



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Fattori attentivi nella *simulator sickness*

**Dottorato di Ricerca in Neuroscienze Cognitive  
XXVI Ciclo**

Coordinatore  
Prof Fabrizio Doricchi

Tutor  
Prof.ssa Cecilia Guariglia

Candidato  
Dott Pierandrea Trivelloni

## INDICE

RINGRAZIAMENTI	pag. III
INTRODUZIONE	pag. 1
LA SIMULAZIONE DI VOLO	pag. 5
L'efficacia dei simulatori di volo	pag. 8
Il <i>Transfer of Training</i>	pag. 10
La fedeltà della simulazione	pag. 11
I DISTURBI DA MOVIMENTO (CHINETOSI)	pag. 17
Etiopatogenesi	pag. 18
Incidenza	pag. 21
Prevenzione e trattamento	pag. 22
Il programma di riabilitazione dal mal d'aria dell'AM	pag. 24
LA <i>SIMULATOR SICKNESS</i>	pag. 28
Fattori relativi al soggetto	pag. 31
Fattori relativi al simulatore	pag. 33
Fattori relativi ai <i>task</i>	pag. 40
La clinica della <i>simulator sickness</i>	pag. 40
I correlati psicologici della <i>simulator sickness</i>	pag. 43
I correlati fisiologici della <i>simulator sickness</i>	pag. 47
L'instabilità posturale	pag. 52
STUDIO SPERIMENTALE	pag. 58
ROTAZIONI MENTALI	pag. 62
PARADIGMA DI POSNER	pag. 68
<i>VISUAL SEARCH</i>	pag. 72
CONCLUSIONI	pag. 79
BIBLIOGRAFIA	pag. 87

## **RINGRAZIAMENTI**

Al termine del percorso formativo, desidero ringraziare innanzitutto la Professoressa Cecilia Guariglia, *tutor* del mio corso di dottorato di ricerca, per il coraggio e l'entusiasmo dimostrati nel concedere fiducia a un ufficiale medico dell'Aeronautica Militare, lontano dalle aule universitarie da più di venti anni, e al suo sogno di realizzare anche in Italia qualcosa che è molto comune in Europa e negli altri Paesi NATO: coniugare in un percorso di studi avanzato l'esperienza pratica e le conoscenze teoriche di una Forza Armata con il rigore scientifico e metodologico del mondo della ricerca.

Rivolgo un doveroso ringraziamento al Professore Fabio Ferlazzo, per aver reso disponibile l'*eye-tracker* utilizzato per lo studio e, soprattutto, per la sua costante disponibilità a guidarmi e sostenermi nell'analisi statistica dei risultati degli esperimenti, sicuramente favorito in questo dal comune interesse scientifico per il settore aerospaziale.

Ringrazio il Colonnello Marco Lucertini, Capo Reparto Medicina Aeronautica e Spaziale, che mi ha stimolato a inseguire il mio sogno e mi ha consentito di dedicarmi ai miei impegni di studio.

Ringrazio i colleghi del laboratorio DiViNa dell'IRCCS Fondazione Santa Lucia di Roma che hanno sopportato il periodico utilizzo di un loro dispositivo sperimentale per la raccolta dati sui soggetti arruolati per il presente studio.

Ringrazio i Marescialli Paolo Carrozzo, Gregorio Angelino, Roberto Vitalone e Francesco Piccolo, tecnici sanitari sperimentatori del Gruppo Biodinamica del Reparto Medicina Aeronautica e Spaziale, che mi hanno assistito nella raccolta dei dati sperimentali e nella conduzione delle sessioni al simulatore di volo.

Da ultimo, ma non per ultimo, un grazie alla mia famiglia che mi ha sempre sostenuto nei miei progetti di vita e lavorativi, magari non condividendoli inizialmente ma sempre rispettandoli, e che mi ha garantito, anche in questa occasione, incoraggiamento e supporto costanti.

## INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si è scritto e discusso lungamente sulla realtà virtuale, definita come un ambiente interattivo, multisensoriale, tridimensionale e generato dal computer, presentato su schermi mediante sistemi di proiezione o su apparati portatili e "indossabili" (Kim et al. 2005). I sistemi di realtà virtuale sono utilizzati in diversi settori per scopi addestrativi: con i drammatici tagli ai *budget* della difesa, della sanità pubblica e della ricerca scientifica, l'uso della tecnologia della realtà virtuale può consentire di superare le inevitabili limitazioni formative e quindi operative derivanti dalle riduzioni di bilancio effettuate. La simulazione aerea è un'area della realtà virtuale di interesse multidisciplinare: ingegneri, scienziati nel campo della fisiologia e della psicologia aeronautica, istruttori di volo operano in questo settore della scienza e della tecnologia. Purtroppo, spesso - soprattutto nel passato - ognuno di questi attori si è approcciato alla problematica con una prospettiva unica e particolare, che talvolta ha mostrato alcune criticità a integrarsi in maniera interdisciplinare per la soluzione delle diverse problematiche emergenti.

L'uso della simulazione è sempre più diffuso. Numerose professioni moderne ma anche tradizionali sono caratterizzate da una crescente complessità operativa. Al *frontline operator* è richiesto di svolgere compiti sempre più impegnativi, di coordinare le attività in modo rapido e dinamico con altri componenti di un *team*, il tutto in scenari tecnologicamente sempre più complessi e cronobiologicamente innaturali. In tali contesti, solo il *simulation-based training* (SBT) può permettere lo sviluppo delle conoscenze, abilità e atteggiamenti (*knowledge, skill, attitude* - KSA) necessarie allo svolgimento in sicurezza ed efficienza dei compiti professionali (Salas 2006). Tutte le attività umane caratterizzate da elevato rischio intrinseco di errore umano potenzialmente catastrofico, come quelle dei settori trasporti, sanità e nucleare, si stanno attrezzando per standardizzare protocolli formativi basici e

avanzati per consentire di verificare e validare in ambiente simulato la *performance* professionale richiesta, in un contesto del tutto rappresentativo del mondo reale. In campo sanitario sono sempre più comuni l'addestramento ai ruoli professionali in sala operatoria mediante tecniche di realtà virtuale; le prove simulate di *triage* con sistemi elettronici anche antropomorfi che forniscono scenari clinici aggiornati sulla base dell'efficacia o meno dell'intervento terapeutico; la cosiddetta chirurgia mini-invasiva che si avvale di sistemi robotizzati che si interfacciano tra l'operatore e il campo chirurgico ovvero di sistemi di visualizzazione che sovrappongono al campo operatorio la vascolarizzazione locale dello specifico paziente, soprattutto in campo neurochirurgico; la telemedicina, cioè tutte le pratiche sanitarie effettuate da postazioni remote per il tramite di sistemi computerizzati di trasmissione di dati clinici, studi elettrofisiologici e diagnostiche radiologiche di vario tipo (rx, eco, TAC, RMN, ecc.). Ma simulatori si utilizzano anche in campo riabilitativo fisico e neurologico, sia clinico, come negli amputati e protesizzati di guerra o nei craniolesi, che psicologico, come nel caso del PTSD<sup>1</sup>.

Sicuramente il mondo aeronautico è quello che da oltre 50 anni utilizza la realtà virtuale e la simulazione per sviluppare competenze tecniche specifiche, dall'*handling* basico dell'aeromobile, alla gestione delle emergenze di volo anche potenzialmente catastrofiche, ma anche le cosiddette competenze non tecniche, come il CRM (*Crew Resource Management*), cioè l'acquisizione della capacità di utilizzare efficacemente tutte le risorse umane e professionali per minimizzare l'errore, migliorare la sicurezza del volo e aumentare l'operatività e la *performance*. L'utilizzo dei simulatori di volo, o comunque l'esposizione degli esseri umani alla realtà virtuale mediante l'ausilio di apparati di immersione come gli HMD (*Head/Helmet Mounted Display*) e i guanti aptici o la semplice esposizione a condizioni di realtà aumentata mediante HUD (*Head*

---

<sup>1</sup> PTSD: *Post Traumatic Stress Disorder*.

*Up Display*) determina la comparsa di una condizione di *distress* e/o *discomfort* denominata *cyber-sickness* o *simulator sickness*, in relazione agli specifici dispositivi utilizzati. Dai primi studi della fine degli anni 50 (Havron & Butler, 1957) a oggi la problematica è stata affrontata con varie modalità, metodologie e prospettive, ma nessuna ha realmente individuato reali ed efficaci contromisure. La letteratura scientifica si limita alla descrizione della fenomenologia clinica della sindrome, affronta le diverse problematiche tecniche e tecnologiche che possono essere alla base della sindrome o che ne accentuano l'intensità del *discomfort* e viene quasi da pensare, riprendendo il titolo del lavoro di Young et al. (2007) "[...] *does taking a motion sickness questionnaire make you sick?*", cioè che la *simulator sickness* sia una sindrome "iatrogena", determinata dalla medicalizzazione del mondo dei simulatori e non costituisca una effettiva problematica per la sicurezza e la salute dei lavoratori esposti. In realtà, la sindrome è un limite obiettivo per l'impiego del personale navigante nei simulatori per il *discomfort* che genera e che può determinare l'interruzione della sessione addestrativa ma ancor di più, a causa dei riportati *after-effect*, rappresenta una pesante limitazione al successivo svolgimento di operazioni di volo reali per gli effetti disorientanti che produce e che determinano un'impennata della matrice di rischio della missione operativa.

Pertanto, nella presente ricerca, allo scopo di meglio comprendere alcuni aspetti della sindrome, è stato definito un disegno sperimentale che investigasse specificamente su uno dei settori sintomatologici della *simulator sickness*, il *cluster* oculomotorio, per approfondire con metodologie di tipo psicofisiologico e neuropsicologico i sintomi che lo caratterizzano, cercando di svincolarli dall'astenopia accomodativa, che troppo spesso viene banalizzata in termini di fatica oculare, cioè sensoriale (*eye-straining*), cercando invece di individuare parametri che ne identifichino la natura di fatica visiva, afferente quindi all'area della fatica cognitiva, o quantomeno percettiva, considerata

proprio la natura percettiva dei movimenti oculari. Tale ipotesi, qualora confermata dalla sperimentazione, rappresenterebbe un importante segnale di attenzione e precauzione da trasmettere alle diverse organizzazioni che utilizzano la simulazione per scopi addestrativi, in quanto lo svolgimento di attività lavorativa reale dopo quella simulata potrebbe esporre l'operatore a rischio per lo stato di affaticamento già sviluppato durante la simulazione.

La tesi presenterà preliminarmente una introduzione dedicata alla simulazione di volo, con particolare riferimento all'efficacia della simulazione, al *transfer of training* (ToT) e alla fedeltà della simulazione.

Quindi si introdurrà brevemente l'argomento dei disturbi da movimento (chinetosi), descrivendone le teorie etiopatogenetiche, l'incidenza, le strategie di prevenzione e di trattamento e infine presentando il protocollo di riabilitazione dal mal d'aria sviluppato in Aeronautica Militare dal Reparto Medicina Aeronautica e Spaziale del Centro Sperimentale Volo.

Successivamente, prima di esporre la parte sperimentale, sarà presentata una *review* critica della letteratura scientifica sulla *simulator sickness*, focalizzata soprattutto sugli studi epidemiologici condotti, sulla fenomenologia clinica e sui correlati psicologici e fisiologici.

Infine, nella parte sperimentale, saranno presentati metodi, risultati e discussione sui tre esperimenti condotti, finalizzati a trovare un nuovo approccio integrato e interdisciplinare tra la fisiologia, la psicofisiologia e la neuropsicologia allo studio del *cluster* oculomotorio della *simulator sickness*, inteso quale espressione di impegno cognitivo, o quantomeno percettivo, piuttosto che di astenopia accomodativa.

## LA SIMULAZIONE DI VOLO

La prima definizione di simulatore di volo è attribuita da Rolfe & Staples (1986) a Dorothy M. Haward che, nel 1910, descrisse sulla rivista Flight, "il primo settimanale aeronautico del mondo" e organo ufficiale del Royal AeroClub del Regno Unito, il "*Sanders Teacher*" come "un apparato che consentirà al principiante di acquisire un'idea chiara del funzionamento dei controlli di volo di un aeromobile [...] senza alcun rischio per sé o per gli altri". I primi simulatori di volo furono sviluppati proprio in quegli anni, rudimentali sistemi addestrativi che prevedevano esclusivamente di contrastare le variazioni di assetto del simulacro del cockpit generate meccanicamente dall'istruttore, mediante l'azionamento di barre trasversali esterne che intendevano simulare le ali (Adorian et al. 1979). L'origine dei moderni simulatori di volo a base mobile è attribuita a Edward Link che, nel 1929, brevettò il cosiddetto "*blue box*" *link trainer*. Si trattava di un simulacro di aeromobile installato su una base mobile su tre gradi di libertà (*pitch*, *roll*, *yaw*)<sup>2</sup>. All'interno, la strumentazione di volo forniva indicazioni di assetto coerenti con quelle reali del simulatore, la cui base mobile era azionata mediante un sistema ad aria compressa. Il presupposto addestrativo di Link era che il simulatore dovesse fornire un *setting* operativo il più possibile simile a quello reale. Solo alla fine della Seconda Guerra Mondiale la simulazione di volo sviluppata per motivi militari fu applicata anche all'aviazione civile, soprattutto per effettuare la transizione operativa dei piloti sui nuovi velivoli (Loesch 1979).

Con la sempre maggiore complessità tecnologica degli aeromobili nacque l'esigenza di simulatori specifici, cioè di sistemi esattamente rappresentativi dei velivoli, compresa la configurazione degli strumenti di volo, la *performance* di volo e la gestione dei comandi di volo. Proprio quest'ultima caratteristica

---

<sup>2</sup> Le tre modalità di traslazione di un aeromobile ad ala fissa sono *pitch*, rotazione intorno all'asse trasversale y; *roll*, rotazione intorno all'asse sagittale x; *yaw*, rotazione intorno all'asse verticale z.

risultò la più difficile da realizzare e solo con lo sviluppo della tecnologia elettro-meccanica e dell'industria aeronautica, negli anni 70, furono progettati i primi simulatori di volo a base mobile. E' in questa fase che i simulatori di volo entrano a far parte di complessi e sofisticati sistemi addestrativi integrati, dando l'impulso alla ricerca scientifica nel settore della psicologia aeronautica per dimostrare l'efficacia del metodo o sviluppare sistemi sempre più avanzati (Koonce 1994). Nel tempo, dunque, le caratteristiche costruttive e l'impiego dei simulatori di volo si sono evolute significativamente: oggi, per esempio, non sono utilizzati esclusivamente per l'addestramento iniziale ma anche e soprattutto per la transizione operativa su nuovi velivoli di piloti già esperti.

Cardullo (1994) classifica i simulatori di volo militari in tre categorie:

- *operational flight trainer*, definito anche *full mission simulator* (FMS), capace di addestrare l'equipaggio in tutti gli aspetti del volo, compresi la navigazione, la gestione dei sistemi e le comunicazioni;
- *weapon system trainer* (WST) per la familiarizzazione e l'addestramento all'uso dei sistemi d'arma offensivi o difensivi;
- *part task trainer* (PTT), per l'addestramento di specifiche funzioni o compiti del volo (gestione delle emergenze, procedure standard, rifornimento in volo).

In ambito civile, secondo la Federal Aviation Administration (FAA)<sup>3</sup> si può considerare come simulatore di volo esclusivamente una replica in dimensioni reali del *cockpit* di uno specifico velivolo, inclusa la strumentazione, i comandi di volo, il sistema di computer necessari per generare il movimento della piattaforma mobile e la grafica del sistema visivo *out-of-the-window* (OTW)<sup>4</sup>. I

---

<sup>3</sup> Ente federale per l'aviazione civile statunitense, autorità di regolazione, controllo, vigilanza, certificazione e disciplina degli aspetti tecnici, amministrativi e finanziari del sistema del trasporto aereo e dell'aviazione civile.

<sup>4</sup> Airplane Simulator Qualification (AC120-40C, 1995): "A full-size replica of a specific type or make, model and series airplane cockpit, including the assemblage of equipment and computer programs necessary to represent the airplane in ground and flight operations, a visual system providing an out-of-the-cockpit view, and a force-cueing system".

simulatori così descritti dalla FAA vengono suddivisi in quattro categorie, sulla base della loro complessità tecnologica: tutti i simulatori devono avere una base mobile almeno su tre gradi di libertà; le categorie A e B devono essere dotate di un sistema OTW con un campo visivo di almeno 45° orizzontali e 30° verticali; la categoria C deve avere un sistema OTW con capacità notturne e un campo visivo minimo di 75° orizzontali e 30° verticali; la categoria D deve consentire operazioni di volo sia diurne che notturne, senza soluzione di continuità temporale, attraverso un sistema OTW con un campo visivo minimo di 150° orizzontali e 75° verticali. Oltre ai simulatori propriamente detti sono previsti dalla FAA anche i *Flight Training Devices* (FTD)<sup>5</sup>, suddivisi in sette categorie e che possono non essere dotati di *motion* e di OTW, e i *Personal Computer-based Aviation Training Devices* (PCATD) (Koonce 1998).

Ma perché tanto interesse per la simulazione? Perché la simulazione è sempre più necessaria non solo per l'addestramento degli operatori coinvolti in attività professionali caratterizzate da elevato rischio intrinseco di errore umano con conseguenze catastrofiche (piloti, medici, addetti alle centrali nucleari), ma anche per la verifica del mantenimento delle specifiche competenze professionali degli stessi operatori. La simulazione è diventata oggi parte integrante anche dei processi di ricerca e sviluppo (*Research & Development*, R&D) e di *test* e valutazione (*Test & Evaluation*, T&E) industriali. La possibilità di effettuare il *download* dei registratori di bordo dei velivoli reali di tutte le informazioni strumentali e i relativi *input* esercitati sui comandi di volo dall'equipaggio, oltre che tutte le comunicazioni intra- ed extra-*cockpit* effettuate, e quindi di procedere con l'*upload* sul simulatore specifico dell'aeromobile, consente oggi anche la ricostruzione in laboratorio degli

---

<sup>5</sup> Airplane Flight Training Device (AC120-45E, 1994): "A full scale replica of an airplane's instruments, equipment, panels and control in an open flight deck area or in an enclosed aircraft cockpit, including the assemblage of equipment and computer software programs necessary to represent the airplane in ground and flight conditions [...]; it does not require force (motion) cueing or visual system".

incidenti di volo ai fini della identificazione delle cause (da fattore tecnico o da fattore umano) e delle raccomandazioni di prevenzione da emanare perché l'evento non si ripeta.

Senza alcun dubbio il principale campo di applicazione della simulazione è l'addestramento, ma oggi trova un impiego sempre più diffuso anche nel campo dei fattori umani e della gestione delle risorse umane in campo aeronautico (Jentsch 1998), per la capacità di studiare l'interfaccia uomo-macchina e quindi la trasmissione di informazioni dai sistemi computerizzati al sistema percettivo e cognitivo umano, di valutare la *performance* umana proprio durante l'espletamento dei compiti, attraverso la quantificazione del *workload*, delle abilità psicomotorie, dei processi decisionali e del *task-shifting* (Farmer 1999). Rimane ancora un'area di criticità, rappresentata dalla incompleta integrazione tra le diverse anime del mondo della simulazione: i progettisti, che definiscono le caratteristiche HW e SW dei simulatori, sulla base delle capacità di sviluppo tecnologico; gli utenti, cioè istruttori e allievi, che definiscono le competenze tecnico-professionali da sviluppare; il mondo della ricerca scientifica (con approccio interdisciplinare) che definisce il modo di sviluppare tali competenze tecnico-professionali e i sistemi di valutazione dell'apprendimento.

### **L'efficacia dei simulatori di volo**

Con Moroney & Moroney (2010) si può affermare che i simulatori di volo, come tutti gli strumenti addestrativi e formativi, sono caratterizzati da vantaggi e svantaggi. Tra i vantaggi dell'uso dei simulatori è la loro disponibilità 24/7, cioè la possibilità di utilizzo senza soluzione di continuità temporale e senza limitazioni di ordine meteorologico o climatico. Un altro vantaggio è rappresentato dalla possibilità di addestrare il personale di volo nella gestione delle avarie di bordo catastrofiche, altrimenti impossibili da realizzare sul velivolo reale. I più moderni e avanzati velivoli, dotati di comandi

di volo di tipo *fly-by-wire*<sup>6</sup>, integralmente gestiti da complessi computer di bordo, non consentono infatti tale fondamentale fase addestrativa e richiedono pertanto (Wiener & Nagel 1988) la disponibilità di un simulatore specifico ove generare i malfunzionamenti e sviluppare quindi gli appropriati *skill* di gestione delle emergenze di volo. Secondo Stark (1994) i simulatori consentono di raccogliere una grande mole di dati relativi al confronto della *performance* tra soggetti diversi sul medesimo profilo di volo e nello stesso soggetto rispetto agli *standard* addestrativi richiesti, alla valutazione dell'efficacia addestrativa attraverso l'analisi della *performance* degli allievi, alla valutazione della *performance* attraverso l'individuazione di parametri di accuratezza e tempestività nell'esecuzione dei compiti durante il pilotaggio. L'uso dei simulatori di volo consente inoltre di risparmiare ore di volo del velivolo reale, con conseguente economia sui costi di gestione e di manutenzione della linea operativa.

Tra gli svantaggi deve essere innanzitutto segnalato che la *performance* al simulatore di un soggetto può essere non totalmente rappresentativa di quella dello stesso soggetto sul velivolo reale. Insufficiente motivazione, eccessiva *overconfidence* nel simulatore, indotte dal ritenere priva di rischi la condotta della missione simulata, possono generare un atteggiamento negligente o quantomeno disinteressato o distratto nell'allievo. Per tale ragione, almeno nella realtà addestrativa dell'Aeronautica Militare, le sessioni al simulatore sono sempre valutative, essendo l'allievo sottoposto alla verifica da parte di un istruttore di volo. Un altro svantaggio è rappresentato dall'elevato costo iniziale degli apparati, soprattutto di quelli dotati di base mobile e di sistema visivo OTW ad ampio raggio (tipo *dome*). Tuttavia tale svantaggio risulta facilmente ammortizzabile con un uso estensivo dell'apparato stesso. Ultimo

---

<sup>6</sup> Sistema *fly-by-wire*: sistema di controllo degli aeromobili in cui il collegamento tra i comandi di volo e gli attuatori meccanici (alettoni, timone di coda, *flaps*, ecc.) non è realizzato mediante connessioni meccaniche, ma informatiche. Cioè l'*input* sui comandi di volo da parte del pilota, prima di essere trasmesso agli attuatori viene elaborato e computato dai computer di bordo.

ma non trascurabile svantaggio derivante dall'uso dei simulatori di volo è la *simulator sickness*, di cui si parlerà diffusamente nei capitoli successivi, e che può risultare un fattore limitante il completamento di una sessione al simulatore, per l'insorgenza della sindrome clinica che la caratterizza, o può rappresentare una controindicazione all'effettuazione immediatamente successiva di una missione di volo reale a causa della comparsa degli *after-effect*. Complessivamente, tuttavia, sempre con Moroney & Moroney (2010), si può affermare che i vantaggi superano nettamente gli svantaggi (reali o percepiti) in termini di validità dell'addestramento e applicabilità, in termini di sicurezza del volo e in termini di possibilità di studi e ricerche nel settore dei fattori umani e della *performance* umana nello svolgimento di attività lavorative caratterizzate da impegno cognitivo e psicomotorio complesso.

### **Il *transfer of training***

L'addestramento è un cambiamento sistematico dei comportamenti realizzato attraverso l'istruzione, la dimostrazione, l'esercizio guidato e la verifica (Salas et al. 1998). Lo scopo è di insegnare all'allievo la capacità di eseguire compiti precedentemente non possibili o caratterizzati da livelli di abilità e competenze precedentemente non raggiungibili. L'addestramento al pilotaggio prevede l'uso di diverse risorse umane e tecnologiche tra cui il personale istruttore, il velivolo addestrativo, i simulatori FMS o PTT del velivolo, le lezioni frontali, ecc. La simulazione di volo costituisce un componente fondamentale in molti settori o sottosettori dell'addestramento al pilotaggio. In ambito militare o civile, sia commerciale che dell'aviazione generale, l'uso della simulazione per addestrare in compiti è sempre più diffuso: dalla gestione basica dei comandi di volo (Stark 1989), alle manovre da combattimento aereo (Bell & Waag 1998), all'addestramento IFR<sup>7</sup> (Ortiz 1994), al *decision making* aeronautico (Connolly et al. 1989), alle procedure di CRM (Wiener et al. 1993). Oggi, anche nell'*iter* addestrativo degli allievi pilota presso le Scuole di Volo

---

<sup>7</sup> IFR: *Instrumental Flying Rules*.

dell'Aeronautica Militare, i simulatori di volo sono integrati in un sistema formativo complesso<sup>8</sup> (*integrated training system*, ITS), costituito almeno dai seguenti sottosistemi:

- sottosistema di formazione teorica *computer-based* con metodologia sia frontale sia a distanza, mediante tecnologia *e-learning*;
- sottosistema di simulazione, che comprende sia *full mission simulator* che *part task trainer*;
- sottosistema di volo reale sul velivolo addestratore;
- sottosistema *computer-based* di gestione della missione pre- e post-volo, rispettivamente per la fase di pianificazione e di valutazione analitica.

Il *transfer of training* (ToT), con Blaiwes et al. (1973), è l'obiettivo fondamentale dell'addestramento, cioè l'acquisizione di KSA (*knowledge, skill, attitude*) durante il programma formativo, la loro applicazione nelle condizioni di impiego reale e il loro mantenimento per tutta la durata dell'impiego operativo. Questo processo di acquisizione di competenze tecniche può essere distinto in positivo e negativo. Il ToT positivo come detto è l'obiettivo finale di ogni processo addestrativo e nello specifico della simulazione di volo consiste nello sviluppo di KSA all'interno del simulatore e il loro trasferimento e applicazione nelle missioni di volo reali; il ToT negativo si verifica quando KSA pre-esistenti interferiscono con l'esecuzione di una adeguata *performance* in un compito o situazione differenti (*habit interference* secondo Chapanis 1996).

Allo scopo di fornire un indicatore obiettivo dell'efficacia addestrativa di un simulatore, Povenmire & Roscoe (1971) suggerirono l'adozione del cosiddetto *transfer effectiveness ratio* (TER) quale indicatore obiettivo del ToT, rappresentato dal rapporto tra il tempo risparmiato sul velivolo reale e il tempo trascorso nel simulatore di volo. Il TER, e le sue successive varianti, è quindi

---

<sup>8</sup> Concetto di impiego del velivolo T-346A (Stato Maggiore Aeronautica; 2013).

un parametro numerico che cerca di esprimere in maniera quantitativa e ripetitiva l'efficacia addestrativa di un simulatore. Questa in realtà rappresenta il *key-element* della simulazione aerea e la sua misurazione è ben più complessa e non può limitarsi esclusivamente all'espressione del tempo o dei costi risparmiati (Bandhuin 1987), ma deve esplorare ben altre aree, tra cui sicuramente quelle della acquisizione di KSA, della *performance* operativa e dell'errore umano in ambito lavorativo (Moroney & Moroney 2010).

