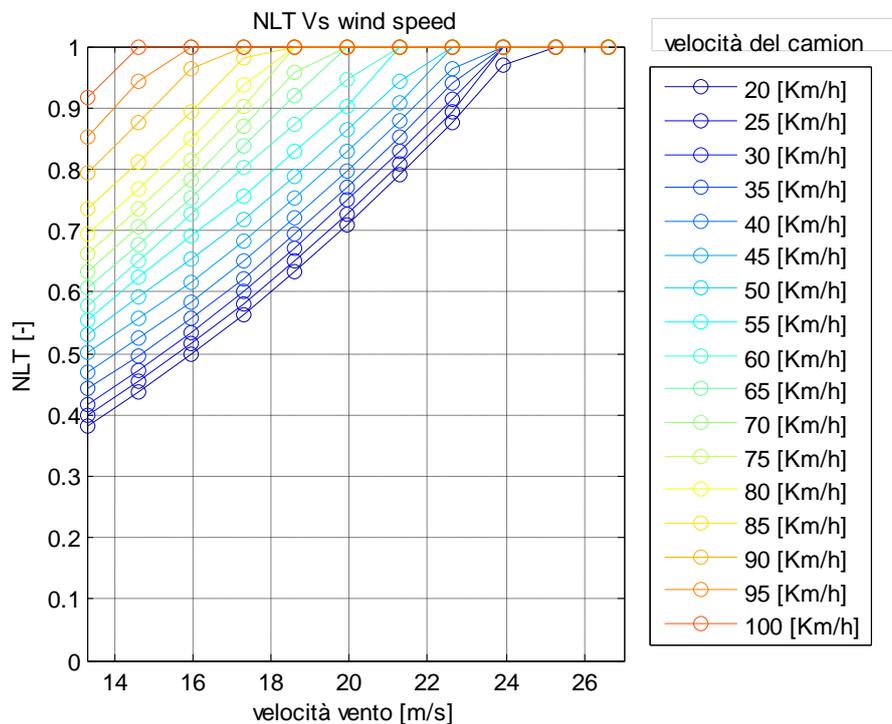
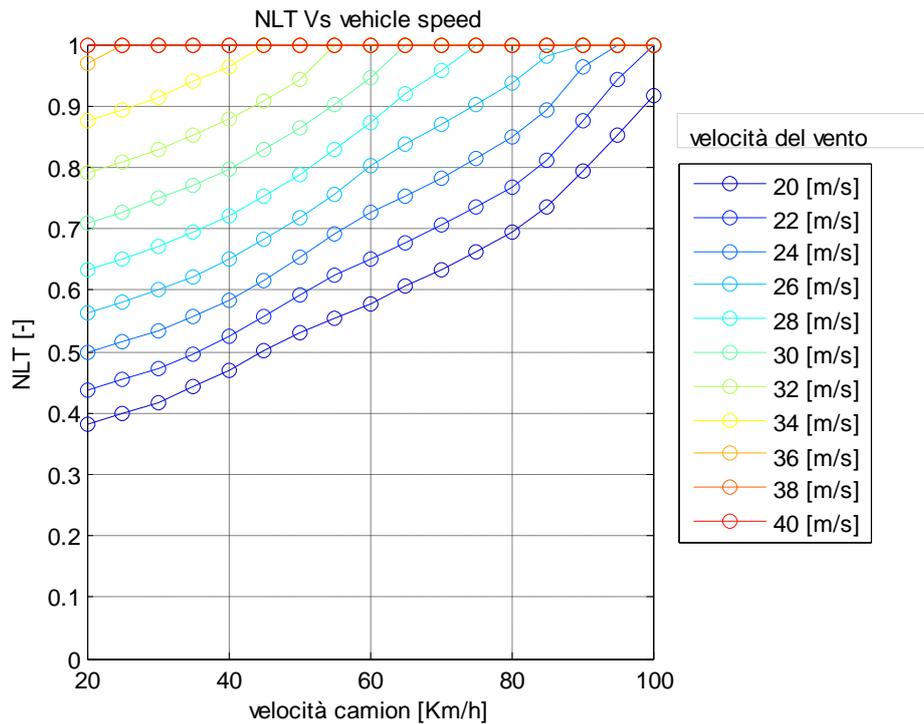


Figura 101 NLT Vs velocità del veicolo e del vento - configurazione 13 - veicolo scarico

Gli andamenti sono simili a quelli del caso precedente. NLT mostra un andamento lineare con la velocità del vento, mentre ha un andamento più che lineare con la velocità del veicolo: il cambio di pendenza, stavolta, si osserva per velocità superiori agli 80 Km/h; come osservato in precedenza, nel caso di veicolo scarico la barriera compensa gli effetti aerodinamici della torre fino a velocità maggiori rispetto il veicolo carico.

