

**IMPLEMENTAZIONE MEDIANTE TECNICHE MULTIBODY  
DI UN MODELLO PER LA SIMULAZIONE  
DELLE DINAMICHE VIBRAZIONALI  
DEL SISTEMA UOMO-SEDILE**

P. CAMPANILE<sup>1</sup>, L. CELIBERTI<sup>1</sup>, F. BARIZZONE<sup>1</sup>, A. ROSATI<sup>1</sup>  
E. PENNESTRI<sup>2</sup>, P.P. VALENTINI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Centro Ricerche Fiat, Orbassano (TO)*

<sup>2</sup>*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Roma*

**SOMMARIO**

L'analisi dei fenomeni vibrazionali che interessano il sistema sedile-guidatore viene eseguita sia tramite rilievi sperimentali che modelli teorici.

Tali modelli, tuttavia, sono spesso fondati sull'ipotesi di linearità e non considerano l'influenza della postura.

Nel presente lavoro è stato impostato, mediante tecniche multibody, un originale modello teorico, finalizzato all'analisi dinamica del sistema sedile-guidatore, in grado di riprodurre la reale postura tridimensionale del soggetto seduto.

La validazione del modello è avvenuta mettendo a confronto le curve di trasmissibilità, relative ad input verticale e longitudinale, ottenute a calcolo e quelle rilevate sperimentalmente, utilizzando il banco Sedya, presso il Centro Ricerche Fiat. Il confronto ha anche riguardato risultati sperimentali ottenuti presso altri centri di ricerca.

**ABSTRACT**

Most of human vibration models for seat-driver simulation are linear and do not take into account the real three-dimensional posture. A theoretical multibody model, where the human body is described in terms of rigid bodies, joints and lumped spring-dampers, is described in this paper. The model has been validated by comparing numerical results with experimental tests carried out at Centro Ricerche Fiat and other research centers.

**1. INTRODUZIONE**

I modelli di analisi del comportamento vibrazionale del sistema sedile-guidatore sono per la maggior parte fondati sull'ipotesi di linearità e non considerano l'influenza della postura [1, 2, 3]. Il lavoro, inserito nell'ambito di una ricerca volta a migliorare le tecniche di

modellazione del corpo umano, descrive un approccio all'analisi del sistema uomo-sedile mediante l'utilizzo di tecniche multibody. A tal fine, il corpo umano è stato assimilato ad un insieme di corpi rigidi vincolati attraverso coppie cinematiche ed elementi spring-damper. Per stabilire la geometria e le caratteristiche inerziali del manichino, ci si è avvalsi di database antropometrici, mentre, per quanto concerne la schematizzazione del contatto tra uomo e sedile, si è fatto uso di mappe di pressioni ottenute sperimentalmente.

La generazione del sistema di equazioni algebrico-differenziali che descrivono il modello matematico è avvenuta tramite il software SymDyn3D [4], sviluppato presso l'Università di Roma Tor Vergata.

Al fine di consentire lo studio di soggetti corrispondenti a diversi percentili, il codice possiede le proprietà di parametricità e riscalabilità e si interfaccia direttamente ad apposite tabelle antropometriche. La modularità del codice consente infine di estendere la rappresentatività del modello tramite l'inserimento di moduli aggiuntivi specifici.

Sono stati eseguiti diversi lanci del codice al fine costruire le curve di trasmissibilità, ad input vibrazionali orizzontali e verticali, delle varie parti del corpo di un soggetto seduto.

I risultati numerici ottenuti si dimostrano in ottimo accordo sia con quelli provenienti da prove al banco che quelli presenti in letteratura.

## **2. DESCRIZIONE DEL MODELLO**

Nella fase di modellazione si è deciso di mantenere un compromesso tra la quantità di dati necessaria ad una modellazione di dettaglio del corpo umano, e gli obiettivi di rappresentatività del modello stesso. Il modello risulta perciò descritto tramite di tecniche multibody e costituito da corpi rigidi collegati tra loro attraverso coppie cinematiche ed elementi viscoelastici discreti.