### **La fedeltà della simulazione**

Come riportato precedentemente a proposito di vantaggi e svantaggi dei simulatori, l'elevato costo iniziale dei modelli più avanzati, soprattutto militari o di livello D della classificazione della FAA, è spesso giustificato dalla necessità di sviluppare sistemi addestrativi integrati che forniscono scenari operativi il più possibile simili a quelli reali. La fedeltà della simulazione diviene pertanto un elemento fondamentale nella valutazione dell'efficacia di un simulatore e della sua capacità di generare ToT positivo. Alessi (1988) cita diversi tipi di fedeltà di un simulatore: strumentale, ambientale, fisica, cognitiva, psicologica, funzionale, operativa. Hays & Singer (1989) definiscono la fedeltà della simulazione come il grado di somiglianza tra il contesto addestrativo e quello operativo reale che viene simulato. La somiglianza è riferita a due sole dimensioni: quella delle caratteristiche fisiche, cioè visive, uditive, aptiche, cinestesiche, ecc.; e quella delle caratteristiche funzionali, cioè la presentazione delle informazioni, la risposta agli stimoli, lo scenario addestrativo. Anche Kaiser & Schroeder (2003) limitano la fedeltà di un simulatore a due categorie: la fedeltà fisica, rappresentata dalle caratteristiche strutturali e costruttive del sistema (sistema video OTW, sistema audio, base mobile, strumentazione e comandi di volo); e la fedeltà cognitiva, espressa dalla capacità del simulatore di replicare nell'allievo gli stessi processi cognitivi del volo reale (risorse attentive, processi decisionali, *workload* mentale).

La comunità della simulazione aerea, rappresentata - come detto precedentemente - dai progettisti, dagli utenti e dall'area della ricerca ergonomica, è divisa su due posizioni estreme, a proposito della fedeltà della simulazione e della sua capacità di sviluppare un adeguato ToT: i primi supportano la tesi che la simulazione debba essere la più realistica possibile e che pertanto debba essere realizzata la più elevata fedeltà fisica; gli altri identificano nella fedeltà funzionale il *key-element* del successo della simulazione aerea.

Secondo la teoria di Fitts (1962) sullo sviluppo di *skill* professionali in ambiti operativi complessi - particolarmente apprezzata in ambito aeronautico - si distinguono tre fasi addestrative: cognitiva, associativa e autonoma. Nella prima fase, l'allievo cerca di comprendere il compito, la risposta richiesta, la procedura prevista per generare la risposta e identifica gli elementi fondamentali del compito. In questa fase l'approccio addestrativo è basato sull'istruzione teorica e sulla dimostrazione da parte dell'istruttore. Nella seconda fase, l'allievo inizia a integrare gli *skill* acquisiti nella fase precedente, riduce gli errori e aumenta l'identificazione personale degli stessi, e comincia a riconoscere elementi comuni a situazioni diverse. In questa fase l'approccio addestrativo si basa fundamentalmente sull'esercizio e sull'esecuzione in prima persona dei compiti. Nella terza fase, la *performance* dell'allievo diviene integrata, gli automatismi (cioè le *routine* cognitive) sono ormai ben strutturati e consolidati e, pertanto, il *workload* mentale risulta ridotto, al punto che è possibile eseguire un compito ormai consolidato mentre si acquisisce un nuovo *skill*.

Sempre a proposito di fedeltà della simulazione, è ancora molto acceso il dibattito scientifico sulla necessità che il simulatore di volo sia dotato o meno di base mobile. La premessa fondamentale alla problematica è se sia veramente necessario decuplicare la spesa iniziale per l'acquisizione di un simulatore di volo a base mobile su 6 gradi di libertà o se siano piuttosto

sufficienti sistemi addestrativi più semplici ed economici come i *Flight Training Devices* (FTD), o addirittura i *Personal Computer-based Aviation Training Devices* (PCATD). Questi ultimi, secondo Dennis & Harris (1998), possono fornire risultati positivi nelle fasi davvero iniziali di addestramento al pilotaggio di personale totalmente inesperto, a condizione di utilizzare interfacce di controllo realmente rappresentative dei comandi di volo standard dell'aeromobile, cioè il volantino (o lo *stick*) e la pedaliera, indicando che, anche senza sviluppare gli *skill* psicomotori, il *computer-based training* (CBT) fornisce un'adeguata familiarizzazione con il contesto operativo aeronautico, iniziando a sviluppare i *template* cognitivi necessari per l'esecuzione dei compiti effettivi del pilotaggio. Tuttavia, è opportuno segnalare preliminarmente un aspetto metodologico relativo alla letteratura scientifica sul ToT: la gran parte di essa si basa su esperimenti condotti con la metodica dello *pseudo-transfer*, anche definito *quasi-transfer* o *in-simulator transfer* (Lintern et al. 1990). Il raffronto e quindi la valutazione dell'efficacia addestrativa di un simulatore di volo viene effettuata non comparando un simulatore specifico con il corrispettivo velivolo reale, ma raccogliendo dati di *performance* su soggetti che volano simulatori diversi (per tipologia o modalità di generazione del movimento della base) nella fase pre- e post-*training* o il medesimo simulatore prima in modalità statica e poi in modalità dinamica (Lintern 1991). Indubbiamente, tale metodo sperimentale (Taylor et al. 1993), per quanto economico (perché non richiede l'utilizzo del velivolo reale e consente di rispettare la pianificazione temporale delle sedute sperimentali, indipendentemente da eventuali avverse condizioni meteorologiche e fatte salve eventuali inefficienze tecniche) e sicuro (proprio perché condotto su simulatori di volo e non su velivoli reali, dovendo magari ricorrere a monitoraggi psicofisiologici dei soggetti di studio), inserisce di fatto un *bias* nel *setting* sperimentale e uno scostamento dall'obiettivo finale che si intende verificare. Con questa premessa, le due meta-analisi più recenti pubblicate (Valden &

Hall 2005, de Winter et al. 2012) sostengono che la fedeltà fisica generata dai simulatori a base mobile su 6 gradi di libertà fornisce solo un lieve effetto positivo sul ToT dell'allievo ma a condizione che il *pattern* di movimento del simulatore sia effettivamente fedele e ben accoppiato con le immagini presentate sull'OTW, e che la fedeltà fisica di movimento del simulatore è fondamentale sui simulatori di elicottero e in caso di addestramento in condizioni di turbolenza, di assetti inusuali, di *windshear*<sup>9</sup>, situazioni in cui la corretta percezione dell'orientamento spaziale dell'aeromobile è fondamentale per una pronta e corretta applicazione delle procedure di rimessa dell'aeromobile. Sebbene nell'area del *crew coordination* anche l'uso di simulatori generici e a base fissa, o addirittura *Personal Computer-based Aviation Training Devices* (PCATD) non produce effetti negativi dal punto di vista dell'efficacia addestrativa (Bowers 1992, Baker 1993, Jentsch 1998), va sottolineato che l'obiettivo dei *multi-crew coordination course* (MCC) non è tanto quello di sviluppare *skill* tecnico-professionali relativi all'*handling* dell'aeromobile, ma piuttosto comportamenti e atteggiamenti assertivi nell'ambito del *team* rappresentato dall'equipaggio al suo completo e quindi anche un sistema a bassa fedeltà fisica può costituire un adeguato *hardware*, se supportato da una ben strutturata fedeltà funzionale, in questo caso psicologica (Koonce 1998).

Viceversa, in ambito militare, nonostante la scarsità di studi di pubblico dominio (Kellogg 1980, Kelly 1988, Bell & Waag 1998), l'uso del simulatore di volo è ritenuto che generi sicuramente un ToT positivo in termini di impiego dei sistemi d'arma, di accuratezza dell'attacco al suolo e dello sgancio del carico bellico, di evitamento delle minacce sia aeree che terrestri. Questo perché negli studi sono stati utilizzati simulatori specifici di velivoli militari che

---

<sup>9</sup> Il *windshear* è l'improvvisa variazione della velocità o della direzione del vento, comprese le correnti ascendenti o discendenti, che può determinare il repentino cambio di assetto e/o di quota di un aeromobile, condizione particolarmente pericolosa se si manifesta in fase di decollo o atterraggio (ICAO, Circ. 186/1987).

soddisfacevano pertanto il requisito di fedeltà fisica, anche se la metodologia sperimentale è risultata essere comunque quella del quasi-*transfer*.

Infine, non può essere sottaciuta la problematica della *simulator sickness*: nonostante la comunità scientifica sia orientata a sostenere la non necessità di un'accentuata fedeltà fisica ai fini di un adeguato ToT, coerentemente con la teoria di Reason & Brand (1975) del *mismatch* sensoriale, stimoli di movimento attuali non coerenti con quelli attesi/previsti sulla base delle precedenti esperienze di movimento avviano la risposta da *discomfort* che caratterizza le chinetosi. Proprio la *simulator sickness* può risultare causa di ToT negativo, riducendo la permanenza nel simulatore dell'allievo per il manifestarsi del *discomfort* e allungando la durata della fase addestrativa, oppure generando atteggiamenti o comportamenti errati, finalizzati a minimizzare l'entità della sintomatologia clinica della *simulator sickness*, che costituisce pertanto non solo un ostacolo alla piena l'efficacia addestrativa dei simulatori di volo, ma anche un potenziale pericolo per la sicurezza del volo per il *transfer* attitudinale negativo sviluppato.

## **I DISTURBI DA MOVIMENTO (CHINETOSI)**

Tutti i mezzi di trasporto, terrestri, marittimi e aerei, sono capaci di generare stimoli potenzialmente nauseogenici in soggetti non adattati, ma il disturbo può insorgere anche durante le missioni spaziali, o in caso di esposizione alla realtà virtuale, e quindi nei simulatori di volo. I disturbi da movimento (chinetosi) sono sindromi cliniche caratterizzate da pallore cutaneo, sudorazione, nausea e vomito, ma accompagnate anche da altri sintomi secondari quali scialorrea, eruttazione, sonnolenza, apatia, *discomfort* generale, cefalea, instabilità posturale (Graybiel 1968). In aggiunta a questi sintomi clinici, sia in laboratorio che in vivo, si apprezza un peggioramento nell'esecuzione di compiti cognitivi e psico-motori (Graybiel 1969). I sintomi chinetosici possono essere distinti in due categorie: quelli riconducibili a una disfunzione del sistema vestibolare, come il nistagmo e l'instabilità posturale, e quelli riconducibili a una disfunzione del sistema neurovegetativo ovvero a un'alterazione della bilancia simpato-vagale (Graybiel 1969). Negli anni successivi, è stata descritta da Graybiel & Knepton (1976) una nuova manifestazione della chinetosi, che può rappresentare da sola l'unica espressione del disturbo. Tale condizione è definita *sopite syndrome*, perché caratterizzata esclusivamente da fenomeni cognitivi e comportamentali, come la difficoltà a richiamare dalla memoria informazioni, l'elevata incidenza di errori, la demotivazione e la riduzione del tono dell'umore. Una particolarità della sindrome è rappresentata dalla sua persistenza anche dopo un adeguato periodo di sonno, mentre il trattamento con farmaci antichinetosici, che notoriamente sono caratterizzati da effetti collaterali sfavorevoli di tipo narcolettico, determinano un paradossale miglioramento nell'esecuzione dei compiti. Ciò che deve essere puntualizzato è che i disturbi da movimento sono un fenomeno fisiologico che si sviluppa a seguito dell'esposizione a un movimento inusuale (reale o virtuale) e sufficientemente prolungato in un soggetto non ancora adattato al movimento stesso (Oosterveld 1995).

Diviene un problema di ordine clinico, che può richiedere anche un trattamento farmacologico, solo per la tipologia di risposta da *distress* che genera e per la sua entità fenomenologica: è lo stimolo a essere anormale, non è il soggetto a essere "ammalato". Proprio per questa ragione, le chinetosi sono classificate da Brandt (1991), nella sua monografia sulle vertigini, tra le cosiddette vertigini "fisiologiche". Inoltre, gli unici soggetti non suscettibili alle chinetosi risultano essere quelli privi (anatomicamente o anche solo funzionalmente) del sistema vestibolare bilateralmente: tali soggetti nei test provocativi a terra e nei test in microgravità simulata mediante voli parabolici non manifestano alcun fenomeno clinico riferibile ai disturbi da movimento (Miller et al. 1969).

### **Etiopatogenesi**

Come detto precedentemente, la chinetosi insorge per effetto dell'esposizione di un soggetto non adattato a un movimento inusuale. Proprio il riferimento allo stimolo di movimento inusuale rappresenta la base razionale della teoria di Reason & Brand (1975) sull'etiopatogenesi delle chinetosi. Secondo gli Autori, il movimento produce un *pattern* di attivazione neurale nei diversi sistemi sensoriali che forniscono informazioni relative all'orientamento e al movimento del corpo nello spazio (sistemi visivo, vestibolare e propriocettivo) che afferiscono, in parallelo, in un deposito percettivo neurale di tutti i *pattern* sensoriali pregressi derivanti dal movimento e in un cosiddetto *comparator*. Quest'ultimo, confronta il *pattern* di movimento attuale con quello atteso/previsto sulla base delle pregresse esperienze di movimento, immagazzinate nel deposito neurale. Se le percezioni attuali sono in armonia con il modello neurale interno, cioè se coincidono con il *pattern* sensoriale atteso, perché precedentemente immagazzinato, il sistema rimane in equilibrio e non si genera alcun disturbo. Se invece le informazioni provenienti dagli organi di senso sono discrepanti con il modello interno, cioè in presenza di un *mismatch* sensoriale tra l'evento attuale e quello atteso, emerge dal

*comparator* un segnale alterato che determina la comparsa della chinetosi, ma consente al contempo, anche l'avvio del processo di adattamento al movimento e quindi la successiva scomparsa della chinetosi. Tuttavia questo processo adattivo non è immediato e la sua durata varia significativamente tra la popolazione e in rapporto allo stimolo provocativo. La teoria di Treisman (1977), nota anche come teoria evolutiva delle chinetosi, enfatizza la dipendenza di un organismo, per il coordinamento di tutte le forme di movimento corporeo, da *input* sensoriali multipli (visivi, vestibolari e propriocettivi). Queste fonti di informazione relative alla posizione e al movimento del corpo sono monitorate continuamente e simultaneamente e i loro rapporti, derivanti dalle pregresse esperienze di movimento, devono essere coerenti tra loro al fine di rendere possibili i movimenti coordinati. Nel passato, quando la traslazione degli esseri umani si basava esclusivamente sul movimento autoindotto, l'unico modo per disturbare la correlazione tra i diversi *input* sensoriali, cioè per generare un conflitto sensoriale (sia intra- che inter-sensoriale) era attraverso l'ingestione di sostanze neurotossiche. Tali sostanze producono effetti che coinvolgono l'interazione dei sistemi visivo, vestibolare e propriocettivo, effetti che agiscono come un segnale d'allarme precoce, protettivo per l'individuo perché, attraverso l'eliminazione con il vomito della sostanza neurotossica, aumenta la capacità di sopravvivenza del soggetto stesso. Il conflitto sensoriale generato dalle neurotossine rappresenta quindi un importante passaggio evolutivo perché aumenterebbe la sopravvivenza dell'individuo capace di eliminare la neurotossina con il vomito. In altre parole, vomitare per effetto di *input* sensoriali conflittuali ha un valore evolutivo per l'organismo. Secondo la teoria di Treisman pertanto "la chinetosi è una risposta adattiva provocata da uno stimolo inappropriato". Le due teorie vengono confermate da due osservazioni: l'incidenza e la gravità della chinetosi sono strettamente correlate alle caratteristiche di magnitudo e di durata delle accelerazioni a cui è esposto il soggetto, essendo il sistema

vestibolare l'accelerometro naturale per i vettori sia lineari che angolari; e inoltre l'assenza anatomica o funzionale del sistema vestibolare rende i soggetti refrattari alle chinetosi. Tuttavia la chinetosi può essere determinata anche dalla presenza esclusiva di stimoli visivi, senza che siano associati ad accelerazioni del corpo, come accade, per esempio, nella *simulator* o nella *virtual reality sickness*. Oppure, la chinetosi si manifesta per l'assenza di uno degli stimoli abituali sulla superficie terrestre, cioè la forza di gravità, normalmente acquisita dal sacco che fa parte, insieme all'otricolo, degli organi otolitici del sistema vestibolare, recettori delle accelerazioni lineari, compresa la gravità. Questa, nelle missioni spaziali, cioè in condizione di micro-gravità, non stimola il sacco generando un *mismatch* intra-vestibolare, responsabile dell'insorgenza della *space motion sickness*. Altre due teorie sull'etiopatogenesi delle chinetosi meritano di essere citate: quella dell'instabilità posturale (Riccio & Stoffregen 1991) che si basa sul principio che uno degli obiettivi primari del comportamento umano è il mantenimento della stazione eretta e della relativa stabilità posturale. Quest'ultima è definita come "lo stato in cui i movimenti incontrollati dei sistemi percettivi ed effettori motori sono minimizzati", cioè stabili. La stabilità posturale è contrastata costantemente dalla natura e dalle caratteristiche dell'ambiente circostante. Ogni qualvolta si verifichi un brusco, repentino e significativo cambiamento ambientale, la stabilità posturale viene persa, soprattutto se le strategie di controllo non sono disponibili per scarsità di esperienze precedenti; tuttavia, proprio con l'esperienza acquisita, possono essere sviluppate nuove strategie di controllo che permettono di recuperare la stabilità posturale. Nella teoria di Riccio e Stoffregen, pertanto, le chinetosi sono sempre precedute da uno stato di instabilità posturale, indotta da una condizione ambientale inusuale e prolungata. L'ultima, più recente teoria è quella di Bles et al. (1998) che, partendo dalla teoria del *mismatch* sensoriale di Reason & Brand (1975) sostiene che nella genesi delle chinetosi sia

coinvolta, oltre al sistema visivo, vestibolare e propriocettivo e il relativo eventuale *mismatch* sensoriale, anche la percezione della verticale soggettiva, per cui tutte le situazioni in cui la verticale soggettiva percepita (derivante dall'integrazione degli *input* sensoriali attuali) non coincide con la verticale soggettiva attesa/prevista (sulla base delle esperienze precedenti) determinano la comparsa della chinetosi.

### **Incidenza**

L'incidenza della chinetosi è estremamente variabile, condizionato dalla natura dello stimolo inusuale di movimento, dalla soglia di sensibilità individuale e dalla rapidità di adattamento interindividuale (Dobie et al. 2001). Anche altre specie animali possono sviluppare chinetosi: i cani, in particolare, mostrano la stessa suscettibilità degli esseri umani, ma anche scimmie, cavalli, pecore, gatti e uccelli possono sviluppare disturbi da movimento, mentre i conigli e le cavie appaiono particolarmente refrattari alle chinetosi (Money 1970). Nell'uomo, le chinetosi sono eccezionali al di sotto dei 2 anni di età, per l'im maturità del sistema vestibolare, che impedisce che si generi il *mismatch* sensoriale. L'incidenza aumenta rapidamente fino ai 12 anni quando raggiunge il picco per poi iniziare lentamente a decrescere (Brandt 1991). È segnalato che il sesso femminile è più suscettibile alle chinetosi, soprattutto nella fase estrogenica del ciclo mestruale, e che mostra una maggiore gravità della sintomatologia e una maggiore lentezza nel processo di adattamento al movimento (Dobie et al. 2001). Tuttavia Park & Hu (1999) non hanno riscontrato alcuna differenza di genere statisticamente significativa della sintomatologia chinetosica in uno studio condotto mediante tamburo optocinetico.

Per quanto riguarda il mal di mare (Lawther & Griffin 1988, Gordon et al. 1994), circa il 90% dei passeggeri non abituali sviluppa chinetosi in condizioni di mare mosso, ma anche in condizioni di mare calmo circa il 30% dei passeggeri manifestano chinetosi nei primi 2-3 giorni di traversata.

L'incidenza e la gravità del mal di spazio (Lackner & Graybiel 1986, Oman 1987, Davis 1988) costituisce uno dei *key-element* delle missioni spaziali, soprattutto di breve durata, potendo limitare e di fatto limitando l'operatività dell'equipaggio durante le prime 72 ore di volo extra-atmosferico in condizioni di microgravità: circa il 75% degli astronauti a bordo delle missioni spaziali riportano la comparsa di mal di spazio, talmente intensa da richiedere il ricorso alla terapia farmacologica, che trova possibile indicazione nell'attività spaziale (Graybiel 1979), a differenza di quanto avviene nel campo strettamente aeronautico. Inoltre, la condizione di microgravità genera uno stato protratto nel tempo di *minus* sensoriale sui recettori delle accelerazioni lineari verticali (il sacco) responsabile di *mismatch* tra gli stimoli attuali e quelli attesi (Miller et al. 1969).

Relativamente al mal d'aria, ma facendo riferimento solo ai soggetti già selezionati quali aspiranti piloti militari, le statistiche internazionali (Gillingham & Previc 1996) concordano nel riportare un'incidenza di episodi di chinetosi, durante lo svolgimento delle prime missioni di volo tra i frequentatori dei corsi di pilotaggio, compresa tra il 15 e il 40% dei casi. Tali episodi, in un terzo dei soggetti, risultano talmente prolungati e gravi, da richiedere l'interruzione della missione di volo, con possibili conseguenze negative sul completamento dell'iter addestrativo. Nel più recente studio italiano (Lucertini et al. 2008), l'incidenza della chinetosi tra gli allievi pilota dell'Aeronautica Militare durante la fase di addestramento al pilotaggio è stata del 34,8%, senza differenza di genere. Tra questa popolazione scarsamente adattata al movimento e pertanto sensibile alla chinetosi, circa l'11% dei soggetti ha manifestato episodi prolungati, ben oltre la sesta missione di volo consecutiva, con una prevalenza nei soggetti di sesso femminile.

### **Prevenzione e trattamento**

In termini di prevenzione della chinetosi possono essere considerati diversi elementi: fattori individuali, riduzione di specifici fattori scatenanti, fattori che

influenzano la capacità di adattamento al movimento, e possibilità di *screening* predittivi della suscettibilità alla chinetosi. La capacità di adattamento al movimento, cioè l'innalzamento della soglia di sensibilità individuale al movimento, compare abitualmente con l'esposizione ripetuta e continuativa a uno specifico movimento (Parker et al. 1987). La ripetuta stimolazione vestibolare sviluppa infatti l'adattamento ma questo può decadere più o meno rapidamente in caso di mancata esposizione al movimento stesso (Reason 1978). Questo fenomeno, definito ritentività, è di fondamentale importanza nella gestione degli allievi pilota, soprattutto in caso di attività di volo discontinua e irregolare in termini di esposizione temporale. In ogni ripresa-volo, dovrebbe essere applicata la stessa cautela e precauzione nell'evitare manovre brusche o acrobatiche, già usate nelle primissime missione di volo, svolte al fine di familiarizzazione.

L'uso di indagini di *screening* predittive della suscettibilità alla chinetosi è stato tentato in differenti scenari occupazionali e operativi, senza tuttavia raggiungere conclusioni decisive e univoche. Test provocativi vestibolari, questionari anamnestici sulla chinetosi, test psicometrici e personologici, valutazione della bilancia simpato-vagale (Gordon et al. 1994) sono stati utilizzati nel tentativo di selezionare i soggetti in funzione delle specifiche esigenze operative. Tuttavia i risultati sono ancora dubbi, poiché anche chi evidenzia valori positivi nei test predittivi di *screening* della chinetosi può sviluppare un adeguato adattamento a stimoli specifici o ne può essere desensibilizzato con successo.

Per quanto riguarda il trattamento, esistono due approcci differenti, seppure talvolta integrabili: il trattamento farmacologico e la desensibilizzazione fisica. La terapia farmacologica (Parrot 1989, Doweck et al. 1994, Lucertini et al. 2007), per quanto risulti essere il sistema più economico ed efficace, è inapplicabile nel contesto lavorativo aeronautico, dove è richiesto svolgere compiti operativi complessi basati sulle abilità e sulle procedure (*skill-* e *rule-*

*based task*), per la comparsa di effetti collaterali che interferiscono con la vigilanza, l'attenzione e la memoria. Il farmaco ideale non dovrebbe avere alcun effetto collaterale sfavorevole nei confronti della sicurezza e dell'efficienza psico-fisica sul lavoro e dovrebbe possedere una maneggevolezza farmacodinamica tale da garantire il giusto equilibrio tra dose, durata d'azione e comparsa di effetti collaterali sfavorevoli (Tab. 1). L'impossibilità di ottenere tali obiettivi terapeutici, rende l'approccio farmacologico non approvato in Italia durante lo svolgimento dell'attività di volo, mentre in altre Nazioni, esclusivamente durante le prime missioni di addestramento al volo, è consentito effettuare fino a un massimo di tre sortite consecutive sotto l'effetto di farmaci antichinetosici.

MOLECOLA	DOSAGGIO	VIA DI SOMMINISTRAZIONE	DURATA	SIDE EFFECTS
Scopolamina	0.5 mg	per os	4 h	sedazione
Scopolamina	1.5 mg	transdermica	3 gg	midriasi
Prometazina	25 mg	per os	6-18 h	sedazione
Cinnarizina	30 mg	per os	5 h	cefalea
Dimenidrato	50 mg	per os	6 h	sedazione

**Tab. 1:** Principali farmaci antichinetosici disponibili

L'approccio non farmacologico si basa su strategie di desensibilizzazione fisica (Stott 1990), spesso associate a tecniche di supporto psicologico (Dobie 1994) ed è efficace su chi viene esposto con regolarità e continuità al movimento ambientale inusuale.

### **Il protocollo di riabilitazione dal mal d'aria dell'Aeronautica Militare**

Dal 2000, presso il Centro Sperimentale Volo - Reparto Medicina Aeronautica e Spaziale di Pratica di Mare (RM) è stato sviluppato un protocollo di riabilitazione dalla chinetosi per il personale navigante dell'AM e, in casi eccezionali e selezionati, anche per altro personale, comunque esposto a movimento ambientale per ragioni lavorative o sportive agonistiche. Il

protocollo sperimentale prevede una desensibilizzazione fisica su sedia rotatoria con velocità di rotazione e durata progressivamente crescenti, associata alla familiarizzazione con gli esercizi inferiori delle tecniche di rilassamento di Schultz (*training* autogeno) in una cornice di supporto psicologico di tipo cognitivo-comportamentale (Lucertini & Lugli 2004).

