

SESSIONE A VEICOLI

ANALISI DELL'INTERAZIONE PILOTA-KART MEDIANTE TECNICA MULTI-BODY

Eugenio Pezzuti, Luigi Reccia, Alessio Ubertini, Andrea Gaspari

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Roma "Tor Vergata", Via di Tor Vergata, 110 - 00133 Roma, e-mail: reccia@ing.uniroma2.it

PAROLE CHIAVE: Interazione uomo -macchina, kart, manichino virtuale

SOMMARIO

Lo studio dell'interazione uomo-macchina è particolarmente complesso dato l'elevato numero di fattori in gioco. Un ausilio, lo offrono le moderne tecniche di simulazione CAD che consentono di riprodurre in virtuale il comportamento del veicolo in funzione dei diversi fattori che intervengono durante la guida, come ad esempio le azioni del pilota o le condizioni della pista. L'approccio al problema non può che essere interdisciplinare in quanto sono necessarie competenze che spaziano dall'analisi numerica con modelli FEM fino a tecniche di realtà virtuale.

Nel presente lavoro vengono analizzate le prestazioni di un Kart utilizzando tecniche multibody. Il pilota è riprodotto mediante un modello CAD tridimensionale in grado di simulare, grazie all'impiego di opportuni vincoli cinematici, tutte le possibilità di movimentazione del corpo umano. Il dummy è completamente parametrico e personalizzabile in base ai dati antropometrici del pilota.

Il modello del kart è implementato mediante corpi rigidi connessi attraverso rigidità rappresentative del telaio, ricavate grazie ad un procedimento di condensazione statica a partire da un modello FEM. Sono state anche rilevate le rigidità dei pneumatici ed il modello FEM è stato validato grazie a misure sperimentali. Le analisi svolte hanno permesso di verificare l'influenza della posizione del pilota sui trasferimenti di carico e quindi sul comportamento dinamico del kart e di valutare, inoltre, le reali forze agenti sul pilota durante la guida.

ABSTRACT

The study of human-machine interaction problems can be very difficult because of the number of parameters to set for a correct simulation.

The use of CAD techniques can be a powerful tool in these problems, permitting to evaluate human-machine interaction and driving behaviour. On the other side a complete dynamic model can be realized only using Cad, Fem and multi-body simultaneously. In fact FEM models permits to evaluate the stiffness of vehicle structure, CAD models allows to reproduce human motion and machine lay-out and multi-body codes can solve the equations of motion.

In this paper the kart road dynamic has been studied using a tool representative of chassis stiffness and inclusive of driver model. The latter aspect has been achieved using a parametric 3D dummy with 54 bodies connected with appropriate constraint, in order to correctly reproduce human motion. Kart model performed is a system of rigid bodies assembled with elastic connection. The stiffness values has been calculated using a finite element model validated with experimental test on an actual chassis. Furthermore tire radial stiffness are also been measured.

Performed analysis shows how driver movement influences kart dynamic in terms of vertical forces on each tire and consequently in acceleration and trajectory. Also the head-neck loads are been evaluated during kart motion and showing how this tool can be further developed to investigate human stresses during a race.

1. INTRODUZIONE

L'evoluzione dei software di supporto alla progettazione meccanica (CAD) e l'interesse per lo studio dell'ambiente, in cui l'essere umano si trova durante l'uso di una macchina, hanno spinto i tecnici a valutare, direttamente nella fase di progettazione, i fattori che intervengono durante l'interazione uomo-macchina. Le applicazioni di siffatte tecniche di simulazione spaziano da studi relativi all'ergonomia di veicoli, macchine ed azionamenti, alla valutazione di prestazioni sportive di atleti ed attrezzature fino all'analisi delle reali possibilità di azione delle persone portatrici di handicap.

Tali studi richiedono però modelli dettagliati sia dell'uomo che dell'ambiente e competenze che spaziano da tecniche computazionali, quali quelle FEM, sino a strumenti di realtà virtuale.

Oggi particolare interesse riscuotono i modelli tridimensionali del corpo umano (o dummy), impiegati in analisi con programmi di tipo multibody. Dal punto di vista della ricostruzione del movimento umano, l'utilizzo dei manichini virtuali consente effettuare un elevato numero di analisi, nei diversi scenari di interesse, senza la necessità della presenza fisica del soggetto, con ovvi vantaggi in termini di tempi e costi. Per ottenere però risultati accurati è necessario che il manichino riproduca fedelmente il soggetto nelle sue misure antropometriche e nelle sue possibilità di movimentazione. A tale scopo è stato sviluppato un software capace di generare un modello tridimensionale del corpo umano personalizzabile con le misure antropometriche del soggetto e correttamente vincolato per quanto riguarda la cinematica delle articolazioni [1];

il modello è molto dettagliato, essendo composto da 54 segmenti che riproducono tutte le articolazioni del corpo umano.