Una prima verifica della congruenza delle scelte eseguite, rispetto agli obiettivi, si è avuta attraverso un esame della postura assunta dal manichino in condizioni statiche, avendo come riferimento i dati sperimentali disponibili da prove eseguite presso il Centro Ricerche Fiat.

Il sistema di riferimento inerziale adottato è mostrato in Figura 1 con l'asse  $z$  in direzione trasversale orientato verso il lettore. Per tutti i riferimenti cartesiani locali si è assunta una convenzione che prevede l'asse  $x$  in direzione parallela alla dimensione maggiore del segmento corporeo, asse  $y$  ortogonale al precedente e complanare con la Figura 1 e asse  $z$  ortogonale ai precedenti così da formare una terna destrorsa.

### **2.1 Modellazione del sedile**

Il sedile viene schematizzato modellando separatamente le parti schienale e cuscino, per una più corretta riproduzione della distribuzione della massa. Tali parti, vincolate tra loro rigidamente, sono collegate ad una terza rigida rappresentativa del telarino di sostegno del sedile. Allo scopo di consentire un confronto tra risultati teorici e sperimentali, su tale parte viene imposto l'input vibrazionale, in modo tale da simulare le prove condotte al Centro Ricerche Fiat su soggetti umani al banco SEDYA; tale banco è in grado di imporre input vibrazionali al sedile in direzione longitudinale e verticale.

### **2.2 Modellazione del corpo umano**

Studi precedenti hanno mostrato come sia possibile, utilizzando modelli discretizzati a pochi gradi di libertà, riprodurre con risultati soddisfacenti la risposta verticale di bassa

frequenza di un uomo seduto su sedile.

Tuttavia tali modelli risultano in modo intrinseco non antropometricamente rappresentativi, e dunque poco adatti a studi mirati alla indagine di sensibilità di risposta del sistema uomo-sedile per variazione dei principali parametri antropometrici e posturali; inoltre non consentono di riprodurre la risposta vibrazionale in direzione longitudinale.

D'altro canto una modellazione più complessa (FEM) determinerebbe un grado di dettaglio eccessivo rispetto agli obiettivi preposti, con un incremento notevole dei tempi di calcolo e una riduzione della flessibilità di impiego. Alla luce di tali esigenze di "schematicità" e di "antropometricità" al tempo stesso, il modello di manichino sviluppato con metodologia MultiBody [7] si compone delle seguenti parti rigide: testa, collo, torace, spalle, braccia e avambracci, addome, bacino, cosce, polpacci e piedi [8, 9].

Tali parti sono tra loro vincolate in modo tale da definire un unico elemento rigido rappresentativo del busto (torace, braccia, collo e testa); ad esso si collegano, mediante cerniere, le restanti parti del modello.

La parte alta del manichino risulta così rappresentativa della esatta distribuzione di massa del percentile prescelto, nonché della postura ergonomicamente corretta di un guidatore in vettura. Più precisamente, la postura scelta discende dallo standard di prova utilizzato al Centro Ricerche Fiat al banco SEDYA, costituente il riferimento sperimentale: si è optato dunque per una posizione delle braccia caratterizzata da un appoggio della mano sulle gambe 2. Per schematizzare l'interazione tra la parte alta del corpo e il bacino, ovvero per introdurre l'elasticità verticale dovuta alla colonna vertebrale, viene inoltre definita una coppia prismatica sulla quale agisce un elemento visco-elastico.

Una volta accertata la postura del soggetto, si deve procedere alla schematizzazione mediante un insieme di corpi rigidi.

### 2.3 Connessioni tra i componenti

Le connessioni tra i corpi rigidi che compongono il modello di corpo umano, possono rilevarsi dalla Figura 1. Le articolazioni sono sostituite da coppie cinematiche standard, sebbene un'accurata modellazione delle giunture comporterebbe una più approfondita conoscenza della cinematica delle articolazioni e coinvolgerebbe anche la determinazione dei coni di circonduzione delle stesse [13]. Il modello presenta dunque:

- 2 coppie rotoidali ad asse trasversale tra avambracci e braccia,
- 1 coppia prismatica ad asse longitudinale tra addome e bacino,
- 2 coppie rotoidali tra bacino e cosce,
- 2 coppie rotoidali ad asse trasversale tra cosce e polpacci,
- 2 coppie rotoidali ad asse trasversale tra polpacci e piedi,
- 1 coppia prismatica ad asse verticale o orizzontale tra sedile e scocca.

