

**XV Congresso Nazionale A.I.D.A.A.
Torino, 15 – 19 Novembre 1999**

**MODELLI PER L'ANALISI DELLA DINAMICA DEL SISTEMA
VELIVOLO-CARRELLI NELLE MANOVRE AL SUOLO**

E. Denti

Università degli Studi di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale
Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa
Tel. 050 550200, Fax 050 553654, E-mail: denti@ing.unipi.it

SOMMARIO

In questa memoria vengono illustrati i contenuti delle attività di ricerca svolte ed in corso di svolgimento presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale dell'Università degli Studi di Pisa (DIA) nell'ambito dello studio del comportamento dinamico del velivolo, dei carrelli e delle ruote in atterraggio, rullaggio e frenata, in presenza di sistemi antislittamento. Vengono inoltre riassunti i principali risultati conseguiti e vengono illustrate le tematiche di un progetto di ricerca europeo sull'argomento, al quale il DIA partecipa in qualità di partner.

1. INTRODUZIONE

L'analisi della dinamica del velivolo nelle manovre al suolo è essenziale per la determinazione delle sollecitazioni sul velivolo e sui carrelli e la verifica del comportamento dinamico dei carrelli stessi. A tutt'oggi non sono disponibili criteri affidabili per il progetto di carrelli completamente esenti da problemi di vibrazione, in parte per la complessità delle interazioni tra la dinamica elastica del carrello, la dinamica delle ruote e dei freni e le logiche di controllo dei sistemi di antislittamento, in parte per le carenze dei modelli della dinamica del pneumatico e dei modelli dei fenomeni che avvengono nella zona di contatto pneumatico-suolo.

In questa memoria vengono illustrati i contenuti delle attività di ricerca svolte ed in corso di svolgimento presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale dell'Università degli Studi di Pisa (DIA) su tale tematiche. Queste sono essenzialmente focalizzate su due temi:

- studio della dinamica del sistema velivolo elastico-carrelli in atterraggio e rullaggio, con lo scopo di consentire la determinazione delle caratteristiche della sollecitazione sul velivolo e dei carichi introdotti nella struttura dai carrelli nell'ambito di tali manovre;
- modellizzazione e controllo della dinamica dei velivoli in frenata, con particolare riferimento ai modelli dei pneumatici e dei fenomeni dinamici che avvengono all'interfaccia pneumatico-suolo.

Quest'ultima attività, iniziata autonomamente presso il DIA nel 1993, prosegue ora nell'ambito di un progetto di ricerca europeo denominato SAMBA.

Nella memoria vengono riassunti i principali risultati conseguiti nell'ambito delle attività di ricerca sopra citate e vengono illustrate le tematiche del progetto di ricerca SAMBA ed il ruolo che il DIA vi svolge.

2. SIMULAZIONE DELL'ATTERRAGGIO E DEL RULLAGGIO

Le attività del DIA in questo campo sono iniziate nei primi anni '80 nell'ambito di una collaborazione con un'azienda aeronautica italiana per lo sviluppo di un codice per la simulazione numerica della dinamica del velivolo elastico nel corso delle manovre di rullaggio ed atterraggio simmetrico e per il calcolo delle caratteristiche della sollecitazione sul velivolo.

La realizzazione di tale codice ha comportato una lunga attività di sviluppo di modelli matematici, algoritmi numerici e software, i cui risultati sono illustrati in un lavoro [1] che è stato presentato al congresso sull'aeroelasticità e la dinamica strutturale organizzato a Strasburgo nel maggio 1993 dall'AAAF (Association Aéronautique et Astronautique de France).

Il codice realizzato, denominato SRS (Simulazione Rullaggio Simmetrico), consente sia la simulazione dell'atterraggio che quella del rullaggio, con profilo della pista assegnato tra