Il protocollo ha la durata di due settimane, dieci giorni lavorativi consecutivi con un'unica interruzione per un solo fine settimana, per evitare sospensioni troppo prolungate o frequenti dell'esposizione allo stress chinetogeno: i soggetti, dopo una valutazione della soglia di sensibilità in prima giornata mediante *Coriolis stress test* (CST), vengono sottoposti ogni giorno a 4 sessioni fortemente provocative su sedia rotatoria della durata di 15' o fino alla comparsa del vomito nel soggetto. Con il passare delle giornate e delle sessioni provocative si intensifica la velocità di rotazione, la stimolazione di Coriolis inizialmente effettuata esclusivamente sul piano del *pitch* (escursioni del capo in antero-posteriore), viene svolta anche sul piano del *roll* (escursioni dal capo in latero-laterale) e infine in sequenza *random*, su indicazione del responsabile della desensibilizzazione. In decima giornata viene ripetuta la valutazione del CST per rideterminare la soglia di sensibilità alla chinetosi sviluppata mediante il protocollo riabilitativo. Il soggetto fa quindi ritorno al Reparto Operativo o alla Scuola di Volo di appartenenza per un'immediata ripresa dell'attività volativa, che dovrà avvenire in maniera graduale, in termini di intensità delle manovre di volo.

Sono stati trattati complessivamente 27 soggetti in 32 protocolli riabilitativi, con risultati sostanzialmente sovrapponibili alle altre statistiche internazionali, sempre riferite alla riabilitazione dal mal d'aria di piloti militari (Tab. 2):

- 5 allievi piloti provenienti dal 70° Stormo di Latina durante il conseguimento del BPA<sup>10</sup> e del BPM<sup>11</sup>-2^ fase su aeromobile a elica SF-260;

---

<sup>10</sup> BPA: Brevetto di Pilota d'Aeroplano.

<sup>11</sup> BPM: Brevetto di Pilota Militare.

- 13 allievi piloti provenienti dal 61° Stormo di Lecce durante il conseguimento del BPM-3<sup>^</sup> fase su velivolo a getto MB-339A;
- 4 piloti e 5 navigatori dopo il conseguimento del BPM/BNM<sup>12</sup>, provenienti dai Reparti Operativi durante la fase di abilitazione pre-operativa su velivolo MB-339CD o di transizione operativa su velivoli a getto aerotattici (F16, F2000, Tornado, AM-X).

La riabilitazione ha fornito risultati positivi nel 92% dei casi, con solo 2 insuccessi del protocollo nella fase di valutazione finale in laboratorio. Tuttavia, nella fase di verifica in volo dell'efficacia del protocollo di desensibilizzazione, si sono ottenuti risultati insufficienti in un ulteriore 18% dei casi trattati, con conseguente interruzione definitiva dell'iter addestrativo (Lucertini et al. 2013), e con un risultato positivo complessivo del protocollo riabilitativo pari al 76%.

AUTORI	SOGGETTI	DURATA	VOLO	SUPPORTO PSICOLOGICO	RISULTATI
LEVY	20	2 sett.	SI	SI	85%
GILES	37	1 sett.	NO	SI	95%
STOTT	66	4 sett.	SI	NO	79%
STOTT	17	4 sett.	NO	NO	94%
A.M.	27	2 sett.	NO	SI	92%

**Tab. 2:** Confronto tra differenti protocolli di desensibilizzazione dalla chinetosi

Successivamente alla desensibilizzazione e alla ripresa dell'attività di volo, nel 22% dei casi si sono verificate recidive di episodi di chinetosi grave, che hanno reso necessario un secondo ciclo di riabilitazione. Le recidive sono state distinte in "a lungo termine", per ricomparsa dei sintomi dopo più di un anno dalla prima riabilitazione, oppure "a breve termine", se verificatesi dopo meno di un anno dal ciclo riabilitativo precedente: i risultati in quest'ultima

<sup>12</sup> BNM: Brevetto di Navigatore Militare.

sottopopolazione sono poco lusinghieri in quanto solo il 20% dei soggetti recidivi ha continuato il regolare svolgimento dell'attività di volo. In termini operativi, i soggetti riabilitati con successo in laboratorio e che hanno continuato con regolarità l'attività di volo (con o senza recidive) risultano attualmente assegnati per il 33% alle linee aero-tattiche, per il 45% alle linee trasporti e per il rimanente 22% alla linea ala rotante.

In conclusione, la chinetosi è una sindrome determinata dall'esposizione al movimento ambientale (reale o virtuale), che costituisce un normale meccanismo protettivo e non una risposta patologica, anche se determina la comparsa di quadri clinici spesso invalidanti che inficiano la capacità di svolgere i previsti compiti cognitivi in ambito occupazionale e operativo. L'uso di farmaci antichinetosici, per quanto efficace dal punto di vista clinico, trova numerose controindicazioni aeromediche per gli effetti collaterali sfavorevoli. Solo un approccio integrato di desensibilizzazione fisica e supporto psicologico cognitivo-comportamentale consente il recupero al pilotaggio dei soggetti chinetosici con risultati riportati nella letteratura scientifica che oscillano tra il 75 e il 90 per cento.

## **LA SIMULATOR SICKNESS**

I disturbi da movimento, termine usato per la prima volta da Irwin nel 1881 nel suo lavoro sul mal di mare pubblicato su Lancet, sono la conseguenza dell'esposizione dell'uomo al movimento passivo generato da mezzi di trasporto di varia natura. Ognuno dei diversi mezzi di trasporto oggi disponibili può generare una forma di chinetosi, con caratteristiche cliniche spesso specifiche e uniche. Lo sviluppo della tecnologia e dell'industria della simulazione e l'utilizzo sempre più estensivo dei simulatori in ambito addestrativo ha di fatto svelato l'esistenza di una nuova forma di chinetosi: la *simulator sickness* (Kennedy et al. 1989). In realtà, la sua prima segnalazione è attribuita a Havron & Butler che nel 1957, durante alcuni test di valutazione dell'efficacia addestrativa di un simulatore di elicottero acquisito dall'US Navy, riportarono la comparsa di segni e sintomi riconducibili a un disturbo da movimento nel 78% dei soggetti esposti al simulatore. Tale disturbo presentava un'insorgenza precoce, nei primi 10 minuti di utilizzo, e poteva persistere, con una grande variabilità interpersonale, per alcune ore dopo la fine dell'attività. La *simulator sickness*, dunque, ha caratteristiche cliniche assolutamente specifiche ed esclusive perché oltre alla classica sindrome poli-sintomatologica simile (ma non uguale) a quella delle altre forme di chinetosi, può manifestarsi anche, e talvolta esclusivamente, con gli *after-effect*, cioè con disturbi che compaiono al termine della sessione addestrativa al simulatore e che possono riprodurre le medesime caratteristiche cliniche della sintomatologia acuta, o possono presentarsi anche con caratteristiche cliniche differenti (Miller & Goodson 1960, Baltzley et al. 1989, Kennedy et al. 1989). Nel lavoro di Baltzley, relativo a 742 soggetti esposti ad attività di volo su simulatori di volo, la comparsa di *after-effects* è avvenuta nel 45% dei casi: di questi, nel 59% dei soggetti, i fenomeni tardivi si esaurivano nell'arco di un'ora, in un 12% dei soggetti si risolvevano entro 2 ore, in un 13% dei casi si esaurivano in 4 ore, nel 3% dei casi in 6 ore, mentre nel restante 14% dei

casi veniva segnalata una persistenza degli *after-effect* per più di 6 ore. L'incidenza della *simulator sickness* nella letteratura scientifica varia in rapporto al tipo di simulatore utilizzato, alle sue caratteristiche tecnologiche di fedeltà e alla metodologia di raccolta dei dati epidemiologici, che può essere rappresentata dall'osservazione diretta dei soggetti per il riscontro dei segni obiettivi clinici della sindrome, dalla autocompilazione di questionari validati (quali il *simulator sickness questionnaire* SSQ), dal monitoraggio di parametri fisiologici e dall'esecuzione di test posturali e di equilibrio pre- e post-simulatore. Crowley (1987) ha segnalato nel suo studio sul simulatore dell'elicottero AH-1 Cobra, con base mobile e campo visivo dell'OTW di 48° orizzontali e 36° verticali, un'incidenza di *simulator sickness* nel 40% dei casi; Magee et al (1988) nello studio epidemiologico condotto su 42 soggetti esposti a un simulatore di velivolo C-130 (ala fissa) a base mobile esapodica con OTW di 120° orizzontali e 40° verticali riferiscono la comparsa di segni anche lievi di *simulator sickness* nel 95% dei soggetti; Unga (1988) nella sua indagine relativa a 238 soggetti riporta un'incidenza del 64.3%; Braithwaite & Braithwaite (1990) hanno riportato un'incidenza di *simulator sickness* nel 60% dei 230 soggetti esposti al simulatore dell'elicottero Lynx; infine Lerman et al. (1993) nel lavoro su un simulatore di carro armato su base mobile con 3 gradi di libertà hanno riportato su 59 soggetti impiegati in compiti di conduzione del simulatore l'insorgenza di sintomi riferibili a *simulator sickness* nel 68% dei casi. Tuttavia, è lo studio di Kennedy et al. (1989) che risulta essere la più ampia indagine epidemiologica svolta (oltre 1800 soggetti): gli autori riportano un'incidenza della *simulator sickness*, su dieci diversi simulatori di aeromobili ad ala fissa o ad ala rotante, sia a base fissa che a base mobile, compresa tra il 10 e il 60%. Nello specifico, nei simulatori di velivoli ad ala fissa l'incidenza è stata tra il 10 e il 47%, mentre nei simulatori di elicottero l'incidenza della *simulator sickness* è stata tra il 26 e il 69%. Nonostante siano trascorsi ormai più di 50 anni dalla prima segnalazione di

episodi di *simulator sickness* negli equipaggi coinvolti in attività di volo su simulatori, ben poco è stato studiato e determinato in termini di prevenzione e di trattamento. Dalla letteratura scientifica aeromedica emerge una certa carenza di studi in tale ambito, prevalendo un approccio limitato a strategie di *management* degli equipaggi coinvolti in attività di volo simulatori, in rapporto alla tipologia di simulatore, alle caratteristiche degli scenari operativi delle missioni simulate, all'età, al genere e all'esperienza di volo dei soggetti coinvolti. Pertanto, le strategie preventive si limitano a identificare i soggetti più suscettibili alla *simulator sickness*, cioè soggetti con anamnesi positiva per chinetosi, soggetti di sesso femminile, soggetti alle prime esperienze sul simulatore di volo, soggetti molto esperti in termini di ore-volo (reali); a suggerire di non esporre gli individui al simulatore per sessioni addestrative di durata superiore a 2 ore; a garantire un intervallo di 2-5 giorni tra le sessioni addestrative; a evitare il *freezing* dell'OTW o, se proprio necessario, avvisare il soggetto per consentire la chiusura degli occhi; a esporre i soggetti a missioni di volo di impegno operativo progressivamente crescente (Stanney & Kennedy 2009). Tutto ciò al fine di far sviluppare nei soggetti una forma di adattamento, cioè un soddisfacente grado di tolleranza nei confronti degli stimoli poligenici che determinano la *simulator sickness* (Webb et al. 2009), anche se tali strategie di prevenzione appaiono in realtà come dei limiti del pieno ed estensivo utilizzo della simulazione come strumento addestrativo in compiti operativi complessi (Lilienthal 2009). Per quanto riguarda la terapia, nonostante l'efficacia dei comuni farmaci antichinetosici nei confronti anche della *simulator sickness*, a causa dei loro effetti collaterali, soprattutto sulla vigilanza, non trovano effettiva indicazione per il personale navigante e sono anche specificamente vietati da numerose regolamentazioni aeromediche nazionali.

La *simulator sickness* quindi è una sindrome, perché polisintomatica, di origine poligenica (Kennedy & Fowlkes 1992) perché non riconosce un unico fattore

causale, e manifesta un'incidenza estremamente variabile nei diversi studi condotti, proprio in ragione della sua natura multifattoriale, con determinanti che Kolasinski (1995) suddivide in tre categorie: fattori relativi al soggetto, fattori relativi al simulatore e fattori relativi ai *task*.

### **Fattori relativi al soggetto**

Analogamente alle chinetosi in generale, sia in termini di suscettibilità che di lento adattamento (Dobie et al. 2001), anche per la *simulator sickness* è segnalata un'incidenza maggiore (3,4:1) nel sesso femminile (Kennedy et al. 1995), suggestiva di una differenza di genere. Kennedy & Frank (1993) ipotizzano che la maggiore incidenza della *simulator sickness* nel sesso femminile sia da attribuire al campo visivo più ampio che, per ragioni di minore ingombro anatomico del massiccio facciale, caratterizza questi soggetti, e al conseguente maggior flusso visivo che incide sul sistema visivo e quindi al rischio di insorgenza di illusione vettoriale di movimento (*vection*) generata dai sistemi OTW ad ampio campo visivo con tecnologia non di tipo *dome*. Tuttavia, Graeber & Stanney (2002) affermano che la diversa incidenza della *simulator sickness* tra soggetti di sesso maschile e femminile, in termini di maggiore sensibilità e di minore adattamento, non sia da attribuire a una differenza di genere e in particolare alla fluttuazione dei livelli estrogenici durante il ciclo mestruale, ma piuttosto a una diversa suscettibilità inter-individuale nella popolazione studiata. Cheung & Hofer (2002-2003), nel loro studio sulla differenza di genere nella chinetosi indotta dal *Coriolis stress test* su sedia rotatoria negano l'evidenza di una maggiore incidenza di chinetosi nelle femmine e ipotizzano che la raccolta di dati epidemiologici mediante questionari possa essere soggetta a un *bias* di genere, in quanto i soggetti di sesso femminile sarebbero più inclini a riferire stati di *discomfort* o di franco malessere, rispetto ai soggetti maschi. Invece, Flanagan et al. (2005) nello studio sulla chinetosi indotta da stimolo tipo pseudo-coriolis con *vection* rotatoria generata da un tamburo optocinetico hanno osservato una differenza

di genere statisticamente significativa negli individui di sesso femminile non solo relativamente alla suscettibilità alle chinetosi, sulla base della storia clinica raccolta mediante l'anamnesi e questionari dedicati, ma anche nei test provocativi, sia in termini di intensità dello stimolo che di durata dell'esposizione. Anche Garcia et al. (2010) tornano a sostenere l'esistenza di una differenza di genere tra maschi e femmine, espressa da una minore incidenza statisticamente significativa di *simulator sickness* in simulatori a base fissa nei maschi, mentre nei sistemi a base mobile si apprezza solo un *trend* non significativo, sempre a favore dei maschi.

Per quanto riguarda l'età, anche per la *simulator sickness* valgono ancora i principi generali esposti nel capitolo precedente, cioè che prima dei 2 anni i soggetti sono immuni alle chinetosi, che la sensibilità al movimento inusuale e prolungato cresce rapidamente fino ai 12 anni, quando inizia a decrescere rapidamente fino ai 21, per poi generalmente sparire a 50 anni, età in cui le chinetosi sono di occasionale riscontro. Il paradosso della *simulator sickness* è che sono i piloti più anziani (di età anagrafica) ed esperti (per ore di volo volate) a mostrare la più accentuata suscettibilità alla sindrome. Questo è solo un apparente paradosso rispetto alla summenzionata distribuzione per fasce di età dei disturbi da movimento. In realtà il fenomeno è previsto dalla teoria del conflitto sensoriale di Reason & Brand (1975) che postula che il *mismatch* tra movimento attuale e movimento atteso/previsto, sulla base delle precedenti esperienze, causa la comparsa della sindrome clinica polisintomatica. Magee et al (1988) nella loro statistica di 42 piloti maschi studiati sul simulatore a base mobile del C-130 non hanno evidenziato differenze statisticamente significative tra l'incidenza della *simulator sickness* nei soggetti meno esperti rispetto a quelli più esperti e anziani. Viceversa, Braithewaite & Braithewaite (1990), hanno evidenziato una correlazione statisticamente significativa tra l'esperienza di volo e l'incidenza della *simulator sickness* sul simulatore di elicottero Lynx. Lerman et al. (1993) nel loro studio su 59 soggetti nel

simulatore a 3 gradi di libertà di un carro armato non hanno evidenziato alcuna correlazione statisticamente significativa tra l'insorgenza e la gravità della sindrome clinica e l'esperienza operativa dei soggetti. Altri studi, riportati da Johnson (2007) e pubblicati su *report* tecnici dell'US Air Force, dell'US Army e dell'US Navy, forniscono dati discordanti sulla correlazione statisticamente significativa tra *simulator sickness* ed esperienza di volo dei soggetti colpiti dalla sindrome, a conferma della natura poligenica della sindrome stessa, non riconducibile cioè a un'unica causa, ma a un meccanismo multifattoriale. Ancora a proposito dei fattori causali individuali, un'anamnesi positiva per pregressi disturbi da movimento in età pediatrica o giovanile risulta essere fortemente predittiva di episodi di *simulator sickness* (Braithewaite & Braithewaite 1990, Kennedy & Fowlkes 1992, Kennedy et al. 1992).

#### **Fattori relativi al simulatore**

Tra i fattori relativi al simulatore bisogna riportare innanzitutto le caratteristiche di costruzione dei *display* e l'ampiezza del campo visivo generato dall'OTW: campi visivi ampi, come quelli previsti per i simulatori di categoria C o D della FAA, determinando un flusso ottico ampio e veloce, aumentano l'incidenza della *vection*. Kennedy et al. (1988) affermano che la rappresentazione visiva del movimento produce effetti anche sul sistema vestibolare e pertanto i *display* che producono una maggiore stimolazione visiva, anche attraverso l'interazione vestibolare, sono responsabili di una più marcata *simulator sickness*. Ancora, Kennedy et al. (1993a) affermano che la *vection* generata in un simulatore è responsabile sia del realismo e della fedeltà fisica della simulazione che della comparsa della *simulator sickness*. Inoltre, un requisito costruttivo dei display ottici è il cosiddetto *design eye point*, cioè l'area del *display* dove viene ottimizzata la qualità dell'immagine, area strettamente in rapporto con il *design eye position* (DEP), cioè la posizione ideale del capo e dello sguardo durante l'esposizione alla realtà virtuale. Ogni spostamento del capo o dello sguardo sui diversi piani dello

spazio al di fuori del DEP determina una degradazione della qualità dell'immagine acquisita dal *display* e l'insorgenza del *discomfort* che caratterizza la *simulator sickness*. I moderni simulatori sono controllati da sistemi computerizzati che eseguono l'enorme mole di calcoli necessari per riprodurre le risposte dinamiche di uno specifico velivolo, controllano e rispondono agli *input* dell'utente attraverso l'interfaccia dei comandi di volo, forniscono lo scenario visivo in movimento, coerentemente con le manovre di volo attuate. Con l'aumento del numero di calcoli necessari, in funzione dell'aumentata fedeltà o *performance* richiesta dai simulatori, si instaura contestualmente un ritardo interno ai sistemi computerizzati di trasferimento dei dati. Tale ritardo può determinare almeno due conseguenze indesiderate: la capacità di controllo del simulatore da parte dell'utente può risultare degradata, se non addirittura compromessa; l'utente può sviluppare *simulator sickness* di intensità elevata, che può annullare l'efficacia del simulatore come strumento addestrativo. È stato già indicato precedentemente che alla *simulator sickness* è applicabile la teoria etiopatogenetica del conflitto sensoriale di Reason & Brand (1975). Ciononostante, nella progettazione dei simulatori a base mobile è tollerato un *delay* fino a 150 msec tra il movimento della base esapodica e la scena visiva presentata sull'OTW, con l'*input* motorio che precede quello visivo. In realtà, Frank et al. (1987) hanno dimostrato che quando su un simulatore a base mobile si verifica un *delay* tra gli *input*, lo stimolo visivo deve precedere quello accelerativo per produrre il minore *discomfort* possibile e per assicurare la migliore *performance* possibile nel controllo del simulatore da parte dell'utente. Come già riportato precedentemente, sintomi di tipo chinetogeno possono verificarsi in presenza esclusiva di stimoli visivi, laddove il *mismatch* sensoriale è generato proprio dall'assenza di *input* motori provenienti dai sistemi vestibolare o propriocettivo (Lackner & Graybiel 1979). Ciò viene sempre più frequentemente segnalato anche a seguito di esposizione a proiezioni cinematografiche con tecnologia

3D (Bos et al. 2013, Solimini 2013). La base fisiologica della *simulator sickness* (in caso di simulatore a base fissa) e dei nuovi disturbi emergenti da esposizione alla realtà virtuale e/o agli schermi 3D è rappresentata dalla *vection* o illusione di movimento di sé, provocata dalla stimolazione di regioni periferiche della retina (anziché la sola regione foveale) da parte di flussi ottici molto ampi, come quelli generati da schermi con campi visivi molto ampi e con alta dinamica degli *input*. Lestienne et al. (1977) hanno riportato che soggetti esposti a stimoli visivi caratterizzati da flusso ottico ad alta velocità, suggestivo di movimento lineare con ampio campo visivo, evidenziano disturbi marcati da *mismatch* sensoriale, come i soggetti sottoposti a studi con l'utilizzo del tamburo optocinetico, soprattutto se con velocità di rotazione del tamburo variabile. Il tamburo optocinetico ha la superficie interna costituita da bande verticali ad alto contrasto (solitamente bianche e nere) o da cerchi di dimensioni variabili. Entro 30 sec dall'avvio della rotazione, pur rimanendo stabile e immobile la posizione del soggetto, compare la falsa sensazione di movimento di sé visivamente indotta (*vection* rotatoria), nonostante la totale assenza di stimoli accelerativi o inerziali sul sistema vestibolare. Dopo alcuni minuti di esposizione alla *vection*, tipicamente compaiono i sintomi del *mismatch* visuo-vestibolare, cioè la chinetosi (Reason & Brand 1975). Nel caso in cui vengano applicate velocità di rotazione intermittenti (5-10 RPM), i disturbi chinetosici diventano molto più intensi con significatività statistica rispetto alla velocità di rotazione costante, con punteggi del SSQ che aumentano anche del 73-119% (Bubka et al. 2006).

Il movimento di una scena visiva può essere interpretato come il movimento di un oggetto nel campo visivo rispetto all'osservatore oppure la scena visiva viene percepita come stazionaria mentre il soggetto si percepisce in movimento rispetto alla scena (Duh et al. 2004). La percezione del movimento di sé indotta visivamente, cioè la *vection*, può determinare disturbi posturali. La stretta correlazione tra il sistema visivo e il sistema vestibolare, espressa

per esempio dal riflesso vestibolo-oculare (VOR) induce a considerare le manifestazioni dei due sistemi percettivi come l'espressione di un sistema percettivo integrato (Hettinger et al. 1987). Tuttavia i due sistemi sono caratterizzati da una differente latenza di risposta. Per gli stimoli inerziali il sistema vestibolare evidenzia una latenza di meno di 1 sec (Guedry 1974), mentre la percezione visiva della *vection* evidenzia una latenza di alcuni secondi. Nella ricerca di Duh et al. (2004) sugli *input* motori capaci di stimolare i sistemi visivo e vestibolare evocando la *simulator sickness*, è lo stimolo visivo a bassa frequenza (0,1-0,05 Hz) a produrre la più intensa instabilità posturale, indipendentemente dalla tipologia di display (*wide-screen*, *dome*), e dalla tipologia di stimolo visivo (*vection* lineare o angolare). Il sistema vestibolare, tra le sue diverse e complesse funzioni, è anche l'accelerometro integrato del sistema biologico umano, sensibile sia alle accelerazioni angolari che a quelle lineari (compresa la gravità). Nel loro lavoro, Duh et al. definiscono come frequenza di *crossover* quella pari a 0,06 Hz alla quale le frequenze di risposta visiva e vestibolare al movimento di sé sono massime nell'evocare *simulator sickness*. Per frequenze diverse da quella di *crossover*, la comparsa della *simulator sickness* dovrebbe essere minore, perché il sistema visivo ha una responsività ridotta nel *range* di frequenze più alte, mentre il sistema vestibolare esprime una responsività ridotta nel *range* delle frequenze più basse. Questi risultati sono in apparente disaccordo con Lawther & Griffin (1987) che negli studi in laboratorio sulla predittività del mal di mare, testando oscillazioni verticali (*heave*) comprese tra 0,03 e 0,50 Hz, hanno dimostrato che è l'oscillazione alla frequenza di 0,2 Hz quella che determina l'effetto provocativo più intenso e pertanto l'entità più grave della sintomatologia chinetosica. Valori più bassi di frequenza, ma anche più alti, non generano chinetosi come la frequenza critica di 0,2 Hz. Diels & Howarth (2013) hanno confutato l'ipotesi di Duh et al., seppure con una ricerca che studiava l'incidenza della VIMS (*visual induced motion sickness*) generata

esclusivamente da uno stimolo visivo proiettato su uno schermo con un'oscillazione di frequenza variabile (0,025-1,6 Hz), trovando la massima capacità chinetogena alle frequenze di 0,2 e 0,4 Hz, come atteso dalla letteratura scientifica e tecnica. Lo studio di Diels & Howarth (2013) è stato condotto sottoponendo i soggetti a stimolazione pseudo-coriolis non mediante tamburo optocinetico, ma mediante un *pattern* visivo caratterizzato da un flusso ottico con punti, oscillante in senso antero-posteriore (flussi ottici crescente e decrescente), generato da un computer e proiettato su un campo visivo al DEP di 65° orizzontali e 59° verticali. La valutazione dell'efficacia nauseogena del *pattern* visivo veniva effettuata mediante SSQ: la massima insorgenza della VIMS è caduta nelle frequenze di 0,2 e 0,4 Hz decisamente superiori pertanto alla frequenza di *crossover* di Duh et al. che, tuttavia, hanno utilizzato uno stimolo combinato visuo-vestibolare, anziché il solo stimolo visivo di Diels & Howarth. La VIMS è una forma di chinetosi che compare quando un soggetto immobile è esposto a immagini visive in movimento, che inducono la comparsa dell'illusione di movimento di sé o *vection*. Quando la percezione visiva di movimento non è accompagnata da un reale movimento fisico, la discrepanza tra gli stimoli di movimento di sé provenienti dal sistema visivo e la mancanza di effettivi segnali accelerativi o inerziali provenienti dai sistemi vestibolare e propriocettivo determinano la comparsa della VIMS (Reason & Brand 1975, Bles et al. 1998). Anche i simulatori di volo, naturalmente a base fissa, possono indurre la VIMS negli utenti, impedendone la partecipazione attiva, ostacolando il processo addestrativo, limitando la durata delle sessioni o generando ToT negativo, con le conseguenti implicazioni operative. Nelle chinetosi da movimento reale, la caratteristica fisica principalmente responsabile dell'efficacia provocativa del movimento è la frequenza più che l'accelerazione o l'entità della traslazione. Anche per le chinetosi da movimento virtuale e quindi anche per la VIMS, Kennedy et al. (1996) hanno ipotizzato che un movimento della scena visiva

caratterizzato dalla frequenza di 0,2 Hz sia quello dotato dalla maggiore potenzialità chinetogena, anche questo in contrasto con lo studio di Duh et al. (2004) che aveva identificato per stimoli visuo-vestibolari coesistenti la massima capacità provocativa in termini di *simulator* e *cyber-sickness*, la cosiddetta frequenza di *crossover* di 0,06 Hz.