Il modello di corpo umano così configurato presenta 10 segmenti corporei, 45 gradi di vincolo di tipo scleronomo. Inoltre, sono stati introdotti tre vincoli reonomi scalari: due ai piedi per imporre un'inclinazione fissa (*i.e.* appoggio su una pedana inclinata di  $20^\circ$ ) ed uno, al sedile, rappresentante la legge di attuazione dello stesso. In definitiva, il modello presenta 11 g.d.l.



L'appoggio delle mani sulle gambe viene schematizzato con un ulteriore elemento visco-elastico (non mostrato in Figura 2), mentre la caratteristica principale di rigidità del corpo umano viene implementata in corrispondenza del vincolo dinamico posto sulla coppia prismatica di giunzione tra la parte alta del corpo e il bacino.

<b>Elemento visco-elastico</b>	<b>Rigidità (N/m)</b>	<b>Coeff. smorz. visc. (N·s/m)</b>
Cuscino-cosce $\perp$	11000	47
Cuscino-cosce $\parallel$	10000	50
Cuscino-natiche $\perp$	37000	140
Cuscino-natiche $\parallel$	10000	50
Piede-pianale (oriz.)	50000	50
Piede-pianale (vert.)	10000	50
Torace-bacino	48000	1000
Dorso-schienale	37000	140
Mano-coscia $\perp$	100000	50
Mano-coscia $\parallel$	25000	50

Tabella 1: Valori imposti alle rigidità ed ai coefficienti di smorzamento degli elementi viscoelastici

In Tabella 1 vengono riportati i valori dei principali elementi elastico-smorzanti utilizzati: la loro scelta, in combinazione con il relativo posizionamento, deriva da una indagine dei dati disponibili in letteratura, e da analisi sperimentali statiche e dinamiche condotte al Centro Ricerche Fiat ed in collaborazione con i fornitori di sedili.

### 3. PROVE SPERIMENTALI

Lo sviluppo e la validazione del modello sono stati resi possibili grazie al riscontro con dati sperimentali acquisiti durante prove eseguite presso il Centro Ricerche Fiat. Tali prove sono essenzialmente di due tipi:

- prove statiche, per l'identificazione della distribuzione delle pressioni all'interfaccia uomo - sedile, su diversi sedili e con soggetti di differente antropometria;
- prove vibrazionali al banco, per l'acquisizione della risposta dinamica (indici S.E.A.T., FRF, RMS, etc.) in corrispondenza dei canali standard (verticale cuscino e longitudinale schienale), per input stradali e sinusoidali.

### 4. RISULTATI NUMERICI

I risultati del modello, denominato DAViD (Dynamic Automotive Virtual Dummy), si riferiscono ad un soggetto con caratteristiche antropometriche corrispondenti al 50<sup>o</sup> percentile (soggetto "medio") e sono stati ottenuti calibrando i parametri viscoelastici del modello secondo quanto riportato in Tabella 1.

Nel paragrafo verranno messi a confronto le curve di trasmissibilità ottenute per via numerica e sperimentale. Alcune delle curve suddette derivano dalle prove al banco Sedya del Centro Ricerche Fiat, mentre altre sono state desunte dalla letteratura .