i dati di ingresso, tenendo conto dell'elasticità del velivolo e dei carrelli, delle caratteristiche idro-pneumatiche degli ammortizzatori, delle caratteristiche di rigidità dei pneumatici, della dinamica rotatoria delle ruote e dei grandi spostamenti degli organi mobili dei carrelli, le cui architetture possono essere scelte tra quelle del G222 e dell'ATR42/72. Il modello della struttura elastica del velivolo è basato sulla tecnica della sovrapposizione modale in "assi medi" e sviluppato sotto l'ipotesi di comportamento elastico lineare della struttura. Il modello dei moti rigidi del velivolo è non lineare e simmetrico, ovvero tiene conto dei 3 gradi di libertà (DOF): longitudinale, verticale e beccheggio. Il codice tiene conto delle forze aerodinamiche di portanza e resistenza e del momento aerodinamico di beccheggio agenti sui modi rigidi del velivolo. Il calcolo delle caratteristiche della sollecitazione viene effettuato tenendo conto delle forze dovute alle accelerazioni che si generano nella struttura nel corso della manovra, delle forze introdotte nella struttura stessa dai carrelli, delle forze propulsive, della distribuzione del peso e delle distribuzioni di portanza in ala e coda. Queste ultime vengono calcolate ripartendo sia la portanza complessiva dell'ala che quella della coda, lungo l'apertura, sulla base di "distribuzioni di portanza unitarie" costanti. Vengono invece trascurati sia gli effetti della deformazione strutturale sulle forze aerodinamiche che gli effetti delle variazioni delle forze aerodinamiche sulla deformazione elastica della struttura.

Il codice è costituito da circa 40'000 righe di fortran 77, più della metà delle quali sono dedicate alla modellizzazione dei carrelli, ed è organizzato in quattro moduli integrati il primo dei quali determina la configurazione di equilibrio al suolo del sistema velivolo-carrelli (in caso di rullaggio), il secondo effettua la simulazione numerica dell'atterraggio o del rullaggio, il terzo effettua il calcolo delle sollecitazioni sulla struttura dovute ai carichi aerodinamici e propulsivi ed alle forze introdotte dai carrelli in corrispondenza degli attacchi con la struttura, il quarto consente di effettuare analisi statistiche sui carichi, ovvero di determinare massimi, minimi e numero di attraversamenti di livelli di carico predefiniti.

Il codice è stato sviluppato per fare fronte ad esigenze di certificazione, ovvero è stato progettato in modo da consentire la taratura dei parametri dei carrelli attraverso la simulazione di "drop tests", dei quali siano noti i risultati sperimentali, ed essere poi utilizzato in ambito certificativo per il calcolo delle caratteristiche della sollecitazione in atterraggio e rullaggio. Le prove per la verifica del corretto funzionamento del codice sono state effettuate mediante confronti con risultati di drop tests sperimentali.

La metodologia utilizzata per la determinazione della configurazione di equilibrio al suolo del sistema velivolo carrelli, in condizioni di rullaggio a velocità costante, applicata nel primo dei quattro moduli sopracitati, è basata su un algoritmo sviluppato presso il DIA. Questo algoritmo, descritto in [2], consente di determinare la configurazione di equilibrio di un sistema dinamico non lineare, utilizzando, senza modifiche, i modelli sviluppati per la simulazione numerica della dinamica del sistema stesso. Ciò si realizza mediante la semplice sostituzione dell'algoritmo di integrazione numerica, utilizzato per la simulazione, con l'algoritmo descritto in [2].

3. MODELLIZZAZIONE "REAL-TIME" DEI CARRELLI

Sulla base delle esperienze sopra descritte è stato possibile, nel 1991, avviare uno studio con lo scopo di dotare il simulatore di volo del DIA di un modello della dinamica longitudinale e laterale dei carrelli. Questa attività ha portato alla realizzazione di modelli semplificati di tale dinamica [3], compatibili con una simulazione in tempo reale, che tengono conto delle forze frenanti e delle forze laterali che si generano nel contatto tra le

ruote ed il suolo e consentono di simulare gli effetti dell'angolo di sterzata, fornendo un comportamento qualitativamente realistico del velivolo nelle manovre al suolo, in decollo ed in atterraggio.

4. STUDIO E SIMULAZIONE DELLA DINAMICA DELLA FRENATA DEI VELIVOLI

Nel 1993 è poi iniziata un'attività di ricerca, tuttora in corso, sul delicato tema della frenata dei velivoli con sistemi di controllo automatici antislittamento. Questa attività ha avuto origine da un problema reale di montaggio di un sistema antislittamento su un velivolo executive di produzione italiana.