Muth (2009) ha studiato la presenza e la durata di *after-effect* cognitivi e fisiologici dopo l'esposizione a due movimenti asincroni, di cui uno reale e l'altro virtuale (*uncoupled motion*) come nel caso dell'utilizzo di un simulatore di volo a bordo di una portaerei (Muth & Lawson, 2003). Il *setting* sperimentale prevedeva l'uso di un simulatore di volo posto su una piattaforma mobile, desincronizzata rispetto alla effettiva dinamica del volo, utilizzando come ambiente visivo le immagini generate da computer presentate su un *head mounted display* (HMD). Il simulatore di volo generava escursioni sull'asse del *roll* di  $\pm 20^\circ$  e sull'asse del *pitch* di  $\pm 15^\circ$ . La piattaforma mobile era programmata per generare oscillazioni verticali alla frequenza di 0,2 Hz, la frequenza identificata in letteratura come quella maggiormente nauseogena per i movimenti sull'asse verticale. I soggetti arruolati, tutti piloti civili o militari, venivano preliminarmente valutati con il MSHQ (*motion sickness history questionnaire*); la eventuale *simulator sickness* durante la sessione al simulatore veniva stadiata mediante il MSAQ (*motion sickness assessment questionnaire*) basato su 16 *item* con un *grading* da 0 a 10 (Gianaros et al. 2001). Test cognitivi, posturali e di acuità visiva dinamica venivano somministrati pre- e post-simulatore. La durata delle sessioni di volo era di 60 min, con possibilità di interruzione su richiesta del soggetto. La somministrazione post-volo dei test era seriale: immediatamente al termine del volo simulato, e poi dopo 2, 4, 6 e 8 ore. I test cognitivi erano rappresentati da una batteria derivata dall'APTS (*automated performance test system*) di Turnage & Kennedy (1992). L'incidenza della *simulator sickness* ha manifestato estrema variabilità interindividuale non correlabile, data la scarsa

potenza statistica del campione (11 soggetti), con variabili individuali quali età e ore-volo. Tutti i soggetti arruolati hanno manifestato un peggioramento statisticamente significativo della *performance* cognitiva al termine della sessione di volo simulato rispetto alla valutazione pre-volo. La significatività statistica è perdurata anche nella verifica a 2 ore dalla conclusione del volo simulato, mentre la differenza non risultava più statisticamente significativa nelle prove effettuate 4 ore dopo il simulatore; la *performance* cognitiva risultava sovrapponibile al pre-volo nelle verifiche a 6 e 8 ore dopo la conclusione della prova. La valutazione della instabilità ponderale mediante test di Romberg potenziato ha mostrato un peggioramento nell'immediato post-volo statisticamente significativo, effetto che già a 2 ore dal termine della prova al simulatore non era più presente. Non è stato riscontrato alcun cambiamento relativo all'acuità visiva dinamica.

Ancora a proposito di *performance* cognitiva, Tal et al. (2012) hanno verificato l'efficacia su di essa di un indicatore di riferimento di orizzontalità (orizzonte artificiale) durante 120 minuti di esposizione a uno scenario virtuale di navigazione all'interno di un simulatore marittimo a base mobile su 3 gradi di libertà (*pitch* e *roll* come movimenti angolari e *heave* come movimento verticale, con escursioni rispettivamente di 2,2°, 7,7° e 1,5 metri).

L'intensità della *simulator sickness*, più che la sua incidenza nella popolazione studiata, è risultata significativamente diminuita nelle prove effettuate con l'ausilio dell'orizzonte artificiale. Del resto questo risultato era stato già segnalato da Bos et al. (2005) che in un simulatore marittimo avevano riscontrato la peggiore incidenza e gravità di *simulator sickness* nella condizione senza riferimenti ambientali esterni. Tuttavia la ridotta intensità delle manifestazioni chinetosiche non si è accompagnata a un miglioramento dei risultati nei test di *performance* cognitiva condotti, dato questo in contrasto con gli studi precedenti che avevano evidenziato una correlazione diretta tra l'intensità della chinetosi, in termini di gravità della fenomenologia

clinica, e il decadimento degli *skill* cognitivi, psicomotori e percettivi (Hettinger et al. 1990).

### **Fattori relativi ai *task***

Infine, tra i fattori relativi ai *task* svolti durante la sessione al simulatore, va segnalata innanzitutto la durata dell'esposizione alla realtà virtuale: più lunga è la sessione addestrativa, maggiori saranno le probabilità di insorgenza della *simulator sickness*. È stato segnalato un incremento lineare dell'insorgenza della sindrome del 23% ogni 15 minuti di esposizione, seppure solo il 5% dei soggetti esposti a un simulatore di volo siano costretti a interrompere la sessione addestrativa per la gravità dei fenomeni (Stanney & Kennedy 2009). Altri fattori relativi ai *task* sono rappresentati dall'esecuzione di manovre brusche, aggressive, con elevato rateo di variazione di velocità angolare, dal volo a bassa quota o bassissima quota (*nap of the earth*)<sup>13</sup>, condizione questa che intensifica il flusso visivo percepito e quindi l'incidenza della *vection*. Ancora, i movimenti del capo durante l'effettuazione di manovre di volo che comportano variazioni di assetto (principalmente intorno all'asse del *roll*) aumentano la suscettibilità alla *simulator sickness*, così come il non essere in controllo del simulatore, cioè il non eseguire autonomamente le manovre di volo.

### **La clinica della *simulator sickness***

La sintomatologia clinica della *simulator sickness* si differenzia da quella delle altre più comuni forme di chinetosi perché le manifestazioni neurovegetative sono molto meno frequenti e il vomito è segnalato in meno dell'1% dei casi, seppure spesso con caratteristiche di tipo cerebrale, cioè esplosivo e senza prodromi (cioè senza nausea), in questo molto simile a quanto descritto nel mal di spazio. Viceversa, prevalgono i disturbi riconducibili a fenomenologia di tipo atassico-disorientante e oculomotoria. Kennedy et al. (1993c), superando

---

<sup>13</sup> *Nap of the earth*: profilo di volo, reale o simulato, a bassissima quota, radente il terreno.

la precedente classificazione dei sintomi della *simulator sickness* (Kennedy & Dutton 1984) in minori (compresi quelli mentali), maggiori e patognomonici, hanno suddiviso la sintomatologia della *simulator sickness* in tre *cluster*: nausea (N), oculomotorio (O) e disorientamento (D) (Tab. 3). Sulla base dei dati epidemiologici relativi a 3691 missioni volate sui simulatori di volo, è stato validato un questionario, il *simulator sickness questionnaire* (SSQ), modificando il preesistente Pensacola *motion sickness questionnaire* (PMSQ) attraverso l'eliminazione di 12 dei 28 *item* che lo caratterizzavano.

Sintomo	Cluster N	Cluster O	Cluster D
General discomfort	X	X	
Fatigue		X	
Headache		X	
Eye straining		X	
Difficulty focusing		X	X
Increased salivation	X		
Sweating	X		
Nausea	X		X
Difficulty concentrating	X	X	
Head fullness			X
Blurred vision		X	X
Dizzy (open eyes)			X
Dizzy (closed eyes)			X
Vertigo			X
Stomach awareness	X		
Burping	X		

**Tab. 3:** I 3 cluster del Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

Il questionario è autosomministrabile e consiste nel rispondere quantificando secondo una scala da 0 a 3 (0, assenza di disturbi; 1, disturbi lievi; 2, disturbi moderati; 3, disturbi gravi) i 16 disturbi caratterizzanti la *simulator sickness* e

riconducibili ai 3 *cluster* nausea (N), oculomotorio (O) e disorientamento (D). Dal SSQ si ottengono dunque tre punteggi parziali di *cluster*, che sono l'espressione specifica dell'impatto del simulatore sui differenti sistemi bersaglio, e un punteggio totale (TS), espressione della gravità generale dei sintomi. I punteggi del SSQ si ottengono sommando i valori attribuiti dal soggetto a ogni singolo sintomo e moltiplicando tale valore per un fattore correttivo che è 9,54 per il *cluster* N, 7,58 per il *cluster* O, 13,92 per il *cluster* D e 3,74 per il TS. Quest'ultimo si può considerare come la misura della capacità del simulatore di generare *discomfort* negli utenti durante le sessioni addestrative ed è naturalmente determinato dai punteggi parziali che invece definiscono con accuratezza la specifica azione chinetogena del simulatore o dei sistemi di realtà virtuale sul sistema biologico che lo utilizza, cioè il *mismatch* tra un sistema basato sul silicio e un altro basato sul carbonio.

Il SSQ, che costituisce il *gold standard* degli studi clinici ed epidemiologici sulla *simulator sickness*, ha consentito di definire per ogni singolo simulatore di volo, ma anche per ogni singolo apparato di immersione nella realtà virtuale (che determinano l'insorgenza della *cyber-sickness*), lo specifico profilo chinetogeno.

Sulla base del TS del SSQ, Stanney et al. (1997) hanno proposto una classificazione "aeromedica" (Tab. 4) dei simulatori e dei sistemi per la realtà virtuale in 6 categorie, progressivamente ingravescenti con il crescere del TS, che permette di studiare apparati differenti dal punto di vista tecnologico, correlandoli con il loro specifico potere chinetogeno.

Questa metodica ha consentito di evidenziare che la *cyber-sickness* produce *discomfort* molto più accentuato rispetto alla *simulator sickness* (TS: 29, *range* 16 ÷ 55, rispetto a TS: 10, *range* 7 ÷ 20) con una prevalente comparsa di disturbi afferenti al *cluster* D, seguito da disturbi N e infine disturbi O, mentre l'uso dei simulatori di volo determina prevalentemente disturbi del *cluster* O, seguiti da quelli del *cluster* N e infine dal *cluster* D.

Total Score del SSQ	Categoria
0	Assenza di sintomi
< 5	Sintomi trascurabili
5-10	Sintomi minimi
10-15	Sintomi significativi
15-20	Sintomi problematici
> 20	Sistema inappropriato

**Tab. 4:** Modificata da Stanney et al. (1997)

### **I correlati psicologici della *simulator sickness***

Negli anni, sono stati condotti studi con metodiche proprie dell'area neuropsicologica, quali i test di rotazione mentale (MRT) e lo studio dello stile cognitivo, potenzialmente utili nell'approfondire lo studio della *simulator sickness*, seppure anche questi con risultati incerti. Parker & Harm (1992) hanno studiato l'abilità di rotazione mentale in ambiente microgravitazionale virtuale. La microgravità virtuale, generata presso il Neurosciences Laboratory della NASA al Johnson Space Center di Houston dal PAT-DOME (*preflight adaptation trainer device for orientation and motion environments*), determina un riarrangiamento degli stimoli visivi, vestibolari e propriocettivi che contribuiscono all'orientamento spaziale e al mantenimento della corretta postura in risposta all'alterazione degli abituali rapporti spaziali. Gli Autori notarono che tra gli astronauti esistevano modi differenti di affrontare le anomalie sensoriali evocate dalla microgravità: in particolare, alcuni soggetti ponevano più attenzione ai vettori di orientamento interni quali soprattutto quelli associati all'asse corporeo longitudinale z (soggetti tipo IZ) e questi soggetti, che nei voli spaziali reali non presentavano per niente, o solo in misura lieve, sintomi di mal di spazio, erano capaci di ignorare gli stimoli visivi per determinare la posizione corporea eretta. Questi stessi soggetti tipo IZ avevano evidenziato in fase di selezione e addestramento una spiccata abilità

nei test di rotazione mentale: trattandosi di un'abilità allenabile, Parker & Harm conclusero che i MRT potevano essere utilizzati come strumento di *screening* per selezionare soggetti meno o per niente suscettibili alle chinetosi in generale e che, attraverso l'esposizione ripetuta ai MRT durante l'addestramento pre-missione, poteva invece essere sviluppato nei soggetti suscettibili alla *space sickness* una sorta di pre-adattamento (Parker et al. 1987).

Lo stile cognitivo esprime la misura in cui un soggetto percepisce il mondo esterno in maniera analitica, cioè la misura in cui il campo circostante condiziona la percezione di un singolo oggetto all'interno del campo stesso. Sulla base di questa definizione, la popolazione viene suddivisa in soggetti campo-indipendenti e campo-dipendenti. Gli studi classici per analizzare lo stile cognitivo sono il *rod & frame test* (RFT) e l'*embedded figures test* (EFT). Il RFT misura l'accuratezza con cui un soggetto, in condizioni di conflitto visuo-proprioceettivo, riesce a collocare in posizione esattamente verticale un *rod* quando questo è inserito in un *frame* orientato lungo l'asse verticale in modo discordante. L'EFT misura la capacità dell'individuo di estrarre una figura geometrica semplice da un *pattern* visivo complesso. I soggetti campo-indipendenti sono capaci di collocare il *rod* accuratamente sulla verticale oggettiva e di estrarre la figura semplice; viceversa il soggetti campo-dipendenti sono fortemente condizionati dal campo circostante e pertanto non posizionano con accuratezza il *rod* sulla verticale ed estraggono con difficoltà la figura semplice dal pattern visivo complesso. Barrett & Thornton (1968) ipotizzarono che i soggetti campo-indipendenti fossero molto più sensibili agli stimoli proprioceettivi e pertanto, in presenza di un elevato flusso visivo generato da un *display* ad ampio FOV, fossero più suscettibili alla *simulator sickness* per il conseguente mismatch sensoriale. In effetti nel loro studio del 1968, i soggetti campi-indipendenti secondo il RFT, mostravano un'elevata incidenza di *simulator sickness*. Barrett et al. (1969) studiarono lo stile

cognitivo degli stessi soggetti mediante l'EFT che, nell'interpretazione più restrittiva, è un test propriamente percettivo, ma questo *test* non risultò statisticamente correlabile con la suscettibilità alla *simulator sickness*. Infine nel 1970, lo stesso gruppo (Barrett et al.) concluse che i soggetti campo-dipendenti al RFT manifestavano una maggiore incidenza e severità di *simulator sickness*, seppure senza significatività statistica. Viceversa, Kennedy (1975) ipotizzò che la campo-indipendenza all'EFT potesse essere uno *skill* fondamentale per il pilotaggio, perché l'abilità cognitiva consentirebbe di ignorare gli *input* propriocettivi che sono irrilevanti ai fini della condotta della missione (nel gergo aeronautico il cosiddetto *seat-of-the-pants*) nelle condizioni di volo considerate potenzialmente disorientanti (volo notturno, volo in IFR, volo in formazione). Conclusioni confermate dal lavoro di Long (1975) che evidenziava una prevalenza statisticamente significativa di soggetti campo-indipendenti al RFT tra i piloti militari della US Navy rispetto a due diverse popolazioni di controllo rappresentate da studenti di *college* e dagli allievi pilota della US Navy Academy. Rimane dubbia l'interpretazione di quest'ultimo dato, cioè se la *performance* al RFT dei piloti esperti rispetto agli allievi pilota sia l'espressione dell'iter selettivo condotto, o piuttosto il risultato dell'addestramento al pilotaggio. Questo dato tuttavia è coerente con i risultati della ricerca di Cullen et al. (1969) che valutarono lo stile cognitivo tra piloti di compagnia aerea e ingegneri volo (già risultati campo-indipendenti rispetto agli studenti di *college*), trovando, anche in questo caso, una differenza significativa di campo-indipendenza tra i piloti, al punto da chiedersi se la campo-indipendenza non fosse un requisito selettivo fondamentale per la professione di pilota o se piuttosto non fosse l'addestramento al pilotaggio a sviluppare e perfezionare *skill* cognitivi che altrimenti non sarebbero stati pienamente espressi. In realtà l'ipotesi più attendibile è che tra i piloti prevalga *ab initio* la campo-indipendenza e che l'addestramento al volo possa accentuare tale stile cognitivo, senza determinare reali "trasformazioni" dalla

campo-dipendenza. Studiando la campo-indipendenza con l'EFT e correlandola con l'immersione nella realtà virtuale, Hecht & Reiner (2007) affermano che l'abilità di superare l'organizzazione strutturale del campo, disperdendola al fine di localizzare la figura geometrica semplice, e di ricostruirla secondo un modello mentale interno, si manifesta anche in altre aree dell'attività psicologica, sia cognitiva che comportamentale, del soggetto. Mentre i soggetti campo-dipendenti fanno affidamento soprattutto su fonti esogene, sul campo circostante e sui suoi elementi contestuali e ne sono profondamente condizionati, i soggetti campo-indipendenti sono capaci di ignorare gli elementi esterni e di fare affidamento sulle loro risorse interne. Nonostante queste esplicite e marcate differenze, le due condizioni non sono tuttavia l'espressione di una dicotomia, di una divisione manichea della popolazione umana, ma piuttosto sono gli estremi di un *continuum*, in cui i campo-indipendenti performano meglio nei compiti cognitivi che richiedono abilità analitiche, mentre i campo-dipendenti rendono meglio nei compiti interpersonali che richiedono una buona valutazione degli elementi sociali. Tuttavia è indubbio che, proprio in virtù del loro stile cognitivo, i soggetti campo-indipendenti siano in grado di estrarre le informazioni rilevanti e significative da un *pattern* complesso, ignorando ogni elemento ridondante o disturbante. Perciò, "i soggetti campo-indipendenti hanno l'indubbio vantaggio di riorganizzare il campo percettivo e di costruirlo in accordo con le loro precedenti conoscenze interne, ignorando gli stimoli irrilevanti" (Witkins et al. 1971). Nell'ambito della simulazione e della realtà virtuale, nonostante i significativi e continui progressi nelle tecnologie informatiche, non si è ancora raggiunta la piena fedeltà dei sistemi: questo rende necessario, da parte dell'utente, uno sforzo creativo per riempire lo spazio tra l'esperienza virtuale e quella del mondo reale, attraverso una sorta di fusione tra gli stimoli grezzi generati dal computer e la loro ricostruzione mentale (sia cognitiva che emotiva) operata sulla base degli stessi *input*. L'ambiente virtuale della

simulazione aerea è senza dubbio un contesto che contiene informazioni irrilevanti e disturbanti che devono essere "soppresse" per dedicarsi esclusivamente agli elementi rilevanti. In questo compito, come detto, i soggetti campo-indipendenti superano quelli campo-dipendenti perché sono in grado di riorganizzare il campo appena percepito e di ricostruirlo in accordo con le loro conoscenze interne precedentemente acquisite. Gli altri studi che hanno riscontrato una maggiore incidenza di chinetosi e *simulator sickness* in particolare nei soggetti campo-dipendenti al RFT (Guerraz et al. 2001) ipotizzano che gli stimoli vestibolari conflittuali in presenza di una forte dipendenza visiva evocano la chinetosi e che la debole capacità di ricostruzione cognitiva dell'esperienza vissuta, in presenza di stimoli visivi irrilevanti o disturbanti (bassa fedeltà visiva, campo visivo ampio, *vection*), determini un minore coinvolgimento e quindi una ridotta capacità di immersione nella realtà virtuale. Pertanto si riaffaccia l'ipotesi che i soggetti campo-indipendenti siano molto meno suscettibili alla *simulator sickness* o alla *cybersickness*, perché più capaci di ricostruire cognitivamente almeno l'esperienza propriocettiva. Infine, è ipotizzabile che il sistema visivo dei soggetti campo-dipendenti sia dominante in periferia, rispetto a quello dei soggetti campo-indipendenti che è fovea-dominante. Poiché il campo visivo periferico e i bastoncelli sono più sensibili al movimento della fovea e dei coni, e poiché la percezione del movimento alla periferia del campo visivo può determinare la *vection*, è ipotizzabile che i soggetti campo-dipendenti abbiano effettivamente più possibilità di sviluppare e di sperimentare conflitti visuo-vestibolari e quindi chinetosi in generale e *simulator sickness* in particolare.

### **I correlati fisiologici della *simulator sickness***

Nonostante il SSQ sia il *gold standard* per le indagini clinico-epidemiologiche sulla *simulator sickness*, diversi studi sono stati condotti per identificare indicatori obiettivi di *distress* e/o *discomfort*, al fine di correlarli sul piano psico-fisiologico con l'entità della *simulator sickness*. Sono stati utilizzati

principalmente la frequenza cardiaca (intervallo R-R), la *heart rate variability* (HRV), la frequenza respiratoria, la conduttanza e la resistenza cutanee, l'elettrogastrografia<sup>14</sup> (Shupak & Gordon 2006), tutti parametri fisiologici in qualche modo espressione dello stato della bilancia simpato-vagale. Miller et al. (1993) hanno studiato su piloti militari di elicottero dopo l'attività su simulatori di volo a base fissa, la correlazione tra i punteggi del SSQ (TS e i tre *cluster* N-O-D) e alcuni parametri fisiologici obiettivi: intervallo R-R dell'ECG, conduttanza cutanea, elettrogastrografia. I punteggi più elevati al SSQ correlavano statisticamente con l'elettrogastrografia e con la frequenza cardiaca. Quest'ultima mostrava un caratteristico *pattern* variabile e dipendente dalla quota di effettuazione del profilo di volo simulato: nei profili volati a quota più bassa (100 ft o NOE) la frequenza cardiaca aumentava maggiormente rispetto alle missioni volate a quota più alte, espressione dell'attivazione del tono simpatico generato dal *workload* per la gestione della missione. Tuttavia, nonostante la riscontrata correlazione tra SSQ e parametri fisiologici, questi non appaiono dotati di valore predittivo sulla effettiva incidenza della *simulator sickness*.

Fowlkes et al. (1993) hanno studiato gli effetti della *simulator sickness* sull'accomodazione visiva. Questo è il meccanismo fisiologico che consente la messa a fuoco del sistema diottrico dell'occhio, il cristallino, attraverso la contrazione o il rilasciamento del muscolo ciliare: la prima determina un aumento del potere diottrico, il secondo lo riduce. Il muscolo ciliare è sottoposto al controllo del sistema nervoso autonomo, ma in realtà è prevalentemente controllato dal parasimpatico: l'attivazione vagale determina la contrazione del muscolo ciliare, l'aumento della convessità del cristallino e il conseguente aumento del potere diottrico dell'occhio e quindi la messa a

---

<sup>14</sup> L'elettrogastrografia è una tecnica non invasiva di monitoraggio della funzione gastrica mediante elettrodi di superficie applicati sulla parete addominale che registrano le variazioni del potenziale elettrico dell'attività gastrica, nelle chinetosi, prima della comparsa del vomito, si evidenzia un'attività elettrica ad alta frequenza (4-9 cicli/min) che sostituisce quella basale a 3 cicli/min, seppure con ampia variabilità inter-individuale.

fuoco da vicino. La stimolazione del simpatico determina un modesto rilasciamento del muscolo ciliare, contribuendo alla messa a fuoco da lontano. A riposo accomodativo, cioè in assenza di un efficace stimolo visivo, il muscolo ciliare assume uno stato intermedio di contrazione, definito *dark focus* (Leibowitz & Owens 1975), stabile finché non sopraggiunga un adeguato stimolo luminoso o una variazione comunque indotta (anche per via farmacologica) della bilancia simpato-vagale. Lo stato di contrazione intermedia del muscolo ciliare, cioè il *dark focus*, come l'HRV, è un buon indicatore, seppure non specifico, dello stato di attivazione del sistema nervoso autonomo. Fowlkes et al. (1993) hanno studiato la possibile correlazione tra il *dark focus* e l'entità della *simulator sickness* in piloti militari prima e dopo l'effettuazione di profili di volo simulati. I soggetti che riportavano sintomi al Pensacola MSQ, usato perché il SSQ non era stato ancora validato da Kennedy et al. (1993), presentavano valori di *dark focus* spostati verso la visione da vicino, seppure le immagini dell'OTW venissero proiettate su uno schermo con campo visivo al DEP di 80° orizzontali e 40° verticali posto a 4,57 metri dall'osservatore. I soggetti che non presentavano segni e sintomi di *simulator sickness* non evidenziavano cambiamenti del *dark focus*: la differenza di valore dell'accomodazione a riposo nella fase post-simulatore risultava significativa tra soggetti *sick* e *non-sick*, significatività assente nella condizione pre-volo. Ciò appare coerente con una evidente prevalenza del tono parasimpatico che caratterizza e determina a livello viscerale la sintomatologia delle chinetosi; tuttavia, dopo l'effettuazione di profili di volo più complessi, impegnativi e prolungati da parte di piloti mediamente esperti (1000 ore-volo), gli autori hanno evidenziato nei soggetti risultati positivi alla *simulator sickness* una variazione dell'accomodazione a riposo nella fase post-volo verso la messa a fuoco da lontano, indicativa quindi di una attivazione simpatica, risultata minore seppure statisticamente significativa di quella evidenziata dai soggetti *non-sick*, come se la maggiore

complessità operativa della missione volata al simulatore avesse mascherato l'attesa prevalenza parasimpatica generata dalla chinetosi.

Anche Min et al. (2004) hanno studiato i correlati fisiologici della *simulator sickness* a seguito della esposizione a un simulatore di guida stradale a base fissa. La novità dello studio è rappresentata dall'aver monitorizzato non solo gli abituali parametri fisiologici rappresentati dalla frequenza cardiaca, dall'HRV, dalla conduttanza cutanea e dalla temperatura corporea periferica, ma anche l'attività elettrica cerebrale mediante EEG dei lobi frontali e parietali. Sulla base del SSQ somministrato verbalmente ogni 5 minuti, durante i 60 minuti previsti di esposizione alla simulazione di guida, entro 10 minuti dall'avvio della guida simulata i punteggi N e D oltre al TS hanno iniziato ad aumentare, mentre il punteggio O è aumentato dopo 15 minuti, con differenza significativa rispetto alla fase pre-simulatore. L'intervallo R-R dell'ECG e la temperatura corporea periferica sono diminuiti in maniera non significativa a partire dal quinto minuto di guida simulata, mentre la conduttanza cutanea è aumentata anch'essa dal quinto minuto, sempre senza significatività statistica. Interessanti i risultati dell'analisi dell'EEG: l'attività delta è aumentata significativamente dopo 5 minuti di simulazione di guida, mentre le attività theta, alfa e beta sono diminuite anch'esse in maniera significativa. Il TS del SSQ correla positivamente con l'attività delta dei lobi frontali e parietali e negativamente con l'attività theta degli stessi lobi cerebrali e, in virtù della variazione maggiore dell'attività theta rispetto a tutte le altre, questa è stata considerata dagli autori come correlato fisiologico cerebrale della *simulator sickness*. Gli altri parametri fisiologici, tutti possibili indicatori di alterazione della bilancia simpato-vagale, hanno mostrato variazioni compatibili con studi precedenti, ma senza nulla aggiungere in termini di predittività della *simulator sickness*.

