

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DOTTORATO DI RICERCA

IN

PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE MECCANICA

XV CICLO

TESI DI DOTTORATO

STUDIO E SVILUPPO DI METODOLOGIE DI

PROGETTAZIONE ERGONOMICA

IN AMBIENTE VIRTUALE

Coordinatore del Dottorato

**Ch.mo Prof. Ing.
ANTONIO DE IORIO**

Candidato

Ing. Giuseppe Di Gironimo

Tutor

**Ch.mo Prof. Ing.
FRANCESCO CAPUTO**

ANNO ACCADEMICO 2002-2003

A mia moglie Ornella

Ringraziamenti

Nell'accingermi a concludere la stesura di questo lavoro di tesi sento il desiderio di esprimere delle sincere parole di ringraziamento a tutte quelle persone che hanno condiviso con me questa entusiasmante esperienza. Il mio pensiero va innanzitutto al mio tutor, professor Francesco Caputo, per avermi insegnato ad affrontare la ricerca con serietà e puntiglio, ma anche con la giusta dose di spirito. Grazie prof per i momenti di crescita culturale e per il bagaglio di esperienza e capacità che, con una umanità quasi paterna, Lei mi ha quotidianamente trasmesso.

Ringrazio con uguale decisione il prof. Antonio Lanzotti per la professionalità e disponibilità con cui ha orientato il mio studio ed i miei colleghi Stanislao Patalano, Salvatore Gerbino, Massimo Martorelli, Fabrizio Renno, Domenico Speranza e Dario Oliviero per la collaborazione che ciascuno, con la propria capacità ed esperienza, mi ha offerto.

Un ringraziamento doveroso va all'ing. Gennaro Monacelli dell'ELASIS, per avermi offerto la possibilità di condividere le conoscenze ed allo stesso tempo le necessità di un'efficace realtà aziendale che rappresenta un mondo completamente diverso da quello universitario, e agli ingegneri Michele La Cerra, Michele Vitiello e Lorenzo Scialla per aver condiviso con me le difficoltà della ricerca.

Un sentito ringraziamento va all'ingegner Raffaele de Amicis per il costante supporto offertomi durante la mia esperienza in Germania.

Desidero inoltre ringraziare con immenso affetto mia madre e mio padre, senza i quali non avrei mai potuto raggiungere alcun risultato, e mio fratello Francesco per avermi insegnato quanto sia importante credere nei propri mezzi e non mollare mai.

Infine desidero ringraziare te, Ornella, a cui dedico questo lavoro, per la fiducia e la stima che hai riposto in me quando mi hai seguito nei miei sogni di ricercatore e per l'amore e la gioia di vivere che quotidianamente mi regali.

Giuseppe Di Gironimo

INDICE

Prefazione del Tutor <i>Prof. Francesco Caputo</i>.....	1
--	----------

CAPITOLO I

L'ERGONOMIA: LINEAMENTI STORICI E DEFINIZIONI

I.1	L'evoluzione del rapporto uomo-ambiente di lavoro.....	6
I.2	Il concetto di usabilità.....	15
I.3	Ergonomia e qualità.....	17
	I.3.1 Caratteristiche ergonomiche.....	21
	I.3.2 Parametri ergonomici.....	22
	I.3.3 Qualità ergonomiche.....	23
I.4	La progettazione ergonomica: il principio di globalità.....	24
	I.4.1 L'utente.....	26
	I.4.2 Metodi di analisi.....	28
I.5	Ergonomia cognitiva ed ergonomia fisica.....	29
I.6	Il ruolo dell'antropometria e della fisiologia.....	32
	I.6.1 L'Antropometria.....	32
	I.6.2 La Fisiologia.....	33
I.7	Ergonomia, tecnopatie e sicurezza.....	36

CAPITOLO II

LA PROGETTAZIONE ERGONOMICA IN AMBITO AUTOMOBILISTICO

II.1	Introduzione.....	40
II.2	Misure antropometriche.....	42

II.2.1	Misure antropometriche convenzionali.....	42
II.2.2	Misure antropometriche <i>task oriented</i>	45
II.3	Fattori che influenzano la postura di guida.....	50
II.4	Metodologia SAE per l'analisi ergonomica della postazione di guida.....	53
II.4.1	Sistema di riferimento globale.....	54
II.4.2	Punti, piani e dimensioni caratteristiche della postazione di guida.....	55
II.4.3	Determinazione dell' AHP e del BOF.....	60
II.4.3.1	Procedura relativa al pedale acceleratore sospeso.....	62
II.4.3.2	Procedura relativa al pedale acceleratore fulcrato sul pavimento.....	62
II.4.4	Determinazione dell'SgRP e della corsa orizzontale del sedile....	63
II.4.4.1	Descrizione matematica delle curve.....	64
II.4.4.2	Posizione dell'SgRP.....	65
II.4.4.3	Corsa orizzontale del sedile.....	66
II.4.5	Raggiungibilità della mano.....	67
II.4.5.1	Determinazione del sistema di riferimento.....	70
II.4.5.2	Scelta della tabella.....	71
II.4.6	Posizione degli occhi.....	72
II.4.6.1	Descrizione matematica dell'eyellipse 3D.....	75
II.4.6.2	Posizionamento dell'eyellipse 3D.....	76
II.4.6.3	Descrizione matematica dell'eyellipse 2D.....	78
II.4.6.4	Posizionamento dell'eyellipse 2D nella vista laterale....	80
II.4.6.5	Posizionamento dell'eyellipse 2D nella vista dall'alto...	82
II.4.6.6	Posizionamento dei punti P ed E.....	82
II.4.7	Posizione della testa.....	84

II.4.7.1	Descr. matematica del contorno testa - sedile fisso.....	86
II.4.7.2	Descr. matematica del contorno testa – sedile reg. orizz.	87
II.4.7.3	Posizionamento del contorno testa – sedile fisso.....	89
II.4.7.4	Posizionamento del contorno testa – sedile reg. orizz....	89
II.4.7.5	Distanza tra il contorno testa e il tetto dell’abitacolo.....	90
II.4.8	Strumenti SAE per definire e misurare le dimensioni relative all’abitacolo e alla postura dell’occupante.....	91
II.4.8.1	H-Point template – descrizione e applicazioni.....	91
II.4.8.2	H-point machine – descrizione e applicazioni.....	92
II.5	Metodologia FIAT per l’analisi ergonomica della postazione di guida basata sull’impiego di un software 2D.....	95
II.5.1	Descrizione dei manichini.....	96
II.5.2	Dati di input relativi al veicolo.....	97
II.5.2.1	Dati posizionamento manichino.....	98
II.5.2.2	Dati sedile.....	98
II.5.2.3	Dati volante.....	100
II.5.2.4	Dati acceleratore, frizione e freno.....	103
II.5.2.5	Dati pedana.....	103
II.5.2.6	Dati padiglione.....	103
II.5.2.7	Dati visibilità.....	104
II.5.3	Dati di output.....	106
II.5.3.1	L’interfaccia grafica.....	106
II.5.3.2	La mappa sedile.....	108
II.5.3.3	Il report dei risultati.....	110
II.5.3.4	Le opzioni di calcolo.....	110
II.6	Confronto tra le metodologie SAE e FIAT per l’analisi ergonomica.....	112

CAPITOLO III**IMPIEGO DEI MANICHINI VIRTUALI NELLA PROGETTAZIONE ERGONOMICA DELL'AUTOVEICOLO**

III.1	Introduzione.....	118
III.1.1	Scelta del modello cinematico umano per le esigenze della progettazione automobilistica.....	119
III.2	Ramsis.....	120
III.2.1	Struttura del manichino Ramsis.....	121
III.2.2	Definizione dei modelli antropometrici in Ramsis.....	123
III.2.3	Analisi ergonomica del posto guida.....	126
III.2.3.1	Costruzione del modello CAD.....	128
III.2.3.2	Definizione dei vincoli cinematici.....	129
III.2.3.3	Metodologie di simulazione.....	131
III.2.3.3.1	Scelta del punto caratteristico.....	131
III.2.3.3.2	Scelta della postura iniziale.....	133
III.2.3.4	Comparazione dei dati sperimentali.....	134
III.3	Jack.....	138
III.3.1	Modello anatomico.....	140
III.3.2	Modello cinematico.....	141
III.3.3	L'ambiente di Jack.....	144
III.3.4	Interagire con Jack.....	145
III.3.5	Assegnare compiti umani.....	147
III.3.6	Collision Detection.....	148
III.3.7	Human Force and Torque Analysis.....	150
III.3.8	Classic Jack e l'ambiente CAD.....	150
III.3.9	Task Analysis Toolkit.....	151

III.3.10	Occupant Packaging Toolkit.....	155
III.3.10.1	SAE Packaging Guidelines.....	155
III.3.10.2	Posture Prediction.....	159
III.3.10.3	Comfort Assessment.....	161
III.3.10.4	Reach Zone.....	162
III.3.10.5	Parts Library.....	162
III.3.11	Applicazione ad un caso reale.....	163
III.3.11.1	Analisi con l'applicativo 2D.....	166
III.3.11.2	Confronto tra i risultati ottenuti dalle due metodologie.....	171
CAPITOLO IV		
PROGETTAZIONE DI UN AMBIENTE VIRTUALE PER ANALISI ERGONOMICHE.		
IV.1	Introduzione.....	176
IV.2	L'impiego di simulatori di veicolo per l'impostazione di una nuova vettura.....	177
IV.2.1	Impiego di simulatori meccanici integrati da tecnologie avanzate.....	178
IV.2.2	Tipologie di simulatori ergonomici.....	180
IV.2.2.1	Seating buck fisici.....	180
IV.2.2.2	Simulatori integrati in un ambiente virtuale.....	182
IV.3	Le tecnologie occorrenti per i simulatori.....	185
IV.3.1	Sistemi di tracking.....	185
IV.3.1.1	Sistemi di tracking elettromeccanici.....	185
IV.3.1.2	Sistemi di tracking elettromagnetici.....	187
IV.3.1.3	Sistemi di tracking acustici.....	189
IV.3.1.4	Sistemi di tracking ottici.....	190

IV.3.2	Dispositivi di visualizzazione diretta.....	190
IV.3.3	I sistemi haptic.....	192
IV.3.3.1	Sistemi haptic indossati.....	194
IV.3.3.2	Sistemi haptic esterni.....	196
IV.4	Motivazioni che hanno spinto alla progettazione di un nuovo tipo di Seating Buck.....	197
IV.5	Un ambiente virtuale per lo sviluppo dell'interno dell'autoveicolo: scopi e descrizione dei componenti fisici.....	199
IV.6	Integrazione con la realtà virtuale.....	203
IV.7	Conclusioni.....	207
CAPITOLO V		
APPLICAZIONI NEL CAMPO DELLA MEDICINA DEL LAVORO:		
<i>Valutazione comparativa del rischio da movimentazione manuale dei carichi mediante protocolli di analisi e l'impiego di modelli umani digitali.</i>		
V.1	Introduzione.....	210
V.1.1	Aspetto di innovatività dell'uso di manichini virtuali.....	211
V.2	Materiali e Metodi.....	211
V.3	Risultati.....	212
V.3.1	Valut. con metodo NIOSH del compito lavorativo e risultati...	212
V.3.2	Valutazione mediante simulazione virtuale e risultati.....	214
V.3.2.1	Ricostruzione dell'ambiente di lavoro.....	214
V.3.2.2	Valutazione del rischio.....	215
V.3.2.3	Risultati.....	218
V.4	Discussione.....	220
CONCLUSIONI.....		223
BIBLIOGRAFIA.....		226

PREFAZIONE

del tutor *prof. Francesco Caputo*

La Tesi di dottorato che l'ingegner Giuseppe Di Gironimo, Ricercatore appartenente al Settore Scientifico Disciplinare di "Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale", sottopone alla Commissione designata a valutare i risultati del suo lavoro di ricerca, alla conclusione del XV ciclo del Dottorato in Progettazione e Costruzione Meccanica, merita, da parte del Tutor, una pur concisa presentazione che valga ad illustrarne gli aspetti innovativi e peculiari.

Il lavoro del progettista industriale è oggi più complesso e difficile che mai. Ma anche stimolante, vario, creativo, perché se è vero che esiste una mole ingente di conoscenza da portare in conto, un numero praticamente infinito di soluzioni innovative, in ogni settore, è ancora da sperimentare.

Il conseguimento di un adeguato livello di conoscenza e di padronanza degli strumenti informatici che sono disponibili per la progettazione, di per se, costituisce il primo difficile ostacolo da superare.

Alle difficoltà palesi del progettare si accompagnano anche i frequenti ed imprevedibili tranelli nei quali è facile cadere: essi vengono tesi dalla convinzione che la potenza dell'informatica possa risolvere tutto, dall'illusione che la sperimentazione fisica condotta nei laboratori sia ormai da relegare assieme ai ricordi del passato, dalla superbia di non voler tener conto del lavoro che, fino ad ieri, è stato fatto da chi ci ha preceduto.

Il giovane collega Di Gironimo, che ha condiviso ed affrontato il compito di studiare le attuali metodologie di progettazione ergonomica in ambiente virtuale, ha affrontato il suo lavoro con consapevole prudenza, ma anche con giovanile entusiasmo, vi ha profuso impegno e studio, ha evitato i pericoli più gravi ed ha fornito, alla conclusione del suo percorso, un apprezzabile contributo alla comunità scientifica.

Il merito principale della sua tesi, a parere di chi scrive, consiste nell'aver correttamente intuito e valorizzato il ruolo delle tecnologie informatiche che riguardano la riproduzione virtuale degli ambienti e degli oggetti progettati come strumento valido della fruizione dell'uomo. Il tema dell'Ergonomia, che, appunto, considera l'Uomo come elemento centrale della progettazione, gli è stato per questo propizio.

La ordinata sistemazione di conoscenze consolidate e lo sviluppo di applicazioni sulla frontiera dell'innovazione che costituiscono la tesi, rendono possibile la progettazione ergonomica in settori nei quali essa non è stata ancora utilmente sperimentata.

I contenuti del lavoro riguardano le metodologie di progettazione ergonomica, l'impiego di tecniche di realtà virtuale nella progettazione automobilistica, la modellazione del comportamento umano e l'impiego di modelli umani digitali a supporto della progettazione. Queste tematiche sono state sviluppate per l'applicazione in contesti industriali mediante collaborazioni con la *Elasis ScpA* di Pomigliano d'Arco e la *Novartis Pharma* di Torre Annunziata e, nello spirito della interdisciplinarietà che contraddistingue il settore della progettazione ergonomica, in collaborazione con esperti nel campo della medicina del lavoro e del design industriale.

Negli ultimi anni si è verificato un profondo cambiamento nei metodi di progettazione; esso è stato guidato da due fenomeni distinti ma che trovano giustificazione l'uno nell'altro. Da una parte c'è stata infatti un'evoluzione del mercato alla quale le aziende hanno dovuto necessariamente adattarsi con i loro prodotti, e dall'altra la crescita, oltre ogni immaginazione, delle risorse *hardware* e *software* che ha consentito alle stesse di fornire sempre risposte adeguate.

Il mercato ha imposto non solo l'esigenza del sostanziale contenimento del *time to market*, cioè della durata complessiva del tempo di sviluppo di un progetto dalla prima ideazione all'avvio produttivo, ma anche il raggiungimento di livelli sempre più elevati di qualità e di affidabilità del prodotto stesso.

L'obiettivo perseguito non è più solo quello di rispettare le specifiche, bensì anche di soddisfare le aspettative del cliente. Un'adeguata risposta a queste esigenze viene necessariamente dalla definizione di nuove e più sofisticate metodologie di

progettazione rese oggi possibili grazie alla disponibilità e all'impiego di avanzate risorse *hardware* e *software*.

Nel settore automobilistico, così come in altri settori (si pensi ad esempio a quello aeronautico e navale), esempi significativi di queste metodologie sono rappresentati dalle tecnologie *Cax* (*Computer Aided Eveyithing*) e, più recentemente, dall'applicazione di tecniche di realtà virtuale all'impostazione di nuovi modelli.

La disponibilità di tali strumenti sta consentendo, tra l'altro, di tener conto, fin dalla fase di impostazione di un nuovo progetto, di fattori ergonomici. Negli ultimi anni il fattore umano sta assumendo infatti sempre maggiore importanza nella progettazione, ingegnerizzazione, produzione e manutenzione dei nuovi prodotti industriali nonché nella progettazione degli ambienti di lavoro. Grandi sforzi sono già stati compiuti verso la definizione di un ciclo di vita del prodotto che tenga conto di fattori ergonomici (o quella che oggi viene comunemente definita "progettazione incentrata sull'uomo") incontrando spesso difficoltà legate ai costi ed ai lunghi tempi necessari alla costruzione di prototipi fisici, ed alla loro successiva modifica. E' oggi possibile che tali problemi siano risolti facendo uso di strumenti e metodologie tipiche della realtà virtuale.

Nel **primo capitolo** si analizzano nel dettaglio i vari aspetti dell'ergonomia, dandone, per quanto possibile, definizioni chiare ed esaustive, evidenziandone il contenuto interdisciplinare e il carattere metodologico. In particolare si precisano i concetti di usabilità, di qualità ergonomica, di principio di globalità e si studia come questi possano tradursi in linee guida per la progettazione di oggetti e ambienti di lavoro che rispondano alle reali esigenze funzionali e alle caratteristiche psico-fisiologiche degli utenti.

Nel **Secondo Capitolo** viene affrontato il problema della progettazione ergonomica in campo automobilistico partendo da una descrizione accurata degli studi antropometrici per la definizione delle dimensioni dei conducenti e dei passeggeri dei veicoli e degli studi empirici, condotti sui modelli del comportamento umano, finalizzati all'analisi dei fattori che influenzano la postura di guida. Inoltre vengono esaminate due differenti metodologie ergonomiche, quella SAE (*Society of Automotive Engineers*) e quella sviluppata dall'azienda automobilistica italiana, con

gli obiettivi di evidenziare i criteri su cui si basano e le modalità di impiego e di individuare i parametri ergonomici utilizzati.

Nel **Terzo Capitolo** vengono brevemente illustrate le funzionalità e le caratteristiche dei principali manichini virtuali in commercio, *Ramsis* della *Human Solution – Tecmath* e *Jack* della *EAI-UGS*, focalizzando, in particolare, la discussione sui modelli cinematici ed antropometrici su cui si basano i due manichini e sulle differenti metodologie di impiego. In particolare, al fine di evidenziare le potenzialità offerte da tali *software* nei confronti dell'approccio tradizionale basato sull'impiego di modelli bidimensionali, vengono descritti due studi comparativi condotti rispettivamente con *Ramsis* e con *Jack*.

Nel **Quarto capitolo** viene riassunta una attività di ricerca, svolta in collaborazione con l'ente Metodologie Sviluppo Prodotto dell'*Elasis SCpA* di Pomigliano d'Arco (NA), riguardante la progettazione dell'architettura di un ambiente virtuale che permetta, ai progettisti e agli ingegneri, di valutare differenti soluzioni degli interni di una nuova vettura, partendo dalle prime fasi del progetto. Tale ambiente virtuale è basato sull'integrazione di tecnologie di Realtà Virtuale (sistemi di *tracking*, sistemi *haptic*, strumenti di visualizzazione stereoscopica), modelli umani digitali e un simulacro fisico di posto guida (*seating buck*) e richiede la gestione di protocolli di riferimento per lo scambio dati tra l'ambiente CAD, dove vengono generati i modelli digitali dell'abitacolo, e l'ambiente virtuale dove vengono impiegati modelli tassellati.

Nel **Quinto Capitolo**, infine, viene presentato uno studio, condotto in collaborazione con la sezione di medicina del lavoro della Seconda Università di Napoli e con la *Novartis Pharma* di Torre Annunziata, riguardante la valutazione comparativa del rischio da movimentazione manuale dei carichi mediante protocolli di analisi e l'impiego di modelli umani digitali. In particolare viene proposto, in alternativa ai protocolli tradizionali di valutazione del rischio dovuto a posture incongrue o a movimentazione manuale dei carichi, l'impiego del *software* di ergonomia *Jack* per simulare, in ambiente virtuale, un'operazione di movimentazione manuale di carichi relativa al montaggio di un tubo per lo scarico di confetti da una macchina per la laccatura in una azienda farmaceutica. Il *software* di simulazione utilizzato consente, infatti, di ricostruire virtualmente l'ambiente di lavoro e di

valutare, in tempo reale, le forze di compressione e di taglio e i momenti di reazione nel piano assiale, sagittale e laterale a carico della zona lombare della colonna vertebrale e a quella scapolo-omerale dei lavoratori impegnati nella movimentazione.

Il lavoro, in conclusione, appare metodologicamente corretto e ben articolato: esso costituisce un primo, significativo passo verso un nuovo modo di progettare ambienti e prodotti nel rispetto, ma anche nell'affidabile valutazione dei requisiti ergonomici.

Napoli, novembre 2002

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Carlucci', written in a cursive style.

Capitolo I

L'ERGONOMIA: LINEAMENTI STORICI E DEFINIZIONI

I.1 L'EVOLUZIONE DEL RAPPORTO UOMO-AMBIENTE DI LAVORO

E' dell'inizio del secolo scorso l'idea che una scienza del lavoro avrebbe potuto fornire un contributo obiettivo alla soluzione di problemi sociali. Una cultura ancora fortemente imbevuta di influenze positivistiche e social-umanitarie spingeva ad affermare che lo studio scientifico del posto di lavoro doveva condurre al miglioramento dello stesso e, per quanto possibile, alla gratificazione del lavoratore. Di fatto, i cambiamenti tecnologici di fine secolo – aumento della meccanizzazione, avvento dell'industria di processo – vanificarono queste buone intenzioni. Il lavoratore perse gradualmente la facoltà di organizzare liberamente il suo lavoro e divenne un semplice ingranaggio in un circuito di produzione, la cui complessità lo sovrastava e la cui concezione si uniformava rigidamente ai soli imperativi del rendimento [2]. Le esigenze poste dalla prima guerra mondiale – il reclutamento del personale militare da assegnare a compiti più o meno qualificati, la preoccupazione di assicurare livelli quantitativi e qualitativi del rendimento nelle fabbriche di armi – portarono in primo piano una nuova disciplina, la psicotecnica, definita come unione della psicologia e della tecnica in collaborazione con metodi fisiologici. Ma fin dagli inizi del suo sviluppo, la psicotecnica si trovò di fronte allo '*Scientific Management*' di Taylor; il costante appello alla superproduzione proprio dell'organizzazione scientifica del lavoro orientò verso obiettivi diversi da quelli originari i canoni della psicotecnica. Dal posto adatto all'uomo, si passò e si perseguì l'obiettivo della ricerca dell'uomo adatto al posto di lavoro.

Lo sviluppo degli studi ergonomici sulle relazioni tra uomo e ambiente di lavoro fu piuttosto lento durante il periodo della grande depressione economica che investì negli anni trenta il mondo intero, ma ricevette un grande impulso durante la seconda

guerra mondiale, allorché dovettero essere risolti unitariamente problemi derivanti dall'invenzione e dall'uso di strumenti complessi e difficili da governare. Sotto la spinta poderosa di esigenze belliche impellenti, furono avviati, infatti, studi scientifici volti ad analizzare ed ottimizzare l'interazione tra gli aerei da guerra e i rispettivi piloti. Durante la seconda guerra mondiale, gli aerei erano già in grado di volare a centinaia di chilometri l'ora coprendo lunghe distanze in situazioni disagiate e d'estremo pericolo. I sedili dovevano perciò essere disegnati in modo da offrire la maggior comodità possibile per scongiurare il pericolo di crampi; gli strumenti collocati in modo da risultare leggibili con una sola occhiata; attrezzature di vitale importanza, come l'inalatore a miscela ad alta quota, correttamente disposte e di comodo impiego.

La strategia che vedeva il lavoro come costante e l'uomo come variabile, nella nuova situazione tecnologica, non poteva fornire alcun contributo sulla conoscenza dei termini della relazione uomo-macchina.

A questa strategia venne a contrapporsi, quindi, un tipo di approccio la cui enfasi era invece posta nel lavoro e sull'ambiente al fine di adattarli alle capacità e ai limiti dell'essere umano. Il paradigma "l'uomo diviene la costante e il lavoro la variabile" poneva come esigenza conseguente la necessità di formulare una strategia di interventi che, invece di individuare nell'insieme delle risorse umane quei "profili professionali" adattabili alle richieste dell'organizzazione, "manipolava" la variabile lavoro in modo che ogni persona poteva adattarsi.

Da quel momento in poi (anni 40), la ricerca di livelli ottimali di integrazione fra l'uomo e la macchina diventò lo scopo e l'interesse di indagini e ricerche sempre più numerose, inquadrabili tutte all'interno dell'emergente scienza che, negli USA,

prende il nome di “*Enginnering Psychology*” o di “*Human Engineering*”, antesignana dell'ergonomia [3].

La parola ergonomia fu coniata, infatti, nel settembre 1949 in Inghilterra da *K. F. Murrel* unendo insieme i vocaboli greci “*érgon*” (lavoro), e “*nomos*” (norma, legge naturale). *Murrel* spiegò, in seguito, che il termine ergonomia fu adottato proprio per distinguersi dagli statunitensi che, a suo dire, rischiavano troppo di cadere nello psicologismo. L'ergonomia doveva ricoprire un'area più vasta, soprattutto in direzione della medicina del lavoro, servendosi delle conoscenze mediche per esplorare in maniera esaustiva e funzionale il rapporto uomo-macchina o uomo-ambiente di lavoro.

Il rapporto tra uomo e lavoro è sicuramente complesso e proteiforme, caratterizzato com'è da aspetti di carattere fisiologico, psicologico, sociale ed è quindi chiaro che la definizione data non è esauriente, né si prefigura cosa semplice tentare di formularne una chiara e completa. Del resto, numerosissime sono state negli anni le definizioni proposte per ergonomia, nessuna delle quali però universalmente accettata. Nel 1961 l'Ufficio Internazionale del Lavoro di Ginevra propose di definirla come “l'applicazione congiunta di certe discipline biologiche e di certe discipline ingegneristiche per assicurare tra l'uomo e il suo lavoro il migliore mutuo adattamento al fine di accrescere il rendimento del lavoratore e contribuire al suo benessere”. Nel 1999 l'*International Ergonomics Association* (IEA) riunita a Santorini (Grecia) ha proposto la definizione probabilmente più completa ed esaustiva: *‘L'ergonomia è la disciplina che si occupa delle interazioni tra l'uomo e gli altri elementi dei sistemi. L'ergonomo partecipa alla progettazione di posti di*

lavoro, compiti, prodotti ed ambienti fisici e organizzativi al fine di renderli compatibili con le esigenze, le abilità ed i limiti delle persone.”

La ricerca ergonomica ha per caratteristica essenziale l'interdisciplinarietà, rappresenta, cioè, il risultato di un lavoro di gruppo che si avvale degli apporti di specialisti di diversi settori senza privilegiarne alcuno. Al centro dell'attenzione degli ergonomi, cultori di questa scienza interdisciplinare, è sempre l'uomo, considerato come entità fisiologica e sociale e non come semplice fattore condizionante la produttività. All'ergonomia contribuiscono l'*anatomia* per lo studio della struttura del corpo umano, l'*antropometria* per le sue dimensioni, la *fisiologia* per le sue funzioni (in particolare le funzioni degli organi sensoriali), la *psicologia* per definire e misurare le risposte soggettive agli stimoli esterni, la *neurologia* per il comportamento del sistema nervoso, la *medicina industriale* per i rapporti tra l'uomo e l'ambiente di lavoro, la *bionica* per lo studio dei modelli degli organi del corpo umano interessati all'attività lavorativa, la *fisica* e l'*ingegneria* per lo studio degli agenti fisici e tecnologici esterni (fig. 1.1).

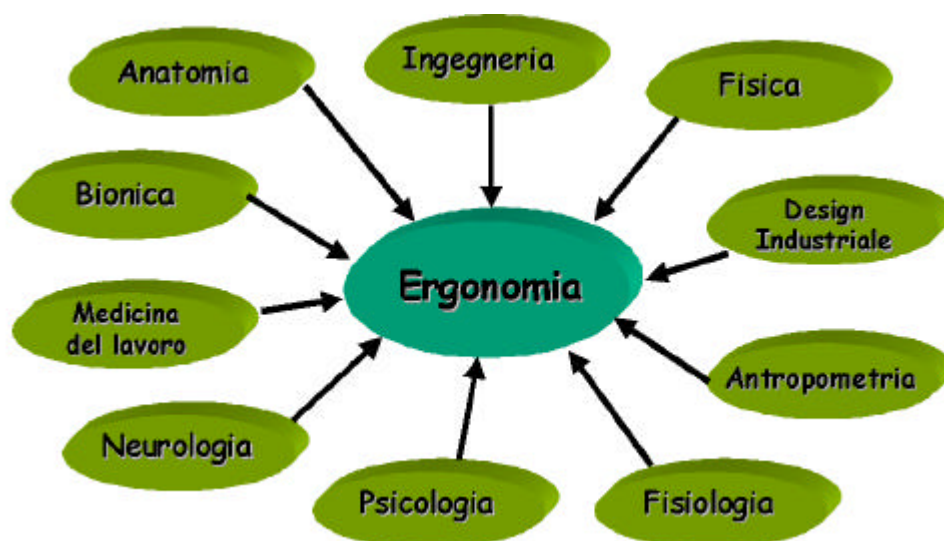


Fig. 1.1. – Contributo delle diverse discipline all'ergonomia

E' usuale distinguere l'ergonomia secondo criteri operativi, come quelli di seguito indicati, suddivisi in base agli aspetti che li caratterizzano [4].

Ergonomia di concezione. E' il tipo di ergonomia che consegue i risultati più rapidi. Viene attuata quando il fattore umano viene considerato già nella fase concettuale della progettazione restando sempre presente nel lavoro progettuale e nella fasi esecutive. I contributi specialistici, opportunamente amalgamati, permettono, attraverso successivi momenti di sintesi correttiva, di conseguire il risultato ottimale.

Ergonomia di correzione. E' così definita l'ergonomia finalizzata a modificare esistenti condizioni di pericolo o di disagio per il lavoratore. Non sempre permette di conseguire un risultato ottimale e generalmente comporta costi più elevati rispetto ad interventi effettuati nella progettazione.

Ergonomia della produzione. Viene così definito l'approccio focalizzato prevalentemente alle linee di produzione, con particolare riferimento ai sistemi uomo-macchina, senza specifica considerazione del contesto globale.

Ergonomia del prodotto. Comprende gli interventi rivolti a rendere il prodotto industriale più sicuro e più efficiente per l'acquirente.

Ergonomia di laboratorio. Prevede lo studio delle condizioni di lavoro nella loro riproduzione in laboratorio.

Ergonomia sul campo. Viene così definito l'approccio di verifica sul campo di lavoro di modifiche progettate o di un nuovo sistema, verifica sempre opportuna e, talvolta, indispensabile per controllare la validità del progetto o delle modifiche organizzative prima di introdurle definitivamente nel sistema produttivo.

Evidentemente ogni intervento ergonomico può ricondursi ad un intervento di correzione o di concezione.

L'intervento ergonomico di correzione è caratterizzato dal fatto che esso avviene sull'esistente, cioè su entità presenti e operative che possono essere un ambiente di lavoro o di vita, un sistema organizzativo, una macchina, un prodotto fisico o virtuale o un insieme di elementi fra loro interagenti orientati ad un fine unitario. In questi casi la possibilità di effettuare modifiche in senso ergonomico è molto bassa. Sugli ambienti costruiti gli interventi tendono ad essere marginali perché gli spazi già realizzati, sui quali si deve operare, sono sempre poco adatti agli interventi di trattamento acustico, di settorializzazione, di captazione di polvere e di vapori. Sulle macchine gli interventi di correzione sono sempre di difficile realizzazione e anch'essi marginali nei risultati, in quanto le modifiche devono essere effettuate su macchine progettate ed installate con ottica di tipo tecnico-produttivo. Basta pensare al problema del *layout* di un impianto industriale. Quando il *layout* è concepito seguendo la logica produttiva, diventa difficile attuare modifiche per adeguarsi, per esempio, alle esigenze di minimizzazione degli spostamenti dei lavoratori all'interno dell'impianto. Ancor più difficile da modificare, è la struttura dei compiti, perché è più facile modificare o sostituire una macchina che modificare abitudini e ruoli consolidati nel tempo. I risultati che si possono ottenere, quando si è di fronte ad un intervento di correzione, sono, per quanto esposto sopra, sempre difficili da raggiungere per cui si è costretti a scendere a compromessi con l'esistente. Inoltre, i costi di tale intervento sono generalmente elevati. Lo sviluppo del progetto è complesso in quanto gli interventi devono adattarsi all'esistente, il che comporta un suo esatto rilievo e la conoscenza di tutte le sue caratteristiche funzionali. Molto

spesso, negli interventi sui sistemi produttivi, è necessario ricostruirne la storia e progettare adattamenti agli impianti tecnici e alle macchine, il che richiede tempi aggiuntivi e conoscenze specialistiche anche sofisticate. Le opere di attuazione degli interventi correttivi avvengono, nelle fabbriche, ad impianti funzionanti o durante i fermi settimanali o annuali della produzione, cioè in condizioni straordinarie che incidono sui costi di realizzazione. Quando ciò non è possibile si devono computare i sovraccosti per i fermi di produzione.

L'intervento ergonomico di concezione è caratterizzato dal fatto che esso avviene su oggetti, sistemi, ambienti e macchine ancora in fase di definizione o su attrezzature e macchine che devono essere ancora scelte. Ne deriva che gli interventi possono essere sviluppati seguendo specifiche ergonomiche che tengano conto delle limitazioni che l'uso delle macchine può indurre negli utenti. Anche la scelta e l'acquisto nel mercato delle macchine, di attrezzature e di sistemi può essere effettuata conoscendo l'ambiente fisico e organizzativo di destinazione per confrontarlo con le specifiche di ciò che si deve acquisire. Non esiste alcun ostacolo concettuale affinché il progetto possa essere sviluppato tenendo conto delle prestazioni ergonomiche che si possono ragionevolmente prendere come obiettivo, effettuando un progetto globale dei vari elementi materiali (ambienti, macchine, impianti) e immateriali (*layout* e struttura dei compiti), raggiungendo elevati standard ergonomici compatibilmente con quanto offrono le tecniche più aggiornate. Il massimo obiettivo è quello di inserire nel progetto elementi di elasticità che consentano l'aggiornamento del prodotto e del sistema, a costi economici ed umani contenuti, man mano che vengono proposti sistemi ergonomici più avanzati. Nell'intervento di concezione è necessario formulare ipotesi e operare simulazioni

individuando oggetti, sistemi o entità simili a quella in fase di elaborazione, su cui si possano effettuare i rilievi che dovranno essere analizzati criticamente ed estrapolarli per avvicinarli alla realtà, non ancora nota, di cui si sta sviluppando il progetto. Nel caso sia difficile individuare realtà simili a quelle in fase di elaborazione, si dovrà operare con una analisi mirata dei singoli componenti che formeranno il sistema finale. Anche in questo caso sarà indispensabile attuare una analisi critica dei dati per ipotizzare gli effetti sinergici dell'accostamento delle varie parti che erano state viste, nel primo momento, come parti staccate. I costi dell'intervento ergonomico di concezione sono tendenzialmente contenuti perché la loro esecuzione durante la realizzazione dell'opera complessiva ha costi decisamente minori degli interventi realizzati a posteriori come correzione e, quindi, gravati dei sovraccosti tipici dell'intervento correttivo. Il progetto ergonomico, invece, è un po' più oneroso del progetto tecnico perché richiede il coinvolgimento di un maggior numero di competenze e una certa dilatazione dei tempi [5].

Il campo di applicabilità dell'ergonomia non è solo quello industriale. Sin dall'immediato dopoguerra il concetto di design ergonomico è stato esteso fino ad abbracciare ogni settore dell'esistenza fisica dell'uomo, compresi i generi di consumo, l'arredamento domestico ed altro ancora. L'ergonomia è pertinente al lavoro in tutte le organizzazioni di ogni tipo e dimensione; basti pensare alla ricerca antropometrica applicata al sedile nell'ufficio, alle autovetture, agli ambienti di lavoro dove è prevista la movimentazione di carichi. Gli studi di biomeccanica sul rachide possono essere applicati per ridurre gli infortuni nei lavori che comportino sollevamento pesi; la ricerca sulla capacità sensoriale e sui processi mentali è applicabile alla conduzione e controllo dei processi chimici e nucleari, ai compiti di

ispezione e di controllo del traffico aereo, alla riduzione dei rischi nella guida di carrelli, treni e veicoli in genere [6].

Una delle branche centrali dell'ergonomia, che può definirsi "*ingegneria umana*", consiste nello scegliere i compiti da attribuire all'uomo e quelli da attribuire alla macchina. Sulla base di una scelta appropriata si potrà progettare una "macchina ergonomica", in altre parole, conducibile o guidabile dall'uomo nel rispetto delle sue capacità, con limitazione dello sforzo fisico e con pieno utilizzo delle sue facoltà mentali.

Un aspetto non trascurabile dell'ergonomia è la sua relazione positiva con la produttività del lavoro. Le persone che lavorano in un sistema progettato ergonomicamente si affaticano di meno e sono meno distratte da situazioni non confortevoli. Una postura di lavoro progettata ergonomicamente dà meno problemi nello svolgimento delle attività e, soprattutto, consente di operare con maggiore efficacia: questo significa più bassa probabilità di errori e di incidenti, minor tempo speso per controlli incrociati e miglior disposizione psicologica. Da ciò discende che i benefici dell'applicazione dell'ergonomia sono rivolti non solo alle persone, ma alle stesse aziende e di conseguenza a tutto il sistema lavoro.

Si può quindi affermare che gli obiettivi dell'ergonomia sono sì rivolti alla salvaguardia della "efficienza umana", intesa come pienezza delle capacità necessarie per lo svolgimento di attività che individui o gruppi compiono consapevolmente, ma sono altresì mirati all'incremento complessivo della produttività dei sistemi [7].

I.2 IL CONCETTO DI USABILITÀ

Il principio che regola l'ergonomia afferma che con essa è possibile controllare le interazioni tra le persone e i prodotti, le attrezzature, gli ambienti e i servizi che esse usano e che queste interazioni possono essere misurate in modo da indirizzare positivamente la definizione dei requisiti, la valutazione e la progettazione degli artefatti. Queste misure si rilevano con prove su utenti, cioè con prove di *usabilità*, termine diventato comune negli anni '70 nel vocabolario delle azioni adatte allo sviluppo dei prodotti industriali.

Non si vuol semplicemente affermare che si possano definire valori numerici rispetto all'utilizzo o alla soddisfazione per informare se le cose funzionino o meno, ma che si debba analizzare un elemento qualitativo dell'usabilità, che è difficile da esprimere attraverso i numeri e, a volte, è anche difficile da mettere a fuoco [8].

L'obiettivo dell'analisi di usabilità è di rendere più sistematica nei prodotti l'introduzione dei requisiti richiesti dagli utenti, inserendoli già nelle specifiche di prodotto e verificando il loro esatto inserimento, con prove effettuate dagli stessi utenti, già durante lo sviluppo del progetto.

È difficile trovare una definizione di usabilità condivisa da tutti. L'*International Organization for Standardization* definisce in questo modo l'usabilità: *'l'usabilità è la misura in cui un prodotto può essere usato per raggiungere specifici obiettivi con efficacia, rendimento e soddisfazione in un contesto d'uso specificato'* (ISO 9241).

Generalmente viene accettata, però, una definizione operativa che include uno o più dei seguenti fattori [9].

Utilità. Rappresenta in quale misura un prodotto permette all'utente di raggiungere i suoi obiettivi. Anche se un sistema è facile da usare, facile da imparare

ad usare e soddisfacente nell'uso, se non raggiunge gli obiettivi specifici per un utente non verrà da lui utilizzato, anche se viene dato gratuitamente. L'utilità è quindi anche una valutazione indiretta della motivazione dell'utente nell'usare il prodotto.

Facilità d'uso. E' il raggiungimento di livelli accettabili nell'esecuzione di compiti definiti, in ambienti definiti, da una parte definita della popolazione. E' il modo con cui gli utenti raggiungono gli obiettivi e viene solitamente valutata quantitativamente attraverso tempi di esecuzione o numero degli errori commessi.

Apprendibilità. Un sistema dovrebbe permettere agli utenti di raggiungere livelli d'esecuzione accettabili entro tempi accettabili. Si tratta dell'abilità dell'utente nell'utilizzare un sistema ad un livello determinato di comunicazione dopo un periodo di formazione determinato. Riguarda anche l'abilità nel reimparare ad utilizzare un sistema dopo un certo tempo durante il quale non è stato usato, per esempio da parte di utenti non abituali o per attività occasionali.

Flessibilità. Il prodotto dovrebbe essere in grado di gestire una gamma di compiti o di modalità operative oltre a quelli principali, per soddisfare una vasta gamma di esigenze dei diversi utenti o di usi diversi dello stesso utente.

Corrispondenza al compito. Ci deve essere corrispondenza tra le funzioni offerte dal prodotto e i bisogni e i requisiti dell'utente.

L'usabilità, intesa come la misura della qualità dell'esperienza dell'utilizzo di un oggetto, non è una misura unica ma è piuttosto determinata da una serie di parametri. Alla luce di quanto detto, uno strumento può quindi essere considerato usabile se soddisfa sostanzialmente quattro criteri:

i) Se il suo utilizzo è facile da apprendere e da memorizzare, cioè quanto velocemente un utente che non ha mai interagito con l'artefatto riesce ad apprendere sufficientemente bene l'uso e a ricordare, la volta seguente, i passi da compiere per interagire con lo strumento, senza dover imparare nuovamente quanto appreso in precedenza.

ii) Se è efficiente, cioè se, rispetto ad altri strumenti che avrebbero le potenzialità di raggiungere lo stesso scopo, rappresenta una scorciatoia per il raggiungimento dell'obiettivo, vale a dire se facilita e velocizza il conseguimento del risultato.

iii) Se permette di prevenire i possibili errori nell'utilizzarlo, consentendo poi eventualmente di recuperare mediante una correzione.

iv) Se procura una certa soddisfazione all'utente che interagisce con esso.

E' evidente allora che l'obiettivo ergonomico da perseguire sarà quello di assicurare ad uno strumento, ad un componente, ad un oggetto, ad un bene di consumo, come può essere un'automobile, il giusto grado di fruibilità ed usabilità, intesa nell'accezione qui data.

I.3 ERGONOMIA E QUALITÀ

La progettazione ergonomica si pone come obiettivo la realizzazione di oggetti di qualità adatti all'uomo. Spesso si intende per qualità del progetto la sua rispondenza alle specifiche richieste, indipendentemente dal fatto che esse rispondano o meno ai bisogni reali dell'utente, ai bisogni indotti o a scelte puramente commerciali. Quindi, già nelle specifiche sono insite scelte che influenzano pesantemente la qualità globale dell'oggetto. L'ergonomia contrappone a questo atteggiamento la qualità

ergonomica, cioè la rispondenza dell'oggetto alle reali esigenze funzionali e alle caratteristiche psico-fisiologiche degli utenti.

In questi ultimi anni il dibattito culturale sul disegno industriale e sull'ergonomia ha messo in evidenza la tendenza a dare una crescente importanza all'integrazione dell'ergonomia con il design e l'innovazione. Ad esempio *T.H. Thomsen* (1990) [10] indica, fra l'altro, che il buon design conferisce utilità al prodotto, lo rende autoesplicativo ed è rispettoso dell'ambiente. Altri fattori citati da *Thomsen* per un prodotto di buon design enfatizzano gli aspetti psicologici del rapporto prodotto-utente, come l'essere studiato dal punto di vista ergonomico, dare l'idea di unicità, venire identificato da parte dei consumatori, generare fiducia di per sé, avere una ottima interfaccia uomo-macchina, tenere conto degli aspetti psicologici. Egli cita come importanti anche alcuni criteri di qualità pratica, come le proprietà di maneggevolezza, la facilità di pulizia, l'assenza di rumore.

L'ergonomia non deve essere considerata come un apporto secondario alla progettazione nel campo dell'antropometria, e nemmeno come elemento genericamente qualificante l'oggetto. Essa deve essere considerata come un insieme di metodi per affrontare i temi progettuali, ponendo al centro l'uomo. Si sviluppa con ricerche, progettazioni, e verifiche legate da interazioni reciproche in un unico iter mirante alla definizione di oggetti e sistemi adatti all'uomo e in grado di soddisfarlo.

Il mercato attuale ha imposto l'imperativo del perseguimento della qualità indipendentemente dalle condizioni di prezzo, perché è mutato il significato stesso della parola qualità. *La qualità non è più valutata per la rispondenza di un prodotto alle specifiche di progetto, quanto piuttosto in base alla soddisfazione del cliente.*

L'ergonomia ha sviluppato teorie e sperimentato criteri e metodi che si sono dimostrati efficaci per evidenziare i desideri e i bisogni degli utenti e per valutare l'usabilità degli oggetti e dei sistemi.

La percezione è il primo passo indispensabile sulla strada di un corretto uso; infatti se una qualità, anche se presente, non è percepita, avrà un'efficacia ridotta o addirittura nulla. Le caratteristiche qualitative dei prodotti possono essere definite comuni, percepibili, non percepibili, autoesplicative ed indotte [9].

Qualità comuni. Sono le qualità che devono essere considerate generalizzabili a tutti i potenziali utenti; sono quelle che attengono alla sicurezza e alla salute, dalle quali non si può in nessun caso prescindere.

Qualità percepibili. Sono quelle che possono essere percepite con i normali mezzi posseduti dal singolo (vedere, toccare, sentire, soppesare, annusare e gustare). Sono legate all'esperienza ma anche a stereotipi (come ritenere il legno un prodotto nobile e affidabile, la plastica invece artificiale quindi non nobile e forse tossica). Le qualità percepibili si modificano nel tempo con l'arricchimento dell'esperienza individuale (come la percezione del peso dell'oggetto come garanzia di grandi contenuti tecnologici che è andata modificandosi con l'avvento della miniaturizzazione).

Qualità non percepibili. Sono qualità che non possono essere percepite con i normali mezzi posseduti dal singolo. Sono quelle nascoste (come la qualità della struttura di un pannello mascherata dalla finitura superficiale) o quelle che per essere individuate richiedono analisi e prove di laboratorio (come la durata nel tempo delle verniciature). Queste qualità richiedono di essere dichiarate, analizzate e garantite da enti, laboratori o esperti specialisti.

Qualità autoesplicative. Si hanno quando l'oggetto stesso informa l'utente delle sue qualità e del suo uso, attraverso la sua stessa materialità. Sono presenti soprattutto negli oggetti di natura meccanica, la cui conformazione è necessariamente condizionata dal funzionamento dei meccanismi. Con l'elettronica gli oggetti diventano sempre meno autoesplicativi, per cui richiedono sempre più un intervento progettuale di manipolazione dell'immagine in senso autoesplicativo.

Qualità indotte. Sono le qualità che vengono proposte come possibili o necessarie dalle informazioni o dai messaggi pubblicitari che raggiungono l'utente. Per esempio, le campagne sulla vettura sicura hanno indotto nel pubblico la sicurezza come problema e la robustezza come qualità; la diffusione della cultura ecologica ha fatto diventare una qualità richiesta il rispetto, da parte del produttore, della natura e dell'ambiente nella produzione, nell'uso e nello smaltimento dei beni. I traguardi della qualità richiesta e attesa dagli utenti si spostano anche quando l'applicazione di oggetti e di sistemi innovativi si diffonde e generalizza, per cui ciò che era opzionale o accessorio diventa qualità minima richiesta.

La qualità è dunque un coacervo di significati e definizioni, che la progettazione deve indirizzare verso il terreno dell'ergonomia, nel tentativo, non mistificatorio, di raggiungere una qualità che possa definirsi ergonomica e possa comprendere gli attributi dianzi accennati.

La norma ISO 9241 considera la qualità ergonomica di un oggetto a proposito dell'uso da parte di un determinato soggetto, in un determinato ambiente, intendendo, con questo, che la qualità ergonomica non è un attributo dell'oggetto ma è un attributo che riguarda l'uso.

La qualità ergonomica di un prodotto industriale si riferisce all'utilizzatore, al compito, alle attrezzature, all'ambiente fisico e organizzativo. Queste affermazioni sembrano escludere che si possano definire le qualità ergonomiche dei vari oggetti e, a maggior ragione, certificarle. È chiaro tuttavia, che è sempre possibile conoscere, valorizzare e diffondere le qualità ergonomiche dei prodotti industriali operando sulle caratteristiche, sui parametri e sulle qualità degli oggetti.

Le caratteristiche ergonomiche dei prodotti sono il frutto di un primo livello di indagine che si riferisce alla generalità degli ambienti, degli usi e degli utenti e si riferiscono agli aspetti che influenzano, positivamente o negativamente, il rapporto tra l'oggetto e la generalità dei possibili utilizzatori. Le caratteristiche ergonomiche devono essere associate a parametri ergonomici, che sono i criteri atti a misurare, valutare o giudicare in termini obiettivi le caratteristiche ergonomiche dei prodotti. Il primo livello fornisce gli strumenti per operare ad un secondo livello, che consente di definire le qualità ergonomiche degli oggetti. Esse non sono più legate ad una generalità di condizioni, ma a specifiche situazioni d'uso da parte di determinati utenti e in determinati contesti ambientali. La qualità ergonomica dei prodotti si determina verificando gli effetti positivi o negativi delle loro caratteristiche in determinate condizioni e si valuta attraverso i parametri ergonomici.

I.3.1 Caratteristiche ergonomiche

Le caratteristiche ergonomiche sono gli aspetti in grado di influenzare la qualità del rapporto fra i prodotti e la generalità degli utenti. Le caratteristiche ergonomiche non sono, di per sé, né positive né negative, ma sono argomenti in grado di influenzare il benessere psicofisico o il piacere di chi usa gli oggetti.

Le caratteristiche ergonomiche dei prodotti devono essere definite per ogni tipologia omogenea di prodotti, facendo riferimento ad un elenco generale di argomenti relativi alle caratteristiche dell'interfaccia fra utente ed oggetto. Questo elenco generale delle caratteristiche ergonomiche dei prodotti deve essere tenuto in costante aggiornamento man mano che si sviluppano ricerche di settore, che si evolvono le aspettative degli utenti e che si arricchiscono le tecnologie.

I.3.2 Parametri ergonomici

Le caratteristiche ergonomiche possono essere valutate e trasmesse solo se sono espresse da parametri che indichino e specificino con quali metodi, strumenti e unità di misura esse possono essere descritte in termini obiettivi. I parametri ergonomici sono quindi i criteri per misurare, valutare o giudicare le caratteristiche ergonomiche dei prodotti. Essi devono far riferimento al patrimonio di conoscenze delle varie discipline afferenti l'ergonomia e solo in assenza di riferimenti soddisfacenti si renderà necessario definire nuovi parametri. I parametri ergonomici possono derivare da:

- Metodi, strumenti e unità di misura presi dalle discipline che rientrano nel raggio d'azione dell'ergonomia.
- Definizioni di metodi, strumenti e unità di misura elaborati specificamente quando la rappresentazione delle caratteristiche ergonomiche non può appoggiarsi al patrimonio delle discipline pertinenti l'ergonomia. Ad esempio, mediante la definizione di simulatori del corpo umano in diverse taglie, di unità di misura e dei metodi di indagine per la valutazione del comfort in autovettura.

- Ricerche specifiche che si rendono necessarie per quegli argomenti che non possono far riferimento ad una adeguata esperienza sulle caratteristiche ergonomiche, sia per carenze nella letteratura, sia per la novità del settore o dell'innovazione.

I.3.3 Qualità ergonomiche

Le qualità ergonomiche dei prodotti sono, quindi, le risposte alle caratteristiche ergonomiche che derivano dall'uso reale degli oggetti. Esse sono pertanto attributi specifici dell'oggetto, riferiti all'interazione delle caratteristiche ergonomiche con specifici utenti, in specifici ambienti e per specifici usi. Per definire le qualità ergonomiche si devono assegnare scale di qualità ai parametri delle caratteristiche ergonomiche dei singoli prodotti [10]. Saranno possibili, perciò, per i vari prodotti, indicazioni del tipo: "adatto anche per mancini", "tascabile", "adatto per il 95% della popolazione", avendo definito con grande precisione il significato oggettivo di ogni affermazione.

A queste esigenze, bisogna poi accostare gli obblighi imposti dal legislatore nell'intento di assicurare al prodotto la maggiore sicurezza. La moderna progettazione s'inserisce in tale quadro, e quanto sinora detto, è la chiave di lettura necessaria per comprenderne interamente le linee d'azione. Appare, quindi, immediatamente comprensibile, il ruolo dell'ergonomia, capace com'è di soddisfare le esigenze qualitative imposte da una domanda sempre più frazionata e, di riflesso, anche le esigenze di sicurezza imposte dal legislatore.

I.4 LA PROGETTAZIONE ERGONOMICA: IL PRINCIPIO DI GLOBALITÀ

Le esperienze maturate sull'ambiente di lavoro, hanno individuato nella globalità degli intenti e degli obiettivi il principio cardine cui uniformarsi nella progettazione ergonomica. Il principio di globalità impone che l'attenzione progettuale sia rivolta a temi generali a largo spettro, riservando ad un secondo livello di approfondimento singoli aspetti del problema [10]. Un tema progettuale potrà essere il comfort della guida delle autovetture, che a sua volta si articolerà in comfort dei sedili, correttezza della posizione di guida, visibilità esterna e via di seguito, e non isolatamente il sedile, l'assetto di guida o la visibilità. In altre parole un problema non deve essere visto nei confini ristretti di un singolo posto o ambiente di lavoro, ma deve essere esteso a tutte le strutture e funzioni che ad esso sono collegate, direttamente o indirettamente. Ne deriva che si devono correlare, per esempio, i problemi interni all'unità produttiva con quelli esterni ad essa.

Il principio di globalità propone l'approccio sistemico dell'ergonomia nell'analisi e nella valutazione degli oggetti, dei sistemi e del posto e dell'ambiente di lavoro, ci dice cioè che sarà sbagliato in un progetto soddisfare un aspetto problematico (ad esempio la sicurezza) trascurando gli altri (facilità d'uso, efficienza, pulizia e manutenzione) perché alla fine anche la sicurezza ne sarà seriamente inficiata.

I singoli aspetti del sistema uomo/macchina/ambiente sono campi di indagine delle discipline biologiche e tecniche che studiano l'interfaccia uomo/macchina e uomo/ambiente. Oggetto dell'ergonomia è, invece, la globalità dei rapporti del sistema uomo/macchina, ragion per cui non si devono progettare sottosistemi separati, ma sviluppare un unico progetto integrato.

La progettazione ergonomica deve quindi sostanziare questi principi per dar luce al prodotto industriale ergonomico. Un prodotto industriale può essere definito ergonomico quando, nei vari momenti della sua vita, non solo non provoca danni, ma genera condizioni di benessere psicofisico in tutti coloro che entrano in contatto con esso.

L'ergonomia del prodotto copre un campo che va dalle prestazioni che il prodotto è in grado di offrire al benessere che esso produce. L'area delle prestazioni riguarda principalmente gli aspetti dimensionali dell'oggetto, la salvaguardia della salute, la sicurezza di tutti coloro che entrano per qualsiasi ragione in contatto con l'oggetto e il rispetto dell'ambiente durante la fabbricazione, l'uso e la dismissione. La caratteristica peculiare degli argomenti raggruppati nell'area delle prestazioni è che i parametri che li descrivono sono validi per la generalità della popolazione, indipendentemente dalle caratteristiche del singolo. L'area del benessere riguarda, invece, principalmente l'usabilità e la gradevolezza dei prodotti. Questi aspetti sono variabili in funzione delle caratteristiche psico-socio-culturali dell'utente, per cui devono essere valutate rispetto alle caratteristiche peculiari del singolo e riferite ad un preciso spazio fisico, sociale e culturale.

I metodi che consentono lo sviluppo di prodotti industriali orientati ergonomicamente sono sia di tipo obiettivo, cioè tecniche per la definizione di dati oggettivi, numerici e misurabili, per fornire guide prescrittive, sia tecniche per la raccolta e il confronto delle esperienze soggettive di reali potenziali utilizzatori che forniscono orientamenti e tendenze. Le tecniche di tipo obiettivo sono quelle riferite a dati oggettivi e misurabili. Esse consentono la misurazione di molti parametri, il confronto fra oggetti in produzione, modelli, prototipi e l'impostazione su dati

obiettivi dei nuovi progetti. Permettono una valutazione certa degli aspetti misurabili e sono indispensabili per la definizione di prescrizioni e normative e per la verifica del loro rispetto.

L'ergonomia, fino a pochi anni fa, tendeva ad occuparsi maggiormente di ciò che era misurabile e di ciò che aveva un'evidenza obiettiva. Da alcuni anni però, grazie alla spinta di alcuni progettisti e studiosi dell'ergonomia che si sono occupati della progettazione di oggetti e sistemi adatti all'uomo, è emerso che gli argomenti più incisivi per la progettazione degli oggetti, anche se di più difficile trattazione, sono proprio gli aspetti soggettivi. Infatti, i dati oggettivi non sono efficaci per analizzare a fondo i comportamenti individuali. Per attuare l'ergonomia nella progettazione di oggetti e di sistemi si devono applicare metodi basati su analisi con soggetti significativi, che è un mezzo efficace per conoscere la risposta individuale in condizioni d'uso reali. Gli aspetti soggettivi sono quelli maggiormente caratterizzanti l'intervento ergonomico perché ergonomia significa adattare gli ambienti e gli oggetti all'uomo, non in astratto ma rispetto alle specificità di ciascun individuo; il che richiede di applicare tecniche oggettive ma soprattutto quelle soggettive che richiedono un rapporto diretto con l'utente, di interpellarlo, di sapere quali sono i suoi bisogni e le sue esigenze.

I.4.1 L'utente

I principi dell'ergonomia applicata al progetto affermano che ambienti, oggetti e sistemi devono essere adatti alle caratteristiche psicofisiche di ogni singolo individuo. Ciò sembra affermare che ogni ambiente, oggetto o sistema deve essere pensato e realizzato specificamente per una ed una sola persona in quanto ciascuno è

singolare e diverso da tutti gli altri. È quanto avviene con la produzione artigianale, il vestito sartoriale o i sedili delle vetture di formula uno. Questi principi sembrano in palese contraddizione con riferimenti certi, ripetibili e di standardizzazione richiesti dalla produzione industriale, di oggetti, di ambienti costruiti e di sistemi.