Nel presente lavoro sono state analizzate le prestazioni di un di kart da competizione, il cui comportamento stradale è oggetto di numerosi lavori riportati in bibliografia [6,12,13], accoppiato ad un dummy precedentemente descritto. La scelta dell'utilizzo di siffatta metodologia è dovuta sia alla presenza di una modellistica affidabile, sviluppata nell'ambito di precedenti lavori [2,3], sia alla notevole influenza, sul comportamento del veicolo, delle azioni del pilota durante il moto, dati i valori delle masse in gioco e l'importanza dei trasferimenti di carico. Difatti il kart, per regolamento, è sprovvisto di sospensioni e di differenziale. La mancanza di quest'ultimo comporta la tendenza ad avere strisciamenti durante la percorrenza di traiettorie curvilinee, evenienza a cui i piloti ovviano proprio sbilanciando il peso verso l'esterno ed ottenendo così, (agevolati dagli spostamenti dei mozzi anteriori in fase di sterzata) il distacco della ruota posteriore interna. Nel presente lavoro sono riportati dapprima le descrizioni dei modelli del manichino e del kart adoperati (per quest'ultimo sono state validate sperimentalmente le caratteristiche di rigidità) e successivamente le simulazioni svolte, orientate sia all'analisi del comportamento dinamico del kart, sia alla valutazione delle forze agenti sul pilota durante la guida.

2. IL MODELLO DEL CORPO UMANO

Il manichino 3D del pilota è stato sviluppato utilizzando il software HuMAN (acronimo di Human Motion Analysis), sviluppato da alcuni degli autori [1]. Il programma utilizza le mesh del corpo umano ottenibili dal software commerciale Poser4 [10], fornendo un dummy pronto per essere impiegato in analisi di tipo multibody. La geometria del modello del corpo umano, fornita dal Poser4, è descritta da una mesh dettagliata di triangoli. Questa geometria, seppur suddivisa nei principali segmenti corporei, si presenta come uno shell e non può essere utilizzata direttamente da un software di analisi dinamica. Infatti, ciascun segmento non racchiude un volume finito di spazio ed è quindi impossibile assegnargli proprietà di massa. E' stato, perciò, necessario operare il completamento della geometria dei singoli segmenti generando le rispettive superfici di chiusura. Il modello finale si presenta costituito da 54 segmenti corporei solidi e vincolati tra loro secondo le principali articolazioni del corpo umano. Ciascun segmento corporeo ha un proprio volume, quindi ingombri reali nello spazio, e proprietà di massa. I modelli finali sono direttamente fruibili dal software Working Model [8], utilizzato per le simulazioni. Il software HuMAN permette di scegliere la tipologia di dummy nelle configurazioni uomo, donna e bambino (fig.1a.) fornendo un modello parametrico personalizzabile in base alle caratteristiche antropometriche del soggetto (Fig.1b).

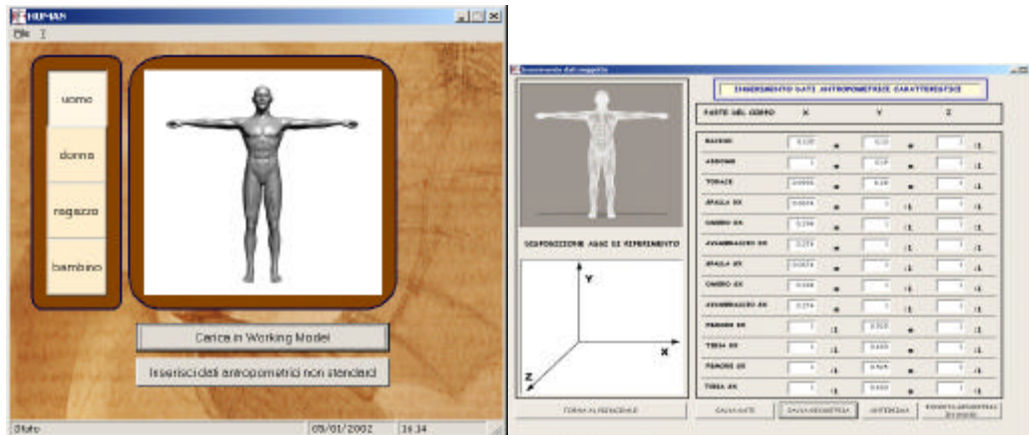


Fig.1 a) Finestra grafica del software HuMAN. b) Finestra per l'introduzione delle misure antropometriche.

3. IL MODELLO DEL KART

Il modello tridimensionale del kart, unitamente al manichino, sono stati implementati nel software multibody Working Model [8]. Tutti gli elementi costitutivi del kart da competizione, ovvero il telaio, i pneumatici, il motore, il serbatoio, sono stati modellati nel rispetto della geometria (passo, carreggiate, disposizione degli organi meccanici) e della distribuzione di masse del caso reale. Trattandosi di un codice multi-body tutti i corpi sono rigidi, mentre le elasticità dei pneumatici e del telaio sono state introdotte nel modello secondo lo schema di fig.2.