Lucertini et al. (2007) presso il Reparto Medicina Aeronautica e Spaziale del Centro Sperimentale Volo hanno condotto uno studio inteso a correlare il

*cluster* D del SSQ con un test obiettivo di stabilità posturale, la stabilometria statica, e a valutare l'efficacia antichinetosica di un farmaco, la cinnarizina, e di un rimedio omeopatico, il *cocculus indicus*. La cinnarizina, antagonista non competitivo dei recettori H1, agisce con un meccanismo duplice sul sistema vestibolare: bloccando il flusso degli ioni Ca dall'endolinfa alle cellule sensoriali vestibolari e con la vasodilatazione cerebrale che, variando il flusso e la disponibilità metabolica nei nuclei vestibolari, ne determina la depressione funzionale. La cinnarizina risulta efficace come farmaco antichinetosico, soprattutto nel mal di mare ed evidenzia scarsi effetti collaterali sulle funzioni cognitive e la vigilanza, rendendola pertanto utilizzabile anche in attività lavorative caratterizzate da un'elevata richiesta attentiva. I soggetti arruolati per lo studio sono risultati tutti suscettibili alle chinetosi, sulla base del MSHQ e della valutazione preliminare mediante il CST. Prima e dopo (serialmente) l'attività nel simulatore di volo a base mobile esapodica e OTW con campo visivo al DEP di 47° orizzontali e 27° verticali, i soggetti sono stati valutati per l'eventuale instabilità posturale con la stabilometria statica e hanno compilato il SSQ e il VASS (*visual analog score for evaluating sleepiness symptoms*). Della stabilometria statica sono stati analizzati due parametri: SE90, cioè la superficie dell'ellisse in cui cadono il 90% delle oscillazioni del centro di gravità; LT, cioè la lunghezza totale dei movimenti eseguiti dai soggetti. I test posturali venivano eseguiti nelle due condizioni occhi aperti e occhi chiusi, con una sequenza randomizzata tra le due condizioni. Dall'analisi dei punteggi del SSQ è emerso che i sintomi del *cluster* O sono stati segnalati in maniera prevalente rispetto a quelli dei *cluster* N e D, seppure senza significatività statistica e senza variabilità rispetto alle tre condizioni sperimentali (placebo, farmaco, rimedio). La cinnarizina quindi non ha dimostrato efficacia antichinetosica; è stato tuttavia riscontrato che nei SSQ compilati alle ore 18.30 e 20.00 i punteggi sono aumentati nelle condizioni placebo e rimedio, ma non in quella cinnarizina, come per un'efficacia

farmacologica ritardata. La stabilometria statica ha evidenziato nella condizione occhi chiusi valori di SE90 e LT molto alti, espressione di un peggioramento della instabilità posturale statisticamente significativo nelle due prove effettuate dopo la sessione al simulatore. Il punteggio peggiore del test si è ottenuto nella condizione cinnarizina, seguita da quella rimedio, che ha mostrato una risposta stabilometrica estremamente irregolare e infine la condizione placebo, effetto quest'ultimo attribuibile ad apprendimento occorso nella ripetizione dei test. Non può essere escluso che la farmacocinetica della cinnarizina abbia determinato questo risultato, cioè la sua scarsa efficacia nel controllare l'instabilità posturale post-simulatore, perché il picco di concentrazione plasmatica si è verificato più tardivamente nel pomeriggio, come suggerito dal mancato incremento dei punteggi del SSQ nelle misurazioni delle ore 18.30 e 20.00 osservato invece nelle condizioni placebo e rimedio. Il VASS ha evidenziato un aumento significativo del punteggio, quindi un peggioramento della vigilanza, nella condizione cinnarizina immediatamente dopo il completamento delle prove al simulatore, persistito anche per le tre ore successive, effetto assente nelle altre due condizioni. Nonostante la nota variabilità inter- e intra-soggetto della *simulator sickness*, si è ipotizzato che gli effetti sulla vigilanza manifestati nella condizione cinnarizina fossero l'espressione di effetti collaterali farmacologici, incompatibili con lo svolgimento di compiti attentivi, piuttosto che l'espressione di *after-effect*.

### **L'instabilità posturale**

L'instabilità posturale o atassia è uno degli effetti acuti o tardivi più caratteristici dell'esposizione ai simulatori di volo ed è riconducibile, nell'indagine epidemiologica della fenomenologia della *simulator sickness* basata sul SSQ, al *cluster D*. Fowlkes et al. (1987) ipotizzarono che l'atassia post-simulatore potesse essere considerata un equivalente del cosiddetto *mal de débarquement*, cioè della sindrome caratterizzata dalla comparsa di disturbi

simil-chinetosici esclusivamente di tipo instabilità posturale al termine di una lunga esposizione al moto ondoso del mare, e quindi espressione di un riarrangiamento della risposta motoria (posturale e deambulatoria) agli *input* visivi e inerziali terrestri, divenuti inusuali dopo un lungo periodo di navigazione in mare aperto. Pertanto, l'atassia post-simulatore è l'espressione di un effetto adattivo alla nuova situazione ambientale, cioè alla ripresa dell'esposizione al mondo reale. L'intensità e la durata dell'atassia, inoltre, aumentano con il prolungarsi delle sessioni addestrative e, mentre la *simulator sickness* tende a regredire con il ripetersi della esposizione al medesimo simulatore, l'atassia post-esposizione tende invece ad aumentare (Berbaum et al. 1994).

Lo studio condotto da Kennedy et al. (1993b) ha valutato la comparsa di atassia e di eventuale *impairment* cognitivo e psicomotorio transitorio dopo l'esposizione al simulatore. Nonostante alcuni minimi effetti cognitivi (come la difficoltà di concentrazione) valutati esclusivamente mediante il SSQ, in un terzo dei soggetti, che presentavano i punteggi più elevati dei *cluster* O e D, venivano riportati nel *follow-up* degli *after-effect* sempre mediante SSQ anche fatica mentale, difficoltà di concentrazione e difficoltà di lettura. 411 soggetti esposti a complessive 726 sessioni addestrative su simulatori di volo di velivoli ad ala fissa o ala rotante, sia a base fissa che mobile, furono sottoposti oltre che a stadiazione della *simulator sickness* mediante SSQ, anche a test di stabilità posturale e a test cognitivi. Per quanto riguarda i test posturali, nei soggetti di controllo non esposti al simulatore di volo, ma a una sessione di 30 minuti di videogiochi, si è evidenziato un miglioramento dei risultati, attribuito a effetto apprendimento, essendo stati utilizzati test di tipo semeiologico e non strumentale, mentre i soggetti esposti ai simulatori evidenziavano un peggioramento nell'esecuzione dei test, con una differenza statisticamente significativa tra le due popolazioni. Seppure non sia emersa differenza significativa tra i due gruppi nell'analisi della *performance* cognitiva

e psicomotoria, i controlli hanno evidenziato un significativo miglioramento del punteggio nei test cognitivi ma non in quello psicomotorio nella seconda prova, miglioramento assente invece nei soggetti esposti al simulatore di volo. Dall'analisi statistica dei risultati dei test di stabilità posturale è emersa inoltre la correlazione tra atassia e simulatori a base mobile, seppure occasionalmente sia stata riscontrata anche sui simulatori di volo a base fissa e nei sistemi visivi di immersione nella realtà virtuale, come gli *head/helmet mounted display* (HMD). Per Kennedy et al. (1993b) l'instabilità posturale che compare a seguito della esposizione ai simulatori di volo, è caratterizzata da grande variabilità intra- e inter-individuale ed è attribuibile a fattori individuali, di apparato o di *task*, cioè alle variabili legate alle caratteristiche generali degli individui o alle caratteristiche tecniche del simulatore o alla tipologia, alla durata e alla complessità delle missioni volate al simulatore. Per Kolasinski et al. (1994) il riscontro pre-simulatore di disturbi atassici, espressi dal punteggio D del SSQ, rappresenta una controindicazione all'effettuazione della seduta addestrativa perché predittiva di *simulator sickness* molto accentuata e pertanto suggeriscono, a fini preventivi, di correlare l'entità dell'atassia pre-esposizione con il punteggio dei *cluster* N e D, piuttosto che correlare semplicemente l'entità dell'atassia nelle fasi pre- e post-simulatore.

Sui simulatori di volo a base fissa, invece, viene comunemente riportata la comparsa della VIMS, *virtually induced motion sickness* che, nonostante i miglioramenti e gli sviluppi tecnologici nel campo della generazione computerizzata di immagini e il conseguente perfezionamento della fedeltà fisica visiva dei simulatori o dei sistemi di realtà virtuale, nulla sembrano garantire in termini di attenuazione o mitigazione della *simulator sickness*. Stoffregen et al. (2000) hanno studiato su un simulatore di volo a base fissa gli effetti dell'esposizione a oscillazioni del flusso ottico sull'asse del *roll* (cioè di variazioni di assetto latero-laterali). I soggetti arruolati, tutti non piloti, nel 46% dei casi hanno riportato al SSQ la comparsa di *simulator sickness*, con

*after-effect* persistenti per 2 ore dopo il termine della sessione al simulatore. Solo il TS del SSQ è stato analizzato, nonostante lo studio fosse finalizzato a verificare la correlazione tra VIMS e instabilità posturale e quindi anche i punteggi dei *cluster* N, O e D avrebbero dovuto essere valutati. Ma in realtà lo studio intendeva essere una conferma della teoria etiopatogenetica delle chinetosi di Riccio & Stoffregen (1991) che prevede che qualunque forma di franca chinetosi sia sempre preceduta da una fase di instabilità posturale, confermata nell'esperimento dal riscontro di un aumento significativo, nei soggetti risultati positivi al SSQ per la *simulator sickness*, della velocità dei movimenti del capo effettuati a seguito delle oscillazioni del flusso ottico sull'asse del *roll*.

Kennedy et al. nel 1997 sono tornati a studiare l'instabilità posturale a seguito dell'uso dei simulatori di volo, continuando l'atassia a essere segnalata durante e al termine di sessioni addestrative sui simulatori di volo militari. Lo studio è stato condotto quindi su piloti militari di varia anzianità ed esperienza (in termini di ore-volo) dopo l'effettuazione di missioni su simulatori a base mobile di velivoli ad ala fissa che prevedevano varie tipologie di compiti operativi, compreso l'attacco al suolo, la navigazione a bassa quota, il rifornimento in volo, ecc. L'obiettivo dell'esperimento era di correlare il punteggio del *cluster* D con alcuni parametri di stabilità posturale mediante test semeiologici. I risultati hanno evidenziato una correlazione significativa tra il punteggio D del SSQ e i test semeiologici di stabilità posturale utilizzati: più alto è il punteggio del *cluster* D, peggiore risulta la *performance* nell'esecuzione dei test posturali. Secondo la teoria del *mismatch* sensoriale, l'instabilità posturale è una conseguenza della chinetosi ed è quindi una delle espressioni cliniche del conflitto stesso. Secondo la teoria di Riccio & Stoffregen, invece, l'instabilità posturale è la causa della chinetosi: l'atassia è determinata dal tentativo dell'organismo di adattarsi ai nuovi stimoli visivi e inerziali generati dal simulatore di volo e la sua persistenza al termine del

profilo di volo simulato è l'espressione dell'incompleto adattamento ottenuto. Secondo la teoria di Reason & Brand, l'instabilità posturale è la risposta adattiva al nuovo contesto ambientale generato dal simulatore che crea conflitti sensoriali di varia natura tra gli *input* attuali e quelli attesi e la sua persistenza come *after-effect* esprime il nuovo conflitto generatosi dal ricollocamento dell'essere umano nell'ambiente reale, che richiede un nuovo arrangiamento delle afferenze sensoriali. Bubka et al. (2007) affermano che la *simulator sickness*, come la VIMS, trova nella teoria del conflitto sensoriale di Reason & Brandt (1975) la sua ipotesi etiopatogenetica più accreditata, seppure anche altre continuano a essere indagate. In un simulatore di volo è il flusso ottico a generare la percezione del movimento di sé, cioè il fenomeno della *vection*: se il simulatore è a base fissa emerge il conflitto sensoriale tra lo stimolo visivo (presente) e quelli inerziali, attivi sui sistemi vestibolare e propriocettivo (assenti); se il simulatore è a base mobile fattori tecnici, ingegneristici e computazionali possono determinare una scarsa fedeltà del simulatore rispetto al sistema reale, scatenando il *mismatch* tra *input* attuali e *input* attesi/previsti sulla base della precedente esperienza. Gli autori hanno verificato la capacità cinetogena di due differenti *pattern* di flusso ottico, uno in espansione e l'altro in contrazione: il primo genera la percezione di movimento di sé in avanti, l'altro induce la percezione di *vection* indietro. Il flusso ottico veniva presentato su uno schermo con campo visivo al DEP di 53° orizzontali e 45° verticali. La stadiazione pre- e post-test della VIMS veniva effettuata mediante SSQ di cui venivano analizzati il TS e i punteggi di *cluster*. Il TS e i punteggi N e O della prova con flusso ottico in espansione, rappresentativo del movimento del soggetto in avanti, sono risultati significativamente più alti di quelli della seconda condizione (flusso ottico in contrazione). Il punteggio D della condizione flusso in espansione ha evidenziato una tendenza verso la significatività rispetto all'altra condizione. Il TS è risultato più alto del 70%, il punteggio N del 123% e punteggio O del

57% nella condizione flusso in espansione rispetto alla condizione flusso in contrazione. La deambulazione o l'uso di qualunque mezzo di trasporto espone l'essere umano a un flusso ottico in espansione e tale *input* visivo si associa ad altre informazioni sensoriali, prevalentemente inerziali, provenienti dagli altri sistemi coinvolti nella percezione del movimento. Nell'esperimento condotto, la posizione seduta e quindi immobile dei soggetti ha generato il conflitto sensoriale caratteristico della VIMS, in accordo con la teoria di Reason & Brand (1975). Inoltre, gli autori ipotizzano che un flusso ottico in espansione generi una *vection* più accentuata e quindi una intensità maggiore della sintomatologia della VIMS, quantificata dal SSQ.

Concludendo questa rassegna dalla letteratura sulla *simulator sickness*, si può affermare con Webb et al. (2009) che i simulatori di volo, per la loro convenienza, efficacia e sicurezza, sono diventati degli strumenti fondamentali per l'addestramento al pilotaggio. Tuttavia non si può nascondere l'evidenza del *discomfort/distress* che possono generare negli utenti e che è attribuibile ai fattori relativi al soggetto, al simulatore e ai *task*, precedentemente discussi. Per poter mitigare l'insorgenza e l'entità della *simulator sickness*, al fine di garantire sia il benessere e la sicurezza degli utenti che la piena efficacia addestrativa dei sistemi tecnologici, è necessario un intervento precoce e interdisciplinare, sia in fase di progettazione che di sviluppo, che agisca sulle tre aree di potenziale criticità, rispettivamente riferibili all'area tecnologica, all'area fisiologica e all'area cognitiva ed ergonomica.

## STUDIO SPERIMENTALE

La rassegna della letteratura riportata nelle pagine precedenti non ha evidenziato alcun lavoro scientifico che abbia investigato l'astenopia accomodativa, cioè l'insieme di disturbi oculari che caratterizzano il *cluster O* del SSQ, in termini di coinvolgimento percettivo, limitandosi all'approccio sensoriale e all'identificazione dei sintomi del *cluster O* come fatica oculare e non visiva. Nel settore aeronautico, la cosiddetta fatica operativa, cioè "lo stato di stanchezza associato a lunghi periodi di lavoro, prolungati periodi di carenza di sonno o attività svolte in condizione di desincronizzazione dei ritmi circadiani" (Caldwell & Caldwell 2003) rappresenta una delle principali attuali aree di studio e ricerca, per fornire agli operatori del trasporto aereo precise indicazioni sulle cause e definirne quindi le possibili contromisure, al fine di mitigare il rischio di errore umano indotto dalla fatica. Tuttavia, dal punto di vista occupazionale, la fatica viene definita come "uno stato di malessere generale determinato da un'attività lavorativa che richiede un particolare impegno fisico, psichico o sensoriale" (Carta et al. 2003). Sono stati condotti numerosi studi per correlare lo stato di fatica con parametri e indicatori psicofisiologici, tra cui i movimenti oculari (Wilson et al. 2007, McKinley et al. 2011, van de Merwe et al. 2012), ma nessun lavoro ha verificato se il *cluster O* della *simulator sickness* sia espressione di impegno cognitivo o quanto meno attentivo. Per tale ragione è stato predisposto un *setting* sperimentale pilota che prevedeva 3 fasi: una verifica della abilità visuo-spaziale dei soggetti mediante un test di rotazione mentale; un paradigma di Posner con *cue* acustico per esplorare i meccanismi di orientamento dell'attenzione spaziale *covert*; un compito di *visual search* (mediante test di cancellazione) con registrazione mediante *eye-tracker* dei movimenti oculari, per verificare l'eventuale effetto dell'esposizione alla simulazione di volo sull'attenzione selettiva, sulla fatica visiva e sulle strategie di esplorazione visiva, per correlare la *performance* nei test di cancellazione con il punteggio del *cluster*

O del SSQ, al fine di identificare un nuovo correlato psicofisiologico della *simulator sickness*. Per lo studio sono stati reclutati 42 soggetti, tutti di sesso maschile e destrimani, tutti piloti militari in servizio presso i Reparti Operativi dell'Aeronautica Militare, con livelli differenti di esperienza (età  $30,23 \pm 2,75$ ; ore volo totali  $797,85 \pm 473,97$ ) e competenza professionale (*fast-jet*, linea trasporto, linea ala rotante). Tutti i soggetti presentavano normale acutezza visiva (10/10 naturali in OO) e normale funzione uditiva all'audiometria tonale. Sono stati suddivisi in due gruppi: casi sperimentali, 22 soggetti (età  $29,86 \pm 2,64$ ; ore volo totali  $738,63 \pm 455,89$ ); controlli, 20 soggetti (età  $30,65 \pm 2,88$ ; ore volo totali  $863 \pm 496,52$ ), tutti con pregressa esperienza di attività di volo simulata su sistemi a base fissa o mobile e con OTW proiettato su *dome* o su schermi CRT.

Tutti i soggetti arruolati per lo studio hanno fornito il consenso informato alla partecipazione allo studio; il protocollo sperimentale non prevedeva alcuna procedura invasiva ed era stato approvato dal comitato di valutazione sperimentale del Centro Sperimentale Volo - Reparto Medicina Aeronautica e Spaziale di Pratica di Mare (RM).

Tutti i soggetti arruolati per lo studio sono stati sottoposti preliminarmente a GEFT (*Group Embedded Figure Test*) per la valutazione dello stile cognitivo: il 36% dei soggetti ha ottenuto il punteggio massimo con 18 risposte corrette su 18, il 50% dei soggetti ha ottenuto un punteggio di 17 risposte corrette su 18, non riuscendo a rispondere correttamente o nel tempo limite previsto alla figura 9 della seconda serie del test, infine il 14% dei soggetti ha ottenuto un punteggio di 16 risposte corrette su 18, con una pari incidenza di errore nella figura 8 della seconda serie o nella figura 9 della terza serie, oltre ad una mancata/errata risposta alla figura 9 della seconda serie. Pertanto, in base al punteggio ottenuto e alla suddivisione in quartili proposta da Witkin et al. (1971), tutti i soggetti appartengono alla categoria dei campo-indipendenti, con una marcata capacità di *disembedding* percettivo.

Tutte le sessioni sperimentali si sono svolte in un arco temporale di 4 ore, compreso tra le 08.30 e le 12.30, con la partecipazione di 3 soggetti per volta.

Per i casi sperimentali, per l'esposizione alla realtà virtuale della simulazione aerea è stato utilizzato un dimostratore di disorientamento spaziale AIRFOX-DISO della ditta AMST - Systemtechnik GmbH di Rashofen (Austria). Si tratta di un simulatore di volo generico, cioè di un apparato non rappresentativo di alcuno specifico aeromobile ma che riproduce l'interno di un *cockpit* standard con strumenti di volo, comandi di volo e strumentazione motoristica e di *performance*. Il sistema computerizzato genera stimoli visivi, acustici e di movimento coerenti con tre diverse modalità di funzionamento: *fast-jet*, aeromobile a elica da addestramento basico ed elicottero. Il sistema, dotato di base mobile esapodica idraulica a 6 gradi di libertà e capace di rotazione continua intorno all'asse verticale, genera (Tab. 5) movimenti angolari (rotazioni) intorno agli assi del *pitch*, *roll* e *yaw*, e movimenti lineari (traslazioni) di *heave* (lungo l'asse verticale z), *surge* (lungo l'asse sagittale x) e *sway* (lungo l'asse trasversale y), coerenti con gli *input* sui comandi di volo e capaci di realizzare scenari operativi relativi a fasi di navigazione, ma anche di attacco al suolo, combattimento aereo e acrobazie, oltre che sviluppare condizioni di volo potenzialmente disorientanti, trattandosi primariamente di apparato per l'addestramento aerofisiologico alle procedure di riconoscimento e di rimessa del disorientamento spaziale in volo. Le immagini generate dal computer del sistema OTW vengono proiettate su uno schermo che le riversa su uno specchio di ingrandimento, che genera un campo visivo al DEP di 42° orizzontali e 27° verticali.

I soggetti sperimentali hanno volato il simulatore per 60 minuti, svolgendo cinque profili di volo, sia diurni che notturni, sia in condizioni VFR<sup>15</sup> che IFR, in sequenza predeterminata dal protocollo sperimentale. Tutti i soggetti

---

<sup>15</sup> VFR: *visual flying rules*.

sperimentali hanno compilato il questionario SSQ due volte: subito prima dell'inizio e subito dopo la conclusione delle sessioni al simulatore.

TIPO DI MOVIMENTO	ESCURSIONE	VELOCITÀ	ACCELERAZIONE
Pitch (deg, deg/sec, deg/sec <sup>2</sup> )	± 30	± 20	± 150
Roll (deg, deg/sec, deg/sec <sup>2</sup> )	± 30	± 20	± 150
Yaw (deg, deg/sec, deg/sec <sup>2</sup> )	± 60	± 20	± 150
Continuous Yaw	360	150	± 15
Heave (m, m/sec, m/sec <sup>2</sup> )	± 0,14	± 0,4	± 8
Surge (m, m/sec, m/sec <sup>2</sup> )	> -0,27 < +0,32	± 0,4	± 8
Sway (m, m/sec, m/sec <sup>2</sup> )	± 28	± 0,4	± 8

**Tab. 5:** Parametri di rotazione e traslazione del simulatore di volo

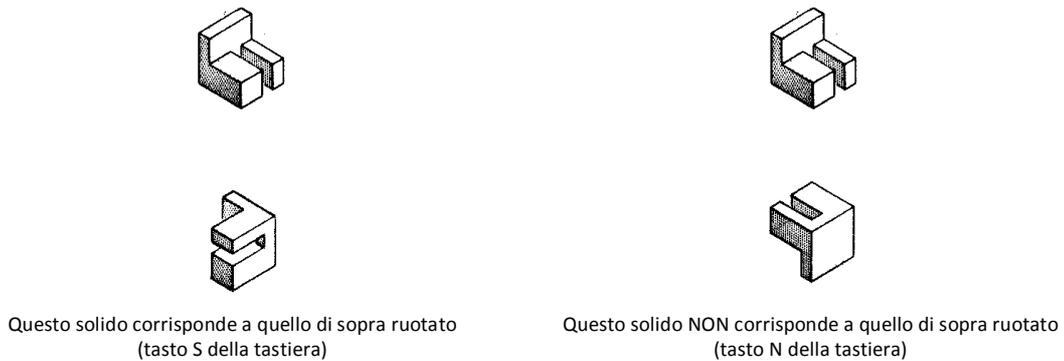
I soggetti di controllo non hanno utilizzato il simulatore di volo, ma hanno assistito a una presentazione sul disorientamento spaziale in volo, anch'essa della durata di 60 minuti; la presentazione avveniva mediante l'utilizzo di un sistema multimediale con proiezione di *slide*, immagini e filmati, su uno schermo con un campo visivo al DEP di 130° orizzontali e 65° verticali. I soggetti di controllo hanno compilato il questionario SSQ due volte: subito dopo il termine della prima sessione di test cognitivi e subito dopo la conclusione della presentazione sul disorientamento spaziale in volo. Per ragioni organizzative e di permanenza presso il Centro dei soggetti, è stato ritenuto non opportuno effettuare la somministrazione seriale del SSQ per lo studio degli *after-effect*, per evitare la perdita di dati per il mancato ritorno dei questionari eventualmente auto-compilati al domicilio.

## ROTAZIONI MENTALI

**Metodo.** Come compito di rotazione mentale è stata utilizzata una versione modificata del Thurstone Primary Mental Ability (PMA) Space test (Thurstone 1938): il test originale prevede 18 stimoli di figure solide relativamente complesse con 5 opzioni di risposta possibile (solo 1 corretta). Tutte le figure solide sono state scannerizzate generando così 90 figure complesse, che sono state presentate al centro dello schermo da 15" di un laptop con risoluzione grafica di 1280x800 pixel. Ogni *item* era costituito da una coppia di stimoli con disposizione verticale: lo stimolo *target* in alto e l'*item* da confrontare in basso (Fig. 1). Sono state generate 2 serie di *item*: una costituita dagli stimoli originali del test, l'altra ottenuta ruotando specularmente di 180° gli stimoli; in ogni serie metà degli *item* era composta da coppie nelle quali lo stimolo da ruotare era uguale al *target* e metà da *item* nei quali lo stimolo da ruotare era diverso dal *target*. Il test veniva gestito per la presentazione degli stimoli e l'acquisizione delle risposte dal programma SuperLab 2.1 (Cedrus®). L'ordine di presentazione degli *item* era randomizzato. In tale modo si sono ottenute due versioni parallele del test di rotazione mentale (A e B), ognuna composta da un numero relativamente ampio di *trials*, in modo da minimizzare eventuali effetti di apprendimento nelle somministrazioni pre/post, in considerazione delle caratteristiche dei soggetti che presentano tutti elevati capacità di elaborazione e memoria visuo-spaziale e della relativa brevità dell'intervallo temporale tra le 2 somministrazioni. L'ordine di presentazione delle due versioni del test era randomizzato tra i soggetti, cosicché metà dei soggetti sperimentali e metà dei soggetti di controllo eseguiva prima il test A e poi il test B, mentre metà dei soggetti sperimentali e metà dei soggetti di controllo eseguiva prima il test B e poi il test A.

I soggetti erano istruiti a compiere mentalmente la rotazione dell'*item*, a confrontarlo con lo stimolo *target* e rispondere quanto più accuratamente e velocemente possibile premendo con la mano destra il tasto S della tastiera se

i due stimoli erano uguali o il tasto N se i due stimoli erano diversi. Sono stati analizzati i dati relativi al tempo di risposta e all'accuratezza delle risposte.



**Fig. 1:** Esempi del test di rotazione mentale

**Analisi statistica.** Sono state eseguite due analisi della varianza multivariata MANOVA a misure ripetute, una relativa ai tempi di risposta e l'altra all'accuratezza delle risposte (numero di risposte corrette), considerando diverse variabili indipendenti: condizione sperimentale (DISO/non-DISO), età (</> media età dei soggetti reclutati), tipologia di velivolo (fast-jet/altro) ed esperienza di volo (</> media ore volo volate dai soggetti reclutati). Il limite di significatività è stato fissato a  $p < 0,05$ . La statistica descrittiva è riportata nelle Tab. 6 e 7.

