

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Meccanica



***Studio dell'utilizzo dei manichini virtuali
nella progettazione di prodotti industriali***

Relatore: Prof. Roberto VIGANO'

Tesi di Laurea di:

Angelo SERIO Matr. 725248

Anno Accademico 2010 - 2011

Vindica te tibi

Un sentito ringraziamento
al Prof. Roberto Viganò per avere avuto fiducia in me
e per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro.
Ringrazio anche l'Ing. Luca Franzosi, Stefano Tagliabue
e tutti coloro che all'interno dell'azienda Skema S.p.a.
mi hanno offerto la loro disponibilità e il loro supporto.
Un grazie inoltre ai colleghi del VPLab
che mi hanno sopportato durante tutto il percorso in questi mesi.

E poi un grazie di cuore
a quelli che ...ci sono sempre stati,
a quelli che ...sono appena arrivati,
a quelli che ...sono ancora calasanziani,
a quelli che ...sono 'La Compagnia dell'anello lesò'
a quelli che ...si ritrovano al Bluespot,
a quelli che ...Buon Sangue non mente,
a quelli che ...non possono crederci neanche adesso,
a quelli che ...non siamo riusciti a trattenere
e a quelli che ...mi hanno aiutato a 'tener botta' un giorno in più!

Indice

Sommario	1
-----------------------	----------

CAPITOLO 1

Introduzione all'analisi ergonomica nella progettazione industriale	3
--	----------

1.1 Evoluzione dell'analisi ergonomica in campo industriale	6
1.2 Metodologie e strumenti d'analisi	7
1.3 I manichini virtuali	10
1.3.1. Il programma Jack	15
1.3.1.1. La struttura del manichino.....	16
1.3.1.2. Proprietà del manichino.....	18
1.3.2. L'applicazione Delmia in Catia.....	21
1.3.2.1. Struttura e controllo.....	22

CAPITOLO 2

Verifica delle fasi critiche di montaggio	27
--	-----------

2.1 Caso studio: il quadro di distribuzione elettrica componibile	28
2.2 Analisi delle operazioni	30
2.3 Il metodo del NIOSH... ..	31
2.3.1 Low Back Analysis.....	35
2.3.2 Static Strength Analysis.....	38
2.3.3 Ovako Posture	39
2.3.4 Rapid Upper Limb Analysis	40
2.4 Verifica dell'installazione del <i>castello</i>	41
2.4.1 Le problematiche della manovra	42
2.4.2 La simulazione con Jack	42
2.4.3 La simulazione con Delmia	45
2.4.4 Risultati e soluzioni	47
2.5 Movimentazione della <i>colonna</i>	48
2.5.1 Le problematiche della manovra	48
2.5.2 La simulazione con Jack	49

2.5.3	La simulazione con Delmia	51
2.5.4	Risultati e soluzioni	53

CAPITOLO 3

Il problema della giunzione: analisi e riprogettazione 55

3.1	Analisi della giunzione: scopo e vincoli	56
3.2	Funzione di collegamento tra <i>castello</i> e <i>colonna</i>	59
3.2.1	Le problematiche dell'assemblaggio	59
3.2.2	La simulazione con Jack	60
3.2.3	Risultati e progettazione delle alternative	62
3.2.4	Verifica della soluzione finale	64
3.3	Funzione di accoppiamento per le fasi	66
3.3.1	I problemi: vie d'accesso e spazio d'azione ...	67
3.3.2	Le problematiche di lateralità	68
3.3.3	La simulazione con Jack	70
3.3.4	Ricerca e progettazione delle alternative	73
3.3.5	Verifica delle soluzioni	75

CAPITOLO 4

Soluzioni finali 81

4.1	Soluzione corta	81
4.1.1	Verifica delle vie d'accesso	82
4.1.2	La simulazione con Jack	84
4.1.3	Risultati e proposte	87
4.2	Soluzione a Tre fori	88
4.2.1	Ricerca degli utensili	88
4.2.2	Verifica degli ingombri	92
4.2.3	La simulazione con Jack	94
4.2.4	Risultati e proposte	97

CAPITOLO 5

Conclusioni 99

Bibliografia 101

Elenco delle figure

Figura 1.1. Esempio di validazione ergonomica: a) da parte del consumatore del prodotto (lavatrice) e b) da parte dell'utente del servizio (cabina elicottero)	4
Figura 1.2. Schema dello sviluppo dell'analisi ergonomica	5
Figura 1.3. Esempio di una prova per movimentazione carichi	7
Figura 1.4. Simulazioni sullo studio delle cadute del corpo umano attraverso l'uso di manichini inerti virtuali	9
Figura 1.5. Simulazioni dei crash test con manichino inerte virtuale.....	9
Figura 1.6. Inversione della tendenza fra la progettazione di modelli umani e l'effettivo utilizzo con software e applicazioni CAD	10
Figura 1.7. Santos: soldato virtuale utilizzato per testare l'ergonomia di equipaggiamento e armi	11
Figura 1.8. Madymo: manichino virtuale inerte usato nella simulazione dei crash-test	11
Figura 1.9. Schema delle metodologie d'uso dei manichini virtuali	12
Figura 1.10. Le simulazioni vengono utilizzate: a) per verificare condizioni esistenti b) per simulare e prevedere problematiche e rischi	13
Figura 1.11. I risultati delle simulazioni: correggendo le postazioni di lavoro permettono di far eseguire un lavoro migliore con minori rischi.	14
Figura 1.12. Le terne mobili che costituiscono i riferimenti del sistema Multy Body nel manichino	16
Figura 1.13. Pannello di controllo del manichino	17
Figura 1.14. Gestione dei vincoli relativi fra manichino e modello	18
Figura 1.15. Le librerie delle posture per corpo e mani (Jack 6.0).	19
Figura 1.16. Esempio di variazione del percentile della statura nella popolazione.	20
Figura 1.17. Controllo dei singoli parametri antropometrici	21
Figura 1.18. Applicazione per l'analisi ergonomica in Catia	22
Figura 1.19. Selezione del percentile e dell'estrazione geografica.....	22

Figura 1.20. Controllo dei singoli parametri antropometrici. ...	23
Figura 1.21. Correzione delle posture parametrizzate.	23
Figura 1.22. Pannello di controllo del manichino.	24
Figura 1.23. Le librerie delle posture per corpo e mani.	25
Figura 1.24. Gestione dei vincoli del manichino.	26
Figura 2.1. Gamma dei modelli prodotti da Skema S.p.a.	28
Figura 2.2. Tavole modello: a) comparto castello, b) comparto colonna... ..	29
Figura 2.3. Esempio di posture da cui ricavare i coefficienti. .	32
Figura 2.4. Esempio risultati LBA.....	36
Figura 2.5. Esempio risultati dell'istogramma del momento distribuito.....	36
Figura 2.6. Esempio di elaborazione dell'istogramma del momento distribuito.....	37
Figura 2.7. Esempio risultati SSA.....	38
Figura 2.8. Esempio risultati OWAS.....	39
Figura 2.9. Esempio risultati RULA.....	41
Figura 2.10. Postura squat.....	43
Figura 2.11. Carico mano.....	43
Figura 2.12. Risultati SSP e LBA per squat.....	44
Figura 2.13. Risultati postura alta SSP.....	45
Figura 2.14. Posture e analisi RULA con carico.....	46
Figura 2.15. Risultati NIOSH.....	47
Figura 2.16. Risultato statico per l'installazione del castello. .	48
Figura 2.17. Forza scambiata sulle mani.....	50
Figura 2.18. Risultati LBA.....	51
Figura 2.19. Risultati forza sui palmi e RULA.....	52
Figura 2.20. Risultati Push/Pull.....	53
Figura 3.1. Giunzione fra castello e colonna.....	56
Figura 3.2. Dettaglio quote: distanze fra le fasi.....	57
Figura 3.3. Fasi con giunzione standard.....	58
Figura 3.4. Dettaglio fazzoletto giunzione standard.....	60
Figura 3.5. Schema postura e condizioni operative manichino.....	61
Figura 3.6. Simulazione inserimento fazzoletto.....	62
Figura 3.7. Soluzione fazzoletti piccoli.....	63
Figura 3.8. Soluzione con le asole.	64
Figura 3.9. Soluzione fazzoletti piccoli: controllo visivo.....	65
Figura 3.10. Soluzione con le asole: controllo visivo.....	66
Figura 3.11. Vie d'accesso alla giunzione.....	67
Figura 3.12. Dettaglio fase critica per il montaggio della giunzione.....	68
Figura 3.13. Lateralità nell'operazione di serraggio con	