La dinamica della frenata, in campo aeronautico è complicata dalla notevole elasticità strutturale dei carrelli che porta ad indesiderati fenomeni dinamici quali il cosiddetto "gear walk", che è una violenta oscillazione longitudinale della gamba del carrello, intorno ai 20÷30 Hz, le cui cause non sono ancora note con precisione, che sembra nascere dagli accoppiamenti tra la dinamica elastica del carrello, la dinamica della ruota e dei freni e la logica di controllo del sistema antislittamento.

Questa attività ha portato inizialmente allo sviluppo di una versione prototipale di un codice per la simulazione della corsa di frenata in presenza di sistemi antislittamento [4] ma ha anche evidenziato [4, 5] come i modelli del contatto ruota-suolo sviluppati presso il DIA nell'ambito dei precedenti lavori, pur tenendo conto della dinamica rotatoria delle ruote, fossero inadatti ad analizzare fenomeni che comportano accoppiamenti dinamici ad alta frequenza, quali quelli che avvengono nell'ambito del controllo automatico della frenata. Ha inoltre evidenziato l'esistenza di notevoli lacune nelle conoscenze sul comportamento dinamico dei diversi sottosistemi coinvolti nella frenata dei velivoli. Esistono infatti non poche difficoltà per la modellizzazione degli impianti idraulici e dei freni, mentre la modellizzazione dei fenomeni dinamici che governano la generazione delle forze di contatto tra i pneumatici ed il suolo è un argomento tuttora aperto, sul quale esiste in letteratura un notevole interesse.

In particolare, in recenti lavori sono state dedotte le funzioni di trasferimento che legano la forza frenante alla velocità del mozzo, alla velocità angolare della ruota ed alla forza verticale applicata al mozzo, ma sempre linearizzando la dinamica della ruota intorno a condizioni di regime di puro rotolamento. Ai fini del progetto di sistemi di controllo automatico della frenata è invece importante conoscere queste funzioni di trasferimento nell'intorno di condizioni di regime prossime allo strisciamento, ovvero nelle condizioni nelle quali la forza frenante è massima. Inoltre, nei lavori focalizzati sulla frenata in campo automobilistico la velocità del mozzo viene in genere assunta come un parametro lentamente variabile, mentre in campo aeronautico, a causa notevole elasticità strutturale dei carrelli, questa deve essere assunta come un ingresso del "sistema ruota", al pari della coppia frenante e del carico verticale, senza limitazioni sulla frequenza.

4.1 Modellizzazione della dinamica longitudinale dei pneumatici

A seguito di quanto sopra, le attività di ricerca del DIA in questo settore si sono focalizzate sullo studio della dinamica del contatto tra la ruota gommata ed il suolo. Questi studi hanno portato allo sviluppo di un modello numerico della dinamica del contatto ruota-suolo, basato su una schematizzazione a spazzola momodimensionale del battistrada, con setole trattate come semplici elementi elastici (Fig. 1A), i cui risultati sono illustrati in un lavoro [6] presentato ad un congresso AGARD tenutosi in Canada nel 1996.

Lo stesso modello è stato poi linearizzato nell'intorno di condizioni di regime generiche, cioè condizioni stazionarie di frenata con rapporto di strisciamento qualsiasi, giungendo alla determinazione della struttura delle funzioni di trasferimento che legano le variazioni della forza frenante alle variazioni delle grandezze fisiche che definiscono il moto relativo tra il battistrada ed il suolo, cioè (Fig. 1B): distribuzione di forza verticale al suolo $f_z(y, t)$, lunghezza dell'impronta $2a$, velocità di avanzamento del centro dell'impronta rispetto al suolo v_c e velocità di avanzamento del battistrada rispetto al suolo v_s .

Quest'ultimo risultato costituisce un apporto originale alle conoscenze scientifiche sull'argomento. Le funzioni di trasferimento ottenute sono descritte in un lavoro [6] pubblicato come atto del DIA nel 1999, una cui versione ridotta¹ è stata inviata, per la pubblicazione, alla rivista "Vehicle System Dynamics" ed ha superato una prima fase di revisione.