**Risultati.** L'analisi della varianza condotta sui tempi di risposta ha evidenziato una differenza significativa per i gruppi della condizione sperimentale ( $F_{1,39} = 15,88647$ ;  $p = 0,000286$ ) e le ore di volo ( $F_{1,36} = 5,0484$ ;  $p = 0,030874$ ), non per le altre variabili indipendenti, cioè tipo di velivolo ( $F_{1,36} = 0,6266$ ;  $p = 0,433780$ ) ed età ( $F_{1,36} = 0,0001$ ;  $p = 0,993215$ ). E' stata condotta un'analisi *post hoc* (Bonferroni) sulla significatività della variazione dei tempi di risposta apprezzata nell'interazione tra gruppi e ore di volo volate ( $p = 0,000382$ ) che risulta determinata esclusivamente dai soggetti con esperienza

di volo inferiore alla media delle ore volate dalla popolazione generale reclutata.

L'analisi della varianza condotta sul numero di risposte corrette, cioè sull'accuratezza, ha evidenziato una differenza significativa per i gruppi della condizione sperimentale ( $F_{1,39} = 29,54162$ ;  $p = 0,000003$ ), ma non per le altre variabili considerate, cioè le ore di volo ( $F_{1,36} = 0,466$ ;  $p = 0,499259$ ), il tipo di velivolo ( $F_{1,36} = 0,231$ ;  $p = 0,633460$ ) e l'età ( $F_{1,36} = 0,043$ ;  $p = 0,836373$ ).

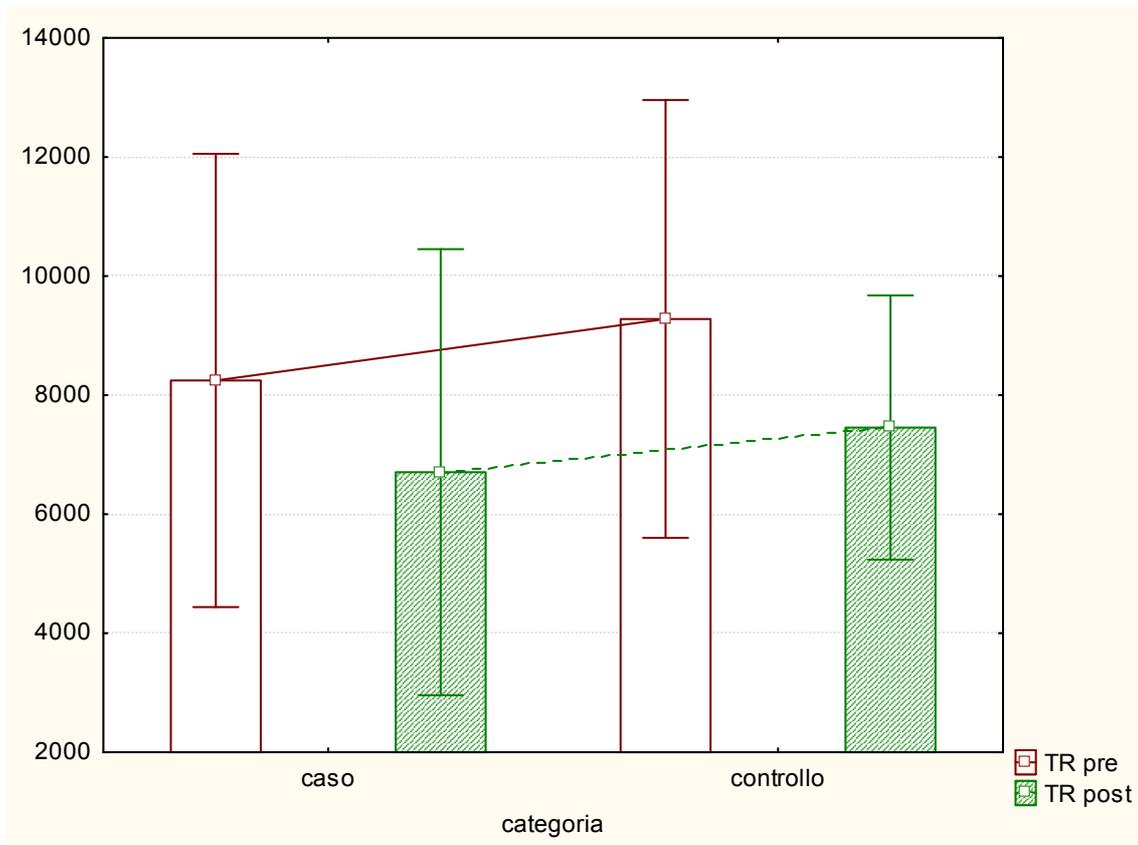
GRUPPO	TR	PRE/POST	MEDIA	DEV.STD.
CASO	TR	PRE	8246,784	3807,889
CASO	TR	POST	6704,826	3747,360
CONTROLLO	TR	PRE	9272,249	3677,395
CONTROLLO	TR	POST	7455,190	2219,140

**Tab. 6:** Statistica descrittiva tempi di reazione MRT

GRUPPO	RC	PRE/POST	MEDIA	DEV.STD.
CASO	RC	PRE	72,550	11,799
CASO	RC	POST	77,450	7,557
CONTROLLO	RC	PRE	75,350	6,192
CONTROLLO	RC	POST	80,350	7,358

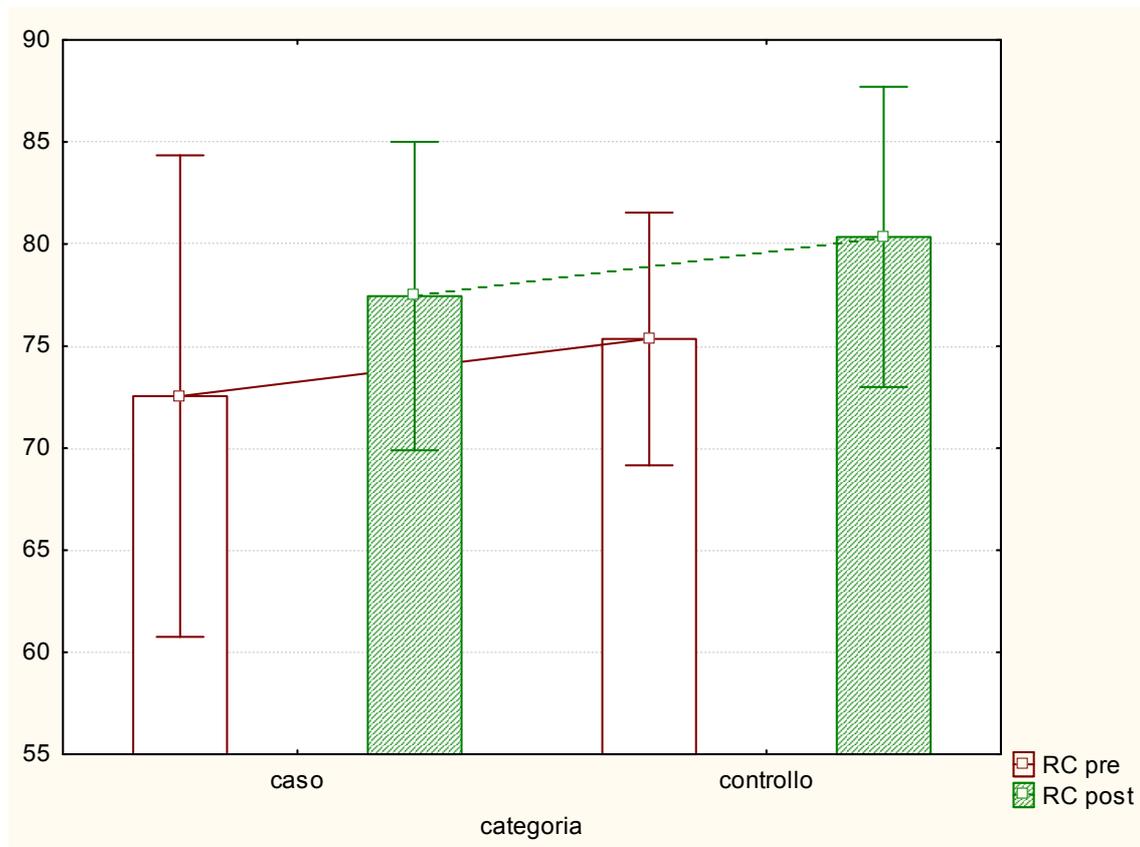
**Tab. 7:** Statistica descrittiva accuratezza MRT

**Discussione.** L'abilità di rotazione mentale consiste nella capacità di visualizzare e di manipolare mentalmente configurazioni spaziali di varia natura e caratteristiche, nonché nella capacità di mantenere l'orientamento rispetto agli oggetti e nella capacità di percepire i rapporti spaziali tra gli oggetti. Questa abilità cognitiva, pertanto, ha un importante ruolo nella navigazione umana e gli individui con una buona capacità di risolvere compiti di rotazione mentale mostrano in genere buoni livelli di abilità anche in altri compiti cognitivi di carattere spaziale (Verde et al. 2013).



**Figura 2:** Tempi di risposta PRE/POST gruppi

Diversi studi su soggetti giovani dimostrano come l'abilità di ruotare mentalmente stimoli sia predittiva della prestazione in compiti di navigazione ambientale (Palermo et al. 2008). L'abilità di rotazione mentale prevede diverse competenze cognitive: la capacità di creare l'immagine mentale di un oggetto, la capacità di ruotare mentalmente l'oggetto fino al completamento del confronto, la capacità di eseguire il raffronto, la capacità di decidere se gli oggetti sono uguali o meno e infine riportare la decisione e rispondere al test. In uno studio del Dipartimento di Aeronautica e Astronautica del MIT di Boston (Pontillo et al. 2010), i compiti di rotazione mentale sono stati utilizzati per predire la riuscita nell'addestramento quale operatore del braccio robotizzato dell'ISS (*International Space Station*).



**Figura 3:** Risposte corrette PRE/POST gruppi

Il punteggio dei test di rotazione mentale è risultato correlato con una minor durata del *training* e con una maggiore accuratezza e velocità di esecuzione dei compiti operativi a bordo che consistono nella gestione del braccio robotizzato esterno mediante l'uso di un *joy-stick*, sotto controllo visivo dello stesso mediante immagini presentate in tempo reale su schermi remoti, il tutto in condizioni di microgravità.

I soggetti arruolati nel presente studio hanno mostrato una prestazione di buon livello nell'esecuzione del test, sia in termini di tempo di risposta che di accuratezza e nella ripetizione del test hanno ulteriormente migliorato la loro prestazione, indipendentemente dalla variabile sperimentale (esposizione o meno alla simulazione di volo) e nonostante sia stata usata una versione parallela del test. Pertanto la abilità di rotazione mentale appare solida e consistente e non influenzata dalla esposizione alla realtà virtuale e dalla sua

potenziale capacità disorientante, espressa dal *cluster* D del SSQ (nel gruppo sperimentale punteggio pre-DISO:  $M = 0,632$  con  $SD = 2,967$ ; punteggio post-DISO:  $M = 17,083$  con  $SD = 17,676$ ). La prestazione nel compito di rotazione mentale ben si associa allo stile cognitivo (o quantomeno percettivo) di tipo campo-indipendente evidenziato dai soggetti nel G-EFT preliminare a cui sono stati sottoposti, sebbene l'abilità visuo-spaziale studiata con il MRT consiste nella capacità di manipolare mentalmente forme bi- o tri-dimensionali, mentre lo stile cognitivo espresso dal RFT o dall'EFT è la capacità di orientare se stesso o un oggetto esterno rispetto alla verticale gravitazionale, ovvero di isolare una figura geometrica semplice nell'ambito di una figura complessa.

## PARADIGMA DI POSNER

**Metodo.** Per esplorare i meccanismi di orientamento dell'attenzione *covert* con *cue* acustico (Ferlazzo et al. 2002) mediante il paradigma di Posner (1980), sono stati presentati in cuffia in modalità monoaurale un tono a 600 Hz oppure uno a 700 Hz che dovevano essere discriminati in termini di frequenza acustica dello stimolo, mediante risposta con i tasti del *mouse* posto trasversalmente davanti allo schermo del computer (su cui veniva proiettato un punto di fissazione) in modo che il tasto destro fosse posizionato in alto e quello sinistro in basso. I soggetti erano istruiti a premere il tasto destro se il tono acustico risultava acuto (alto), il tasto sinistro se il tono risultava grave (basso). I toni *target* a 600 e 700 Hz presentati indifferentemente sul lato destro o sinistro delle cuffie erano sempre preceduti da un *cue*, coerente o meno con la successiva presentazione laterale dello stimolo. Il *cue* era rappresentato da un rumore bianco della durata di 100 msec, sfumato (*tapered*) per 7 msec all'inizio e alla fine del segnale. Sia i toni che il *cue* venivano presentati in cuffia monoauralmente a un livello sonoro di 60 dB. Il test prevedeva 368 stimoli acustici randomizzati in successione: nel 50% delle prove lo stimolo *target* veniva presentato omolateralmente al *cue* (prove valide), mentre nel restante 50% lo stimolo compariva controlateralmente al *cue* (prove invalide). Compito del soggetto era quello di rispondere il più velocemente possibile allo stimolo *target*, presentato monoauralmente, premendo il tasto del mouse coerente con la frequenza del suono percepito, indipendentemente dalla sede anatomica in cui il *cue* o il tono *target* venivano presentati e mantenendo sempre lo sguardo fisso sul punto di fissazione.

**Analisi statistica.** Sui dati acquisiti relativi ai tempi di risposta, alle risposte valide e invalide, è stato effettuato un filtraggio, per eliminare errori e ritardi o risposte casuali. Pertanto sono stati eliminati dalla successiva analisi i tempi di risposta superiori alla media del soggetto più due volte la deviazione standard e quelli inferiori alla media del soggetto meno due volte la deviazione

standard. Sui dati così ottenuti è stata eseguita un'analisi della varianza ANOVA a misure ripetute. Il limite di significatività è stato fissato a  $p < 0,05$ . La statistica descrittiva è riportata in Tab. 8.

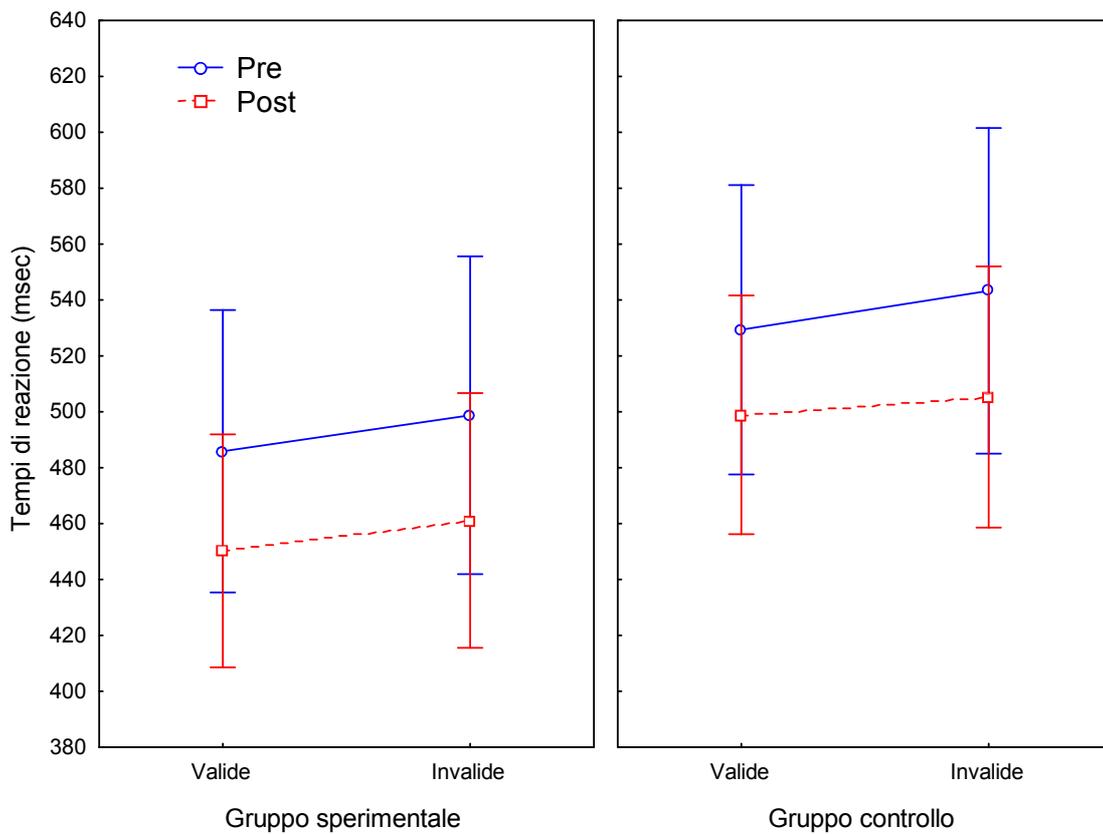
**Risultati.** Non sono state rilevate differenze statisticamente significative tra i due gruppi di soggetti in rapporto all'esposizione o meno alla simulazione di volo ( $F_{1,39} = 1,7837$ ;  $p = 0,189435$ ). E' stata invece evidenziata anche in questo caso in entrambi i gruppi (casi sperimentali e controlli) una differenza significativa tra le due misurazioni, con la seconda misurazione che risulta significativamente migliore ( $F_{1,39} = 16,9097$ ;  $p = 0,00196$ ), senza alcuna variazione o interazione rispetto all'effetto di facilitazione del *cue*, e pertanto attribuibile a effetto apprendimento.

GRUPPO	PRE/POST	VAL/INVAL	MEDIA	DEV.STD.
CASO	PRE	VAL	485,8994	24,97364
CASO	PRE	INVAL	498,7579	28,10721
CASO	POST	VAL	450,2522	20,60380
CASO	POST	INVAL	461,1267	22,53615
CONTROLLO	PRE	VAL	529,3689	25,59037
CONTROLLO	PRE	INVAL	543,2823	28,80132
CONTROLLO	POST	VAL	498,9143	21,11261
CONTROLLO	POST	INVAL	505,2825	23,09269

**Tab. 8:** Statistica descrittiva

**Discussione.** In questo esperimento è stato utilizzato il paradigma di Posner con *cue* e stimoli acustici per esplorare l'attenzione selettiva spaziale, quindi un meccanismo di orientamento dell'attenzione diverso da quello visivo, considerato che gli altri due esperimenti esploravano l'abilità visuo-spaziale con il MRT e il compito di *visual search*. L'ipotesi era che se si fosse avuta una variazione in senso peggiorativo dell'orientamento dell'attenzione per gli stimoli acustici, insieme a una variazione in senso peggiorativo dei test di abilità visuo-spaziale e di *visual search*, si sarebbero ottenuti dati differenziati

e consistenti relativi all'*impairment* cognitivo indotto dall'esposizione alla realtà virtuale. Anche in questo esperimento i due gruppi di soggetti hanno evidenziato nella seconda ripetizione del test esclusivamente un miglioramento della prestazione, senza alcuna perdita dell'effetto "facilitatore" del *cue* nelle stimolazioni valide e anche una riduzione del tempo di risposta (sempre nella seconda prova) nelle stimolazioni "invalidi".



**Figura 4:** Paradigma di Posner con *cue* e stimoli acustici

L'esposizione al volo simulato nei casi sperimentali non ha modificato la prestazione attentiva agli stimoli acustici in senso peggiorativo come era stato ipotizzato. La ragione potrebbe risiedere nel relativamente breve intervallo temporale tra le due prove, che potrebbe aver accentuato l'effetto apprendimento del test che non prevedeva, per esempio, la variazione delle frequenze degli stimoli *target*. Anche l'esperienza operativa dei due gruppi di

soggetti, solida e corrente, può essere considerata come un fattore protettivo nei confronti del compito attentivo svolto, nel senso che l'attività di volo al simulatore non è risultata *demanding*, perché in realtà attività abituale, e quindi tale da non determinare una variazione in senso peggiorativo della prestazione cognitiva.

## ***VISUAL SEARCH***

**Metodo.** Per la valutazione degli effetti della simulazione aerea sui compiti di *visual search* e quindi sulla comparsa di fatica visiva, espressa dal *cluster O* del SSQ, è stato predisposto un test di cancellazione di lettere (A) e di oggetti (campanelle) da svolgere durante la registrazione dei movimenti oculari mediante *eye-tracker*. Per la registrazione dell'attività oculare durante il compito di *visual search* è stato utilizzato un *eye-tracker* Tobii X50. Il sistema consente di acquisire i dati oculari senza dover ricorrere a tecniche invasive né a strumentazione *head-mounted*. Utilizza diodi all'infrarosso per generare dei *pattern* luminosi di riflessione corneali che vengono raccolti da una videocamera, che acquisisce, pertanto, la posizione e i movimenti oculari. Il software dedicato calcola la posizione tridimensionale nello spazio dei bulbi oculari e il punto di fissazione sullo schermo. La frequenza di campionamento è di 50 Hz. Dopo la calibrazione dell'*eye-tracker*, i test di cancellazione venivano presentati su uno schermo TFT da 17" con risoluzione di 1024x768 pixel; i soggetti venivano istruiti a esplorare liberamente la matrice visiva, a posizionare il cursore del mouse sulla lettera/oggetto da cancellare, quindi a cliccare una sola volta sull'*item* identificato che tuttavia continuava a rimanere visibile sul *pattern*.

**Analisi statistica.** Sui dati acquisiti è stata eseguita un'analisi della varianza ANOVA a misure ripetute. Sono stati analizzati i seguenti parametri: fissazioni totali (righe per colonne), escursione massima delle fissazioni, cioè la distanza tra una fissazione e quella precedente, durata media delle singole fissazioni. Il limite di significatività è stato fissato a  $p < 0,05$ . La statistica descrittiva è riportata in Tab. 9.

**Risultati.** L'analisi del numero totale di fissazioni (righe per colonne), effettuate durante lo svolgimento delle due prove di cancellazione di lettere e di campanelle, ha evidenziato una tendenza alla variazione del numero totale di fissazioni nell'area centrale del *pattern* visivo nel gruppo sperimentale dopo

l'esposizione al simulatore di volo (Fig. 5), nonché una inversione della strategia di esplorazione tra casi e controlli che, seppure non raggiunga la significatività statistica ( $F_{4,132} = 2,18$ ;  $p = 0,073287$ ), merita sicuramente ulteriori approfondimenti sperimentali.

GRUPPO	PARAMETRO PRE/POST	Media	DEV.STD
CONTROLLI	Lpreescmax	568,9106	231,7259
CONTROLLI	Lpostescmax	639,8423	307,5418
CASI	Lpreescmax	566,8187	389,6448
CASI	Lpostescmax	478,8511	316,9457
CONTROLLI	Lpreduratamedia	357,6962	72,8560
CONTROLLI	Lpostduratamedia	345,6504	70,9327
CASI	Lpreduratamedia	292,7227	67,8893
CASI	Lpostduratamedia	300,1366	74,6523
CONTROLLI	Bpreescmax	586,8136	211,5806
CONTROLLI	Bpostescmax	662,5039	337,1496
CASI	Bpreescmax	798,4630	529,8135
CASI	Bpostescmax	696,5015	420,7743
CONTROLLI	Bpreduratamedia	323,5131	39,7067
CONTROLLI	Bpostduratamedia	324,6185	55,7343
CASI	Bpreduratamedia	270,6285	61,55928
CASI	Bpostduratamedia	286,2234	65,98933

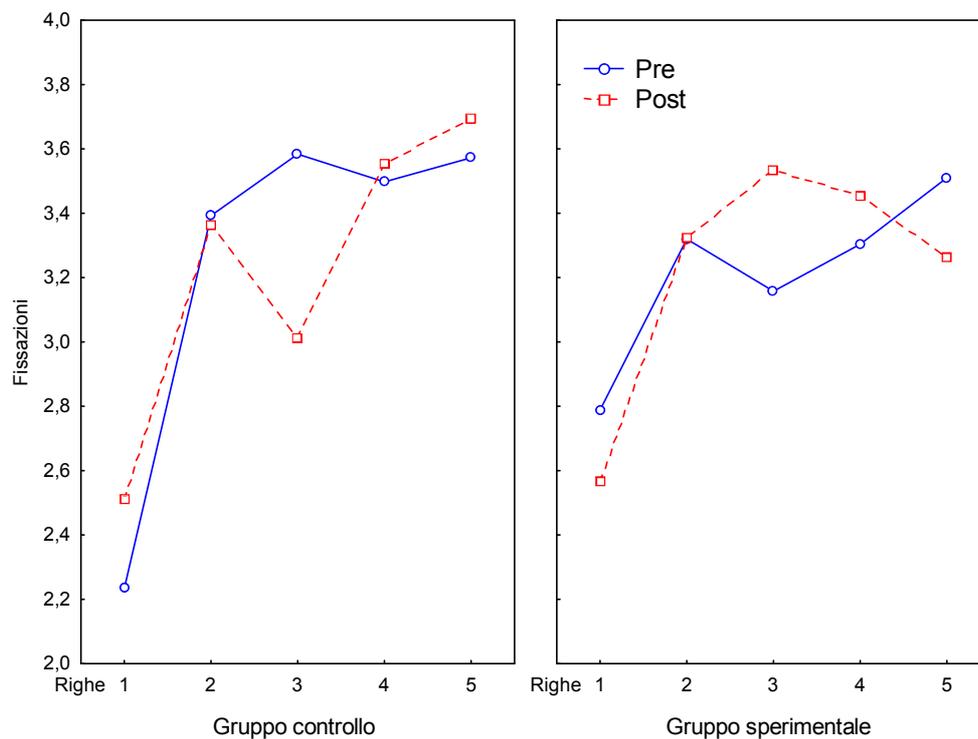
**Tab. 9:** Statistica descrittiva

Tale tendenza è anche confermata dai plottaggi delle fissazioni nelle diverse condizioni sperimentali dei due gruppi che evidenziano una variazione della strategia di esplorazione visiva nell'area centrale del target (Figg. 8-11).

Dall'analisi dei parametri delle fissazioni presi in esame, è emersa significatività statistica in termini di aumento della durata media nel test effettuato dopo l'esposizione dei soggetti sperimentali alla simulazione di volo (Figg. 6-7) sia nel test di cancellazione di lettere ( $F_{1,38} = 6,5206$ ;  $p =$

0,014799) sia nel test di cancellazione di campanelle ( $F_{1,38} = 7,784$ ;  $p = 0,008195$ ).