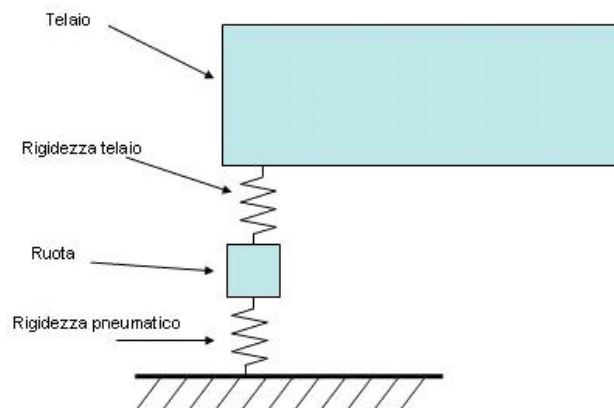


Fig.2 Rappresentazione schematica del modello delle rigidità

Le rigidità dei pneumatici sono state ricavate direttamente da prove sperimentali. Le misure di rigidità radiale sono state effettuate per mezzo di una macchina universale Zwick-Roell con una cella di carico da 5 KN. Il sistema di afferraggio, appositamente realizzato, è costituito da un supporto su cui si caletta il mozzo ed una piastra piana sui cui viene premuta la ruota; l'attrezzatura è visibile nelle figg. 3,4.

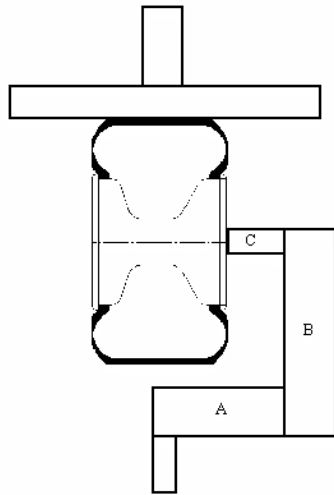


Fig.3 Schema dell'afferaggio

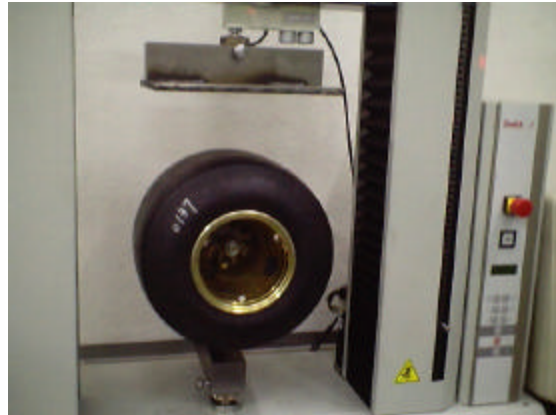


Fig. 4 Sistema sperimentale per la misura

Le prove sono state condotte al variare della pressione di gonfiaggio e su vari tipi di pneumatico sia anteriore che posteriore. In fig.5 è mostrato l'andamento delle curve carico-deformazione, mentre nelle figg.6,7 sono riportati gli andamenti delle rigidzze radiali ottenuti per interpolazione dei dati sperimentali.

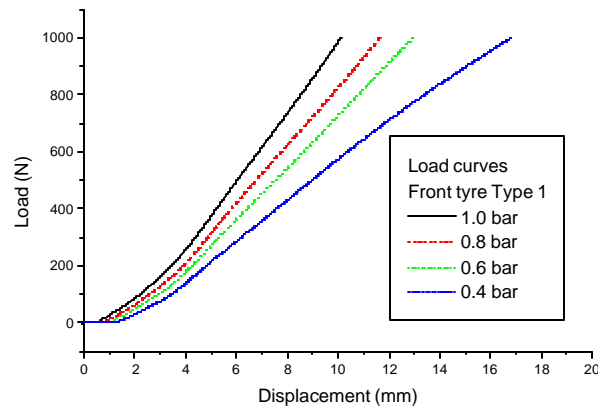


Fig.5 Curve carico-deformazione di schiacciamento radiale del pneumatico

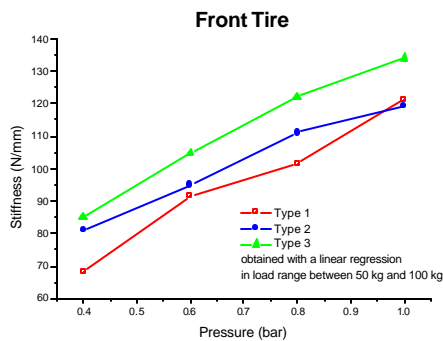


Fig.6 Rigidezza radiale pneumatico anteriore

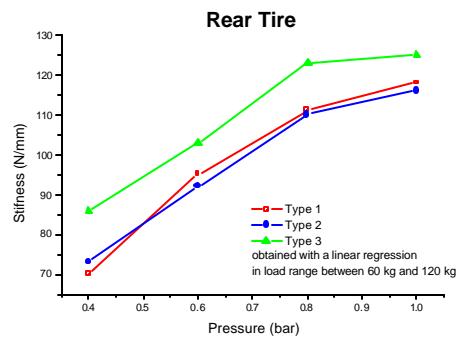


Fig.7 Rigidezza radiale pneumatico posteriore

Vista la modalità di prova, la rigidità del fusello del mozzo (indicato con C nella fig. 3) viene portata in conto nella deformazione complessiva della ruota; pertanto questo elemento strutturale non è stato inserito nel modello FEM impiegato.