Pur mantenendo fede al principio generale che afferma che il prodotto ergonomico deve essere aderente alle esigenze del singolo utente, l'ergonomia riconosce che gli aspetti che caratterizzano il singolo possono essere studiati e razionalizzati in quanto molti di essi sono comuni a tutti gli uomini, altri sono comuni ad ampie fasce di popolazione e altri, infine, sono realmente legati esclusivamente all'individualità del singolo.

Le caratteristiche comuni a tutta l'umanità sono quelle che connotano l'essere umano e lo distinguono dalle altre forme viventi, come, per esempio, la capacità di percepire attraverso l'organo della vista una determinata gamma di onde elettromagnetiche. Le discipline biologiche e psicosociali possiedono una infinità di dati e informazioni che possono e debbono essere utilizzate in sede di progettazione. Altre caratteristiche sono invece specifiche per grandi aree dell'umanità. Riguardano per esempio i meccanismi della termoregolazione del corpo umano, che variano in funzione del colore della pelle o delle caratteristiche culturali, o ancora l'effetto dei suoni che vengono percepiti come armonici da certe popolazioni non lo sono per altre. C'è da osservare che questi aspetti possono essere anche variabili nel tempo.

All'interno di questo quadro che si riferisce a tutta l'umanità o a sue grandi categorie, sono da ricercare le variabili più specificamente individuali, che possono essere di tipo culturale, biologico o derivare da patologie.

Sono le caratteristiche antropometriche individuali che ci dicono che nessun individuo corrisponde perfettamente ai dati antropometrici assunti come caratterizzanti gli individui della sua taglia; la capacità di compiere sforzi che è legata allo stato di salute, alla struttura muscolare e all'allenamento; i deficit visivi spesso legati all'età e via di seguito.

Altri parametri nell'area della psicologia e della cultura riguardano gli aspetti più propriamente soggettivi e sono, per esempio, le abitudini, gli atteggiamenti posturali, le strategie che si instaurano per difendersi dalle aggressioni esterne e in genere il modo di affrontare la vita. Circostanze, queste, che portano ciascuno ad avere differenti comportamenti di fronte al medesimo stimolo in dipendenza di fattori radicati o momentanei come ansia o fretta.

Gli aspetti individuali sono difficilmente riconducibili a valori numerici universali per cui la loro introduzione nel progetto richiede tecniche specifiche che si basino sull'analisi specialistica e su prove e verifiche effettuate su campioni significativi dei probabili utenti dell'oggetto.

I.4.2 Metodi di analisi

La conoscenza dei bisogni degli utenti mirata a nuovi progetti è il punto chiave del processo ergonomico e può essere attuata con una o più metodologie, a seconda della natura dell'oggetto, dei mezzi e dei tempi a disposizione.

- Indagini generali dei "bisogni" e delle loro evoluzioni nel tempo effettuate con i mezzi propri nelle indagini di mercato e consultando la letteratura scientifica.
- Indagini mirate effettuate con un campione significativo di potenziali utilizzatori su progetti, modelli e prototipi.

- Indagini per similitudine effettuate su un campione significativo di potenziali utilizzatori e con oggetti presi dalla produzione corrente, che, in vari modi, siano significativi dell'oggetto che si intende produrre.

Non vi sono differenze concettuali rilevanti nell'analisi di prodotti in fase di progetto o di prodotti già realizzati, mentre ve ne sono molte sui mezzi e sui metodi d'analisi. Nel caso di oggetti esistenti e funzionanti le analisi possono essere eseguite utilizzando il prodotto in condizioni reali d'uso. Si possono valutare sia i parametri misurabili con strumenti fisici, sia quelli misurabili con strumenti cognitivi. Con metodologie adeguate è possibile arrivare alla certificazione ergonomica del prodotto.

Nel caso di oggetti non ancora realizzati, le analisi necessarie in senso ergonomico per lo sviluppo del progetto, possono essere fatte solo su parti dell'oggetto, su aspetti singoli o su prodotti simili a quelli in via di sviluppo. Le analisi, in questo caso, si differenziano da quelle fatte sugli oggetti esistenti non per i fini, ma per una differente programmazione dell'indagine e per l'esigenza di sviluppare una fase di analisi mirata dei dati [11].

I.5 ERGONOMIA COGNITIVA ED ERGONOMIA FISICA

Se un prodotto o un servizio sono progettati tenendo in considerazione bisogni, esigenze, strategie di ragionamento dei futuri utenti, il manuale può non servire poiché il ruolo intermediario tra le caratteristiche del prodotto e le esigenze degli utenti finali, viene svolto dall'ergonomia [12].

All'interno di questa disciplina, l'area che si occupa specificamente di indagare le caratteristiche psicologico-cognitive dell'uomo, prende il nome di *ergonomia*

cognitiva (vedi fig. 1.2). Essa indaga le capacità percettivo-cognitive dell'uomo e applica tali conoscenze alla progettazione di nuovi prodotti e nuovi servizi.

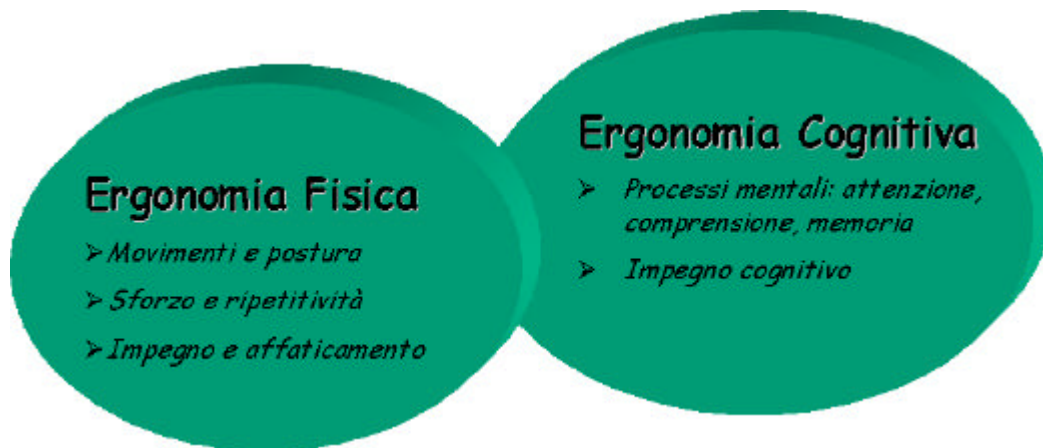


Fig. 1.2. – Ergonomia fisica ed ergonomia cognitiva.

Tramite questo approccio, è possibile sviluppare prodotti che facilitino l'interazione dell'uomo, rendendola allo stesso tempo, più sicura, più efficiente, e più soddisfacente. Le aree di competenza dell'ergonomia cognitiva sono:

- Individuazione ed analisi del modello mentale degli utenti.
- Costruzione di strumenti di indagine ad hoc (per esempio questionari) per la rilevazione di motivazioni ed aspettative
- Progettazione ex-novo e valutazione di prodotti e servizi nell'ottica dell'usabilità.
- Analisi del carico cognitivo dell'interazione uomo-macchina.
- Analisi delle risorse cognitive (percezione, attenzione, memoria, ragionamento) nell'interazione uomo-macchina.

Le metodologie e le tecniche utilizzate possono coinvolgere solo esperti di ergonomia cognitiva oppure utenti finali. Le tecniche che coinvolgono gli esperti

vengono applicate prevalentemente in fase di progettazione ed impostazione del prodotto e sono:

- Analisi delle funzioni;
- Analisi euristica del prodotto mediante linee guida di progettazione.

Altri metodi implicano la partecipazione di gruppi di persone rappresentativi dell'utenza finale che combinate con le precedenti metodologie permettono di ottenere per ognuna delle fasi di sviluppo del prodotto, indicazioni sulla sua effettiva rispondenza a esigenze e aspettative degli utenti. Queste indicazioni, raccolte nel linguaggio degli utenti, vengono tradotte in linee guida ergonomiche operative immediatamente utilizzabili dai progettisti.

L'ergonomia fisica prende in considerazione tutto quanto di una persona si può vedere o misurare: le caratteristiche antropometriche, biomeccaniche e fisiologiche, i movimenti svolti, tutti aspetti fondamentali nella progettazione di ambienti di vita e di lavoro delle persone. L'ergonomia fisica svolge le sue indagini con metodologie di sperimentazione e di calcolo:

- Sperimentazioni con utenti per lo sviluppo di criteri ergonomici effettuate mediante simulacri, *mock-up* o prototipi dell'oggetto o dell'ambiente di lavoro.
- Metodologie di calcolo per il supporto alla progettazione e allo sviluppo. In particolare esistono metodi numerici mediante i quali è possibile analizzare l'interazione di una rappresentazione digitale dell'uomo con una rappresentazione digitale dell'ambiente di lavoro.

Dall'applicazione sistematica di queste metodologie si derivano le specifiche ergonomiche distintive per governare le problematiche progettuali più ricorrenti. Un

modo molto efficace per realizzare questi propositi è rappresentato dall'utilizzo di manichini riproducenti le fattezze umane. In campo automobilistico, ad esempio, (come verrà ampiamente mostrato nel III capitolo) i manichini si rivelano strumenti utilissimi per centrare i target ergonomici rilevati nelle analisi di comfort condotte preliminarmente. Raggiungibilità, visibilità, abitabilità ed altri obiettivi ergonomici possono essere valutati facilmente in fase di prototipazione, collocando il manichino digitale nel prototipo virtuale della vettura destinata al lancio sul mercato.

I.6 IL RUOLO DELL'ANTROPOMETRIA E DELLA FISIOLOGIA

I.6.1 L'Antropometria

L'antropometria può essere intesa come l'insieme delle tecniche sistematicamente adottate per misurare e compiere, nel modo più ripetibile e scientificamente corretto, osservazioni oggettive sulla forma fisica dell'uomo [13].



Fig. 1.3. - Strumenti utilizzati nella *craniometria*.

A seconda del settore specifico di cui si occupa, l'antropometria si divide in più branche, di cui le principali sono: *somatometria*, che effettua le misure delle forme del corpo sia del vivente sia del cadavere; *craniometria*, che esegue misure e osservazioni sul cranio secco (vedi fig. 1.3); *osteometria*, che si occupa delle misure

ossee in generale; *encefalometria*, che effettua misure del cervello; *fisiometria*, che esegue misure dei vari caratteri della faccia.

Proprio per la sua funzione di fornire dati oggettivi, l'antropometria richiede un'accurata definizione dello scopo delle misure, cioè una precisa delimitazione dell'ambito entro il quale si deve svolgere e deve essere limitata la ricerca. Richiede, inoltre, una notevole accuratezza dei metodi e dei procedimenti da seguire nel compiere misure poiché queste devono essere chiaramente ripetibili da altri osservatori in ambienti e condizioni diverse.

Eseguire le misure significa stabilire con esattezza la distanza esistente fra punti determinabili in modo univoco sullo scheletro o sul corpo (punti antropometrici). Le distanze da misurare non sono mai considerate e discusse come valori assoluti, ma nel rapporto percentuale con altre misure correlabili. In questo modo si definiscono i cosiddetti indici antropometrici utilizzati in antropometria per misurare le caratteristiche di ogni parte del corpo umano. Per ottenere un indice si stabilisce il rapporto tra due valori correlabili (per esempio entrambi riferiti al naso), di cui quello considerato, nella generalità dei casi, come il minore viene espresso al numeratore e moltiplicato per cento. Ogni parte del corpo e ogni carattere (forma del cranio, tipo di naso, forma del bacino, ecc.) risultano in tal modo definiti da un indice o da una serie di indici antropometrici, sulla base dei quali si stabilisce anche una classificazione dei tipi umani entro i quali vengono localizzati i vari soggetti [14].

I.6.2 La Fisiologia

Le informazioni ricavabili dagli studi antropometrici sono il punto di partenza per realizzare manufatti compatibili ed armonizzati con la figura umana, ma questo non

basta per assicurare il giusto livello di comfort nell'uso di determinati artefatti o nell'esecuzione di particolari operazioni. Benché il concetto di comfort sia, in qualche misura, fluttuante, essendo legato alla soggettività umana, non si può negare che determinate condizioni di lavoro o semplici operazioni siano fonte di particolare disagio perché svolte con sforzo e fatica notevoli. L'intervento ergonomico è volto dunque anche alla limitazione della fatica. E' difficile definire che cosa sia in realtà la fatica, per la sovrapposizione di sensazioni soggettive, di sintomi oggettivi e di alterazioni del comportamento. Si è d'accordo, però, che per raggiungere la fatica sia necessario uno sforzo nella prestazione, cioè un'attività protratta nel tempo con un'intensità che non consente il recupero spontaneo e che conduce ad una perdita di potere funzionale [15].

L'ergonomia può risolvere brillantemente problemi di affaticamento, o, in ogni caso, mitigarli e ridurli notevolmente. La disciplina dell'ergonomia che si occupa di questi problemi è la fisiologia. La fisiologia è quella branca della biologia che ha per oggetto lo studio delle funzioni degli esseri viventi, in particolare dell'uomo, intendendo per funzione l'insieme di tutti gli eventi coordinati, volti al raggiungimento di un risultato ben definito. Più in particolare, la fisiologia analizza le manifestazioni funzionali dell'organismo; ricerca i fenomeni fisici e chimici che stanno alla base di esse e cerca di risalire alle leggi che le governano. Si può dire, pertanto, che la fisiologia è la scienza che studia il funzionamento dei vari organi ed apparati, sia in riposo, sia durante le varie attività lavorative. Attraverso la conoscenza dei limiti e delle possibilità umane, la fisiologia del lavoro offre elementi preziosi per progettare macchine, strumenti, ambienti e organizzazione del lavoro in senso ergonomico.

Gli studi sulla fisiologia muscolare hanno portato alla constatazione che i muscoli grossi, come quello della coscia, sono meglio adatti per contrazioni lente e prolungate, che sviluppano notevoli quantità di energia. I muscoli piccoli come quelli delle dita, invece, sono capaci di contrazioni rapide e di breve durata, in cui l'energia sviluppata è modesta ma i movimenti fini e precisi. La contrazione prolungata dei muscoli, come avviene nel lavoro statico, dà luogo in breve ad affaticamento e stanchezza. Pertanto, si dirà che sono da definirsi “*antiergonomiche*” tutte quelle posizioni che comportano un eccessivo lavoro statico come la posizione eretta o, per esempio, l'altezza del piano di lavoro troppo elevata o troppo bassa. Questo non si verifica con il lavoro muscolare dinamico, che permette una continua alternanza fra contrazioni e rilassamento dei muscoli. Un altro punto cui si presta attenzione è la riduzione al minimo dei gruppi di muscoli impegnati in una data operazione e lo sforzo associato, tenendo ben presente la forza che può essere esercitata dagli arti in una determinata direzione (fig. 1.4) [16].

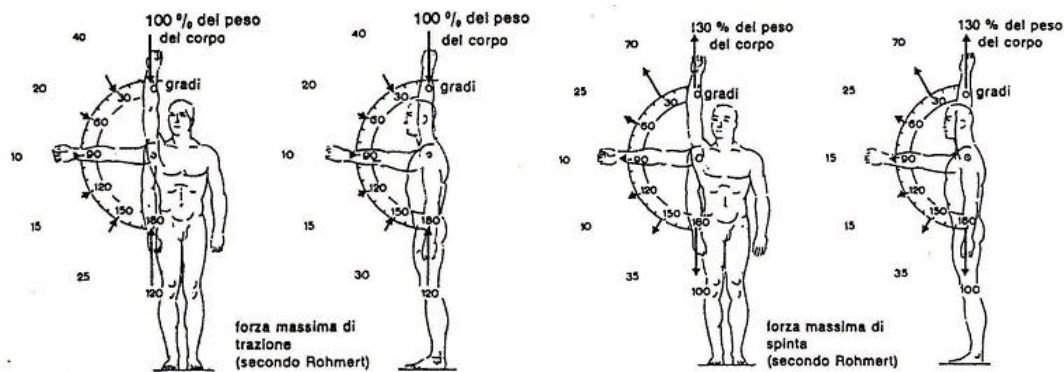


Fig. 1.4. - Forza che può essere esercitata dagli arti [16].

Molto importante è poi l'analisi dei rapporti sensoriali uomo-macchina che arricchisce la ricerca di soluzioni ergonomiche per alleviare la fatica fisica e che integra i metodi di organizzazione del posto di lavoro e del lavoro in genere per

alleviare la fatica mentale del soggetto. Esistono numerosi studi sperimentali in merito, volti a stabilire la corretta posizione delle leve e relative escursioni di manopole, pulsanti, quadranti, indicatori, indici e lancette, interruttori a levetta o a pedale. Per rapporti sensoriali si intende l'insieme delle informazioni che l'uomo rileva da strumenti di controllo e/o da segnali ricevuti e l'insieme dei movimenti che egli deve attuare per correggere il funzionamento della macchina a seguito delle informazioni ricevute. L'ergonomia si occupa di tutti questi dispositivi per evitare errori da parte dell'operatore, con conseguenze anche gravi per se stesso e per gli altri [17].

I.7 ERGONOMIA, TECNOPATIE E SICUREZZA

Alla luce di quanto mostrato in questo primo capitolo risulta evidente la commistione tra ergonomia e sicurezza del lavoratore e, più in generale, dell'utente.

L'eminente studioso *Grandjean* afferma: “...nella progettazione degli artefatti tecnologici, le caratteristiche fisiche delle macchine devono essere compatibili con le caratteristiche fisiche dell'operatore. L'ergonomia traduce le conoscenze dell'antropometria in linee guida per la progettazione di supporti alle attività che non inducano affaticamento o, peggio ancora, a patologie” [18].

L'ergonomia, infatti, come si è visto, si preoccupa di ovviare a tutte le situazioni che possono determinarsi a danno dell'efficienza e del benessere dell'uomo e pertanto la ricerca è indirizzata al rilievo dei carichi di lavoro associati a quelli generati dall'ambiente fisico nel quale si opera. Rientra nei compiti dell'ergonomia l'ottimizzazione di tutti i parametri ambientali e il loro mantenimento nei limiti di benessere, per la gran parte già definiti dalla fisiologia del lavoro e dalla medicina

del lavoro. Se un componente richiede uno sforzo eccessivo, se un lavoro è affaticante perché si devono compiere operazioni che lo rendono tale, questo è il segno che manca una solida progettazione ergonomica. Si è visto in precedenza cosa si intende per affaticamento. E' chiaro che se si superano determinati limiti fisiologici si va incontro a numerose tecnopatie. Com'è noto, si chiamano tecnopatie o malattie professionali, le malattie contratte a causa dell'attività svolta, o anche le alterazioni psicosomatiche che trovano nell'azione lenta del lavoro e dell'ambiente la loro causa esclusiva e prevalente. Fra le più note ricordiamo la sindrome del tunnel carpale, e quelle legate alla movimentazione di carichi che comportano il rischio di lesioni dorso lombari. Nella scelta delle macchine occorre, quindi, considerare attentamente anche questi aspetti e, ovviamente, per gli scopi che qui più direttamente interessano, gli aspetti ergonomici che, generalmente, li comprendono superandoli. E' infatti evidente che un sistema nel quale siano presenti componenti mal concepiti ai fini della prevenzione infortuni, non potrà essere ritenuto ergonomicamente corretto. La prassi ergonomica, comprendendo la rispondenza degli ambienti di lavoro ad opportuni criteri di idoneità, varrà quindi anche a ridurre l'incidenza delle tecnopatie.

Nell'ultimo capitolo della presente tesi verrà proposto, in particolare, un approccio metodologico per la prevenzione delle malattie muscoloscheletriche basato sull'impiego di simulazioni in ambiente virtuale.

Capitolo II

LA PROGETTAZIONE ERGONOMICA IN AMBITO AUTOMOBILISTICO

II.1 INTRODUZIONE

Da qualche anno si sta assistendo ad una evoluzione dell'autoveicolo il quale tende sempre di più a diventare un vero e proprio ambiente, non più semplice mezzo di trasporto, dove per ambiente si intende uno spazio progettato "a misura d'uomo" e cioè razionale, confortevole, poco affaticante, anche nelle lunghe percorrenze, e quindi capace di offrire agli occupanti posture naturali e comandi azionabili agevolmente. Da quanto detto e dalle definizioni presentate nel precedente capitolo, emerge chiaramente la rilevanza dell'ergonomia nell'impostazione di una nuova vettura. Gli standard di comfort e sicurezza di guida stanno diventando, negli ultimi anni, sempre più elevati, imponendo ai costruttori il massimo impegno nello studio di soluzioni avanzate con investimenti ingenti e la messa a punto di metodologie di lavoro sviluppate appositamente. La bontà del progetto ergonomico dell'interno vettura misura il livello di vivibilità e comfort del veicolo mediante la qualità della vita a bordo, parametro di valutazione complesso ed articolato che influisce direttamente anche sulla sicurezza di marcia. Per perseguire l'obiettivo di progettare il veicolo "a misura d'uomo" è necessario tener conto di molteplici aspetti progettuali: disposizione dei comandi principali e secondari (che devono risultare raggiungibili ed azionabili con gesti facili e naturali), visibilità offerta al conducente (dipendente, in particolare, dalla quantità e disposizione delle superfici vetrate e degli specchi), configurazione dell'interno vettura tesa a minimizzare le lesioni agli occupanti in caso d'urto ed integrabile coi moderni dispositivi di sicurezza passiva, disegno generale del posto guida finalizzato a produrre il minimo affaticamento del conducente che potrà quindi conservare lucidità e reattività anche dopo prolungati tempi di marcia, disegno delle porte d'accesso all'abitacolo. Il razionale progetto

ergonomico della vettura impone, quindi, di non sottovalutare nessun aspetto nell'impostazione dell'abitacolo e dei comandi, e richiede, pertanto, la gestione di un insieme complesso di elementi.

Uno dei primi passi nella progettazione di un nuovo autoveicolo è la realizzazione dello spazio utile occupato dai passeggeri (*occupant envelope*). In esso si stabilisce la grandezza dell'abitacolo e la disposizione dei componenti strutturali (sedili, sterzo, leva cambio, pedaliera, etc.) che sono presenti al suo interno in modo tale da renderlo, da un lato, consistente nei confronti della sicurezza e del comfort dei passeggeri, e, dall'altro, economicamente conveniente. La progettazione dell'interno di un autoveicolo dipende, in primo luogo, dal tipo di veicolo (sportivo, utilitario, di lusso, etc.) e dal numero di occupanti. Questi parametri questi forniti dal *marketing*. In una vettura sportiva, ad esempio, l'altezza del sedile dal fondo stradale è notevolmente inferiore a quello delle altre, sia per mantenere una ristretta area frontale e un basso centro di gravità (al fine di ottenere una buona aerodinamica e una migliore tenuta di strada), sia per realizzare le caratteristiche di stile desiderate (*styling appeal*). Questo tipo di vettura spesso è fornita di soli due sedili, uno per il conducente e l'altro per il passeggero al suo fianco; in alcuni ci sono anche i sedili posteriori che però possono accogliere confortevolmente solo una ristretta fascia di utenti a causa degli spazi limitati sia per le gambe, sia per la testa. In una berlina ad uso familiare, invece, il numero di passeggeri è superiore a due ed i sedili devono essere confortevoli per una più ampia fascia di persone, essendo questo un requisito fondamentale e caratteristico per tali vetture. A seconda delle esigenze, quindi, vengono appositamente realizzati compromessi che riguardano lo "spazio passeggero". Il posto guida, invece, deve essere sempre realizzato con l'obiettivo di

posizionare un ampio *range* di conducenti (95%) assicurando loro comfort posturale, raggiungibilità dei comandi e visibilità sia anteriore che posteriore.

Al fine di ottenere veicoli che abbiano caratteristiche tali da soddisfare le differenti esigenze degli utenti e conseguentemente avere successo nelle vendite, è necessario applicare metodologie appropriate di “*occupant packaging*” basate su database antropometrici e sull’impiego di appropriate procedure CAD (*Computer Aided Design*), utili al corretto sviluppo dell’*occupant envelope* [19].

II.2 MISURE ANTROPOMETRICHE

L’antropometria, il cui ruolo nella progettazione ergonomica in generale è stato ampiamente discusso nel precedente capitolo (*c.f.r. paragrafo I.6*), fornisce, in campo automobilistico, le metodologie per definire le dimensioni dei conducenti e dei passeggeri dei veicoli [13]. Bisogna, però, fare una distinzione tra le misurazioni, sia dal punto di vista della definizione che dell’applicazione. Si hanno, quindi, le *misure antropometriche convenzionali*, che sono usate principalmente dagli antropologi, e le *misure antropometriche task oriented*, usate dagli ingegneri e dai progettisti.

II.2.1 Misure antropometriche convenzionali.

Queste sono le misure “classiche” rilevate dagli antropologi sul corpo umano, con i soggetti in posizioni rigide e standardizzate [20]. Esse, tipicamente, sono lunghezze, altezze, larghezze e circonferenze.

Queste misure includono (vedi fig. 2.1):

- altezza in posizione eretta (*Standing height*);
- altezza da seduto (*Seated height*);

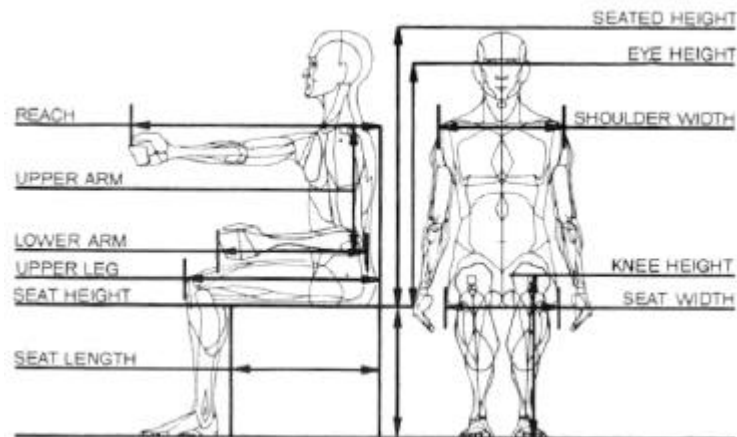


Fig. 2.1. – Misure antropometriche convenzionali.

- altezza degli occhi da seduto (*Seated eye height*);
- lunghezza della coscia (*Upper leg length*);
- altezza del ginocchio (*Knee height*);
- lunghezza da seduto (*Seat length*);
- lunghezza braccio e avambraccio (*Upper and lower arm length*);
- lunghezza totale del braccio (*Reach - total arm length*);
- larghezza delle spalle (*Shoulder width*);
- larghezza anca (*Hip or seat width*);
- peso (*Weight*).

Le misure antropometriche convenzionali sono ricavate tramite strumenti chiamati “*antropometri*”. Tali macchine sono costituite da un fondo piano ed uno schienale entrambe rigidi, muniti di opportuni calibri e scale di misurazione. Tutte le misure, infatti, sono riferite a superfici verticali ed orizzontali, che sostengono il soggetto, non inflesse. Nella figura 2.2 viene mostrato un antropometro semi-automatico costruito nel 1970 dalla *General Motors* e tuttora in uso [21].



Fig. 2.2. - Misuratore antropometrico della General Motors.

Si può notare che queste misure antropometriche, quando sono rilevate su un campione rappresentativo della popolazione, assumono una distribuzione *Gaussiana*. Infatti, posizionando sull'asse delle ascisse il valore misurato e sull'asse delle ordinate il numero di persone che assumono suddetto valore, si ottiene il tipico diagramma a “campana”. Questo tipo di distribuzione è definito completamente dal valore medio e dalla dispersione dei dati dal valore medio, denominata varianza [22]. In figura 2.3 viene mostrata, ad esempio, la curva rappresentativa dell'andamento della altezza in posizione eretta (*standing height*) relativamente alla popolazione americana [23].

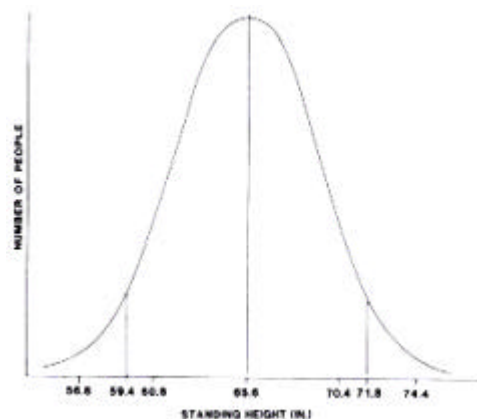


Fig. 2.3. - Curva di distribuzione dell'altezza in posizione eretta della popolazione americana.

E' necessario ricavare la curva di distribuzione relativa ad ogni misura antropometrica per definire il percentile, grandezza statistica molto usata sia dagli antropologi sia dai progettisti e dagli ingegneri. Esso rappresenta quel valore di una certa misura, che non viene superato da una fissata percentuale della popolazione. Ad esempio il 90° percentile dell'altezza in posizione eretta del popolo americano (figg. 2.3, 2.4) è 70.4 inc.; ciò vuol dire che il 90% della popolazione ha l'altezza in posizione eretta minore o uguale a 70.4 inc. [24].

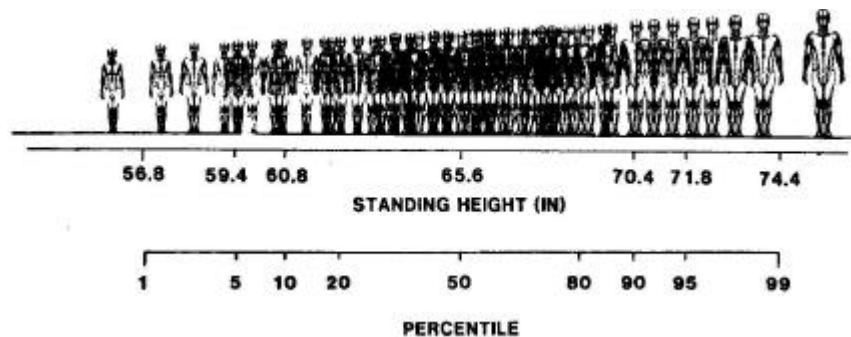


Fig. 2.4. - Figura rappresentativa di un campione di 100 persone, ordinate secondo la statura.

II.2.2 Misure antropometriche *task oriented*.

Le misure antropometriche *task oriented* sono rilevate mentre il corpo umano compie specifici compiti, da seduto, all'interno dell'abitacolo del veicolo. Esse sono definite da curve e superfici ottenute per inviluppo di punti rappresentativi delle posizioni assunte nello spazio da alcune parti del corpo, durante lo svolgimento di specifici compiti. Tali curve (fig. 2.5) sono posizionate relativamente ad alcuni punti di riferimento (*landmarks*) del corpo umano (fig. 2.6) quali: *Hip pivot Point (H-Point* - cardine anca), *Ball Of Foot (BOF* - punto di contatto piede acceleratore), *Accelerator Heel Point (AHP*, punto di contatto tra il tacco del piede posizionato sull'acceleratore e il pavimento) [25].

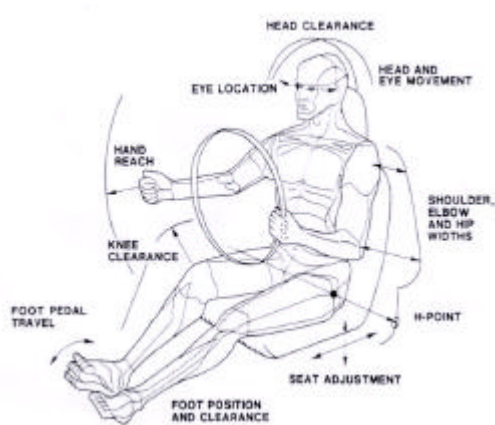


Fig. 2.5. – Misure antropometriche *task oriented*.

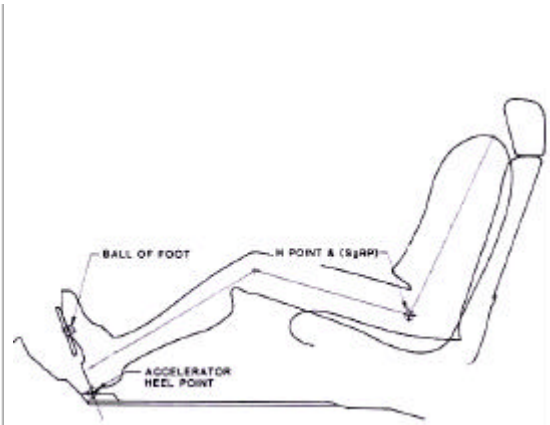


Fig. 2.6. – Punti di riferimento del corpo umano.

Queste curve permettono di valutare :

- la posizione dell'occhio destro e sinistro;
- la posizione della testa;
- la posizione del sedile;
- la zona accessibile da ciascuna mano;
- lo spazio libero per le ginocchia;
- la larghezza delle spalle, delle braccia e dell'anca.

Per il modo in cui vengono ricavate, le misure antropometriche *task oriented* non possono essere dedotte dalle misure antropometriche convenzionali; queste ultime, infatti, sono ottenute, come già detto precedentemente, utilizzando come supporto una struttura rigida la quale è molto differente dal sedile di un veicolo. Ad esempio, la lunghezza totale del braccio (*reach*) non è correlata con l'effettiva zona raggiungibile dalla mano del soggetto seduto all'interno dell'abitacolo (*hand reach*), essendo essa influenzata da fattori come la posizione e la deflessione del sedile, l'articolazione della spalla e la cintura di sicurezza.

Le misure antropometriche statiche convenzionali vengono utilizzate per effettuare studi statistici sulle dimensioni delle varie parti del corpo umano e,

principalmente, per selezionare al meglio un campione rappresentativo della popolazione utente. Tale campione, costituito generalmente da un centinaio di soggetti, viene poi sottoposto a specifici test, condotti in strutture che riproducono l'abitacolo del veicolo (*seating buck*, fig. 2.7), per ottenere le misure antropometriche *task oriented*.

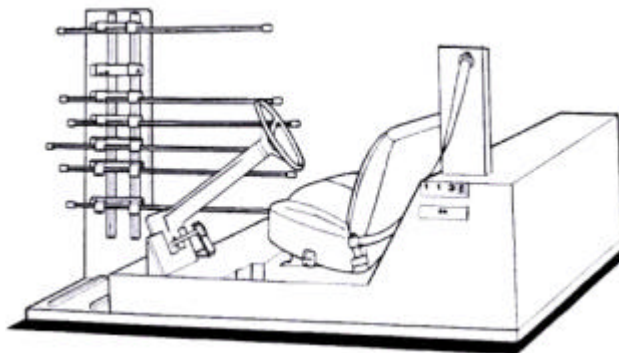


Fig. 2.7. – Seating buck.

Un esempio è lo studio eseguito dalla *Society of Automotive Engineers* (SAE) per valutare l'accessibilità della mano ai comandi. Sono stati valutati vari punti raggiunti dal dito medio della mano del conducente, a sinistra, destra e sopra lo sterzo, ottenendo la superficie mostrata in figura 2.8 [26].

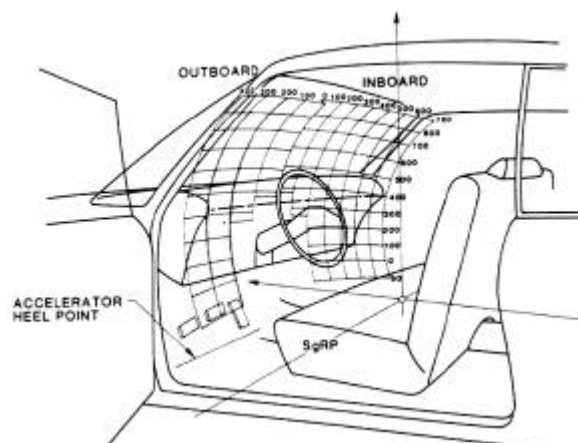


Fig. 2.8. – Superficie di raggiungibilità della mano secondo la norma SAE J287.

Stesso discorso è stato fatto per rilevare la posizione del sedile, degli occhi e della testa. In questo modo sono state ottenute dalle SAE tutte le misure antropometriche *task oriented* e le posizioni dei punti di riferimento del corpo (BOF, AHP, HPoint). Esse sono definite nelle seguenti normative SAE (fig. 2.9):

- SAE J941, *Driver's Eye Range* [27];
- SAE J1517, *Selected Seat Position* [28];
- SAE J1052, *Driver and Passenger Head Position* [29];
- SAE J287, *Driver Hand Control Reach* [30];
- SAE J826, *Devices for Use in Defining and Measuring Vehicle Seating Accommodation* [31];
- SAE J1516, *Accommodation Tool Reference Point* [32].

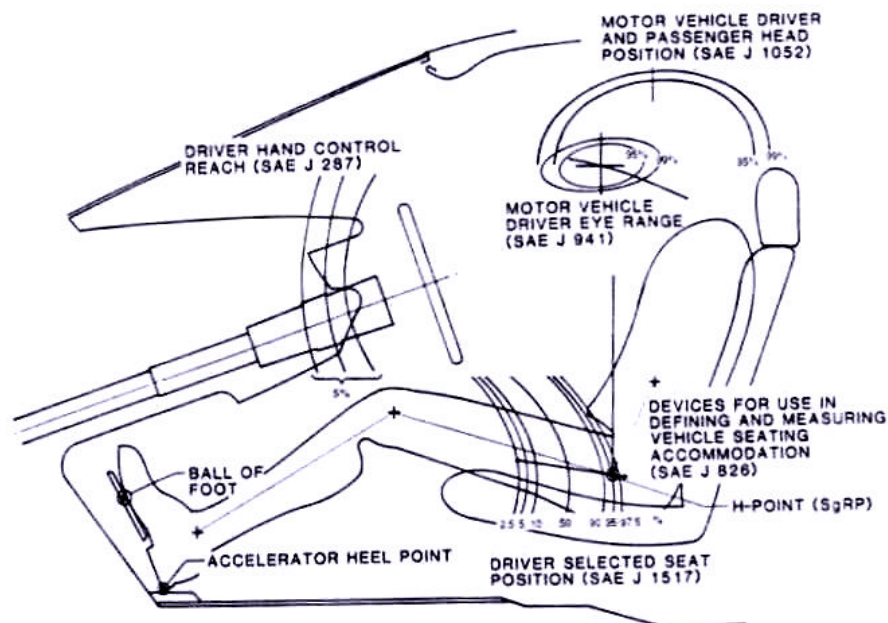


Fig. 2.9. – Curve e posizioni *task oriented* definite nelle Normative SAE.

Tali curve sono riferite a differenti percentili; esse delimitano zone all'interno delle quali sono contenute le varie parti del corpo per una percentuale della popolazione pari al percentile. Ad esempio, la curva del 95° percentile riferita alla

posizione della testa, indica che il 95% della popolazione ha il punto superiore della testa (*top*) all'interno dell'area che ha come contorno tale curva.

Le misure antropometriche possono essere ottenute anche in un altro modo, e cioè utilizzando manichini con statura pari ad un prefissato percentile. Questi vengono posizionati nel *seating buck* e quindi valutate tutte le misure. Ad esempio, per ottenere la superficie di raggiungibilità della mano relativa al 95% della popolazione, viene utilizzato un manichino con statura pari al quinto percentile femminile (femminile perché “generalmente” le dimensioni sono minori di quelle maschili). Sebbene questa procedura sia più veloce della precedente, essa presenta degli inconvenienti di seguito elencati:

- Non è detto che un manichino selezionato in base alla statura del quinto percentile femminile, abbia la lunghezza totale del braccio dello stesso percentile. Di conseguenza la superficie di raggiungibilità valutata non è esatta.
- Poiché la popolazione utente è costituita da maschi e femmine (i progettisti considerano un rapporto di 1:1) è limitativo e non corretto utilizzare un manichino con statura pari ad un prefissato percentile maschile o femminile.
- E' difficile posizionare correttamente un manichino all'interno del *seating buck*. La posizione, infatti, è influenzata dalla postura del soggetto e dalla deflessione del sedile; inoltre le persone tendono ad essere molto più adattabili e flessibili dei manichini [19].

Si può notare, quindi, che utilizzando questo secondo metodo, si giunge a risultati abbastanza approssimati; per tale motivo esso è stato scartato dalla SAE la quale ha utilizzato l'approccio statistico descritto precedentemente.

II.3 FATTORI CHE INFLUENZANO LA POSTURA DI GUIDA.

Studi empirici condotti sui modelli del comportamento umano hanno mostrato che il processo di selezione della postura all'interno dell'autoveicolo è un processo inconscio principalmente influenzato dalle caratteristiche geometriche dell'abitacolo, che, nell'insieme, costituiscono un set di vincoli cinematici da rispettare. Tali vincoli possono essere suddivisi in categorie, ognuna delle quali riguardante un singolo aspetto del processo. Il guidatore deve eseguire, infatti, contemporaneamente, ciascuna delle seguenti operazioni:

- controllo della velocità;
- aggiramento degli ostacoli;
- navigazione.

Le precedenti restrizioni portano alla definizione di particolari esigenze di carattere fisico che vanno ad influenzare la postura e che riguardano i punti sottoelencati:

- visione della realtà esterna;
- manipolazione dello sterzo e dei pedali;
- visione del display interno;
- manipolazione del cambio e degli altri comandi manuali.

Le prime tre limitazioni, essendo presenti durante tutto il periodo di guida, sono di primaria importanza, cosicché la postura deve essere cinematicamente compatibile con la visione esterna, col raggiungimento delle mani allo sterzo e dei piedi ai pedali.

La figura seguente descrive in dettaglio il processo di selezione della postura di guida.

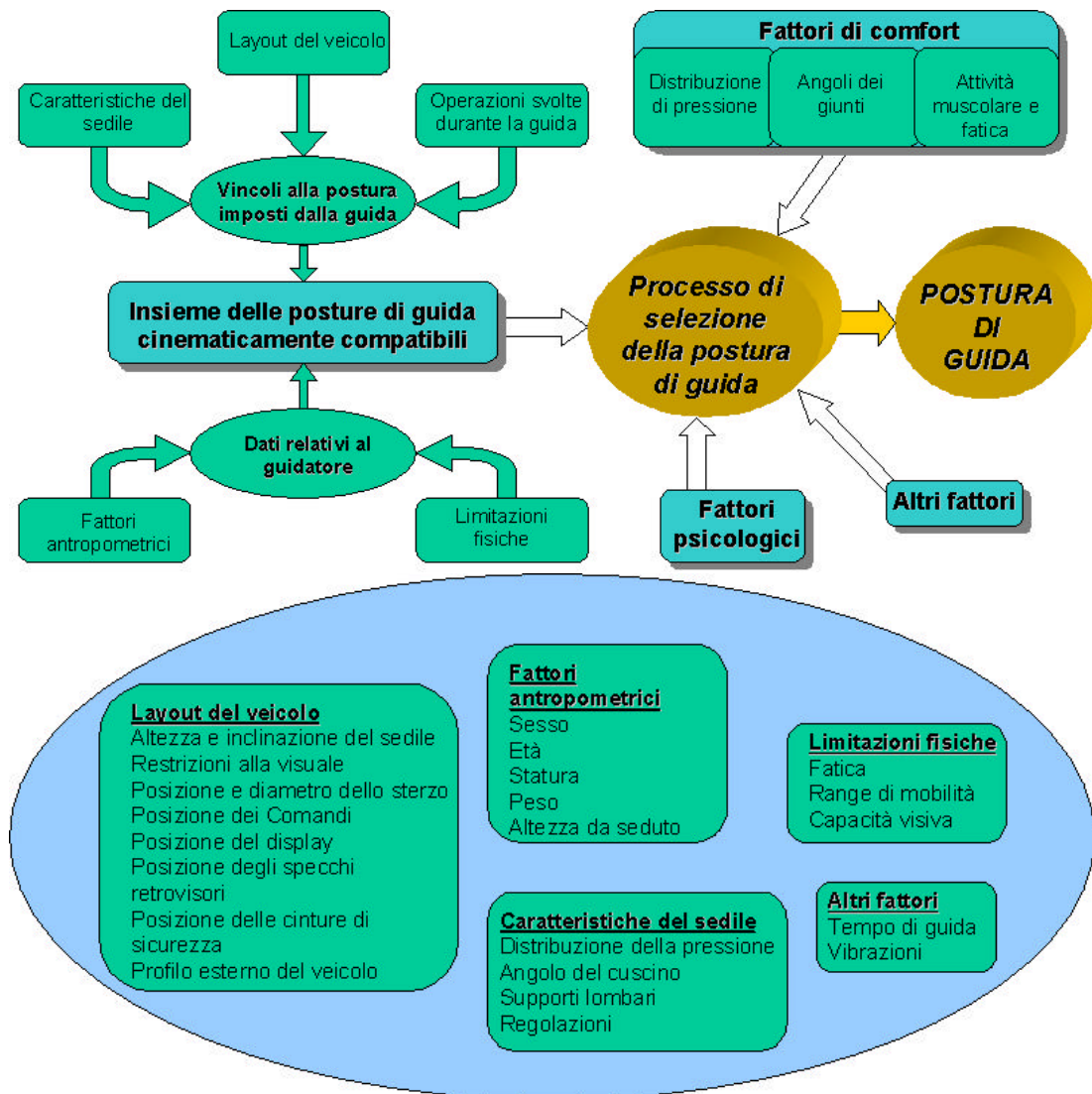


Fig.2.10. – Schematizzazione del processo di selezione della postura di guida.

La configurazione dell'interno del veicolo, comprendente la disposizione dei comandi principali e secondari, la forma del sedile e le regolazioni permesse al guidatore, rappresenta un set di vincoli cinematici che, interagendo con le caratteristiche antropometriche e le limitazioni fisiche del conducente, permettono di determinare l'insieme delle possibili posture di guida. Per le persone di statura piccola, ad esempio, la posizione del piede sui pedali, combinata con una esigua lunghezza degli arti, potrebbe richiedere una posizione più avanzata del sedile tenendo ben presente che i possibili valori dell'inclinazione del torso, sono

fortemente limitati dai vincoli imposti dalla vista frontale. Per le persone di notevole statura, invece, le maggiori restrizioni riguardano la corsa del sedile che va ad influenzare sia la posizione longitudinale dell'anca che l'orientamento della testa; mentre per le persone di corporatura media l'insieme delle possibili configurazioni è, generalmente, maggiore.

Inizialmente le attività di ricerca sulla progettazione ergonomica in campo automobilistico erano tese a migliorare il comfort, piuttosto che predire come le persone si andavano a posizionare all'interno di un particolare veicolo.

Tra i fattori indicati in figura 2.10. quelli relativi alla geometria del veicolo hanno sempre ricevuto una maggiore attenzione da parte dei ricercatori. *Schneider* nel 1979 [33] ha identificato nella posizione dello sterzo e nell'altezza del sedile i fattori principali nella scelta della postura di guida. *Philipart* nel 1985 [34] ha corretto il precedente modello sostenendo l'importanza della posizione della testa al pari della posizione dello sterzo e dell'altezza del sedile. Recentemente *Flannagan* [35] ha presentato un più complesso modello di posizionamento del guidatore che dipende dall'altezza del sedile, dal tipo di trasmissione, dall'angolo del cuscino, e dalla posizione longitudinale dello sterzo, avendo notato che ciascuno di questi parametri ha effetti statisticamente significativi ma indipendenti. Di particolare interesse sono gli studi condotti dal Professor *Reed* [36] presso l'UMTRI, condotti nell'ambito del programma di ricerca *Automotive Seat and Package Evaluation and Comparison Tool* (ASPECT), finalizzati principalmente all'analisi degli effetti sull'intera postura delle tre variabili che influenzano maggiormente la posizione di guida: altezza del sedile, posizione dello sterzo e angolo del cuscino del sedile. Da tali studi è emerso che:

- L'altezza del sedile, la posizione dello sterzo e l'angolo del cuscino del sedile hanno ciascuno effetti importanti, ma indipendenti, sulla postura e non sono condizionati dalle dimensioni del corpo, dalle proporzioni e dal sesso.
- La statura è il principale fattore che influenza la posizione del corpo del guidatore lungo l'asse longitudinale del veicolo. La collocazione del centro anca è influenzata anche dalla posizione dello sterzo, dall'altezza e dall'angolo del sedile.
- Il rapporto tra altezza da seduto e statura è un importante fattore per calcolare l'inclinazione totale del busto ed il valore dell'angolo del gomito.
- Gli angoli del gomito e del ginocchio, fattori decisivi per la postura degli arti, sono fortemente influenzati dall'altezza del sedile e dalla posizione dello sterzo.
- L'angolo del cuscino ha un effetto significativo sia sulla flessione lombare sia sull'intera flessione del busto.
- La postura scelta sarà quella che assicura il pieno rispetto dei vincoli, che prevede una posizione degli occhi elevata rispetto all'anca e che può essere ottenuta con un basso affaticamento dei muscoli della schiena.

II.4 METODOLOGIA SAE PER L'ANALISI ERGONOMICA DELLA POSTAZIONE DI GUIDA

I dati antropometrici *task oriented* sono rappresentati, come già detto, da curve e superfici opportunamente posizionate rispetto ad alcuni punti di riferimento del corpo umano. In questo paragrafo si descrivono dettagliatamente tali curve e superfici e il loro corretto posizionamento in funzione dei valori dei dati di input necessari allo sviluppo dell'*occupant envelope*. Utilizzando, infatti, le normative

SAE *Driver's Eye Range* (SAE J941) [27], *Selected Seat Position* (SAE J1517) [28], *Driver and Passenger Head Position* (SAE J1052) [29], *Driver Hand Control Reach* (SAE J287) [30] (in cui sono descritte le curve e superfici *task oriented*), in accordo con le SAE *Accommodation Tool Reference Point* (SAE J1516) [37], *Devices For Use in Defining and Measuring Vehicle Seating Accommodation* (SAE J826) [31], *Vehicle Dimensioning Procedures* (SAE J1100) [25], *Motor Vehicle Fiducial Marks and Three Dimensional Reference System* (SAE J182) [38] (nelle quali sono definiti i punti di riferimento e le dimensioni caratteristiche dell'abitacolo) è possibile sviluppare correttamente la postazione di guida idonea ad una prefissata percentuale della popolazione utente.

II.4.1 Sistema di riferimento globale

Prima di descrivere in modo dettagliato le curve *task oriented*, è opportuno definire il sistema di riferimento globale del veicolo per determinare univocamente la posizione dei punti e dei piani caratteristici della postazione di guida [25]. I tre piani di riferimento sono (fig.2.11):

- *piano Y*: è il piano verticale che passa attraverso l'asse centrale longitudinale del veicolo;
- *piano X*: è il piano verticale normale al piano Y;
- *piano Z*: è il piano orizzontale ortogonale ai piani X e Y.

Il punto di intersezione dei tre piani, e cioè l'origine del sistema di riferimento, può essere posto in un qualsiasi punto, ben identificabile, del piano Y; è lasciata, quindi, al costruttore la scelta dell'origine del sistema. Gli assi di riferimento X,Y,Z sono orientati come in figura 2.11.

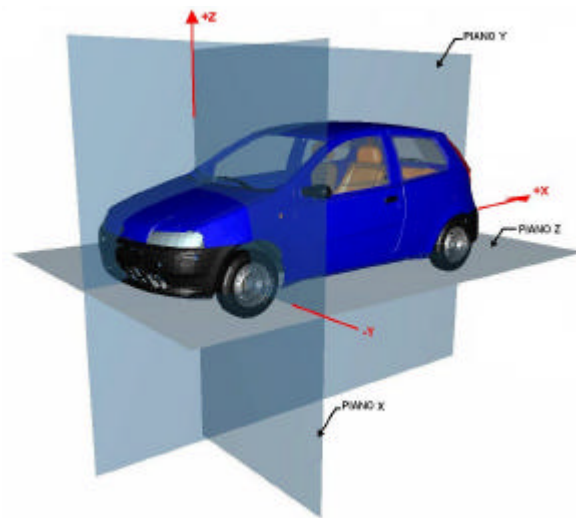


Fig. 2.11. – Sistema di riferimento globale.

II.4.2 Punti, piani e dimensioni caratteristiche della postazione di guida

La normativa SAE J1100 [25] definisce tutte le entità necessarie allo sviluppo della postazione di guida, suddividendole in punti, piani e dimensioni.

- **Punti e piani:**

- *Hip pivot Point (H-Point)*: è il punto intrinseco al sedile che corrisponde al punto di posizionamento del centro dell'anca del corpo umano quando questo è seduto correttamente sul sedile. Con questo termine si indica anche il centro dell'anca (fig. 2.12).
- *Seating Reference Point (SgRP)*: è il punto fisso dell'abitacolo (fig. 2.13) in cui i costruttori posizionano l'H-Point del sedile e del manichino bidimensionale o tridimensionale al fine di valutare le dimensioni caratteristiche interne dell'abitacolo e la postura assunta dall'occupante.



Fig. 2.12. - H-Point.

L'SgRP è il punto più arretrato della corsa sedile ed è situato su una delle curve della *Driver Selected Seat Position* (solitamente quella relativa al 95° percentile) [28]. Le sue coordinate (x,y,z) relative al sistema di riferimento globale sono indicate, rispettivamente, con L31, W20, H30.



Fig. 2.13. - SgRP

- *Centerline of Occupant Plane (C\LO Plane)*: è il piano parallelo al piano longitudinale del veicolo (Y) passante per il centro anca dell'occupante (l'H-point) (fig. 2.14) [38].

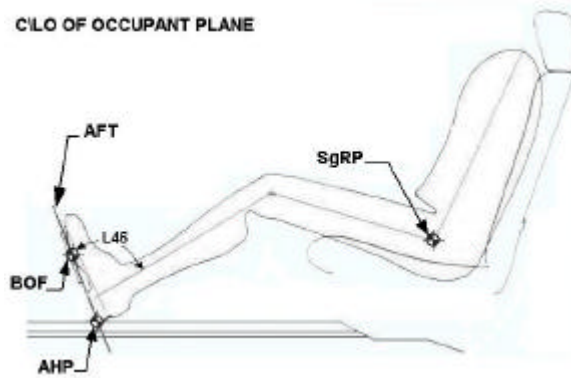


Fig. 2.14. - Punti e piani caratteristici della postazione di guida.

- *Accelerator Heel Point (AHP)*: è il punto di intersezione tra il tallone del manichino bidimensionale, con la scarpa posizionata sull'acceleratore, e il pavimento (fig. 2.14) [24]. Il manichino ha l' H-Point nell' SgRP e l'angolo del piede (*foot angle*) (L46) non inferiore a 87° . L'AHP appartiene al C\LO Plane.
- *Ball of Foot (BOF)*: è il punto posizionato a 203mm dall'AHP sulla retta tangente al fondo della scarpa del manichino bidimensionale e appartenente al piano longitudinale del veicolo (Y) (fig. 2.14) [25]. Il BOF appartiene al C\LO Plane.
- *Accelerator Foot Plane (AFT)*: è il piano passante per il BOF e l'AHP e perpendicolare al piano longitudinale del veicolo (Y) (fig. 2.14) [38].
- **Dimensioni**: sono utilizzati gli indici L,W,H per indicare rispettivamente lunghezze, larghezze e altezze (fig. 2.15).
 - *Horizontal H-Point Travel (TL23)*: è lo spostamento orizzontale che può subire il sedile e quindi l'H-point.
 - *Vertical H-Point Rise (TH23)*: è lo spostamento verticale che può subire il sedile e quindi l'H-point.

- *Steering Wheels Diameter (W9)*: è il diametro del volante.
- *Back Angle (L40)*: è l'angolo compreso tra la linea torso del manichino 2D e la linea verticale condotta dall'SgRP.
- *Accelerator Foot Plane Angle (?)*: è l'angolo formato dall' *Accelerator Foot plane* e il piano orizzontale costituito dal pavimento.
- *Steering Wheels Angle (H18)*: è l'angolo compreso tra il piano verticale, passante per il centro dello sterzo, e il piano dello sterzo.
- *Horizontal Steering Wheel Center (L11)*: è la distanza orizzontale tra l'AHP e il punto di intersezione tra la linea centrale relativa alla colonna dello sterzo e il piano contenente la superficie superiore dello sterzo.
- *Vertical Steering Wheel Center (H17)*: è la distanza orizzontale tra l'AHP e il punto di intersezione tra la linea centrale relativa alla colonna dello sterzo e il piano contenente la superficie superiore dello sterzo.
- *SgRP to Heel (L53)*: è la distanza orizzontale tra l'SgRP e l'AHP.
- *Hip angle (L42)*: è l'angolo formato tra la linea torso e il centrolinea coscia.

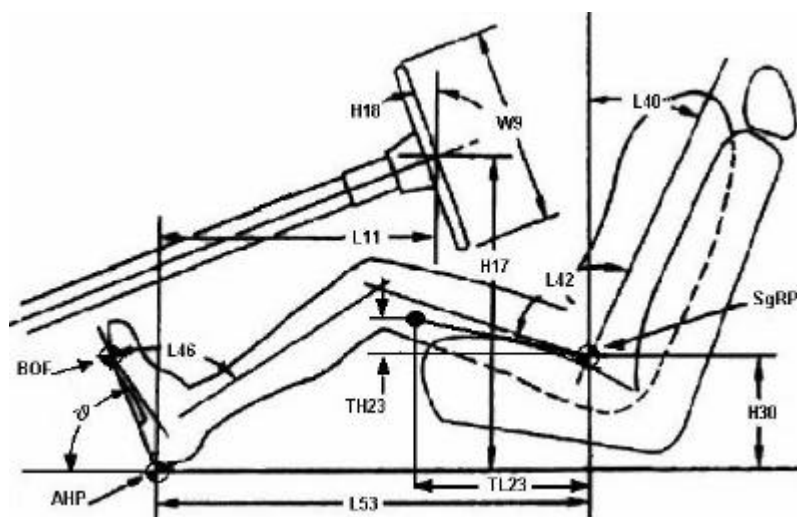


Fig. 2.15. - Dimensioni caratteristiche della postazione di guida.

In base ai valori assunti da alcune delle dimensioni precedentemente definite, la SAE divide i veicoli in:

Veicoli di Classe A: sono i veicoli che hanno le dimensioni comprese negli intervalli indicati in tabella 2.1.

Sigla SAE	Nome dimensione	Valore Minimo	Valore Massimo
H30	<i>H-Point Height</i>	127mm	405mm
TH23	<i>Vertical H-Point Rise</i>	0.0mm	50mm
TL23	<i>Horizontal H-point Travel</i>	100mm	n.d.
W9	<i>Steering Wheel Diameter</i>	n.d.	450mm
L40	<i>Back Angle</i>	5°	40°

Tab. 2.1 – Intervalli entro i quali sono contenute le dimensioni dei veicoli di Classe A.

Fanno parte di questa categoria: autoveicoli per passeggeri (*passenger car*), furgoni (*vans*), veicoli per passeggeri destinati a più scopi (*multipurpose passenger vehicles - MPV*).

Veicoli di Classe B: sono i veicoli che hanno le dimensioni comprese negli intervalli indicati in tabella 2.2.