dettaglio della vista.....	69
Figura 3.14. Serraggio dall'alto SSP.....	70
Figura 3.15. Carico per simulare coppia di serraggio.....	71
Figura 3.16. Serraggio dall'accesso frontale SSP.....	72
Figura 3.17. Schema delle varianti di giunzione, in viola le fasi posteriori e in giallo le fasi anteriori.....	74
Figura 3.18. Implementazione della simulazione sui modelli delle varianti.....	75
Figura 3.19. Dettaglio errore nella variante 2.3.....	76
Figura 3.20. Dettaglio vista impugnatura sinistra variante 2.1.....	76
Figura 3.21. Dettaglio errore nella variante 2.2.....	77
Figura 3.22. Variante 2.4 SSP.....	78
Figura 3.23. Variante 2.4: visuale.....	78
Figura 4.1. Dettaglio soluzione corta.....	82
Figura 4.2. Soluzione corta: accesso superiore.....	83
Figura 4.3. Soluzione corta: accesso frontale.....	83
Figura 4.4. Soluzione corta SSP.....	84
Figura 4.5. Soluzione corta LBA.....	85
Figura 4.6. Soluzione corta OWAS.....	86
Figura 4.7. Soluzione corta RULA.....	87
Figura 4.8. Quote: soluzione standard e soluzione 3 fori.....	89
Figura 4.9. Prolunga Catalogo Facom.....	90
Figura 4.10. Cricchetto Catalogo Facom.....	90
Figura 4.11. Inserto per M10 Catalogo Facom.	91
Figura 4.12. Assieme utensile cad per simulazioni Catalogo Facom.....	92
Figura 4.13. Fissaggio inserto dopo aver fatto passare la prolunga nella fase frontale.....	93
Figura 4.14. Postura fissaggio inserto: controllo visivo.....	93
Figura 4.15. Soluzione a 3 fori LBA.....	95
Figura 4.16. Soluzione a 3 fori SSP.....	96
Figura 4.17. Prototipo della soluzione a 3 fori e prova dell'inserimento della prolunga.....	97

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1. Tabella coefficienti del calcolo del peso limite raccomandato.....	33
--	----

Sommario

L'analisi ergonomica ha conosciuto negli ultimi anni un'evoluzione significativa che ha portato ad una dicotomia dei campi di applicazione.

Si è passati da uno studio del confort e dell'analisi dell'interfaccia del prodotto, del rapporto uomo - prodotto, ad un approccio metodologico nel campo della progettazione. In questo ambito ha avuto larga diffusione l'applicazione di metodologie d'analisi per lo studio degli assiemi di prodotti industriali, andando ad indagare le singole fasi di assemblaggio, le operazioni che si possono definire rischiose per l'operatore, le operazioni difficili da portare a compimento.

Tali aspetti evidenziati in fase di assemblaggio hanno ripercussioni non trascurabili in fase di progettazione in quanto possono essere utilizzate in una duplice prospettiva: in maniera retrospettiva, andando ad analizzare fasi di assemblaggio di prodotti e di linee già esistenti; in maniera predittiva, verificando in ambiente virtuale le manovre e analizzando le fasi di assemblaggio di prodotti non ancora in produzione.

Quest'ultimo aspetto in particolare consente di prevedere quelle che sono le problematiche che si potrebbero incontrare in fase di realizzazione del prodotto, permettendo di intervenire nella progettazione avanzando delle alternative e validandole prima di raggiungere la catena di montaggio.

Ciò è possibile soprattutto grazie all'evoluzione di software che consentono la gestione dei manichini virtuali in grado di replicare le manovre necessarie per la realizzazione di alcune operazioni. Le simulazioni con manichini virtuali consentono sia di verificare singole operazioni elementari, producendo dei risultati congrui con le analisi del metodo del NIOSH, sia di analizzare operazioni specifiche e di verificarne le alternative in maniera metodica.

In particolare il caso studio qui presentato prevede la verifica della risposta del manichino virtuale ad operazioni elementari e la ricerca di soluzioni alternative per la progettazione dell'elemento di giunzione per un quadro componibile prodotto da Skema S.p.a..

Capitolo 1

Introduzione all'Analisi Ergonomica nella progettazione industriale

La ricerca ergonomica negli ultimi anni ha ampliato il suo campo di applicazione. Dall'utilizzo come pura validazione da parte del consumatore (se si tratta di un prodotto come telefono, elettrodomestici e simili) o dell'utente (se si tratta di un servizio come per il sedile di autovetture, treni e aerei), si è proceduto a ritroso nel percorso di fabbricazione industriale andando ad investire rami della produzione e della fase di progettazione stessa del prodotto.

Se, come sostiene J. Mark Porter in una pubblicazione del 2004, *"There are ethical, legislative and financial reasons why products and services should be designed, wherever appropriate and possible, for the widest range of consumer ages, shapes, sizes, needs, preferences and abilities"*¹ si può benissimo estendere il concetto di *consumer* e applicarlo anche nell'ambito delle produzioni.

¹ J. Mark Porter, Keith Case, Russell Marshall, Diane Gyi, Ruth Sims neé Oliver – International Journal of Industrial Ergonomics - *'Beyond Jack and Jill': designing for individuals using HADRIAN*, No. 33 (2004) pp. 249–264

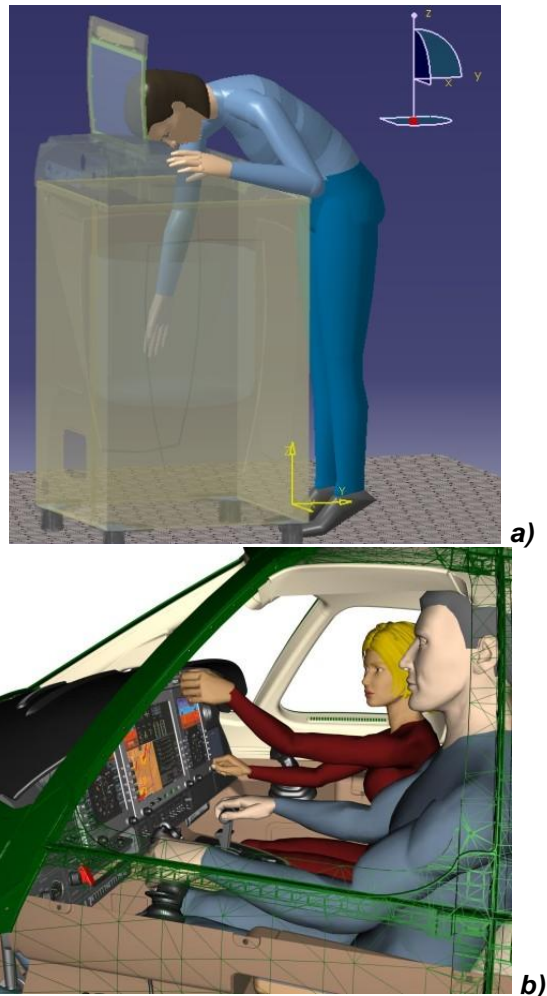


Figura 1.1. Esempio di validazione ergonomica: **a)** da parte del consumatore del prodotto (lavatrice) e **b)** da parte dell'utente del servizio (cabina elicottero)

Si può quindi interpretare l'analisi ergonomica nella progettazione industriale sostanzialmente come suddivisa in due ambiti: il primo riguarda l'analisi della funzionalità del prodotto; il secondo è collegato più strettamente al ciclo produttivo e alla progettazione. Nel primo caso si tratta di andare ad analizzare il confort e il livello di interazione con il prodotto; nel secondo invece si valutano aspetti come la movimentazione dei carichi e il livello di accessibilità di alcune zone. Si può inoltre approfondire ancora di più questo aspetto andando ad analizzare le condizioni di montaggio e di manutenzione che dovrebbero presentarsi all'operatore, oppure le manovre e il livello di sforzo che la movimentazione dei carichi pesanti può causare.

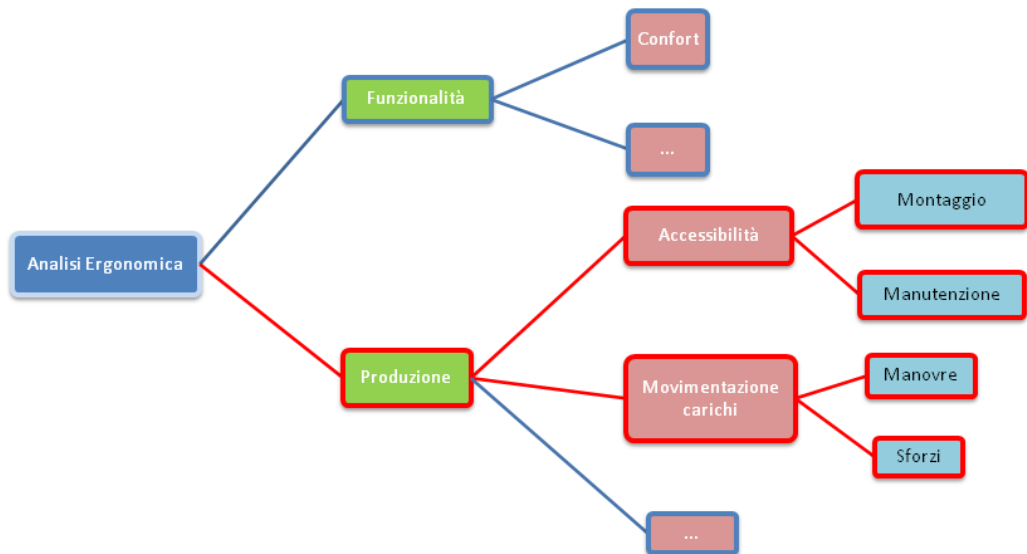


Figura 1.2. Schema dello sviluppo dell'analisi ergonomica

Oggetto di questo lavoro sarà appunto lo studio di un caso industriale dell'assemblaggio di un prodotto modulare. Riconducendoci al grafico di Figura 1.2 abbiamo concentrato il nostro interesse sul percorso evidenziato in rosso, scegliendo il ramo di applicazione della produzione. Abbiamo trattato le fasi del montaggio e abbiamo analizzato le manovre che riguardavano la movimentazione dei carichi e l'analisi delle posture per poterli sostenere.