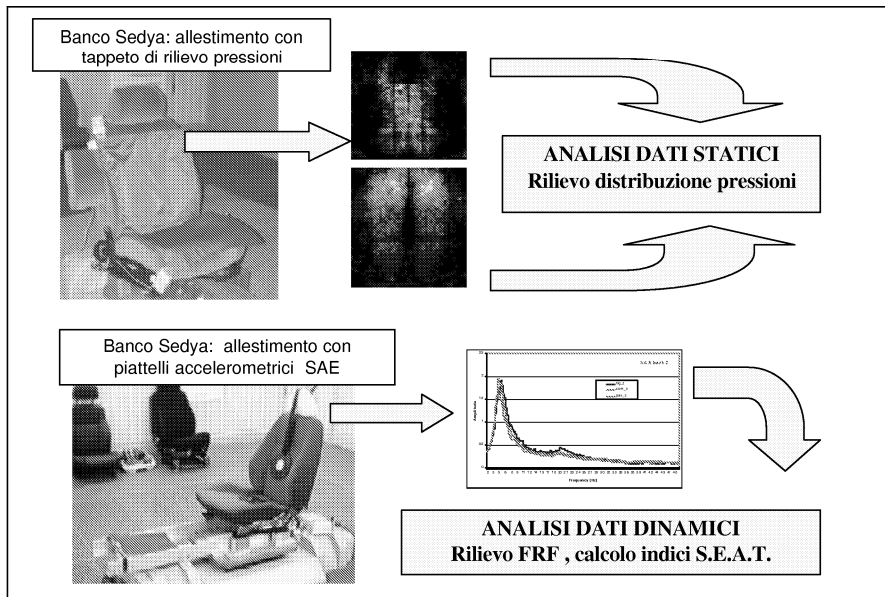


Figura 3: Rilievi sperimentali

Le leggi di attuazione imposte al sedile, in direzione verticale ed orizzontale, sono di tipo armonico. Per le oscillazioni verticali si è imposta un'ampiezza di 0.05 m, per le basse frequenze (0.5, 1, 2, 3, 4 Hz), e 0.01 m per quelle alte (5, 7, 10, 15 Hz).

Per le analisi ad input orizzontale si è scelta un'ampiezza di 0.03 m.

Le curve di trasmissibilità vengono ottenute quale rapporto tra i moduli della risposta e dell'eccitazione.

In particolare porremo maggiore attenzione alle risposte di cosce e torace, direttamente misurate dagli accelerometri del banco Sedya.

#### 1. Curva di trasmissibilità verticale per le cosce - Input verticale

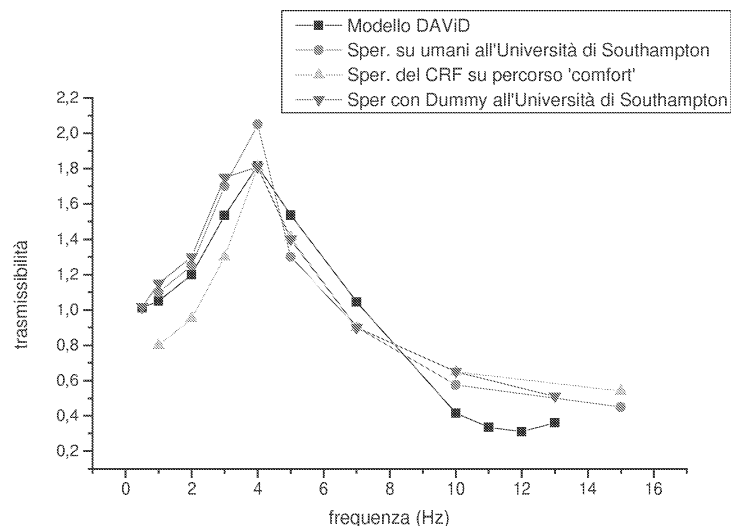


Figura 4: Confronto tra le curve di trasmissibilità verticale (input verticale) delle cosce del modello DAVID e alcuni modelli sperimentali.

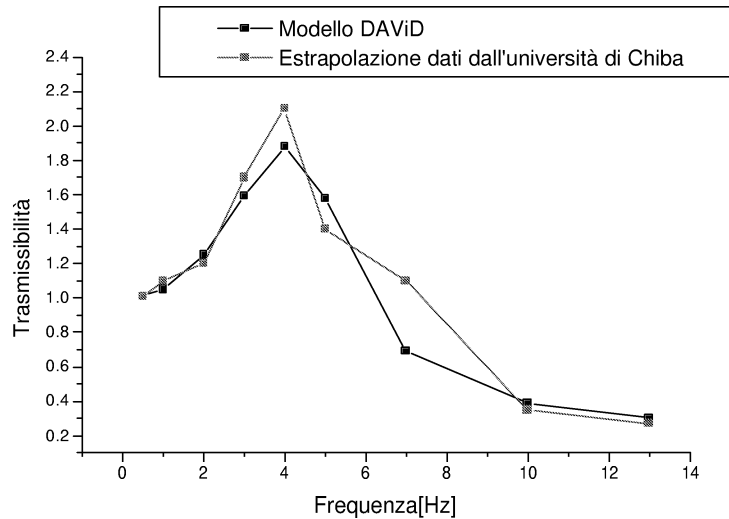


Figura 5: Confronto tra le trasmissibilità orizzontale (input orizzontale) del torace calcolate con il modello DAVID e quelle rilevate sperimentalmente presso università di Chiba [1]