6) CONCLUSIONI

Per il presente lavoro di tesi sono state fatte prove sperimentali presso la GVPM. Le prove sono state eseguite in condizioni stazionarie e sono state misurate le forze totali e la distribuzione di pressione agente sul veicolo. Per tener conto degli effetti della forza laterale sulla dinamica del veicolo, si è diviso l'autoarticolato in 5 sezioni. La forza aerodinamica laterale agente sulla singola sezione si può calcolare una volta noti:

- Profilo di velocità del vento nella scia della torre a partire da prove con misura di pressione con veicolo fermo posto a diverse distanze dalla torre;
- Coefficienti aerodinamici determinati sulle diverse sezioni del veicolo tramite prove di pressione;
- Velocità del veicolo, ipotizzata costante durante la manovra;

Nota la velocità del veicolo e quella del vento per ogni sezione, si può calcolare l'angolo d'attacco, da cui si ricava il valore dei coefficienti aerodinamici, e la velocità relativa. La forza laterale per ciascuna sezione si ottiene combinando il coefficiente aerodinamico e la velocità relativa.

Per le simulazioni si è usato un modello multi – body di un autoarticolato composto da motrice e semi – rimorchio. Il modello della motrice è caratterizzato da 18 gradi di libertà mentre il modello del semi – rimorchio da 24 gradi di libertà. Motrice e semi – rimorchio sono collegati tramite un accoppiamento ralla – perno, modellato come una cerniera sferisca in grado di trasmettere il momento a ribaltamento. Al modello del veicolo è accoppiato un modello di pilota, tipo inseguitore di traiettoria con risposta neuro – muscolare.

E' stata condotta una campagna di simulazioni applicando il profilo del vento al modello di veicolo. Il profilo del vento dipende dalla configurazione analizzata mentre la velocità del veicolo è costante durante l'intera simulazione. I parametri che sono stati fatti variare durante le simulazioni sono:

- Configurazione delle barriere
- Condizioni di carico
- Velocità del veicolo
- Velocità del vento
- Tempo di reazione e dinamica del pilota

Lo scopo delle simulazioni è quello di proporre due indici sintetici, uno riferito al rischio di ribaltamento e l'altro al rischio di invasione di corsia, in grado di valutare l'effetto delle barriere sulla stabilità del veicolo.

Dai risultati ottenuti dalle simulazioni, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Configurazione senza barriere vicino la torre:

in questa situazione il ribaltamento è sempre statico. Il veicolo è investito da un incremento di velocità del vento in ingresso alla torre che ne causa il ribaltamento immediato; si osserva come il punto di ribaltamento sia sempre in ingresso alla torre. In questo caso lo spostamento laterale massimo è molto piccolo. Poiché il ribaltamento è statico, l'intervento del pilota non ha nessun peso ai fini della stabilità del veicolo. Si osserva come il veicolo carico si ribalti per velocità del vento maggiori rispetto al veicolo scarico, a pari velocità del veicolo; anche la posizione rispetto la torre in cui si ribalta il veicolo scarico è arretrata rispetto il veicolo carico.

Rispetto al caso di veicolo in vento libero si osserva che, a pari velocità del veicolo, la velocità del vento che causa il ribaltamento è inferiore: nel caso di veicolo carico la differenza è di circa 10 m/s e

si mantiene costante per tutte le velocità del veicolo esaminate; nel caso di veicolo scarico la differenza è di 6 m/s per la velocità del veicolo di 20 Km/h e diminuisce fino a 2,5 m/s per velocità del veicolo di 100 Km/h.

Si osserva, inoltre, che il rischio di ribaltamento dipende maggiormente dalla velocità del vento che da quella del veicolo: quando la velocità del vento aumenta, cresce sia $|V_{rel}^2|$ che il coefficiente aerodinamico della forza laterale; quando, invece, aumenta la velocità del veicolo, $|V_{rel}^2|$ cresce ma il coefficiente CF_y diminuisce: la diminuzione di CF_y attenua l'effetto legato all'aumento di $|V_{rel}^2|$.

- Configurazione con barriere vicino la torre:

in questa condizione l'instabilità è dinamica. La barriera diminuisce la velocità del vento, che dietro la torre raggiunge anche valori negativi. In questo caso il veicolo non è soggetto a un aumento della velocità del vento prima di attraversare la torre. Tuttavia, la variazione del profilo di velocità del vento costringe il pilota ad intervenire per mantenere il veicolo in traiettoria. In questo caso diventa molto importante la dinamica del sistema veicolo – pilota. Oltre il ribaltamento, diventa importante anche il rischio di invasione della corsia adiacente. Il pilota assume un ruolo importante: prove effettuate con piloti con diversi tempi di reazione e dinamiche differenti, dimostrano l'influenza di questo elemento.