Nello specifico ci siamo occupati di un quadro elettrico prodotto da Skema S.p.a., che ha come sua caratteristica fondamentale quella di essere un prodotto componibile. Il vantaggio facilmente intuibile di una simile soluzione deriva prima di tutto dal risparmio economico nella fase di trasporto.

Solitamente i quadri elettrici vengono assemblati in officina secondo le richieste del cliente e poi trasportati.

Una soluzione modulare componibile permette di abbattere i costi di trasporto diminuendo sensibilmente i volumi trasportati, oltre a venire in contro ad un'esigenza di *carbon footprint* per migliorare la gestione e minimizzare l'apporto di emissioni di CO² nell'ambito di tutta la vita del prodotto.

1.1. Evoluzione dell'analisi ergonomica in campo industriale

Nell'ultimo decennio², in particolare dal 2003 dopo la pubblicazione di uno studio da parte della Ford³, si è provato ad applicare lo studio ergonomico direttamente nel campo della produzione industriale, andando ad analizzare le fasi di assemblaggio da parte degli operai, per poter meglio capire dove e come era possibile intervenire. Tale applicazione, dapprima solo teorica o puramente logico-intuitiva (si andavano a valutare le posizioni degli operai, la sequenza dell'assemblaggio, l'interazione uomo - macchina, uno studio di massima di ingombri e postazioni adoperate), ha avuto quasi da subito un riscontro positivo per quanto riguarda il punto di vista dei tempi di produzione e della qualità del lavoro.

Partendo dal presupposto che chi lavora meglio e nel più breve tempo possibile spesso è colui che è messo nelle migliori condizioni per svolgere il suo compito³, è facile capire come questo concetto in ambito industriale vada esteso non solo per la singola operazione ma anche nel ripetere la stessa più volte.

Per perseguire questo percorso di studio si sono intraprese diverse strade che in letteratura possono essere suddivise in due tronconi principali: un primo che si può definire empirico - statistico e un secondo che implica l'utilizzo di simulazioni virtuali. Ovviamente per quanto tale suddivisione sia dettata anche da ragioni storiche e tecnologiche, allo stato attuale la prima non esclude la seconda e viceversa. Molto spesso è solo l'utilizzo combinato delle due che permette di raggiungere risultati soddisfacenti.

² Colin G. Drury - HUMAN FACTORS - *Human Factors in Industrial Systems: 40 Years*, Vol. 50, No. 3, June 2008, pp. 368-374

³ Emilio C. Baraldi, Paulo C. Kaminski - *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries - Ergonomic Planned Supply in an Automotive Assembly Line*, 2010, pp. 1-16

1.2. Metodologie e strumenti d'analisi

Nella prima analisi si studiano in maniera empirica alcune operazioni della fase di assemblaggio.

Si mette appunto dapprima una tipologia di prova, isolando e standardizzando le singole fasi, ad esempio il sollevamento di un peso generico e il posizionamento dello stesso in tre posizioni ad altezze differenti nei ripiani di una scaffalatura. Successivamente si procede all'analisi dello sforzo del singolo operatore, ripetendo lo stesso esercizio con diverse serie e ampliandolo su una popolazione significativa⁴.

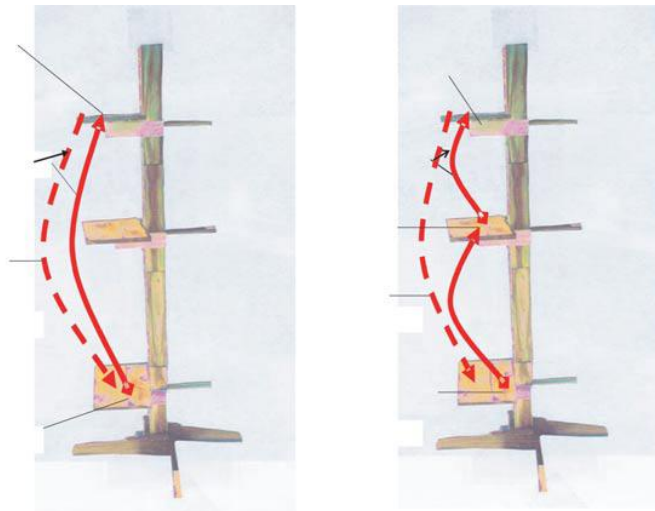


Figura 1.3. Esempio di una prova per movimentazione carichi

Appare subito chiaro come gli aspetti cruciali in questo caso siano la valutazione dello sforzo e l'analisi dei dati ottenuti, senza trascurare tutta la problematica relativa alla standardizzazione della prova che qui si tralascia ma di cui bisogna sempre tener conto.

Per l'analisi dello sforzo si possono utilizzare diversi metodi come il metodo del NIOSH (*National Institute of Occupational Safety and Health*), per calcolare il limite di sforzo ammissibile; la scala di Borg, che mette in relazione la frequenza cardiaca e le ripetizioni dello

⁴ Edem G. Tetteh, Niaz Latif, James D. McGlothlin, Jerry Peters - Human Factors and Ergonomics in Manufacturing - *Impacts of Frequency and Posture on Body Mass, Index in Manual Handling Tasks*, Vol. 19 (4) May 2009, pp. 329–343

sforzo; l'elettromiografia (EMG), che consente di misurare lo sforzo muscolare attraverso l'utilizzo di sonde intramuscolari.

In base alla tipologia di dati che si riesce ad ottenere e alla loro stretta correlazione con l'operazione che si va ad analizzare, si può applicare uno studio statistico (ANOVA) degli sforzi accumulati dagli operai e valutare quali fattori siano determinanti e come sia possibile intervenire di conseguenza per correggerli.

Dalla semplice analisi statistica si può ad esempio capire il mutamento della popolazione degli operai andando a ragionare sul cambiamento antropometrico della classe operaia, nel corso degli anni, oppure si possono individuare operazioni critiche, per la sicurezza o per la salute, e intervenire per correggere, diminuire o eliminare definitivamente tali rischi. Questo tipo di studio, per quanto elementare, permette di focalizzare l'attenzione sulle problematiche di alcune fasi dell'assemblaggio, le più onerose dal punto di vista dello sforzo fisico, e consente di aprire nuovi orizzonti per lo studio statistico delle popolazioni.

Nella seconda metodologia si analizza il fattore umano attraverso la simulazione numerica, utilizzando manichini virtuali. In questo campo lo sviluppo del ramo che riguarda la produzione industriale si è intensificato solo negli ultimi anni, ma questo aspetto è sempre stato tenuto presente fin dalla fine degli anni 60 soprattutto in campo militare.

La naturale evoluzione tecnologica ha permesso però solo negli ultimi anni di rendere le simulazioni interamente virtuali. I primi esempi di simulazione sperimentale si servivano di manichi antropomorfi reali per la validazione di posture rischiose.

Molto più spesso, si effettuavano simulazioni con manichini inerti reali per capire la risposta del corpo umano a determinate sollecitazioni difficili da essere ricondotte a semplici forze puntuali. In questo campo l'introduzione di manichini inerti virtuali ha consentito l'analisi della risposta a sollecitazioni distribuite. Partendo dalla suddivisione del corpo in macro regioni, calcolando dimensioni di massima e baricentro si provvedeva a realizzare un manichino per la risposta a forze generiche come quelle che si possono incontrare nella caduta dei corpi. Dapprima si valutava solo il contributo gravitazione all'inerzia e all'interazione delle componenti, simulando le diverse tipologie di caduta sia dei corpi che delle singole parti.⁵

⁵ M.A. Forero Rueda, M.D. Gilchrist - Forensic Science International - *Comparative multibody dynamics analysis of falls from playground climbing frames*, No. 191 July 2009, pp. 52-57

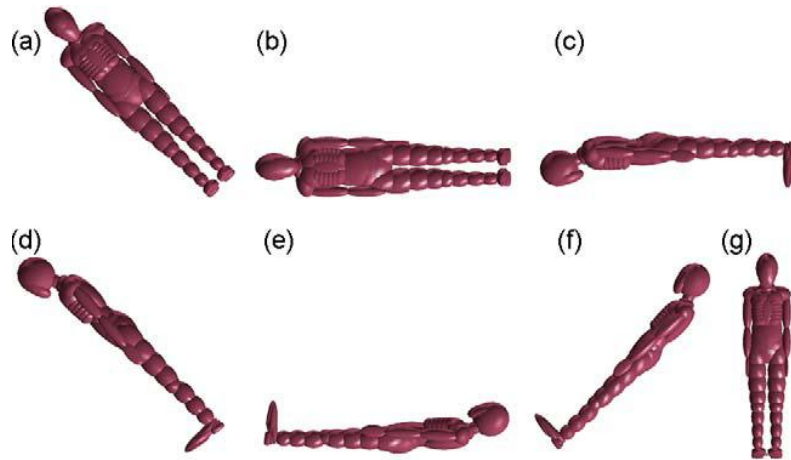


Figura 1.4. Simulazioni sullo studio delle cadute del corpo umano attraverso l'uso di manichini inerti virtuali

Successivamente si è riusciti ad elaborare la risposta dei manichini virtuali in casi molto più complessi, come ad esempio ne caso della risposta dei manichini alle sollecitazioni e ai vincoli predisposti nella classica prova di crash test.