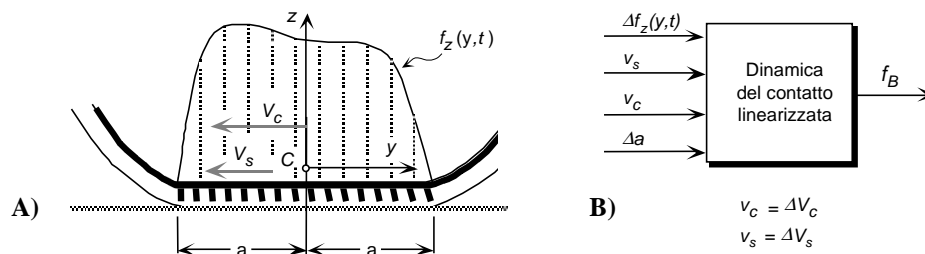


Fig. 1 - Modello a spazzola momodimensionale del battistrada nella zona di contatto (A); ingressi ed uscite del modello a spazzola linearizzato (B).

Le ricerche attuali sono concentrate sulle metodologie utilizzabili per la valutazione dei parametri che compaiono nelle funzioni di trasferimento suddette (guadagni, zeri, poli e ritardi puri), sulla base della conoscenza sperimentale delle caratteristiche di funzionamento della ruota in condizioni di frenata stazionaria. Ci si propone inoltre di determinare un modello linearizzato della dinamica dell'intero sistema "ruota-carrello elastico" che possa essere di ausilio per la sintesi di sistemi di controllo automatico della frenata in campo aeronautico.

4.2 Progetto SAMBA

Le esperienze sopra illustrate hanno consentito di ottenere, nel 1997, l'inserimento del DIA nel progetto di ricerca europeo SAMBA (Smart Actuator and Modular Braking Applications), il quale è parzialmente finanziato dalla "Commission of the European Communities (CE) - Directorate General XII" e vede la partecipazione di industrie aeronautiche (Aerospatiale, Alenia, British Aerospace Airbus, Messier-Bugatti e SABCA²), enti di ricerca ed università (Istituto Superior Tecnico di Lisbona e DIA) di cinque nazioni europee. La Messier-Bugatti è il "project co-ordinator". Il DIA partecipa in qualità di "Partner" con finanziamento interamente a carico CE.

Il progetto SAMBA è finalizzato al miglioramento delle prestazioni dei sistemi frenanti dei velivoli da trasporto attraverso la modifica della metodologia di elaborazione e

¹ Denti E., Fanteria D. "Models of Wheel Contact Dynamics: an analytical study on the in-plane transient responses of a brush model".

² Société Anonyme Belge des Constructeurs Aeronautiques.

trasmissione dati (dislocazione delle logiche di controllo in attuatori locali di tipo "smart") e attraverso l'introduzione di sistemi di controllo automatico della coppia frenante, anziché della pressione.

L'obiettivo del controllo automatico della coppia frenante è quello di modulare il segnale di comando della servovalvola in modo da mantenere direttamente la coppia frenante, anziché la pressione, il più possibile vicina al valore necessario ad ottenere l'intensità della frenata richiesta dal pilota. Ciò dovrebbe ridurre le oscillazioni della coppia frenante dovute alla natura aleatoria delle forze d'attrito sviluppate dai dischi dei freni al carbonio, con conseguente riduzione delle sollecitazioni a fatica dei carrelli e miglioramento della regolarità e dell'efficacia della frenata, della controllabilità direzionale del velivolo in frenata e del comfort dei passeggeri.

Il gruppo di ricerca del DIA è coinvolto principalmente in due attività:

- a) Analisi di vantaggi e svantaggi del controllo in coppia rispetto al controllo in pressione, mediante lo sviluppo e la successiva applicazione di un codice di simulazione numerica che consenta di confrontare le prestazioni dei due sistemi di controllo.
- b) Studio comparativo di modelli diversi di carrelli e pneumatici, utilizzabili per la simulazione della frenata. Questo studio coinvolge la modellizzazione sia longitudinale che laterale dei pneumatici, dal momento che la controllabilità direzionale del velivolo è uno dei parametri di valutazione delle prestazioni del sistema frenante.