Come si può notare la curva mostra un picco nell'intorno dei 4 Hz e un andamento molto simile alla trasmissibilità di un sistema a un grado di libertà. In particolare è pressoché comune il picco intorno ai 4 Hz. Nel tratto tra i 0 e i 4 Hz il risultato numerico concorda con le prove sperimentali eseguite presso l'università di Southampton, mentre si discosta, pur se leggermente, dalle rilevazioni svolte presso il CRF.

Tale scostamento potrebbe imputarsi al diverso orientamento degli accelerometri.

Il tratto oltre i 4 Hz mostra accordo invece sia con le prove del CRF sia con le prove su soggetti umani dell'università di Southampton, mentre si discosta dai risultati ottenuti con il dummy, ma sempre in misura trascurabile.

## 2. Curva di trasmissibilità orizzontale per input orizzontale per il torace

La figura 5 mostra il confronto per la trasmissibilità del busto del manichino in direzione longitudinale. Il modello anche in questo caso coglie la dinamica principale sia in ampiezza che in frequenza.

## 5. NONLINEARITÀ DEL MODELLO

Al fine di valutare la sensibilità dei risultati al variare dell'ampiezza dell'oscillazione imposta, viene riportato, a titolo esemplificativo, il grafico di Figura 6 in cui la risposta viene calcolata per due differenti valori di tale ampiezza.

La presenza di non linearità causa una risposta in frequenza differente a seconda dell'ampiezza di oscillazione del sedile. Questo risultato mostra come, rispetto agli attuali modelli lineari, si colgano, con la descrizione scelta, le non linearità associate alla geometria del sistema fisico (descrizione antropometrica).

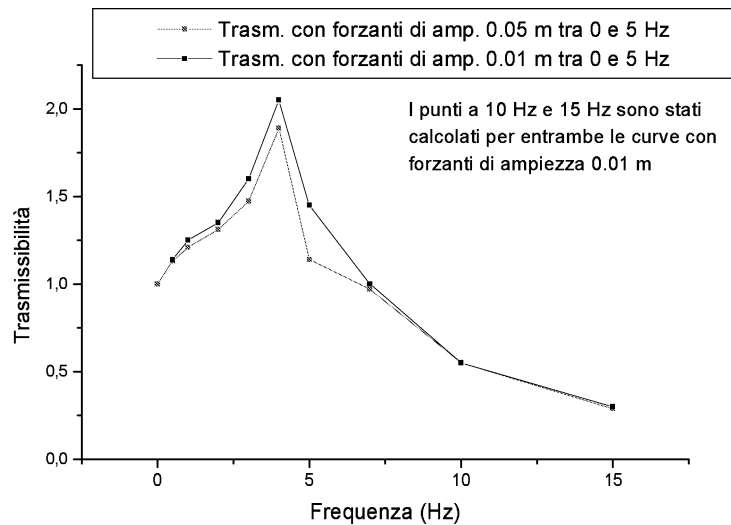


Figura 6: Curve di trasmissibilità verticale per input verticale delle cosce

## 6. CONCLUSIONI

Si è definito un modello virtuale atto a riprodurre la risposta vibrazionale acquisibile sperimentalmente all'interfaccia uomo-sedile durante missioni stradali predefinite.

Il grado di definizione del modello è stato scelto mediando tra l'esigenza di poter effettuare analisi parametriche su antropometria e postura, e l'esigenza di disporre di un modello versatile e modulare. Rispetto ai modelli a parametri concentrati presenti in letteratura, inoltre, è stata resa possibile la simulazione delle dinamiche associate del sistema uomo-sedile sul grado di libertà longitudinale.