Si osserva che, sia per il veicolo carico che scarico, esiste una velocità del veicolo limite sotto la quale la velocità critica del vento, a pari velocità del veicolo, è la stessa sia per il caso di vento libero che per quello di torre con barriere. Questa velocità, nel caso di veicolo carico, è compresa tra i 60 Km/h e i 65 Km/h; nel caso di veicolo scarico è circa pari a 90 Km/h. Per velocità del veicolo inferiori a questa velocità limite, la barriera riesce a compensare gli effetti aerodinamici introdotti dalla presenza della torre: il ribaltamento avviene lontano dalla torre, nella zona in cui il profilo di velocità del vento è costante, per le stesse velocità del caso di vento libero. Per velocità del veicolo superiori a quella limite, invece, l'instabilità del sistema veicolo – pilota è di tipo dinamico. La velocità limite del veicolo dipende dall'abilità del pilota nel gestire la variazione delle forze aerodinamiche: aumentando i ritardi relativi alla dinamica del pilota la velocità limite diventa inferiore. Si osserva che il veicolo non si ribalta dietro la torre, ma circa 40 – 50 metri dopo. Inoltre, il veicolo scarico, si ribalta ad una distanza maggiore dalla torre del veicolo carico: questo accade perché l'inerzia del veicolo scarico è inferiore di quella del veicolo carico; quindi il pilota deve gestire una forza inerziale inferiore e si trova avvantaggiato rispetto al caso di veicolo carico.

In questa configurazione, va sottolineato il rischio di invasione della corsia adiacente anche per basse velocità del veicolo. Quest'effetto, di natura strettamente dinamica, è completamente assente nel caso di torre senza barriere. Si nota come lo spostamento laterale resti costante al variare della velocità del camion mentre aumenta linearmente con la velocità del vento. Per quanto riguarda il rischio di ribaltamento, esso aumenta linearmente con la velocità del vento mentre all'aumentare della velocità del veicolo presenta un cambio di pendenza: fino alla velocità limite, il rischio di ribaltamento cresce lentamente (in questo caso è di tipo statico); superata la velocità limite, l'effetto della variazione aerodinamica introdotta dal sistema torre – barriera, fa crescere più velocemente il rischio di ribaltamento (in questo caso è di tipo dinamico).

I prossimi sviluppi per questo progetto sono i seguenti:

- Prove in scia alla torre del vento con veicolo mobile, misurando sperimentalmente il profilo di velocità del vento. In questa maniera si potrà ottenere una validazione diretta sia dell'approccio utilizzato in questo lavoro, ossia la simulazione del comportamento dinamico del veicolo a partire dalle prove statiche, dividendolo in più sezioni, che del profilo di velocità ricostruito numericamente.
- Eseguire le simulazioni con diverse barriere, per poterne confrontare le prestazioni
- Proporre un unico indice sintetico che tenga conto, contemporaneamente, sia del rischio di ribaltamento che di invasione della corsia adiacente.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1]: Baker C.J., 1998. The effect of high winds on vehicle behaviour, in: Proc. of International Symposium on Advances in Bridge Aerodynamics, Copenhagen
- [2]: Charuvisit S., Kimura K., Fujino Y., 2004. Effects of wind barrier on a vehicle passing in the wake of a bridge tower in cross wind and its response. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*
- [3]: L. J. J. Kusters. Increasing roll-over safety of commercial vehicles by application of electronic systems. In J. P. Pauwelussen and H. B. Pacejka, editors, *Smart Vehicles*, pages 362–377. Swets and Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, 1995.
- [4]: D. J.M. Sampson, “Active Roll Control of Articulated Heavy Vehicles”, Cambridge university Engineering Department September 2000
- [5]: Charuvisit S., Kimura K., Fujino Y., 2004. “Experimental and semi-analytical studies on the aerodynamic forces acting on a vehicle passing through the wake of a bridge tower in cross wind ”. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92, 749-780.
- [6]: Cheli F., Corradi R., Sabbioni E., Tomasini G., Tosi A., 2009. “Active control system to prevent heavy road vehicles from rollover induced by severe manoeuvres and cross wind” , in: Proc. of XXI IAVSD Symposium, Stockholm, Sweden.
- [7]: Will Houtt, David J. Cole, “A neuromuscular model featuring co-activation for use in driver simulation”, Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, UK
- [8]: S. A. Coleman, C. J. Baker, “An experimental study of the aerodynamic behaviour of high sided lorries in cross winds”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*
- [9]: Vehicle, road, tyre and electronic control systems interaction: increasing vehicle active safety by means of a fully integrated model for behaviour prediction in potentially dangerous situations (VERTEC) , Acronym: VERTEC, Start: 12/1/2002, End 11/30/2005
- [10]: S. Charuvisit, K. Kimura, Y. Fujino, “Experimental and semi-analytical studies on the aerodynamic forces acting on a vehicle passing through the wake of a bridge tower in cross wind”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92 (2004) 749–780
- [11]: D. Rocchi, T. Argentini, M. Sbroisi, L. Rosa, “WIND TUNNEL TESTS – WIND SHIELD MODELLING FOR THE FORTH REPLACEMENT CROSSING”, Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica.
- [12]: Soon-Duck Kwon, Dong Hyawn Kim, Seung Ho Lee, Ho Sung Song, “Design criteria of wind barriers for traffic. Part 1: wind barrier performance”, *Wind and Structures*, Vol. 14, No. 1 (2011) 55-70

-