4.2.1 Analisi dei vantaggi del controllo in coppia, rispetto al controllo in pressione

Per quanto riguarda il punto a) è stato progettato e sviluppato presso il DIA un codice, in ambiente Matlab/Simulink, denominato ABS (Aircraft Braking Simulation), che consente la simulazione della dinamica a sei DOF del velivolo rigido in rullaggio e frenata, tenendo conto dell'aerodinamica, dell'elasticità longitudinale e laterale dei carrelli (ausiliario, destro e sinistro), delle caratteristiche idro-pneumatiche ed inerziali degli ammortizzatori, delle caratteristiche di rigidità verticali e laterali dei pneumatici e della dinamica rotatoria delle ruote. Gli ingressi sono: i comandi aerodinamici (timone di profondità, alettone e timone di direzione), la spinta ed i comandi di frenata e sterzata assegnati dal pilota.

Il codice che è stato realizzato mediante due modelli Simulink, uno per la simulazione della dinamica del sistema ed uno per la determinazione della configurazione di equilibrio del velivolo al suolo, comprende modelli semplificati dell'idraulica e dei freni, nonché modelli della dinamica con cui si manifestano le forze longitudinali e laterali all'interfaccia pneumatico-suolo. Trattandosi di un codice destinato alla simulazione della frenata, e non destinato al calcolo dei carichi sul velivolo, i modelli dei carrelli sviluppati non tengono conto della reale architettura dei carrelli stessi, ma realizzano una architettura semplificata, costituita da una gamba diritta con "ammortizzatore diretto" (Fig. 2). Non è inoltre simulata la dinamica del sistema idraulico che comanda la sterzata del carrello ausiliario.

In fig. 3 è rappresentato lo schema di più alto livello del codice che è formato da otto sottomodelli principali: pilota, aereo, ruote, carrelli, trasduttore del comando di frenata, controllore (di pressione o di coppia), idraulica e freni.

Le caratteristiche del codice ed i modelli sviluppati sono descritti in [8] unitamente agli esiti di una prima attività di verifica dei risultati forniti dal codice effettuata mediante confronti con i risultati forniti dal già citato codice SRS, posto nelle medesime condizioni di funzionamento. Il confronto dei risultati con dati sperimentali è previsto in una fase successiva del progetto.

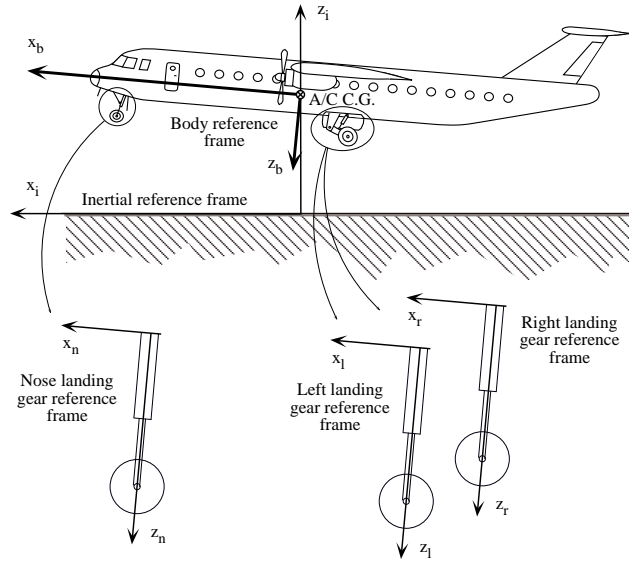


Fig. 2 – Architettura dei carrelli nel codice ABS.