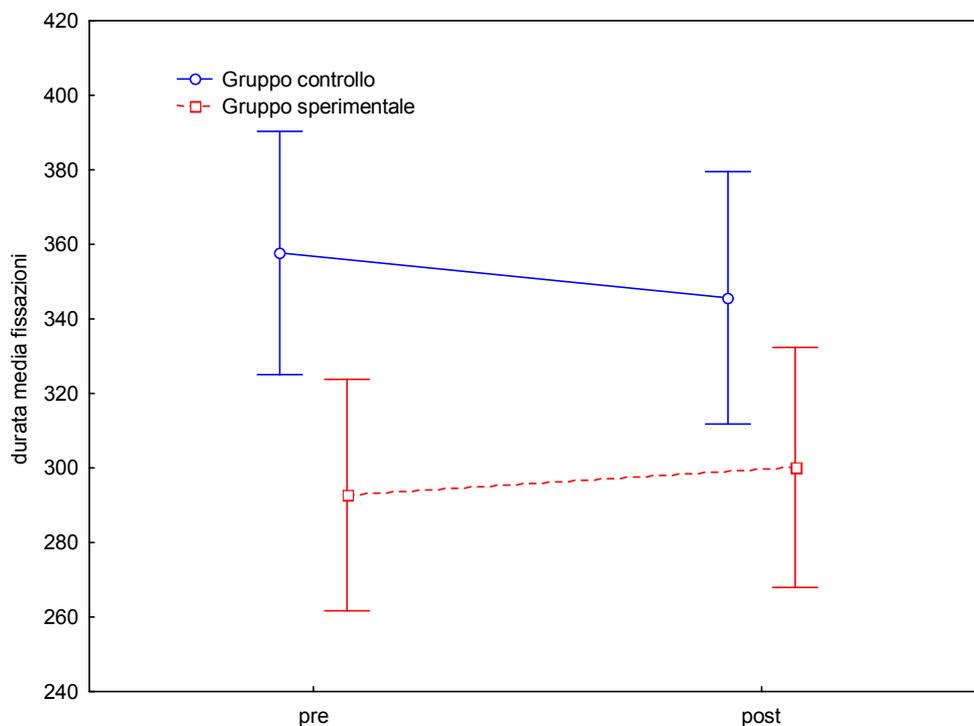
Viceversa, nessuna variazione statisticamente significativa si è evidenziata dall'analisi dell'escursione massima delle fissazioni sia per il test di cancellazione di lettere ( $F_{1,38} = 1,4807$ ;  $p = 0,231164$ ) che per il test di cancellazione di campanelle ( $F_{1,38} = 1,6573$ ;  $p = 0,205752$ ).



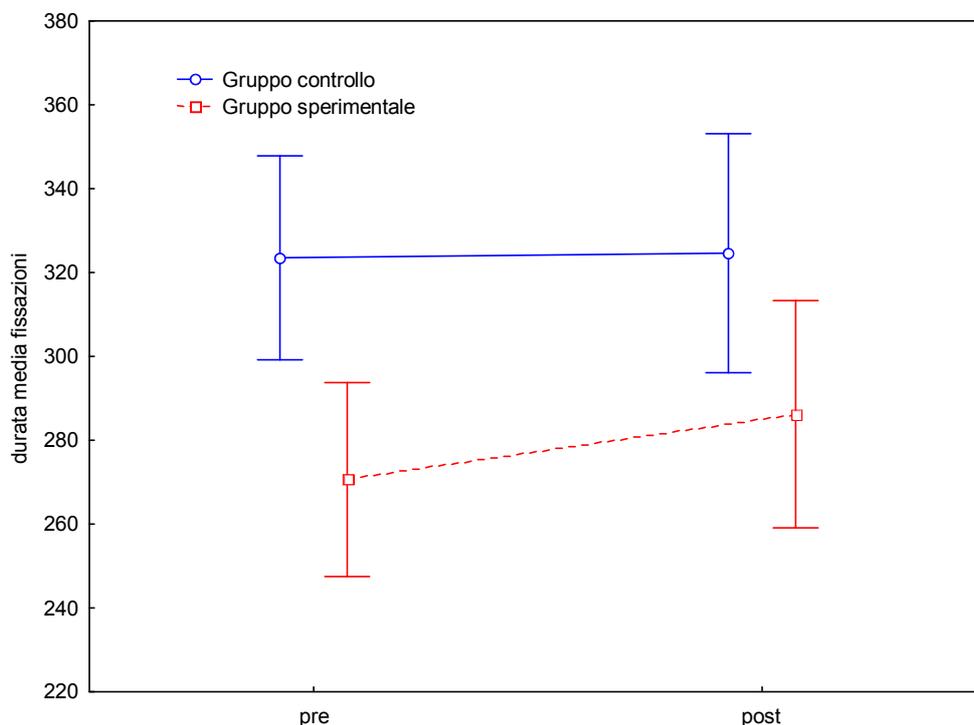
**Figura 5:** Numero totale di fissazioni righe per colonne

**Discussione.** Nel test di cancellazione, sia di lettere che di campanelle, i casi sperimentali nella prova post-DISO hanno mostrato un aumento della durata media delle fissazioni statisticamente significativo, associato a una riduzione dell'escursione massima che non ha raggiunto la significatività statistica. Viceversa, il gruppo di controllo ha evidenziato, nel test di cancellazione di lettere, una riduzione della durata media e un aumento dell'escursione massima delle fissazioni, variazioni entrambe non statisticamente significative, mentre nel test di cancellazione di campanelle si è apprezzato una sostanziale

costanza della durata media delle fissazioni e un aumento non significativo dell'escursione massima. L'analisi dei movimenti oculari durante *visual search*, se correlati con il punteggio del *cluster O* del SSQ, ha evidenziato un *trend* interessante: i casi sperimentali nel post-DISO evidenziano una tendenza a una minore esplorazione del *target* visivo, in termini di escursione delle fissazioni, che appare ancora più accentuato, seppur sempre statisticamente non significativo, nei soggetti che riportano un punteggio del *cluster O* più elevato. Dall'analisi dei dati appare evidente che i casi sperimentali esplorano meno il *target* visivo rispetto ai casi di controllo dopo l'esposizione al simulatore di volo. Nello specifico dei casi sperimentali, i soggetti con punteggio O al SSQ elevato esplorano ancora meno di quelli con punteggio O basso. Considerato che anche i controlli, pur non avendo effettuato la prova al simulatore di volo, hanno compilato il SSQ, è emerso che i controlli con punteggio O basso aumentano l'escursione delle fissazioni nella seconda batteria del test, mentre quelli con SSQ alto non modificano il *pattern* di esplorazione visiva.



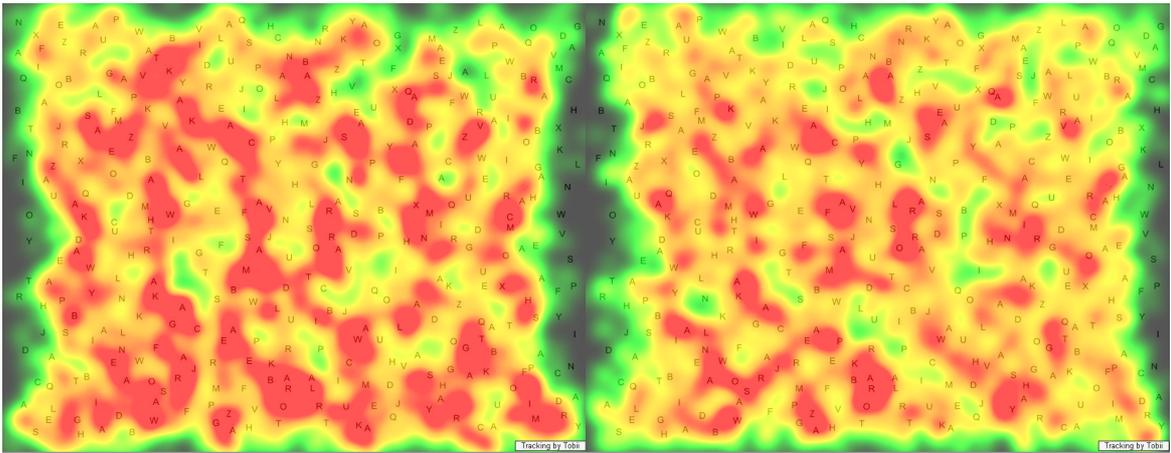
**Figura 6:** Durata media delle fissazioni nel test di cancellazione lettere ( $p < 0,05$ )



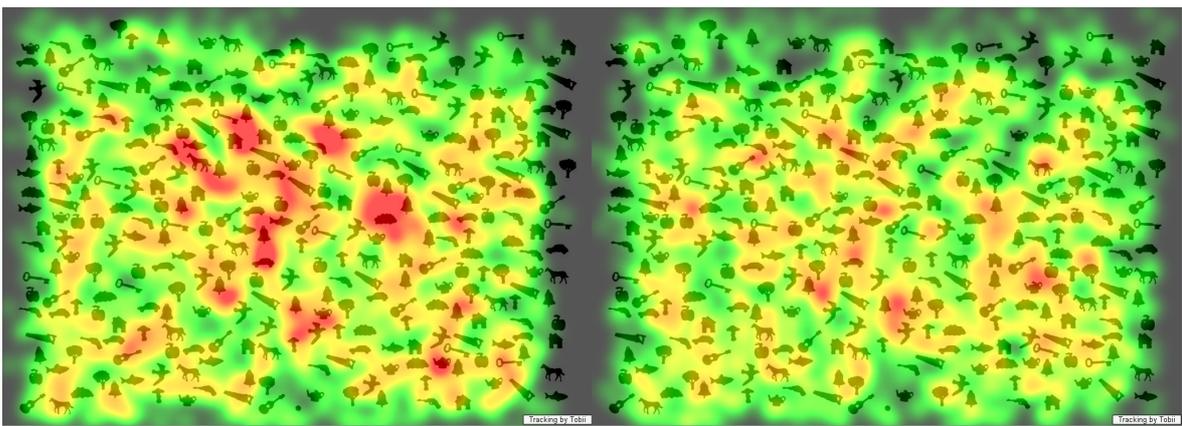
**Figura 7:** Durata media delle fissazioni nel test di cancellazione campanelle ( $p < 0,05$ )

Esiste pertanto un gradiente dell'escursione delle fissazioni che aumenta progressivamente a partire dai casi sperimentali con punteggio del SSQ alto fino ai controlli con punteggio SSQ basso, passando attraverso i casi sperimentali con SSQ basso e quindi i controlli con punteggio del SSQ alto.

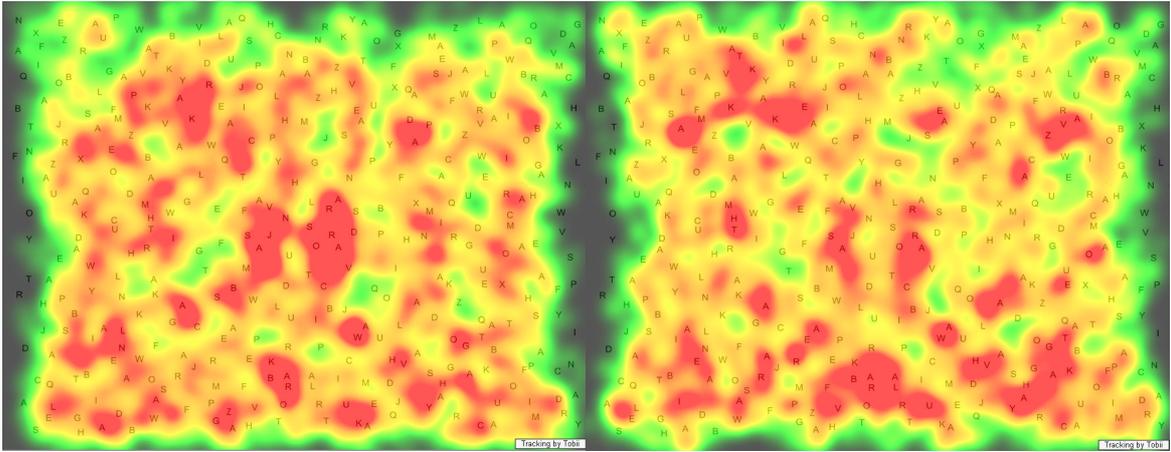
Tale risultato, pur non potendosi definire specificamente come un aspetto attentivo della *simulator sickness*, sia per la scarsa significatività statistica dei dati ottenuti, sia per la tipologia di *marker* usati, diversi da quelli suggeriti da Di Nocera et al. (2007), sia per la relativa semplicità del compito svolto, rappresenta comunque un cambiamento nel *pattern* oculomotorio esplorativo che, come detto in precedenza, è espressione di attività percettiva - e quindi cognitiva - e non banalmente sensoriale o meramente motoria.



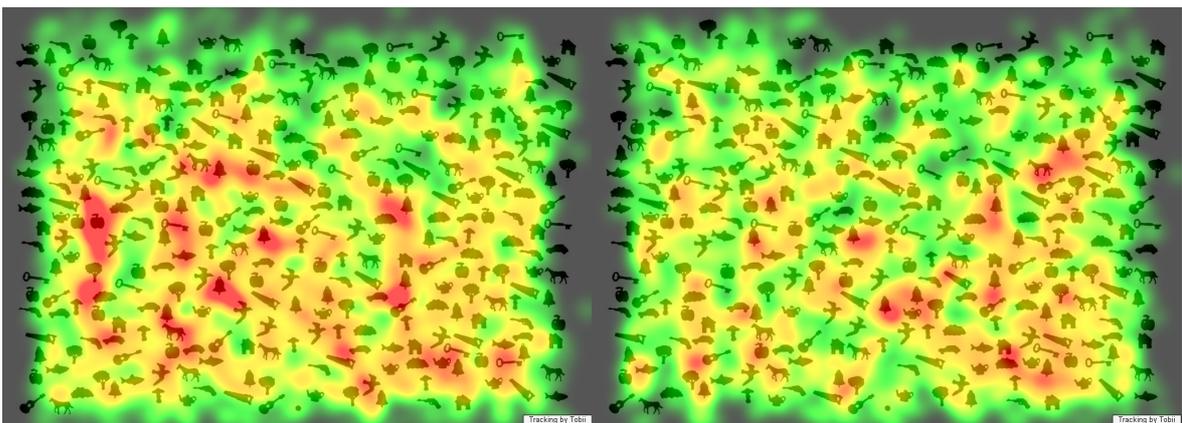
**Figura 8:** A sinistra fissazioni pre-DISO, a destra fissazioni post-DISO nella prova di *visual search* mediante test di cancellazione di lettere del gruppo sperimentale



**Figura 9:** A sinistra fissazioni pre-DISO, a destra fissazioni post-DISO nella prova di *visual search* mediante test di cancellazione di campanelle del gruppo sperimentale



**Figura 10:** A sinistra fissazioni pre-, a destra fissazioni post- nella prova di *visual search* mediante test di cancellazione di lettere del gruppo di controllo



**Figura 11:** A sinistra fissazioni pre-, a destra fissazioni post- nella prova di *visual search* mediante test di cancellazione di campanelle del gruppo di controllo

## CONCLUSIONI

Il lavoro presentato in queste pagine rappresenta il coronamento accademico di 15 anni di lavoro presso il Centro Sperimentale Volo - Reparto Medicina Aeronautica e Spaziale, dedicati allo studio del disorientamento spaziale in volo<sup>16</sup>, del mal d'aria e della *simulator sickness*, soprattutto nell'ottica della medicina preventiva e della sicurezza del volo. Ed è anche un primo tentativo di approccio interdisciplinare alla problematica della *simulator sickness* nell'ambito della comunità scientifica italiana. L'obiettivo è stato quello di studiare la *simulator sickness* con modelli sperimentali della psicofisiologia e della psicologia cognitiva, abbandonando il semplice approccio, seppur validato e diffuso nella letteratura scientifica, della raccolta di dati epidemiologici dell'incidenza della fenomenologia clinica mediante questionari autosomministrati.

I risultati ottenuti negli esperimenti, pur non avendo evidenziato dati significativi dal punto di vista statistico, anche a causa dell'ampia variabilità interindividuale della popolazione reclutata, a esclusione dello stile cognitivo studiato mediante il G-EFT, appaiono tuttavia meritevoli di ulteriori verifiche sperimentali, magari ottimizzando dal punto di vista del *timing* la raccolta dati, soprattutto per quanto riguarda il compito di *visual search*. La letteratura scientifica sulle misurazioni intra-simulatore della *performance* visiva in termini cognitivi (Cheung & Hofer 2003, Cheung et al. 2004, Sarter et al. 2007, Di Nocera et al. 2007, McKinley et al. 2011, van de Merwe et al. 2012) evidenzia significative variazioni del numero di fissazioni, dell'entropia delle fissazioni e della strategia di esplorazione visiva durante l'attività al simulatore

---

<sup>16</sup> Il disorientamento spaziale in volo, secondo la definizione originale di AJ Benson (1978), è la condizione in cui il pilota "non percepisce correttamente la posizione, il movimento o l'assetto del velivolo o di se stesso rispetto al sistema di coordinate di riferimento rappresentato dal piano della superficie terrestre e dalla verticale gravitazionale".

di volo, in caso di eventi potenzialmente critici, quali l'esordio di una condizione di disorientamento spaziale in volo o un'emergenza in volo.

La *simulator sickness* è dunque un sindrome poligenica e polisintomatica diffusamente segnalata dai piloti durante lo svolgimento di missioni di volo simulate. Coerentemente con la teoria del *mismatch* sensoriale di Reason & Brand (1975), la sindrome colpisce prevalentemente i piloti esperti con all'attivo molte ore di volo su aeromobili reali, perché questi soggetti non riescono a generare il *matching* tra le informazioni di movimento attuali acquisite all'interno del simulatore (nonostante gli sforzi tecnologici in materia di fedeltà della simulazione) e quelle attese/previste, depositate nel *neural store* e derivanti proprio dalla pregressa attività di volo reale. Un aspetto problematico della *simulator sickness* è rappresentato non tanto dalla fenomenologia clinica che insorge durante l'effettuazione della sessione addestrativa al simulatore, ma soprattutto dagli *after-effect*, anch'essi caratterizzati dai tre *cluster* sintomatologici. Questi fenomeni tardivi infatti possono rappresentare una minaccia o quantomeno un ostacolo al corretto svolgimento di missioni di volo immediatamente post-simulatore, perché il personale navigante fino a 4-6 ore dopo la conclusione della sessione al simulatore può continuare a presentare gradi diversi di *discomfort* riconducibile sempre ai tre *cluster* N-O-D. Ma, mentre per i disturbi afferenti ai cluster N e D ogni individuo è in grado di valutarne l'entità e la persistenza, decidendo autonomamente se riportare il disturbo alla linea gerarchica e al *flight surgeon*<sup>17</sup> per annullare la missione di volo per ragioni sanitarie, la consapevolezza dei disturbi afferenti al *cluster* O è molto più sfumata e sfuggente. Un dato interessante da sottolineare è quello del punteggio del SSQ registrato dalla popolazione di controllo che compilava il questionario subito dopo la conclusione della prima batteria di test cognitivi.

---

<sup>17</sup> Ufficiale medico qualificato in medicina aeronautica, responsabile della salute e della sicurezza del personale navigante, in servizio presso i Reparti Operativi dell'Aeronautica Militare.

Paradossalmente il TS e i *cluster* N-O-D del SSQ sono risultati tutti più alti (Fig. 12) di quelli dei casi sperimentali che compilavano il SSQ dopo la sessione al simulatore.

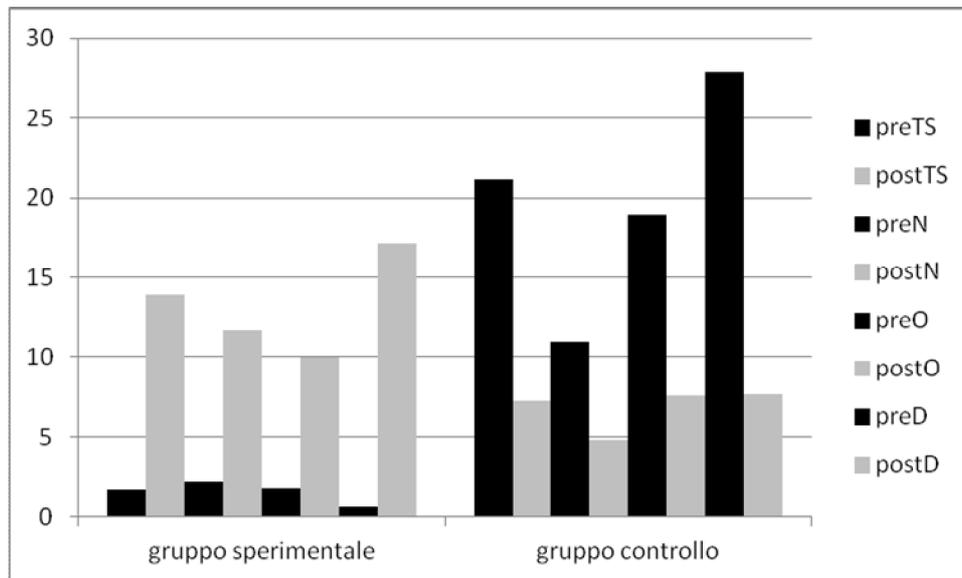


Fig. 12: Valori del TS e dei *cluster* N-O-D del SSQ

Tale risultato del SSQ dimostra l'utilità del metodo per raccogliere dati epidemiologici celermente e senza interferenze con la prestazione lavorativa, operativa e/o sperimentale e ne conferma la sensibilità nell'acquisire informazioni sullo stato attuale dei soggetti che lo compilano. Come detto precedentemente, mentre per i *cluster* N e D è emerso in sede di *debriefing* che esisteva consapevolezza da parte della popolazione reclutata per lo studio della presenza dei disturbi, non altrettanto si può dire per il *cluster* O, che senza la compilazione del questionario sarebbe rimasto misconosciuto sia in termini qualitativi che quantitativi. Considerato che il *cluster* O copre l'area dell'oculomotricità e che tale funzione riguarda la sfera cognitiva e non meramente motoria e sensoriale, è di fondamentale importanza per la comunità aeronautica in generale e aeromedica in particolare poter informare il personale navigante delle possibili conseguenze dell'esposizione all'attività di volo simulata sulle funzioni e sui processi cognitivi.

La *situation awareness* (SA), secondo la definizione originale di Mica R. Endsley (1988)<sup>18</sup>, rappresenta il *continuum* cognitivo che consente di processare un'informazione al fine di generare una coerente risposta motoria all'interno di sistemi lavorativi dinamici e complessi. Pertanto, un efficace processo decisionale ed esecutivo dipende dalla SA, che è il modello dinamico dello stato dell'ambiente (Jones & Endsley 1996). Partendo dallo stimolo fisico esterno che si interfaccia con l'organo di senso specifico che ne rappresenta il recettore e trasduttore specializzato per il successivo *processing* percettivo, il modello di Endsley (1988) prevede tre livelli funzionali: la fase percettiva dell'informazione (livello 1), la fase di elaborazione cognitiva delle informazioni percepite (livello 2), la fase di proiezione, da cui deriverà la risposta fornita dal soggetto (livello 3). Poiché la maggior parte delle informazioni ai fini della missione di volo sono presentate visivamente sugli strumenti di volo sia tradizionali, cioè analogici, sia avanzati, cioè digitali come nella tecnologia dei *glass-cockpit*, in cui i parametri di volo sono presentati ai piloti sui *display* solo quando sono necessari, e considerato che circa il 77% degli errori di pilotaggio sono riconducibili all'area dei *perception failure*, circa il 20% all'area dei *comprehension failure* e circa il 3% all'area dei *projection failure* (Jones & Endsley 1996), è di fondamentale importanza poter definire la funzione visiva dalla prospettiva delle neuroscienze, cioè definire con esattezza le modalità di *processing* dell'informazione visiva a partire dall'orientamento dell'attenzione visiva e dalle strategie di esplorazione visiva che sono le basi percettive che sottendono la piena SA. Infatti, il successo del processo dinamico della SA dipende dall'assenza di errori nei livelli inferiori e quindi innanzitutto nel livello percettivo (Wickens 2008).

Le prove sperimentali effettuate nel presente studio-pilota sono state tre, ma in realtà solo una, quella che riguarda il compito di *visual search* sotto

---

<sup>18</sup> *Situation Awareness* è definita da Mica R. Endsley (1988): "[...] the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning and the projection of their status in the near future".

registrazione dei movimenti oculari, ha dato qualche risultato interessante, coerente con l'ipotesi sperimentale. Le variazioni osservate sembrano meritevoli di ulteriori approfondimenti effettuati sia con compiti di maggiore complessità che utilizzando altri parametri di analisi delle fissazioni quali il *fixation rate*, cioè il numero di fissazioni al minuto, il *dwell time*, cioè il tempo totale di fissazione in una determinato area di interesse (*area of interest*, AOI) e l'entropia di scansione, cioè la misura della casualità del comportamento di esplorazione visiva. Negli altri due test, che riguardano lo studio dell'abilità visuo-spaziale mediante MRT e lo studio dell'orientamento dell'attenzione mediante stimoli acustici secondo il paradigma di *spatial cueing* di Posner, si è apprezzato esclusivamente un forte effetto apprendimento, con un miglioramento statisticamente significativo della *performance* nella seconda prova effettuata, indipendentemente dalla condizione sperimentale (DISO, no-DISO).

I risultati ottenuti, per quanto non emergano dati statisticamente significativi riferibili a un impegno attentivo critico indotto dalla esposizione alla realtà virtuale, verosimilmente anche per la scelta dei *marker* utilizzati, suggeriscono che il *cluster O* della *simulator sickness* correli con una diversa strategia di esplorazione del *pattern* visivo presentato. In altre parole, l'uso del simulatore, in presenza di *simulator sickness*, si accompagnerebbe a un'alterazione del *pattern* dei movimenti oculari esploratori. La mancanza di effetti significativi nel presente studio potrebbe essere attribuita alla relativa scarsa numerosità del campione, allo specifico addestramento dei soggetti sperimentali a controbilanciare gli effetti negativi del simulatore (considerata la pregressa esperienza dei soggetti nell'uso dell'apparato tecnologico), a una durata relativamente limitata della stimolazione. Tutti insieme questi fattori potrebbero aver contribuito a ridurre l'entità delle variazioni osservate nel *pattern* dei movimenti oculari, che potrebbero risultare accentuate in seguito a

lievi modificazioni sperimentali, come un aumento della durata dell'esperienza nel simulatore.

La diversa strategia di esplorazione visiva osservata nel gruppo sperimentale, dopo l'esposizione alla simulazione di volo nel dimostratore di disorientamento spaziale, consiste in un aumento della durata media e del numero di fissazioni nell'area centrale dello schermo su cui veniva presentato il test di cancellazione. A questo cambiamento nel *pattern* oculomotorio esplorativo non corrisponde alcuna differenza di prestazione rispetto al gruppo di controllo. Pertanto, pur non potendosi affermare con certezza un maggior impegno della funzione attentiva indotto dalla *simulator sickness*, non si può negare che per effetto del *discomfort* oculomotorio, espresso dal *cluster O* del SSQ, i soggetti con punteggio più elevato nella fase post-DISO hanno evidenziato un cambio di strategia nello svolgimento del compito di *visual search*, limitando l'escursione oculomotoria verso la periferia dello schermo e aumentando la durata media delle fissazioni. L'assenza di effetti sulla prestazione infatti potrebbe essere dovuta al livello di difficoltà del compito cognitivo svolto, che potrebbe essere non sufficiente a evidenziare rallentamenti prestazionali o incrementi di errori, alla compensazione operata da soggetti specificamente addestrati a contrastare gli effetti della *simulator sickness*, oppure a un'interazione tra questi due fattori.