L'approccio multibody proposto ha consentito di ricostruire con sufficiente grado di precisione il sistema fisico reale, introducendo le non linearità geometriche, oltre alla possibilità di parametrizzare le variabili del sistema in funzione della postura adottata, dell'antropometria del soggetto e del tipo di sedile.

I primi risultati ottenuti appaiono soddisfacenti, consentendo di riprodurre a calcolo le dinamiche rilevabili sperimentalmente sui canali standard (verticale sul cuscino e longitudinale sullo schienale).

Le non linearità geometriche del modello hanno inoltre consentito di riprodurre parzialmente quelle presenti nel sistema fisico e rilevabili sperimentalmente.

Tali risultati confermano quindi la validità dell'approccio proposto e costituiscono una solida base su cui impostare le successive indagini parametriche, per le quali si rivelano particolarmente adatte le caratteristiche di flessibilità del codice SymDyn3D.

## Riferimenti bibliografici

- [1] M.J. Griffin, *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, 1990.
- [2] Cyril M. Harris, *Shock Vibration Handbook*, 1988 - McGraw Hill.
- [3] A.I. King, A Review of Biomechanical Models - *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 106, May 1984.
- [4] Valentini, P.P. *et al.*, SymDyn3D - Un codice multibody per la generazione delle equazioni del moto in forma simbolica, *AIMETA, XV Congresso Nazionale*, 2001, Taormina.
- [5] Jens Trampe Broch, *Mechanical Vibration and Shock Measurement*, 1984 Brüel & Kjær.
- [6] F.M.L. Amirouche, M. Xie, A. Patwardhan, Optimization of the contact damping and stiffness coefficients to minimize human body vibration *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 116, November 1994.
- [7] E. Pennestrì, *Dinamica tecnica e computazionale*, vol.II, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, in corso di stampa.
- [8] Valentini, P.P., *Analisi delle modalita' di Implementazione di un manichino virtuale per la simulazione delle dinamiche vibrazionali del sistema uomo-sedile*, Tesi di Laurea, Università' di Roma Tor Vergata, A.A. 1999-2000.
- [9] D'Alessio, G., *Analisi di sensibilità dei parametri di un manichino virtuale vibrazionale*, Tesi di Laurea, Università' di Roma Tor Vergata, A.A. 1999-2000.
- [10] Mitsunori Kubo, Fumio Terauchi, Hiroyuki Aoki, Masahiro Isobe, Kazuiko Okubo, *Riding Comfort affected by the properties of Flexible Polyurethane Foams*, 35<sup>th</sup> United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration, ISRV, Università di Southampton, Inghilterra, Settembre 2000.
- [11] Christopher H. Lewis, *Evaluating the vibration isolation of soft seats using an active anthropodynamic dummy*, 35<sup>th</sup> United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration, ISRV, Università di Southampton, Inghilterra, Settembre 2000.
- [12] Lin Wei, Michael J. Griffin *Effect of subject weight on predictions of seat cushion transmissibility*, 35<sup>th</sup> United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration, ISRV, Università di Southampton, Inghilterra, Settembre 2000.
- [13] M.P.T. Silva, J.A.C. Ambrosio, M.S. Pereira *Biomechanical Model with Joint Resistance for Impact Simulation* Multibody System Dynamics1: 65-84, 1997.
- [14] Xuting Wu, Subhash Rakheia, Paul-Emile Boileau *Study of Human-Seat interactions for Dynamic Seating Comfort Analysis* 1999, Society of Automotive Engineers, Inc.
- [15] Yi Gu, *A New Dummy for Vibration Transmissibility Measurement in Improving Riding Comfort* 1999, Society of Automotive Engineers, Inc.
- [16] Yi Gu, *A Comparison Test of Transmissibility Response from Human Occupant and Anthropodynamic Dummy*, Society of Automotive Engineers, Inc., 1988.
- [17] Se-Jin Park, Young-Shin Lee, Toon-Eui Nahm, Jung-Woo Lee, Jin-Sun Kim *Seating Physical Characteristics and Subjective Comfort: Design Considerations*, Society of Automotive Engineers, Inc., 1988.