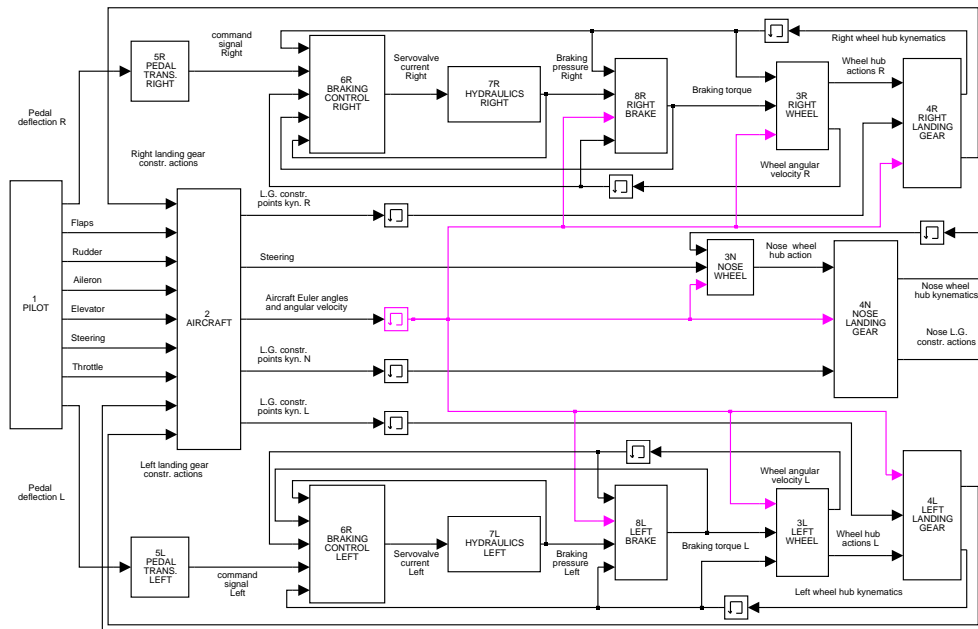


Fig. 3 – Schema simulink di alto livello del codice ABS.

Parallelamente al codice principale è stata sviluppata una versione che consente la simulazione della frenata di un solo carrello principale collegato ad un modello semplificato di velivolo (a 2 DOF). I restanti modelli sono identici a quelli del codice principale. Questa versione semplificata è stata sviluppata con l'obiettivo di provare gli algoritmi di controllo automatico della frenata prima del loro inserimento nel codice principale.

4.2.2 Studio comparativo sui modelli dei carrelli e dei pneumatici

Le attività di cui al punto b) vengono svolte in collaborazione principalmente con Alenia, British Aerospace e Messier-Bugatti.

Nell'ambito di tali attività è previsto che il DIA sviluppi modelli più completi della dinamica dei carrelli ed effettui uno studio comparativo su modelli diversi dei fenomeni che avvengono all'interfaccia pneumatico-suolo. Questi modelli verranno poi tarati sulla base di risultati di prove sperimentali disponibili presso British Aerospace e Messier Bugatti, e provati nel simulatore di frenata "in tempo reale" disponibile presso la Messier-Bugatti, allo scopo di sottoporli ad un più ampio campo di condizioni operative.

Allo stato attuale, è stato realizzato un modello di carrello basato sulla stessa architettura semplificata descritta al punto precedente ma che comprende la simulazione del fondocorsa e del precarico dell'ammortizzatore e consente quindi la simulazione di "drop tests", per la taratura dei parametri del sistema ruota-carrello mediante confronto con risultati sperimentali. Sono stati inoltre realizzati nuovi modelli della dinamica longitudinale e laterale dei pneumatici che rappresentano un miglioramento rispetto a quelli realizzati nel codice ABS ma sono relativamente semplici essendo tuttora basati sulle curve caratteristiche stazionarie dei pneumatici; gli effetti dinamici vengono valutati attraverso modelli di tipo molla-smorzatore della struttura del pneumatico e mediante termini di ritardo semi-empirici che rappresentano i ritardi tipici della dinamica del contatto. Questi modelli sono attualmente in fase di taratura e valutazione presso British Aerospace. I risultati di questa attività verranno utilizzati per una revisione critica dei modelli stessi e costituiranno la base per lo sviluppo di modelli più raffinato, eventualmente basati su schematizzazioni a spazzola del battistrada.