Sigla SAE	Nome dimensione	Valore Minimo	Valore Massimo
H30	<i>H-Point Height</i>	405mm	530mm
TH23	<i>Vertical H-Point Rise</i>	0.0mm	0.0mm
TL23	<i>Horizontal H-point Travel</i>	100mm	n.d.
W9	<i>Steering Wheel Diameter</i>	450mm	560mm
L40	<i>Back Angle</i>	11°	18°

Tab. 2.2 – Intervalli entro i quali sono contenute le dimensioni dei veicoli di Classe B.

Fanno parte di questa categoria: autocarri pesanti (*heavy trucks*), autocarri di servizio (*duty trucks*) e bus.

II.4.3 Determinazione dell' AHP e del BOF [37]

I principali dati di input nello sviluppo della postazione di guida sono: *H-point height* (H30), numero di passeggeri e l'uso per cui viene progettato il veicolo. L'H30 dipende da tipo di macchina da realizzare; ad esempio in una macchina sportiva l'altezza del sedile dalla linea di terra (e di conseguenza l'H30) è notevolmente inferiore alle altre macchine per mantenere una ristretta area frontale ed un basso centro di gravità al fine di ottenere una buona aerodinamica e una migliore tenuta di strada. Gli ingegneri del *packaging* sviluppano l'architettura di un veicolo partendo lateralmente dalla linea di terra [38] (fig. 2.16). L'altezza da terra del fondo del pavimento si determina sommando la distanza del fondo del veicolo dalla linea di terra (*ground clearance*) allo spessore del fondo del veicolo (che comprende struttura, strato isolante e tappeto). Una volta definita la posizione del pavimento viene determinata, rispetto a questo, l'*H-point height* (H30).

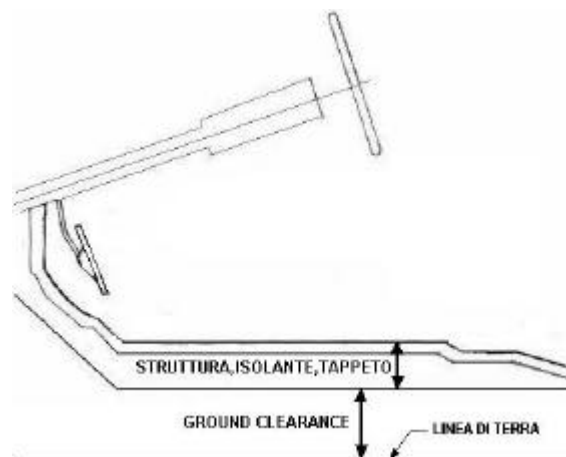


Fig. 2.16. - Distanza pavimento linea di terra.

La posizione del BOF e dell'AHP è funzione dell'H30. Per determinare tali punti, infatti, bisogna conoscere il valore dell'*accelerator foot plane angle* (?), il quale è ottenuto dall'equazione:

$$\theta = 78.96 - 0.15z - 0.0173z^2 \quad (2.1)$$

dove z è l' altezza H30 in cm mentre θ è espresso in gradi.

Questa è stata ricavata utilizzando un manichino bidimensionale avente la lunghezza delle gambe uguale al 95° percentile, l'angolo del piede (*foot angle*) pari ad 87° e l'H-point posizionato lungo la curva *Selected Seat Position* del 95° percentile [28]. In particolare è stato misurato l'angolo θ compreso tra il fondo della scarpa del manichino ed il piano orizzontale, per diverse posizioni dell'H-point lungo tale curva (fig. 2.17); dall'analisi dei vari valori ottenuti si è giunti alla definizione dell'equazione precedente.

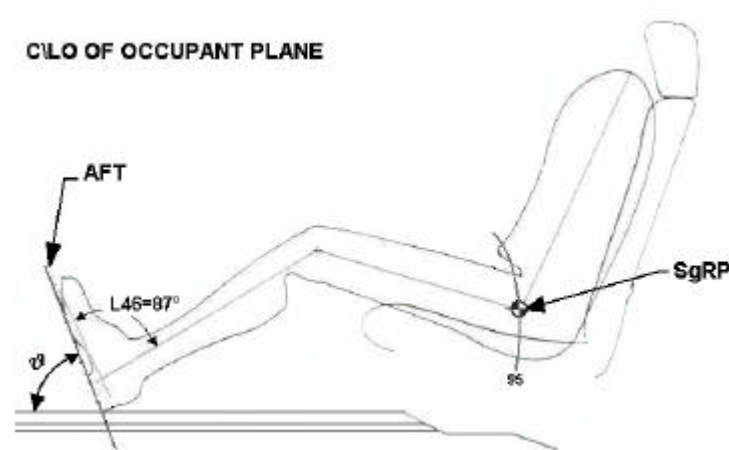


Fig. 2.17. - Valutazione dell'angolo θ .

Si hanno due differenti procedure per individuare il BOF e l'AHP in relazione alla tipologia di pedale acceleratore utilizzata: *pedale acceleratore sospeso* (fig. 2.18) o *fulcrato sul pavimento* (fig. 2.19).

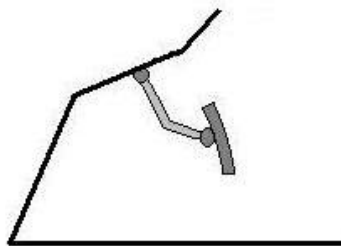


Fig. 2.18. - Pedale acceleratore sospeso.

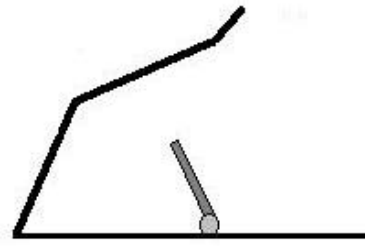


Fig. 2.19. - Pedale acceleratore fulcrato sul pavimento

II.4.3.1 Procedura relativa al pedale acceleratore sospeso

Dopo aver calcolato il valore dell'angolo θ dall'equazione 2.1 in funzione della predefinita altezza H30 si costruisce un triangolo rettangolo avente l'ipotenusa pari a 203mm (distanza tra il BOF e l'AHP) e l'angolo compreso tra l'ipotenusa e il cateto orizzontale pari a θ (fig. 2.20).

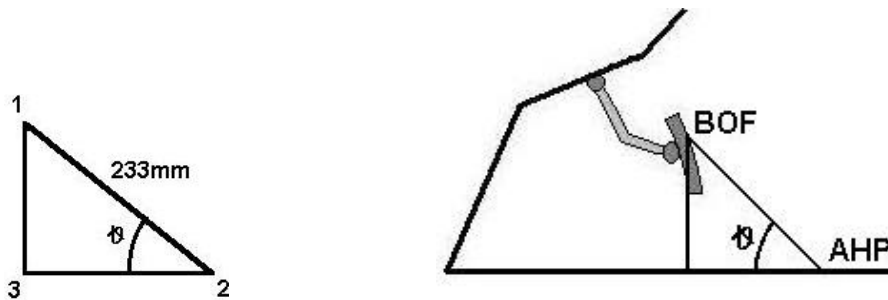


Fig. 2.20. – Costruzione del BOF e dell'AHP relativamente al pedale acceleratore sospeso.

Quindi si posiziona il triangolo in modo tale che l'ipotenusa sia tangente al pedale acceleratore nel vertice 1 (se ciò non accade è necessario regolare il pedale finché non si ottiene la configurazione precedentemente descritta). La posizione del vertice 1 e quella del vertice 2 rappresentano rispettivamente il BOF e l'AHP.

II.4.3.2 Procedura relativa al pedale acceleratore fulcrato sul pavimento

Dopo aver calcolato il valore dell'angolo θ dall'equazione 2.1 in funzione della predefinita altezza H30 si costruisce, analogamente alla precedente procedura, un triangolo rettangolo avente l'ipotenusa pari a 203mm (distanza tra il BOF e l'AHP) e l'angolo compreso tra l'ipotenusa e il cateto orizzontale pari a θ . Quindi si posiziona il triangolo con l'ipotenusa tangente al pedale acceleratore. Si hanno due differenti configurazioni:

- angolo θ è maggiore dell'angolo compreso tra la superficie del pedale e il piano orizzontale (fig. 2.21).



Fig. 2.21. – Costruzione del BOF e dell'AHP relativamente al pedale acceleratore fulcrato sul pavimento nel caso in cui θ è maggiore dell'angolo compreso tra la superficie del pedale e il piano orizzontale

Il punto di tangenza risulta il vertice 2. Bisogna allora ruotare l'ipotenusa intorno a quest'ultimo in modo tale da avere il vertice 1 sul piano del pedale. La posizione del vertice 1 e quella del vertice 2 rappresentano rispettivamente il BOF e l'AHP (fig. 2.21).

➤ Angolo θ minore dell'angolo compreso tra la superficie del pedale e il piano orizzontale (fig. 2.22).

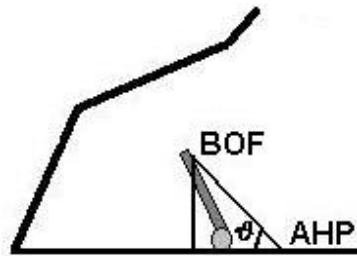


Fig. 2.22. - Costruzione del BOF e dell'AHP relativamente al pedale acceleratore fulcrato sul pavimento nel caso in cui θ è minore dell'angolo compreso tra la superficie del pedale e il piano orizzontale.

In tal caso il punto di tangenza è il vertice 1. La posizione del vertice 1 e quella del vertice 2 rappresentano rispettivamente il BOF e l'AHP.

II.4.4 Determinazione dell'SgRP e della corsa orizzontale del sedile (TL23)

[28]

In uno studio condotto dalla SAE (analizzando un campione rappresentativo della popolazione utente costituito da un rapporto maschi:femmine di 1:1) sono state

valutate le posizioni assunte dal sedile in 40 differenti abitacoli relativi ad un range di veicoli che va dalle macchine sportive (con altezza dell'H-point da 145 a 180 mm) ai furgoni (con altezza dell'H-point da 300 a 405mm). Si è giunti così alla definizione di una serie di curve di secondo grado, denominate *Driver Selected Seat Position*, che permettono di individuare la posizione in cui i guidatori fissano il sedile in differenti abitacoli. In particolare esse descrivono la distanza orizzontale dell'H-Point dal BOF in funzione del prefissato valore dell'H30. Tali curve sono utilizzate per individuare la posizione dell'SgRP e la corsa orizzontale del sedile (TL23) necessaria ad accomodare una fissata percentuale di conducenti. Nel caso in cui sia già assegnata la lunghezza della corsa orizzontale del sedile, le curve *Driver Selected Seat Position* possono essere utilizzate come strumento di verifica per individuare la percentuale di guidatori accomodabili.

II.4.4.1 Descrizione matematica delle curve

Le curve sono descritte in un sistema di riferimento avente per asse delle ascisse l'asse orizzontale X passante per l'AHP e per asse delle ordinate l'asse verticale Z passante per il BOF [32] (fig. 2.23).

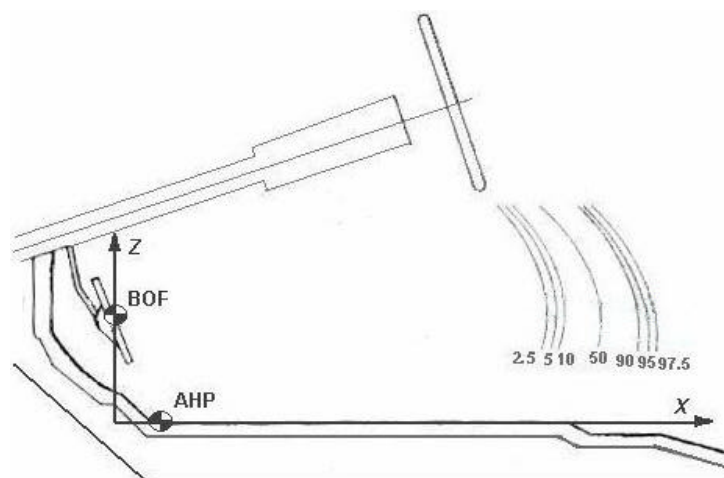


Fig. 2.23. – Le curve *Driver Selected Seat Position*.

Le equazioni sono:

$$\begin{aligned}
 x_{97.5} &= 936.6 + 0.613879 z - 0.00186247 z^2 \\
 x_{95} &= 913.7 + 0.672316 z - 0.00195530 z^2 \\
 x_{90} &= 885.0 + 0.735374 z - 0.00201650 z^2 \\
 x_{50} &= 793.7 + 0.903387 z - 0.00225518 z^2 \\
 x_{10} &= 715.9 + 0.968793 z - 0.00228674 z^2 \\
 x_5 &= 692.6 + 0.981427 z - 0.00226230 z^2 \\
 x_{2.5} &= 687.1 + 0.895336 z - 0.00210494 z^2
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

dove:

x_i è la distanza in mm dal BOF dell'H-point relativo all' i -esimo percentile

z è l'altezza in mm dell'H-point (H30).

La curva dell' i -esimo percentile è la curva all'interno della quale sono contenuti l' i % degli H-point relativi alla popolazione utente (spesso, erroneamente, la curva dell' i -esimo percentile è definita come la curva lungo la quale si posiziona l' i % della popolazione utente).

II.4.4.2 Posizione dell'SgRP

La posizione dell'SgRP dipende dal valore assunto dall'H30. Una volta individuati l' AHP ed il BOF risulta determinato il sistema di riferimento rispetto al quale sono posizionate le curve *Driver Selected Seat Position*.

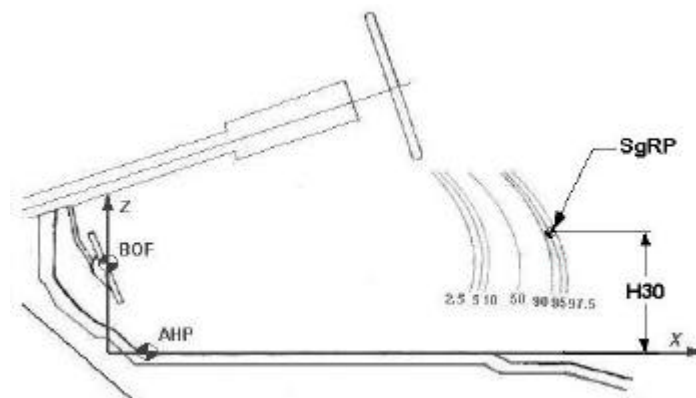


Fig. 2.24. - Posizione dell'SgRP.

Tracciando una retta parallela all'asse X, distante da esso H30, è possibile determinare l'SgRP come il punto di intersezione tra tale retta e la curva del 95° percentile (fig. 2.24).

II.4.4.3 Corsa orizzontale del sedile

Il sedile viene reso mobile orizzontalmente per accogliere utenti di differente statura. E' necessario allora valutare la corsa e la posizione delle guide sedile in funzione della percentuale di popolazione che deve essere accomodata. Diagrammando la distanza x dell'H-point dal BOF, ad una prefissata altezza H30, in funzione del percentile, si ottiene una curva simile alla sottostante (fig. 2.25), ottenuta ponendo $H30 = 243\text{mm}$.

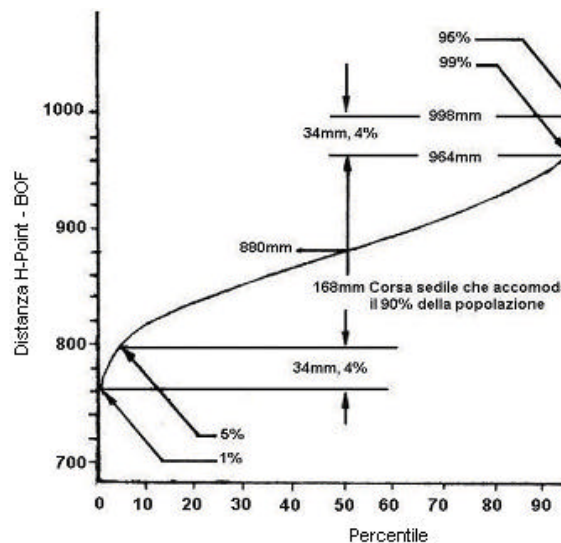


Fig. 2.25. - Diagramma per la valutazione della corsa sedile e della posizione delle slitte.

Tale curva è composta da un tratto centrale rettilineo e da due tratti, iniziale e finale, curvilinei fortemente crescenti con concavità rivolta rispettivamente verso il basso e verso l'alto. Da essa si ricava che posizionando il centro della guida in $x_{50} = 880\text{mm}$ ed utilizzando una corsa di 168mm può essere accomodato il 90% della popolazione utente. Se si posiziona il centro della guida ad una distanza dal BOF

diversa da x_{50} , per accomodare la stessa percentuale di popolazione c'è bisogno di una corsa maggiore di 168mm. Quindi, indipendentemente dal valore dell' H_{30} , fissata la percentuale di popolazione da accomodare, la corsa minima si ottiene posizionando il centro della guida ad una distanza dal BOF pari all' x_{50} . Si può ancora notare che per accomodare il 98% della popolazione c'è bisogno di un incremento di corsa, rispetto a quella relativa al 90%, di 68mm (34mm ad ogni estremo) pari al 40%; ciò è dovuto all'andamento fortemente crescente dei tratti iniziale e finale della curva [39].

II.4.5 Raggiungibilità della mano [30]

E' importante valutare le superfici di raggiungibilità della mano del guidatore, per posizionare correttamente i comandi all'interno dell'abitacolo. La SAE definisce un insieme di tabelle in cui sono date le coordinate dei punti raggiungibili dal 95% della popolazione rispetto ad un particolare sistema di riferimento descritto in seguito. Dall'involuppo di questi punti si ottiene la superficie tridimensionale (fig. 2.26) che delimita la zona accessibile al 95% dei conducenti per una prefissata geometria dell'abitacolo.

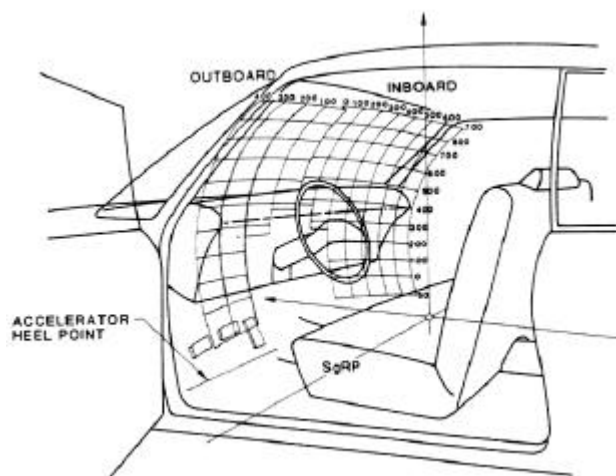


Fig. 2.26. – Superficie di raggiungibilità.

I valori in tabella sono stati ottenuti analizzando un campione rappresentativo della popolazione utente con rapporto maschio femmina di 1:1 in differenti configurazioni del *seating buck*, riproducenti gli abitacoli delle vetture con guida a sinistra, con e senza l'utilizzo della cintura di sicurezza. Ogni persona esaminata era posizionata in assetto di guida, con il piede destro sull'acceleratore e una mano sullo sterzo [40]. Manovrando con tre dita della mano un pomello di diametro 25mm (fig. 2.27) e rilevando le coordinate del centro del pomello sono stati determinati i punti raggiungibili con impugnatura a tre dita (*three-finger grasping*).

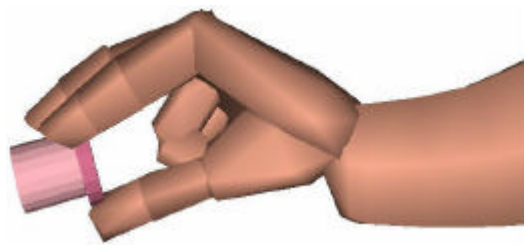


Fig. 2.27. – Impugnatura a tre dita.

Analogamente sono state ricavate le zone raggiungibili sia dal dito indice in posizione estesa (*extended finger*) (fig. 2.28) sia dal centro della superficie esterna del pomello mantenuto con pugno chiuso (*full hand grasped*) (fig. 2.29).

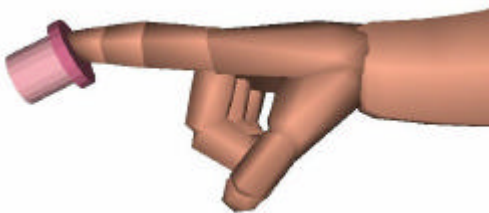


Fig. 2.28. – Dito indice esteso

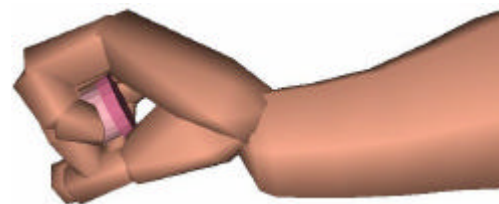


Fig. 2.29. – Impugnatura a pugno chiuso.

Le tre superfici così ottenute sono mostrate nella figura 2.30 [41].

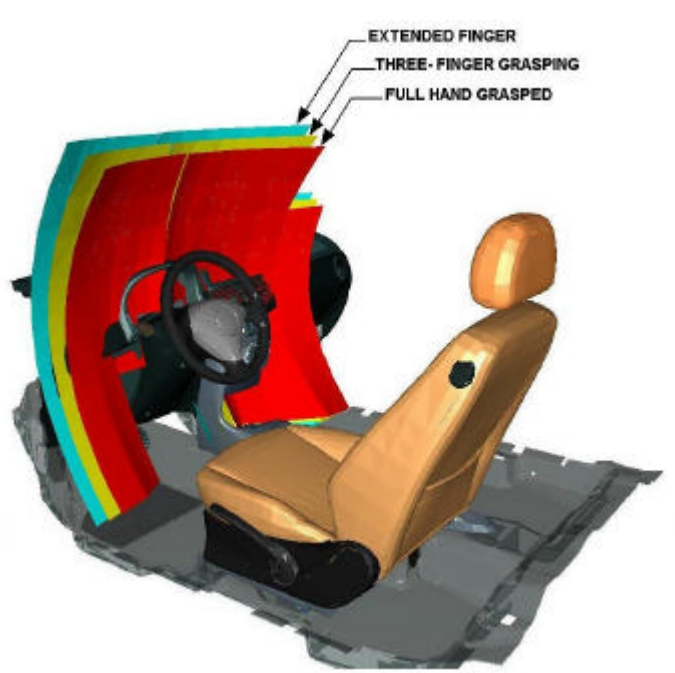


Fig. 2.30. – Superfici di raggiungibilità.

Questa superfici sono valide per veicoli aventi le dimensioni contenute nei seguenti intervalli:

Sigla SAE	Nome dimensione	Valore Minimo	Valore Massimo
H30	<i>H-point Height</i>	130mm	520mm
L40	<i>Back Angle</i>	9.0°	33.0°
TL23	<i>Horizontal H-point Travel</i>	130mm	n.d
W9	<i>Steering Wheel Diameter</i>	330mm	600mm
H18	<i>Steering Wheel Angle</i>	10.0°	70.0°
L11	<i>Horizontal Steering Wheel Center</i>	152mm	660mm
H17	<i>Vertical Steering Wheel Center</i>	530mm	838mm

Tab. 2.3. - Intervalli di validità delle superfici di raggiungibilità.

Rientrano in questi intervalli i veicoli di Classe A e gli autocarri medi.

II.4.5.1 Determinazione del sistema di riferimento

Il sistema di riferimento, rispetto al quale sono posizionati i punti di raggiungibilità definiti nelle tabelle, dipende dalla geometria interna dell'abitacolo e cioè dai valori delle grandezze presenti nella tabella 2.3. E' stato quindi definito il *General Package Factor* (G) per sintetizzare in un unico indice la geometria di una prefissata configurazione di guida. Questo fattore si ottiene, infatti, dalla seguente equazione:

$$G = 0.0018(H30) - 0.0197(L40) + 0.0027(W9) + 0.0106(H18) - 0.0011(L11) + 0.0024(H17) + 0.0027(L42) - 3.0853 \quad (2.3)$$

dove le distanze sono espresse in mm e gli angoli in gradi.

Una volta calcolato G è possibile determinare il suddetto sistema di riferimento i cui tre piani sono (fig. 2.31):

- *Horizontal Plane*: è il piano orizzontale passante per l'H-Point più arretrato della corsa sedile .
- *Centerline of Occupant Plane (C\LO Plane)*: è il piano parallelo al piano longitudinale del veicolo (Y) [38] passante per il centro anca dell'occupante (l'H-point).
- *Hand Reach Reference Plane (HR Plane)*: è un piano parallelo al piano trasversale del veicolo (X) la cui posizione è funzione del valore assunto dal fattore HR dipendente dal *General Package Factor* (G) tramite la seguente equazione:

$$HR = 786 - (99) G \quad (2.4)$$

con HR espresso in mm. In particolare si possono verificare due casi:

- Se $(HR - L53) < 0$ allora l'*Hand Reach Reference Plane* è posizionato ad una distanza dall'AHP pari ad HR.

- Se $(HR - L53) > 0$ allora l'*Hand Reach Reference Plane* è posizionato nell'H-Point più arretrato della corsa sedile.

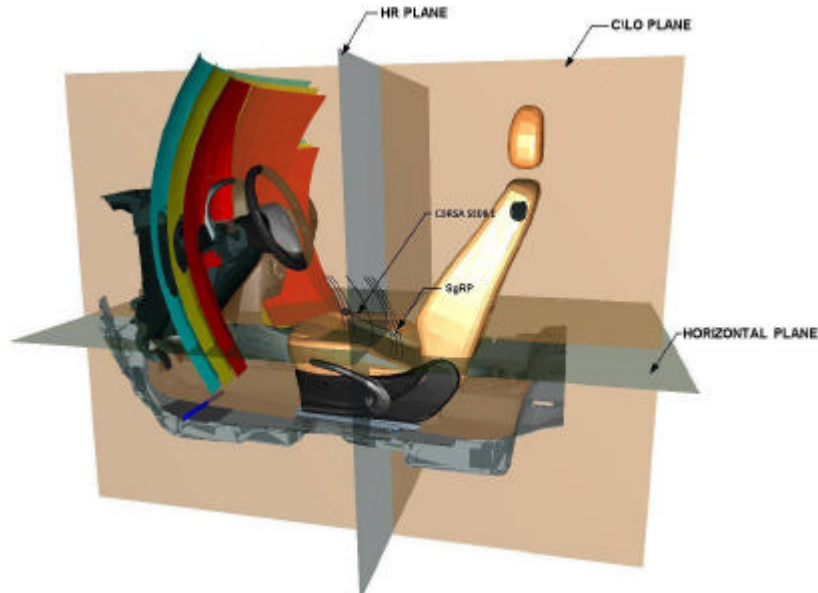


Fig. 2.31. – Sistema di riferimento per la determinazione delle superfici di raggiungibilità.

II.4.5.2 Scelta della tabella

La tabella da utilizzare per determinare la superficie di raggiungibilità dipende dalla geometria dell'abitacolo, e quindi dal valore assunto da G , dal tipo di popolazione da accomodare, e cioè dal rapporto maschio femmina (50/50,75/25,90/10), e dall'uso o meno della cintura di sicurezza. A titolo di esempio nella fig. 2.32 viene mostrata la tabella relativa ad un valore di G minore di (-1.25) , ad un rapporto maschio/femmina di 50/50 e con restrizione dei movimenti del corpo imposta dall'uso della cintura di sicurezza. Le aree delle tabelle in cui non sono presenti i numeri rappresentano regioni di spazio dell'abitacolo dove la raggiungibilità della mano non è stata misurata, oppure dove non è stato possibile stabilire i valori limiti di progetto. Le aree grigie rappresentano regioni di spazio dell'abitacolo dove la differenza tra il valore ottenuto per interpolazione dei punti

circostanti e quello realmente osservato è superiore a 25mm. Le misure che compaiono in queste aree devono essere utilizzate con attenzione.

TABLE 1m
 HAND REACH-RESTRAINED VEHICLE RANGE: (G LESS THAN -1.25) POPULATION MIX: 50/50 MALES-TO-FEMALES
 (mm)

ELEVATION ABOVE H PT (mm)	STATIONS OUTBOARD OF C/L/O (mm)							STATIONS INBOARD OF C/L/O (mm)							
	400	300	250	200	100	50	0	50	100	200	250	300	400	500	600
800	387	434	456	470	490	497	500	493	501	504	495	483	468	426	377
700	463	506	520	531	546	551	556	550	562	566	557	546	532	499	455
600	519	555	567	576	586	588	584	590	605	611	604	595	584	555	514
500	556	586	598	606	609	603	589	614	630	636	637	631	622	595	553
450	567	595	607	615	615	604	583	620	636	645	649	644	636	609	565
400	574	600	612	621	618	601	571	621	637	648	656	654	646	619	572
350	576	601	614	623	616	594	555	619	633	646	660	660	654	625	574
300	574	597	612	622	611			639	660	662	654	626	626	572	510
250	567	590	605	617	602			628	657	662	658	624	624	564	506
200	557	578	596	608	590			613	649	654	656	614	614	551	498
100	524	544	566	581				624	639	640	640	593	510	469	
0	474							544	607	610	610	551	449	423	
-100	410							528	561	567	567	493	357	360	

Fig. 2.32. – Esempio di tabella per la determinazione della superficie di raggiungibilità.

II.4.6 Posizione degli occhi

Individuare la posizione degli occhi è necessario per misurare il campo visivo del guidatore all'interno del veicolo [42]. E' possibile, infatti, posizionare all'interno dell'abitacolo i punti "E" (Eye Points) e "P" (Neck Pivot Point) fondamentali per lo studio del campo visivo [43].

La SAE [27] definisce delle superfici tridimensionali costituite da ellissoidi (fig. 2.33) e curve bidimensionali ellittiche (fig. 2.34) (relative alla vista laterale e dall'alto del veicolo) le quali rappresentano le posizioni degli occhi del conducente. Esse sono state ottenute analizzando le posizioni degli occhi all'interno del veicolo di un campione rappresentativo la popolazione utente, costituito da 2300 guidatori che guardano avanti, seduti su sedili regolabili orizzontalmente.

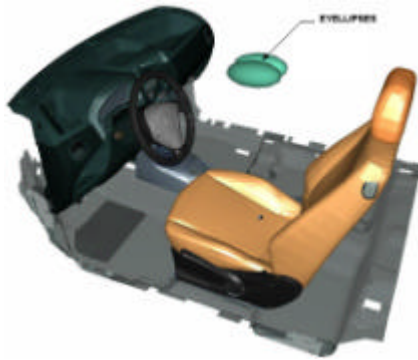


Fig. 2.33. – Ellissoidi 3D

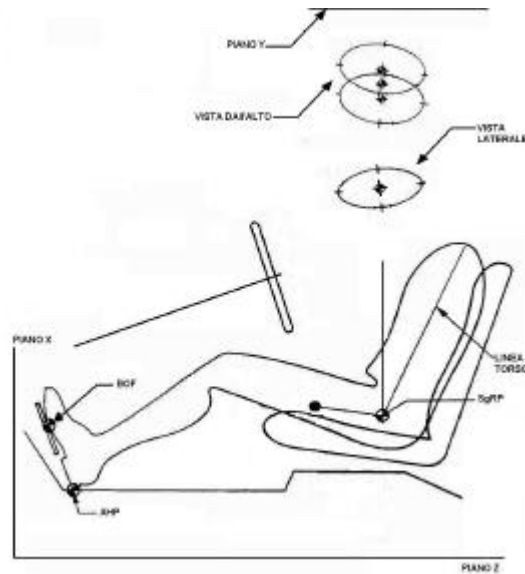


Fig. 2.34. – Ellissoidi 2D

Tali curve e superfici prendono il nome di *Eyellipse*, ottenuto dalla contrazione di due parole *eye* (occhio) ed *ellipse* (ellisse). Le loro dimensioni dipendono dal valore della corsa orizzontale del sedile (TL23) e dal percentile prescelto. La SAE definisce le *eyellipses* del 95° e 99° percentile per due differenti range della corsa sedile.

Si hanno due *eyellipses*, una relativa all'occhio sinistro ed una al destro; esse sono identiche ma opportunamente distanziate. Esse sono ottenute nel seguente modo:

L'*eyellipse* 3D sinistra o destra dell' X° percentile è ricavata come perimetro di involuppo di infiniti piani ognuno dei quali divide lo spazio in due semispazi in cui sono contenuti rispettivamente l' $X\%$ e il $(100-X)\%$ degli occhi sinistri o destri dei soggetti esaminati. Ad esempio si consideri l'ellissoide del 95° percentile relativo all'occhio destro ed un piano ad esso tangente (fig. 2.35): il 5% degli occhi destri dei soggetti esaminati si trovano da un lato del piano e il 95% dall'altro.

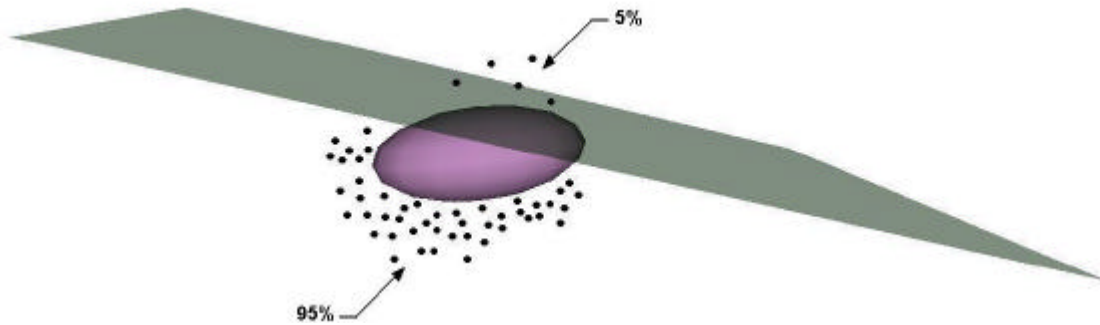


Fig. 2.35. – Significato dell'Eyeellipse 3D relativa al 95° percentile.

Analogamente ciascuna eyeellipse 2D, sinistra o destra, dell'X° percentile relativa sia alla vista dall'alto sia a quella laterale, è ottenuta come perimetro di involuppo di infiniti piani che appaiono come rette nella vista considerata, ognuno dei quali divide il piano in due semipiani in cui sono contenuti rispettivamente l'X% e il (100-X)% degli occhi sinistri o destri dei soggetti esaminati. Ad esempio la retta tangente all'eyeellipse 2D del 99° percentile relativa all'occhio destro divide il piano in due zone una contenente l'1% e l'altra il 99% degli occhi destri dei soggetti esaminati (fig. 2.36).

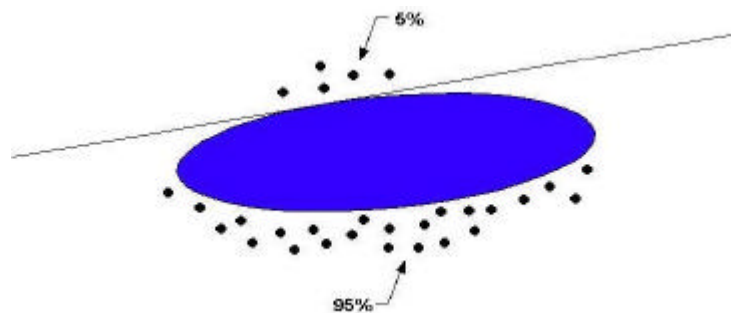


Fig. 2.36. – Significato dell'Eyeellipse 2D relativa al 95° percentile.

Dall'eyeellipse del 95° percentile derivano i punti "E" e "P" così definiti (fig 2.37):

Eye Points (E) (punti occhio): due punti che rappresentano gli occhi destro e sinistro del guidatore. Essi risultano distanti l'uno dall'altro 65mm e sono utilizzati congiuntamente ai punti "P".

Neck Pivot Point (P) (punto cardine del collo): un punto intorno al quale ruota nel piano orizzontale la testa del guidatore. Sono definiti 4 punti P ciascuno dei quali è 98mm dietro il punto medio dei punti “E”.

- P1 e P2 sono utilizzati rispettivamente per misurare l’ostruzione binoculare dovuta al montante anteriore più vicino e più lontano [44].
- P3 e P4 sono utilizzati rispettivamente per misurare il campo visivo attraverso lo specchio retrovisore interno ed esterno [44].

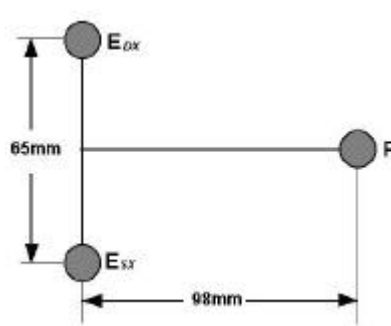


Fig. 2.37. - Posizioni relative tra i punti P ed E.

II.4.6.1 Descrizione matematica dell’eyellipse 3D

Come detto in precedenza la normativa definisce le *eyellipses* del 95° e 99° percentile per due differenti range della corsa sedile (TL23); le dimensioni degli assi principali X, Y, Z di tali ellissoidi (fig. 2.38) sono mostrate in tabella 2.4 [45].

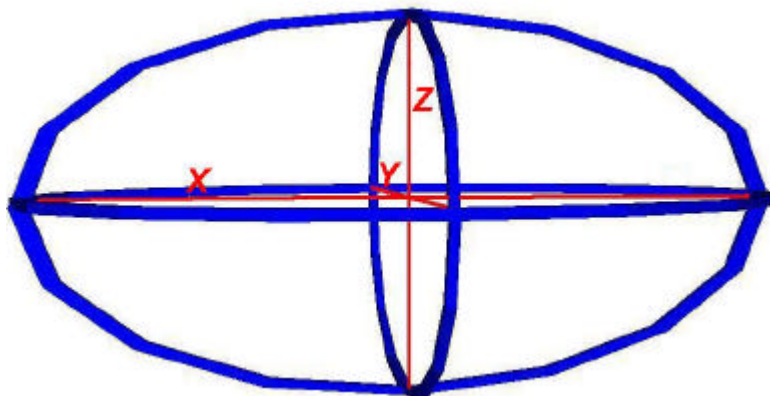


Fig. 2.38. – Assi principali X, Y, Z dell’eyellipse 3D.

	95 th Eyellipse 100<TL23<133mm	95 th Eyellipse TL23 >133mm	99 th Eyellipse 100<TL23<133mm	99 th Eyellipse TL23>133mm
<i>Asse</i>				
<i>X</i>	173.8	198.9	241.1	268.2
<i>Y</i>	105.0	104.9	149.0	148.9
<i>Z</i>	86.0	86.0	122.0	122.0

Tab. 2.4. - Dimensioni in millimetri degli assi X,Y,Z dell'*eyellipse*3D.

Dalla tabella 2.4 risulta che l'asse X sia per l'*eyellipse* del 95° percentile sia per quella del 99°, risulta più lunga di circa 25mm quando la corsa sedile è superiore a 133mm. L'effetto di una corsa maggiore, quindi, è quella di allungare l'ellissoide nella direzione dell'asse X lasciandolo invariato nelle rimanenti direzioni (fig. 2.39) [46].

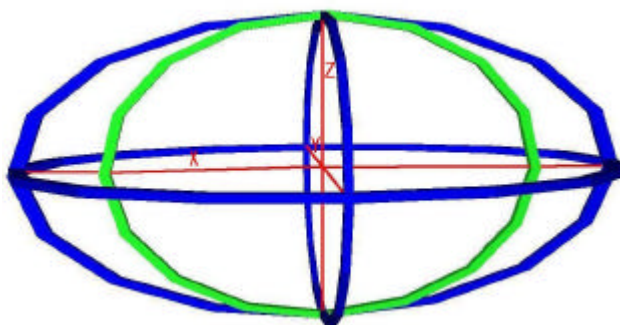


Fig. 2.39. – Incremento dell'asse X dell'*eyellipse* 3D per effetto di una corsa sedile maggiore.

Il punto di intersezione dei tre assi è il centro (*centroid*) dell'*eyellipse* 3D ed è utilizzato come punto di riferimento per posizionarla all'interno dell'abitacolo. Il centro di ciascuna *eyellipse* 3D, sinistra e destra, rappresenta rispettivamente l'occhio sinistro e destro del conducente. Il punto medio dei due centri (*mid centroid*) è chiamato occhio ciclopico (*cyclopean eye*).

II.4.6.2 Posizionamento dell'*eyellipse* 3D

Per posizionare l'*eyellipse* 3D all'interno dell'abitacolo bisogna procedere come segue:

- a) Determinare l'SgRP [28] – Le coordinate x, y, z dell'SgRP sono relative al sistema di riferimento globale [38] e sono indicate rispettivamente con $L31, W20, H70$.
- b) Determinare il valore del *back angle* $L40$.
- c) Selezionare un *eyellipse*. Determinata la corsa del sedile (TL23) bisogna scegliere la corrispondente *eyellipse* del 95° o 99° percentile desiderata. Le dimensioni sono date in tabella 2.4.
- d) Posizionare il centro. Il sistema di riferimento rispetto al quale è posizionato il centro, e quindi l'*eyellipse 3D*, è quello globale [38]. Le coordinate del centro (x, y, z) variano in funzione della corsa sedile e sono date da:
- Per $TL23 > 133\text{mm}$:

$$\begin{aligned}
 x &= L31 - 259.91472 + 10.281641 \times (L40) - 0.032032 \times (L40)^2 \\
 y &= W20 - 32.5 \quad (\text{occhio sinistro}) \\
 y &= W20 + 32.5 \quad (\text{occhio destro}) \\
 z &= H70 + 653.71757 + 0.398747 \times (L40) - 0.059301 \times (L40)^2
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

- Per $100 < TL23 < 133\text{mm}$:

$$\begin{aligned}
 x &= L31 - 247.71472 + 10.281641 \times (L40) - 0.032032 \times (L40)^2 \\
 y &= W20 - 32.5 \quad (\text{occhio sinistro}) \\
 y &= W20 + 32.5 \quad (\text{occhio destro}) \\
 z &= H70 + 655.01757 + 0.398747 \times (L40) - 0.059301 \times (L40)^2
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

dove le distanze sono espresse in mm e gli angoli in gradi.

In questa fase l'*eyellipse* deve essere orientata in modo tale da avere gli assi x, y, z paralleli agli assi X, Y, Z del sistema di riferimento globale (fig. 2.40).

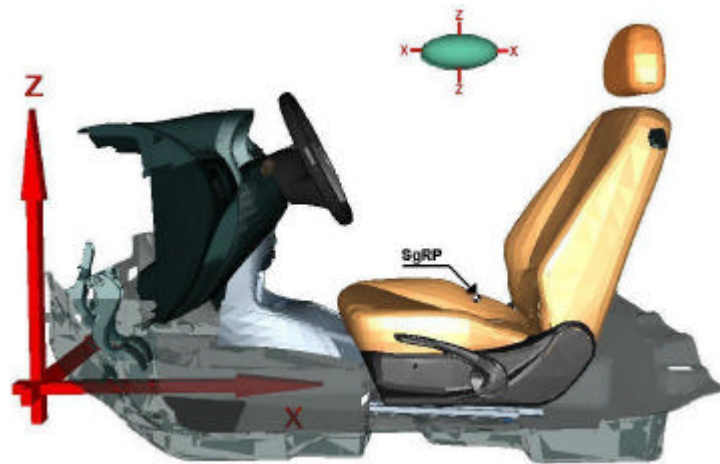


Fig. 2.40. - Orientazione degli assi x, y, z dell'eyellipse 3D.

- e) Orientare gli assi. Ruotare separatamente ciascuna *eyellipse 3D*:
- Nella vista dall'alto, intorno al proprio asse z di 5.4° in senso orario (fig. 2.41).

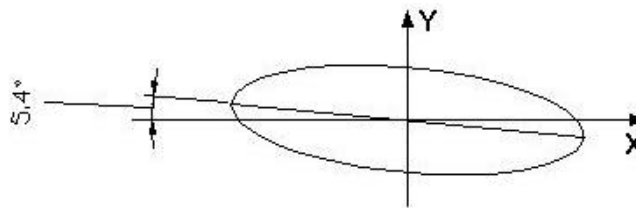


Fig. 2.41. - Rotazione dell'eyellipse 3D intorno all'asse z.

- Nella vista laterale, intorno al proprio asse y di 6.4° in senso orario (fig. 2.41).

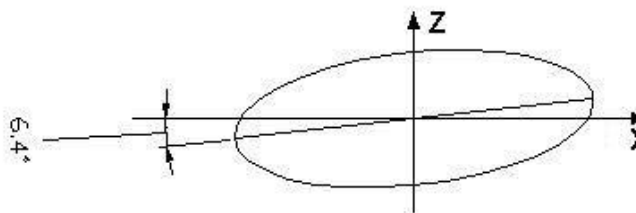


Fig. 2.42. - Rotazione dell'eyellipse 3D intorno all'asse y.

II.4.6.3 Descrizione matematica dell'eyellipse 2D

Sono definite le *eyellipses 2D* del 95° e 99° percentile relative alla vista laterale e dall'alto, per due differenti range della corsa sedile (TL23). Le dimensioni degli assi sono mostrate nella seguente tabella 2.5.

	95 th Eyellipse 100<L23<133mm	95 th Eyellipse L23 >133mm	99 th Eyellipse 100<L23<133mm	99 th Eyellipse L23>133mm
Asse maggiore:	173	198	241	267
Asse minore in vista laterale:	105	105	149	149
Asse minore in vista dall'alto:	86	86	122	122

Tab. 2.5. - Dimensioni in millimetri degli assi dell'eyellipse 2D.

Confrontando i valori definiti nella tabella 2.5 con i corrispondenti di tabella 2.4, si nota che essi differiscono di poco, ed in particolare i primi risultano minori dei secondi. Ciò può essere facilmente spiegato osservando che le dimensioni degli assi dell'eyellipse 2D si ottengono come proiezione nelle due viste, laterale e dall'alto, degli assi dell'eyellipse 3D.

Per tracciare l'eyellipse 2D nella vista prescelta, si usano delle sagome, generalmente di legno, i cui contorni interno ed esterno rappresentano rispettivamente la curva del 95° e 99° percentile. Si hanno, quindi, due set di sagome, uno per ogni range della corsa sedile (TL23) (fig. 2.43, fig. 2.44); ogni set è composto da due sagome, ciascuna utilizzata per disegnare l'eyellipse in vista laterale o dall'alto.

- Per 100 mm < TL23 < 133 mm:

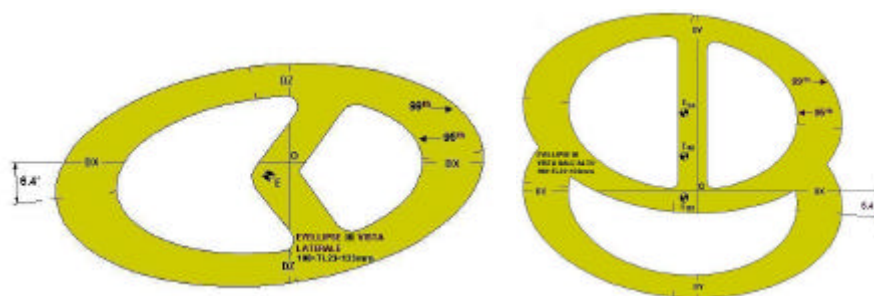


Fig. 2.43. - Sagome dell'eyellipse 2D per 100mm<TL23<133mm.

- Per TL23 > 133mm

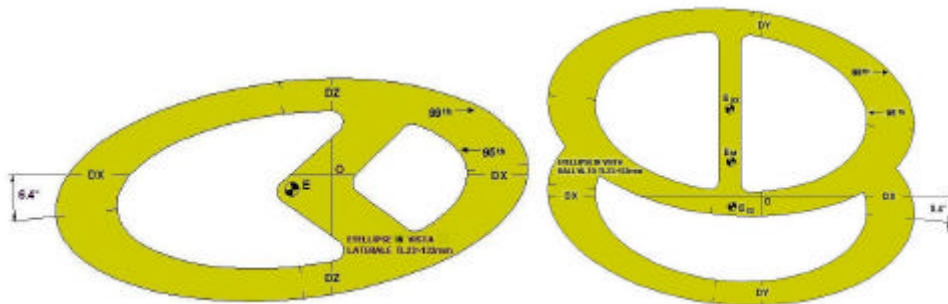


Fig. 2.44. - Sagome dell'eyellipse 2D per TL23>133mm.

Le linee DX, DY, DZ sono le linee di riferimento (*datum lines*) utilizzate per posizionare correttamente le sagome nel layout della vista prescelta. I centri, sinistro e destro, rappresentano rispettivamente l'occhio destro e sinistro del conducente. Il centro medio è il punto medio dei precedenti ed è definito occhio ciclopico (*cyclopean eye*). Le coordinate (x, y, z) dei centri rispetto al sistema di riferimento DX, DY, DZ sono illustrate nella tabella 2.6 sottostante:

	x	Y			Z
		occhio sinistro	Occhio Ciclopico	occhio destro	
TL23>133mm	-10.7	-5.1	26.95	59.0	-7.1
100<TL23<133mm	-22.9	-4.1	28.20	60.5	-8.4

Tab. 2.6. - Coordinate in millimetri dei centri dell'eyellipse rispetto al sistema DX, DY, DZ.

II.4.6.4 Posizionamento dell'eyellipse 2D nella vista laterale

Per posizionare la sagoma dell'eyellipse 2D nella vista laterale bisogna procedere nel seguente modo:

- Determinare l'SgRP [28] – Le coordinate x, z dell'SgRP sono relative al sistema di riferimento globale [38] e sono indicate rispettivamente con L31,H70.

- b) Determinare L40 – Valore del *back angle*.
- c) Selezionare la sagoma dell'*eyellipse* – In base alla corsa del sedile (TL23) scegliere la corrispondente sagoma dell'*eyellipse*.
- d) Individuare il punto O nel layout – La posizione del punto O dipende dal valore L40 e le sue coordinate (x, z) rispetto all'SgRP sono date dalle seguenti equazioni (valide per sedili fissi):

$$\begin{aligned} x &= -237.01472 + 10.281641 (L40) - 0.032032 (L40)^2 \\ z &= 662.11757 + 0.398747 (L40) - 0.059301 (L40)^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

con: x e z espresse in mm e L40 in gradi.

- e) Tracciare l'*eyellipse* – Posizionare la sagoma con le *datum lines* DX e DZ parallele rispettivamente agli assi X e Z del sistema di riferimento globale [38], ed il loro punto di intersezione in O. Infine marcare il contorno esterno se si vuole ottenere l'*eyellipse* del 99° percentile, altrimenti l'interno (fig. 2.45).

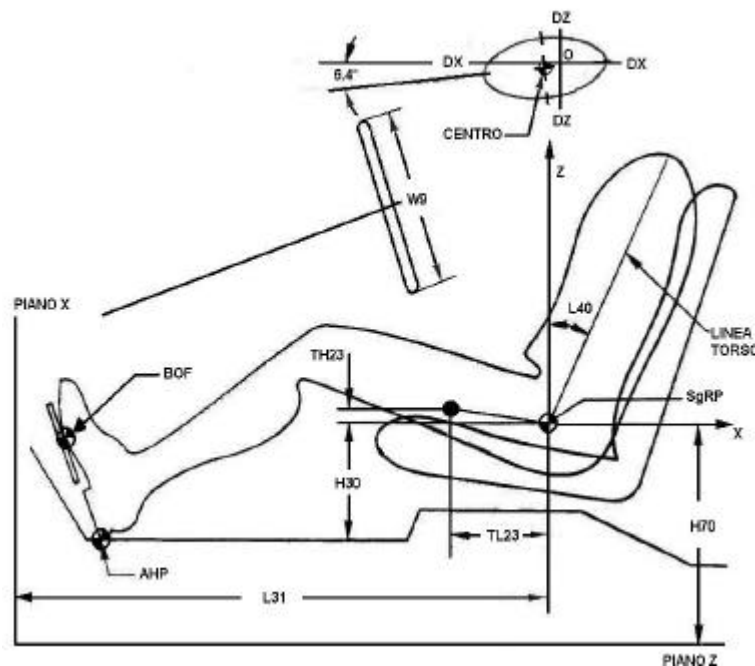


Fig. 2.45. - Posizione dell'*eyellipse* 2D nella vista laterale.

II.4.6.5 Posizionamento dell'*eyellipse* 2D nella vista dall'alto

Per posizionare la sagoma dell'*eyellipse* 2D nella vista dall'alto bisogna procedere nel seguente modo:

- a) Selezionare la sagoma dell'*eyellipse* – In base alla corsa del sedile (TL23) scegliere la corrispondente sagoma dell'*eyellipse*.
- b) Costruire due linee di lavoro nel layout – Tracciare una linea di lavoro laterale, perpendicolare all'asse longitudinale X del veicolo, prolungando la *datum line* DZ dalla vista laterale. Tracciare una linea di lavoro parallela all'asse longitudinale X del veicolo distante da esso W20 (coordinata y dell'SgRP).
- c) Tracciare l'*eyellipse* – Posizionare la sagoma con la *datum line* DY sovrapposta alla linea di lavoro laterale ed il centro medio sulla linea di lavoro longitudinale. Infine marcare il contorno relativo allo stesso percentile utilizzato nella vista laterale (fig. 2.46).

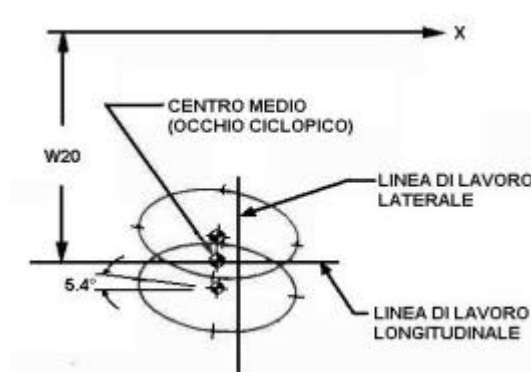


Fig. 2.46. - Posizione dell'*eyellipse* 2D dall'alto.

II.4.6.6 Posizionamento dei punti P ed E

Per posizionare i punti P ed E bisogna procedere nel seguente modo:

- a) Determinare l'SgRP [28] – Le coordinate x, y, z dell'SgRP sono relative al sistema di riferimento globale [38] e sono indicate rispettivamente con $L31, W20, H70$.
- b) Determinare il valore del *back angle* ($L40$).
- c) Posizionare $P1$ e $P2$ – Questi punti sono posizionati rispetto al sistema di riferimento globale [38] e si trovano internamente all'*eyellipse*. Le coordinate (x, y, z) sono espresse in funzione della corsa sedile ($TL23$) dalle seguenti equazioni:

- Per $TL23 > 133\text{mm}$:

$$\begin{aligned}
 x_{P1} &= L31 - 250.01472 + 10.281641 (L40) - 0.032032 (L40)^2 \\
 x_{P2} &= x_{P1} + 28 \\
 y_{P1} &= W20 - 20 \\
 y_{P2} &= W20 + 47 \\
 z_{P1\&P2} &= H70 + 654.11757 + 0.398747 (L40) - 0.059301 (L40)^2
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

- Per $100\text{mm} < TL23 < 133\text{mm}$:

$$\begin{aligned}
 x_{P1} &= L31 - 224.01472 + 10.281641 (L40) - 0.032032 (L40)^2 \\
 x_{P2} &= x_{P1} + 28 \\
 y_{P1} &= W20 - 20 \\
 y_{P2} &= W20 + 47 \\
 z_{P1\&P2} &= H70 + 654.11757 + 0.398747 (L40) - 0.059301 (L40)^2
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

dove le distanze sono espresse in mm e gli angoli in gradi.

Si può notare che solo la coordinata x dipende dalla corsa $TL23$ e che z è uguale per entrambe i punti.

- d) Posizionare $P3$ e $P4$ – Questi punti sono posizionati rispetto al sistema di riferimento globale [38] e si trovano esternamente all'*eyellipse*. Le equazioni che forniscono le loro coordinate (x, y, z) sono le stesse per entrambe i range di $TL23$ e risultano valide solo per corse sedili superiori a 100mm :

$$\begin{aligned}
 x_{P3\&P4} &= L31 - 87.01472 + 10.281641 (L40) - 0.059301 (L40)^2 \\
 y_{P3} &= W20 - 40 \\
 y_{P4} &= W20 + 31 \\
 z_{P3\&P4} &= H70 + 662.11757 + 0.398747 (L40) - 0.059301 (L40)^2
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

dove le distanze sono espresse in mm e gli angoli in gradi.

Si può notare che le coordinate x e z sono uguali per entrambe i punti.

- e) Posizionare i punti E – I punti E sono posizionati relativamente ai punti P come segue:

$$\begin{aligned}
 x &= x_p - 98 \\
 y_{E_{SX}} &= y_p - 32.5 \quad (\text{occhiosinistro}) \\
 y_{E_{DX}} &= y_p + 32.5 \quad (\text{occhio destro}) \\
 z &= z_p
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

II.4.7 Posizione della testa [29]

La SAE definisce delle superfici tridimensionali ellittiche, chiamate *Head Position Contours*, che rappresentano le posizioni assunte dalla testa dell'occupante all'interno dell'abitacolo. Esse sono utilizzate per valutare la minima distanza dal padiglione del veicolo, in modo tale da prevenire o correggere eventuali interferenze. Sono definite le superfici del 95° e 99° percentile, per sedile fisso o regolabile orizzontalmente.

Analizzando i dati antropometrici [35] è stato delineato un profilo medio della testa ottenuto raccordando opportunamente i punti superiore e posteriore (capelli inclusi), frontale e laterale rispetto all'occhio ciclopico. Dall'involuppo delle curve ricavate posizionando il profilo medio della testa lungo la metà superiore dell'*eyellipse* laterale (fig. 2.47) e posteriore, sono stati ottenuti i rispettivi contorni delle posizioni della testa. In particolare, per i sedili fissi è stata utilizzata l'*eyellipse*

definita nel riferimento [48], mentre per i sedili regolabili orizzontalmente sono state utilizzate le *eyellipses* definite nella SAE J941.

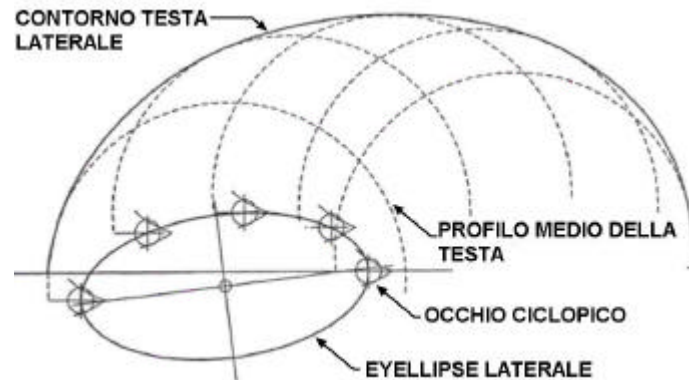


Fig. 2.47. - Contorno testa laterale.