Per quanto riguarda il comportamento elastico del telaio è stato messo a punto un modello ad elementi finiti, mostrato in figg. 9 e 10, basato sulla geometria del telaio a disposizione per le prove sperimentali (fig. 8). Il modello, sviluppato in ambiente Femap [9] e processato dal solutore Nastran [10], è costituito da elementi di tipo “beam” ed è stato tarato mediante misure sperimentali, sia statiche che dinamiche.

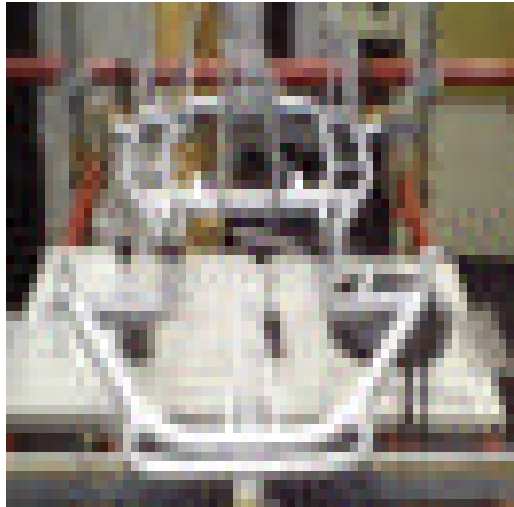


Fig. 8 Telaio del kart



Fig. 9 Modello FEM del telaio

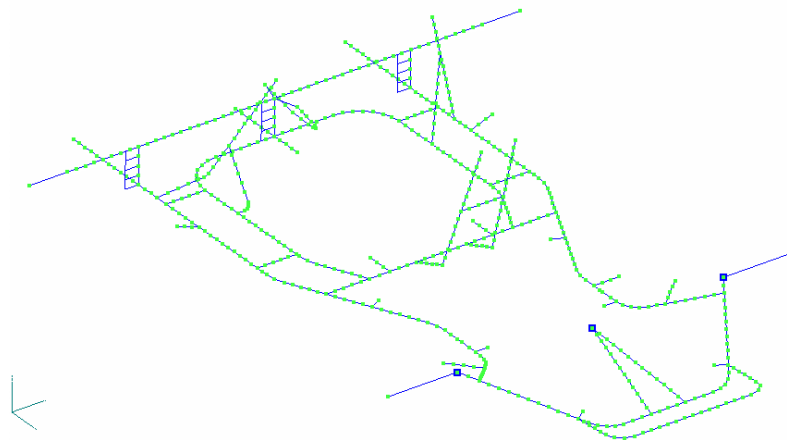


Fig. 10 Modello FEM del telaio ad elementi beam

Il telaio, vincolato con un apposito supporto in modo da ottenere un incastro all'estremità posteriore ed impedendo, per mezzo di una barra, deformazioni flessionali sull'anteriore è stato sottoposto a torsione. Grazie a due comparatori centesimali sono state misurate le deformazioni in diversi punti significativi del telaio, ed è stato ricavato il valore della rigidità torsionale, valutato 176000 Nmm° .

Validato il modello FEM, imponendo la rigidità torsionale in accordo con i dati sperimentali, la rigidità del telaio è stata caratterizzata attraverso un procedimento di condensazione statica operato sul modello FEM secondo la procedura descritta in precedenti lavori [2,3].

La matrice ristretta ai quattro gradi di libertà di traslazione verticale dei mozzi è risultata la seguente

$$K = 10^4 \begin{bmatrix} 3.50 & 0.291 & 0.778 & 1.47 \\ 0.291 & 3.50 & 1.47 & 0.777 \\ 0.778 & 1.47 & 5.02 & 0.142 \\ 1.47 & 0.777 & 0.142 & 5.01 \end{bmatrix} \text{ N/m}$$

Nel modello completo del kart è stata inserito il cinematismo di sterzo, secondo le misure della tiranteria riscontrate sul kart a disposizione. E' stata anche tenuta in conto la corretta inclinazione (sia di *caster* che di *king-pin*) del fusello di sterzo in modo da simulare correttamente la variazione di altezza da terra dei mozzi delle ruote anteriori in funzione della sterzata. L'andamento di tale variazione è rappresentato in fig.11b