5. SVILUPPO DI MODELLI PER LO STUDIO DELLO SHIMMY

Recentemente è stata infine avviata una attività di ricerca sulla modellizzazione del comportamento dinamico laterale del pneumatico, con lo scopo di sviluppare modelli che consentano lo studio dei fenomeni di "shimmy" dei carrelli aeronautici in ambiente "Matlab/Simulink". Anche lo shimmy è infatti un argomento tuttora aperto, di grande interesse per il progetto dei velivoli. Questa attività prevede, come fase iniziale, uno studio approfondito dei modelli classici dello shimmy, sviluppati da Moreland e Von Schlippe nel 1941 e da Fromm nel 1954, ed un confronto delle rispettive prestazioni, per poi passare allo studio dei modelli più recenti, in genere basati su schematizzazioni "a spazzola" del battistrada simili a quello adottato presso il DIA per lo studio della dinamica longitudinale. Un primo interessante risultato di tale attività è stato l'implementazione, con esito positivo, del modello di Moreland in ambiente Simulink. I vari sottosistemi la cui dinamica è rappresentata nel modello di Moreland (pneumatico, forcella, gamba del carrello, elasticità dei vincoli, ecc.) sono stati implementati in blocchi Simulink separati, i quali sono stati poi interfacciati in un modello unico mediante il quale è stato possibile ottenere gli stessi risultati ottenuti da Moreland nel 1941.

Le porzioni dei modelli di Moreland e Von Schlippe che riguardano la dinamica del pneumatico sono stati poi realizzati, come sistemi isolati, in ambiente Simulink, con lo scopo di confrontarne il comportamento e le prestazioni. Questo studio ha consentito, tra l'altro, una riformulazione di detti modelli, in termini di funzioni di trasferimento dei vari sottosistemi che li compongono (modello della carcassa, modello del contatto battistrada-suolo, cinematica dello strisciamento), che appare notevolmente promettente in quanto consente lo studio della dinamica laterale del "sistema carrello", al variare dei parametri, mediante le moderne tecniche di analisi della dinamica dei sistemi in ciclo chiuso.

6. RINGRAZIAMENTI

L'autore tiene a ringraziare l'ing. Massimo De Marinis e l'ing. Luca Savorelli che nell'ambito delle loro tesi di laurea hanno contribuito alle attività di ricerca descritte in questo lavoro, il Sig. Stefano Mussi che sta attualmente svolgendo la sua tesi di laurea sul tema dello shimmy, l'ing. Carlo Alberto Pellacani per il suo importante contributo allo sviluppo del codice ABS nell'ambito del progetto SAMBA e l'ing. Daniele Fanteria che da diversi anni collabora con l'autore in tutte le attività di ricerca legate alle manovre al suolo del velivolo fornendo costantemente un prezioso contributo. Un doveroso ringraziamento va infine ai colleghi del gruppo di ricerca europeo SAMBA ed in particolare a Veronique Dalbin, Laure Girault, Andy Hebborn, Sanjiv Sharma ed Adrian Twitchett, senza la cui collaborazione parte delle attività descritte in questo lavoro non sarebbero risultate attuabili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Denti E., Brogi C., De Francesco L. "Dynamic Simulation and Load Prediction for a Flexible Aircraft in Taxiing, Take-off and Landing". AAAF - Proc. of the Int. Forum on Aeroelasticity and Structural Dyn., V.2, pp. 839-856, Strasbourg 1993.
- [2] Denti E. "Determinazione della configurazione di equilibrio di sistemi dinamici non lineari". In: "La ricerca e i ricercatori della facoltà di ingegneria" a cura di Pratelli, Fantozzi, Roncella - T.E.P. Editore Pisa, Feb. 1995, pag. 287-303.
- [3] De Marinis M. "Sviluppo e messa a punto di un simulatore di volo a basso costo". Tesi di Laurea - Dipartimento di Ing. Aerospaziale, U.d.S. di Pisa, marzo 1992.
- [4] Savorelli L. "Analisi e controllo della dinamica flessionale dei carrelli dei velivoli in frenata con sistemi antislittamento". Tesi di Laurea - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, U.d.S. di Pisa, lug. 1994.
- [5] Fanteria D. "Modellazione della dinamica del sistema ruota-carrello per il progetto di sistemi di controllo antislittamento in frenata". Tesi di Laurea - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, U.d.S. di Pisa, feb. 1997.
- [6] Denti E., Fanteria D. "Analysis and Control of the Flexible Dynamics of Landing Gear in the Presence of Antiskid Control Systems". in "The Design, Qualification and Maintenance of Vibration-Free Landing Gear" AGARD Report 800, 1996.
- [7] Denti E., Fanteria D. "Models and methods for the study of the in-plane transient responses of tyres". Atti del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale - ADIA 99-2. Mar. 1999.
- [8] Denti E., Fanteria D. "Towards the development of a numerical code for the simulation of aircraft braking". ADIA 98-7. Dec. 1998.