In queste simulazioni, partendo dall'acquisizione dei dati effettuata nei crash test con manichini inerti reali, si riesce a ricavare un modello analitico da cui ricavare la risposta di manichini virtuali a parità di condizioni al contorno.⁶

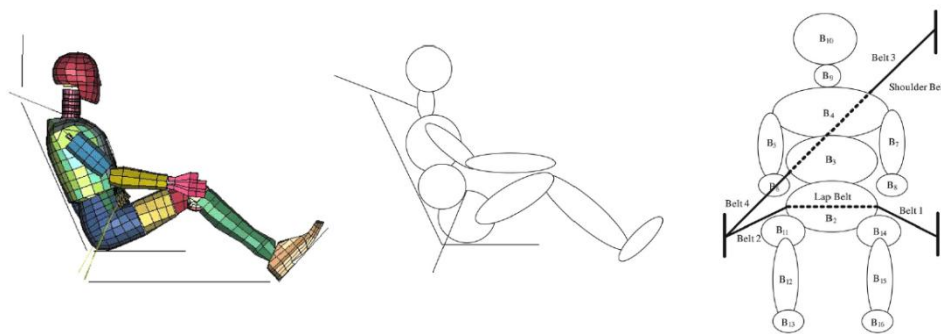


Figura 1.5. Simulazioni dei crash test con manichino inerte virtuale

⁶ Tso-Liang Teng, Fwu-An Chang, Yung-Sheng Liu, Cheng-Ping Peng - Mathematical and Computer Modelling - Analysis of dynamic response of vehicle occupant in frontal crash using multibody dynamics method, No. 48 (2008), pp. 1724–1736

1.3.1 manichini virtuali

Il cuore dello sviluppo di questa analisi è lo sviluppo di modelli umani, manichini, in grado non solo di replicare virtualmente le operazioni ma di restituire anche dati facilmente leggibili e realistici. Lo sviluppo di modelli umani dal punto di vista analitico ha avuto inizio alla fine degli anni 60⁷. I primi modelli erano dei manichini ‘a stecchino’ in grado di realizzare una prima analisi di tipo dimensionale, su base statistica, del fattore umano, soprattutto applicati in ambito aerospaziale, NASA.

Ovviamente il progresso tecnologico dei calcolatori ha portato a sviluppare modelli sempre più complessi in grado di implementare anche fasi cinematiche e dinamiche per quanto riguarda la simulazione del comportamento umano. Ciò ha comportato una larghissima diffusione degli strumenti di analisi ergonomica, a tal punto che dall’inizio degli anni duemila si è registrata un’inversione della tendenza fra la creazione di nuovi modelli ergonomici, che utilizzano manichini virtuali, e il loro effettivo utilizzo in software specifici o in applicazioni come moduli di prodotti per CAD⁸.

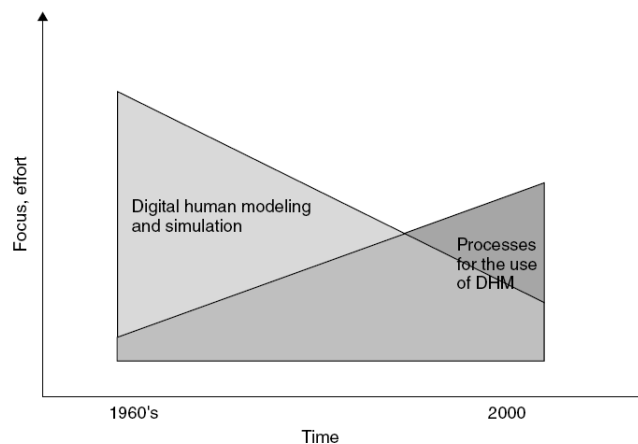


Figura 1.6. *Inversione della tendenza fra la progettazione di modelli umani e l'effettivo utilizzo con software e applicazioni CAD*

⁷ Lars Fritzsche - Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, *Ergonomics Risk Assessment with Digital Human Models in Car Assembly: Simulation versus Real Life*, No. 20 (4) (2010), pp. 287–299

⁸ Anders Sundin, Roland Anders Sundin, Roland Örtengren - Handbook of Human Factors and Ergonomics, Third Edition. – *Chapter 39: DIGITAL HUMAN MODELING FOR CAE APPLICATIONS*, Edited by Gavriel Salvendy 2006 John Wiley & Sons, Inc.

Sul finire degli anni 90 ha avuto inizio lo sviluppo dei modelli tridimensionali che ha aggiunto all'analisi puramente statistica una validazione più realistica non solo dei risultati ma anche del livello di interazione fra modello e fattore umano. Con i modelli tridimensionali si inizia a ragionare non solo sull'analisi dimensionale e dinamica ma anche sull'analisi degli ingombri, dei campi di vista, aspetti non secondari nell'ergonomia.

Ciò ha implicato negli ultimi anni la tendenza ad abbandonare lo sviluppo algoritmico dei modelli e a concentrarsi maggiormente sui processi di analisi dei modelli, diversificando la nascita di manichini a seconda dei campi di applicazione.

Nell'ultimo decennio si può riscontrare la nascita di vari modelli: Santos, modello di simulazione usato in ambito militare; Jack, nato negli anni 70/80 come algoritmo e sviluppato negli anni 2000 per simulazioni dinamiche; Delmia, concepito principalmente per la validazione di posizioni statiche nel campo della sicurezza; Madymo, modello inerte usato nel settore dell'automotive per la simulazione di crash test.



Figura 1.7. Santos: soldato virtuale utilizzato per testare l'ergonomia di equipaggiamento e armi

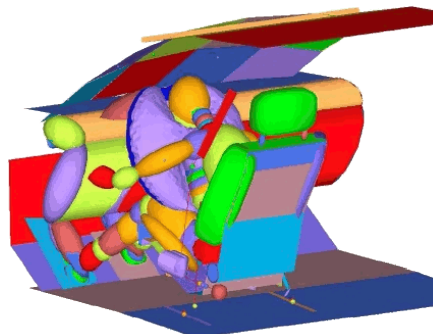


Figura 1.8. Madymo: manichino virtuale inerte usato nella simulazione dei crash-test

La moltiplicazione delle applicazioni ha anche diversificato di conseguenza l'analisi del fattore umano. I manichini virtuali vengono adoperati sostanzialmente secondo due metodologie: per verificare il livello di rischio in alcune operazioni elementari; per analizzare l'utilizzo di alcune componenti ad esempio in fase d'assemblaggio. Nella prima opzione il manichino viene adoperato per verificare determinate operazioni valutando i rischi degli sforzi che entrano in gioco sull'operatore e cercando di trovare quali possano essere i limiti e i vincoli che ne scaturiscono. Nella seconda metodologia invece si passa all'analisi dell'utilizzo delle componenti e tale operazione può essere effettuata o in maniera retrospettiva, su modelli e prodotti già esistenti verificando le condizioni già esistenti oppure può essere effettuata in maniera predittiva lavorando in ambito virtuale cercando di intercettare prima della realizzazione del prodotto reale quali possano essere le problematiche di alcune operazioni. L'impatto di questo studio, poiché svolto precedentemente alla fase di realizzazione del prodotto, consente la riprogettazione del componente, delle fasi di assemblaggio o la ricerca di soluzioni alternative quando si è ancora in fase di progettazione.