Dalla vista laterale e posteriore è possibile valutare la lunghezza degli assi X,Y,Z e quindi tracciare il contorno ellittico tridimensionale (fig. 2.48).

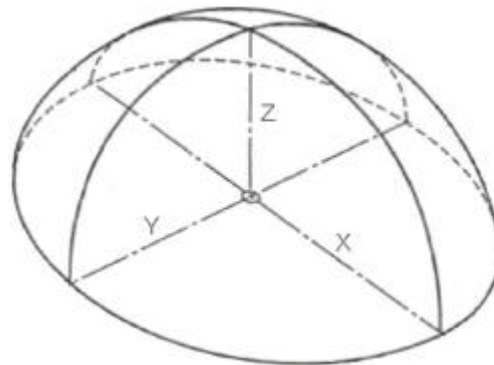


Fig. 2.48. - Contorno testa tridimensionale.

Quindi, per come è stato ricavato, il contorno delle posizioni testa dell' X° percentile rappresenta il perimetro di involuppo di infiniti piani ognuno dei quali divide lo spazio in due semispazi in cui sono presenti rispettivamente l' $X\%$ e il $(100-X\%)$ delle teste degli occupanti. Ad esempio si consideri il contorno del 95° percentile ed un piano ad esso tangente (fig. 2.49), allora il 5% delle teste si trovano da un lato del piano e il 95% dall'altro.

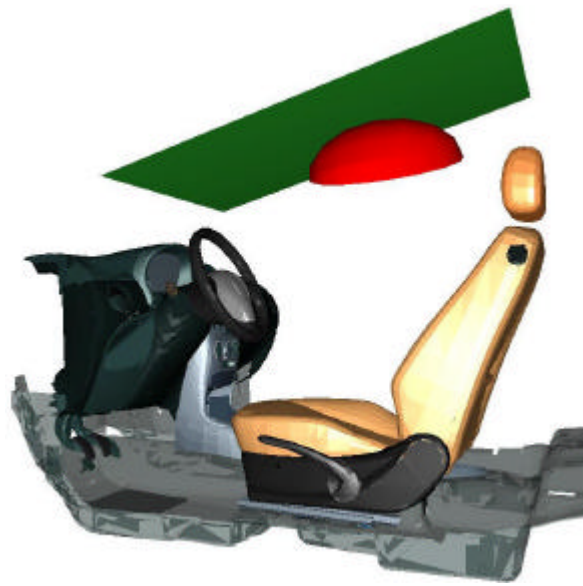


Fig. 2.49. - Contorno testa.

II.4.7.1 Descrizione matematica del contorno testa - sedile fisso¹-

La SAE definisce i contorni testa relativi al 95° e 99° percentile (fig. 2.50) le cui dimensioni dei semiassi X, Y, Z sono contenute nella tabella 2.7.

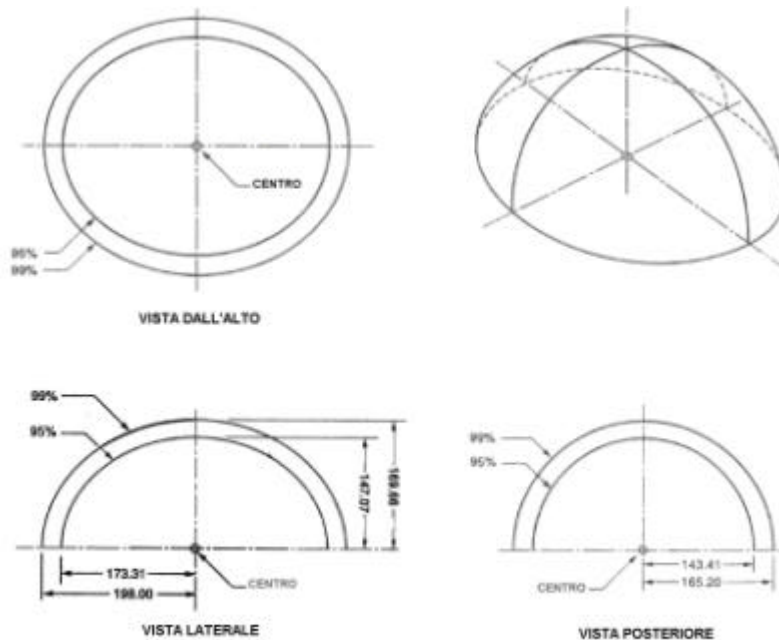


Fig. 2.50. - Contorno testa relativo al sedile fisso.

¹ Solitamente il contorno relativo al sedile fisso è utilizzato per il passeggero.

	95 th	99 th
semiassi		
X	173.31	198.0
Y	143.41	165.2
Z	147.07	169.66

Tab. 2.7. - Dimensioni in mm dei semiassi X,Y,Z del contorno testa relativo al sedile fisso.

II.4.7.2 Descrizione matematica del contorno testa – sedile regolabile

orizzontalmente –

La SAE definisce i contorni testa relativi al 95° e 99° percentile (fig. 2.51) per due differenti range della corsa sedile, le cui dimensioni dei semiassi X,Y,Z sono contenute nella tabella 2.8.

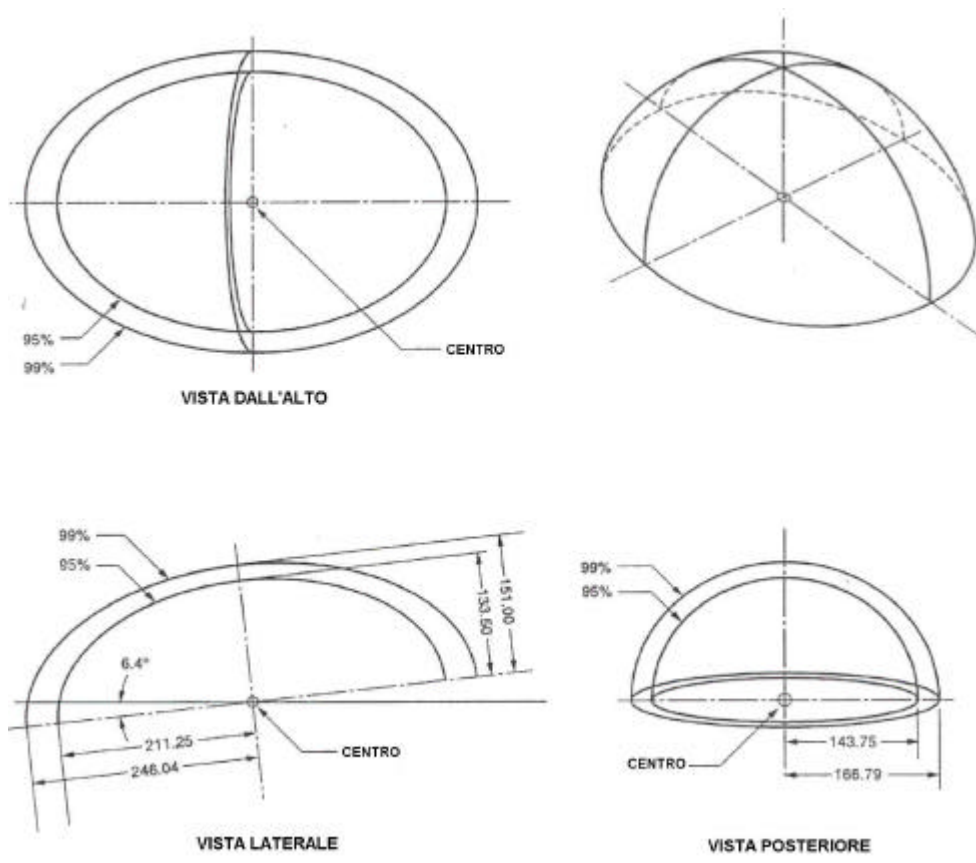


Fig. 2.51. - Contorno testa relativo al sedile regolabile orizzontalmente.

TL 23	95 th 100<TL23<133mm	95 th TL23>133mm	99 th 100<TL23<133mm	99 th TL23>133mm
Semiassi				
X	198.76	211.25	232.4	246.04
Y	143.75	143.75	166.79	166.79
Z	133.5	133.5	151	151

Tab. 2.8. - Dimensioni in mm dei semiassi X,Y,Z del contorno testa relativo al sedile regolabile orizzontalmente.

Dalla tabella 2.8 risulta che l'asse X, sia per il contorno testa del 95° percentile sia per quello del 99°, è, per corsa sedile superiore a 133mm, più lungo di circa 14mm. L'effetto di una corsa maggiore, quindi, è quella di allungare il contorno nella direzione dell'asse X lasciandolo invariato nelle rimanenti direzioni.

Il contorno descritto vale per guidatori che guardano dritto in avanti. Se si vuole tenere conto anche delle rotazioni della testa sia a sinistra che a destra, bisogna aumentare il valore dell'asse Y. In particolare i due semicontorni devono essere raccordati con una striscia piana larga 23mm (fig. 2.52) [49].

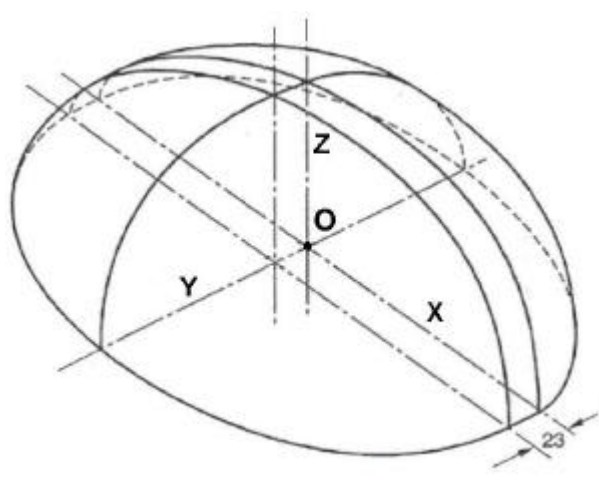


Fig. 2.52. - Contorno testa relativo al sedile regolabile orizzontalmente.

Dagli studi effettuati si è notato che questo incremento di lunghezza dell'asse Y non è simmetricamente ripartito rispetto al *centerline plane* dell'occupante, ma si

trova alla sua sinistra. Quindi il punto di riferimento, utilizzato per posizionare il contorno nell'abitacolo, non è il centro di esso ma il punto O indicato in figura.

II.4.7.3 Posizionamento del contorno testa – sedile fisso –

Per posizionare il contorno testa all'interno dell'abitacolo bisogna procedere nel seguente modo:

- a) Determinare l'SgRP [28] – Le coordinate x,y,z dell'SgRP sono relative al sistema di riferimento globale [38] e sono indicate rispettivamente con L31, W20, H70.
- b) Determinare il valore del *back angle* (L40).
- c) Scegliere il contorno testa relativo al percentile desiderato (95°, 99°).
- d) Posizionare il centro – Le coordinate (x,y,z) del centro rispetto al sistema di riferimento globale [38] sono date dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} x &= L31 - 143.89500 + 13.54328(L40) - 0.05588(L40)^2 \\ y &= W20 \\ z &= H70 + 682.14905 + 0.49530(L40) - 0.068834(L40)^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

dove le distanze sono espresse in mm e gli angoli in gradi.

- e) Orientare gli assi – Gli assi X,Y,Z devono risultare paralleli ai rispettivi assi del sistema di riferimento globale.

II.4.7.4 Posizionamento del contorno testa – sedile regolabile orizzontalmente

Per posizionare il contorno testa all'interno dell'abitacolo bisogna procedere nel seguente modo:

- a) Determinare l'SgRP [28] – Le coordinate x,y,z dell'SgRP sono relative al sistema di riferimento globale [38] e sono indicate rispettivamente con L31,W20,H70.

- b) Determinare il valore del *back angle* L40.
- c) Selezionare il contorno testa – Determinata la corsa del sedile (TL23), bisogna scegliere il corrispondente contorno testa del 95° o 99° percentile desiderato.
- d) Posizionare il punto O - Le coordinate (x,y,z) del punto O rispetto al sistema di riferimento globale sono date dalle seguenti equazioni:

- Per $100\text{mm} < \text{TL23} < 133\text{mm}$:

$$\begin{aligned} x &= L31 - 155.21472 + 10.281641 (L40) - 0.032032 (L40)^2 \\ y &= W 20 \\ z &= H70 + 691.51757 + 0.398747 (L40) - 0.059301 (L40)^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

- Per $\text{TL23} > 133\text{mm}$

$$\begin{aligned} x &= L31 - 166.91472 + 10.281641 (L40) - 0.032032 (L40)^2 \\ y &= W 20 \\ z &= H70 + 691.51757 + 0.398747 (L40) - 0.059301 (L40)^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

dove le distanze sono espresse in mm e gli angoli in gradi.

- e) Orientare gli assi – Ruotare il contorno testa intorno al proprio asse Y di 6.4° in senso orario. Gli assi X e Z devono essere paralleli ai rispettivi assi del sistema di riferimento globale.

II.4.7.5 Distanza tra il contorno testa e il tetto dell'abitacolo

La distanza tra un punto del contorno testa e il padiglione è misurata lungo la normale alla linea tangente al contorno nel punto prescelto (fig.2.53).

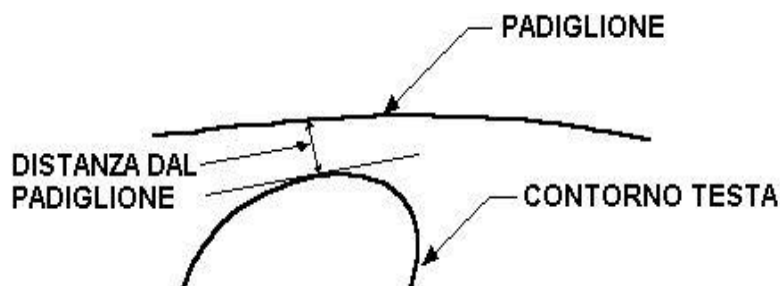


Fig. 2.53. - Distanza del contorno testa dal padiglione.

II.4.8 Strumenti SAE per definire e misurare le dimensioni relative all'abitacolo e alla postura dell'occupante [31]

Sono manichini bidimensionali e tridimensionali denominati rispettivamente *H-Point Template* e *H-Point Machine*, costruiti in modo tale da poter rappresentare tre differenti percentili di maschi adulti (10°, 50°, 95°). E' importante notare che la posizione dell'occupante all'interno dell'abitacolo è stabilita prima dell'utilizzo dei manichini, attraverso i quali, invece, è possibile individuare i punti effettivi in cui la persona siede, tenendo conto dell'inflessione che subisce il sedile a causa del peso del passeggero. Infatti è poco conveniente definire e misurare le dimensioni relative all'abitacolo e alla postura dell'occupante rispetto ad un sedile non caricato, in quanto le misure così rilevate non coincidono con quelle reali. Ad esempio la distanza tra il padiglione e la testa dell'occupante risulterebbe minore di quella effettiva; inoltre risulterebbero non reali anche tutti gli angoli caratteristici del corpo umano come l'angolo del piede (L46), l'angolo del ginocchio (L 44) etc.

II.4.8.1 H-Point template – descrizione e applicazioni –

La sagoma *H-Point template* (fig. 2.54), generalmente in legno, è rappresentativa del profilo di un adulto maschile che indossa scarpe [38]. Il contorno della coscia e del torso sono sagomati in modo tale da presentare le stesse inflessioni che subiscono queste parti quando un adulto maschile siede su un sedile; questi contorni, inoltre, risultano uguali a quelli dell'*H-Point Machine*. Gli angoli formati tra le varie parti del corpo come torso, coscia, gamba e piede possono essere fissati bloccando i

relativi giunti. Inoltre è presente una barra attraverso la quale è possibile orientare la sagoma rispetto all'asse verticale.

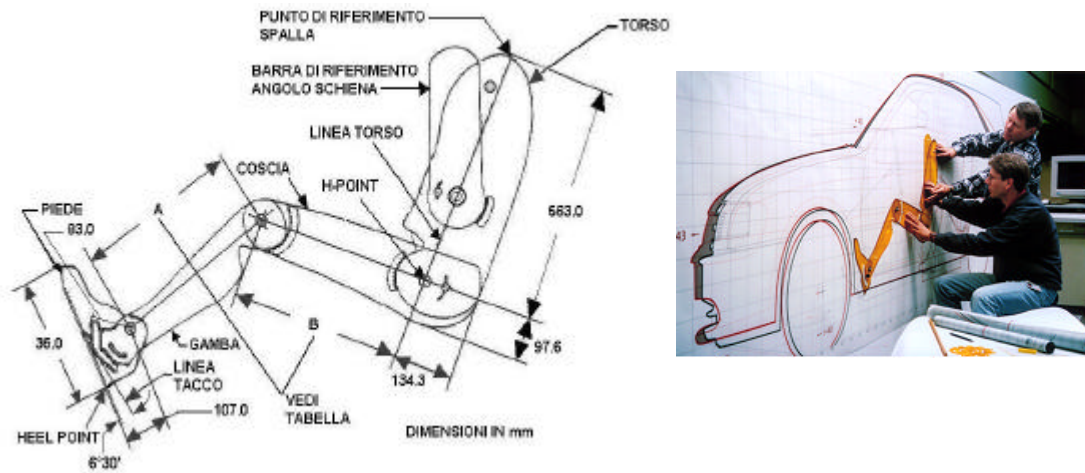


Fig. 2.54. - H-Point Template.

Questo strumento è utilizzato per:

- Posizionare correttamente il sedile nella vista laterale .
- Valutare gli spazi liberi per l'occupante e la correttezza della sua postura.
- Misurare le dimensioni interne dell'abitacolo in vista laterale.

II.4.8.2 H-point machine – descrizione e applicazioni –

E' una macchina (fig. 2.55) con schienale e fondo realizzati in modo tale da avere la stessa configurazione di torso e coscia di un adulto maschio seduto sul sedile. Queste due parti sono collegate mediante un giunto al punto H del manichino. Una sonda scorrevole, fulcrata nel punto H, è utilizzata per misurare lo spazio a disposizione per la testa; essa è munita di un indicatore che permette di valutare l'angolo dello schienale (*back angle* L40). Altri indicatori sono posti vicino alle ginocchia ed alla caviglia per misurare rispettivamente l'angolo formato tra coscia e gamba (*knee angle* L44) e tra gamba e piede (*foot angle* L46). Le gambe possono assumere tre diverse lunghezze relative a tre differenti percentili di adulti maschi

(10°, 50°, 95°), elencate in tabella 2.9. L'*H-Point machine* ha un peso pari al 50° percentile maschile (76 Kg) ed il suo centro di gravità è in una posizione equivalente a quella del corpo umano. In questo modo è possibile simulare correttamente l'inflessione che subisce il sedile per effetto del peso della persona seduta.

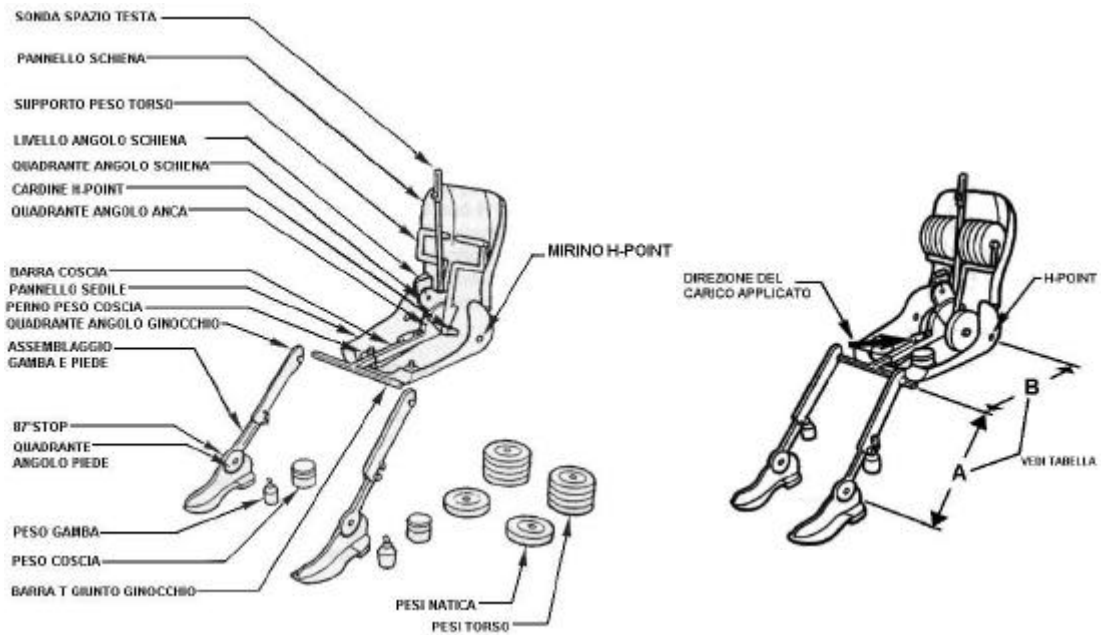


Fig. 2.55. - *H-Point Machine*.

	10 th percentile (mm)	50 th percentile (mm)	90 th percentile (mm)
Lunghezza gamba (A)	390.4	417.5	459.1
Lunghezza coscia (B)	407.7	431.5	456.0

Tab. 2.9. - Dimensioni della gamba e della coscia.

L'*H-Point Machine* è utilizzata per:

- Individuare il punto H del sedile.
- Valutare in modo consistente e ripetibile tutte le dimensioni interne dell'abitacolo (fig. 2.56) e gli angoli caratteristici del corpo (fig. 2.57) definiti nella SAE J1100 [25].

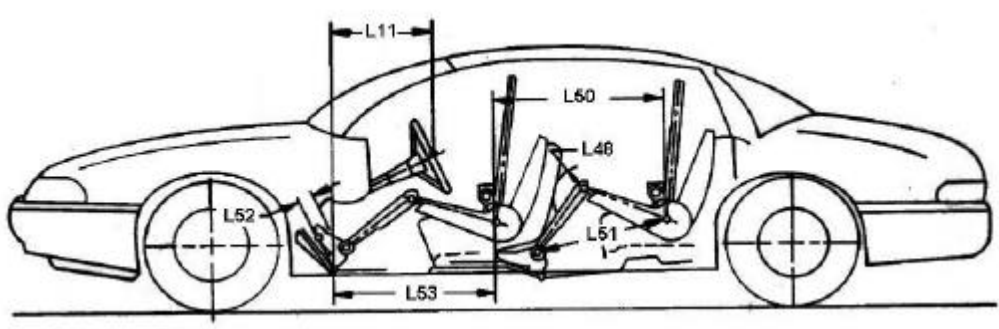


Fig. 2.56. – Alcune delle dimensioni interne dell'abitacolo definite nella SAE J1100.

- Verificare che in tutte le fasi successive alla progettazione di un nuovo autoveicolo, le dimensioni interne dell'abitacolo e le posizioni dei punti caratteristici come l'SgRP, l'AHP ed il BOF, non vengano variate.
- Valutare la posizione dei punti caratteristici dell'abitacolo come l'SgRP, l'AHP, ed il BOF in veicoli già esistenti, per creare opportuni database.
- Analizzare statisticamente la postura dell'occupante definita da una assegnata configurazione dell'abitacolo (fig. 2.57).

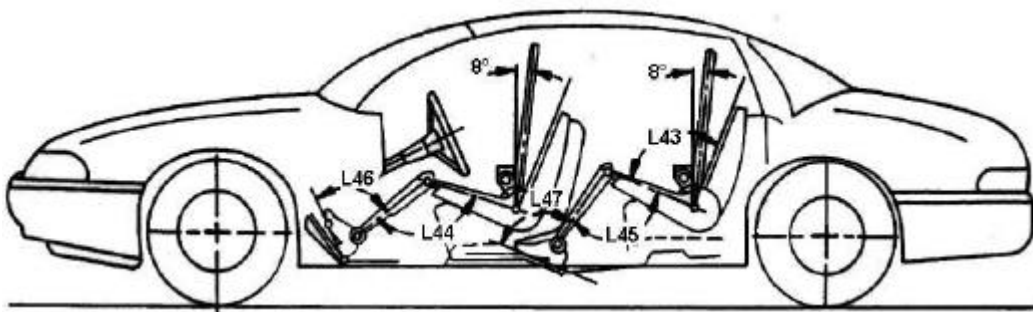


Fig. 2.57. - Angoli di postura definiti nella SAE J1100.

Attualmente la SAE sta realizzando una nuova *H-Point Machine* (fig. 2.58), più sofisticata della precedente ma migliore nel simulare l'occupante all'interno del veicolo.



Fig. 2.58. - Nuova H-Point Machine.

II.5 METODOLOGIA FIAT PER L'ANALISI ERGONOMICA DELLA POSTAZIONE DI GUIDA BASATA SULL'IMPIEGO DI UN SOFTWARE 2D.

In questo paragrafo verranno analizzate le principali caratteristiche del codice di calcolo sviluppato e utilizzato dalla FIAT per l'analisi ergonomica dell'autoveicolo. Tale software permette di verificare le condizioni di comfort dei potenziali guidatori e passeggeri in funzione della geometria dell'abitacolo. Esso, inoltre, consente di analizzare i parametri caratteristici relativi alla visibilità anteriore e posteriore, e la raggiungibilità dei comandi. L'output di tali verifiche è fornito sia sotto forma di tabelle che mediante un'interfaccia grafica, la quale facilita la lettura dei risultati ed il successivo confronto tra le diverse soluzioni.

Nel seguito, dopo una breve descrizione delle tipologie di manichini utilizzati dall'applicativo suddetto, verranno analizzati i dati di input richiesti e i dati di output che è possibile ottenere.

II.5.1 Descrizione dei manichini

La metodologia utilizza manichini bidimensionali i quali rappresentano differenti percentili del corpo umano. Essi sono modelli matematici schematizzati come sistemi di aste e nodi, con gli snodi coincidenti con i centri delle articolazioni. Sono definiti due tipi di manichini:

- **Manichino SAE:** (fig. 2.59) è utilizzato come strumento di misurazione, per ricavare le dimensioni interne dell'abitacolo della vettura. Ad esso, infatti, non è applicabile nessuna considerazione di comfort.

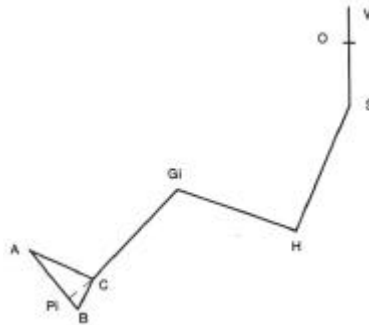


Fig. 2.59. – Manichino SAE.

- **Manichino Human-Scale (HS):** è considerato sia in sezione longitudinale che trasversale (per motivi di riservatezza aziendale non se ne riporta l'immagine). Esso è provvisto di braccia ed ha il tacco di altezza modificabile. Poiché tutte le dimensioni del manichino fanno riferimento ad una persona seduta in assetto di guida, al manichino HS originale sono state apportate delle modifiche, evidenziate nella sezione longitudinale, per simulare l'effetto del rilassamento della colonna vertebrale e l'avanzamento scapolare dovuto all'impostazione di seduta. Tali modifiche permettono di avvicinarsi con sufficiente approssimazione alle condizioni reali di accomodamento in vettura. Il manichino HS è utilizzato per stabilire l'abitabilità di una vettura secondo criteri di comfort specifici. I

database delle misure antropometriche adottabili, sono tre: quello relativo alla popolazione nord-americana (HS-HOLD), quello basato su previsioni di crescita per gli anni '90 (HS-V90) e per l'anno 2000 (HS-V2000). In ognuno di essi, inoltre, sono fornite le misure per tre tipologie di popolazione: maschile, femminile, standard (50% maschi, 50%femmine). I percentili definiti sono 41, dal 1° al 99° con passo 2.5.

II.5.2 Dati di input relativi al veicolo

Uno dei primi passi per iniziare l'analisi di una vettura consiste nel definire i dati relativi alla geometria dell'abitacolo e degli strumenti in esso contenuti. Essi sono valutati utilizzando il manichino SAE del 95° percentile, posizionato nell'abitacolo nel seguente modo: il punto H del manichino in corrispondenza del punto H più arretrato e più basso della corsa sedile (definito nel software come punto R [52]), angolo schienale (L40) pari a 25° e piede appoggiato sul pedale acceleratore con un angolo (L46) pari ad 87°.

Nel seguito verranno descritti i dati che è necessario fornire in input per effettuare le analisi di abitabilità. E' bene notare fin dall'inizio, che è possibile valutare l'abitabilità di una vettura anche non tenendo conto di alcuni strumenti in essa presenti. Ad esempio, se non interessa l'effetto sulla postura del conducente dovuta all'azionamento della frizione, ciò può essere facilmente realizzato disattivando la corrispondente maschera di input. I dati indispensabili per effettuare un'analisi di abitabilità di "primo livello", sono quelli relativi al conducente al pedale acceleratore e alla movimentazione del sedile; gli altri dati infatti sono tutti opzionali, e possono essere utilizzati per fare verifiche più dettagliate.

II.5.2.1 Dati posizionamento manichino

I dati relativi al posizionamento del manichino pilota all'interno dell'abitacolo sono (fig. 2.60):

- Punto H di progetto (x,y,z);
- Punto tacco di progetto (punto R) (x,y,z);
- Delta SAE (L40)(generalmente 25°).

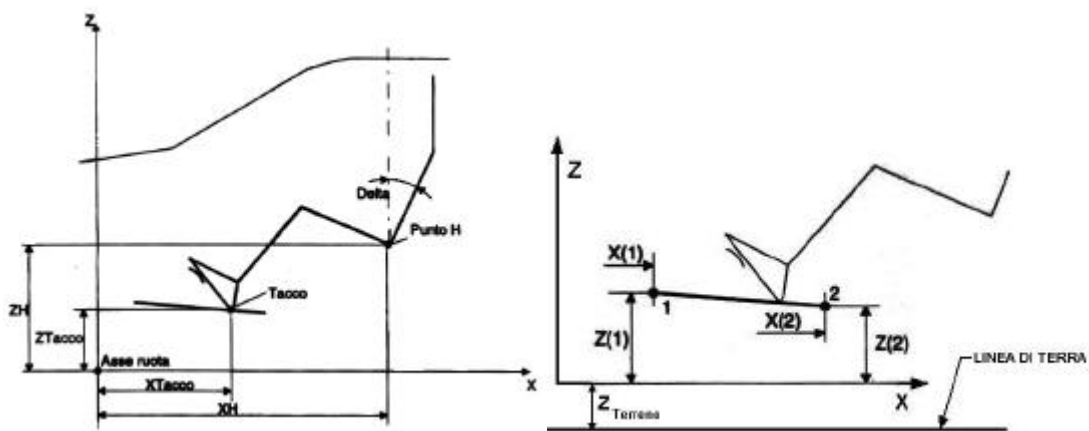


Fig. 2.60. – Dati di input per il posizionamento del manichino.

- Pavimento anteriore – Coordinate (x, z) del punto anteriore (1) e posteriore (2).
Per linea pavimento si intende un segmento di retta utilizzato come zona di scorrimento del tacco. Gli estremi costituiscono un vincolo alla traslazione del tacco.
- Terreno – coordinata z della linea di terra.

II.5.2.2 Dati sedile

Il metodo richiede di definire i parametri di regolazione del sedile ed in particolare la tipologia di alza-sedile. I dati comuni da inserire sono relativi al numero di scatti orizzontali che il sedile può assumere scorrendo sulle guide, al passo (ovvero alla distanza orizzontale tra due scatti che può essere misurata lungo l'asse X

oppure parallelamente alle guide, a seconda della tipologia di sedile), al numero di scatti verticali (ovvero al numero di livelli in altezza ottenuti dalla suddivisione in intervalli equidistanti dell'escursione verticale del sedile), al passo verticale (ovvero alla distanza in verticale tra due scatti), all'angolo di ribaltamento schienale in avanti, all'angolo di ribaltamento schienale all'indietro, al passo angolare (ovvero al passo degli scatti angolari dello schienale, non essendo prevista la regolazione "continua" tramite rotella). Il tipo di alza-sedile definisce la forma dell'area di movimentazione del punto H. La selezione di uno di essi comporta l'inserimento delle coordinate dei punti (Punto1, Punto2,...) necessari per identificare la curva di movimentazione del sedile.

Sono previste quattro tipologie di alza-sedile:

- Alza-sedile verticale (fig. 2.61);

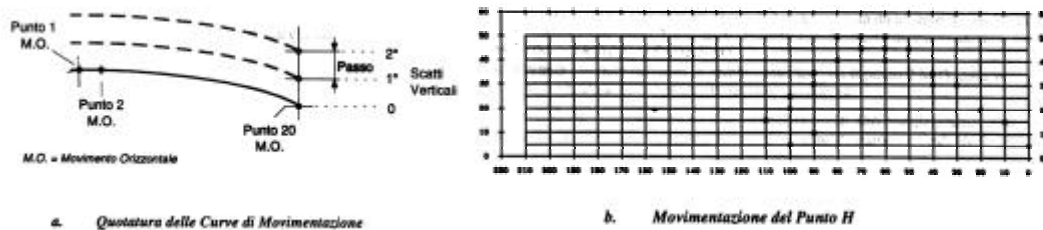


Fig. 2.61. – Alza-sedile verticale.

- Alza-sedile parallelo a lati rettilinei (fig. 2.61);

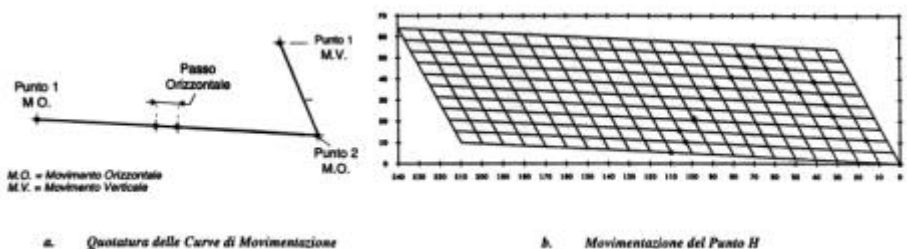


Fig. 2.61. - Alza-sedile parallelo a lati rettilinei.

- Alza-sedile parallelo a lati circolari (fig. 2.62);

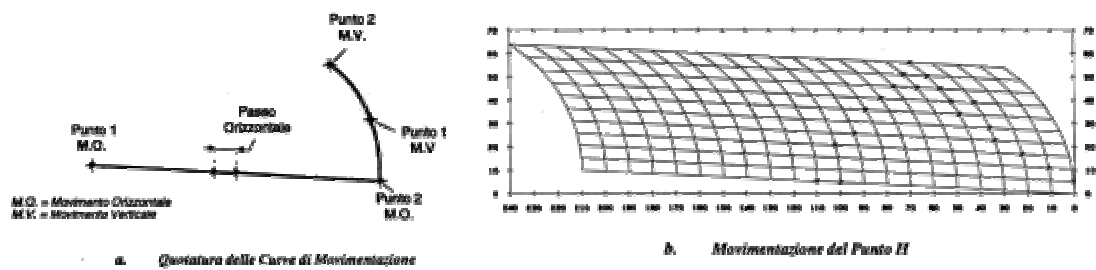


Fig. 2.62. - Alza-sedile parallelo a lati circolari.

> Alza-sedile solo posteriore (fig. 2.63):

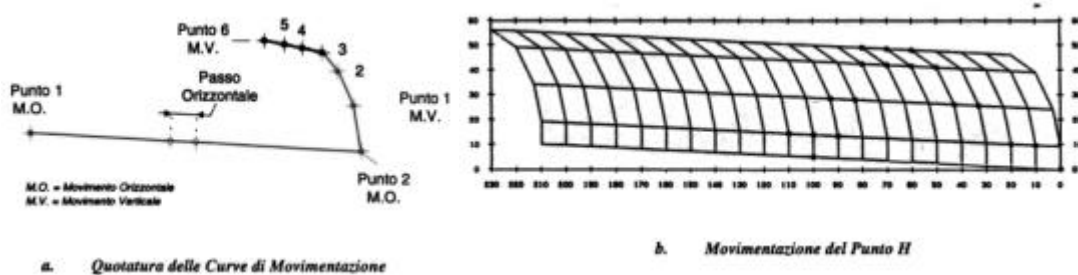


Fig. 2.63. - Alza-sedile solo posteriore.

Nel caso in cui non si ha un alza-sedile, il punto H si muove lungo una curva (fig. 2.64).



Fig. 2.64. - Nessun alza-sedile.

II.5.2.3 Dati volante

Il volante può essere considerato fisso o regolabile. In questo secondo caso bisogna fornire la griglia dei punti rappresentativi le posizioni del centro volante. Essa può essere definita manualmente, fornendo le coordinate di ogni singola posizione di centro volante (c.v.) considerata, oppure calcolata automaticamente in

base ai parametri geometrici che definiscono l'area di movimentazione del c.v. in funzione delle regolazioni possibili.

I dati indipendenti dalla tipologia di regolazione del volante sono:

- Diametro – Diametro massimo della corona.
- Coordinata Y – Distanza in Y del centro volante rispetto alla mezzeria del veicolo.

Sono previste tre modalità di costruzione dell'area di movimentazione del centro volante:

- *Inserimento manuale di tutti i punti della griglia, quotati arbitrariamente*: basta introdurre le coordinate (x,z) del centro volante e l'inclinazione della corona rispetto alla verticale (fig. 2.65).

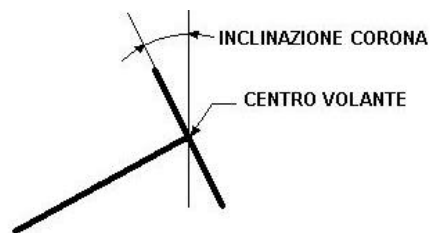


Fig. 2.65. – Dati volante.

- *Costruzione automatica tramite parametri geometrici di "tipo A"*: tramite questa funzione il software costruisce automaticamente una griglia di posizioni del centro volante (fig. 2.66) realizzata in funzione dei parametri geometrici di controllo del movimento del piano corona nello spazio (regolazione angolare, fulcro rotazione piantone, regolazione assiale) (fig. 2.67).

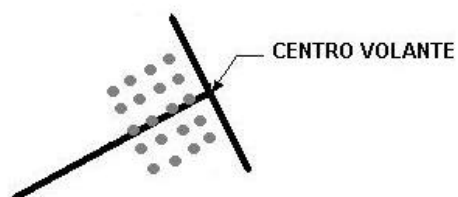


Fig. 2.66. - Griglia di posizioni del centro volante.

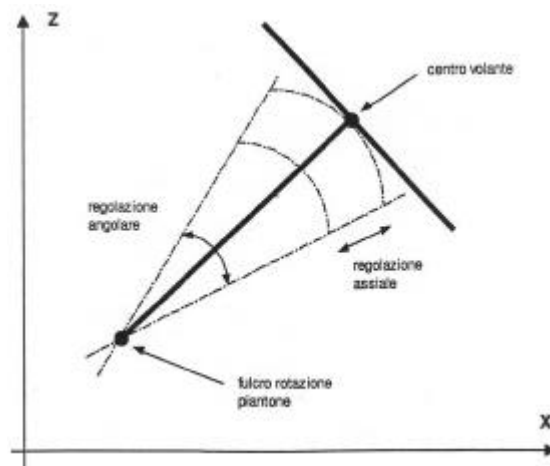


Fig. 2.67. - Parametri tipoA.

L'infittimento dei punti della griglia è variabile a seconda del numero di posizioni in senso assiale e angolare come specificato dall'utente.

- *Costruzione automatica tramite parametri geometrici di "tipo B"*: analogamente al caso precedente questa funzione consente di costruire la griglia di posizioni del centro volante schematizzata specificando i parametri della cinematica di tipo B (regolazione angolare, regolazione assiale, posizione fulcro-piantone max. avanti, posizione fulcro-piantone max. indietro) (fig. 2.68).

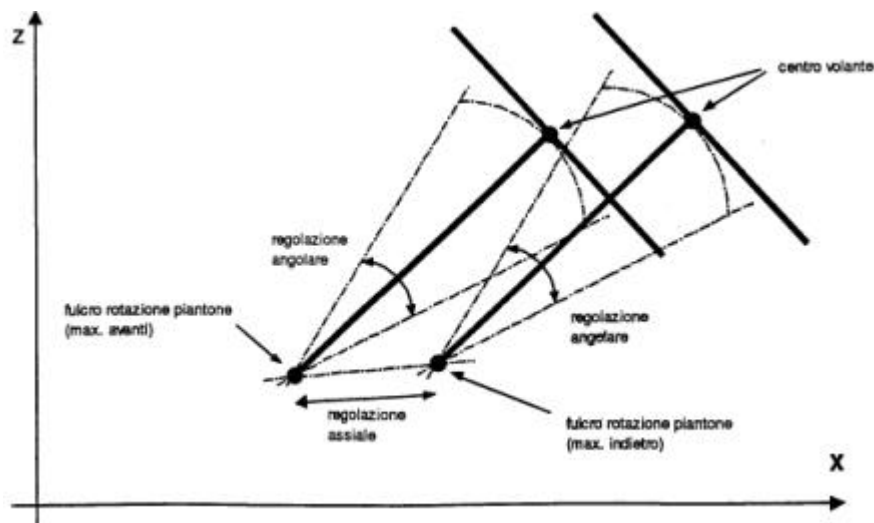


Fig. 2.68. - Parametri tipoB.

Anche per questo tipo di costruzione automatica l'infittimento dei punti della griglia dipende dal numero di posizioni in senso assiale ed angolare.

II.5.2.4 Dati acceleratore, frizione e freno

E' possibile definire due differenti modalità di calcolo: pedale fisso e pedale azionabile. Nel primo caso viene svolto il calcolo di appoggio statico del piede, su pedale a rilascio, mentre nel caso di pedale azionabile è possibile seguire l'evoluzione del movimento del piede durante tutta l'escursione del pedale. I dati da fornire sono indicati in figura 2.69.

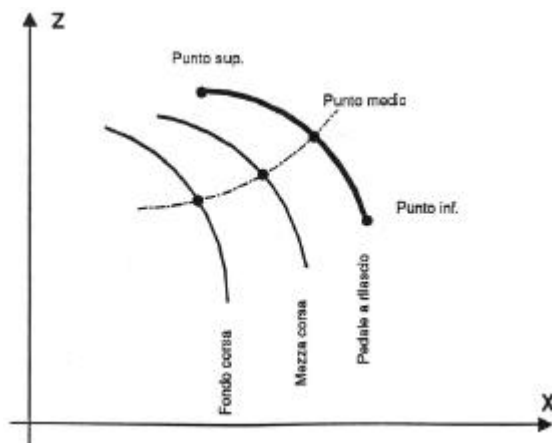


Fig. 2.69. - Dati pedali.

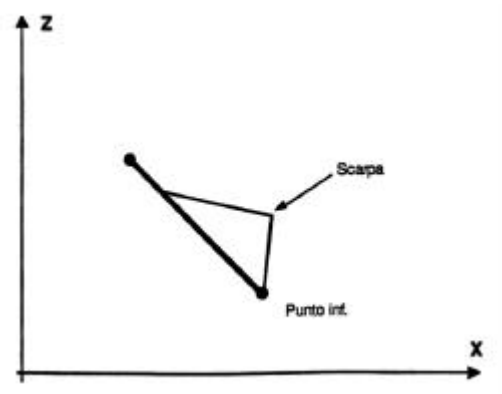


Fig. 2.70. - Punti pedana poggia piedi.

II.5.2.5 Dati pedana

La pedana poggia piedi è quotata come un segmento di retta passante per due punti. Il punto inferiore coincide con l'appoggio del tacco, ma non necessariamente con il pavimento (fig. 2.70).

II.5.2.6 Dati padiglione

Fornire i dati relativi al profilo interno del padiglione è necessario per valutare le possibili interferenze con la "aureola" del manichino (fig. 2.71).

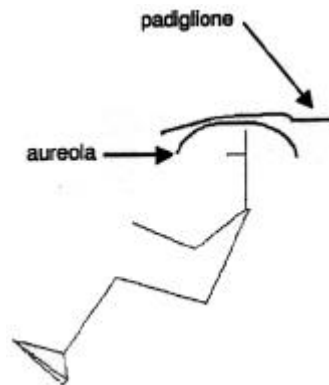


Fig. 2.71. - Padiglione definito per punti.

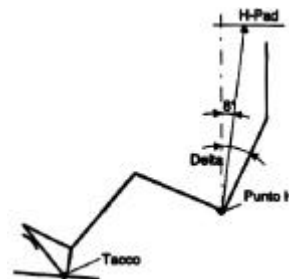


Fig. 2.72. - Padiglione approssimato.

Il padiglione può essere definito per punti, fornendo le coordinate (x,z), oppure specificando la distanza dal punto H lungo la retta inclinata di 8° rispetto alla verticale (fig. 2.72). Nel secondo caso esso viene rappresentato da un segmento di retta orizzontale.

II.5.2.7 Dati visibilità

I dati della visibilità sono utilizzati per calcolare gli angoli formati tra la linea orizzontale passante per l'occhio del manichino pilota, in posizione statica di guida, e i punti di massima ostruzione visiva verso l'esterno, misurati longitudinalmente sul piano (x,z). Gli angoli di visuale verso il basso sono utilizzati per il calcolo della minima distanza di visione del suolo stradale (punto a terra), ovvero la distanza orizzontale tra l'occhio del manichino ed il primo punto visibile del terreno (fig. 2.73). Gli angoli che concorrono al calcolo del "punto a terra" sono quelli più limitativi misurati rispetto alla base del vetro, al cofano e al volante.

Per valutare la visuale anteriore bisogna fornire (fig. 2.74):

- Punto superiore parabrezza - Punto di massima ostruzione visiva verso l'alto.
- Punto inferiore parabrezza - Punto di massima ostruzione verso il basso provocata dalla base del parabrezza.

- Punto del cofano - Limitazione verso il basso da parte del cofano anteriore.

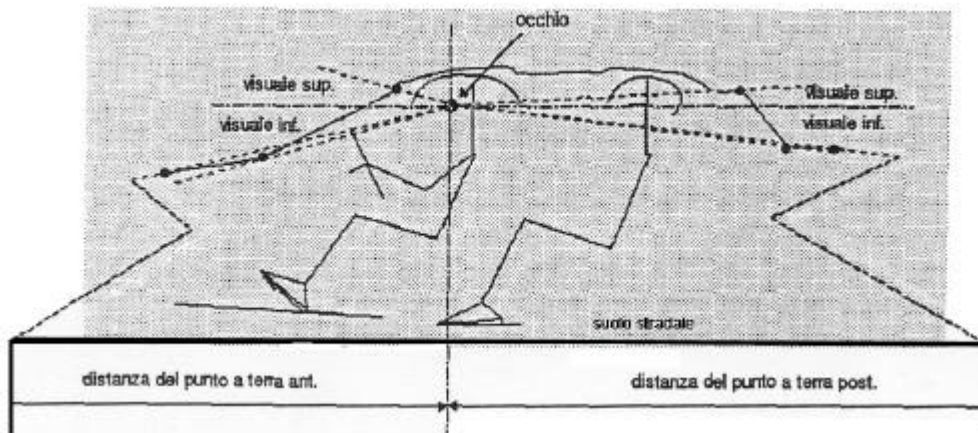


Fig. 2.73. - Distanza del punto a terra.

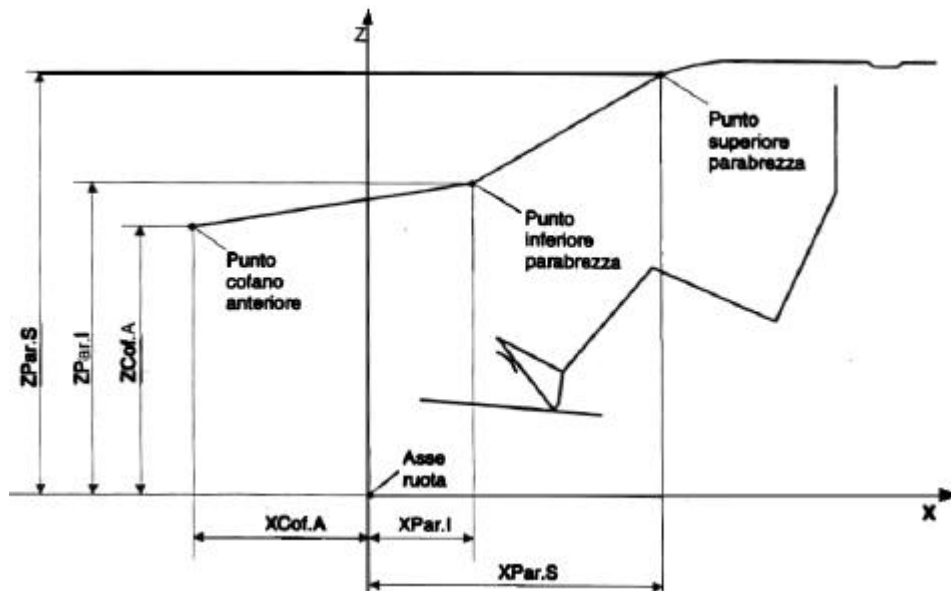


Fig. 2.74. - Dati visibilità anteriore.

Per valutare la visuale posteriore bisogna fornire (fig. 2.75):

- Punto superiore lunotto - Punto di massima ostruzione visiva verso l'alto.
- Punto inferiore lunotto - Punto di massima ostruzione verso il basso provocata dalla base del lunotto o della cappelleria.
- Punto cofano - Limitazione verso il basso da parte del cofano posteriore.

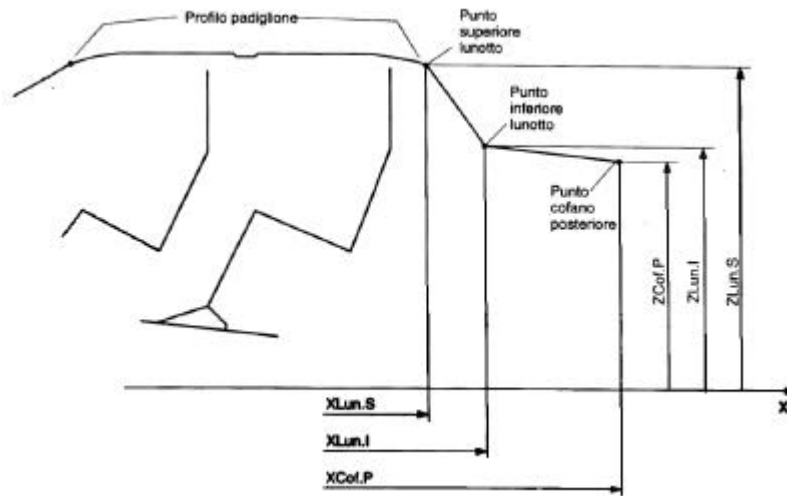


Fig. 2.75. - Dati visibilità posteriore.

II.5.3 Dati di output

Gli output forniti dal software sono:

- L'interfaccia grafica
- La mappa sedile
- Il report

II.5.3.1 L'interfaccia grafica.

Il software è dotato di un interfaccia grafica che consente di visualizzare la geometria dell'abitacolo e la postura dei manichini. Essa, inoltre, consente di interagire con questi componenti spostandoli nello spazio e di verificare istantaneamente l'effetto delle modifiche.

L'interazione con l'ambiente grafico consente di:

- Variare la posizione dei componenti della vettura, utilizzando i tasti prestabiliti dal software.
- Visualizzare il movimento del piede durante l'azionamento dei pedali.
- Verificare il lay-out corrente per le diverse stature dei manichini.

- Scegliere le entità grafiche da visualizzare quali: gamba su acceleratore a rilascio, gamba su frizione a fondo corsa, braccio su punto superiore volante, linea visuale anteriore e posteriore, nuvola punti occhio, aureole, ellisse di visibilità per differenti percentili (fig. 2.76).

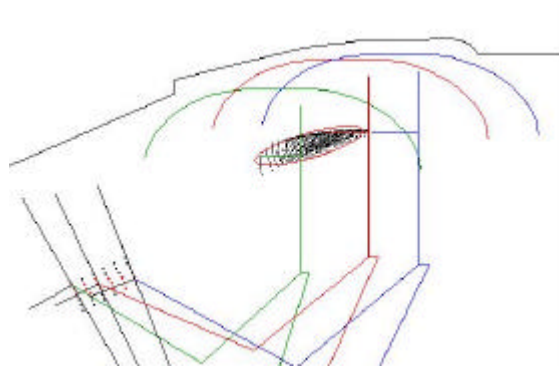


Fig. 2.76. - Nuvola punti occhio, aureola ed ellisse per diversi percentili.

- Area di raggiungibilità volante per comfort: buono (verde), discreto (blu), sufficiente (rosso) o scarso (nero) (fig. 2.77).

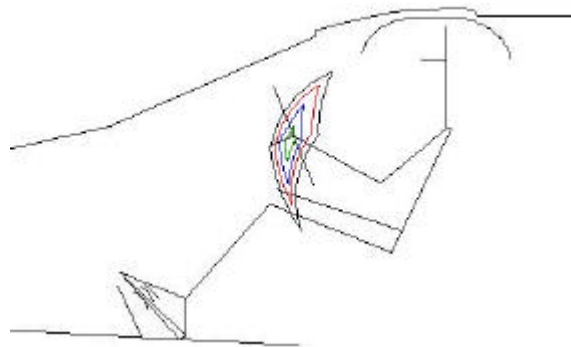


Fig. 2.77. - Area raggiungibilità volante.

- Distanza gamba volante per comfort: buono, discreto, sufficiente o scarso.
- Linea di visibilità punto superiore volante per comfort: buono, discreto, sufficiente o scarso.
- Area di raggiungibilità cambio per comfort: buono, discreto, sufficiente o scarso.

- Area di raggiungibilità freno a mano per comfort: buono, discreto, sufficiente o scarso.
- Area raggiungibilità punti plancia (pugno) per comfort: buono, discreto, sufficiente o scarso.
- Area raggiungibilità punti plancia (indice) per comfort: buono, discreto, sufficiente o scarso.

Verificare l'effetto di una modifica significa:

- Aggiornare i dati effettivi del veicolo (analogamente a quanto si potrebbe fare con le maschere di input);
- Effettuare il calcolo della ricerca posturale in base ai correnti parametri di calcolo;
- Aggiornare la rappresentazione grafica della vettura e dei manichini.
- Aggiornare la mappa degli scatti del sedile ed il report di calcolo.

II.5.3.2 La mappa sedile

La mappa degli scatti sedile è uno strumento di controllo visivo immediato del comfort posturale del manichino. Il parametro più importante per la ricerca della corretta postura di seduta è sicuramente legato alla posizione spaziale del punto H del manichino stesso. La mappa degli scatti sedile permette quindi di ottenere la "fotografia" delle condizioni posturali del manichino, in un diagramma a matrice che classifica ogni singola posizione spaziale che il punto H può assumere, con la possibilità di utilizzarla per la guida. La lista dei colori inizia dalla condizione di scatto inutilizzabile (grigio) e procede passando per le varie condizioni di comfort da verificare, fino ad arrivare al colore verde che conferma il raggiungimento di tutte le

condizioni testate. Questo scatto viene così classificato come utilizzabile per la guida, o meglio come rappresentativo di una possibile posizione del punto H che rispetti la corretta postura corporea. I colori riportati nel diagramma indicano fino a quale livello (nell'ordine esposto in legenda) si sono verificate le condizioni di comfort; ad esempio, il colore arancione indica che sono valide le condizioni fino a "schiena in comfort" ma restano escluse quelle di "testa-padiglione" e "raggiungibilità volante".

La scelta del punto H dipende dal criterio utilizzato:

- **Metodo classico** – La posizione finale del punto H è quella corrispondente allo scatto centrale tra quelli verdi, del livello più alto della mappa sedile.
- **Indice di comfort IC** - La posizione del punto H è quella relativa allo scatto sedile (tra quelli che consentono l'assetto corporeo in comfort) che ha ottenuto un I.C. più alto. L'I.C. è calcolato sugli aspetti di "raggiungibilità volante" e "visuale anteriore esterna", e dipende dai seguenti parametri:
 - angolo della spalla;
 - angolo del gomito;
 - distanza tra esterno coscia e bordo inferiore del volante;
 - angolo di visuale sul punto superiore del volante;
 - angolo di visuale inferiore;

L'I.C., quindi, non influisce sulla determinazione degli scatti utilizzabili che rimane identica al metodo classico, ma è utilizzato per scegliere il punto dell'area che costituisce il miglior compromesso in termini di raggiungibilità volante e visibilità esterna. Infine, la posizione finale individuata dall'I.C. più

alto, non implica necessariamente una buona raggiungibilità del volante o una buona visibilità, ma indica solamente il valore migliore tra quelli calcolati.

II.5.3.3 Il report dei risultati

Il codice di calcolo fornisce i risultati in forma numerica. Essi sono: coordinate dei punti caratteristici, valori di angoli e distanze. A queste ultime due entità, a seconda dello scostamento dal valore di target, viene attribuita una delle seguenti valutazioni: buono, discreto, sufficiente, scarso. In particolare le grandezze fornite in output dal software possono essere classificate come: dati relativi al posizionamento scelto (punto H); punti e angoli della gamba destra appoggiata sull'acceleratore a rilascio; raggiungibilità frizione; raggiungibilità pedana appoggio piede sinistro; punti relativi alla parte superiore del manichino; raggiungibilità volante; visibilità anteriore; visibilità posteriore; movimentazione della gamba su frizione e freno.

II.5.3.4 Le opzioni di calcolo

L'applicativo consente di scegliere differenti opzioni di calcolo, a seconda dello studio che si vuole condurre. Esse riguardano:

- Scelta del percentile da esaminare – Può essere scelto un solo percentile, tutti i percentili (41), o una scala ridotta (7).
- Spessore del tacco – Consente di variare l'altezza del tacco del manichino. Essa rimane invariata per tutte le stature dei manichini.
- Condizioni di comfort – Scelta del livello di comfort relativo al manichino utilizzato per il calcolo dell'assetto corporeo. Bisogna scegliere una delle seguenti valutazioni: buono, discreto, sufficiente, scarso.