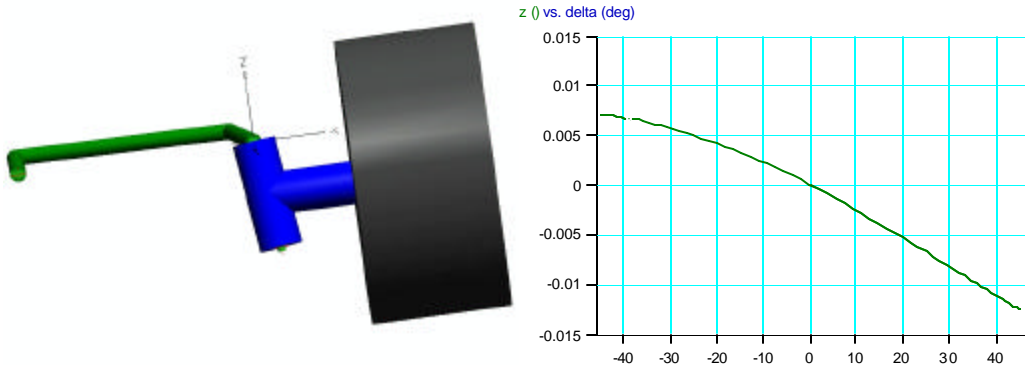


Fig 11a Particolare del cinematismo di sterzo

Fig 11b Posizione verticale del mozzo

La caratteristica della forza di deriva è stata introdotta nel modello multibody secondo una formulazione bilineare, dipendente sia dall'angolo di deriva α che dal carico verticale F_z agente sul pneumatico, in modo da ottenere la saturazione della forza laterale al raggiungimento dei valori limite di α e/o di F_z . In assenza di dati sperimentali specifici si è fatto riferimento ai dati proposti nel lavoro [6], in analogia con i pneumatici automobilistici [11], ed alla conoscenza dei valori di accelerazione laterale massima. Gli andamenti sono riportati in figura 12.

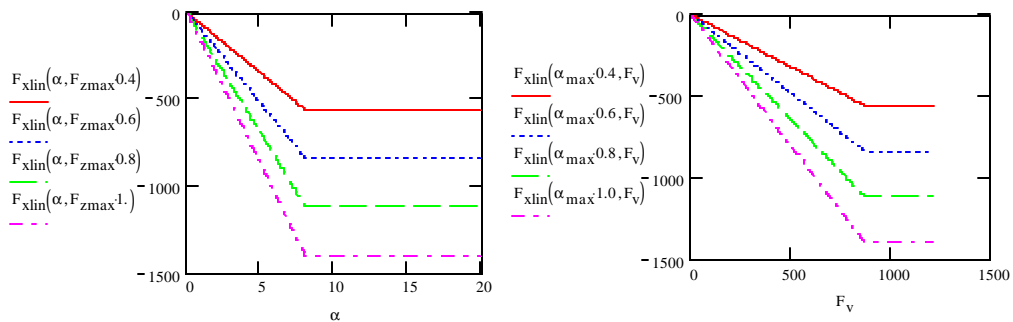


Fig. 12 Andamento delle forze di deriva in funzione dell'angolo di deriva e delle forze verticali

4. ANALISI SVOLTE

Il manichino è stato utilizzato, in combinazione con il modello del kart, per valutare sia gli effetti degli spostamenti del pilota sia le diverse condizioni di moto sul comportamento dinamico del veicolo.

Il dummy, che riproduce le caratteristiche antropometriche di un pilota di 170cm altezza e 68 kg di peso, è stato posizionato sul kart con la corretta postura che pilota assume durante la guida (vedi fig. 13 a,b).

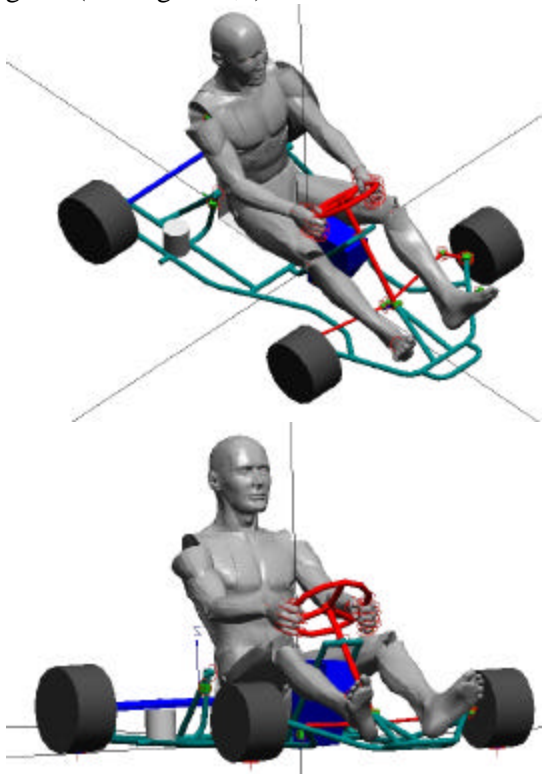


Fig. 13 a,b Il modello del kart con manichino

Particolare attenzione è stata posta alla posizione delle mani, bloccando tutti i gradi di libertà dei vincoli cinematici delle falangi ed utilizzando una cerniera sferica per il polso, in modo da simulare correttamente la presa sul volante, ricostruendo così la catena cinematica fra il volante, le articolazioni superiori e le spalle (fig.14 a,b).