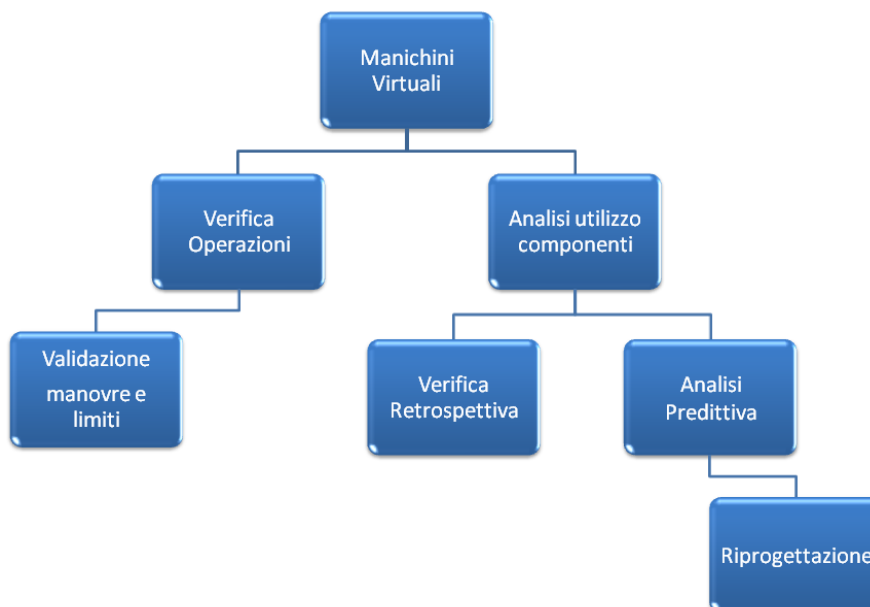


Figura 1.9. Schema delle metodologie d'uso dei manichini virtuali

In quest'ottica i modelli con base statistica sono utilizzati per validare i prodotti dalla parte dell'utente o per verificare la condizione di singole fasi statiche. In questi casi la verifica ergonomica può suggerire di intervenire direttamente sulla riprogettazione di singole parti o su concezioni di progetto differenti. I modelli più avanzati invece permettono di percorrere la strada alternativa affrontando nuove metodologie d'analisi. Lo studio, iniziato nell'ambito dell'automotive⁹, pone l'accento sulla validazione delle operazioni in catena di montaggio. Storicamente il fattore umano in queste operazioni è sempre stato una risorsa critica importante a fronte di un limitato contributo dell'automazione.

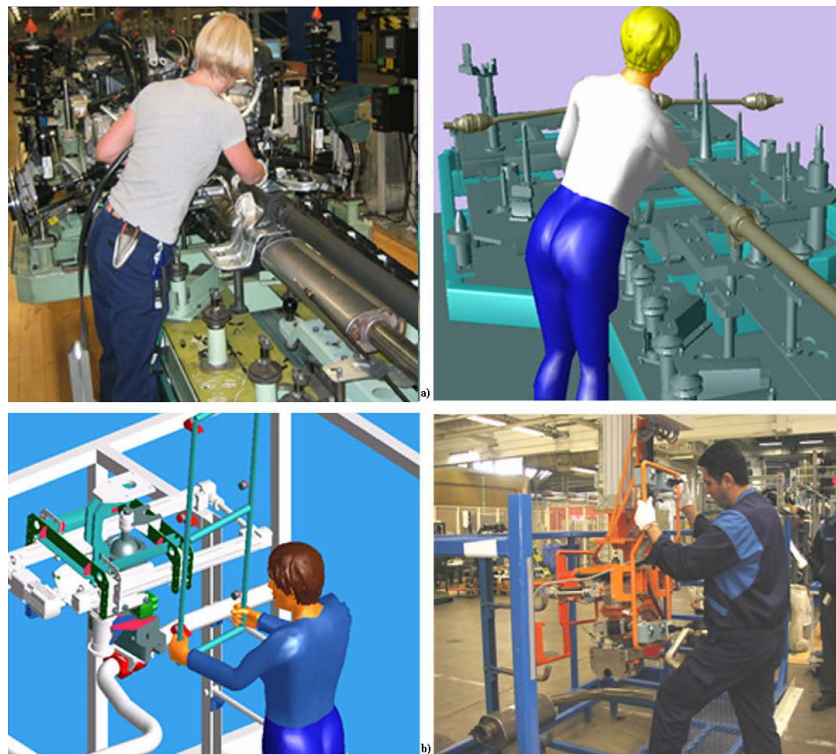


Figura 1.10. *Le simulazioni vengono utilizzate: a) per verificare condizioni esistenti b) per simulare e prevedere problematiche e rischi*

È qui che gli studi si sono sdoppiati in due direzioni: secondo una visione retrospettiva, si effettua la validazione e la verifica delle linee

⁹ Dan Lamkull, Lars Hanson, Roland Örtengren - International Journal of Industrial Ergonomics - *A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: A case study within manual assembly of automobiles*, No. 39 (2009), pp. 428–441

già esistenti andando a verificare posture, sequenze e livello di sforzo fisico; oppure secondo una validazione puramente virtuale per andare ad intercettare quei fattori che potrebbero diventare critici in fase di realizzazione, effettuando l'analisi di ingombri, raggiungibilità o ripetitività di alcune operazioni.

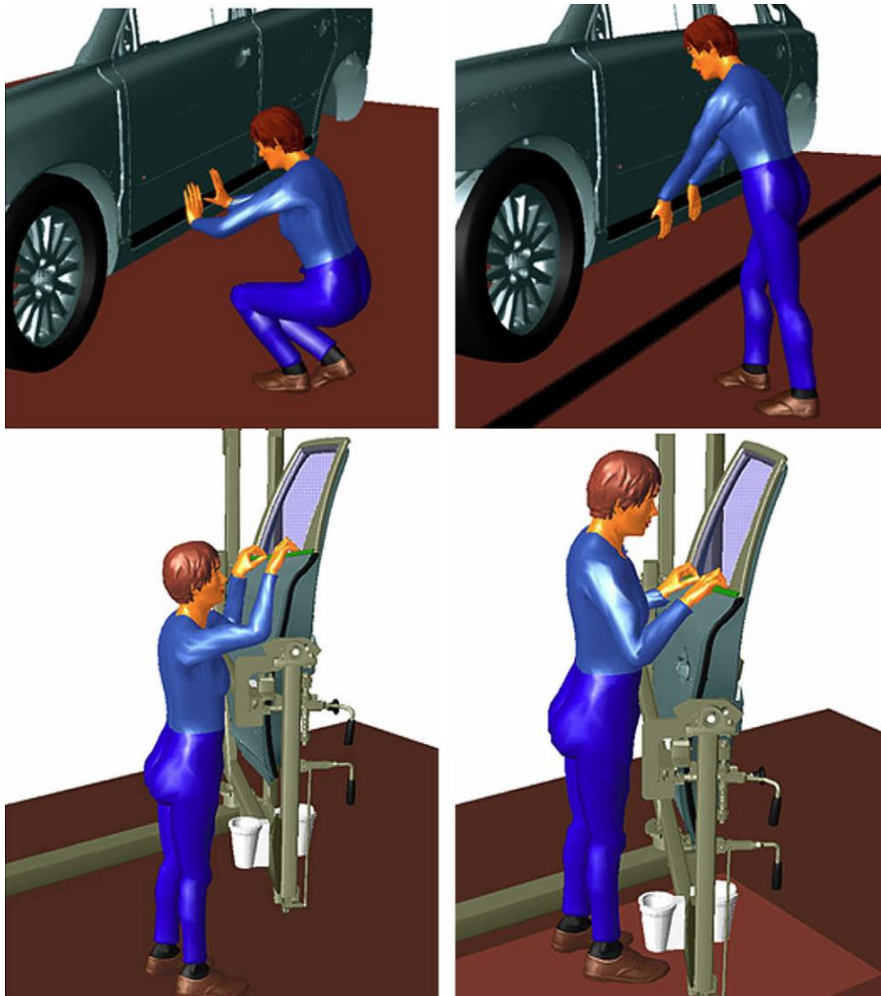


Figura 1.11. *I risultati delle simulazioni: correggendo le postazioni di lavoro permettono di far eseguire un lavoro migliore con minori rischi*

In tali analisi si standardizzano le operazioni e si effettua un'analisi degli ingombri o della raggiungibilità delle zone interessate, andando a verificare il comportamento del manichino in 3D. Partendo da una base antropometrica statistica si rilevano e classificano le operazioni suddividendole secondo tre categorie in base al grado di difficoltà (rosso, giallo e verde). Così si va ad

individuare quali operazioni possono essere rischiose e quali invece sicure.

Le operazioni a rischio ovviamente dovrebbero essere ricontrollate per quanto riguarda la postura dell'operatore, la sequenza delle operazioni oppure, come estrema conseguenza, la riprogettazione dei componenti.

Nel settore automobilistico questa tipologia di analisi ha riscosso molto successo, a tal punto da diventare uno dei settori trainanti per la ricerca ergonomica.

Qui è importante la verifica delle linee già esistenti per poter incrementare la produzione, facilitando la sequenza delle operazioni su prodotti noti oppure si cerca di verificare, prima di mandare in produzione nuovi prodotti, la sequenza delle operazioni, la loro fattibilità e la loro capacità di esser replicate nel tempo.

Inoltre l'ergonomia viene anche utilizzata nell'analisi dell'assemblaggio per quelle aziende che producono secondo kit di assemblaggio. Qui l'analisi della postazione di lavoro e della prossimità degli oggetti di utilizzo viene usata per migliorare le condizioni di lavoro dell'operatore, così come si può fare la stessa analisi per similitudine sulle postazioni di lavoro per uffici e simili.

1.3.1. Il programma Jack

In questo studio si è usato prevalentemente il software di simulazione *Jack 6.0* di Siemens. *Jack* è un programma esclusivamente adoperato per l'analisi e la validazione ergonomica. Le sue peculiarità sono:

- un manichino antropometrico in grado di interagire in ambiente virtuale;
- la possibilità di importare assieme direttamente da programmi CAD;
- la capacità di costruire semplici geometrie di supporto (sfere, cubi, coni, parallelepipedi) con le quali interagire;
- una gestione della risposta alle sollecitazioni subite dal corpo umano secondo le librerie del NIOSH (*National Institute of Occupational Safety and Health*).