- Vincolo su comfort volante – Come detto nel paragrafo precedente, l’area degli scatti utilizzabili per il posizionamento del punto H è effettuata, indipendentemente dal criterio di scelta della posizione finale, considerando unicamente la postura statica di seduta del guidatore. Scegliendo questa opzione, invece, la scelta degli scatti utilizzabili viene effettuata tenendo conto non solo del comfort posturale di seduta ma anche del rispetto degli ambiti angolari previsti per una buona raggiungibilità del volante. Di conseguenza si ha una diversa area di distribuzione degli scatti utilizzabili cioè della forma dell’area dei punti verdi, che risulterà in particolare più piccola. Il controllo sul “vincolo del volante” comprende il rispetto dei seguenti parametri:
 - Angolo della spalla
 - Angolo del gomito
 - Distanza tra esterno gamba e bordo inferiore corona
 - Angolo di visuale rispetto al bordo superiore corona
 - Angolo di visuale esterna inferiore
- Metodo di scelta del punto H – Come già detto nel paragrafo precedente è possibile scegliere tra due differenti metodi: metodo classico e metodo dell’Indice di Comfort (IC).
- Popolazione – E’ possibile selezionare differenti tipologie di manichini. Si hanno tre versioni della popolazione di riferimento:
 - HS-V2000: manichini Human Scale aggiornati secondo la previsione di crescita degli anni 2000.
 - HS-V90: manichini Human Scale aggiornati secondo la previsione di crescita degli anni ‘90.

- HS-OLD: manichini Human Scale nella versione originale.
- Frizione – Si possono scegliere i criteri di raggiungibilità della frizione premuta, in termini di ambiti angolari della caviglia. E' possibile delimitare gli estremi angolari ammessi, nel seguente modo:
 - Comfort: la frizione deve essere premuta mantenendo l'angolo della caviglia compreso entro l'ambito di comfort.
 - Limiti articolare: il pedale può essere premuto sfruttando l'escursione angolare massima della caviglia fino ai limiti dell'articolazione.
- Pesi – Questa funzione riguarda il calcolo dell'indice di comfort Fiat. A tutti i parametri utilizzati per la valutazione dell'I.C. non può essere attribuita la stessa importanza, in quanto ciò non è rispondente alla realtà. Normalmente, infatti, i soggetti attribuiscono ad esempio un peso maggiore alla caviglia piuttosto che al ginocchio, alla spalla rispetto al gomito. Per ovviare a tali problemi sono stati introdotti dei coefficienti moltiplicativi chiamati "pesi", che consentono di differenziare l'importanza che i vari parametri assumono nel calcolo dell'indice di comfort.

II.6 CONFRONTO TRA LE METODOLOGIE SAE E FIAT PER L'ANALISI ERGONOMICA

Lo scopo di questo paragrafo è quello di condurre un'analisi teorica finalizzata a mostrare i differenti criteri con cui le due metodologie, SAE e FIAT, descritte nei precedenti paragrafi, valutano l'abitabilità di un veicolo.

La SAE fornisce delle curve e superfici *task oriented* (fig. 2.78) ottenute analizzando un campione rappresentativo della popolazione utente nord-americana, in differenti abitacoli relativi ad un ampio range di veicoli.

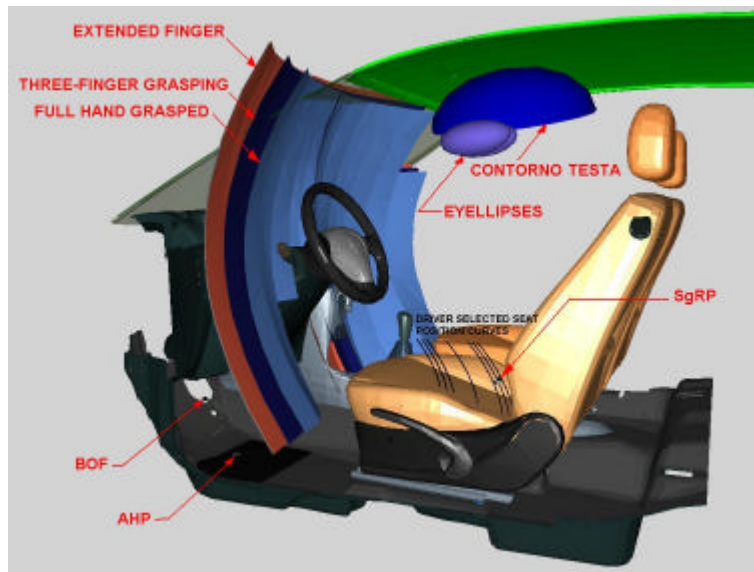


Fig. 2.78. - Curve task oriented SAE.

Queste superfici delimitano una regione di spazio in cui è contenuta una prefissata percentuale delle parti del corpo esaminate. Ad esempio, il “contorno testa” definisce una zona dell’abitacolo in cui è contenuta il 95 o 99% (a seconda della superficie considerata) delle teste dei conducenti; le superfici di “raggiungibilità della mano” definiscono un’area accessibile al 95% dei guidatori, con differenti impugnature (*extended finger, three-finger grasping, full hand grasped*); le curve “*driver selected seat position*” determinano le zone dell’abitacolo in cui sono contenuti il 2.5, 5, 10, 50, 90, 95 e 97.5 % dei punti H dei conducenti; “le *eyellipses*” delimitano una regione di spazio in cui si posizionano il 95 o 99% degli occhi dei guidatori (a seconda della superficie considerata).

Le curve e superfici *task oriented*, quindi, una volta posizionate sono utili per valutare se un abitacolo sia stato progettato in modo ergonomico. Attraverso il loro impiego, infatti, è possibile evidenziare potenziali interferenze tra la struttura e il corpo del conducente, verificare se i comandi sono stati posizionati correttamente e se la corsa sedile è stata bene proporzionata. E’ possibile determinare anche

l'ostruzione visiva sul guidatore causata dalle varie parti del veicolo come montanti anteriori e posteriori, sterzo e cofano.

Si può notare che le dimensioni delle curve e superfici *task oriented* sono indipendenti dalla particolare geometria dell'abitacolo, esse infatti risultano definite una volta fissata la percentuale di popolazione da accomodare (95 o 99%) e la corsa orizzontale del sedile (minore o maggiore di 133mm). Ciò che varia, invece, è la loro posizione rispetto all'abitacolo.

La metodologia SAE non determina l'effetto sulla postura del conducente causata da una fissata configurazione di seduta, e quindi non introduce nessun indice di comfort per definire la gradevolezza di un abitacolo.

In FIAT, invece, l'abitabilità di un veicolo è valutata andando a posizionare manichini bidimensionali, rappresentativi dei differenti percentili del corpo umano, nella vista laterale dell'abitacolo (fig. 2.79) e attribuendo ad ognuno di essi un certo valore dell'indice di comfort (I.C.). Quest'ultimo dipende dalla misura degli angoli formati tra i vari segmenti del manichino in assetto di guida; in particolare dallo scostamento di ogni angolo dal corrispondente valore di target. Per ogni manichino, infatti, vengono determinate le differenti posture assunte muovendo il sedile lungo tutta la corsa, e valutati i rispettivi I.C. La posizione ottimale è quella che ha l'I.C. più alto. Determinata questa, vengono poi tracciate le "aree di raggiungibilità", ottenute movimentando i segmenti che costituiscono il braccio all'interno dei limiti articolari. In seguito sono valutate le distanze tra le varie parti del corpo e la struttura, le posizioni dei comandi e gli angoli caratteristici del campo visivo. Ripetendo tale procedura per ogni percentile, è possibile definire l'abitabilità del veicolo per ognuno

di essi, e quindi determinare la fascia di popolazione posizionata confortevolmente all'interno dell'abitacolo.

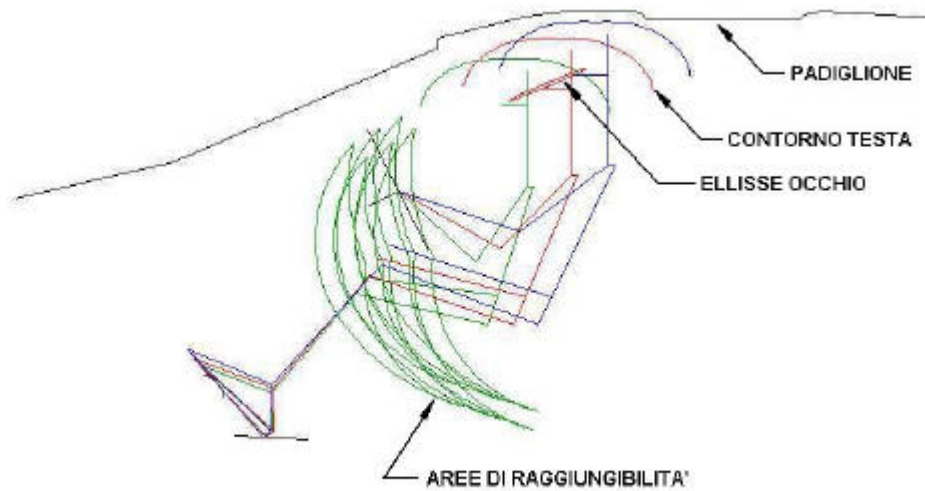


Fig. 2.79. - Curve e manichini del software 2D impiegato dalla FIAT.

Si può notare che le forme e le dimensioni delle “aree di raggiungibilità” dipendono dalla geometria dell'abitacolo e dal manichino prescelto.

Da quanto scritto si può capire come sia differente il modo in cui è condotta l'analisi ergonomica del veicolo secondo le due metodologie: l'una infatti considera curve e superfici *task oriented* tridimensionali ottenute analizzando soggetti umani, l'altra valuta solo l'abitabilità longitudinale, utilizzando manichini bidimensionali di diversi percentili che simulano l'uomo all'interno dell'abitacolo.

Capitolo III

IMPIEGO DEI MANICHINI VIRTUALI NELLA PROGETTAZIONE ERGONOMICA DELL'AUTOVEICOLO

III.1 INTRODUZIONE

Per progettare gli interni di un autoveicolo nel rispetto degli obiettivi di *comfort* ergonomico, si può ricorrere fin dalle fasi preliminari all'utilizzo dei manichini virtuali, con i quali è possibile simulare i vari *task* compiuti dal guidatore e dai passeggeri. Un manichino virtuale è costituito da un modello realistico dell'essere umano dotato di un proprio scheletro e di numerosi punti di giuntura. Le dimensioni dei segmenti corporei sono ricavate da banche dati antropometriche grazie alle quali è possibile rappresentare i diversi percentili della popolazione umana.

Attraverso questi software il progettista è in grado di valutare, prima della realizzazione di alcun prototipo fisico, la leggibilità e la facilità d'uso della strumentazione, lo spazio a disposizione per testa, spalle, braccia, gambe e ginocchia e l'accessibilità in vettura. E' inoltre possibile effettuare analisi ergonomiche particolareggiate in merito agli sforzi sostenibili dall'uomo nell'atto di compiere determinate azioni.

In questo capitolo verranno brevemente illustrate le funzionalità e le caratteristiche dei principali manichini virtuali in commercio, Ramsis della Human Solution – Tecmath e Jack della EAI-UGS, focalizzando, in particolare, la discussione sui modelli cinematici ed antropometrici su cui si basano i due manichini e sulle differenti metodologie di impiego. In particolare, al fine di evidenziare le potenzialità offerte da tali software nei confronti dell'approccio tradizionale basato sull'impiego di modelli bidimensionali, verranno descritti due studi comparativi condotti rispettivamente con Ramsis e con Jack.

III.1.1 Scelta del modello cinematico umano per le esigenze della progettazione automobilistica

Il corpo umano è comunemente rappresentato negli studi ergonomici e biomeccanici come una catena aperta di parti rigide. Una classica rappresentazione del corpo umano proposta da *Dempster* [53] era costituita da 13 segmenti planari, includendo un singolo segmento che andava dalle pelvi alla testa. Più recentemente *Nussbaum* e *Chaffin* [54] hanno proposto un modello più evoluto che prevedeva una modellazione tridimensionale abbastanza accurata della colonna vertebrale. Per applicazioni automobilistiche, sono stati largamente utilizzati due modelli cinematici: quello proposto dalla SAE [31], ampiamente discusso nel precedente capitolo, e quello, utilizzato per test dinamici, proposto nell'*Antropomorphic Test Device (ATDs)* [55]. Un modello abbastanza evoluto, impiegato principalmente per lo sviluppo dei sedili delle automobili, è *The John Model* [56] il quale permette di riprodurre abbastanza accuratamente il complesso moto della colonna vertebrale per mezzo di sei giunti lombari.

Il grosso problema che si riscontra nello sviluppo di nuovi prototipi è con quanta approssimazione si devono riprodurre le articolazioni umane per avere un modello che rappresenti fedelmente, nel grado di complessità richiesto dall'analisi, il comportamento umano; infatti, utilizzando un modello troppo semplificato non si riesce ad avere una buona riproduzione del moto del corpo, invece, considerando il caso opposto, si ha un'eccessiva ed inopportuna complicazione del modello. La chiave determinante della complessità del modello per questo tipo di applicazione è che la struttura deve correttamente rappresentare i cambiamenti della postura in

accordo col *layout* dell'abitacolo e del sedile modificando solo i gradi di libertà rotazionali senza, per esempio, modificare la lunghezza degli arti.

Una questione fondamentale nel creare nuovi modelli è la collocazione dei giunti umani all'interno del manichino. Il problema consiste nel determinare le relazioni tra le superfici anatomiche di riferimento e la geometria interna dello scheletro al fine di trasferire le informazioni, raccolte sulla stessa superficie, all'interno del corpo per l'individuazione dei giunti. In passato tale problema è stato affrontato utilizzando le radiografie di cadaveri [53] o radiografie di volontari in differenti posture [57]. Nel prossimo paragrafo verrà spiegato come tale problema è stato affrontato nella definizione del modello cinematico del manichino Ramsis.

III.2 RAMSIS

Ramsis è stato sviluppato in Germania, a partire dal 1986, grazie alla spinta delle principali industrie automobilistiche tedesche e delle industrie manifatturiere di sedute. Tale software può essere definito come uno strumento CAD-3D per la progettazione ergonomica, con possibilità d'applicazione sia nella progettazione degli interni di automobili, che delle postazioni di lavoro. Le case automobilistiche e le industrie che contribuirono alla sua realizzazione furono l' *Audi*, la *BMW*, la *Ford*, la *Mercedes*, la *Opel*, la *Porche* e la *Volkswagen* oltre alle industrie di sedute *Keiper-Reicar* e *Naue-Johnson controls*. Il suo utilizzo iniziò nel 1993 ad opera delle suddette industrie e la sua distribuzione a livello mondiale risale al marzo del 1995 ad opera della *TECMATH*.

Per tale applicativo è stato definito un sistema di misura completamente nuovo che permette di rilevare contemporaneamente dati antropometrici e dati sulla postura

e sul moto. L'idea concettualmente nuova che distingue il manichino proposto nel software *Ramsis* dagli altri modelli umani sta nella sua capacità di usare lo stesso modello come stima per le misure antropometriche. Tale procedura è composta di due passi:

- 1 La persona da misurare è ripresa con una videocamera CCD e le immagini sono trasformate in formato digitale per poi essere lette da un computer (figura 3.1).
- 2 Le grandezze antropometriche sconosciute del modello sono sistematicamente variate fin quando le immagini del modello tridimensionale ricalcano pienamente quelle dei soggetti in esame [58].

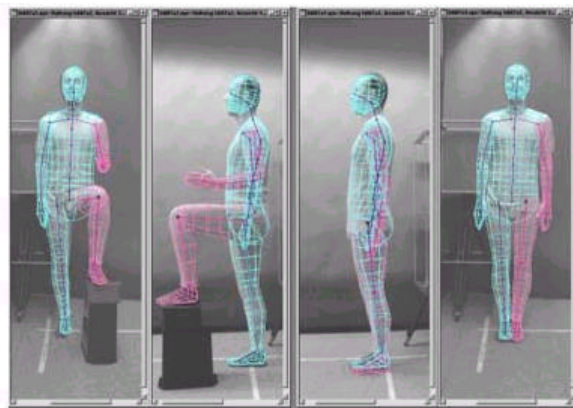


Fig. 3.1. - Registrazione dei dati antropometrici.

III.2.1 Struttura del manichino Ramsis

Così come in un uomo la modellazione delle superfici del corpo ne definisce l'aspetto esteriore, mentre lo scheletro e la muscolatura ne permettono la mobilità, allo stesso modo *Ramsis* è stato creato mediante un modello di definizione per le superfici esterne ed uno per quelle interne. Il manichino, infatti, è costituito di uno "scheletro" con "pelle" attaccati dinamicamente utilizzando "un approccio esterno-interno". Con tale filosofia non si è tentato tanto di costruire un modello che ricalcasse quanto più possibile lo scheletro umano, ma una struttura che, in generale,

riproducesse, sulla base di informazioni raccolte con le telecamere, il moto dell'uomo nel modo più fedele possibile. In tal modo lo scheletro di *Ramsis* si avvicina a quello umano ma l'esatta locazione dei giunti non è stata determinata con degli studi antropometrici ma con l'ausilio dell'analisi delle posture che di volta in volta erano assunte dalle persone.

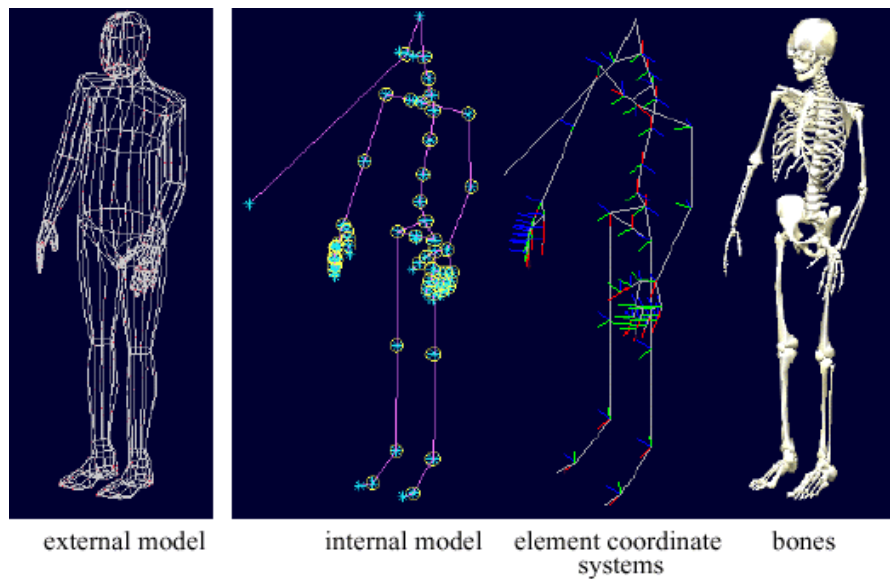


Fig. 3.2. - Struttura del manichino *Ramsis*.

La struttura (figura 3.2) su cui si basa il manichino è composta di 54 elementi (vedi tabella 3.1) e presenta 6 gradi di libertà esterni (traslazione e rotazione), e 99 gradi di libertà interni (angoli di ciascun giunto).

Parti del corpo	Numero degli elementi
Pelvi	1
Tronco(busto)	6
Petto	1
Testa	2
Braccio dx	3
Mano dx	15
Braccio sx	3
Mano sx	15
Gamba dx	2
Piede dx	2
Gamba sx	2
Piede sx	2

Tab. 3.1. – Struttura del manichino *Ramsis*.

Per quanto riguarda la pelle essa è costituita da un'interpolazione ellittica di 1200 punti di controllo (figura 3.3), la cui legge varia a seconda delle parti del corpo che si stanno modellando.

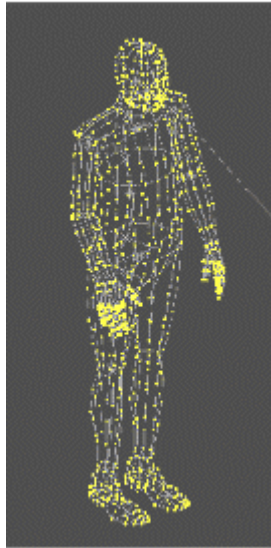


Fig.3.3. - Rappresentazione dei punti di controllo.

III.2.2 Definizione dei modelli antropometrici in Ramsis

In fase di progettazione, generalmente, si mira a fornire un buon *layout* che soddisfi non la singola persona, ma gran parte della popolazione utente, scartando, per comprensibili ragioni di costo, i casi limite. Spesso le problematiche concernenti le dimensioni del corpo, legate intimamente alle specifiche di progetto, sono ridotte alla sola considerazione della statura del corpo umano. Questo tipo di approccio ha il grosso vantaggio che le complicate analisi e considerazioni tipiche di un problema statistico multivariabile possono essere sostituite da un più semplice problema monodimensionale [59].

Nel caso monodimensionale, c'è il concetto di percentile che permette di legare facilmente le dimensioni del corpo ad una precisa classe di utenti essendo l'a-

percentile di una variabile antropometrica (per esempio la statura) il valore a di tale variabile che gode delle seguenti proprietà:

- La corrispondente misura antropometrica dell' $a\%$ di tutta la popolazione è minore o uguale ad a .
- La corrispondente misura antropometrica del $(100-a)\%$ di tutta la popolazione è maggiore di a .

Evidentemente, per molti problemi di progettazione, la riduzione ad una sola variabile non è adeguata. Per un approccio multivariabile non ha senso parlare di percentile: due numeri reali possono essere confrontati tra loro, si può affermare che $a > b$ o il contrario; tale proprietà si perde allorché si passa ad analisi multi dimensionali; per esempio non è possibile affermare, in relazione a punti appartenenti ad un piano, che l'uno è minore dell'altro o viceversa.

Per tenere conto di tutte le possibili combinazioni antropometriche, allora, si è introdotto il concetto di “variazione condizionata” delle grandezze. Con questa nuova metodologia, non si va ad agire direttamente sul valore delle grandezze ma se ne restringe il campo di utilizzo, vincolandolo alla dimensione di un'altra variabile [60]. Fondandosi su tali convinzioni la *Tecmath* [59] ha condotto una laboriosa fase di raccolta ed analisi di informazioni sperimentali, basandosi su dati antropometrici della popolazione tedesca, giungendo alla conclusione che una buona caratterizzazione del corpo umano la si può ottenere sfruttando tre sole grandezze antropometriche, indipendenti tra loro, definite anche “*dimensioni caratteristiche*”:

- 1) Altezza del corpo
- 2) Rapporto tra statura ed altezza da seduto
- 3) Circonferenza della vita

Inoltre è stato anche provato che il proporzionamento del modello umano mediante le suddette grandezze risulta essere soddisfacente, indipendentemente dalla nazionalità considerata, permettendo, così, di definire un cosiddetto *Ramsis Typology*.

Una volta stabilite le tre grandezze di sopra, tutte le restanti dimensioni del corpo, definite anche “*misure dipendenti*”, sono fissate in modo da essere le più probabili. La procedura per definire la tipologia di modello umano è suddivisa in due fasi distinte:

- una volta scelto il sesso bisogna scegliere il percentile della statura tra (fig. 3.4):
 - Molto alto: limite inferiore della statura = 87° percentile.
 - Alto: limite inferiore della statura = 80° percentile.
 - Medio: limite inferiore della statura = 20° percentile.
 - Basso: limite inferiore della statura = 13° percentile.
 - Molto basso: non ci sono limiti inferiori.

il valor medio all'interno dei sottogruppi molto alto, medio e molto basso, è approssimativamente il 95°, il 50° e il 5° percentile della statura.

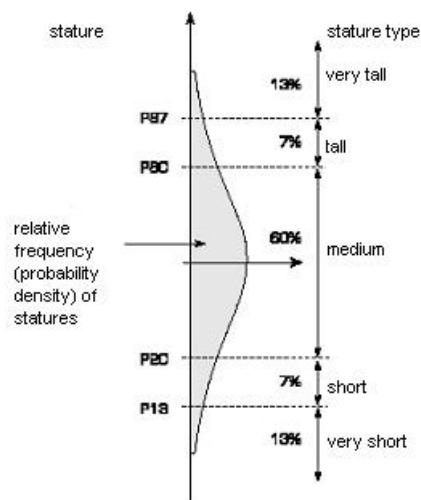


Fig. 3.4. - Definizione del *Ramsis Typology* attraverso la statura.

- nella seconda fase ciascuno dei 5 gruppi è suddiviso in altri 3x3 sottogruppi in accordo all'altezza da seduto (torso breve, torso medio, torso lungo) e alla circonferenza della vita (vita sottile, vita media, vita larga). In tal modo utilizzando questi ulteriori sottogruppi, si riesce a coprire l'82% delle persone per una data statura ed allo stesso tempo si ha una possibile variazione della stessa che va dal 3° al 97° percentile [59].

Il software, inoltre, per garantire una piena libertà di modellazione, offre anche la possibilità di proporzionare, liberamente e senza ogni sorta di vincolo antropometrico, il corpo umano attraverso la funzione *free scaling*.

III.2.3 Analisi ergonomica del posto guida

Per ottenere una valutazione oggettiva di quelli che possono essere i dati provenienti da un'analisi ergonomica del posto guida effettuata col software Ramsis, è stato condotto uno studio su di un modello matematico semplificato dell'interno di un autoveicolo in modo tale da poterne confrontare i risultati con quelli provenienti dall'applicativo 2D le cui caratteristiche sono state illustrate nel paragrafo II.5. A tal scopo si è tentato di adeguare il più possibile il manichino *Ramsis* a quello *Human Scale* (cfr. par. II.5). Inizialmente è stata effettuata una comparazione delle definizioni delle grandezze antropometriche in esame per stabilirne eventuali differenze [62], [63]. L'analisi condotta ha mostrato che, nella quasi totalità dei casi, le misure in esame sono pienamente compatibili, permettendo, in via teorica, una perfetta modellazione del manichino poiché la lunghezza delle varie parti del corpo non è riportata come distanza tra i giunti, ma tiene conto anche della presenza del muscolo e della pelle. In particolare mediante il tool *free scaling* del *BodyBuilder*, si

sono potute scalare tutte le misure delle varie parti del corpo in maniera tale da avere una perfetta corrispondenza tra i due manichini. Nella fig. 3.5. sono evidenziate, in rosso e in viola, le misure che sono state oggetto di modifiche.

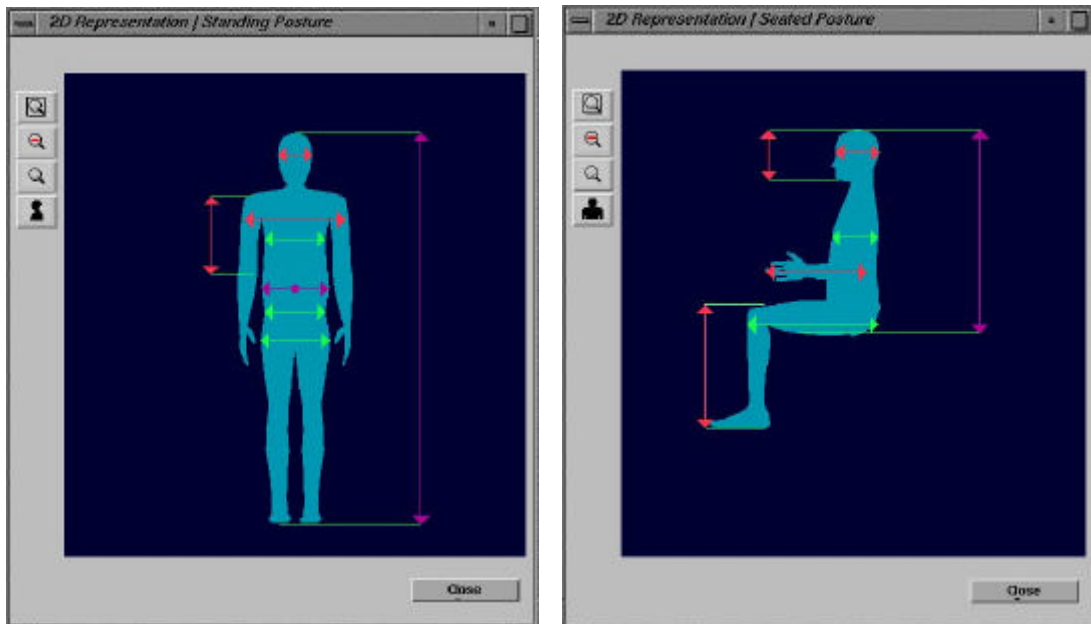


Fig. 3.5. – Modifica alle misure antropometriche nel software Ramsis.

In particolare sono state modificate le seguenti misure:

- Altezza totale
- Altezza da seduto
- Altezza della testa
- Lunghezza frontale della testa
- Lunghezza trasversale della testa
- Distanza tra le spalle
- Braccio
- Avambraccio
- Altezza del ginocchio da seduto
- Altezza della caviglia

Seguendo tale procedura sono stati modellati i manichini relativi al 2.5°, al 50° ed al 97.5° percentile secondo i dati riportati nella seguente tabella (le misure sono espresse in mm).

Misura antropometrica	97.5° percentile	50° percentile	2.5° percentile
Altezza totale	1880	1748	1615
Altezza da seduto	972.8	909.2	840.7
Altezza della testa	221	236.2	215.9
Lunghezza frontale della testa	165.4	154.9	144.8
Lunghezza trasversale della testa	208.3	195.5	185.4
Distanza tra le spalle	491.7	450.9	409.8
Braccio	375.7	346.7	329.6
Avambraccio(inclusa la mano)	519.2	478.1	433.6
Altezza del ginocchio da seduto comprensiva della scarpe	613.2	549.7	505.6
Altezza della caviglia	94	89	81

Tab. 3.2. - Misure antropometriche dei tre percentili.

III.2.3.1 Costruzione del modello CAD

Il modello matematico oggetto di studio (fig. 3.6) è stato creato con il software CAD CATIA della Dassault System.

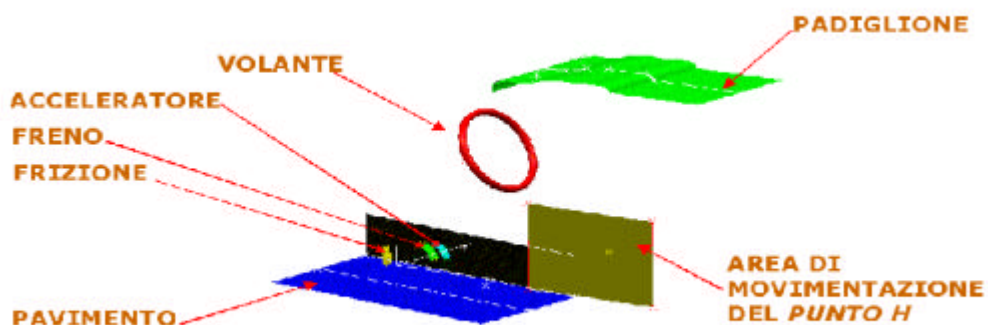


Fig. 3.6. – Modello CAD semplificato del posto guida.

La scelta di tale applicativo non risulta essere casuale in quanto la versione del software Ramsis utilizzata è integrata all'interno di CATIA (fig. 3.7). La possibilità di avere un *tool* ergonomico direttamente integrato in ambiente CAD offre il grosso vantaggio di evitare la gestione di protocolli di riferimento per lo scambio dati tra l'ambiente CAD e l'ambiente di simulazione ergonomica, pagando però un prezzo in termini di tempi di simulazione che risultano notevolmente allungati.

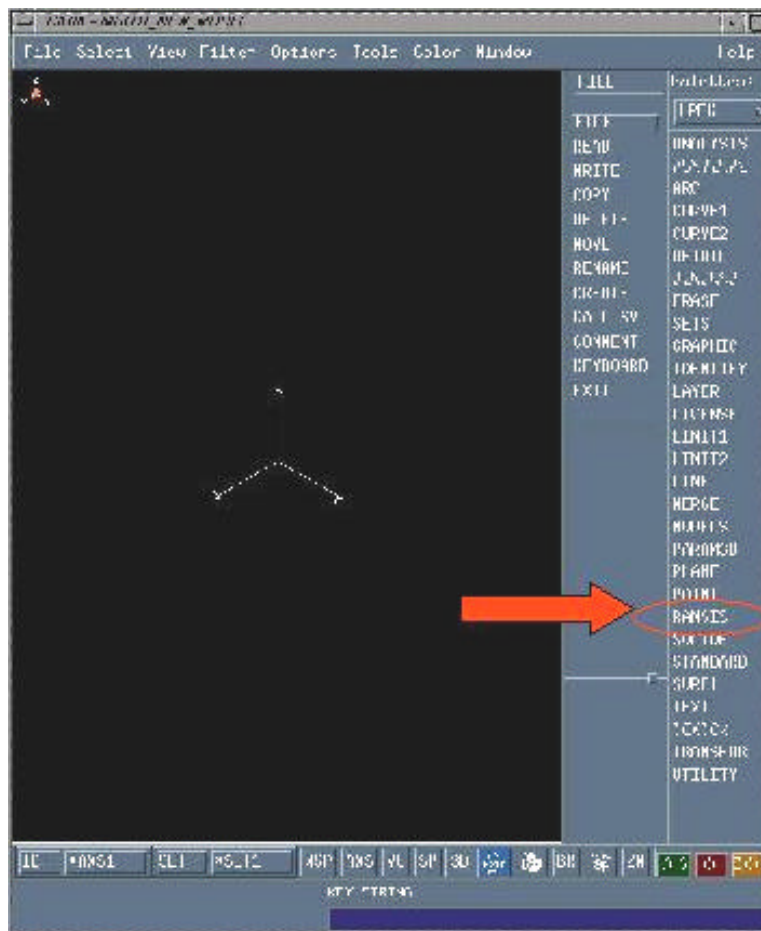


Fig. 3.7. – Il *tool* Ramsis all'interno di CATIA.

III.2.3.2 Definizione dei vincoli cinematici

La strada seguita nell'imporre le restrizioni necessarie al posizionamento del manichino è stata quella di utilizzare vincoli non troppo restrittivi in maniera tale da

non condizionare fortemente ed in modo inappropriato l'algoritmo di calcolo del *software*. Sono state definite, quindi, ampie aree di movimentazione dei punti caratteristici del manichino (AHP, BOF e punto H) in modo tale da lasciare piena libertà al *software* sul posizionamento di tali punti.

Nella definizione dei vincoli si è lasciata piena libertà di traslazione alle pelvi lungo i tre assi, mentre se ne è bloccata la torsione; si è, altresì, imposto la condizione di appartenenza tra le superfici interne delle mani con due punti caratteristici del volante. Per riprodurre una corretta postura di guida, che seguisse le direttive vigenti, si è imposto, altresì una condizione di minima distanza (100 mm) tra la testa ed il padiglione. I vincoli imposti sono sinteticamente riportati nella seguente tabella:

Parte del corpo	Vincoli
Punto H	Condizione di appartenenza all'area di movimentazione
Punto tacco dx (AHP)	Condizione di tangenza con il tappeto
Punto tacco sx	Condizione di tangenza con il tappeto
BOF	Condizione di tangenza con la superficie dell'acceleratore
Suola della scarpa sx	Condizione di tangenza con la superficie della frizione
Superficie interna della mano sx	Condizione di tangenza alla superficie del volante
Superficie interna della mano dx	Condizione di tangenza alla superficie del volante
Estremo superiore della testa	Condizione di minima distanza (100 mm) dal padiglione
Pelvi	Torsione: bloccata
Pelvi	Traslazione lungo X,Y,Z: permessa

Tab. 3.3. - Definizione dei vincoli geometrici.

Una volta definiti i vincoli è possibile lanciare la simulazione al fine di ottenere il posizionamento del manichino (vedi fig. 3.8).

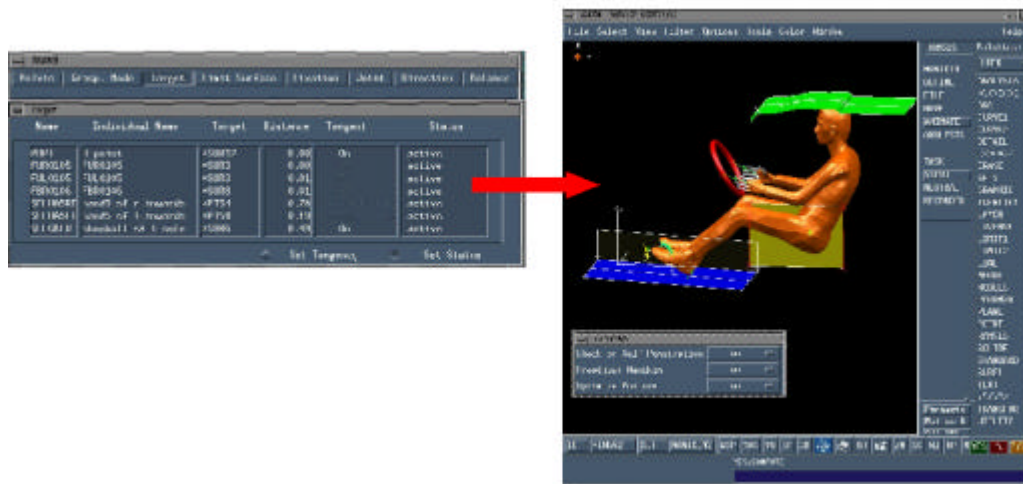


Fig. 3.8. Posizionamento del manichino Ramsis.

III.2.3.3 Metodologie di simulazione

Nel corso dell'analisi del *software* gli sforzi sono stati orientati alla determinazione di una metodologia di simulazione che fosse ripetibile e che assicurasse il corretto posizionamento del manichino. A tal fine si è indagato sull'influenza della scelta del *punto caratteristico* per l'esecuzione della simulazione, e sull'influenza della *postura iniziale* sul posizionamento finale del manichino.

III.2.3.3.1 Scelta del punto caratteristico

Inizialmente si è testato il diverso comportamento dell'applicativo scegliendo come punto caratteristico della simulazione alternativamente il centro del giunto dell'anca (*GHZ*) ed il punto H (*PHPT*). Nel grafico seguente (fig. 3.9) è mostrata, nei due casi, la distanza dei punti del corpo dai *target* imposti.

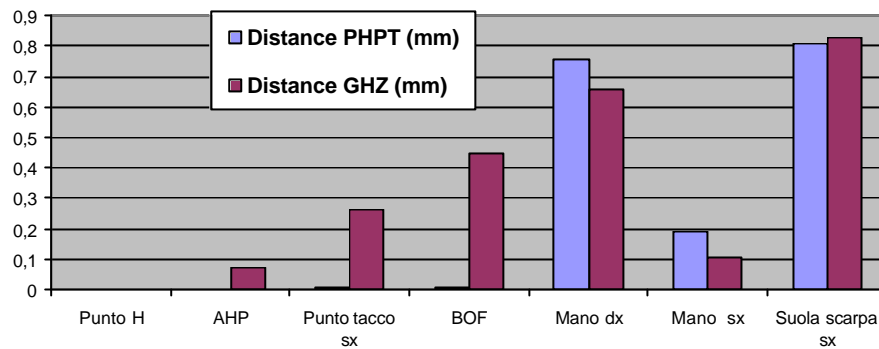


Fig. 3.9. – Confronto dei punti caratteristici in base al rispetto dei target.

Come si nota chiaramente dalla figura, la simulazione che assicura i risultati più accurati è quella in cui si sceglie come punto caratteristico il punto H anche se per tutti i punti si nota una distanza inferiore al millimetro. Oltre al posizionamento del manichino sono state valutate le eventuali differenze di comfort tra le due diverse configurazioni (vedi fig. 3.10).

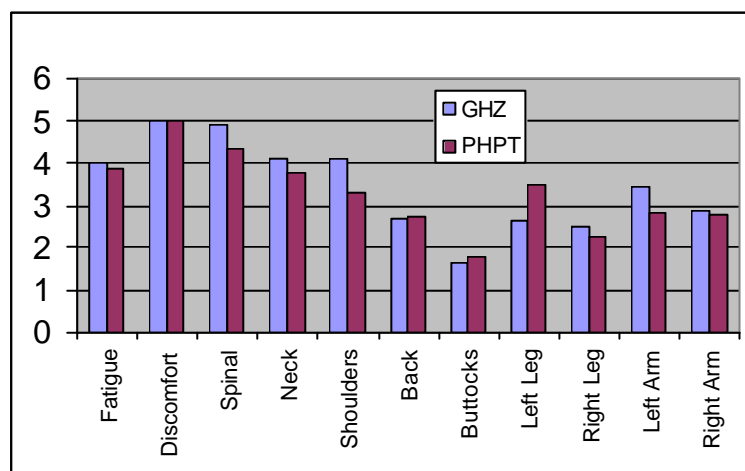


Fig. 3.10. – Confronto dei punti caratteristici in base al comfort.

I risultati migliori si raggiungono, ancora una volta, definendo come punto caratteristico della simulazione il punto H (PHPT).

Basandosi su tali risultati, nell'eseguire tutte le successive simulazioni si è, allora, scelto di considerare il punto H come *punto caratteristico* di default.

III.2.3.3.2 Scelta della postura iniziale

Per una giudizio completo sull'applicativo si è inoltre testato, se, ed in quale misura, la postura iniziale del manichino influenza la posizione finale raggiunta a valle della simulazione.

Come posture iniziali sono state scelte quella di default del software (*Neutral Posture* = postura A) ed un'altra (postura B) ottenuta imponendo, a priori, il rispetto dei vincoli. In particolare, sono state eseguite delle simulazioni per ognuno dei tre percentili con le due diverse posture iniziali. I risultati di tali analisi sono riportati nelle seguenti figure.

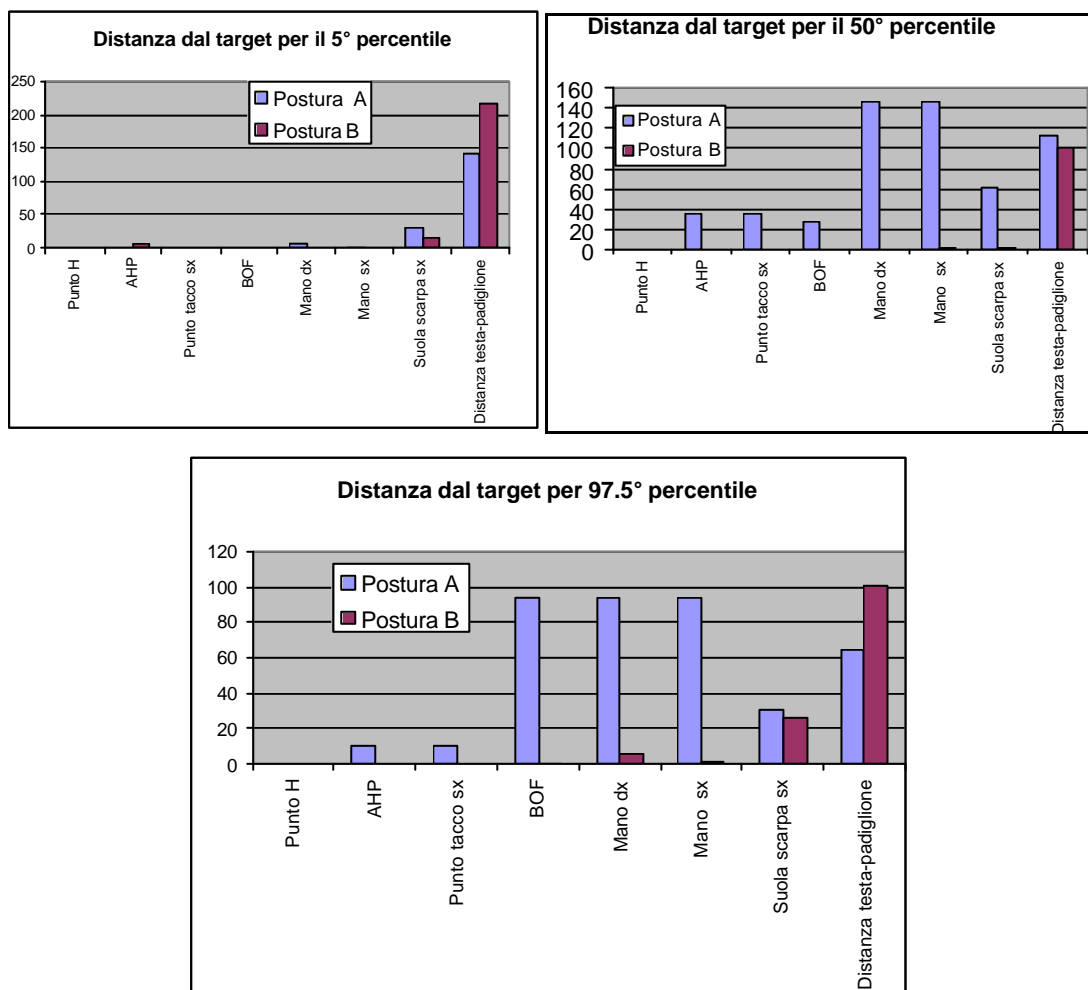


Fig. 3.11. - Confronto delle posture iniziali in base al rispetto dei target.

Tranne che per il 2.5° percentile, i risultati migliori si ottengono definendo come postura iniziale la B. Una riflessione supplementare la merita la distanza testa-padiglione (ultimo campo dell'istogramma), che, a differenza degli altri target, è riferita ad una condizione di minima distanza (100 mm); in virtù di tale vincolo, quindi, la situazione migliore si avrà con distanze maggiori.

In conclusione si può dire che tra le procedure di calcolo nessuna ottimizza, contemporaneamente, il raggiungimento dei target ed il valore del comfort. In particolare, partendo dalla postura B, ovvero da una postura ottenuta imponendo il rispetto dei vincoli si raggiunge, a valle della simulazione, una postura finale molto vicina ai target, ma che non ottimizza il comfort. Invece utilizzando come postura iniziale quella di default (A), si giunge ad un risultato che privilegia il comfort rispetto all'osservanza dei target.

III.2.3.4 Comparazione dei dati sperimentali

Ogni simulazione eseguita con il software Ramsis ha permesso di determinare una posizione finale del manichino caratterizzata, in particolare, dalle posizioni dell'AHP, del BOF, del punto H e del punto occhio.

Le simulazioni sono state eseguite in corrispondenza dei percentili 2.5°, 50° e 97.5° e partendo, alternativamente, dalle due posture iniziali A (che privilegia il comfort) e B (che privilegia il rispetto dei target).

Al fine di ottenere una valutazione oggettiva dei risultati raggiunti, le posizioni finali del manichino Ramsis sono state confrontate con quelle del manichino *Human Scale* ottenute eseguendo analoghe simulazioni con l'applicativo 2D descritto nel paragrafo II.5.

Le figure seguenti mostrano la posizione del **punto H** per i tre diversi percentili.

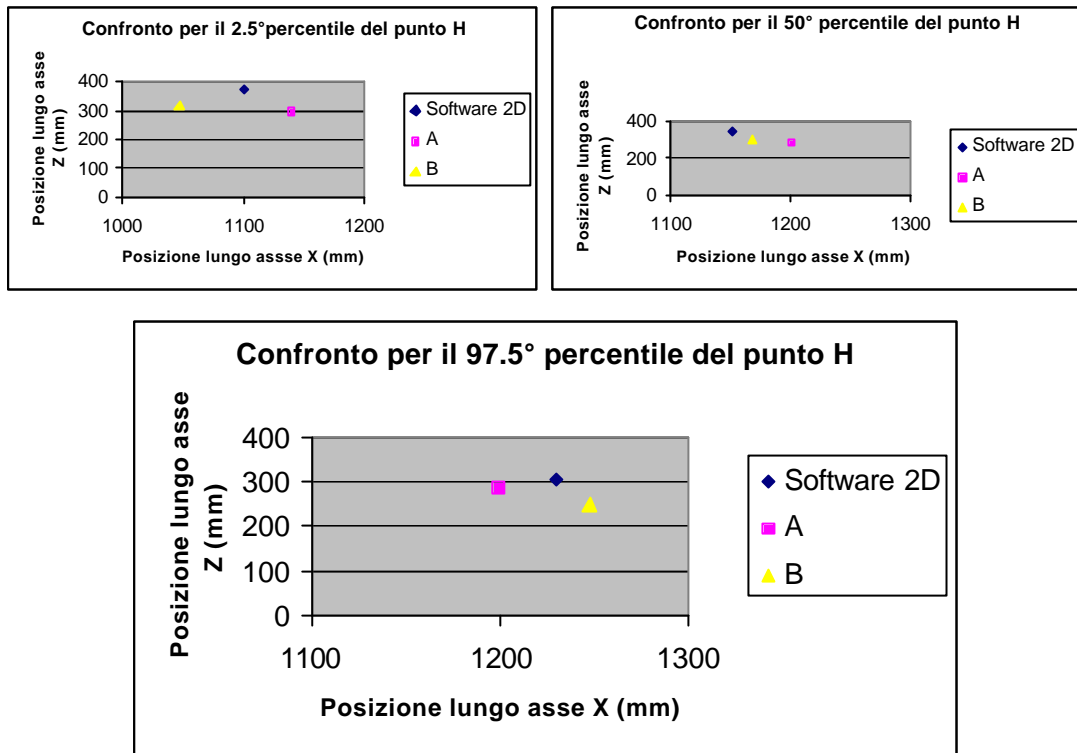


Fig.3.12. - Confronto della posizione del **punto H** per i percentili 2.5°, 50° e 97.5°.

Si può osservare che il software 2D tende a disporre il manichino ad un'altezza maggiore; per il 2.5° percentile ed il 97.5° percentile la posizione del punto H calcolato col software 2D cade all'interno dell'intervallo costituito dai punti H di output del SW Ramsis. La variazione massima tra il software 2D e Ramsis lungo l'asse Z è di circa 70mm mentre quella lungo l'asse X è di circa 53 mm.

La corsa sedile, ottenuta riportando, per ciascuna simulazione, i punti relativi al 2.5° percentile ed al 97.5° percentile, è rappresentata nella seguente figura 3.13.

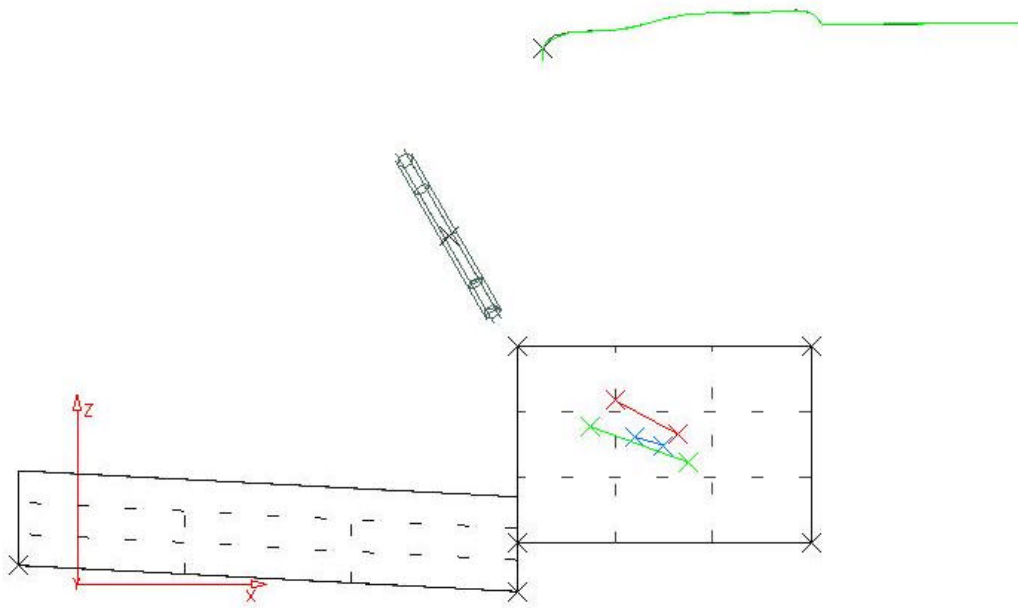


Fig. 3.13. - Corsa sedile: SW 2D (rosso), Ramsis – postura A (blu), Ramsis – postura B (verde).

In particolare la linea rossa, quella azzurra e quella verde sono riferite rispettivamente al software 2D, alla postura A ed alla postura B.

Le figure seguenti mostrano la posizione dell’AHP per i tre diversi percentili.

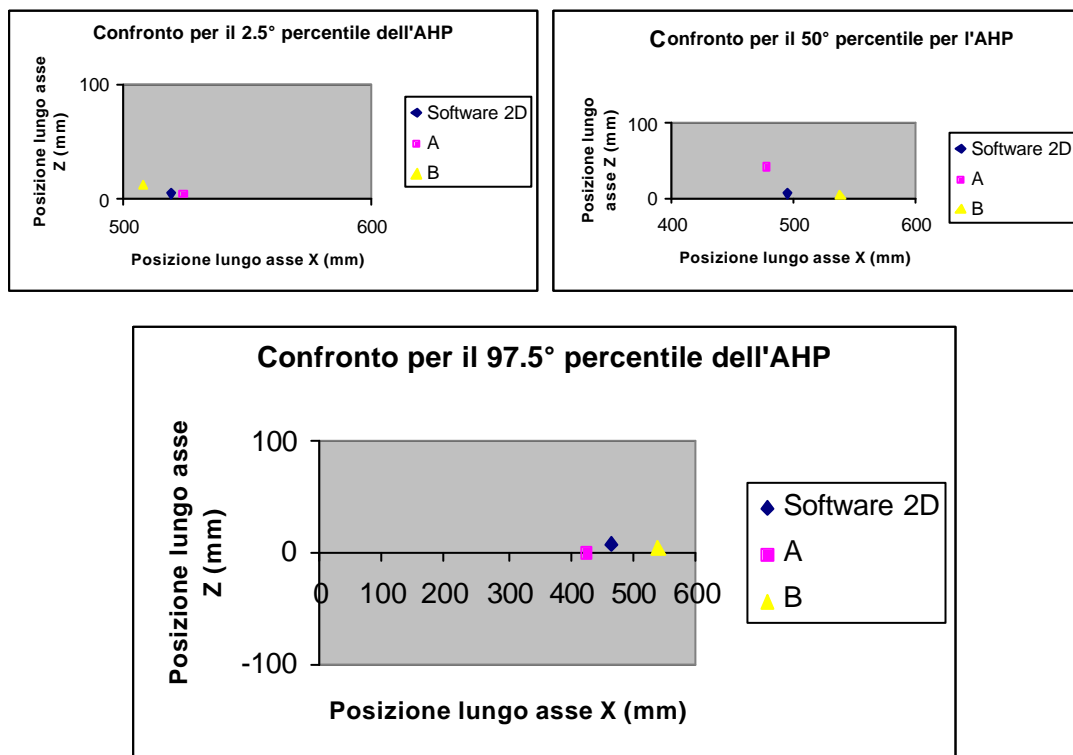


Fig.3.14. - Confronto della posizione dell’AHP per i percentili 2.5°, 50° e 97.5°.

Ancora una volta si nota che la posizione di output del software 2D cade all'interno dell'intervallo dei punti calcolati con il SW Ramsis. La variazione massima tra il software 2D e Ramsis lungo l'asse X è di circa 70 mm mentre quella lungo l'asse Z è approssimativamente di 40 mm.

Le figure seguenti mostrano la posizione del **BOF** per i tre diversi percentili.

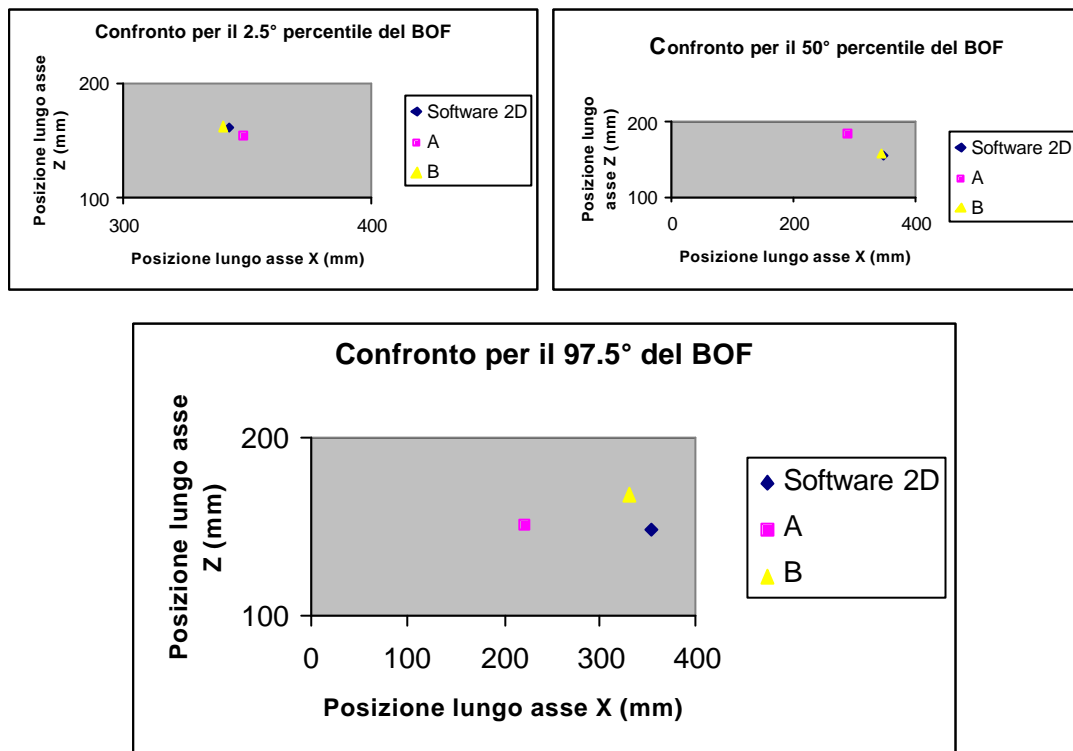


Fig.3.15. - Confronto della posizione del **BOF** per i percentili 2.5°, 50° e 97.5°.

Dalla figura 3.15 si nota che nel caso del 2.5° percentile e del 50° percentile vi è una piena corrispondenza tra i risultati del software 2D e quelli di Ramsis ottenuti scegliendo come postura iniziale quella B, mentre nel caso del 97.5° percentile si hanno delle differenze apprezzabili tra il software 2D e Ramsis (132 mm lungo l'asse X, 20 mm lungo Z).

Come ultimo parametro per il posizionamento del manichino, si è considerata la posizione del *punto occhio*. Le posizioni riguardanti i tre percentili sono riportate nella seguente figura.