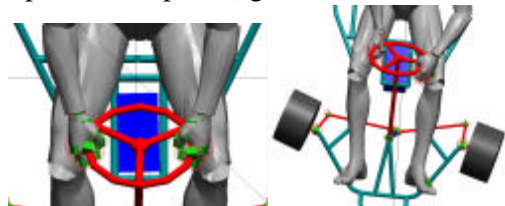


Fig. 14 a,b Dettaglio dell'interazione mani-volante

Il manichino è stato vincolato al sedile attraverso un vincolo rigido tra il bacino ed il sedile stesso; sistema di vincolo semplificato che non consente una corretta interpretazione delle forze scambiate tra uomo e sedile, valutabile con metodologie specializzate [5], ma è

sufficiente per gli scopi di tale lavoro, finalizzato sia ad esplorare le possibilità di applicazione di tale metodologia che a valutare gli effetti dello spostamento del pilota sulla guida.

Le analisi sono state svolte imponendo una traiettoria curvilinea, percorsa sia a velocità costante, sia imponendo una legge di moto il cui andamento è riportato in figura 16 b.

La sterzata è stata simulata imponendo una rotazione al volante secondo l'andamento riportato in fig. 17 b. La prima simulazione è stata svolta mantenendo il busto del manichino in posizione eretta, mentre nel secondo caso si è imposta una legge di rotazione al vincolo posto tra bacino e busto, in modo da provocare uno sbilanciamento del peso del pilota verso l'esterno della curva (si veda la fig. 15). La rotazione massima imposta è stata di 20 gradi, raggiunti secondo la time-history di figura 17 a.

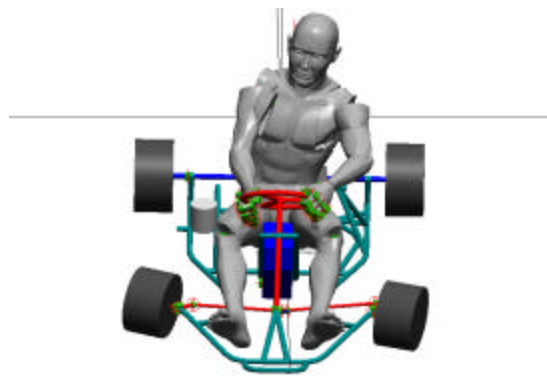


Fig. 15 Inclinazione del busto durante la sterzata

Le seguenti figure rappresentano i risultati delle diverse simulazioni effettuate:

- *velocità costante e busto fermo*
- *velocità costante e busto mobile*
- *velocità variabile e busto fermo*
- *velocità variabile e busto mobile.*

La fig. 16 a mostra l'andamento dell'accelerazione laterale del kart durante la manovra; la figura 18 mostra invece gli andamenti delle reazioni verticali sulle ruote. È evidente la differenza di comportamento del veicolo in relazione agli spostamenti del busto, che influiscono in maniera sensibile sulla traiettoria percorsa dal kart, come si vede dalle figg. 19 a,b. Al fine di stimare le sollecitazioni che si sviluppano sulla testa del pilota durante la guida, sono stati valutati anche i carichi sul vincolo interposto tra collo e busto, nelle differenti condizioni descritte precedentemente (vedi figura 20). Anche in questo caso si rivelano sensibili differenze in funzione delle condizioni imposte alla simulazione. Va sottolineato che i valori ottenuti sono solo di tipo qualitativo in quanto, in tale fase del lavoro, interessava principalmente esplorare i campi ed i limiti di applicabilità della metodologia. Analisi più puntuali saranno sviluppate in lavori successivi, in cui saranno valutate più in dettaglio le diverse condizioni operative, quali il contatto uomo-sedile, l'attrito opposto al rotolamento dei pneumatici ecc.