1.3.1.1 Struttura del manichino

Essendo un programma per lo studio di problematiche ergonomiche, il manichino, *human*, è l'anima di ogni funzione. Esso è concepito essenzialmente come un sistema Multy Body a corpi rigidi dotato di 135 gradi di libertà, che consentono di posizionare il corpo secondo necessità rendendolo molto coerente con le posture reali.

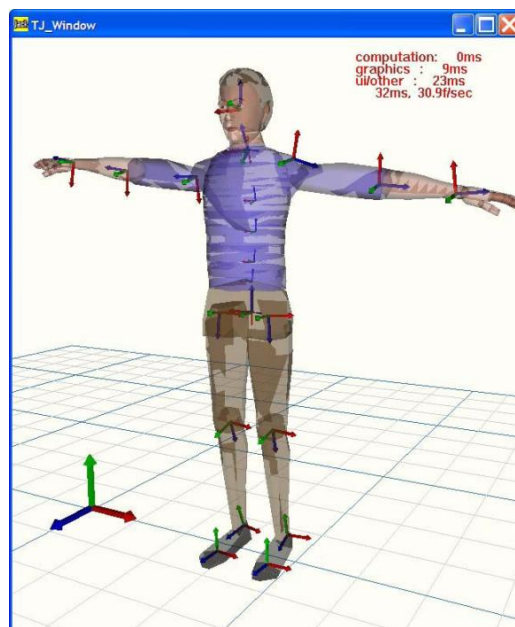


Figura 1.12. Le terne mobili che costituiscono i riferimenti del sistema Multy Body nel manichino

La struttura dei file di simulazione è costruita in modo tale da gestire in un solo ambiente ogni soggetto in modo indipendente, sia manichino che modelli cad. Per ogni elemento si possono poi controllare le singole parti: *segment* o *figure*. I primi riguardano geometrie elementari, facce e superfici, la seconda categoria riguarda elementi più complessi. La distinzione è importante per la gestione dei vincoli fra gli oggetti, *constraint*, e per la limitazione dei relativi gradi di libertà nello spazio, *joint*.

Per il manichino quindi si riesce a controllare sia la figura intera sia i singoli elementi di cui è costituito il sistema Multy Body attraverso l'utilizzo del pannello di controllo.

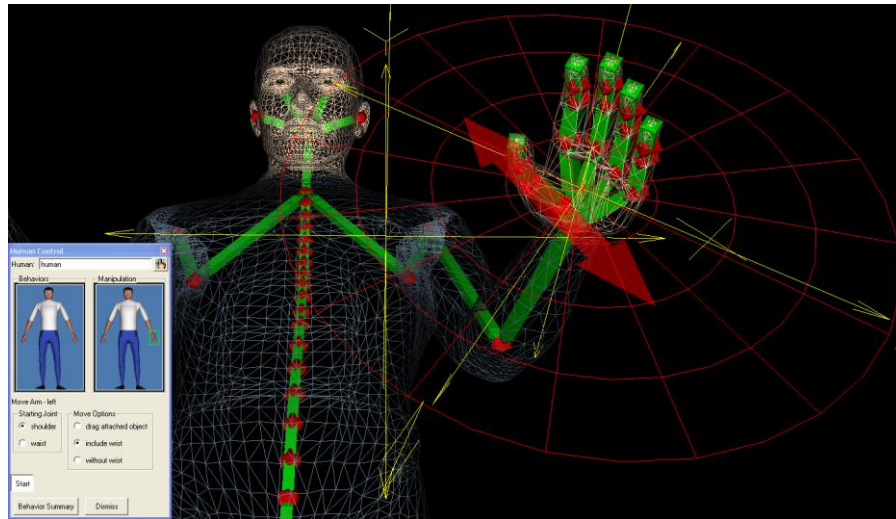


Figura 1.13. Pannello di controllo del manichino

Ogni segmento può essere corretto in ogni suo vincolo per poter adattare la postura. I nodi principali, infatti, sono gestiti tramite dei *sites* che consentono di correggere e reimpostare i vincoli che vengono dati di default.

I *sites* sono dei nodi che hanno 6 gradi di libertà nello spazio. Una volta legati i nodi allo scheletro del manichino però ci sono dei gradi che vengono soppressi o limitati per far rispettare i vincoli biomeccanici. I vincoli soppressi riguardano gradi di libertà non presenti nella struttura del corpo umano come la rotazione delle falangi lungo l'asse longitudinale. Le limitazioni invece possono riguardare ad esempio le rotazioni degli arti superiori e inferiori per quanto riguarda movimenti di adduzione e abduzione oppure di flessione ed estensione. Da questi vincoli derivano delle catene cinematiche che legano direttamente il movimento degli arti superiori alle spalle e al torace mentre il movimento degli arti inferiori è legato al bacino e al tronco. A seconda del confort e delle operazioni che si richiede di eseguire è possibile vincolare i *sites* in modo da restringere ulteriormente il range di movimento favorendo il vincolo con gli oggetti che si vuole far utilizzare al manichino.

Nel corso delle simulazioni si possono creare delle catene di vincoli in modo tale da rendere simultaneo il gesto, ad esempio con un utensile. e ripetibile più volte su diversi modelli. Si possono

assegnare dei vincoli fra i segmenti di figure diverse o fra site, che possono essere introdotti direttamente anche sui modelli.

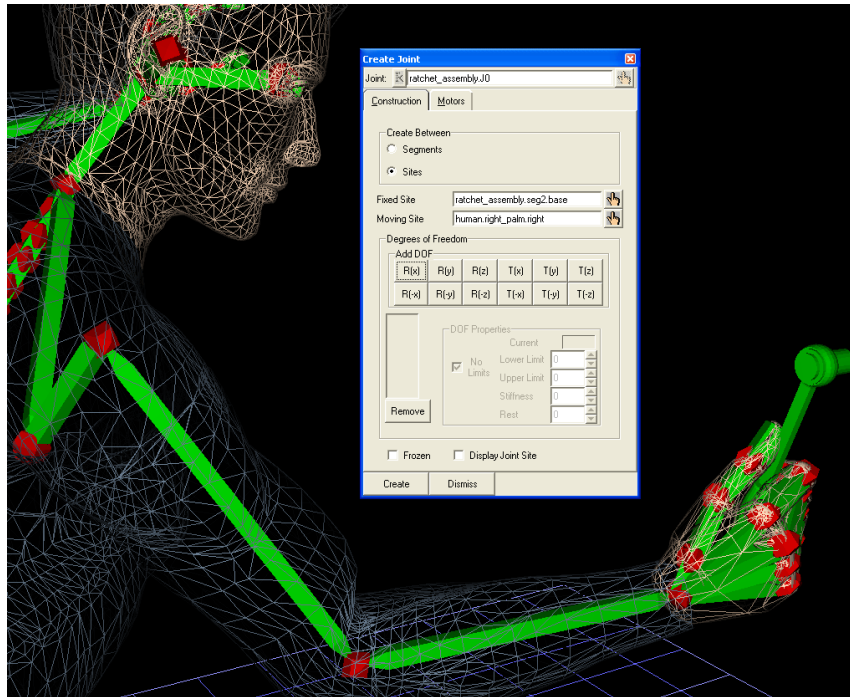


Figura 1.14. Gestione dei vincoli relativi fra manichino e modello

1.3.1.2 Proprietà del manichino

Per rendere più pertinenti le simulazioni vi è la possibilità di impostare la postura del manichino secondo alcune librerie che raccolgono le posture più comuni e permettono di programmare e controllare meglio tutti i gradi di libertà.

Nella versione Jack 6.0, che abbiamo utilizzato in questo studio, è stata anche ampliata la gamma delle posture sia per quanto riguarda il corpo del manichino sia quelle riguardanti le mani. Ciò ha migliorato la veridicità dell'analisi poiché, come verrà spiegato più avanti, è fondamentale partire dalla postura più vicina possibile all'operazione ideale che si intende compiere. L'errata postura di partenza comporta errori nella lettura dei risultati dal momento che è

molto difficile comunque controllare manualmente ogni volta il corretto settaggio di ogni vincolo.