Sebbene in letteratura non siano riportati risultati analoghi, la presenza di alterazioni del *pattern* oculomotorio esplorativo - se confermata - suggerisce la possibilità di una complessiva ridotta *performance* operativa del pilota in condizioni nelle quali l'effetto della *simulator sickness* non sia controllato sperimentalmente o abbia durata maggiore. In particolare, potrebbe risultare particolarmente evidente in situazioni di esperienza reale (come nel caso di controllo di droni da postazione remota), quando il pilota è impegnato a svolgere compiti ben più complessi e prolungati che addestrarsi a contrastare l'effetto della *simulator sickness* e risultare addirittura potenzialmente

pericolosa per la condotta del volo. Proprio per la sua potenziale pericolosità, l'effetto di alterazione del *pattern* esplorativo oculomotorio, per quanto non statisticamente significativo nel presente studio, merita ulteriori approfondimenti e conferme, che dovranno riguardare sia la verifica dell'effetto in compiti di *visual search* resi maggiormente impegnativi, aumentando la complessità e la densità degli stimoli nonché diminuendo i tempi di presentazione, sia le condizioni di stimolazione, aumentandone la durata. Inoltre, esperimenti che permettano di evidenziare meglio questi effetti oculomotori consentiranno di indagare anche sulla eventuale presenza e durata della fenomenologia degli *after-effect*.

Nel loro insieme, i risultati ottenuti negli esperimenti mostrano chiaramente come gli studi in questo settore applicativo possano meritare attenzione da parte della comunità scientifica. È auspicabile un approccio interdisciplinare allo studio della *simulator sickness*: preliminarmente, attraverso l'utilizzo dei questionari validati ma somministrati esclusivamente post-esposizione per evitare la sopravvalutazione degli *score* per effetto del possibile *bias* di risposta, causato dalle aspettative dell'osservatore (*experimenter demand*, Young et al. 2007), a ogni sistema di realtà virtuale dovrebbe essere attribuito lo specifico punteggio di *discomfort* (Stanney et al. 1997), quindi sulla base dell'entità e della natura del *discomfort* espresso dai *cluster* sintomatologici approfondire l'analisi delle possibili cause, integrando l'approccio clinico a quello psicofisiologico e neuropsicologico per giungere alla definizione di nuove strategie di contrasto, orientate sia sulla componente biologica che su quella tecnologica.

L'uso dei simulatori continuerà a essere sempre più diffuso, forse principalmente perché l'area del *modeling & simulation* è molto attiva, indipendentemente dagli effettivi risultati positivi delle applicazioni sviluppate e delle metodologie addestrative utilizzate. Rimane certo l'assunto che nelle attività lavorative caratterizzate da elevato rischio intrinseco per l'operatore o

per la popolazione, alcune procedure critiche possono essere effettuate esclusivamente in modalità simulata per la natura potenzialmente catastrofica e comunque irripetibile delle condizioni testate.

Lo studio-pilota condotto presenta alcuni limiti, rappresentati dall'aver utilizzato un simulatore generico disegnato per l'addestramento aerofisiologico e non un *full mission simulator* e dalla durata delle prove al simulatore che, seppur coerente con il reale impiego nelle missioni simulate addestrative, ma non con le missioni di volo reali, può aver determinato un impegno cognitivo non sufficientemente accentuato e tale da produrre significativi o più significativi cambiamenti della *performance* nei soggetti esposti al simulatore. Il riscontro positivo di una variazione della strategia di esplorazione visiva nei test di cancellazione svolti sotto monitoraggio mediante *eye-tracker* meriterebbe inoltre il confronto dopo l'esposizione al volo reale, per verificare che si tratti di un cambiamento specifico attribuibile all'immersione nella realtà virtuale ovvero l'espressione di *workload* cognitivo, determinato da una prestazione lavorativa *demanding* e complessa perché svolta in un ambiente per definizione estremo e potenzialmente ostile - perché inusuale e innaturale - come è l'ambiente di volo.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Adorian P, Staynes WN, Bolton M (1979). The evolution of the flight simulator. Proceedings of Conference: Fifty Years of Flight Simulation, Vol 1. London: Royal Aeronautical Society, p. 1
- Alessi SM (1988). Fidelity in design of instructional simulations. Journal of Computer-Based Instructions; 15(2):40-7
- Baker D, Prince C, Shreshta L, Oser R, Salas E (1993). Aviation computer games for crew resource management training. Int J Aviat Psychol; 3(2):143-56
- Baltzley DR, Kennedy RS, Berbaum KS, Lilienthal MG, Gower DW (1989). The time course of postflight simulator sickness symptoms. Aviat Space Environ Med; 60(11):1043-8
- Baudhuin ES (1987). The design of industrial and flight simulators. In SM Cormier & JD Hagman (Eds), Transfer of learning. San Diego, CA; Academic Press
- Bell HH, Waag WL (1998). Evaluating the effectiveness of flight simulators for training combat skill: a review. Int J Aviat Psychol; 8(3):223-42
- Benson AJ (1999). Spatial disorientation: General aspects. In Ernsting J, Nicholson AN, Rainford DJ (Eds), Aviation Medicine (3<sup>rd</sup> edition). Oxford, UK; Butterworth Heinemann
- Berbaum KS, Kennedy RS, Braun CC (1994). Postural disequilibrium following adaptation to virtual environments: concerns for post simulator activity. Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet; 38(15):986
- Blaiwes AS, Puig JA, Regan JJ (1973). Transfer of training and the measurement of training effectiveness. Hum Factors; 15(6):523-33
- Bles W, Bos JE, de Graaf B, Groen E, Werthaim AH (1998). Motion sickness: only one provocative conflict? Brain Res Bull; 47(5):481-87

- Bos JE, MacKinnon SN, Patterson A (2005). Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: effects of inside, outside, and no view. *Aviat Space Environ Med*; 76(12):1111-8
- Bos JE, Wietse D, Ledegang WD, Astrid J.A, Lubeck AJA, Stins JF (2013). Cinerama sickness and postural instability. *Ergonomics*; 56(9):1430-436
- Bowers C, Salas E, Prince C, Brannick M (1992) Games teams play: a method for investigating team coordination and performance. *Behav Res Meth Instrum Comput*; 24(4):503-06
- Braithwaite MG, Braithwaite BD (1990). Simulator sickness in an army simulator. *J Soc Occup Med*; 40(3):105-10
- Brandt T (1991). *Vertigo: its multisensory syndromes*. New York; Springer-Verlag
- Bubka A, Bonato F, Palmisano S (2007). Expanding and contracting optical flow patterns and simulator sickness. *Av Space Environ Med*; 78(4):383-6
- Bubka A, Bonato F, Urmev S, Mycewicz D (2006). Rotation velocity change and motion sickness in an optokinetic drum. *Aviat Space Environ Med*; 77(8):811-5
- Caldwell JA, Caldwell JL (2003). *Fatigue in aviation*. Aldershot, UK; Ashgate Publishing Ltd
- Cardullo FM (1994). *Motion and force cueing. Flight simulation update (10<sup>th</sup> ed.)*. Binghamton, NY; SUNY Watson School of Engineering
- Carta P, Meloni M, Casula D (2003). *Elementi di fisiologia del lavoro: la fatica*. In D Casula (a cura di) *Medicina del Lavoro*. Monduzzi Editore
- Chapanis A (1996). *Human Factors in System Engineering*. New York; John Wiley & Sons
- Cheung B, Hofer K (2002-2003). Lack of gender difference in motion sickness induced by vestibular Coriolis cross-coupling. *J Vestib Res*; 12(4):191-200

- Cheung B, Hofer K (2003). Eye tracking, point of gaze, and performance degradation during disorientation. *Aviat Space Environ Med*;74(1):11-20
- Cheung B, Hofer K, Heskin R, Smith A (2004). Physiological and behavioral responses to an exposure of pitch illusion in the simulator. *Aviat Space Environ Med*; 75(8):657-65.
- Connolly TJ, Blackwell BB, Lester L (1989). A simulator-based approach to training in aeronautical decision making. *Aviat Space Environ Med*; 60(1):50-2
- Crowley JS (1987). Simulator sickness: a problem for Army aviation. *Aviat Space Environ Med*; 58(4):355-7
- Cullen JF, Harper CR, Kidera GJ (1969). Perceptual style differences between airline pilots and engineers. *Aerosp Med*; 40(4):407-8
- Davis JR, Vanderploeg JM, Santy PA, Jennings RT, Stewart DF (1988). Space motion sickness during 24 flights of the space shuttle. *Aviat Space Environ Med*; 59(X):1185-89
- Dennis KA, Harris D (1998). Computer-based simulation as an adjunct to ab initio flight training. *Int J Aviat Psychol*; 8(3):261-76
- de Winter JCF, Dodou D, Mulder M (2012). Training effectiveness of whole body flight simulator motion: a comprehensive meta-analysis. *Int J Aviat Psychol*; 22(2):164-83
- Diels C, Howarth PA (2013). Frequency characteristics of visually induced motion sickness. *Hum Factors*; 55(3):595-604
- Di Nocera F, Camilli M, Terenzi M (2007). A random glance at the flight deck: pilots' scanning strategies and the real-time assessment of mental workload. *J Cogn Eng Decis Making*; 1(3):271-85
- Dobie T, McBride D, Dobie TJ, May J (2001). The effect of age and sex on susceptibility to motion sickness. *Aviat Space Environ Med*; 72(1):13-20

- Dobie TG, May JG (1994). Cognitive-behavioral management of motion sickness. *Aviat Space Environ Med*; 65(10):C1-C20
- Doweck I, Gordon CR, Spitzer O, Malamed Y, Shupak A (1994). Effect of cinnarizine in the prevention of seasickness. *Aviat Space Environ Med*; 65(7):606-09
- Duh HB, Parker DE, Philips JO, Furness TA (2004). "Conflicting" motion cues to the visual and vestibular self-motion systems around 0.06 Hz evoke simulator sickness. *Hum Factors*; 46(1):142-53
- Endsley MR (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 32(2):97-101
- Farmer E, Rooj JV, Riemersma J, Jorna P, Moraal J (1999). *Handbook of Simulator-Based Training*. Aldershot, UK; Ashgate Publishing Ltd
- Ferlazzo F, Couyoumdjian A, Padovani T, Olivetti Belardinelli M (2002). Head-centred meridian effect on auditory spatial attention orienting. *Q J Exp Psychol*; 55A(3):937-63
- Fitts PM (1962). Factors in complex skill training. In R. Glaser (Ed), *Training research and education*. Pittsburgh, PA; University of Pittsburgh Press
- Flanagan MB, May JG, Dobie TG (2005). Sex differences in tolerance to visually-induced motion sickness. *Aviat Space Environ Med*; 76(7):642-46
- Fowlkes JE, Kennedy RS (1987). Postural disequilibrium following training flights. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 1987:488-91
- Fowlkes JE, Kennedy RS, Hettinger LJ, Harm DL (1993). Changes in the dark focus of accommodation associated with simulator sickness. *Aviat Space Environ Med*; 64(7):612-8
- Frank LH, Casali JG, Wierwille WW (1987). Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 41(1):492-96

- Garcia A, Baldwin C, Dworsky M (2010). Gender differences in simulator sickness in fixed versus rotating base driving simulator. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 54(19):1551-55
- Gianaros PJ, Muth ER, Mordkoff JT, Levine ME, Stern RM (2001). A questionnaire for the assessment of the multiple dimensions of motion sickness. *Aviat Space Environ Med*; 72(2):115-19
- Gillingham KK, Previc FH (1996). Spatial orientation in flight. RL DeHart (Ed), *Fundamentals of aerospace medicine*. Baltimore, MD; Williams & Wilkins
- Gordon CR, Ben-Aryeh H, Spitzer O, Dowek I, Gonen A, Malamed Y, Shupak A (1994). Seasickness susceptibility, personality factors and salivation. *Aviat Space Environ Med*; 65(7):610-14
- Graeber DA, Stanney KM (2002). Gender differences in visually induced motion sickness. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 46(26):2109-113
- Graybiel A (1969). Structural elements in the concept of motion sickness. *Aerosp Med*; 40(4):351-67
- Graybiel A (1979). Prevention and treatment of space sickness in shuttle-orbiter mission. *Aerosp Med*; 50(2):171-76
- Graybiel A, Knepton J (1976). A sometimes sole manifestation of motion sickness. *Av Space Environ Med*; 47(8 ):873-82
- Graybiel A, Wood CD, Miller EF, Cramer DB (1968). Diagnostic criteria for grading the severity of acute motion sickness. *Aerosp Med*; 39(5):453-55
- Guedry FE (1974). Psychophysics of vestibular sensation. In H Kornhuber (Ed.), *Handbook of Sensory Physiology*. New York; Springer
- Guerraz M, Yardley L, Bertholon P, Pollak L, Rudge P, Gresty MA, Bronstein AM (2001). Visual vertigo: symptom assessment, spatial orientation and postural control. *Brain*; 124(8):1646-56

- Hays RT, Singer MJ (1989). Simulation fidelity in training system design. New York; Springer-Verlag
- Hecht D, Reiner M (2007). Field dependency and the sense of object-presence in haptic virtual environments. *Cyberpsychol Behav*; 10(2):243-51
- Hettinger LJ, Kennedy RS, McClauley ME (1990). Motion sickness and human performance. In GH Crampton (Ed.), *Motion and Space Sickness*. Boca Raton, FL; CRC Press
- Hettinger LJ, Nolan MD, Kennedy RS, Berbaum KS, Schnitzius KP, Edinger KM (1987). Visual display factors contributing to simulator sickness. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 31(5):497-501
- Jentsch F, Bowers CA (1998). Evidence for the validity of low-fidelity simulation in aircrew coordination research and training. *Int J Aviat Psychol*; 8(3):243-60
- Johnson DM (2007). Simulator sickness research summary. In *Virtual environments for intuitive human-system interaction*. RT&O-TR-HFM-121-Part II:5.1-5.28
- Jones DG, Endsley MR (1996). Source of situation awareness error in aviation. *Aviat Space Environ Med*; 67(6):507-12
- Kaiser MK, Schroeder JA (2003). Flights of fancy: the art and science of flight simulation. In MA Vidulich & PS Tsang (Eds), *Principles and Practice of Aviation Psychology*. Mahwah NJ; Lawrence Erlbaum Associated
- Kellog R, Prather E, Castore C (1980). Simulated A-10 combat environment. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 24(1):573-77
- Kelly MJ (1988). Performance measurement during simulated air-to-air combat. *Hum Factors*; 30(4):495-506
- Kennedy RS (1975). Motion sickness questionnaire and field independence score as predictors of success in naval aviation training. *Aviat Space Environ Med*; 46(11):1349-52

- Kennedy RS, Berbaum KS, Dunlap WP, Hettinger LJ (1996). Developing automated methods to quantify the visual stimulus for cybersickness. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 40(23):1126-30
- Kennedy RS, Berbaum KS, Lilienthal MG (1997). Disorientation and postural ataxia following flight simulation. *Aviat Space Environ Med*; 68(1):13-17
- Kennedy RS, Berbaum KS, Smith MG (1993a). Methods for correlating visual scene elements with simulator sickness incidence. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 37(18):1252-56
- Kennedy RS, Fowlkes JE (1992). Simulator sickness is polygenic and polysymptomatic: implications for research. *Int J Aviat Psychol*; 2(1):23-38
- Kennedy RS, Fowlkes JE, Berbaum KS, Lilienthal MG (1992). Use of a motion sickness history questionnaire for prediction of simulator sickness. *Aviat Space Environ Med*; 63(7):588-93
- Kennedy RS, Fowlkes JE, Lilienthal MG (1993b). Postural and performance changes following exposure to flight simulators. *Aviat Space Environ Med*; 64(10):912-20
- Kennedy RS, Hettinger LJ, Lilienthal MG (1990). Simulator sickness. In GH Crampton (Ed.), *Motion and Space Sickness*. Boca Raton, FL; CRC Press
- Kennedy RS, Lanham DS, Massey CJ, Drexler JM (1995). Gender difference in simulator sickness incidence: implications for military virtual reality systems. *Safe*; 25(1):69-77
- Kennedy RS, Lane NE, Berbaum, Lilienthal MG (1993c). Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness. *Int J Aviat Psychol*; 3(3):203-20
- Kennedy RS, Lilienthal MG, Berbaum KS, Baltzley DR, McCauley ME (1989). Simulator sickness in U.S. Navy flight simulators. *Aviat Space Environ Med*; 60(1):10-16.

- Kim YY, Kim HJ, Kim EN, Ko HD, Kim HT (2005). Characteristic changes in the physiological components of cybersickness. *Psychophysiology*; 42(5):616-25
- Kolasinski EM (1995). Simulator sickness in virtual environments. Technical Report 1027, U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences
- Kolasinski EM, Jones SA, Kennedy RS, Gilson RD (1994). Postural stability and its relation to simulator sickness. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 38(15):980
- Koonce JM (1994). A brief history of aviation psychology. *Hum Factors*; 26(4):499-508
- Koonce JM, Bramble WJ Jr (1998) Personal Computer-based Flight Training devices. *Int J Aviat Psychol*; 8(3):277-92
- Lackner JR, Graybiel A (1979). Some influence of vision on susceptibility to motion sickness. *Aviat Space Environ Med*; 50(11):1122-25
- Lackner JR, Graybiel A (1986). Head movement in non terrestrial force environment elicit motion sickness: implications for the etiology of space motion sickness. *Aviat Space Environ Med*; 57(5):443-48
- Lawther A, Griffin MJ (1988). A survey of the occurrence of motion sickness amongst passengers at sea. *Aviat Space Environ Med*; 59(5):399-406
- Leibowitz HW, Owens DA (1975). Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation *J Opt Soc Am*; 65(10):1121-28.
- Lerman Y, Sadovsky G, Goldberg E, Kedem R, Peritz E, Pines A (1993). Correlates of military tank simulator sickness. *Aviat Space Environ Med*; 64(7):619-22
- Lestienne F, Soechting J, Berthoz A (1977). Postural readjustment induced by linear motion in visual scene. *Exp Brain Res*; 28(3-4):363-84

- Lilienthal MG (2009). Comment on "Simulator sickness in a helicopter flight training school. *Aviat Space Environ Med*; 80(6):546
- Lintern G, Roscoe SN, Sivier JE (1990). Display principles, control dynamics and environmental factors in pilot training and transfer. *Hum Factors*; 32(3):299-317
- Lintern G (1991). An informational perspective on skill transfer in human-machine system. *Hum Factors*; 33(3):251-66
- Loesch RL, Waddell J (1979). The importance of stability and control fidelity in simulation. *Proceedings of Conference: Fifty Years of Flight Simulation, Vol 1. London: Royal Aeronautical Society, p. 90*
- Long GM (1975). Rod and frame test performance among naval aviation personnel. *Percept Mot Skills*; 41:950
- Lucertini M, Lugli V (2004). The Italian Air Force rehabilitation programme for air-sickness. *Acta Otorhinolaryngol Ital*; 24:181-87
- Lucertini M, Lugli V, Casagrande M, Trivelloni P (2008). Effects of airsickness in male and female student pilots: adaptation rates and four years outcomes. *Aviat Space Environ Med*; 79(7):677-84
- Lucertini M, Mirante N, Casagrande M, Trivelloni P, Lugli V (2007). The effect of cinnarizine and cocculus indicus on simulator sickness. *Physiol Behav*; 91(1):180-90
- Lucertini M, Verde P, Trivelloni P (2013). Rehabilitation from airsickness in military pilots: long-term treatment effectiveness. *Aviat Space Environ Med*; 84(11):1196-200
- Magee LE, Kantor L, Sweeney DCM (1988). Simulator induced sickness among Hercules aircrew. In *Motion cues in flight simulation and simulation induced sickness. AGARD Conference Proceedings 433:5.1-5.8*

- McKinley RA, McIntire LK, Schmidt R, Repperberg DW, Caldwell JA (2011). Evaluation of eye metrics as a detector of fatigue. *Hum Factors*; 53(4):403-11
- Miller EF 3<sup>rd</sup>, Graybiel A, Kellogg RS, O'Donnell RD (1969). Motion sickness susceptibility under weightless and hypergravity conditions generated by parabolic flight. *Aviat Space Environ Med*; 40(8):862-68
- Miller JC, Sharkey TJ, Graham GA, McCauley ME (1993). Autonomic physiological data associated with simulator discomfort. *Aviat Space Environ Med*; 64(9):813-9
- Miller JW, Goodson JE (1960). Motion sickness in a helicopter simulator. *Aerosp Med*; 31(3):204-12
- Min BC, Chung SC, Min YK, Sakamoto K (2004). Psychophysiological evaluation of simulator sickness evoked by a graphic simulator. *Appl Ergon*; 35(6):549-56
- Money KE (1970). Motion sickness. *Physiol Rev*; 50(1):1-39
- Moroney WF, Moroney BW (2010). Flight Simulation. In Garland DJ, Wise JA, Hopkins VD (Eds.), *Handbook of Aviation Human Factors* (2<sup>nd</sup> ed.). Boca Raton, FL; CRC Press
- Muth ER (2009). The challenge of uncoupled motion: duration of cognitive and physiological aftereffects. *Hum Factors*; 51(5):752-61
- Muth ER, Lawson B (2003). Using flight simulators aboard ships: human side effects of an optimal scenario with smooth seas. *Aviat Space Environ Med*; 74(5):497-505
- Oman CM (1987). Spacelab experiments on space motion sickness. *Acta Astron*; 15(1):55-66
- Oosterveld WJ (1995). Motion sickness. *J Travel Med*; 2:182-85
- Ortiz GA (1994). Effectiveness of PC-based flight simulation. *Int J Aviat Psychol*; 4(3):285-91

- Palermo L, Iaria G, Guariglia C (2008). Mental imagery skills and topographical orientation in humans: a correlation study. *Behav Brain Res*; 192(2): 248-53
- Park AH, Hu S (1999). Gender differences in motion sickness history and susceptibility to optokinetic rotation-induced motion sickness. *Aviat Space Environ Med*;70(11):1077-80
- Parker DE, Harm DL (1992). Mental rotation: a key to mitigation of motion sickness in the virtual environment. *Presence*; 1(3):329-33
- Parker DE, Rock JC, von Gierke HE, Ouyang L, Reschke MF, Arrott AP (1987). Space motion sickness preflight adaptation training: preliminary studies with prototype trainers. *Acta Astronaut*; 15(1):67-71
- Parrot AC (1989). Transdermal scopolamine: a review of its effects upon motion sickness, psychological performance and physiological functioning. *Aviat Space Environ Med*; 60(1):1-9
- Pontillo TM, Oman CM, Liu AM, Natapoff A, Tomlinson ZA (2010). Role of spatial ability in camera selection for space teleoperation tasks. *Aviat Space Environ Med*; 81(3):255
- Posner, MI (1980). Orienting of attention. *Q J Exp Psychol*; 32(1):3-25
- Povenmire HK, Roscoe SN (1971). An evaluation of ground-based flight trainer in routine primary training. *Hum Factors*; 13(2):109-16
- Reason JT (1978). Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *J R Soc Med*; 71(11):819-29
- Reason JT, Brand JJ (1975). *Motion Sickness*. New York; Academic Press
- Riccio GE, Stoffregen TA (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Eco Psychol*; 3(3):194-240
- Rolfe JM, Staples KJ (1986). *Flight Simulation*. Cambridge, UK; Cambridge University Press

- Salas E, Bowers CA, Rhodenizer L (1998). It is not how much you have but how you use it: toward a rational use of simulation to support aviation training. *Int J Aviat Psychol*; 8(3):197-208
- Sarter NB, Mumaw RJ, Wickens CD (2007). Pilots' monitoring strategies and performance on automated flight decks: an empirical study combining behavioral and eye-tracking data. *Hum Factors*; 49(3):347-57
- Shupak A, Gordon CR (2006). Motion sickness: advances in pathogenesis, prediction, prevention and treatment. *Aviat Space Environ Med*; 77(12):1213-23
- Stanney KM, Kennedy RS, Drexel JM (1997). Cybersickness is not simulator sickness. *Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet*; 41(2):1138-42
- Stanney KM, Kennedy RS (2009). Simulator sickness. In DE Vincenzi, JA Wise, M Mouloua, PA Hancock (Eds.), *Human factors in simulation and training*. Boca Raton, FL; CRC Press
- Stark EA (1989). Simulation. In Jensen RS (Ed), *Aviation Psychology*. Brookfield, VT; Gower
- Stark EA (1994). Training and human factors in flight simulation: flight simulation update. Binghamton, NY; SUNY, Watson School of Engineering
- Stoffregen TA, Hettinger LJ, Haas MW, Roe MM, Smart LJ (2000). Postural instability and motion sickness in a fixed-based flight simulator. *Hum Factors*; 42(3):458-69
- Stott JRR (1990). Adaptation to nauseogenic motion stimuli and its application in the treatment of airsickness. In GH Crampton (Ed.), *Motion and space sickness*. Boca Raton, FL; CRC Press; 373-90
- Tal D, Gonen A, Wiener G, Bar R, Gil A, Nachum Z, Shupak A (2012). Artificial horizon effects on motion sickness and performance. *Otol Neuroto*; 33(5):878-85

- Taylor HL, Lintern G, Koonce JM (1993). Quasi-transfer as a predictor of transfer from simulator to airplane. *J Gen Psychol*; 120(3):257-76
- Treisman M (1977). Motion sickness: an evolutionary hypothesis. *Science*; 197(4302):493-95
- Turnage JJ, Kennedy RS (1992). The development and use of a computerized human performance test battery for repeated-measures. *Human Perform*; 5(4):265-301
- Thurstone LL (1938). Primary mental abilities. *Psychometric Monographs*; 1
- Ungs TJ (1988). Simulator induced syndrome in Coast Guard aviators. *Aviat Space Environ Med*; 59(3):267-72
- Valden EA, Hall S (2005). The effect of simulator platform motion on pilot training transfer: a meta-analysis. *Int J Aviat Psychol*; 15(4):375-93
- van de Merwe K, van Dijk H, Zon R (2012). Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment. *Int J Aviat Psychol*; 22(1):78-95
- Verde P, Piccardi L, Bianchini F, Trivelloni P, Guariglia C, Tomao E (2013). Gender effects on mental rotation in pilots vs. non-pilots. *Aviat Space Environ Med*; 84(7):726-29
- Webb CM, Bass JM, Johnson DM, Kelley AM, Martin CR, Wildzunas RM (2009). Simulator sickness in a helicopter flight training school. *Aviat Space Environ Med*; 80(6):541-5
- Wickens CD (2008). Situation awareness: review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement. *Hum Factors*; 50(3):397-403
- Wiener EL, Kanki BG, Helmreich RL (1993). *Cockpit Resource Management*. San Diego, CA; Academic
- Wiener EL, Nagel DC (1988). *Human Factors in Aviation*. New York, Academic Press

- Wilson GF, Caldwell JA, Russell CA (2007). Performance and psychophysiological measures of fatigue effects on aviation related tasks of varying difficulty. *Int J Aviat Psychol*; 17(2):219-47
- Witkin HA, Oltman PK, Raskyn E, Karp SE (1971). A manual for the embedded figures tests. Palo Alto, CA; Consulting Psychologist Press
- Young SD, Adelstein BD, Ellis SR (2007). Demand characteristics in assessing motion sickness in a virtual environment: or does taking a motion sickness questionnaire make you sick? *IEEE Trans Vis Comput Graph*; 13(3):422-28