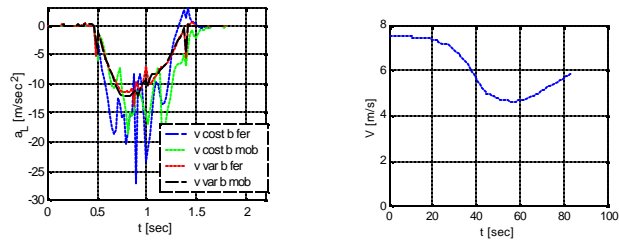


Fig. 16 a,b Time history di accelerazione laterale e velocità d'avanzamento

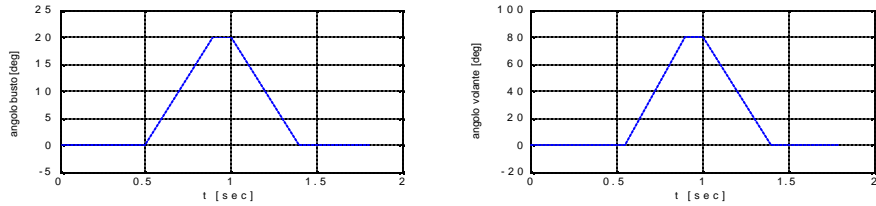


Fig. 17 a, b Time history di angolo d'inclinazione del busto e angolo volante

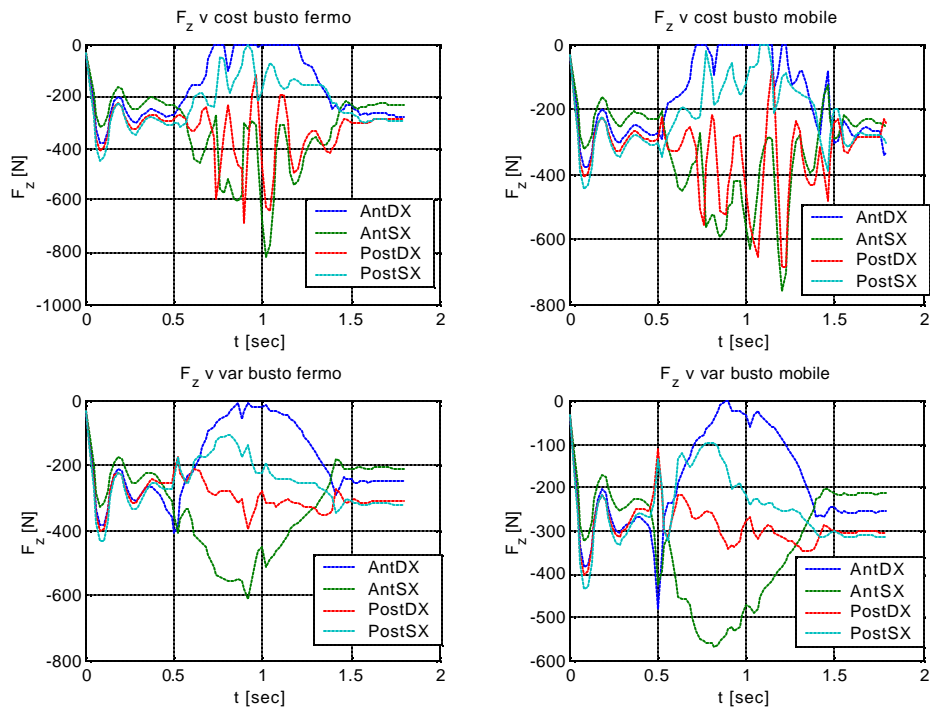


Fig. 18 Andamento dei carichi verticali sulle ruote durante la manovra

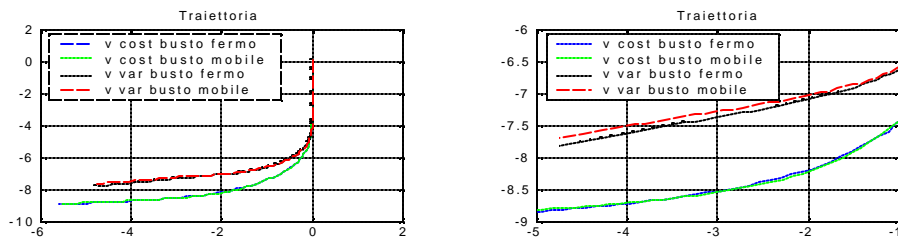


Fig. 19 a,b Traiettorie percorse dal kart nelle varie prove

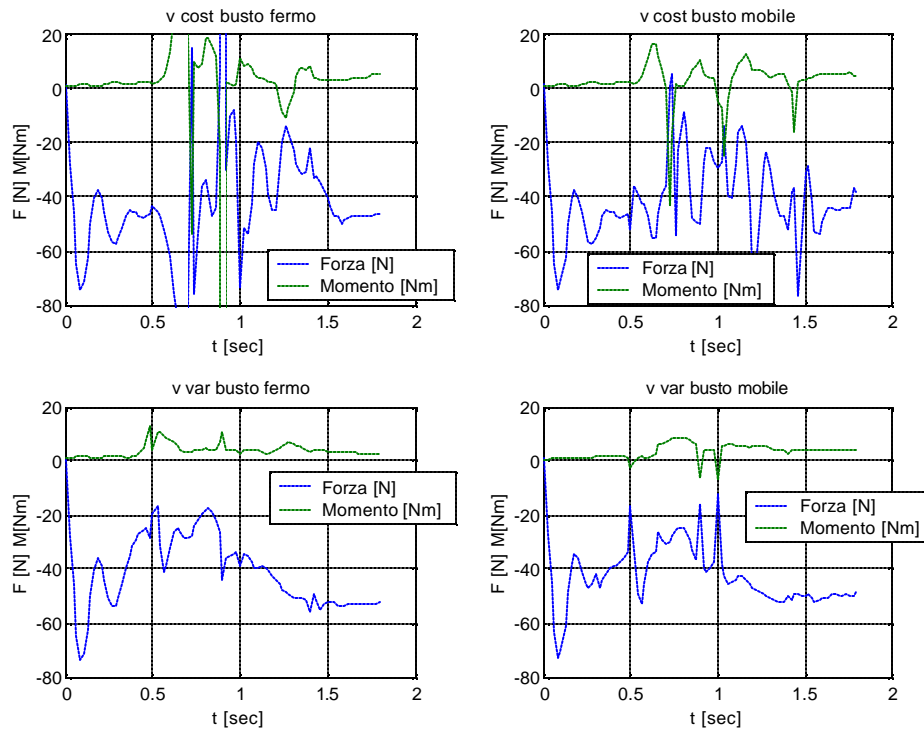


Fig. 20 Carichi (forza laterale e coppia) applicate al vincolo testa-busto

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato simulato il comportamento dinamico di un kart, utilizzando un manichino virtuale, accoppiato ad un modello del kart, all'interno di un codice di calcolo di tipo multibody. Le analisi svolte hanno permesso di valutare, in prima approssimazione, gli effetti dello spostamento del pilota e delle condizioni di moto sul comportamento dinamico del kart.

In particolare è stato studiato l'effetto di uno sbilanciamento del pilota, imponendo una rotazione del busto rispetto al bacino, manovra che i piloti adoperano usualmente in condizioni di bassa aderenza della pista. Sono state rilevate apprezzabili differenze sia in termini di reazioni verticali alle ruote, sia in termini di accelerazioni laterali e quindi di traiettoria. Sono state inoltre valutate le sollecitazioni a cui è sottoposto il collo durante la percorrenza della curva. I risultati hanno un valore più qualitativo che quantitativo in quanto, in questa fase, interessava più esplorare le potenzialità di siffatta metodologia che l'ottenimento di valori puntuali. I risultati ottenuti, infatti, non sono che una delle possibili applicazioni di un tale approccio metodologico. Sono ovviamente possibili simulazioni più accurate introducendo, ad esempio, le caratteristiche di forza longitudinale dei pneumatici e le corrette condizioni di attrito. Tuttavia il modello sviluppato si è mostrato in grado di simulare correttamente il moto del veicolo e valutare gli effetti dell'interazione tra uomo e veicolo, costituendo così una valida base per analisi successive.