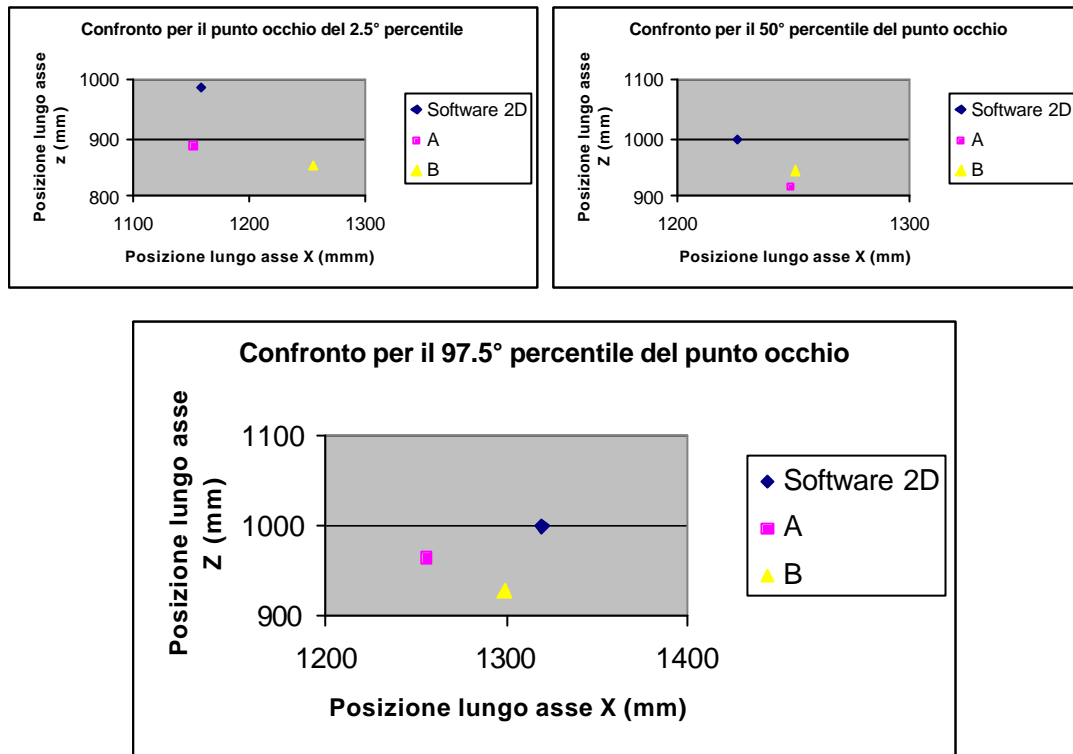


Fig.3.15. - Confronto della posizione del **punto occhio** per i percentili 2.5°, 50° e 97.5°.

La posizione del punto occhio lungo l'asse Z del software 2D risulta essere più alta. Tale risultato non è inaspettato in quanto la colonna vertebrale del manichino 2D è modellata mediante un'unica asta rigida, mentre, quella di Ramsis, essendo costituita da più segmenti congiunti da articolazioni, può flettersi raggiungendo una postura più realistica.

III.3 JACK

In questo paragrafo verranno illustrate le caratteristiche e il funzionamento del software *Classic Jack* della EAI-UGS [63, 64, 65], focalizzando l'attenzione sul modulo *Occupant Packaging Toolkit* ed in particolare sullo strumento *SAE*

Packaging Guidelines, in cui risulta implementata tutta la metodologia SAE relativa all'analisi ergonomica della postazione di guida illustrata nel paragrafo II.4.

Il software *Classic Jack* è stato sviluppato, a partire dalla fine degli anni '80, presso il *Center for Human Modeling* della Università della Pennsylvania, ed è attualmente distribuito dalla *Engineering Animation Inc. (E.A.I.)*. Oltre a *Classic Jack* è in commercio una versione semplificata, *Vis Jack*, integrato con alcuni software di *mock-up* tridimensionale distribuiti sempre dalla E.A.I.. A corredo di *Classic Jack*, esistono due *add-on*, cioè due moduli aggiuntivi che vanno ad integrare la versione base: l'*Occupant Packaging Toolkit* e il *Task Analysis Toolkit*..

Classic Jack rappresenta un valido strumento per la progettazione ergonomica, in grado di migliorare sia la fase di progettazione che il processo di produzione. Esso consente di posizionare manichini digitali in ambienti virtuali, di assegnare loro compiti specifici e di valutarne le performance. Jack è dotato di un ambiente 3D interattivo, con il quale si può interagire in tempo reale per effettuare le valutazioni tecniche ed ergonomiche necessarie per la validazione del progetto.

Questo *software* è in grado di:

- Costruire facilmente ambienti virtuali nei quali collocare il manichino.
- Gestire in maniera accurata dati antropometrici per la creazione di modelli umani virtuali.
- Modificare le singole parti del manichino, creandone di nuovi, potendo introdurre anche condizioni di handicap fisico.
- Assegnare compiti al manichino e valutarne il comportamento in tempo reale anche attraverso animazioni.

- Effettuare valutazioni del comfort posturale, grazie al pacchetto *Occupant Packaging Toolkit*.
- Effettuare analisi ergonomiche dettagliate dei compiti assegnati al manichino grazie al pacchetto *Task Analysis Toolkit*.

III.3.1 Modello anatomico

Il manichino può essere creato sia nella versione maschile, *Jack*, sia in quella femminile, denominata *Jill* (fig. 3.16); inoltre è possibile utilizzare all'occorrenza anche il modello virtuale di un bambino.



Fig. 3.16 – *Jack e Jill*: versione maschile e femminile dei manichini virtuali in *Classic Jack*.

I vari segmenti del manichino possono essere rappresentati secondo diverse modalità: trasparente (*transparent*), utile per avere la visibilità degli oggetti con i quali il manichino virtuale deve interagire, scheletro (*skeleton*), *wireframe* e ombreggiato (*shaded*) (fig. 3.17).

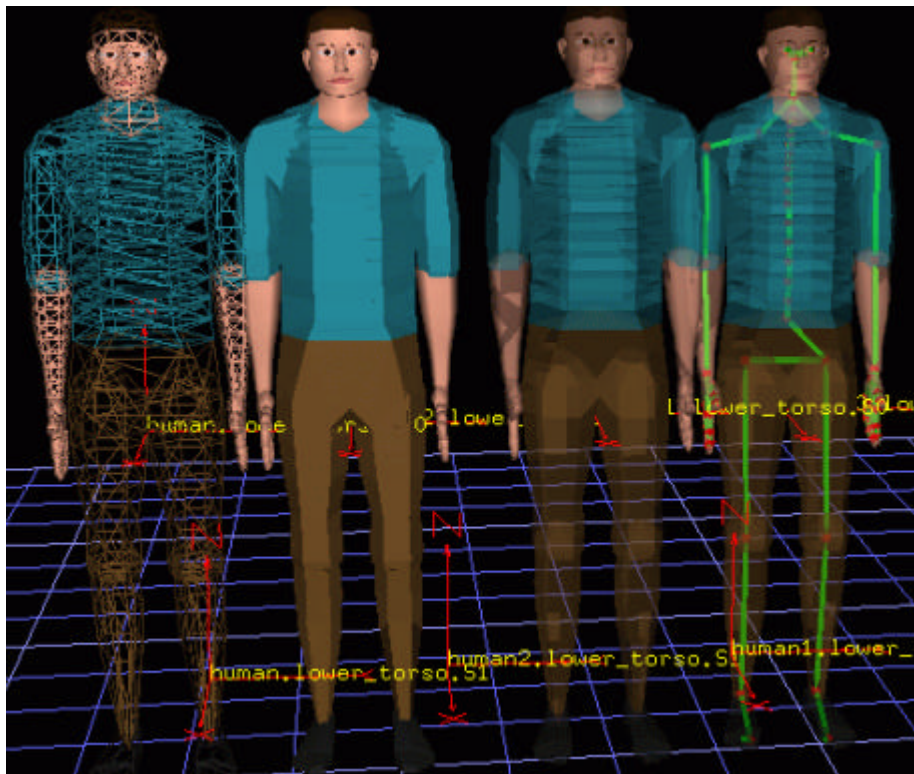


Fig. 3.17 – Jack rappresentato in modalità *wireframe*, *transparent*, *shaded* e *skeleton*.

Dal punto di vista grafico, la definizione delle superfici è stata migliorata nella versione più recente, risultando queste meno spigolose, con agevolazione delle funzioni di posizionamento manuale dei manichini in prossimità degli oggetti e ottimizzazione della percezione del movimento.

III.3.2 Modello cinematico

Il modello cinematico di *Classic Jack* permette di indurre nel manichino comportamenti realistici, grazie all'elevato numero di articolazioni e di gradi di libertà. In particolare il manichino presenta (fig. 3.18):

- 69 segmenti;
- 68 articolazioni;
- Una colonna vertebrale costituita da 17 segmenti;
- Mani costituite da 16 segmenti.

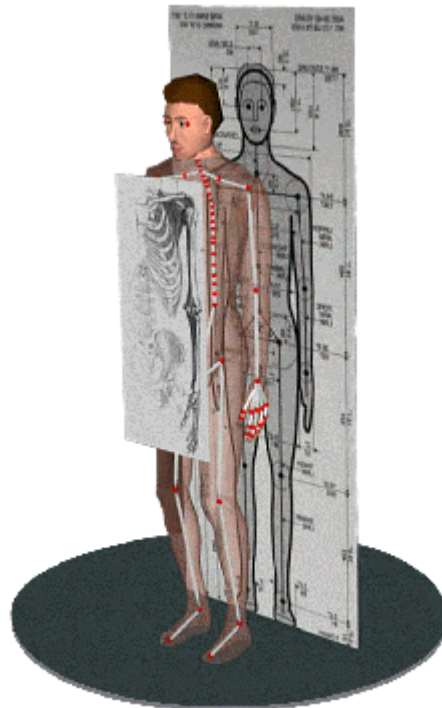


Fig. 3.18. – Il modello cinematico di Jack.

Ogni modello umano presenta 135 gradi di libertà.

I dati antropometrici per la definizione del modello di *Jack*, sono stati ricavati dalle misurazioni delle varie dimensioni del corpo umano, dedotte da uno studio condotto nel 1988 in campo militare, sul personale dell'esercito degli Stati Uniti. La fonte di riferimento è l'*Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel 1988*.

Un numero così alto di articolazioni necessita di essere regolamentato perché il manichino non possa compiere movimenti innaturali e non compatibili con la fisiologia del corpo umano. Nel caso di *Classic Jack*, le articolazioni rispettano i limiti fisiologici di apertura angolare ricavati da studi NASA [66].

Le dimensioni del manichino possono essere definite utilizzando dati SAE [67] implementati nel *software*. Con *Classic Jack* è anche possibile definire i diversi

percentili della popolazione umana, specificando peso ed altezza nella finestra di dialogo *Human Scaling Panel* visibile nella figura 3.19.

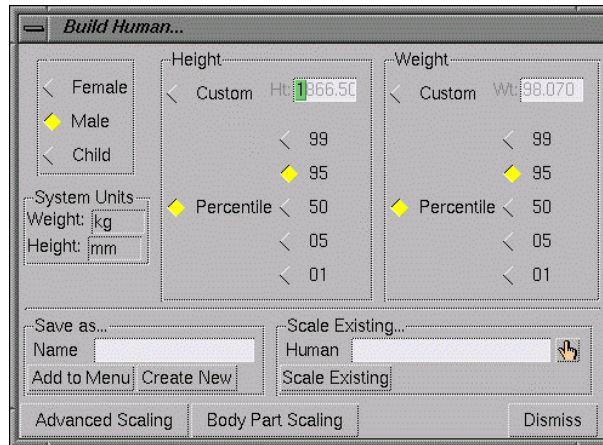


Fig. 3.19. – Lo *Human Scaling Panel*.

Classic Jack consente di modificare i vari rapporti antropometrici della figura umana permettendo così al progettista di simulare anche condizioni di handicap. Per utilizzare questa funzione, basta interagire con la finestra di antropometria avanzata mostrata in figura 3.20.

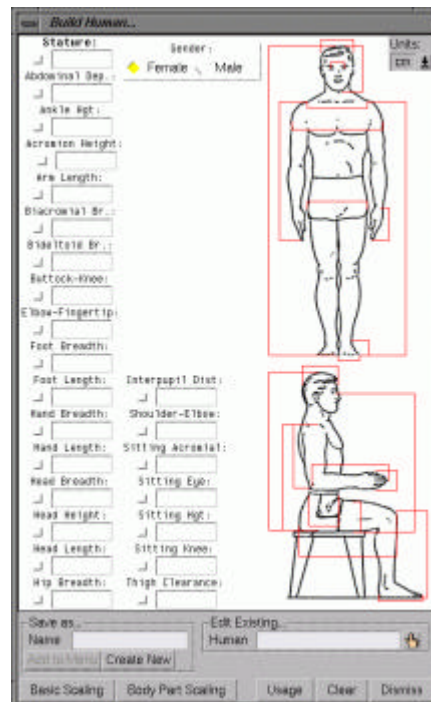


Fig. 3.20. - La finestra dei controlli antropometrici avanzati.

III.3.3 L'ambiente di Jack

Per costruire l'ambiente virtuale in cui collocare Jack si possono importare *file* dall'ambiente CAD gestendo opportuni protocolli di riferimento per lo scambio dati. In particolare, tra gli altri, è possibile importare all'interno di Jack i *file* aventi i seguenti formati: *.stl*, *.igs*, *.wrl*, *.jt*. Il software ha, inoltre, al suo interno una libreria di primitive solide che possono essere utilizzate per creare geometrie solide semplici e una libreria di oggetti predefiniti che può essere richiamata facilmente dal menù principale.

Con *Classic Jack* è molto semplice cambiare vista, e, per conferire maggior verosimiglianza alla scena, è possibile modificare le caratteristiche dei materiali e applicare *texture* alle superfici. L'intera scena è l'ambiente in cui si muove *Jack*. Nella scena sono posizionate le figure (il manichino, oggetti importati dall'ambiente CAD o dalle librerie interne). Ogni figura è costituita da segmenti connessi da giunti.

Il diagramma ad albero che segue chiarisce quanto detto (fig. 3.21).

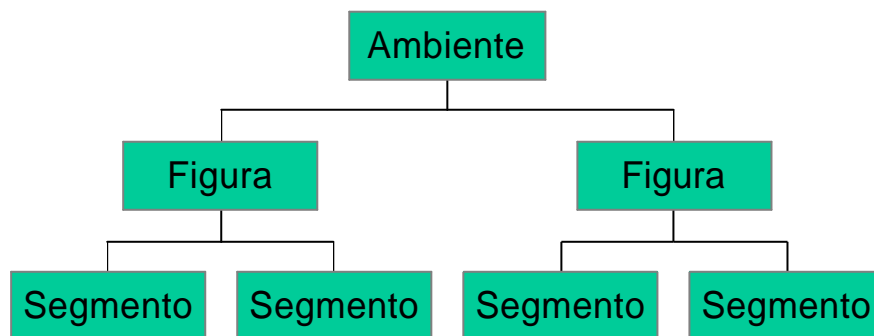


Fig. 3.21. – La struttura gerarchica degli elementi dell'ambiente in *Classic Jack*.

I segmenti costituiscono il livello più basso della gerarchia. Nel caso del manichino virtuale un segmento è rappresentato per esempio da un braccio o da una gamba. Un segmento è costituito da nodi, bordi (*edges*) e facce. I nodi costituiscono il più basso livello di geometria in *Classic Jack*. Essi sono definiti da una terna di

coordinate cartesiane. I bordi, *edges*, rappresentano invece la connessione tra due nodi. In pratica i bordi definiscono un oggetto quando quest'ultimo è rappresentato in modalità *wireframe*.

Una figura allora è un insieme costituito da uno o più segmenti ai quali sono associati riferimenti (*site*), colori e giunti (*joint*). *Classic Jack* usa il concetto di *site* per definire la posizione nello spazio dei segmenti. Più specificamente un *site* è una triade di assi che rappresenta un riferimento locale. Per articolare le figure sono state introdotte le giunture che legano tra loro due segmenti. Tutta questa struttura si pone in un sistema di riferimento "globale", vale a dire una terna di assi X, Y, Z usata per definire la posizione e l'orientamento delle figure. Esiste dunque un riferimento globale a cui riferire gli oggetti, ed uno locale relativo ai "*site*" predefiniti di ogni oggetto o a quelli eventualmente creati all'occorrenza.

La manipolazione e la movimentazione di ogni figura è facilitata grazie agli *snap*, la cui funzione non è dissimile da quella omonima presente nei principali CAD.

Lo *snap*, infatti, consente di posizionare con precisione l'oggetto selezionato su un piano, su un bordo, su un *site*, su un nodo o sul "*ground plane*" (piano di terra) dell'ambiente virtuale.

III.3.4 Interagire con Jack

L'interazione con gli oggetti importati nell'ambiente del software e la regolazione della postura assunta dal manichino sono effettuate attraverso appositi controlli, contemplati nella finestra "*Human Control*" (fig. 3.22). Attraverso lo *Human Control Panel* è possibile selezionare un segmento, muoverlo e ruotarlo secondo gli assi del *site* locale interessato.

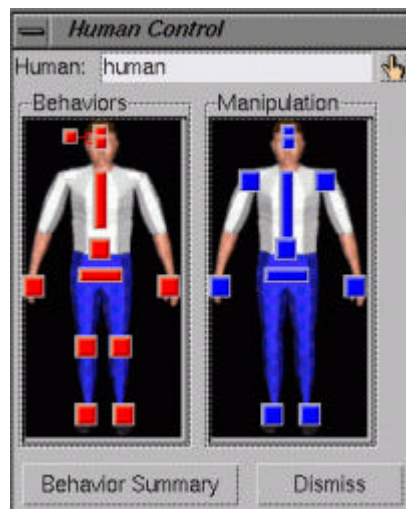


Fig. 3.22. – Lo Human Control Panel.

Quando si manipola un segmento, il software utilizza la *cinematica inversa* per determinare, in tempo reale, la posizione di segmenti e di articolazioni collegati. Per esempio, quando si muove la mano di Jack, i segmenti superiori ed inferiori del braccio, e i giunti relativi, si muovono come avverrebbe nel corpo umano (fig. 3.23).



Fig. 3.23. - Quando si manipola un segmento, il software utilizza la **cinematica inversa** per determinare, in tempo reale, la posizione di segmenti e di articolazioni collegati.

Il manichino può effettuare quattro tipi predefiniti di presa (*grasp*): precisione, potenza, tripode, controllo. Si specifica il tipo di presa, si seleziona l'oggetto da afferrare e il *software* provvede a far chiudere realisticamente la mano sull'oggetto (fig. 3.24).

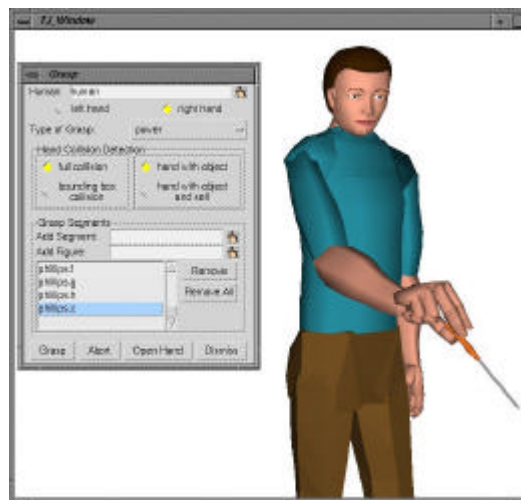


Fig. 3.24. - Jack che afferra un cacciavite con la presa "precisione".

L'elevato numero di segmenti e di giunture costituenti le mani consente all'operatore di definire sul manichino qualsivoglia tipo di presa (fig. 3.25).

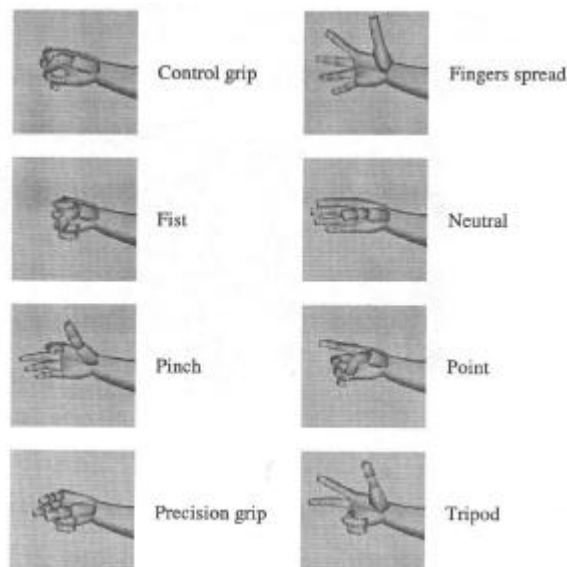


Fig. 3.25. – Alcuni tipi di presa definibili in Jack.

III.3.5 Assegnare compiti umani

Si può assegnare al manichino una postura selezionandola da una biblioteca che ne contiene 30 predefinite, o crearla e salvarla secondo le particolari esigenze (fig.3.26).



Fig. 3.26. – Jill al lavoro.

Il manichino può afferrare gli oggetti, guardare, sollevare, camminare su un percorso pre-assegnato: un sistema di animazione consente di assegnare facilmente a *Jack* ogni tipo di movimento. Si può inoltre osservare il compito svolto da *Jack* attraverso i suoi stessi occhi (fig. 3.27).



Fig. 3.27. – Jack alla guida. Nel riquadro l'operazione osservata dal punto di vista del manichino.

III.3.6 Collision Detection.

Classic Jack non tiene conto dell'impenetrabilità dei solidi e non può essere altrimenti, dato che sarebbe estremamente difficoltoso e oneroso, dal punto di vista computazionale, manipolare gli oggetti e interagire con essi.

Esiste però una funzione di *Collision Detection* che permette di visualizzare eventuali collisioni tra oggetti. Per attivarla bisogna selezionare preventivamente una coppia di segmenti; tale coppia si illumina appena si verifica la collisione (fig. 3.28).

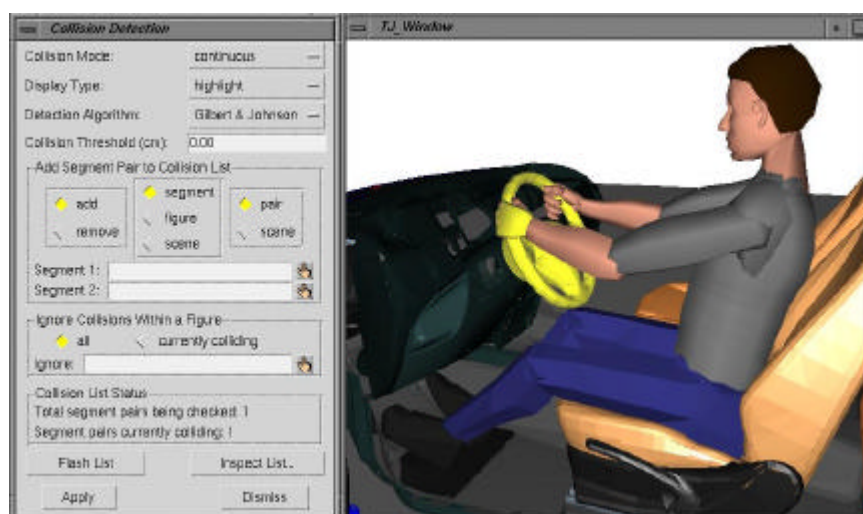


Fig. 3.28. – Un esempio di *Collision Detection*.

Classic Jack dispone di quattro differenti algoritmi per individuare la collisione tra gli oggetti (tab. 3.4).

Metodo collisione	Velocità	Precisione
Bounding box/sphere	Alta	Bassa
Gilbert & Johnson	Media	Media
Moore & Whelhem	Bassa	Alta
Modified M & W	Bassa	Alta

Tab. 3.4. - I diversi algoritmi a disposizione per il comando *collision detection*.

Con il primo algoritmo, *Bounding box / sphere* viene a costruirsi, intorno al segmento selezionato, una sfera o un rettangolo fittizio. Il metodo non è accurato, ma è molto utile per valutazioni di massima perché è molto veloce. Al contrario, il metodo “*Gilbert e Johnson*” è più accurato ma più lento ed è particolarmente indicato per oggetti concavi. Il metodo “*Moore e Whelhem*” e il metodo “*Moore e Whelhem modificato*” sono molto accurati ma altresì molto lenti.

III.3.7 Human Force and Torque Analysis

Fissata la postura del manichino, si possono calcolare le forze che vengono ad esercitarsi sulle articolazioni e sui vari segmenti con l'opzione *Human Force and Torque Analysis* (fig. 3.29) dando un opportuno peso agli oggetti con cui interagisce. Attraverso il sistema di animazione è possibile visualizzare i compiti assegnati al manichino e la sua movimentazione nell'ambiente virtuale. In questo modo è possibile ottimizzare, ad esempio, il *layout* di un reparto o l'organizzazione del posto di lavoro. Nel sesto capitolo si vedrà una applicazione di questo *tool* ad un caso reale.

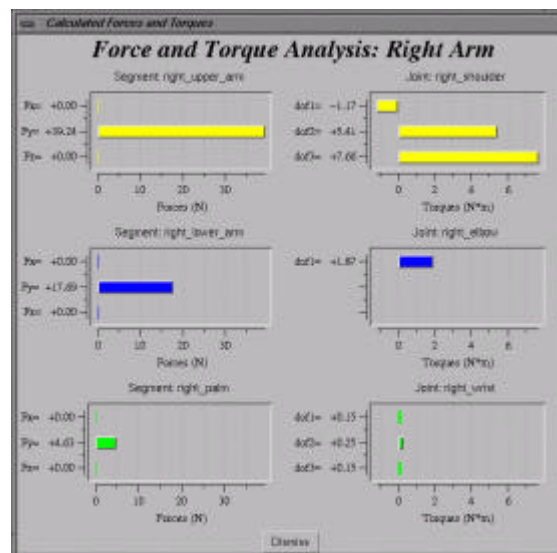


Fig 3.29 – Il pannello *Human Torque Analysis*.

III.3.8 Classic Jack e l'ambiente CAD

Il programma è dotato di *driver* interni per l'importazione e l'esportazione di file dal CAD. Supporta i file CAD più comuni: IGES, VRML, STL, IV, CSB, VTK, PFB, JT. E' possibile creare primitive geometriche che possono essere integrate nel modello ed esportate nel CAD.

Classic Jack contiene un'*utility* (*OpenGL Optimizer and Decimate*) che serve a semplificare la rappresentazione delle superfici presenti nel modello. Per interagire in

tempo reale con il programma è necessario, infatti, in taluni casi ridurre preventivamente il numero di poligoni costituenti la superficie dell'oggetto importato nel programma.

È possibile l'accesso alle API per lo sviluppo di modelli personalizzabili ma non esiste, invece, alcun tipo d'integrazione con sistemi CAD parametrici come CATIA.

III.3.9 Task Analysis Toolkit

Il *Task Analysis Toolkit* è un *add-on* di Classic Jack. Esso consta di un set di nove strumenti molto utili per analizzare i compiti del lavoratore in merito alla sua incolumità e alla sua produttività.

Gli strumenti sono:

- NIOSH Lifting Analysis
- Rapid Upper Limb Assessment
- Low Back Spinal Force Analysis
- Static Strength Prediction
- Predetermined Time Analysis
- Metabolic Energy Expenditure
- Manual Handling Limits
- Fatigue/Recovery Analysis
- Working Posture Analysis

Saranno ora analizzati, brevemente, questi strumenti.

Il *NIOSH Lifting Analysis* (fig. 3.30) determina il carico atteso che, sotto prefissate condizioni posturali, i lavoratori sani potrebbero alzare senza problemi in un dato periodo di tempo, e fornisce una stima relativa del livello di stress fisico

associata ad un'operazione manuale di sollevamento singolo o multiplo. Fa riferimento alla normativa NIOSH.

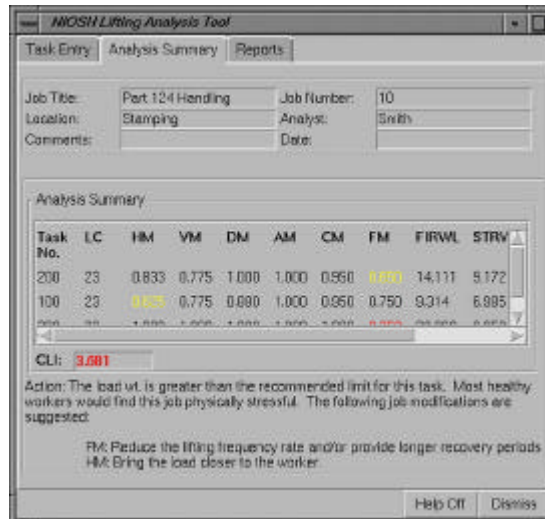


Fig. 3.30. – La finestra di dialogo *NIOSH Lifting Analysis*.

Il **Rapid Upper Limb Assessment** valuta l'esposizione dei lavoratori al rischio di danno agli arti superiori (fig. 3.31). Tale strumento fornisce una stima del rischio del danno basandosi sulla postura, sull'uso dei muscoli, sulla durata del compito e sulla sua frequenza. Esso, inoltre, assegna un punteggio che indica il grado di intervento richiesto per ridurre il rischio di danno agli arti superiori.

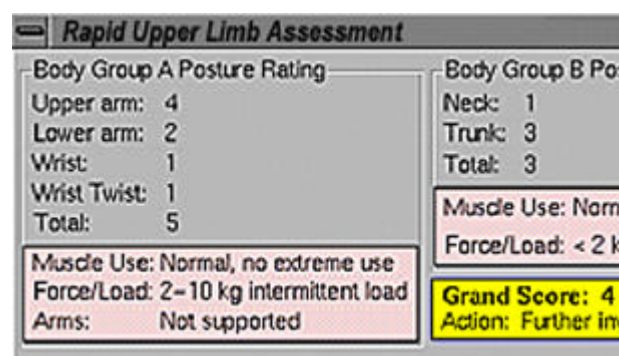


Fig. 3.31. – *Rapid Upper Limb Assesment*.

Lo strumento **Lower Back Analysis** permette di valutare le forze agenti sulla colonna vertebrale del manichino virtuale, sotto qualunque postura da lui assunta e

qualsivoglia azione di caricamento della medesima colonna vertebrale (fig. 3.32). Questo strumento valuta in tempo reale le azioni correlate ai compiti imposti al manichino alla luce delle normative NIOSH e degli studi condotti nel settore da *Chaffin e Raschke* [68, 69].

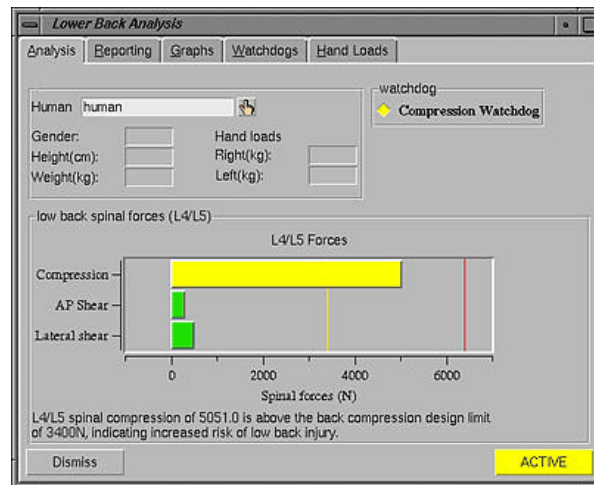


Fig.3.32. – La finestra di dialogo del Lower Back Analysis

Lo *Static Strength Prediction* è basato su studi compiuti nel corso di venticinque anni al centro di ergonomia dell'Università del Michigan. Questo utile strumento determina la percentuale di uomini e donne che possiede la forza necessaria per compiere il lavoro prescritto al manichino (fig. 3.33).



Fig. 3.33. – Lo Static Strength prediction tool.

Il ***Predetermined Time Analysis*** determina il tempo richiesto per compiere un assegnato lavoro basandosi sui metodi di misurazione del tempo-lavoro MTM-1. Può rilevarsi uno strumento fondamentale per quanti siano interessati alla riorganizzazione del posto di lavoro e all'ottimizzazione dei tempi richiesti per effettuare determinate operazioni. Esso, infatti, evidenzia quelle operazioni che rappresentano la migliore opportunità per ridurre il tempo totale richiesto per compiere un certo lavoro.

Il ***Metabolic Energy Expenditure*** specifica se i lavori assegnati sono conformi alle direttive NIOSH per quanto riguarda la spesa di energia metabolica, individuando le operazioni e le variabili che possono essere modificate per ridurre tale spesa.

Il ***Manual Handling Limits*** consente di determinare il massimo peso accettabile che uomini e donne possono sopportare quando compiono sollevamenti, abbassamenti e spinte.

Il ***Fatigue/Recovery Analysis*** si fonda su ricerche condotte dallo studioso di fisiologia applicata *Rohmert*. Questo strumento calcola il tempo di recupero richiesto per un dato lavoro e lo confronta con quello disponibile; consente di analizzare la fatica del lavoratore in posture statiche o dinamiche e infine permette di identificare le operazioni che richiedono più tempo di recupero e i gruppi muscolari che sono sotto sforzo.

Infine, a completare il *Task Analysis Toolkit*, c'è la ***Working Posture Analysis***. E' un'applicazione in cui sono implementate le direttive dell'*Ovako Working Posture Analysis System* (OWAS). Essa valuta il disagio relativo di una postura basandosi sulla posizione della schiena, delle gambe e sui carichi da sopportare, assegnando un

punteggio che indica l'urgenza di prendere misure correttive per ridurre il rischio di possibili danni al lavoratore.

III.3.10 Occupant Packaging Toolkit

E' il secondo modulo aggiuntivo di *Classic Jack* composto da cinque strumenti utili allo sviluppo dell'abitacolo ed, in particolare, della postazione di guida. Essi sono:

- *SAE Packaging Guidelines*
- *Posture Prediction*
- *Comfort Assessment*
- *Reach Zone*
- *Parts Library*

Nel seguito verrà analizzato ogni strumento, rivolgendo particolare attenzione al *SAE Packaging Guidelines*, essendo in esso implementata tutta la metodologia SAE relativa all'analisi ergonomica dell'abitacolo descritta nel paragrafo II.4.

III.3.10.1 SAE Packaging Guidelines.

Questo strumento fornisce le linee guida, basate su dati SAE e su ricerche industriali, per il corretto posizionamento del guidatore e di alcuni elementi del veicolo. In *Jack* sono presenti due versioni del *SAE Packaging Guidelines*, esse sono denominate “*Standard*” ed “*Enhanced*”. La versione “*Standard*” è basata esclusivamente sulle normative SAE mentre la “*Enhanced*” tiene conto anche di numerosi dati forniti da industrie che hanno condotto studi in campo automobilistico (fig. 3.34).

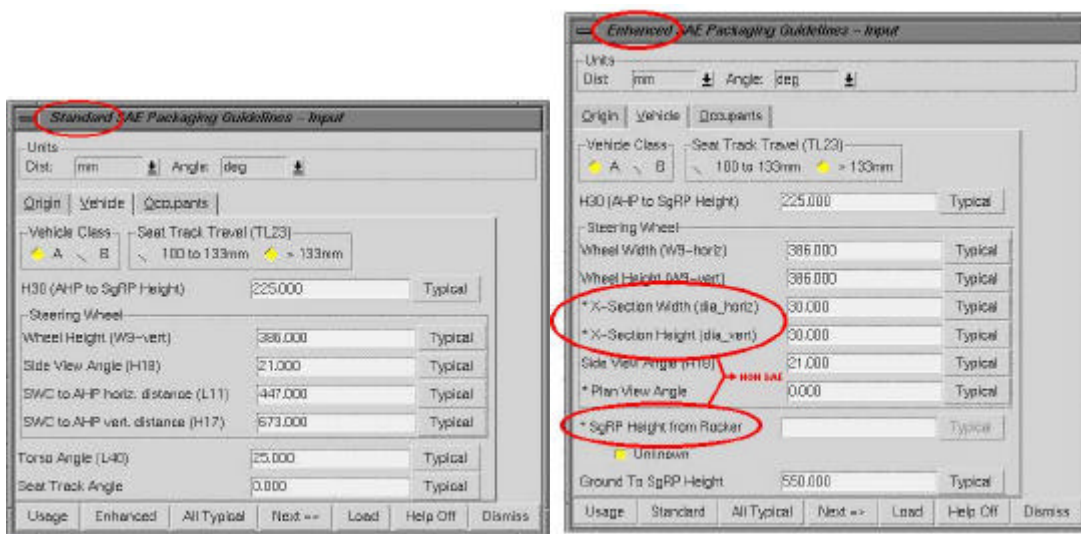


Fig. 3.34. – Dati di input del veicolo nelle versioni “Standard” ed “Enhanced”.

Nel seguito verrà analizzata esclusivamente la versione “Standard”.

Sono richiesti dati di **input** relativi all’origine, al veicolo e all’occupante:

- **Input relativi all’origine** (fig. 3.35):

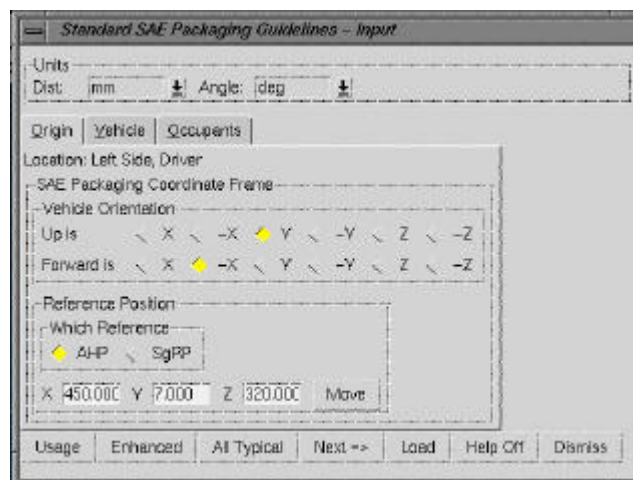


Fig. 3.35. – Dati di input relativi all’origine nella versione “Standard”.

Up is & Forward is – Nel sistema di coordinate interno di *Jack* l’asse “+Y” è rivolto verso l’alto e l’asse “ - X” è rivolto in avanti. Il sistema di riferimento SAE [38], invece, definisce “+Z” verso l’alto (fig. 3.36). Con questo comando è possibile allineare il sistema di riferimento delle zone calcolate a quello delle geometrie importate.

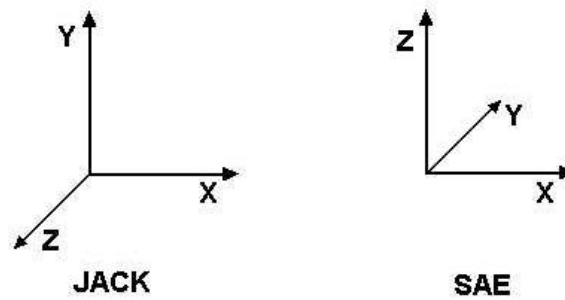


Fig. 3.36. – Sistemi di riferimento SAE e Classic Jack.

Which Site – L'utente può scegliere se usare il *Seating Reference Point* (SgRP) o l'*Accelerator Heel Point* (AHP) come *site* di riferimento [25]. Fornendo le coordinate globali di uno di questi due *site*, il programma calcolerà la posizione di tutti gli altri relativamente a questo.

➤ **Input relativi al veicolo** (fig. 3.37)

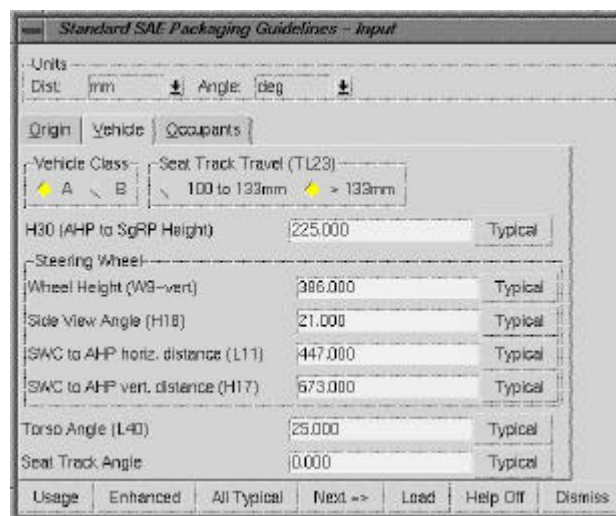


Fig. 3.37. – Dati di input relativi al veicolo nella versione “Standard”.

Le grandezze che compaiono in questa finestra sono state ampiamente trattate nel paragrafo II.4.

➤ **Input relativi all'occupante** (fig. 3.38):

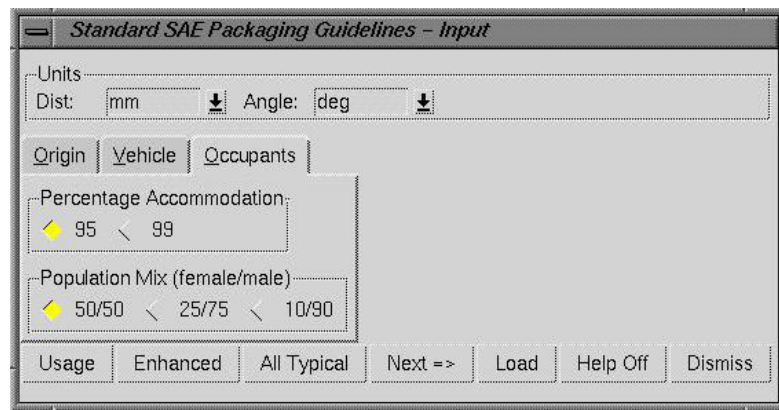


Fig. 3.38 – Dati di input relativi all’occupante nella versione “Standard”.

Percentage Accommodation – Consente di specificare la percentuale di popolazione che si vuole includere per la costruzione delle “*eyellipses*” e della “*head clearance zone*”.

Population mix – Consente di specificare la percentuale di popolazione che si vuole includere per la costruzione delle superfici di raggiungibilità della mano.

Come *output* si ottengono:

- ✓ Le posizioni dei seguenti *site* (fig. 3.39): dell’SgRP o dell’AHP, a seconda che sia stato fissato come *site* origine l’AHP o L’SgRP; del centro delle “*eyellipses*” e del centro del contorno testa (*head clearance*).

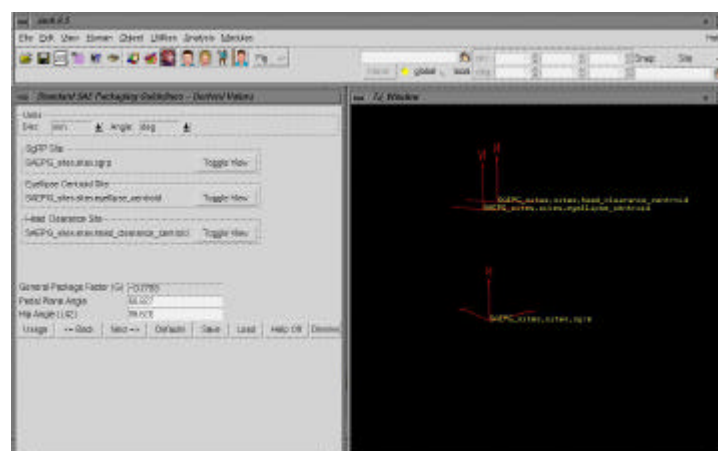


Fig. 3.39. – Dati di output: posizione dei *site*.

- ✓ La posizione (fig. 3.40) del *site* relativo al BOF e la raffigurazione delle *seat position curves* [28], delle tre superfici di raggiungibilità della mano (con impugnatura a tre dita, con dito indice in posizione estesa e con pugno chiuso) [30], delle “*eyellipses*” [27], del contorno testa [29], delle “*wiper zones*” [70] e delle “*defroster zones*”[71].

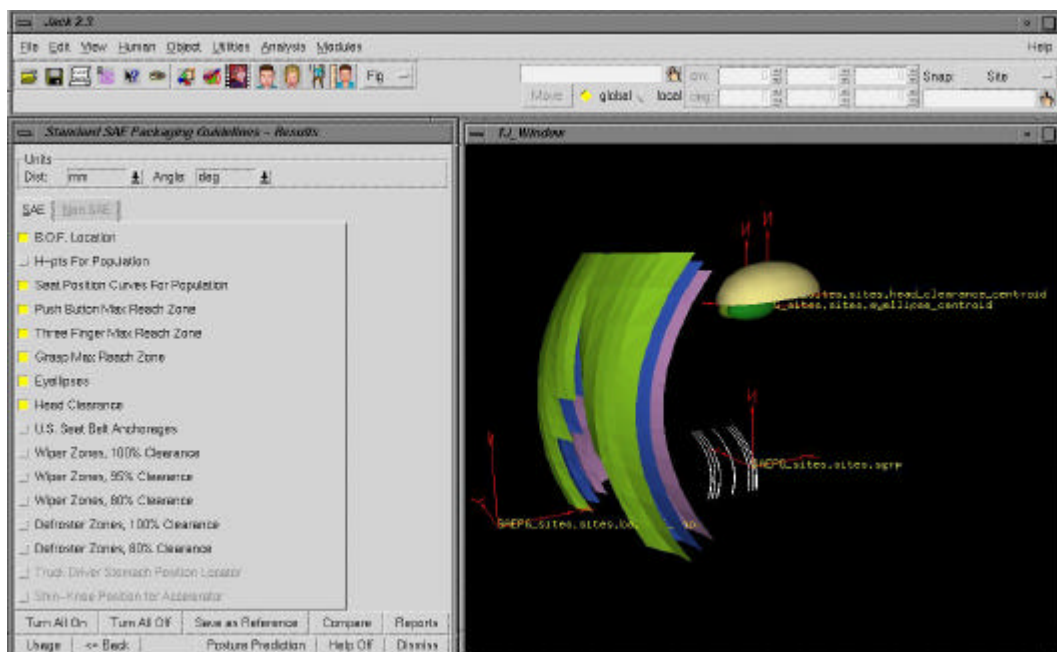


Fig. 3.40. - Dati di output: posizione delle curve e delle superfici.

III.3.10.2 Posture Prediction

Questo *tool*, basandosi su ricerche condotte dall'*University of Michigan Transportation Research Institute* (UMTRI) e pubblicate dalla SAE, consente di posizionare il manichino correttamente all'interno della vettura.

Oltre 100 soggetti sono stati osservati durante la guida di diversi tipi di veicoli (o simulatori di guida) e ne sono state registrate le posture. Sulla base dei dati acquisiti sono stati ricavati dei modelli statistici aventi come *input* quelle dimensioni del veicolo che maggiormente influenzano la posizione del guidatore. Tali modelli

previsionali forniscono la posizione del bacino relativa al punto di riferimento del sedile (SgRP), tenendo conto dell'*offset* tipico tra anca e HPoint. E' prevista anche la possibilità di relazionare l'orientamento del bacino e la posizione della testa alla posizione del punto H. La posizione delle braccia e dell'anca viene determinata tramite cinematici inversi. I piedi sono vincolati al BOF dell'acceleratore e al pedale del freno. Le mani sono poste arbitrariamente nella posizione "10.10" sul volante in quanto gli studi effettuati dall'UMTRI hanno dimostrato che la posizione delle mani sul volante ha un effetto minimo sulla postura. Il *Posture Prediction Tool* è specifico per vetture di Classe A [25]. Se questo strumento viene richiamato direttamente dal *SAE Packaging Guidelines*, saranno assunti come dati di input i valori definiti nello stesso *SAE Packaging Guidelines* (fig. 3.41).

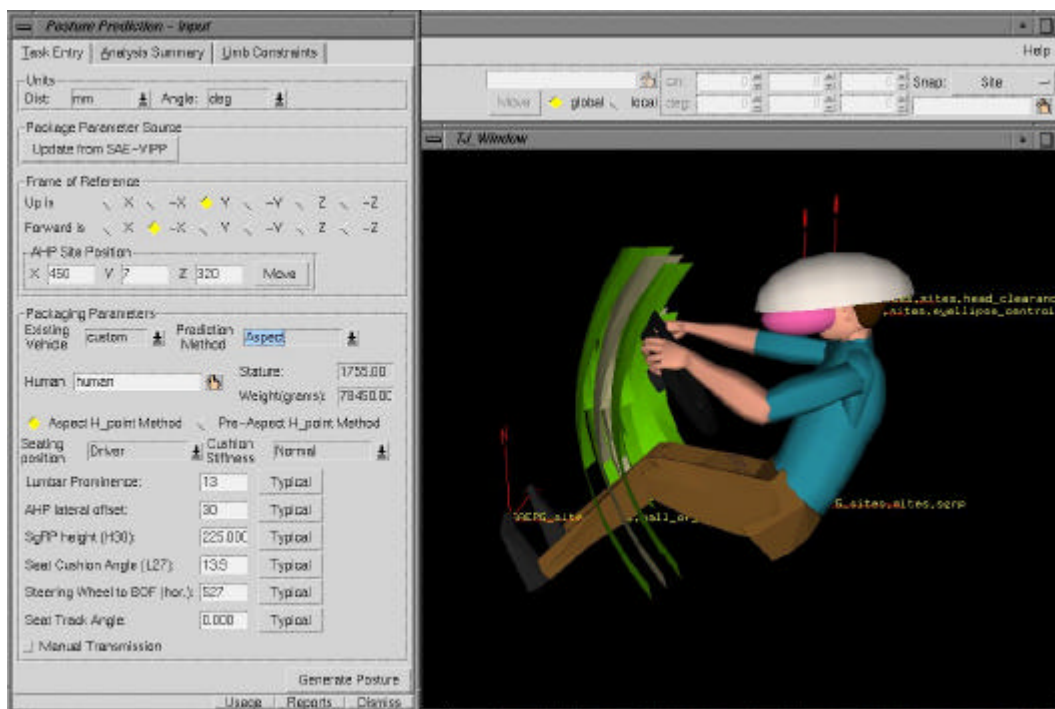


Fig. 3.41. – Posture Prediction.

III.3.10.3 Comfort Assessment

Posizionato il manichino secondo i dettami della *Posture Prediction* o facendogli assumere qualunque altra postura, viene utilizzato lo strumento *Comfort Assessment* per verificare se Jack è seduto in modo confortevole, in base agli angoli formati tra le articolazioni e alla posizione complessiva (fig. 3.42).

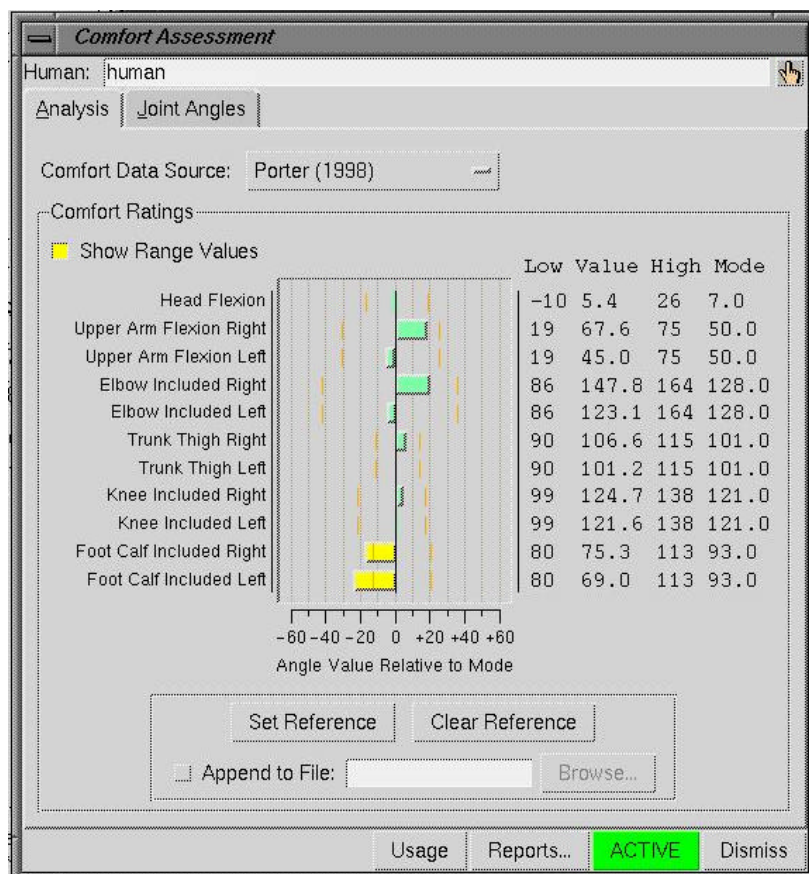


Fig. 3.42 - La finestra dov'è visualizzato uno dei cinque modelli disponibili (*Porter*) per la valutazione del comfort.

Per la verifica di comfort si può scegliere tra cinque metodi diversi, ognuno dei quali fa riferimento ad uno studioso che ha compiuto ricerche nel settore. I cinque metodi sono nell'ordine: *Porter*, *Krist*, *Grandjean*, *Rebiffe*, *Dreyfuss 2D*, *Dreyfuss 3D*. E' tuttavia sempre possibile impostare propri range di comfort qualora lo richiedesse il progetto.

III.3.10.4 Reach Zone

Questo strumento è utilizzato per effettuare un'analisi avanzata di raggiungibilità. Definita la postura del manichino, si può andare a visualizzare l'involuppo delle superfici raggiungibili da un segmento dello stesso, preventivamente selezionato. In figura 3.43 si può notare Jack seduto su un sedile di una vettura. La superficie rappresenta il contorno della porzione di spazio raggiungibile dal braccio destro del manichino, compatibilmente con la postura assunta e nel pieno rispetto dei limiti fisiologici.

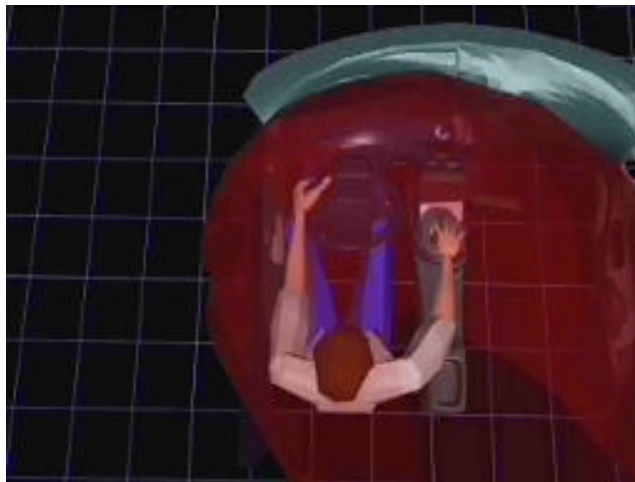


Fig.3.43. – Reach Zone.

III.3.10.5 Parts Library

Questo è l'ultimo strumento dell'*Occupant Packaging Toolkit*; esso contiene un utile assortimento di oggetti che rendono più spedite le analisi e le valutazioni dell'abitacolo. Si possono importare nell'ambiente di Jack oggetti come il pedale del freno e dell'acceleratore, il sedile e la leva del cambio.

III.3.11 Applicazione ad un caso reale

Per ottenere una valutazione oggettiva di quelli che possono essere i dati provenienti da un'analisi ergonomica del posto guida effettuata col software Jack, in cui è implementata la metodologia SAE, è stato condotto uno studio sul *Digital Mock UP* (DMU) di un veicolo di Classe A in modo tale da poterne confrontare i risultati con quelli provenienti dall'applicativo 2D, le cui caratteristiche sono state illustrate nel paragrafo II.5, e in cui è implementata la metodologia FIAT.

Il sistema di riferimento globale utilizzato è quello definito dalla FIAT [52].

Il DMU dell'abitacolo del veicolo è stato costruito in ambiente CAD CATIA e poi importato, pezzo per pezzo, nell'ambiente del software Jack, mediante protocolli di scambio dati che fanno riferimento al formato neutro *.jt*.

Con riferimento a quanto detto nel paragrafo III.3.10, sono stati immessi i seguenti dati di *input* [25] tratti dal DMU dell'autoveicolo di classe A preso in considerazione per la verifica ergonomica:

- *AHP*: X=453.0mm, Y=-330mm, Z=7.0mm
- *H-Point Height* (H30) = 305.2mm
- *Seat Track Travel* (TL23) > 133mm
- *Stering Wheels Diameter* (W9) = 374.0mm
- *Stering Wheels Angle* (H18) = 26.5°
- *Horizontal Stering Wheel Center* (L11) = 395.0mm
- *Vertical Stering Wheel Center* (H17) = 670.3mm
- *Back Angle* (L40) = 25.0°
- *Seat Track Angle* = 0.0°
- *Percentuale di popolazione da accomodare* = 95%

- Rapporto maschi/femmine: 50/50

Il tool *SAE Packaging Guidelines* di Jack ha fornito i seguenti dati di *output*:

- Posizione del BOF (fig. 3.44):

$$X_{BOF}=34.62\text{cm}, Y_{BOF}=-33.00\text{cm}, Z_{BOF}=17.97\text{cm}$$

- Posizione dell'SgRP (fig. 3.44):

$$X_{SgRP}=128.3\text{cm}, Y_{SgRP}=-33.00\text{cm}, Z_{SgRP}=31.22\text{cm}$$

- Corsa orizzontale del sedile = 186.2mm



Fig. 3.44. – Determinazione del BOF e dell'SgRP.

- Superfici di raggiungibilità della mano: *extended finger* (fig. 3.45), *three-finger grasping* (fig. 3.46) e *full hand grasped* (fig.3.47).

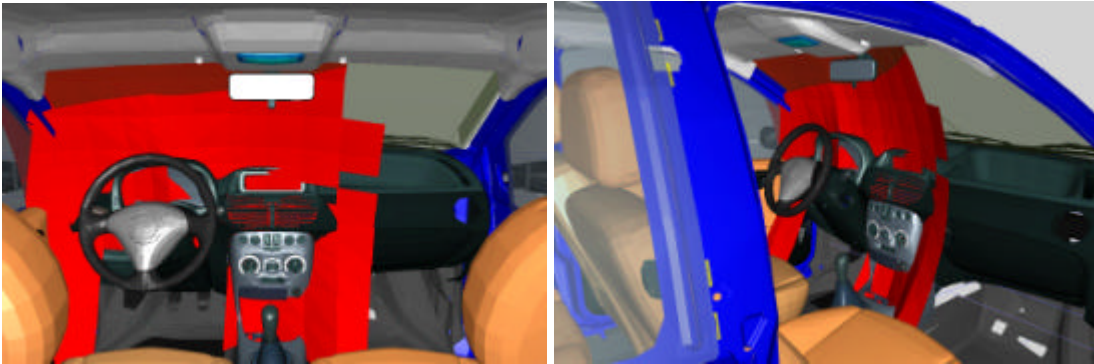


Fig. 3.45. – Superficie di raggiungibilità con dito indice esteso (*Extended finger*).