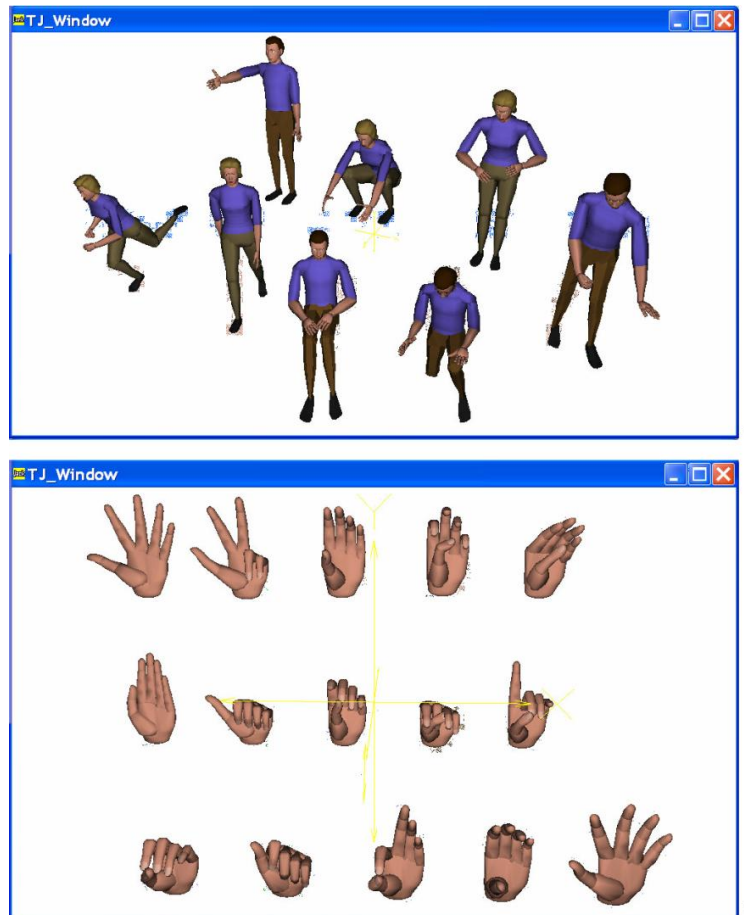


Figura 1.15. Le librerie delle posture per corpo e mani (Jack 6.0)

Jack, inoltre, permette di scegliere il campione di popolazione a cui far riferimento secondo il percentile che si vuole testare. Per permettere di scalare le caratteristiche antropometriche viene utilizzato un data base denominato ANSUR (Army Natick Survey User Requirements) che fa riferimento alla rilevazioni dell'esercito degli Stati Uniti d'America nel 1988.

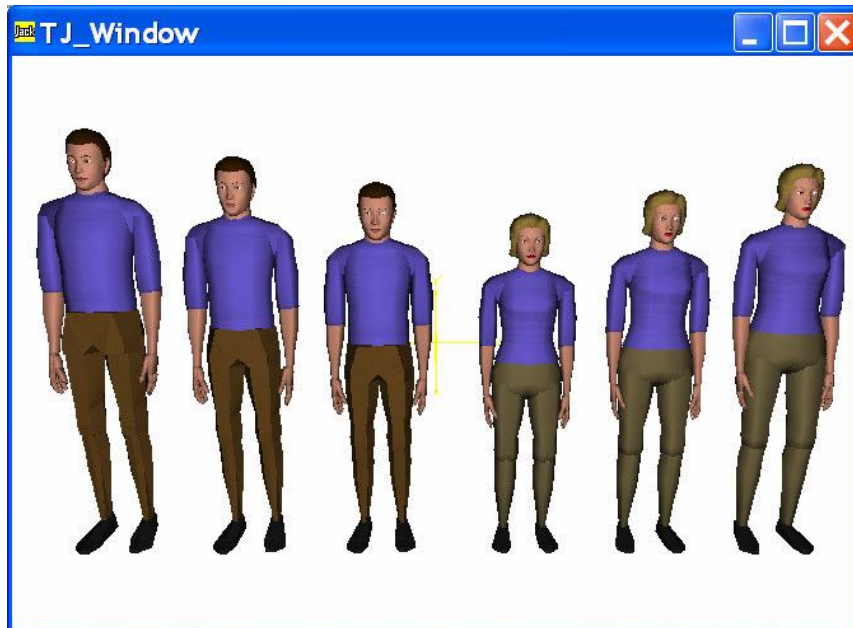


Figura 1.16. Esempio di variazione del percentile della statura nella popolazione

Inoltre è possibile adattare lo stesso manichino secondo misure personali e poter configurare ogni sua parte o solo alcune a seconda dei dati a disposizione.

Nell'analisi ergonomica, infatti, si fa spesso riferimento ad un principio generale valido negli studi antropometrici secondo il quale non esiste un *uomo medio* ma esiste la medie delle sue misure.

Per cui se si fa riferimento alla postura seduta si può far riferimento a parametri come l'altezza della testa dal suolo e la distanza del bacino da terra, che sono parametri differenti rispetto all'analisi da effettuare con postura eretta, dove si considera altezza, ampiezza dell'apertura delle braccia e lunghezza delle gambe.

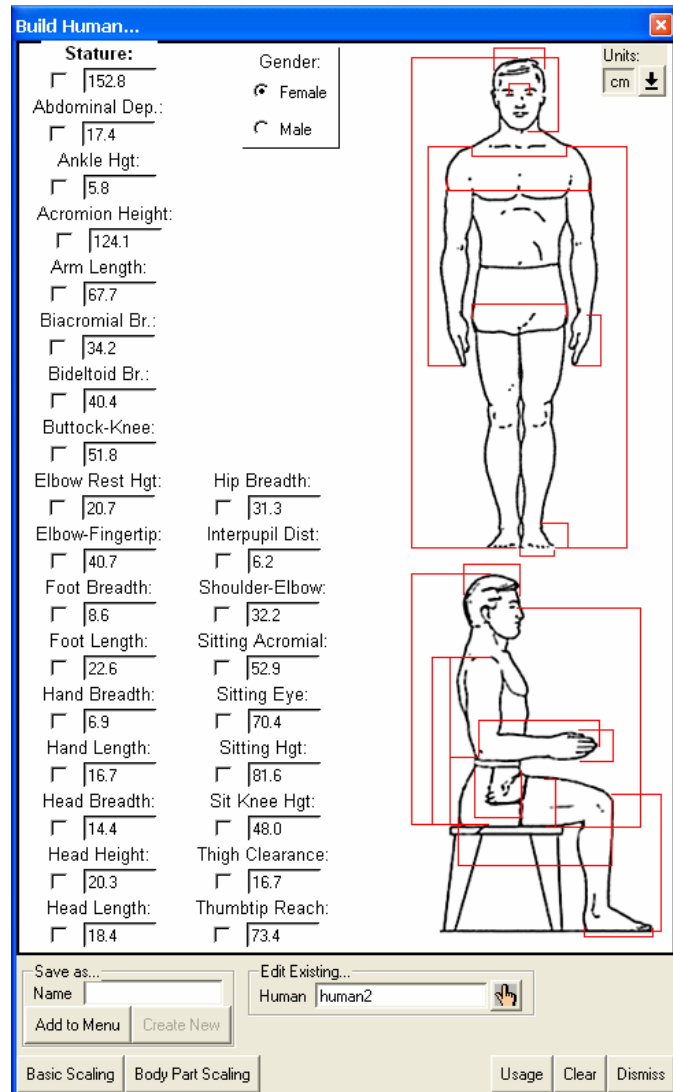


Figura 1.17. Controllo dei singoli parametri antropometrici

1.3.2. L'applicazione Delmia in Catia

Nel caso di Delmia, invece, non si tratta di un vero programma per la simulazione ergonomica, quanto piuttosto di un'applicazione all'interno di Catia di Dessault System.

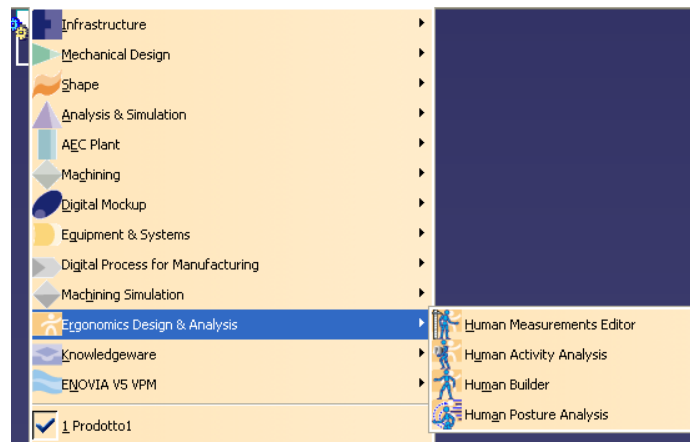


Figura 1.18. Applicazione per l'analisi ergonomica in Catia

Anche in questo caso abbiamo la possibilità di intervenire sui caratteri antropometrici del manichino dal punto di vista della selezione del percentile della popolazione. In più il programma offre una selezione in grado di distinguere fra le diverse aree di provenienza geografica dei dati: americana, canadese, francese giapponese e coreana.



Figura 1.19. Selezione del percentile e dell'estrazione geografica

1.3.2.1. Struttura e controllo

Una volta impostato il manichino si possono correggere le singole misure come per Jack per renderlo più vicino alla popolazione che si vuole analizzare.