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Pezzuti, M. E. Biancolini, A. Ubertini, A. Gaspari, “Modelización CAD 3D del cuerpo humano y aplicación para la análisis del movimiento”, XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, giugno 2002
- [2] R. Baudille, M. E. Biancolini, C. Brutti, L. Reccia, “Analisi integrata multi-body FEM del comportamento dinamico di un kart”, Atti del Convegno AIAS, Alghero, Ottobre 2001
- [3] M. E. Biancolini, R. Baudille, L. Reccia, “Integrated multi-body/FEM analysis of vehicle dynamic behaviour”, Fisita Congress, giugno 2002
- [4] Badler, N. I. et al., “Real Time Virtual Humans”, Proceedings of the International Conference on Digital Media Futures, Bradford, 1999
- [5] F. Barizzone, C. Campanile, L. Celberti, A. Rosati, E. Pennestrì, P. P. Valentini, “The development of a virtual dummy for the vibrational comfort analysis of car drivers”, VI U.S. National Congress on Computational, Dearbourne (MI), August 1-4 2000.
- [6] E. Guglielmino, I.D. Guglielmino, G. Mirone, “Caratterizzazione numerica e sperimentale di un Go-Kart da competizione” AIAS 2000, Lucca, settembre 2000.
- [7] Larry L. Howell, “Compliant Mechanisms”, Ed. John Wily & Sons inc, 2001.
- [8] Working Model 3D 4.0 - User Manual
- [9] Femap 7.0 - User Guide
- [10] Poser 4.0 (E.V.) - User Manual
- [11] J.P. Caffrey, J.M. Lee (1997), “MSC/NASTRAN User’s Guide, Linear Static Analysis”, The Mc Schwendler Corporation Los Angeles.
- [12] G.Genta, “Meccanica dell’autoveicolo” Ed. Levrotto e Bella, Torino.
- [13] E. Vitale, F. Frenzo, M. Amorosa, E. Ghelardi, “Acquisizione dati a bordo di Go-Kart da competizione” AIAS 2000, Lucca, settembre 2000.
- [14] M. Giglio, A. Pecchio, P. Ravasi, “L’utilizzo del FEM per l’ottimizzazione di un telaio di Go-Kart” ATA Ingegneria Automobilistica, 2000.