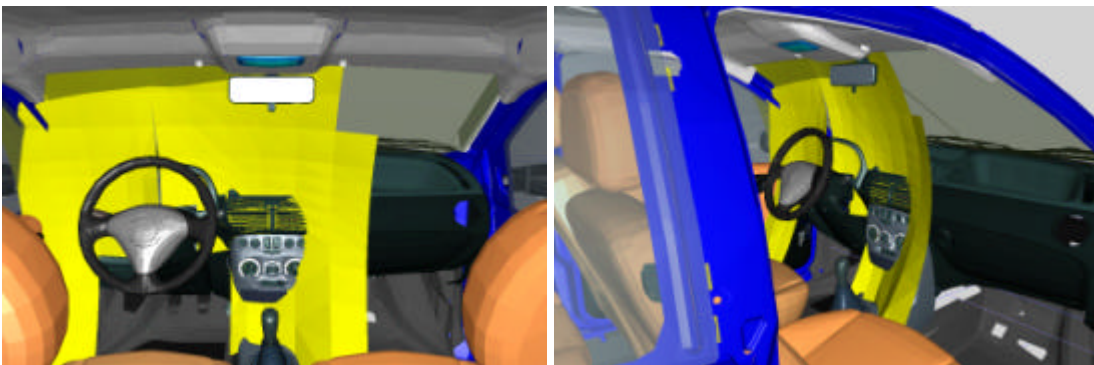


Fig. 3.46. – Superficie di raggiungibilità con impugnatura a tre dita (*Three-finger grasping*).

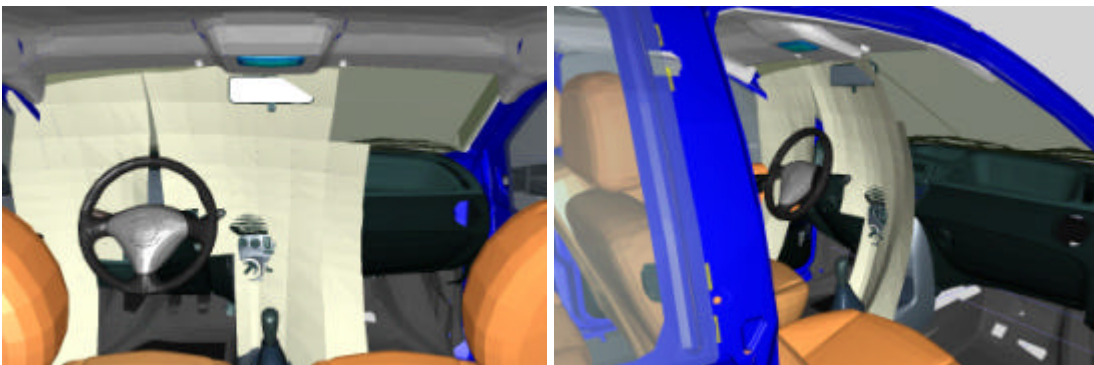


Fig. 3.47. – Superficie di raggiungibilità con pugno chiuso (*Full hand grasped*).

- Posizione dell' *eyellipses* (fig. 3.48): coordinate del *centroid*

$$X_{C.EYELLIPSES}=126.01\text{cm}, Y_{C.EYELLIPSES}=-33.00\text{cm}, Z_{C.EYELLIPSES}=93.88\text{cm}$$

- Posizione del contorno testa (fig. 3.49): coordinate del *centroid*

$$X_{C.CONTORNO}=135.31\text{cm}, Y_{C.CONTORNO}=-33.00\text{cm}, Z_{C.CONTORNO}=97.67\text{cm}$$



Fig. 3.48. – Eyellipses.

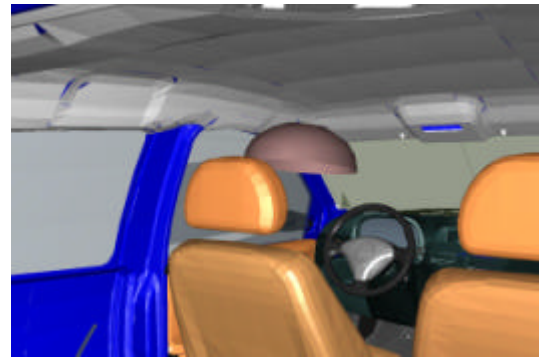


Fig. 3.49. – Contorno testa.

Rappresentando in un'unica figura i punti e le curve caratteristiche precedentemente illustrate, si ha (fig. 3.50):

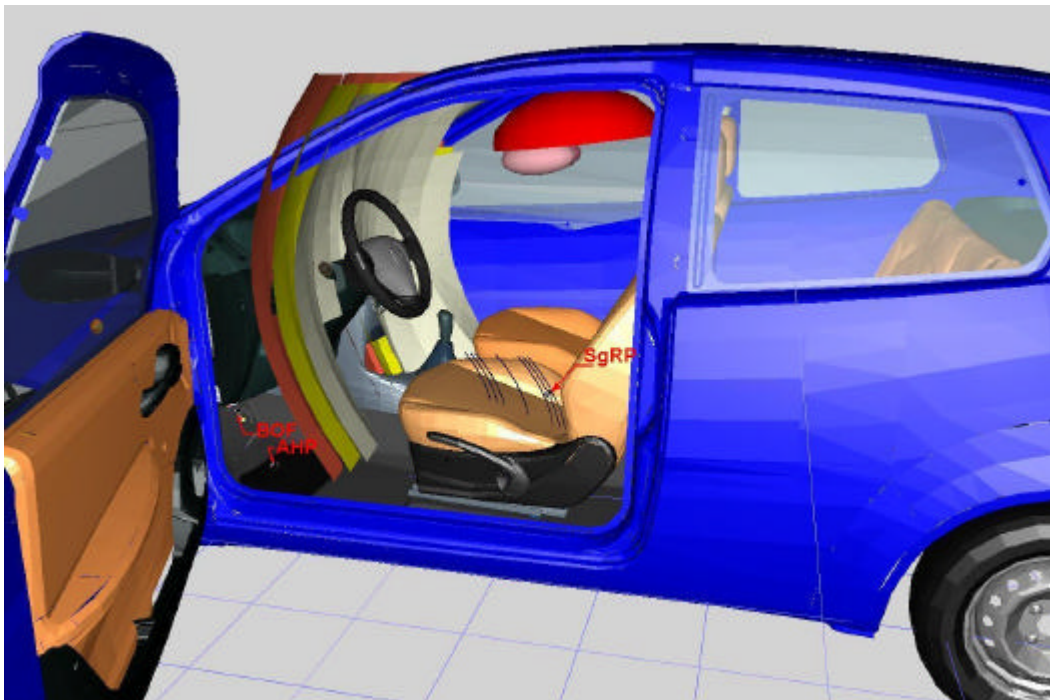


Fig. 3.50. – BOF, AHP, SgRP e curve task oriented.

III.3.11.1 Analisi con l'applicativo 2D

L'applicativo 2D è quello di cui si è ampiamente discusso nel paragrafo II.5, in cui è implementata la metodologia FIAT per l'analisi ergonomica. In accordo con quanto detto nel suddetto paragrafo, per lanciare la simulazione è stato necessario fornire i seguenti *dati di input*:

Punto H di progetto: $X_H=1250\text{mm}$, $Y_H=-330.0\text{mm}$, $Z_H=312.2\text{mm}$

Punto tacco di progetto (AHP): $X_{AHP}=453\text{mm}$, $Z_{AHP}=7\text{mm}$

Delta SAE (L40) = 25.0°

Pavimento:

coordinate punto anteriore: $X=400.0\text{mm}$, $Z=10.0\text{mm}$

coordinate punto posteriore: $X=600\text{mm}$, $Z=1.50\text{mm}$

Terreno: $Z = -300\text{mm}$

Volante:

diametro = 374mm

coordinate del centro: $X_{c.v.}=848\text{mm}$, $Y_{c.v.} = -330$ $Z_{c.v.}=677.3\text{mm}$

Inclinazione rispetto alla verticale = 26.5°

Acceleratore:

punto superiore: $X_{p.s.}=311.0\text{mm}$, $Z_{p.s.}=178.5\text{mm}$

punto medio: $X_{p.m.}=348.0\text{mm}$, $Z_{p.m.}=156.0\text{mm}$

punto inferiore: $X_{p.i.}=371.0\text{mm}$, $Z_{p.i.}=118.0\text{mm}$

Sedile:

numero di scatti orizzontali = 42 passo = 5mm

numero punti orizzontali = 1 coordinate: $X = 1280\text{mm}$; $Z = 312.2\text{mm}$

inclinazione minima schienale = 18°

inclinazione massima schienale = 30° passo = 0.5°

Visibilità:

Anteriore:

Punto superiore parabrezza: $X=953\text{mm}$ $Z=1068\text{mm}$

Punto inferiore parabrezza: $X=233\text{mm}$ $Z=755\text{mm}$

Cofano: X=-200mm Z=655mm

Posteriore:

Punto superiore lunotto: X=2628mm Z=1066mm

Punto inferiore lunotto: X=2855mm Z=794.75mm

Cofano: X=2855mm Z=794.75mm

Padiglione:

numero di punti = 18, coordinate (in mm):

Punto	X	Z
1	953.00	1068.00
2	953.00	1093.00
3	1100.00	1130.00
4	1200.00	1153.00
5	1300.00	1165.00
6	1478.00	1170.00
7	1510.00	1159.00
8	1522.00	1142.00
9	1938.00	1144.00
10	1959.00	1161.00
11	2000.00	1165.00
12	2285.00	1149.00
13	2340.00	1141.00
14	2423.00	1100.00
15	2480.00	1059.00
16	2550.00	1053.00
17	2628.00	1066.00
18	2855.00	793.00

Frizione, freno, pedana, fiancate: non attive

Sono state scelte le seguenti *opzioni di calcolo:*

Spessore del tacco = 25mm

Condizione di comfort pilota = buono ¹

¹ E' stata fissata la condizione di comfort pilota "buono" perché, dovendo fare un confronto con le curve SAE *task oriented* ed essendo queste ricavate testando soggetti umani, è lecito supporre che essi si siano posizionati all'interno del simulatore (*seating buck*) in una postura confortevole.

Metodo di scelta del punto H: I.C.

Popolazione: HS-V2000 tipo: standard

Pesi:

Distanza ginocchio volante = 1

Angolo spalla = 1

Angolo gomito = 1

A valle della simulazione il *software* ha fornito i seguenti ***dati di output***:

Manichini posizionati: 38 su 41

Manichini non posizionati: 1°, 97.5°, 99° percentile

Posizione del punto H scelto, punto tacco (AHP) e del punto di contatto scarpa-pedale (BOF), per ogni manichino posizionato²

Angoli: caviglia, ginocchio, coscia, anca, schienale, per ogni manichino posizionato.

Distanza ginocchio volante, angolo spalla, angolo gomito, distanza testa padiglione, indice di comfort (I.C.) per ogni manichino posizionato.

Corsa orizzontale minima per accomodare il 92.5% della popolazione:

$$corsa = X_{H_{95^{th}}} - X_{H_{2.5^{th}}} = 1225 - 1090 = 135mm$$

Raggiungibilità dei punti plancia (per comfort buono): dito indice esteso (fig. 3.51).

Raggiungibilità dei punti plancia (per comfort buono): a pugno chiuso (fig. 3.52).

Ellisse occhio del 95° percentile (fig 3.53):

Coordinate del centro: $X_{C.ELLISSE}=1249.1mm$, $Z_{C.ELLISSE}=966.14mm$

Lunghezza asse X = 219.33mm

² Per motivi di riservatezza aziendale i valori non sono riportati.

Lunghezza asse Z = 18.02mm

Inclinazione rispetto all'asse orizzontale = 23.0°

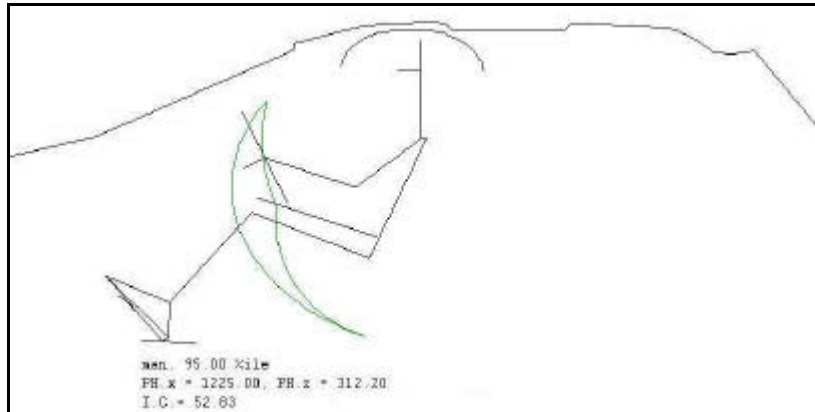


Fig. 3.51. – Raggiungibilità dei punti plancia: dito indice esteso.

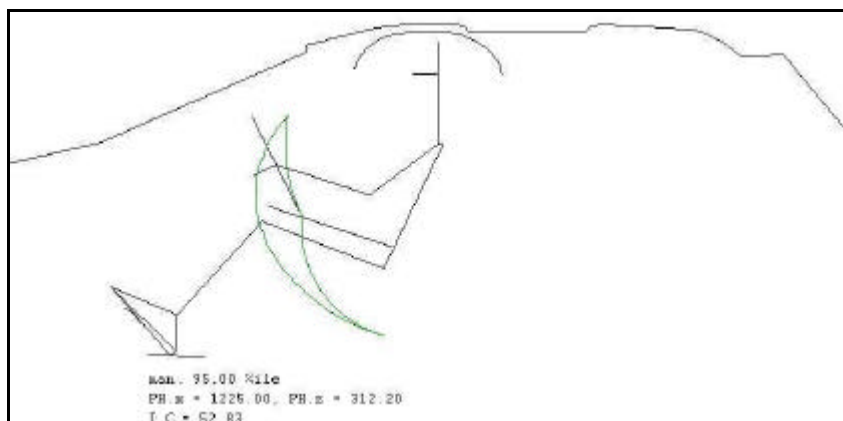


Fig. 3.52. – Raggiungibilità dei punti plancia: a pugno chiuso.

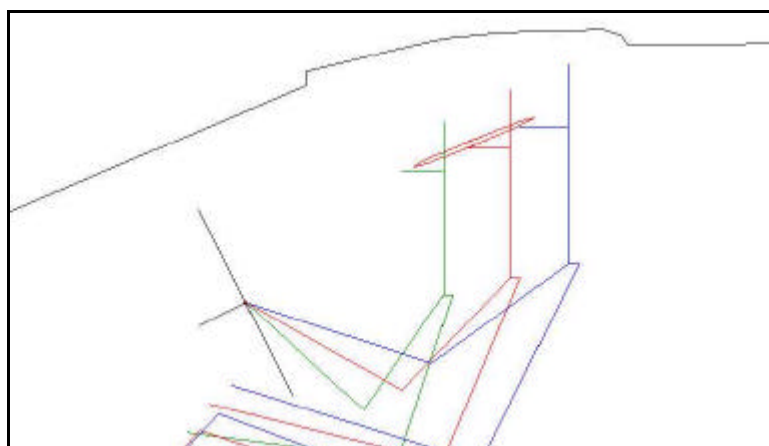


Fig. 3.53. – Ellisse occhi del 95th percentile.

Aureole (o contorni teste) (fig. 3.54):

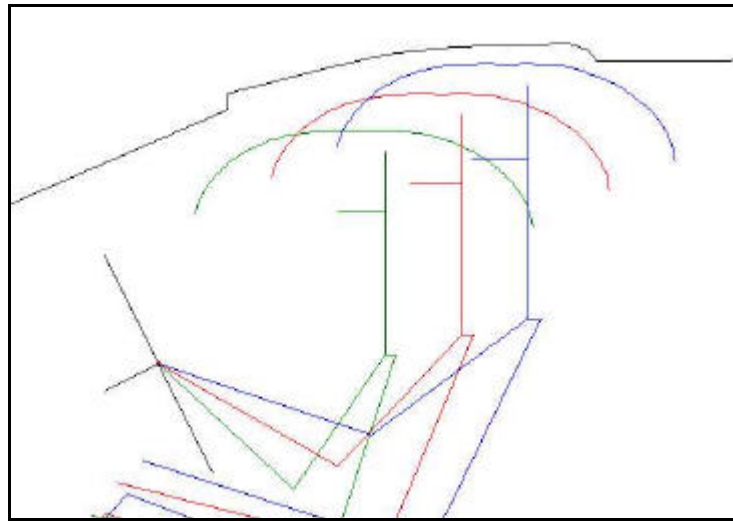


Fig. 3.54. - Aureole relative ai percentili: 2.5° (verde), 50° (rosso), 95° (nero).

Rappresentando in un'unica figura i punti e le curve caratteristiche precedentemente illustrate, si ha (fig. 3.55):

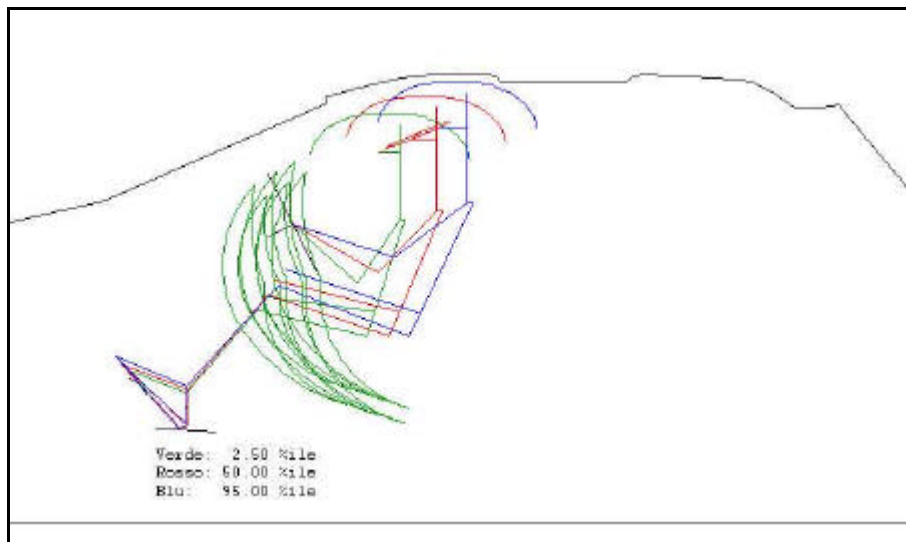


Fig. 3.55. - Punti, curve e manichini.

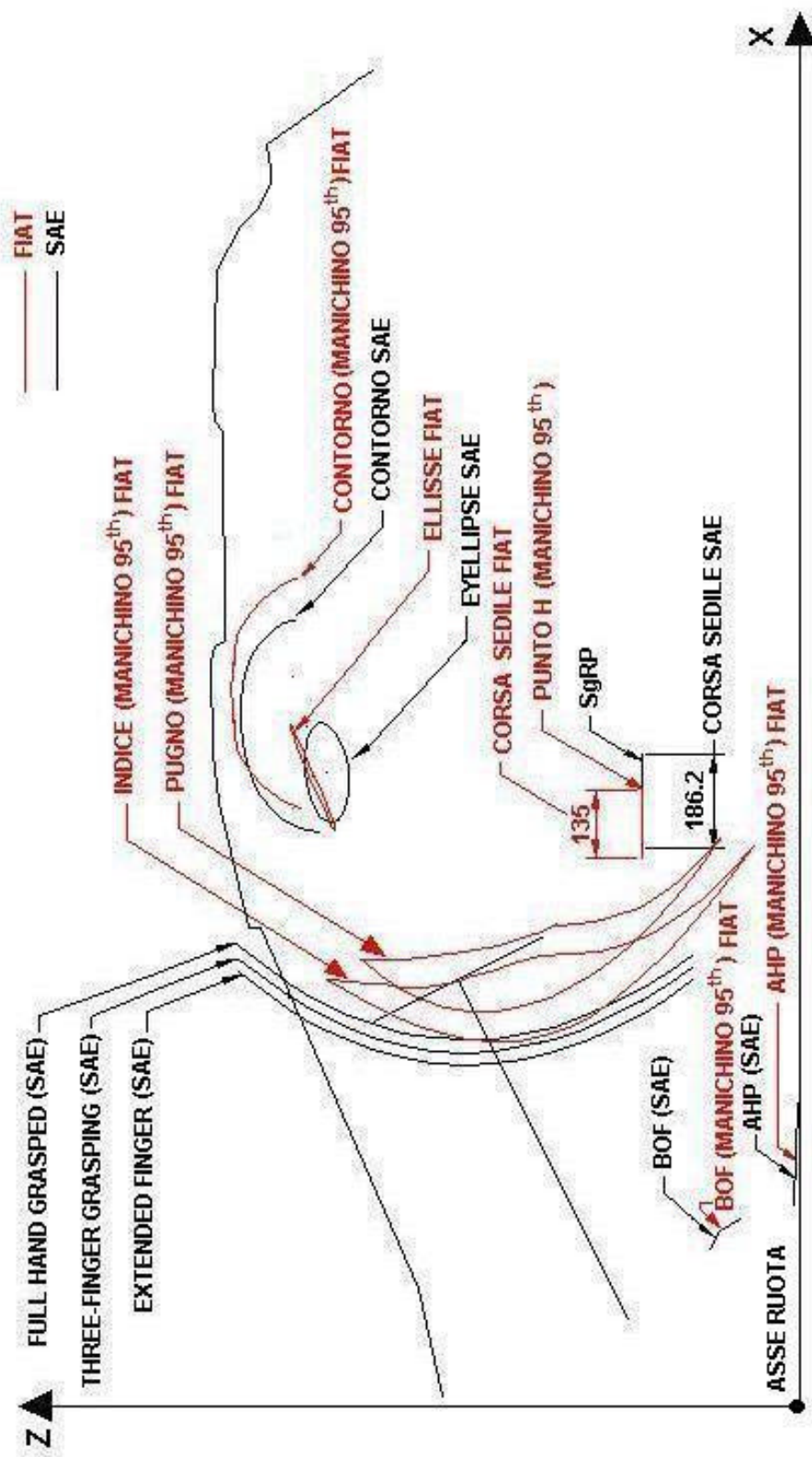
III.3.11.2 Confronto tra i risultati ottenuti dalle due metodologie.

Dai risultati ottenuti dalle simulazioni precedenti, sono state riportate in un'unica vista laterale le curve ed i punti caratteristici ottenuti con Jack (metodologia SAE) e

con l'applicativo 2D (metodologia FIAT) relativi al 95° percentile, al fine di valutare le differenti posizioni e dimensioni.

Dall'analisi della figura (pag. seguente) si osserva che:

- Il *BOF* e l'*AHP* FIAT risultano entrambi più arretrati rispetto ai corrispondenti SAE.
- L'*SgRP* (SAE) è più arretrato rispetto al *punto H* relativo al manichino del 95° percentile (FIAT).
- La "*ellisse occhi*" FIAT è molto più stretta e inclinata della "*eyellipse*" SAE.
- Il *contorno testa* FIAT è più grande, più arretrato e meno distante dal padiglione di quello SAE.
- L'*area di raggiungibilità* FIAT relativa al *dito indice esteso* è più arretrata rispetto alla curva SAE "*extended finger*".
- L'*area di raggiungibilità* FIAT relativa al *pugno chiuso* è più arretrata rispetto alla curva SAE "*full hand grasped*".
- Inoltre si può notare che secondo la FIAT la percentuale di persone posizionate all'interno dell'abitacolo (comfort "buono") è pari al 92.5% e la corsa sedile utile minima è 135mm. Per la SAE, invece, la percentuale di popolazione utente accolta è pari al 95% e la corrispondente corsa sedile minima è 186mm. In particolare, la corsa sedile FIAT risulta più avanzata rispetto a quella SAE.



DIMENSIONI IN mm SCALA 1:10
TUTTE LE CURVE SI RIFERISCONO AL 95TH PERCENTILE

Capitolo IV

PROGETTAZIONE DI UN AMBIENTE VIRTUALE PER
ANALISI ERGONOMICHE.

IV.1 INTRODUZIONE

Questa attività di ricerca, svolta in collaborazione con l'ente Metodologie Sviluppo Prodotto dell'Elasis ScpA di Pomigliano d'Arco (NA), ha riguardato la progettazione di un simulacro fisico di posto guida per analisi ergonomiche sugli interni di nuovi autoveicoli, da integrarsi con dispositivi inerenti la realtà virtuale (caschi HMD, sistemi di *tracking*). In particolare è stata progettata l'architettura di un ambiente virtuale che permetta ai progettisti e agli ingegneri di valutare differenti soluzioni degli interni di una nuova vettura, partendo dalle prime fasi del progetto. Tale ambiente virtuale è basato sull'integrazione di tecnologie di Realtà Virtuale (ad esempio rappresentazione realistica del prodotto, sistemi di *tracking*, sistemi *haptic*, strumenti di visualizzazione stereoscopica, ecc.), modelli umani digitali e un simulacro fisico di posto guida. Lo scopo principale è ridurre la costruzione di prototipi fisici per la validazione del progetto dell'autoveicolo, usando le tecnologie descritte per giungere ad una validazione "virtuale" dello stesso con notevoli risparmi in termini di tempi e di costi.

Dopo aver delineato lo stato dell'arte circa analoghi strumenti in dotazione alle diverse case automobilistiche, con particolare riferimento alle problematiche relative all'integrazione con i citati dispositivi inerenti la realtà virtuale, si è definita la struttura da progettare: un "*seating buck*", ovvero una macchina capace di movimentare nello spazio organi meccanici atti a simulare i principali elementi del posto guida di un veicolo: sedile, volante, pedaliera.

In questo capitolo verrà presentata una sintesi dei principali *seating buck* impiegati per studi ergonomici in applicazioni industriali. Inoltre verrà illustrata l'architettura e le principali caratteristiche del sistema sviluppato presso l'Elasis

focalizzando il discorso sugli aspetti più propriamente progettuali del *seating buck* e sulla sua integrazione con gli strumenti della Realtà Virtuale. Infine verrà posta particolare enfasi sul problema inerente i processi di scambio dati dall'ambiente CAD all'ambiente virtuale dove vengono impiegati modelli tassellati.

IV.2 L'IMPIEGO DI SIMULATORI DI VEICOLO PER L'IMPOSTAZIONE DI UNA NUOVA VETTURA

L'impiego di un simulatore per l'impostazione del *layout* degli interni di un nuovo modello, con particolare riferimento al posto di guida ed a tutti i comandi disponibili al pilota, presenta notevoli potenzialità relativamente al lavoro di progettazione del veicolo sia in termini di qualità dei risultati ottenibili, difficilmente conseguibili con le tecniche classiche di progettazione, sia in termini di riduzione dei tempi di sviluppo di un nuovo modello.

Le potenzialità di un simulatore sono, ovviamente, strettamente legate al tipo di tecnologia utilizzata ed al grado di sofisticazione e raffinatezza con la quale il sistema viene ideato. Tuttavia è possibile affermare che l'orientamento moderno prevede l'uso di simulacri meccanici parametrici, integrati con software avanzati d'analisi ergonomica e con tecnologie di realtà virtuale, che offrono efficacia di rappresentazione ed analisi assai elevate, altrimenti non conseguibili coi tradizionali metodi di lavoro. I simulatori tendono infatti a ricreare attorno all'utilizzatore l'ambiente ipotizzato, con la possibilità di verificare le possibili posture e i movimenti da effettuare per azionare i comandi principali e secondari della vettura. Con l'espressione "*simulatore parametrico*" s'intende un dispositivo capace di riprodurre il posizionamento nello spazio degli elementi principali della guida in

modo univoco ed associato ad un set di valori numerici provenienti dal modello digitale (DMU) del nuovo autoveicolo.

Gli obiettivi esposti risultano chiaramente irraggiungibili con i tradizionali supporti del progettista, cioè le rappresentazioni bidimensionali oppure i modelli statici. Alla luce di quanto detto l'uso di un simulatore rivoluziona il lavoro dei *designer* d'interni, potendo questi verificare materialmente le proposte teoriche e non soltanto più limitandosi a studiarne la rappresentazione su carta. L'apporto benefico in termini di tempi di sviluppo apportato da un tale metodo di lavoro costituisce poi un aspetto assai interessante, vista la continua riduzione dei tempi di *turn-over* dei modelli di auto che induce i progettisti ad approntare nuove soluzioni in tempi sempre più ristretti [72].

Un sistema di simulazione ben congegnato consente infatti di individuare rapidamente le criticità dei problemi tipici del disegno di un abitacolo mettendo a confronto soluzioni alternative in tempi ridotti e ottenendo una convergenza più rapida verso la soluzione ottimale.

IV.2.1 Impiego di simulatori meccanici integrati da tecnologie avanzate

Un simulatore che si avvale di avanzate tecnologie informatiche ed elettroniche non si limita ad offrire un'efficace rappresentazione delle possibili configurazioni degli interni vettura ma consente anche di interagire con i software di analisi ergonomica, fornendo a tali programmi dati numerici per valutare la qualità delle posture e dei movimenti. E' chiaro dunque che si delineano due aspetti diversi ma complementari del lavoro effettuabile con un sistema di simulazione meccanico ed elettronico:

- esperienza e considerazioni *sogettive* dell'ergonomo che viene ad essere l'utilizzatore fisico del sistema;
- Interazione del sistema coi software sviluppati per l'analisi posturale e dei movimenti, che costituiscono un giudizio numerico e quindi *oggettivo* della soluzione in esame.

Tali aspetti del lavoro d'analisi effettuabile con un simulatore sono entrambi rilevanti al fine di decretare la configurazione definitiva che garantisca non solo comfort e qualità della vita a bordo ma anche gradimento estetico e tattile del prodotto. Infatti il giudizio soggettivo dell'utilizzatore del simulatore risulta, come detto, assai importante in quanto esprime fattori non parametrizzabili e quindi automatizzabili ma comunque determinanti ai fini della buona riuscita della configurazione dell'interno vettura.

Tali valutazioni riguardano sia aspetti meramente estetici, come ad esempio le scelte cromatiche, sia aspetti funzionali in tema di sicurezza e comfort, come l'azionamento dei comandi vettura (sterzo, cambio, pedali e freno di stazionamento).

Utilizzando il *seating buck* i progettisti possono ricavare giudizi soggettivi, mediante test clinici condotti su gruppi di potenziali utenti del sistema, ed intersecare questi con l'analisi oggettiva effettuata mediante *software* di simulazione ergonomica come i manichini virtuali al fine di ottenere, dall'interazione dei due approcci, la migliore soluzione possibile (chiaramente la valutazione delle citate soluzioni estetiche rimane un'esclusiva del soggetto umano).

IV.2.2 Tipologie di simulatori ergonomici

I simulatori per verifiche ergonomiche possono suddividersi in due grandi categorie a seconda del tipo di tecnologia utilizzata :

- Simulacri esclusivamente fisici degli elementi caratteristici del posto guida ed eventualmente dell'intero abitacolo;
- Simulatori fisici (meccanici ed elettronici) integrati con tecnologie di realtà virtuale.

IV.2.2.1 Seating buck fisici

I sistemi del primo tipo risultano essere puramente meccanici e possono ulteriormente suddividersi in vari tipi di esecuzione:

- Simulatori meccanici non motorizzati, cioè con organi simulanti gli elementi fondamentali del posto guida (ed eventualmente i rimanenti posti dell'abitacolo) movimentabili manualmente.

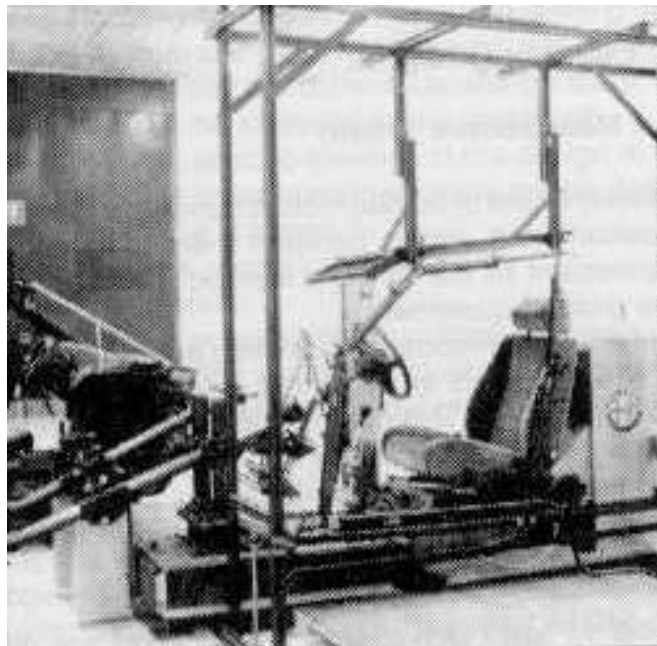


Fig. 4.1. – Un esempio di simulatore meccanico della FIAT.

In figura 4.1 è raffigurato un sistema appartenente a tale tipologia, dove è possibile individuare un telaio di sostegno sul quale sono montati sedile, volante e plancia nonché un elemento simulante il tetto della vettura. In figura 4.2 è poi raffigurato un semplice sistema di simulazione costituito da normali componenti di produzione (plancia, volante, sedili) variamente scelti e disposti a configurare eventuali layout del posto guida. Questi sistemi sono concepiti al fine di valutare il design dell'abitacolo posizionando manualmente nello spazio i principali elementi dell'ambiente.



Fig. 4.2. - Un esempio di simulazione statica degli interni vettura.

- Sistemi meccanici configurabili, in cui i principali elementi del posto guida sono movimentabili meccanicamente. Questi sistemi sono sicuramente potenti e flessibili, ma richiedono in generale molto tempo per configurare completamente i vari componenti.
- simulatori meccanici motorizzati, che si differenziano dai precedenti per la movimentazione degli elementi, realizzata per esempio da motori elettrici; si tratta di sistemi ad assi motorizzati installabili in una vettura o prototipo esistente al fine di verificare direttamente sul modello differenti soluzioni progettuali.

Nella figura 4.3 è raffigurato un esempio di applicazione del sistema della società statunitense *Prefix* [73]. Su questi simulatori è possibile installare componenti reali di nuovi veicoli o prototipi al fine di valutare differenti soluzioni per gli interni degli autoveicoli. D'altra parte essi presentano notevoli svantaggi: alti costi, la possibilità di analizzare solo pochi veicoli e la grande complessità del sistema che deve controllare molti gradi di libertà (ci sono molti motori elettrici da gestire).



Fig. 4.3. – Il simulatore meccanico motorizzato della Prefix.

I simulatori meccanici si basano su un'analisi esclusivamente "soggettiva" ovvero si affidano all'esperienza diretta dell'utilizzatore senza la possibilità di interfacciamento con i sistemi computerizzati di analisi ergonomica che sovrappongono a tale esperienza diretta la verifica rigorosa e numerica (e quindi oggettiva) dei propri algoritmi basati sui *database* antropometrici e sugli altri *tool* descritti nel capitolo III. Inoltre la rappresentazione della realtà offerta dai simulatori meccanici è necessariamente limitata e, soprattutto, molto costosa.

IV.2.2.2 Simulatori integrati in un ambiente virtuale

I simulatori che si avvalgono di tecnologie di realtà virtuale offrono molte e differenti potenzialità:

- Possibilità di offrire al *designer*, e anche all'utente, rappresentazioni grafiche dinamiche e fedeli della realtà che lo circonderebbe all'interno del veicolo;
- possibilità di rilevare ed analizzare la postura ed i movimenti dell'utente durante gli azionamenti dei comandi;
- possibilità di riprodurre sensazioni tattili e forze di retroazione per l'utilizzatore;
- possibilità di valutare diverse alternative di progetto e diverse configurazioni.

La maggior parte dei sistemi di simulazione facenti uso di dispositivi di Realtà Virtuale finora realizzati e noti consistono per lo più di un insieme formato dagli elementi principali dell'abitacolo (sedile, volante ed eventualmente cambio e pedali) disposti a configurare un'ipotesi di posto guida e posizionabili manualmente. Tali elementi possono essere costituiti da normali componenti di produzione (componenti fisici) oppure possono essere simulati mediante sistemi *haptic* come nel caso del volante nell'applicazione mostrata nella figura 4.4.



Fig. 4.4 - Un esempio di uso di tecnologie VR per la simulazione di guida.

Questi simulatori sono tipicamente dotati di un sistema di visualizzazione diretta capace di dare all'utente la rappresentazione grafica di ciò che vedrebbe nella realtà. Inoltre essi includono un sistema di rilevamento (*tracker*) destinato a rilevare la postura ed i movimenti dell'utente stesso ed a trasmettere i relativi dati

all'elaboratore centrale. In figura 4.5 è mostrato il sistema CDV (*Chrysler Data Visualizer*) della *Chrysler*, costituito da un sistema di visualizzazione, un sistema di *tracking* per le mani e la testa dell'utilizzatore e da un sedile e un volante di un veicolo commerciale. Tale sistema risulta essere un esempio particolarmente semplice di simulatore "virtuale" del posto guida in quanto esso non fornisce alcuna possibilità di regolazione motorizzata e "parametrica" dei componenti materiali utilizzati. Nella stessa figura viene anche mostrato lo schermo che consente al team di progettisti di visualizzare la rappresentazione grafica offerta all'utilizzatore tramite il sistema di visione diretta (nel caso particolare mostrato in figura l'utente indossa un casco noto col nome di *Head Mounted Display – HMD*).



Fig. 4.5. - *Chrysler Data Visualiser*.

I dati rilevati dai sistemi di *tracking* sono utilizzati principalmente per due scopi:

- valutazione della qualità della postura coi *software* di analisi ergonomica (manichini virtuali che possono riprodurre la posizione e i movimenti dell'utente);
- aggiornamento in tempo reale delle immagini rappresentate dal dispositivo di visualizzazione in base ai movimenti dell'utente.

I processi sinteticamente descritti sono realizzabili grazie alle tecnologie ed ai dispositivi di seguito analizzati.

IV.3 LE TECNOLOGIE OCCORRENTI PER I SIMULATORI

IV.3.1 Sistemi di *tracking*

I sistemi di *tracking* sono apparecchiature aventi la funzione di rilevare la posizione ed il movimento di oggetti nello spazio e di generare un segnale atto ad immagazzinare tali informazioni presso un elaboratore centrale. Tali sistemi si differenziano essenzialmente per il tipo di tecnologia utilizzata:

- elettromeccanica
- elettromagnetica
- acustica
- ottica

Ciascuna di queste quattro tecnologie presenta pregi e difetti differenti e la scelta è da valutare in base alla specifica applicazione. Nello specifico problema di un simulatore di guida, la decisione per una particolare tipologia di dispositivo è anche condizionata dagli eventuali problemi di “interferenza” con le strutture metalliche.

IV.3.1.1 Sistemi di *tracking* elettromeccanici

Il rilevamento della posizione e dell’orientamento di oggetti nello spazio mediante sistemi elettromeccanici è stato tra i primi ad essere utilizzati.

Un’apparecchiatura di tal genere consta di un braccio meccanico collegato all’elemento di cui si vuole acquisire la posizione/orientamento. Il braccio meccanico è vincolato da un giunto scorrevole e da una cerniera sferica. La posizione del

braccio viene misurata tramite potenziometri o codificatori ottici (*encoder*) al fine di determinare la posizione e l'orientamento del corpo in esame (fig. 4.6). Noti gli angoli di ciascun giunto e le lunghezze delle aste della catena cinematica, è possibile calcolare con facilità la posizione dell'oggetto tracciato.

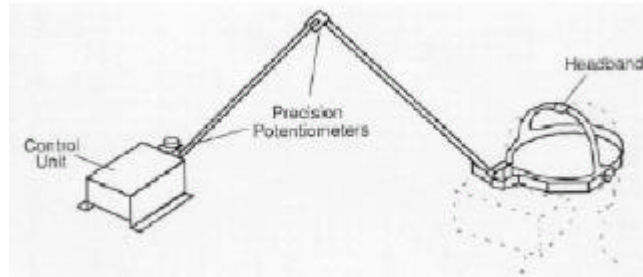


Fig. 4.6. – Sistema meccanico a pantografo.

Vantaggi: la semplicità costruttiva e la mancanza di unità di trasmissione-ricezione ne riduce il costo. Inoltre, essendo meno sensibili a fenomeni dell'ambiente esterno come, ad esempio, i campi elettromagnetici, offrono in generale la più alta risoluzione ed il tempo di risposta minore.

Svantaggi: Nonostante il dispositivo sia di norma accuratamente bilanciato ed agganciato ad appositi supporti, esso risulta molto pesante, e per questo poco indicato, per esempio, per il rilevamento della posizione della testa dell'utente (figura 4.7). Inoltre, solitamente, il volume di lavoro è piccolo, il che vincola l'utente nei movimenti, e le parti in movimento sono soggette ad usura.

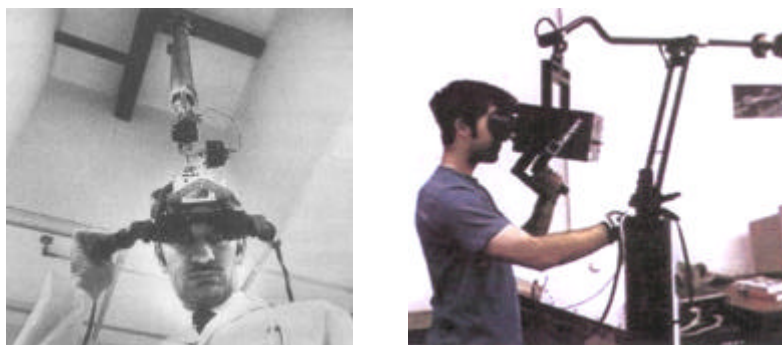


Fig. 4.7. – Esempi di sistemi di *tracking* elettromeccanico.

Nella figura 4.8 viene mostrato un *seating buck* integrato con un sistema di *tracking* elettromeccanico.



Fig. 4.8. – *Seating buck* integrato con un sistema di *tracking* elettromeccanico.

IV.3.1.2 Sistemi di *tracking* elettromagnetici

I sistemi di *tracking* elettromagnetici sono quelli più usati nelle applicazioni in ambiente di realtà virtuale. Sono costituiti da un trasmettitore fisso e da un ricevitore mobile solidale, ad esempio, alla testa dell'utente. Il trasmettitore genera un campo magnetico fluttuante mediante tre spire tra loro ortogonali, che è rilevato da tre simili spire nel ricevitore. La variazione del segnale è tradotta in una variazione (a sei gradi di libertà) di posizione e di orientamento relativo tra il trasmettitore ed il ricevitore. Queste variazioni del segnale sono poi trasferite all'unità centrale per essere trasmesse all'ambiente grafico 3D. Il sistema di *tracking* 3D dovrebbe operare almeno alla frequenza di aggiornamento video, con il tempo di latenza più basso possibile, affinché l'utente non sperimenti un'inaccettabile sensazione di ritardo. Molto spesso il raggio attivo dei *tracker* elettromagnetici è ristretto ad 1-2 metri, il che costringe l'utente VR a navigare in uno spazio fisico relativamente ristretto. In figura 4.9 viene schematizzato il processo di acquisizione dati.

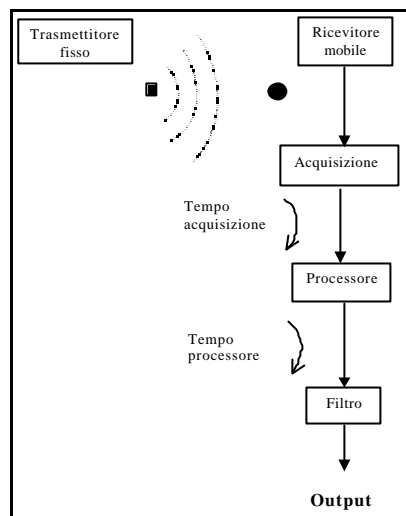


Fig. 4.9. - Il processo di acquisizione dei dati in un *tracker* elettromagnetico.

Vantaggi: sono dispositivi molto comodi grazie alla piccola dimensione dei ricevitori (meno di 2 cm), il che permette di attaccarli con facilità ad esempio alla testa o alle mani. Sebbene il volume di lavoro non sia molto grande (solitamente un metro cubo per la massima accuratezza), è possibile estenderlo combinando più dispositivi tra loro.

Svantaggi: questo tipo di dispositivo è molto sensibile alle interferenze elettromagnetiche di apparecchi elettronici come radio o monitor, così come materiali ferromagnetici nelle vicinanze possono deformare il campo elettrico e quindi compromettere la precisione della misura. Un altro svantaggio è la lentezza della risposta, che è di circa 100ms, anche se, nei dispositivi più recenti, tale valore è stato ridotto.

Il dispositivo in figura 4.10 è il *3SPACE FASTRAK* della *Polhemus*; questo sistema è capace di gestire fino ad un massimo di quattro sensori i quali hanno, ognuno, sei gradi di libertà e più specificatamente la traslazione lungo i tre assi x, y e z, e l'orientamento (azimut, alzata, rollio). Esso permette un aggiornamento

sull'acquisizione con una frequenza pari a 120Hz (raggiungibile con un singolo ricevitore).



Fig. 4.10. - Il sistema Fastrak prodotto da Polhemus.

IV.3.1.3 Sistemi di *tracking* acustici

I sistemi di *tracking* acustici sono stati sviluppati usando due approcci di base: misura del Tempo-di-Percorrenza (*Time-of-flight*, TOF) e misura della Fase-Coerente (*Phase-coherent*, PC). Vengono usate frequenze ultrasoniche (sopra i 20 kHz), per cui i suoni non sono udibili.

Un *dispositivo TOF* determina la distanza dall'emettitore fisso al ricevitore mobile misurando il tempo che impiega un'onda acustica per andare dall'uno all'altro. Si usano vari emettitori e sensori per acquisire un set di distanze al fine di calcolare la posizione e l'orientamento.

Il *sistema PC* determina la distanza comparando la fase di un segnale di riferimento alla fase di un segnale emesso da un trasmettitore e rilevato dai sensori mobili. Questo sistema può generare dati ad alta frequenza, poiché la fase può essere misurata continuamente.

Vantaggi: sono dispositivi economici e di facile reperibilità.

Svantaggi: la velocità del suono varia con le condizioni ambientali, quindi sono sistemi poco precisi in quanto sensibili alla pressione, alla temperatura e all'umidità dell'aria. Inoltre questi sistemi sono inutilizzabili in ambienti dotati di pareti che riflettono le onde sonore in quanto vengono a crearsi immagini fantasma delle sorgenti. Infine hanno un volume di funzionamento limitato.

IV.3.1.4 Sistemi di *tracking* ottici

I sistemi di tracciamento ottici sono caratterizzati da un lato da una elevata accuratezza, e, dall'alto, da una altrettanto elevata complessità e costo. Il sistema è costituito da delle sorgenti luminose disposte sull'oggetto da tracciare e delle telecamere che ne rilevano la posizione. Solitamente si utilizzano sorgenti a infrarossi perché sono invisibili e quindi non interferiscono con la visuale dell'utente.

Vantaggi: sono capaci di gestire un'area di lavoro molto grande (fino a 100m con i sistemi al laser) e delle precisioni impossibili ad altri sistemi.

Svantaggi: richiedono che sia mantenuta la continuità del cammino ottico tra proiettore e sensore, altrimenti si genererebbero valori imprevedibili. L'alto costo e l'ingombro ne hanno impedito lo sviluppo.

IV.3.2 Dispositivi di visualizzazione diretta

Un tipico dispositivo di visualizzazione diretta è il casco **HMD** (*Head-Mounted Display*, fig. 4.11). Tale dispositivo è stato il primo a permettere un'esperienza immersiva a chi lo indossava. La sua prima commercializzazione è avvenuta nel 1989 dal *VPL Research*.



Fig. 4.11 - Head-Mounted Display.

Un tipico dispositivo HMD è costituito da due display in miniatura ed un sistema ottico che convoglia le immagini dallo schermo agli occhi. Il sistema di *tracking* misura continuamente la posizione e l'orientazione della testa dell'utente, permettendo la generazione delle immagini al computer in modo da aggiornare la rappresentazione della scena alla visione corrente. Il risultato è che l'utente può guardarsi intorno e camminare attraverso l'ambiente virtuale circostante.

Esistono vari tipi di display. L'obiettivo della tecnologia è quello di fornire il più ampio campo di visione con la più alta risoluzione ed il minimo peso ad un costo ragionevole. Attualmente gli HMD possono disporre sia di display LCD (display a cristalli liquidi) sia di display CRT (tubo a raggi catodici) basati su fibre ottiche.

Alcuni display richiedono dispositivi esterni per una migliore definizione dei colori. Le caratteristiche di un HMD sono la risoluzione ed il campo di visuale (*field-of-view*, FOV). Di solito per ottenere un ampio FOV ci si deve necessariamente accontentare di una diminuzione della risoluzione. La maggior parte dei display LCD può usare soltanto 256 colori, mentre i display CRT possono usare i 16 milioni di colori tipici della computer grafica.

Il **BOOM** (*Binocular Omni-Orientation Monitor*) è un dispositivo di visualizzazione in 3D. Lo schermo ed il sistema ottico sono alloggiati in una scatola collegata ad un braccio articolato. L'utente guarda all'interno della scatola attraverso due fori, vede il mondo virtuale e lo esplora orientando opportunamente il dispositivo. L'orientamento della scatola è controllato attraverso dei sensori posti nei giunti del braccio articolato.

Il **BOOM HF** (*hands free*) (fig. 4.12) è una variante del **BOOM** che permette all'operatore di stare in piedi o seduto, con entrambe le mani libere di manipolare controlli reali o virtuali e dispositivi di input.



Fig. 4.12. - Il **BOOM hands free**.

IV.3.3 I sistemi *haptic*

I sistemi *haptic* introducono negli ambienti virtuali la capacità di manipolare gli oggetti ed interagire con il mondo circostante tramite dispositivi interfacciati al computer. Il termine *haptic* comprende tutta la gamma di informazioni sensoriali che si provano al contatto con un corpo solido. Ciò include la capacità di sentire se una superficie è liscia o ruvida, o se presenta delle asperità; ma anche proprietà quali la temperatura, l'umidità, la viscosità, il peso, le tensioni e le forze. Poiché le mani

dell'utente giocano un ruolo importante nell'interazione con gli oggetti, sembra naturale che quando la mano effettivamente interferisce con un oggetto virtuale, il contatto, anch'esso virtuale, debba essere accompagnato, oltre che da un segnale acustico o luminoso, anche da un segnale tattile (*haptic*). In questo modo si aumenta la quantità di informazioni ricevute e si accresce il senso di esperienza immersiva dell'utente. La sensazione tattile è resa tramite una serie di piccoli “stantuffi” vibranti o bolle d'aria comandate dal computer, che sollecitano la mano all'interno di speciali guanti (*Dataglove*), mentre le forze di reazione sul corpo sono simulate grazie alla presenza di opportuni vincoli fisici, come *joystick* “reattivi”, o vere e proprie articolazioni meccaniche (fig. 4.13). Tutti i dispositivi *haptic* sono collegati a sistemi di *tracking*, i quali determinano la posizione/orientazione della mano e provvedono ad evitare che essa penetri all'interno dell'oggetto virtuale.



Fig. 4.13. - Articolazione meccanica per il braccio.

Grazie ai sistemi *haptic*, oltre alla sensazione puramente tattile (liscio, ruvido, acuminato), l'utente ha la possibilità di interagire pienamente con l'oggetto virtuale in maniera attiva, afferrandolo, spostandolo e deformandolo.

Attualmente la ricerca si sta indirizzando verso lo sviluppo di algoritmi e strutture di controllo che permettano una veloce ed efficiente sensazione tattile di ambienti virtuali derivati dalle più comuni descrizioni grafiche. Lo sviluppo di questa tecnologia potrà apportare enormi benefici in molte aree dell'attività umana, quali la medicina, la progettazione industriale, l'aeronautica, la robotica e l'insegnamento.

Tuttavia il meccanismo del toccare è molto complesso, e le interfacce *haptic* non sono ancora abbastanza sviluppate per quanto riguarda le sensazioni puramente tattili. I dispositivi per la simulazione delle forze di reazione (*“force-feedback”*), invece, sono ad uno stato più avanzato poiché si tratta di riprodurre compiti molto più semplici e meglio definiti.

IV.3.3.1 Sistemi haptic indossati

Sono disponibili diversi dispositivi che permettono all'utente di interagire con gli oggetti virtuali. Tra questi, i dispositivi “indossati” sono quelli che permettono all'utente di muoversi nella maniera più semplice e naturale possibile all'interno dell'ambiente virtuale. I più diffusi dispositivi indossati sono i guanti (*Dataglove*), poiché le mani costituiscono il mezzo principale di interazione. I *Dataglove* incorporano dei sensori a fibre ottiche che permettono di misurare gli angoli delle dita, in modo da poter ricostruire una rappresentazione virtuale della mano dell'utente su un *display*. Oltre alla sensazione tattile, si possono simulare anche le forze esercitate sulle dita tramite dei “tendini meccanici”. Tuttavia, la presenza di dispositivi esterni come quello in figura 4.13, che esercitano delle forze sull'intera mano e sul braccio, può causare dei movimenti innaturali.

Virtual Technologies (Virtex) ha sviluppato tre tipi di sistemi, rispettivamente per la misura della posizione (*CyberGlove*), per la sensazione tattile (*CyberTouch*) e per la simulazione delle forze sulla mano (*CyberGrasp*).

- *CyberGlove* (fig. 4.14) è un guanto molto leggero con sensori flessibili che misurano con precisione la posizione ed il movimento delle dita e del polso.



Fig. 4.14 – CyberGlove.

Esso è disponibile per entrambe le mani nei modelli a 18 e a 22 sensori. I sensori sono estremamente sottili e flessibili e resistono molto bene alle flessioni.

- *CyberTouch* (fig. 4.15) aggiunge la sensazione tattile al *CyberGlove* a 18 sensori. Esso è caratterizzato da piccoli stimolatori vibrotattili su ogni dito e sul palmo del *CyberGlove*. Ogni stimolatore può essere programmato singolarmente per variare l'intensità della sensazione tattile.



Fig. 4.15. – CyberTouch.

- Il dispositivo haptic *CyberGrasp* rende capace l'utente di toccare in tempo reale oggetti virtuali generati dal computer simulando le forze di reazione. Le forze di

“*afferraggio*” sono esplicate attraverso una rete di tendini (fig. 4.16) collegati alle dita e che possono essere programmati per prevenire la penetrazione delle dita stesse nell’oggetto virtuale.



Fig. 4.16. - CyberGrasp.

I tendini sono comandati da cinque attuatori, uno per ogni dito. Il sistema *CyberGrasp* permette la piena mobilità della mano e non ostruisce i movimenti dell’utente consentendo di manipolare oggetti virtuali e simulare operazioni di assemblaggio e di manutenzione (fig. 4.17). Il dispositivo è completamente regolabile ed è progettato per adattarsi ad un’ampia varietà di mani.

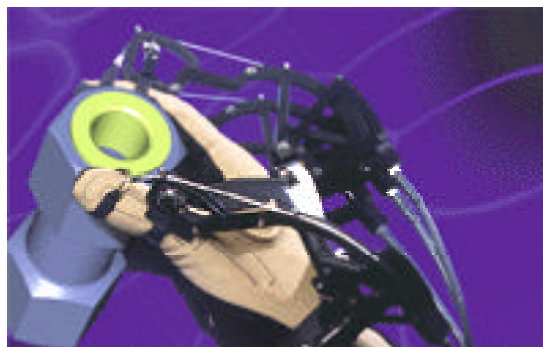


Fig. 4.17. - Simulazione di assemblaggio.

IV.3.3.2 Sistemi *haptic* esterni

Alcune applicazioni di realtà virtuale richiedono un sistema di “*force feedback*” che possa simulare il peso di un oggetto e le forze sul corpo dell’utente. In questi casi

è necessario disporre di appositi dispositivi esterni, come articolazioni meccaniche, manipolatori, joystick reattivi e piattaforme mobili.

Utilizzando questi dispositivi, l'utente può toccare un oggetto solido evitando di penetrare al suo interno, oppure può sentire le forze di reazione esplicate da una superficie elastica. L'utente percepisce delle forze (dovute nella realtà a contatto e inerzia) tramite dispositivi meccanici che amplificano la sensazione di interagire con un oggetto reale.



Fig. 4.18. - SensAble Technologies force feedback system.

IV.4 MOTIVAZIONI CHE HANNO SPINTO ALLA PROGETTAZIONE DI UN NUOVO TIPO DI SEATING BUCK

In base alla breve rassegna dei sistemi di simulazione già realizzati e noti operata all'inizio di questo capitolo è possibile trarre alcune considerazioni su tali dispositivi e sulle loro possibilità d'analisi :

- i sistemi puramente meccanici configurabili permettono di analizzare diverse disposizioni degli oggetti fisici dell'abitacolo ma non ne è prevista l'integrazione con dispositivi di realtà virtuale. L'analisi è quindi affidata alle impressioni soggettive degli utilizzatori senza alcuna possibilità di interfacciamento con i *software* ergonomici. Essi consentono di valutare un limitato range di alternative

durante una sessione di lavoro, e richiedono tempi e costi abbastanza elevati per definire una nuova configurazione.

- I sistemi che utilizzano le tecnologie e i dispositivi VR, descritti nel precedente paragrafo, presentano potenzialità molto maggiori ma non sono dotati di *seating buck* finemente configurabili per tutti i componenti dell'interno vettura; solo gli elementi principali dell'abitacolo possono essere posizionati; in pratica tale tipologia di simulatori presenta lo "sforzo tecnologico" essenzialmente concentrato nei citati dispositivi di realtà virtuale.

Emerge da tali considerazioni che un sistema di simulazione massimamente efficace sarebbe ottenibile ideando un simulacro fisico regolabile e parametrico del posto guida integrato dai dispositivi descritti di rilevamento e di visualizzazione diretta. In tal modo si otterrebbe una rappresentazione della realtà che si avvale sia di un aspetto "*hardware*", ovvero gli elementi fisici, sia di un aspetto "*software*", ovvero la rappresentazione grafica.

Una rappresentazione efficace, completa e multisensoriale è, come intuibile, fondamentale per l'efficacia dell'analisi in quanto maggiore è il grado di "immersione" offerto all'utente e maggiore risulta l'attendibilità dei risultati.

Un altro aspetto assai importante è che il *seating buck* sia facilmente configurabile assegnando i giusti valori ad un opportuno set di *parametri*. Ciò implica non solo la possibilità di configurare con precisione spinta (attraverso opportuni servomeccanismi) tutti i componenti del veicolo, ma anche la possibilità di associare ogni possibile configurazione ad un opportuno set di valori numerici. Tale set di valori sarebbe poi da comparare ai valori della normativa ergonomica automobilistica. Il sistema meccanico deve essere poi integrato con i sistemi di

tracking (ed eventualmente con sistemi *haptic*) che fornirebbero dati al sistema di visualizzazione diretta (per ottenere un *refresh* realistico delle immagini) ed ai *software* di gestione dei manichini virtuali. In questo modo è possibile ottenere in pratica una doppia analisi ovvero quella diretta e soggettiva dell'utilizzatore e quella numerica e rigorosa dei manichini virtuali integrati nei software di ergonomia. Risulta quindi che un tale sistema di simulazione dovrebbe risultare dall'integrazione di un articolato sistema meccanico motorizzato con i dispositivi di realtà virtuale, tipologia che non risulta ancora essere disponibile almeno fra i sistemi noti.

Da tali considerazioni prende spunto lo sviluppo progettuale di prototipo applicativo che si propone di offrire le performance esposte.

IV.5 UN AMBIENTE VIRTUALE PER LO SVILUPPO DELL'INTERNO DELL'AUTOVEICOLO: SCOPI E DESCRIZIONE DEI COMPONENTI FISICI

Con lo scopo di giungere ad un miglioramento del processo di progettazione dell'abitacolo è stato progettato un ambiente virtuale (*Virtual Environment*) per lo studio degli interni delle nuove vetture e fornire ai progettisti ed agli ingegneri una esperienza virtuale dando loro la sensazione di giudicare la macchina reale.

I benefici provenienti dall'impiego di questo Ambiente Virtuale sono evidenti in quei casi in cui il giudizio è basato su sensazioni di natura qualitativa piuttosto che su parametri oggettivi. Tipicamente ciò fa parte della validazione del veicolo in termini di ergonomia, comfort e aspetto estetico.

Questo ambiente virtuale rappresenta un'applicazione di *Augmented Reality*: un *seating buck* che integra una piattaforma di veicolo configurabile parametricamente (in modo da poter simulare differenti configurazioni del veicolo) con dispositivi di

Realtà Virtuale come gli *HMD*, i *Data Glove* e i sistemi di *tracking*. Nella seguente figura 4.19 vengono illustrati i principali componenti di questo ambiente virtuale.

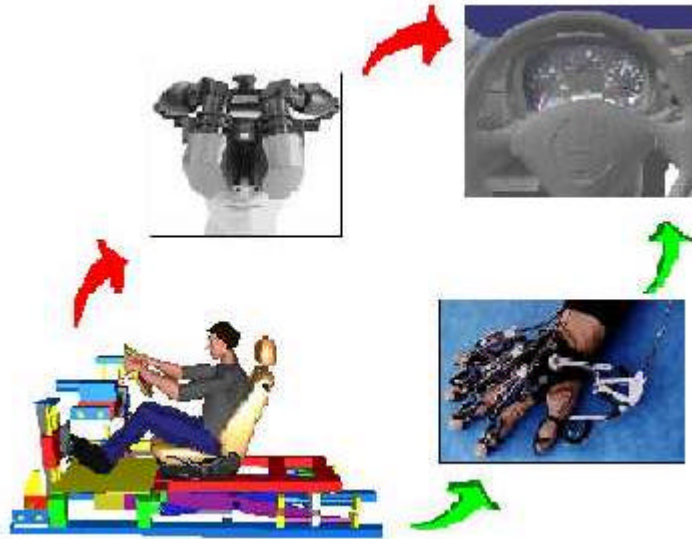


Fig. 4.19. – Componenti del simulatore.

Il sistema è costituito da diversi moduli *hardware* che forniscono all'utente la rappresentazione dell'interno vettura in modo dinamico e realistico.

Sistema veicolo: consiste in una struttura metallica atta a sostenere supporti mobili sui quali installare gli elementi principali del posto guida (il sedile, lo sterzo e i pedali dell'acceleratore, del freno e della frizione). I supporti sono fatti in modo da permettere rapidi cambiamenti dei componenti dell'abitacolo al fine di poter provare e valutare differenti *layout*.

Sistema di movimentazione: fornisce ai componenti del *sistema veicolo* una combinazione di moti traslazionali e rotazionali i cui valori sono selezionabili all'interno di intervalli di variazione desunti da analisi statistiche effettuate su un vasto campione di veicoli di diversa tipologia (utilitaria, monovolume, sportiva, ecc.) al fine di rendere il *seating buck* flessibile e versatile nei riguardi delle suddette tipologie di vetture analizzabili. Le regolazioni dei diversi componenti vengono

realizzate per mezzo di motori elettrici gestiti da un codice di calcolo che permette di convertire il set di dati di input proveniente dall'interfaccia grafica del sistema, tipicamente costituiti da parametri ergonomici della normazione automobilistica, al set di comandi da impartire ai motori elettrici e necessari a realizzare la configurazione desiderata. Per verificare che i valori degli spostamenti effettivamente conseguiti rientrino nei limiti di tolleranza caratteristici del sistema è previsto l'utilizzo di sensori di posizionamento. Mediante l'impiego di un software di controllo l'operatore setta la posizione dei componenti e ne visualizza a priori lo spostamento risultante sullo schermo del computer.

Sistema di visualizzazione: consiste in un HMD (*Head Mounted Display*) (cfr. paragrafo IV.3.2) con un campo di vista e una risoluzione grafica tali da permettere la visualizzazione realistica tridimensionale dello scenario costituito dall'interno del veicolo.

Sistema di *Tracking*: consiste in un sistema ottico (cfr. paragrafo IV.3.1.4) per il rilevamento della posizione della testa dell'utente. Esso permette di mostrare nell'HMD esattamente ciò che il guidatore dovrebbe vedere se fosse realmente all'interno dell'autoveicolo. Ogni movimento della testa viene rilevato dalle telecamere e tradotto, nel software di visualizzazione, in un cambiamento del punto di vista. Il sistema inoltre permette di effettuare analisi ergonomiche basate sull'acquisizione della postura del guidatore e in particolare degli angoli formati dalle articolazioni.

Sistema *Haptic*: fornisce l'interfaccia tra la mano del guidatore (e quindi il suo senso tattile) e i sistemi di controllo manuale (ad esempio bottoni e cambio), permettendo inoltre di simulare la forza necessaria ad attivare questi strumenti.

I moduli descritti operano in tempo reale per fornire una rappresentazione ripetibile, naturale e non distorta dello scenario, dei movimenti e delle sensazioni tattili di controllo associate con l'ambiente dell'interno del veicolo.

L'utente si siede sul sedile e degli operatori esterni configurano al computer il sistema mobile al fine di posizionare i componenti fisici (sedile, volante, pedali) nella stessa posizione della macchina reale che si sta valutando. Lo stesso utente manipola questi strumenti fisici ma, grazie all'HMD, egli ha l'impressione di essere seduto all'interno della macchina osservando stereoscopicamente i componenti e le superfici virtuali interne (plancia, volante e bottoni di controllo).



Fig. 4.20. – Interni virtuali del veicolo.

L'ambiente virtuale permette di eseguire le seguenti analisi:

- Comfort posturale e abitabilità: è possibile verificare la relazione tra il comfort, a breve e a lungo termine, dell'occupante con i fattori di seduta del veicolo.
- Visibilità: l'utente può analizzare i limiti del campo di vista guardando l'ambiente virtuale attraverso l'HMD.
- Raggiungibilità: è possibile analizzare i movimenti umani necessari per raggiungere i principali controlli dell'autoveicolo come la leva del cambio, il freno a mano, la cintura di sicurezza, l'aria condizionata e i pulsanti della radio.

Inoltre è anche possibile verificare caratteristiche sensoriali, comfort visuale, comfort tattile, comfort emozionale, gradevolezza visiva (colori, texture, forma delle superfici), *gap*, sovrapposizioni ed interferenze, accessori, materiali e finiture.

IV.6 INTEGRAZIONE CON LA REALTÀ VIRTUALE

Uno degli obiettivi del presente lavoro è stato studiare il processo di “*Prototipazione Virtuale*”, e quindi le diverse fasi necessarie per utilizzare nel *seating buck* una rappresentazione virtuale del modello CAD dell'autoveicolo. A tal scopo è stato implementato un approccio sistematico e sono stati sviluppati una serie di *tool* interattivi, algoritmi automatici e protocolli di riferimento per lo scambio dati che coprono l'intero processo [74, 75, 76].

I tempi richiesti per la creazione di un prototipo virtuale sono stati ridotti da molte settimane o mesi a pochi giorni. Le fasi del processo di prototipazione virtuale possono essere così riassunte [77]:

- *Costruzione del modello*: approssimazione della geometria, proveniente dal modello CAD, mediante *mesh* di poligoni (*tassellazione*) e semplificazione della stessa *mesh* (decimazione).
- *Modifica del prototipo* mediante l'aggiunta di colori, proprietà dei materiali, luci, *texture*, ecc.

Calibrazione delle interfacce dell'ambiente di realtà virtuale (HMD, sistema di *Tracking*, sistemi *Haptic*) con gli elementi fisici del *seating buck*.

Nel seguito alcune di queste fasi sono brevemente spiegate ed illustrate.

- a) *Tassellazione e decimazione*.

Per creare l'interno virtuale della macchina è necessario tradurre i modelli geometrici, consistenti in superfici curve (ad esempio NURBS), in *mesh* poligonali usando algoritmi di tassellazione. Questa procedura può produrre sia *file* molto leggeri con eccellenti performance ma bassa qualità dell'immagine, sia l'opposto. Tipicamente viene creato un gran numero di poligoni (molti milioni per un abitacolo). Gli algoritmi di decimazione vengono impiegati per ridurre l'ammontare di poligoni a un livello che permette aggiornamenti del *rendering* in tempo reale alla desiderata frequenza di 20-30 *frame* al secondo durante l'esperienza immersiva di visualizzazione e di navigazione. Gli algoritmi per la riduzione delle *mesh* minimizzano il numero di poligoni in accordo a criteri geometrici. Così, per esempio, due triangoli sono fusi insieme a formare un unico triangolo o quando essi presentano un piccolo angolo in corrispondenza del lato comune, o quando sono stati ottenuti punti vicini.



Fig. 4.21. – Volante con 3100 triangoli..

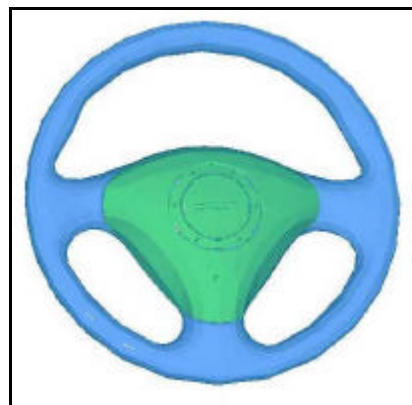


Fig. 4.22. – Volante con 5800 triangoli.

Una tassellazione di buona qualità dovrebbe presentare le seguenti proprietà:

- Distribuzione uniforme dei vertici;
- Allineamento tra i lati delle superfici;
- Linee nominali allineate precisamente alla superficie nominale.

Infine, dal momento che le operazioni di tassellazione e di decimazione di *patch* di superfici potrebbe creare *gap* o sovrapposizioni tra gli stessi *patch*, è necessario utilizzare un algoritmo di cucitura che attacchi le zone sconnesse e crei una *mesh* poligonale uniforme con vertici condivisi sui contorni del *patch*.

b) *Visualizzazione.*

La modellazione di elementi che presentano dettagli complessi, come le strumentazioni di bordo, la radio o le bocchette dell'aria, richiede un gran numero di poligoni. Le *texture* rappresentano allora un eccellente strumento per ridurre la complessità geometrica. *Rendering* computazionale o fotografie digitali di questi elementi vengono convertite in *bitmap* e incollate precisamente nella corretta posizione all'interno del prototipo virtuale.

Una volta che il mondo virtuale è stato creato, esso può essere visualizzato per mezzo di software di visualizzazione dedicati ad applicazioni di Realtà Virtuale. In questa attività di ricerca è stato utilizzato a tal scopo il *software VisConcept* (dell'EAI-UGS) il quale permette:

- La presentazione di progetti in scala 1:1 utilizzando schermi di grande dimensione;
- Applicazione di textures sulle superfici;
- Traslazione, rotazione e manipolazione dei modelli;
- Interazione con il modello mediante strumenti di input e altre tecnologie VR;

Ovviamente più l'ambiente mostrato è realistico, più i comportamenti umani, durante la sessione di simulazione virtuale, sono naturali. Per cui la visualizzazione di immagini di buona qualità è necessaria se si vogliono ottenere analisi significative.

Inoltre, utilizzando questo ambiente per le operazioni di *Design Review* e di validazione virtuale, è necessario che altre persone del *team* di progetto (manutenzione, acquisti, ingegneria di processo, ecc.) possano vedere le stesse immagini dell'utente seduto nell'auto, grazie anche all'impiego di grandi schermi di visualizzazione (*Powerwall*).

c) *Calibrazione dell'ambiente virtuale*

Il successo della simulazione è legato alla precisione con la quale si effettua la calibrazione dei componenti virtuali con gli elementi fisici del *seating buck*. Per esempio, quando l'utente afferra il volante virtuale con la mano virtuale controllata dal guanto (*data glove*) (fig. 4.23), egli deve poter "sentire" il volante fisico nella stessa posizione.



Fig. 4.23. – L'ambiente virtuale osservato dall'utente.

Inoltre, per un utile impiego del prototipo virtuale, le interazioni con i componenti interni dell'abitacolo, devono essere definite specificando la risposta del prototipo alle operazioni dell'utente. Le funzionalità e le proprietà del prototipo sono documentate nella forma di relazioni causa-effetto. Per esempio, se l'utente tocca un

pulsante della radio con il guanto (causa o evento), il sistema *haptic* deve fornire la giusta sensazione tattile alla mano dell'utente (effetto). Toccare un altro dispositivo di controllo può ad esempio generare un suono o un effetto visivo. Menù virtuali a cascata possono essere richiamati per la modifica dei colori interni, della luminosità dell'ambiente e di altre impostazioni.

A valle di queste operazioni il *seating buck* può essere utilizzato per eseguire l'analisi dell'abitacolo in accordo ai criteri illustrati nei precedenti paragrafi. Si potranno quindi ottenere due tipi di valutazioni: una soggettiva legata al giudizio di comfort dell'utente che effettua il test, ed una valutazione legata alle misure oggettive dei movimenti umani. Inoltre le tecniche di realtà virtuale di eseguire facilmente la seconda analisi mediante l'ausilio di software che utilizzano manichini virtuali. In particolare, nel corso di questa attività di ricerca, è stato utilizzato *Jack* (della EAI-UGS) (vedi paragrafo III.3). Attaccando un certo numero di sensori di posizione al soggetto fisico, e grazie ad un sistema di cattura del moto (*motion capture system*), è stato possibile rilevare e tracciare i moti dell'utente e trasferirli al manichino virtuale con la possibilità di ottenere un giudizio analitico del comfort dell'utente [78 – 82].

IV.7 CONCLUSIONI

L'ergonomia sta assumendo un ruolo sempre più importante nella progettazione automobilistica. Di conseguenza sta diventando strategico per le aziende acquisire conoscenze al fine di sviluppare o costruire strumenti potenti in grado di valutare tutti gli aspetti legati all'ergonomia di un nuovo veicolo partendo dalle prime fasi corrispondenti alla sua definizione concettuale. Questi strumenti possono essere

semplici software bidimensionali o programmi più complessi basati sull'impiego di modelli umani digitali rappresentati in tre dimensioni e con moduli per l'analisi di specifici compiti. Tuttavia, poiché nella valutazione del comfort concorrono diversi fattori, non è sufficiente l'analisi dei soli parametri di comfort basati su dati numerici (come gli angoli del corpo), per giudicare la progettazione di un abitacolo.

L'integrazione di un modello umano in un ambiente virtuale consente agli ingegneri di avere una visione globale dell'interazione uomo-veicolo.

L'impiego congiunto di un simulacro fisico di posto guida (*seating buck*) e di sistema per la visione stereoscopica fornisce all'utente la sensazione di essere all'interno del veicolo reale senza la necessità di realizzare alcun prototipo fisico. I movimenti della persona reale all'interno del *seating buck* possono essere rilevati e registrati, mediante un sistema di *tracking*, e trasferiti al manichino virtuale. In questo modo gli studi ergonomici possono essere condotti fin dalla fase concettuale di un nuovo veicolo fornendo, al *team* di progetto, importanti linee guida.

Capitolo V

APPLICAZIONI NEL CAMPO DELLA MEDICINA DEL LAVORO:

*Valutazione comparativa del rischio da movimentazione manuale
dei carichi mediante protocolli di analisi e l'impiego di modelli
umani digitali.*

V.1 INTRODUZIONE

Gli interessi della Medicina del Lavoro, tradizionalmente rivolti a quelle patologie definite “*occupational diseases*” la cui etiopatogenesi era sicuramente di origine professionale, oggi si sono indirizzati verso quadri morbosi ad etiopatogenesi multifattoriale in cui le attività lavorative sono viste come elementi causali o concausali, le “*work related diseases*”. Tra queste affezioni sono preminenti le patologie muscoloscheletriche, in particolare quelle a carico del tratto lombare della colonna vertebrale. Esse sono di comune riscontro in gran parte delle attività lavorative che prevedono movimentazione manuale di carichi, l’assunzione di posture fisse prolungate e movimenti ripetitivi degli arti superiori.

La valutazione del rischio legato a tali attività consta di due momenti fondamentali: il primo consiste nell’osservazione delle posture assunte dai lavoratori nel contesto dell’attività professionale; il secondo è rappresentato dall’analisi mediante specifici metodi di valutazione dei relativi indici di rischio (*ISR*, *OCRA Index*). I metodi più in uso, attualmente, sono quelli che fanno riferimento al *NIOSH* (*National Institute of Occupational Safety and Health*). Tali metodologie, però, non sempre hanno facile applicabilità in quanto mal si adattano alle molteplici realtà lavorative [83]. Da ciò è nata l’esigenza di un approccio multidisciplinare che tenti di soddisfare i punti carenti dei metodi attualmente esistenti e, facendo ricorso a strumenti e metodologie innovative, renda la valutazione del rischio quanto più obiettiva possibile.

V.1.1 Aspetto di innovatività dell'uso di manichini virtuali.

Il crescente sviluppo delle tecnologie *hardware* e *software* ha reso possibile negli ultimi anni l'impiego di modelli virtuali per rispondere ad esigenze ergonomiche in numerosi campi di applicazione, tanto da spingere ad ipotizzare, in campo medico, un approccio innovativo per la prevenzione e la diagnosi delle patologie muscoloscheletriche. Oggi, infatti, è possibile studiare ed analizzare, in un ambiente tridimensionale di visualizzazione, movimenti complessi e posture con un adeguato livello di precisione, mediante l'utilizzo di modelli umani digitali. Dalla discussione portata avanti nel III capitolo di questa tesi è emerso come i manichini virtuali possano rappresentare lo strumento essenziale di un approccio alla progettazione che tende a rendere oggettivi volumi di raggiungibilità e posture di lavoro, con di visualizzazione e carichi della colonna vertebrale. In questo approccio essi si propongono per sostenere, per mezzo di dati oggettivi, l'analisi di posture incongrue assunte durante lo svolgimento di attività lavorative.

V.2 MATERIALI E METODI

Il riferimento per la valutazione delle azioni di sollevamento è costituito dalle linee guida del *NIOSH* [3] modificate dall'Unità di Ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM) di Milano. Tali metodi consentono di determinare per ogni azione di sollevamento il cosiddetto "*limite di peso raccomandato*".

V.2.1 Analisi in ambiente virtuale delle sollecitazioni sulla colonna vertebrale.

Mediante l'uso di software ergonomici 3D è possibile posizionare creature umane digitali in ambienti virtuali, assegnare loro compiti specifici e valutarne le

performance (paragrafo III.3). In particolare, è possibile effettuare analisi muscoloscheletriche dettagliate, relativamente alla zona lombare della colonna vertebrale, che è una delle più sollecitate quando si movimentano i carichi o anche semplicemente quando si è seduti in maniera scorretta [6]. Lo strumento *Low Back Analysis del Task Analysis Toolkit* (paragrafo III.3.9) permette, infatti, di valutare le forze agenti sulla colonna vertebrale del manichino virtuale, sotto qualunque postura da lui assunta e qualsivoglia azione di caricamento della medesima colonna vertebrale. Questo strumento valuta in tempo reale le azioni correlate ai compiti imposti al manichino alla luce delle normative *NIOSH* e degli studi condotti nel settore da *Raschke* e *Chaffin* [68, 69].

V.3 RISULTATI

V.3.1 Valutazione con metodo NIOSH del compito lavorativo e risultati

Le numerose esperienze condotte hanno evidenziato una serie di difficoltà nel valutare l'Indice di Sollevamento (IS) per le attività lavorative che richiedono una Movimentazione Manuale dei Carichi (MMC) di tipo "occasionale" nell'intero turno di lavoro.

In ottemperanza alle normative vigenti lo studio è stato condotto presso lo Stabilimento *Novartis Pharma* di Torre Annunziata (Azienda chimico-farmaceutica). In particolare è stata effettuata una valutazione del rischio da MMC nel reparto laccatura/confettatura.

In tale reparto l'operatore preleva da un armadio un tubo di acciaio di circa 12 kg, lo solleva all'altezza delle spalle, lo poggia sul braccio e, aiutandosi con l'altra mano, lo trasporta per circa 7-8 metri fino ad un oblò di circa 50 cm di diametro, posto a

120 cm dal pavimento. Il tubo, a questo punto viene inserito nell'oblò e durante tale operazione il lavoratore compie un movimento di rotazione del busto e fa leva sull'anca con il tubo stesso al fine di posizionarlo correttamente. Tale operazione viene eseguita 1-2 volte nell'arco delle otto ore lavorative. Secondo la procedura di primo screening, il peso dell'oggetto sollevato e la frequenza di sollevamento sono tali da non far procedere ad ulteriori approfondimenti; ma non essendo rispettati i requisiti generali (buona presa del carico, carico vicino al corpo, tronco non ruotato, movimentazione tra ginocchio e spalla) si è proceduto ugualmente ad applicare il calcolo dell'Indice di Sollevamento (IS). Per sollevamenti occasionali l'indicazione *NIOSH* è di utilizzare una F_f pari ad 1 che corrisponde a 0,20 atti di sollevamento al minuto per meno di un ora lavorativa. Applicando tale metodo l'IS risultava pari a 1,7. Ci si è chiesti se la frequenza di sollevamento può essere giudicata irrilevante nel calcolo dell'IS e se l'IS può rimanere invariato se si solleva una sola volta nelle otto ore lavorative un oggetto di 12 kg o lo si solleva per 12 volte consecutive in un'ora lavorativa. Per rispondere all'interrogativo posto, in caso di sollevamenti occasionali con frequenza da 2 a 10 volte nelle 8 ore lavorative, è stata apportata una modifica al fattore frequenza considerando una frequenza massima di 0,02 atti al minuto, pari ad un sollevamento ogni 50 minuti [9].

Applicando tale criterio all'operazione su menzionata si ottiene un indice di sollevamento IS pari a 1.13 anziché 1.7. Tale valore (IS=1.13), pur rimanendo nell'area di rischio che richiede sorveglianza sanitaria (essendo compreso nel range 0.75 – 1.25), risulta più aderente al rischio reale.

Il metodo esposto, pur essendo maggiormente aderente alla situazione lavorativa reale, non tiene conto né delle misure antropometriche dell'operatore, né dello

svolgersi dell'attività di movimentazione nei suoi vari momenti. Per tali motivi è sembrato opportuno indagare altre metodologie che tenessero conto di tali parametri.

V.3.2 Valutazione mediante simulazione virtuale e risultati

V.3.2.1 Ricostruzione dell'ambiente di lavoro

Per il corretto svolgimento di ogni *task* ergonomico é indispensabile la visualizzazione dell'ambiente in cui il manichino deve essere inserito. Pertanto, si è resa necessaria sia la ricostruzione al CAD dei modelli solidi dei principali elementi costituenti l'ambiente di lavoro in oggetto, sia la loro conversione nel formato compatibile con il software di simulazione ergonomica.

Elementi fondamentali presi in considerazione per la ricostruzione digitale dell'ambiente di lavoro e le successive fasi di analisi e di valutazione dei carichi agenti sulla colonna vertebrale dell'operatore in oggetto sono: il tubo impiegato per lo scarico delle compresse, l'armadio da cui è prelevato il tubo all'inizio dell'operazione e la macchina laccatrice in cui il tubo deve essere posizionato per effettuare l'operazione di scarico delle compresse. In figura 5.1 è mostrato il tubo reale ed il corrispondente modello digitale costruito mediante un modellatore solido parametrico (*Pro-Engineer* della PTC).

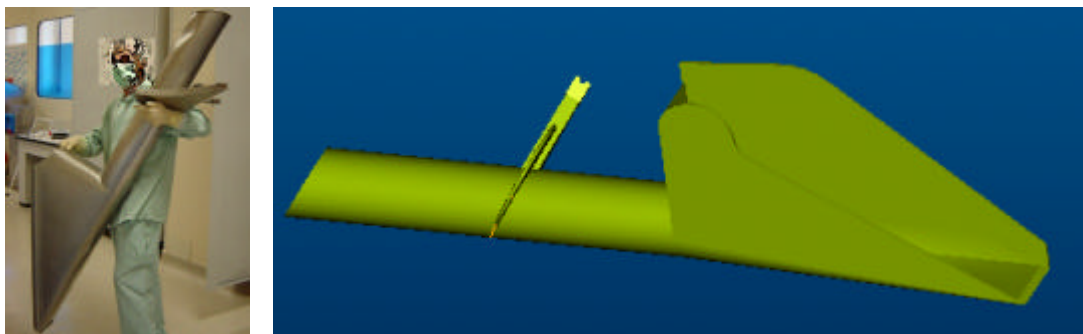


Fig. 5.1. - Tubo di scarico reale e corrispondente modello CAD.

Tutti i modelli CAD opportunamente convertiti nel formato *.stl* sono stati importati e disposti nell'ambiente virtuale del *software* di simulazione impiegato. In figura 5.2 viene mostrata una vista assonometrica della stanza in cui è possibile osservare il tubo riposto nell'armadio ed il manichino nella prima fase dell'operazione.

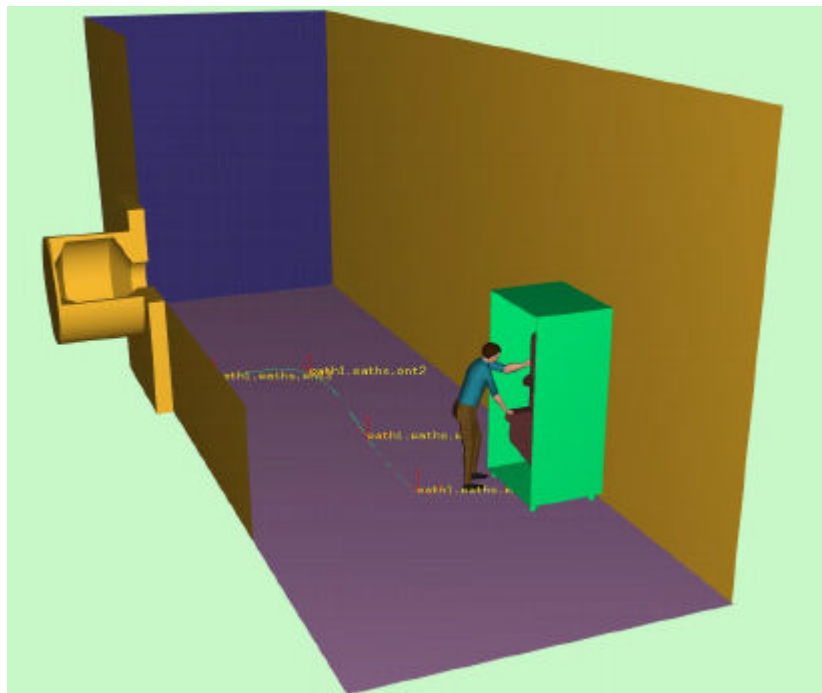


Fig. 5.2. - Ricostruzione virtuale dell'ambiente di lavoro.

V.3.2.2 Valutazione del rischio

In primo luogo è stata condotta l'analisi dettagliata di tutte le fasi dell'operazione in esame, con l'ausilio di riprese dal vero e di interviste agli operatori. Successivamente, mediante il software di simulazione, è stata simulata l'intera operazione dal momento del sollevamento del tubo dall'armadietto fino alla fase finale di ancoraggio del tubo alla macchina laccatrice. Dopo una prima analisi dell'operazione simulata si è deciso di fissare l'attenzione su cinque posizioni di particolare interesse assunte dal manichino (da ora in avanti indicate con *POSI*,

POS2, *POS3*, *POS4*, *POS5*) in cui i valori delle sollecitazioni analizzate subiscono delle brusche variazioni. Nella prima fase l'operatore solleva il tubo dall'armadietto (*POS1*) (figura 5.3), quindi, dopo aver compiuto un'opportuna rotazione, avanza verso la macchina laccatrice (*POS2*) (figura 5.4).

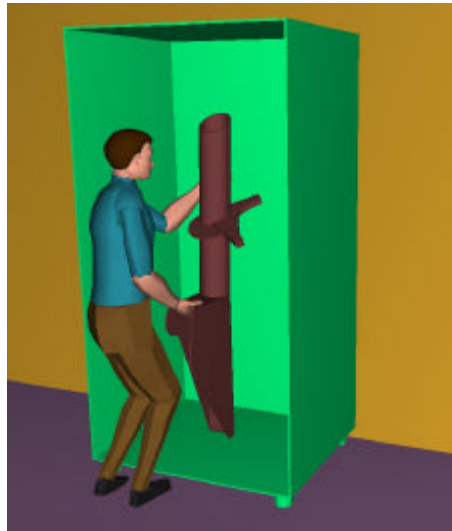


Fig. 5.3. - L'operatore solleva il tubo (*POS1*).

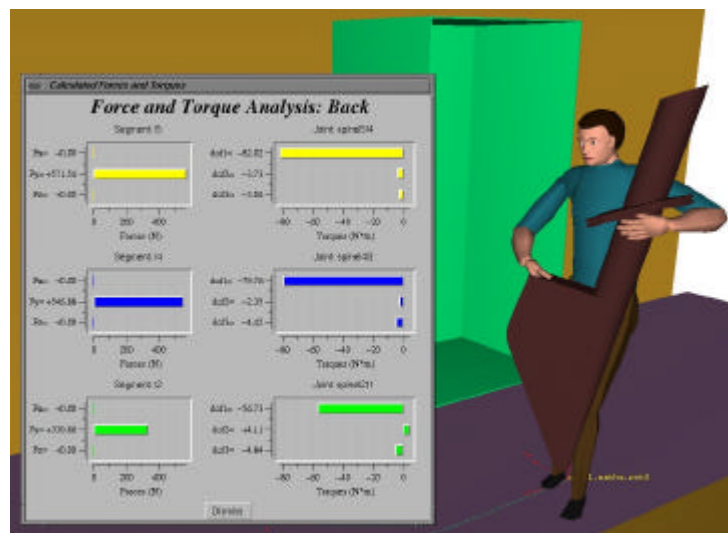


Fig. 5.4. - L'operatore trasporta il tubo verso la macchina laccatrice (*POS2*). Nel riquadro il *force and torque analysis* (paragrafo III.3.7) relativo alla colonna vertebrale.

Seguendo il percorso mostrato in figura 5.5, il manichino raggiunge la macchina laccatrice (*POS3*) (figura 5.6).



Fig. 5.5. - Percorso seguito dal manichino.

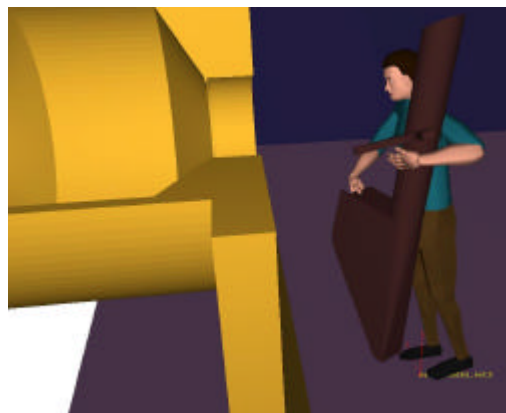


Fig. 5.6. - Il manichino raggiunge la macchina laccatrice (POS3).

Qui, dopo aver infilato solo l'estremità superiore del tubo all'interno della macchina, l'operatore poggia lo stesso sul bordo al fine di poter cambiare presa (POS4). Nelle figure 5.7 e 5.8 viene mostrata questa fase dell'operazione eseguita rispettivamente da un manichino 5° percentile e uno 95° percentile.

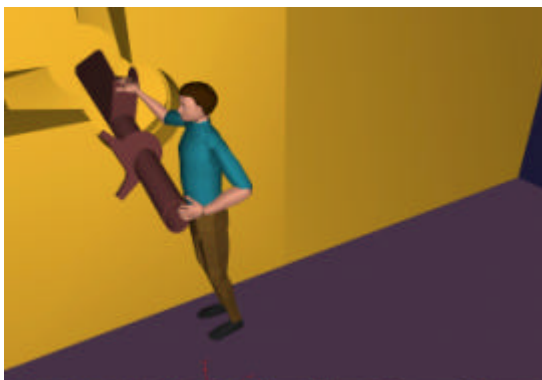


Fig. 5.7: Manichino 5° percentile in POS4.

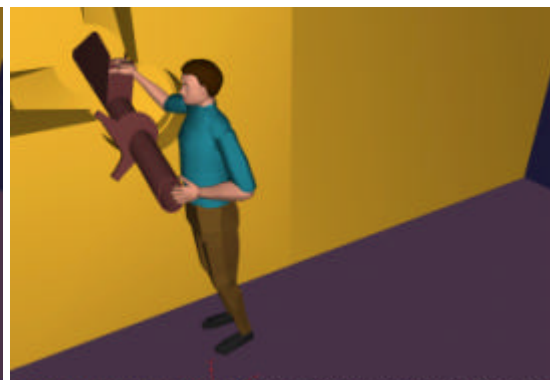


Fig. 5.8: Manichino 95° percentile in POS4.

Dopo aver cambiato presa l'operatore solleva nuovamente il tubo (*POS5*) al fine di poterlo agganciare negli appositi sostegni all'interno della macchina laccatrice. Questa fase è mostrata in figura 5.9; nel riquadro è riprodotta la parte di macchina visibile da parte dell'operatore.

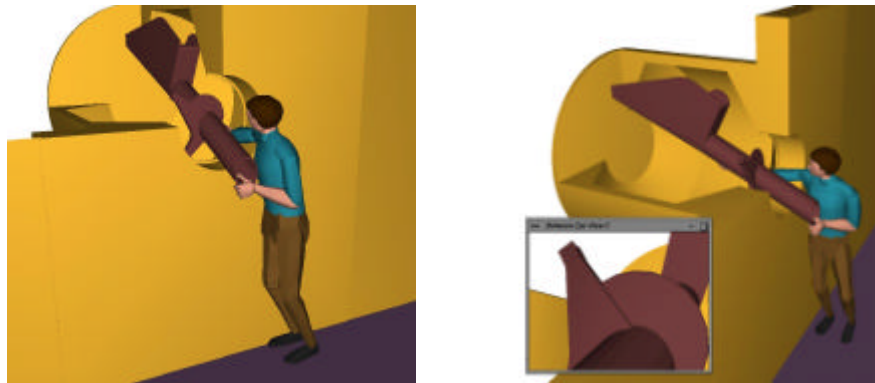


Fig. 5.9 - La fase più critica dell'operazione (*POS5*). Nel riquadro il punto di vista del manichino.

V.3.2.3 Risultati

La simulazione dell'operazione in ambiente virtuale ha consentito di valutare in tempo reale le forze di compressione e di taglio e i momenti di reazione nel piano assiale, sagittale e laterale a carico delle vertebre lombari L4 e L5 confrontando, durante tutte le fasi dell'operazione, tali valori con i limiti *NIOSH*.

Inoltre, mediante lo strumento *Force and Torque analysis* (paragrafo III.3.7) è stato possibile determinare le forze di compressione e di taglio agenti sul braccio destro e i momenti di reazione a carico della spalla, del gomito e del polso nella fase più critica dell'operazione corrispondente a quella in cui l'operatore aggancia il tubo all'interno della laccatrice (*POS5*) sostenendone quasi l'intero peso con il solo braccio destro. È stato quindi possibile valutare con precisione i movimenti compiuti dall'operatore, impiegando, peraltro, manichini corrispondenti a diversi percentili.

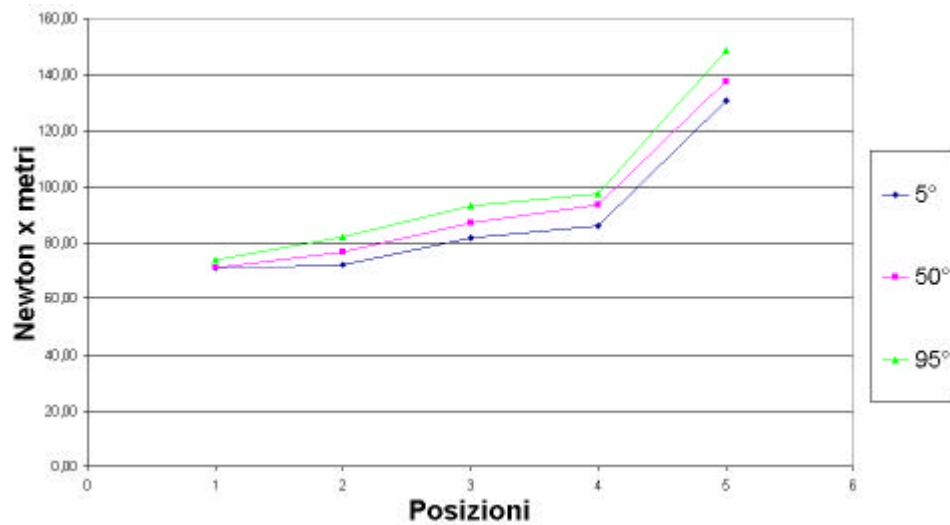


Fig. 5.10: Andamento della risultante dei momenti di reazione nell'articolazione L4/L5 per il 5°, 50° e 95° percentile.

Nel diagramma di figura 5.10 è rappresentato l'andamento della risultante dei momenti misurabili nell'articolazione tra le vertebre L4 e L5 valutati nelle 5 posizioni prese in esame per manichini del 5°, 50° e 95° percentile. Nel diagramma di figura 5.11 sono invece rappresentati i valori delle risultanti dei momenti valutati nelle articolazioni relative rispettivamente agli arti sinistri, alla colonna vertebrale ed agli arti destri dei manichini del 5°, 50° e 95° percentile nella fase più critica dell'operazione (*POS5*). In particolare in tale diagramma è possibile apprezzare i valori dei momenti di reazione a carico della spalla, del gomito e del polso per i tre percentili considerati.

Dalle analisi condotte mediante il software di simulazione ergonomica, si rileva che, nei limiti delle approssimazioni ipotizzate nel corso della definizione delle operazioni di movimentazione descritte, i valori delle forze di compressione e di taglio e i momenti di reazione presi in esame risultano non superare i limiti *NIOSH* implementati nel software stesso.

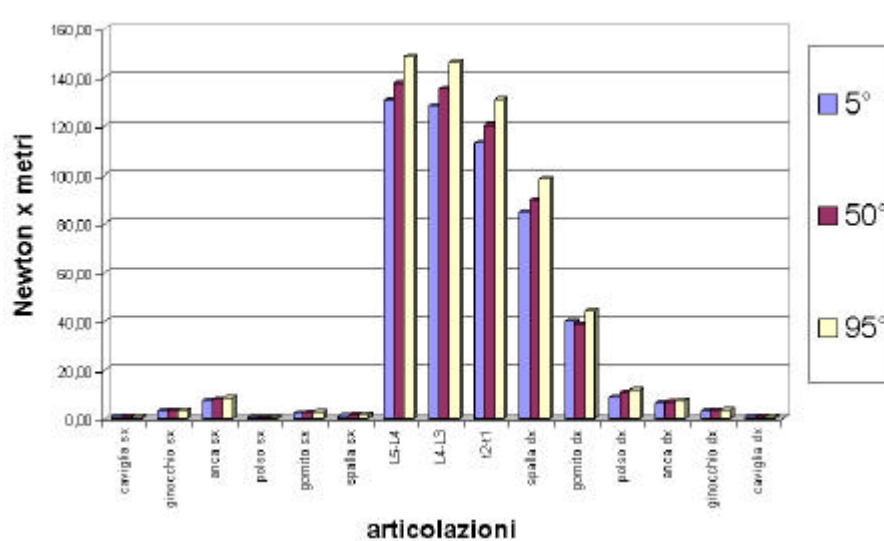


Fig. 5.11: Momenti a carico delle principali articolazioni nella fase più critica dell'operazione (POS5).

V.4 DISCUSSIONE

Le metodologie seguite e i risultati ottenuti nei due approcci esposti evidenziano alcune significative differenze. Il primo approccio, che utilizza protocolli d'analisi tradizionali, consente la determinazione di un indice di rischio. Tale indice, tuttavia, risulta indipendente dalle misure antropometriche dell'operatore e tiene conto delle sole condizioni iniziali e finali dell'attività di movimentazione. Il secondo approccio, invece, basato sull'impiego di modelli umani digitali, pur non consentendo allo stato attuale la determinazione di un indice di rischio, offre la possibilità di valutare, istante per istante e al variare delle misure antropometriche dell'operatore, le sollecitazioni significative agenti sulle articolazioni di interesse.

Si ritiene quindi necessaria una sempre maggiore integrazione tra i due approcci al fine di poter definire un indice di rischio meglio relazionato alle condizioni effettive in cui si svolge la specifica operazione di movimentazione manuale dei carichi.

Infine, per ciò che riguarda la simulazione virtuale delle suddette movimentazioni, si rileva la necessità di predisporre metodologie di impiego ed algoritmi supplementari che consentano di individuare in tempi brevi posture e movimenti dei manichini digitali sempre più prossimi a quelle degli operatori reali.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi rappresenta la tappa finale di un'attività di ricerca durata tre anni ed incentrata sullo studio e sullo sviluppo di metodologie di progettazione ergonomica in ambiente virtuale. Le motivazioni che hanno spinto ad affrontare delle tematiche considerate, fino a pochi anni fa, marginali e di "importanza relativa" sia in ambito aziendale sia in ambito universitario, sono state dettate, oltre che dalla passione nella ricerca di base, da esigenze aziendali concrete di progettare prodotti e ambienti di lavoro "a misura d'uomo". La prima tappa di questa attività è stata quella di soddisfare la fame di conoscenza di base del "ricercatore" che partendo da una formazione puramente ingegneristica ha affrontato le tematiche multidisciplinari che caratterizzano la progettazione ergonomica. Di conseguenza il primo risultato tangibile di questo lavoro è documentato dalla densa bibliografia testimone di una attenta ricerca bibliografica che ha portato alla definizione, si spera chiara ed esaustiva, dei vari aspetti dell'ergonomia, evidenziandone il contenuto interdisciplinare ed il carattere metodologico.

Sotto la spinte delle esigenze dell'azienda con cui principalmente si è collaborato nello svolgimento della presente attività di ricerca (l'*Elasis* SCpA di Pomigliano d'Arco), è stato affrontato il problema della progettazione ergonomica in campo automobilistico. Dopo un attento studio delle caratteristiche e delle misure antropometriche del corpo umano e dei fattori che influenzano la postura di guida

sono state esaminate due differenti metodologie ergonomiche per la progettazione dell'interno dell'autoveicolo, quella *SAE (Society of Automotive Engineers)* e quella sviluppata dalla FIAT, con gli obiettivi di evidenziare i criteri su cui si basano e le modalità di impiego e di individuare i parametri ergonomici utilizzati da ciascuna.

Nel corso degli anni la FIAT ha elaborato un software bidimensionale per le verifiche ergonomiche delle autovetture. L'utilizzo di tale applicativo rientra, oramai, nelle procedure standard per lo sviluppo di nuovi autoveicoli con tutti i limiti tipici di una modellazione in due dimensioni; infatti l'utilizzo di un modello umano semplificato così come di una versione semplificata della geometria d'analisi, forniscono, sicuramente, una valutazione non rigorosa della bontà del progetto.

Da tale premessa è nata l'esigenza di indagare le funzionalità e le caratteristiche dei principali manichini virtuali in commercio, *Ramsis* della *Human Solution – Tecmath* e *Jack* della *EAI-UGS*, focalizzando, in particolare, la discussione sui modelli cinematici ed antropometrici su cui si basano i due manichini e sulle differenti metodologie di impiego. In particolare, mediante due studi comparativi condotti rispettivamente con *Ramsis* e con *Jack*, sono state evidenziate le potenzialità offerte da tali *software* nei confronti dell'approccio tradizionale basato sull'impiego di modelli bidimensionali.

La parte più propriamente applicativa della presente tesi ha riguardato la progettazione dell'architettura di un ambiente virtuale basato sull'integrazione di tecnologie di Realtà Virtuale (sistemi di *tracking*, sistemi *haptic*, strumenti di visualizzazione stereoscopica), modelli umani digitali e un simulacro fisico di posto guida (*seating buck*). Tale ambiente, in via di sviluppo presso l'ente Metodologie Sviluppo Prodotto dell'Elasis di Pomigliano d'Arco, è stato progettato con l'obiettivo

di consentire, ai progettisti e agli ingegneri, di valutare, in termini ergonomici, differenti soluzioni degli interni di una nuova vettura, partendo dalle prime fasi del progetto.

Al fine di dimostrare le grandi possibilità offerte dalle metodologie descritte, basate su tecniche di simulazione in ambiente virtuale, nell'ultimo capitolo della presente tesi è stato infine presentato uno studio, condotto in collaborazione con la sezione di medicina del lavoro della Seconda Università di Napoli e con la *Novartis Pharma* di Torre Annunziata, riguardante la valutazione comparativa del rischio da movimentazione manuale dei carichi (*MMC*) mediante protocolli di analisi e l'impiego di modelli umani digitali. In particolare è stato proposto, in alternativa ai protocolli tradizionali di valutazione del rischio l'impiego del *software* di ergonomia *Jack* per simulare, in ambiente virtuale, un'operazione di *MMC* relativa al montaggio di un tubo per lo scarico di confetti da una macchina per la laccatura in una azienda farmaceutica. Il *software* di simulazione utilizzato ha consentito di ricostruire virtualmente l'ambiente di lavoro e di valutare, in tempo reale, le forze di compressione e di taglio e i momenti di reazione nel piano assiale, sagittale e laterale a carico della zona lombare della colonna vertebrale e a quella scapolo-omerale dei lavoratori impegnati nella movimentazione.

Risulta evidente, a conclusione di questo lavoro di tesi, come lo sviluppo di un ambiente virtuale di simulazione possa permettere di rispettare, più dei tradizionali metodi di analisi che pure in questo contesto sono stati brevemente descritti, il principio di globalità cui deve uniformarsi una corretta progettazione ergonomica.

Bibliografia

- [1] Rabardel P. “*Gli strumenti dell’uomo*”, in *Ergonomia* n.9, Moretti & Vitali Editore, Bergamo, 1997.
- [2] Bandini Buti L. “*L’industrial design ergonomico*” in *Ergonomia* n. 5, Moretti & Vitali Editori, Bergamo, 1995.
- [3] Atti del seminario “*Problemi di ergonomia*”, IFAP- Roma, Febbraio 1978.
- [4] Rizzo R. “*La sicurezza degli impianti industriali*”, Edizioni Scientifiche Italiane, 1998.
- [5] Odescalchi C.P., Bandini Buti L., “*Progettazione ergonomica*” in *Prefabbricare*, Anno XIII n. 3, Maggio/Giugno 1970.
- [6] AA.VV, sito web <http://www.gss.it>.
- [7] Bailey R.W., “*Human Performance Engineering: A guide for System Designers*”, Prentice-Hall, 1982.
- [8] AA.VV, sito web <http://web.tiscalinet.it/userware>.
- [9] Bonapace L., Bandini Buti L., “*L’oggetto gradevole*”, in *Ergonomia* n.10, Moretti & Vitali Editori, Bergamo, 1997.
- [10] Bandini Buti L., “*Ergonomia e progetto*”, Maggioli Editore, 1998.
- [11] Bonapace L., Bandini Buti L., Tarzia A., “*Il progetto e le sensazioni percepite dagli utenti. Il metodo Sensorial Quality Assessment*”, in Atti del 6° Congresso Nazionale della Società Italiana di Ergonomia, 1997.
- [12] Gilardi M., Malvicino C., Varalda G., “*Portare l’utente nel vivo del progetto*” *Rivista ATA* Vol.55-n. 1 /2 Gennaio/Febrero 2002.
- [13] Pheasant S., “*Bodyspace – Anthropometry, Ergonomics and Design*”, Taylor & Francis, London , 1986.
- [14] Facchini, “*Antropologia. Evoluzione, Uomo e Ambiente*”, UTET Libreria, Torino, 1995.
- [15] Scherrer “*Manuale di fisiologia del lavoro*”, Ed Masson, 1981.
- [16] Rohmert W. “*Physiological and psychological work load measurement and analysis*”, in “*Handbook of Human Factors*”, Wiley & Sons,1987.

- [17] Astrand. P. O., Rodhal K. *“Textbook of Work Physiology”*, McGraw-Hill, 1977.
- [18] Grandjean E., *‘Fitting the task to the man. An ergonomics approach’*, Taylor & Francis, London, 1980
- [19] Brian Peacock, Waldemar Karwowski, *“Automotive Ergonomics”*, Taylor & Francis, London, 1993.
- [20] Schneider, Robbins, Pflug, and Snyder, *“Anthropometry of Motor Vehicle Occupants”*, Vol. 1, December 1993, Ann Arbor, MI: University of Michigan Transportation Research Institute.
- [21] Kyropoulos and Roe, *“The application of Anthropometry to Automotive Design”*, Troy, Michigan 1970: General Motors, Automotive Safety Seminar.
- [22] Pasquale Erto, *“Probabilità e Statistica”*, McGraw-Hill, 1999.
- [23] Stoudt, Damon, and McFarland, *“Weight, Height, and Selected Body Dimensions, United States 1961-62”*, U.S. Department of Health, Education and Welfare: Public Health service Publication Series II, No.8, 1965.
- [24] Arkin and Colton, *“Statistical Methods”*, New York: Barnes and Noble, 1970.
- [25] *“Motor vehicle dimensions”*, SAE J1100 rev. May 1995.
- [26] Hammond, Roe, *“SAE Control Reach Study”*, SAE paper 720199, 1972.
- [27] *“Motor vehicle driver’s eye locations”*, SAE J941 Jun.1992.
- [28] *“Driver selected seat position”*, SAE J1517 rev. Mar 1990.
- [29] *“Motor vehicle driver and passenger head position”*, SAE J1052 rev. Apr.1997.
- [30] *“Drive hand control reach”*, SAE J287 rev. Jun.1988.
- [31] *“Devices for use in defining and measuring vehicle seating accommodation”*, SAE J826 rev. Jun 1995.
- [32] *“Accommodation tool reference point”*, SAE J1516 rev. Mar.1990.
- [33] Schneider L.W., Anderson C. K., Olson P.L., *“Drive anthropometry and vehicle design characteristic related to seat positions selected under driving and non-driving conditions”*, SAE Technical Paper 790384. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc., 1979.
- [34] Philliparth N.L., Arnold, A.J., Ferrara, R.A., e Kuechenmeister, T.J *“The effect of the steering wheel to pedal relationship on driver-selected seat*

- position*”, SAE Technical Paper 850311. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc., 1985.
- [35] Flannagan C. A. C., Schneider L. W. ,Manary M. A., ‘*Development of a new seating accomodation model*’. SAE Techical Paper 960479. In *Automotive Design Advancements in Human Factors: Improving Drivers Comfort and Performance (SP-1155)*, 29-36. Warrendale, PA SAE, 1996.
- [36] Matthew P. Reed doctoral dissertation, "*Statistical and Biomechanical Prediction of Automobile Driving Posture*", University of Michigan, 1998.
- [37] “*Accommodation tool reference point*”, SAE J1516 rev.Mar.1990.
- [38] “*Motor vehicle fiducial marks and three-dimensional reference sistem*”, SAE J182 rev. Aug. 1997.
- [39] Philippart, Roe, Arnold, Kuechenmeister, “*Driver Selected Seat Position Model*”, SAE paper 840508, 1984.
- [40] D.Hammond, D.Marar, and L. Razgunas, “*Controls Reach – The Hand Control Reach of Drivers*”, SAE Paper 750357, February 1975.
- [41] Roe, ‘*Reach to Other Types of Controls*’, Minutes of meeting of Design Devices Subcommittee, SAE Human Factors Engineering Committee, april 18, 1972.
- [42] “*Describing and measuring the driver’s field of view*”, SAE J1050 rev. Aug.1994.
- [43] Devlin, Roe ‘*The Eyellipse and Consideretions in the Driver’s Forward Field of View*’, paper 680105, 1968.
- [44] SAE J985 ‘*Vision Factors Considerations in Rear View Mirror Design*’, 1993.
- [45] A.J. Arnold, “*3D Eyellipse Dimensions*”, letter to SAE Driver Vision Committee, 1989.
- [46] Lee and Schneider, “*A Preliminary Investigation of Driver’s Lean on Late Model Vehicles with Bench and Bucket Seats*”, report to General Motors Corp.,1988.
- [47] Roe, ‘*Describing the Drivers’s Workspace: Eye, Head, Knee, and Seat Position*’, SAE paper 750356, 1975.
- [48] Hammond and Roe, “*Driver Head and Eye Position*”, SAE paper 720200, 1972.
- [49] R.W. Roe, ‘*Note to SAE Human Accommodations and Design Devices Committee*’, attachment 7 to Meeting Minutes January 23, 1997.
-

- [50] S.P. Geoffrey, “A 2D Manikin – The Inside Story”, paper 267A presented at SAE automotive Engineering Congress, Detroit, January 1961.
- [51] AA.VV., sito web SAE, <http://www.sae.org>.
- [52] “Codice delle dimensioni per vetture”, FIAT 7.G1000, Mag. 1980.
- [53] Dempster W, T., “Space requirements of the seated operator: Geometrical Kinematic, and mechanical aspects of the body with special reference to the limbs”, WADC Technical Report 55-159. Wright-Patterson AFB, OH :Wright Air Development Center, 1955.
- [54] Nussbaum M. A., Chaffin D. B , “Development and evaluation of a scalable and deformable geometric model of the human torso” Clinical Biomechanics 11(1):25-34, 1996.
- [55] Backaitis S. H., Merts H. S., “Hybrid ????: The first human-like crash test dummy” Special Publication PT-44. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc.
- [56] Haas W. A, “Geometric model and spinal motions of the average male in seated postures.”Master’s Thesis, Michigan State University, 1989.
- [57] Snyder R. G.,Chaffin D. B., Schutz R., “Link system of the human torso.” Report n° AMRL-TR-71-88. Whright-Patterson Air Force Base, OH:Aerospace Medical Research Laboratory, 1972.
- [58] “Ramsis user guide”, Tecmath AG 2001.
- [59] Speyer H. “Definition of Anthropometric Types” Tecmath AG D-67657 Kaiserslauter.
- [60] “BodyBuilder user guide” Tecmath AG 2001,
- [61] Diffrient N., Tilley A. R., Bardagjy “The Humanscale Manual” The MIT Press. Massachusetts 02142.
- [62] Speyer H. “Definition of Conventional Body Dimensions” Tecmath AG Europaallee D-67657 Kaiserslauter.
- [63] AA.VV, sito web della EAI, <http://www.eai.com>.
- [64] AA.VV, Manuale d’uso di Jack 2.3, 2000.
- [65] AA.VV, Guida in linea di Jack 2.3.
- [66] AA.VV., *Anthropometric Source Book*, Vol. 2: A Handbook of Anthropometric Data, Technical Report NASA Rp-1024.
- [67] “Human physical dimensions”, SAE J833, May 1989.

- [68] Nussbaum M. A., Chaffin D. B., “*Development and evaluation of a scalable and deformable geometric model of the human torso*”, *Clinical Biomechanics* 1996, 11(1): 25-34.
- [69] Raschke U. “*Lumbar Muscle Activity Prediction During Dynamic saggital plane lifting Conditions: Physiological and biomechanical Modeling considerations*”, Ph.D Dissertation Bioengineering, University of Michigan, 1994.
- [70] “*Wind shield wiper zone*”, SAE J903, May 1999.
- [71] “*Wind shield Deforster zone*”, SAE J902, May 1999.
- [72] Schiefele Jens, “*Usability Tests and Transfer of Training Test for Virtual Cockpit Simulations*”, 2000, World Wide Web URL: <http://www.public.asu.edu/~image/EVENTS/00IMAGE/PAPERS/Schiefele.html>.
- [73] AA.VV, World Wide Web URL: <http://prefix.com>.
- [74] Beier K.-P., “*Virtual Reality in Automotive Design and Manufacturing*”, Proceedings, Convergence '94, International Congress on Transportation Electronics, SAE (Society of Automotive Engineers), Dearborn, Michigan, October 1994.
- [75] D'Aprile F., Monacelli G., “*Digital Mock-up: An Integrated Approach For Automotive Vehicle Design*”, Proceedings of PMED '97, vol. I, pp. 323 – 334, Napoli, October 1994.
- [76] D'Aprile F., Monacelli G., “*Virtual Simulation in Automotive Design*”, Proceedings of X Convegno ADM Design Tools and Methods in Industrial Engineering, Florence, Sept. 1997.
- [77] Avallone L., Di Gironimo G., Monacelli G., Patalano S., “*Use of digital mock up for automotive assembly design*”, Proc. of ISCS 2001, Napoli, 6-7 december 2001.
- [78] Porter J.M. and Gyi D.E., “*Exploring the optimum posture for driver comfort*”, *Int. J. Of Vehicle Design*. Vol. 19, No. 3, pp. 255-266.
- [79] Raschke U. “*Lumbar Muscle Activity Prediction During Dynamic saggital plane lifting Conditions: Physiological and biomechanical Modelling considerations*”, Ph.D. Dissertation Bioengineering, University of Michigan, 1994.
- [80] Ambrose D., “*A Simulation Approach Analyzing Random Motion Events Between a Machine and its Operator*”, Proceedings of SAE International Congress “*Digital Human Modelling for Design and Engineering*”, Deaborn, Michigan, USA, June 2000.

- [81] Di Gironimo G., Martorelli M., Monacelli G., Vaudo G., *‘Use of virtual mock-up for ergonomic design’*, Proc. of 7th International Conference on “The role of experimentation in the automotive product development process” – ATA 2001, Florence, 23-24 May 2001.
- [82] Caputo F., Di Gironimo G., Monacelli G., Sessa F., *‘The Design of a Virtual Environment for Ergonomics Studies’*, Proc. of XII ADM International Conference, Rimini, 5-7 September 2001.
- [83] Cerkin D.C. et al. *‘A comparison of physical therapy, chiropractic manipulation, and provision of an educational booklet for the treatment of patients with low back pain’*. N Engl J Med, 339 (15): 1021-1029, 1998.
- [84] Water T., Putz Anderson V., Garg A., Fine L. J., *‘Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks’*, Ergonomics, 36, 7, 749-776, 1993.
- [85] Caputo F., Di Gironimo G., Patalano S., Biondi A., Maione R., Liotti F., *‘Use of ergonomic software in virtual environment for the prevention of muscular-skeletal diseases’*, Proc. of ISCS 2001, Napoli, 6-7 december 2001.