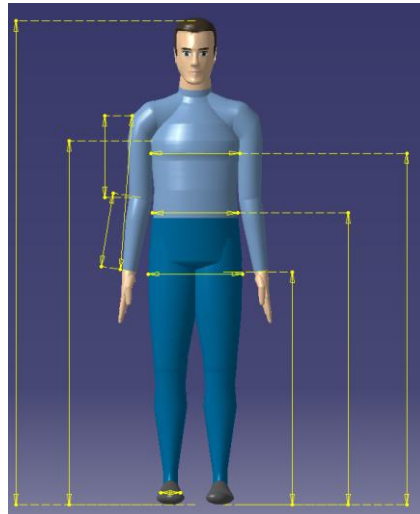


Figura 1.20. Controllo dei singoli parametri antropometrici

La ricerca delle posture si può effettuare tramite una selezione di massima fra quelle più ricorrenti, correggendo eventualmente parametri che influenzano la simulazione e adattando il manichino al test che si vuole effettuare. Ovviamente tale scelta è molto ridotta e le correzioni che si possono effettuare sono dell'ordine di pochi millimetri, importanti per far adattare il manichino allo scenario ma non tanto da consentire modifiche sostanziali.

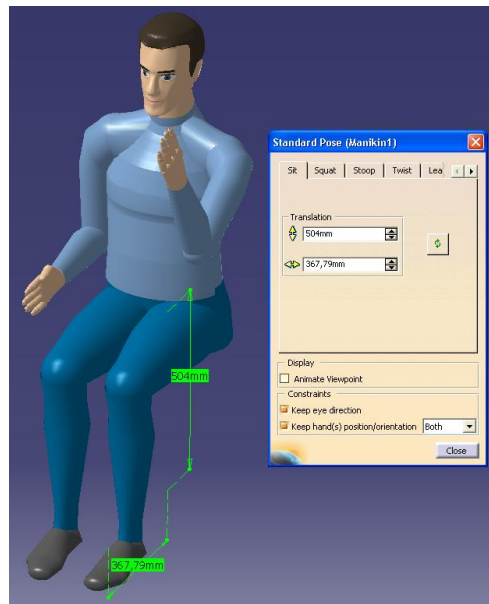


Figura 1.21. Correzione delle posture parametrizzate

Tuttavia, se si desidera movimentare ulteriormente il manichino rispetto alla postura di partenza, si seleziona il lato da controllare, il segmento da movimentare, il tipo di vincolo che si vuole rilasciare (es: fra estensione e flessione) e si può gestire il grado di libertà fra i vincoli impostati secondo la programmazione del segmento.

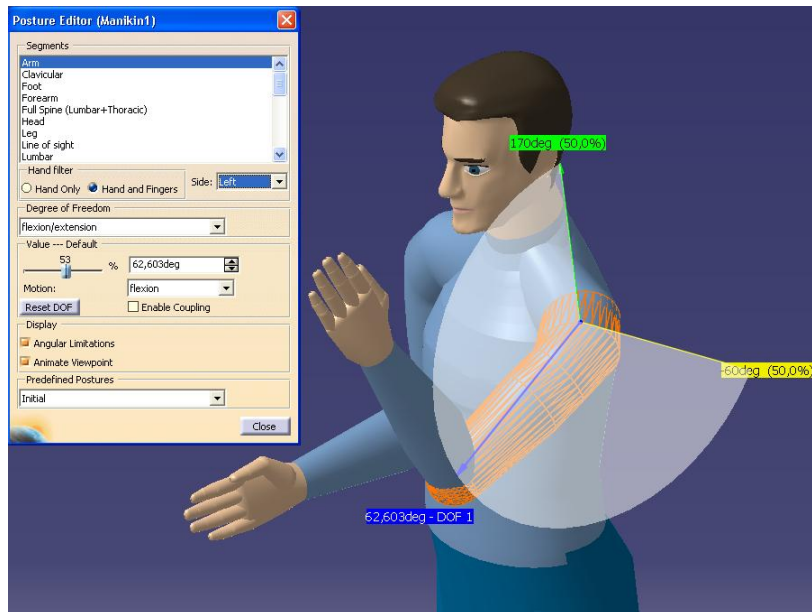


Figura 1.22. Pannello di controllo del manichino

Si nota che la gestione del movimento è molto più articolata rispetto a Jack poiché si è costretti a svincolare i gradi di libertà 'a cascata' (da quello più vicino 'alla terra' a quello più vicino al target dove si vuole operare) Ad esempio se si vuole far raggiungere una determinata posizione alla mano non si può trascinare la mano nel sito desiderato ma si deve partire dai gradi di libertà della spalla, poi regolare quelli del braccio e in fine posizionare la mano nel verso corretto.

Il rispetto dei vincoli ha ripercussioni sulle analisi effettuate per cui non potendo controllare ogni volta tutti i gradi di libertà a disposizione si sono sfruttate le librerie delle posture per cercare di aumentare il grado di realismo delle operazioni.

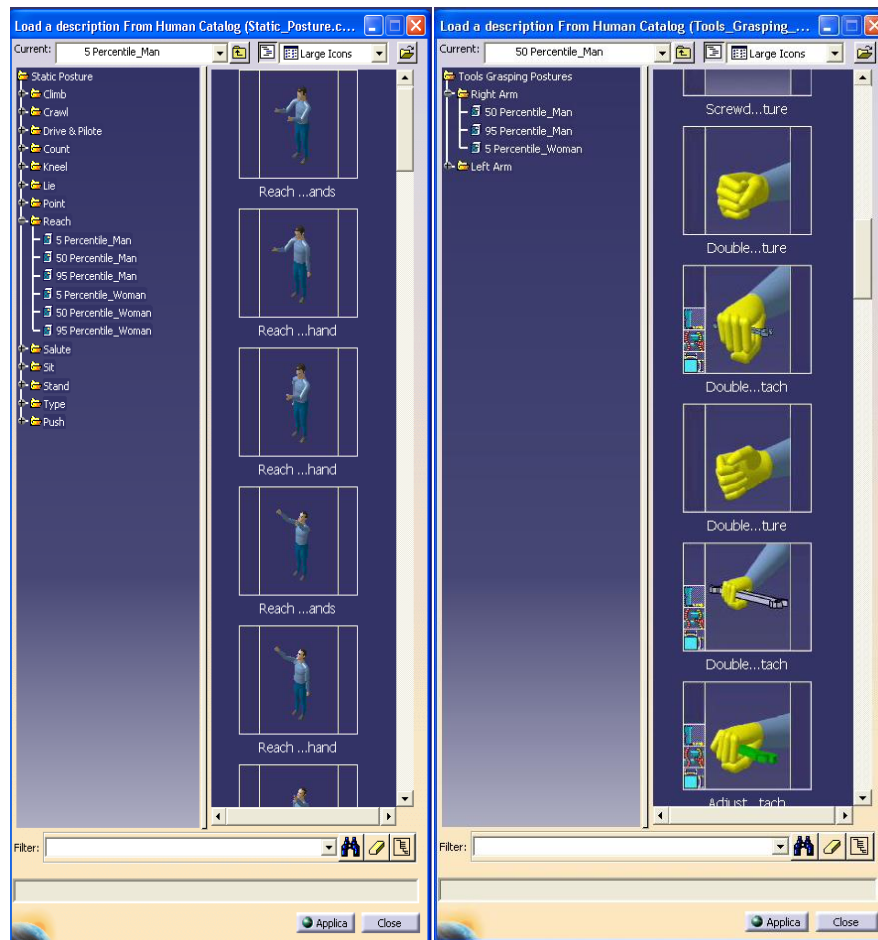


Figura 1.23. Le librerie delle posture per corpo e mani

Le due librerie, riportate in Figura 1.23, riguardano: le posture generali del corpo del manichino e le posture degli arti superiori. Con questi strumenti si riescono ad ottenere simulazioni molto vicine alla realtà; soprattutto le posture della mani sono molto interessanti. Ad ognuna di esse, infatti, è associato un utensile per determinate operazioni e di conseguenza nelle simulazioni si può tentare subito un riscontro per quanto riguarda gli ingombri e gli spazi di manovra.

Per l'interazione del manichino con i modelli CAD non vi sono problematiche particolari, in quanto il programma tratta il manichino come un modello e all'interno del suo albero delle features si trovano tutte le opzioni per caratterizzare vincoli a terra, carichi e vincoli relativi, proprio come se si trattasse di un normale prodotto.

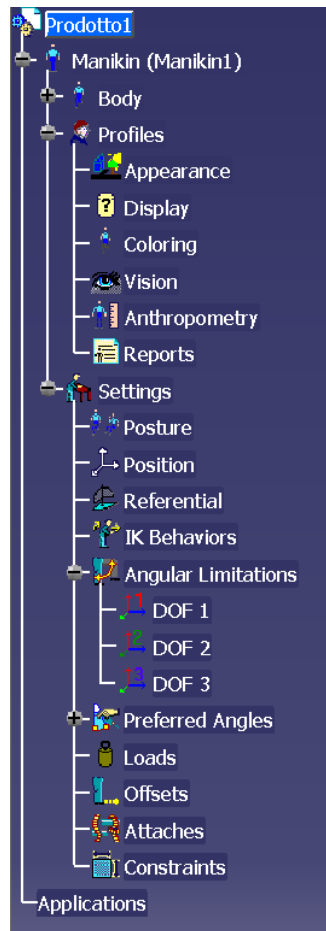


Figura 1.24. Gestione dei vincoli del manichino

Capitolo 2

Verifica delle fasi critiche di montaggio

Nel caso qui trattato, l'installazione e assemblaggio di un quadro comandi elettrico, vi sono diverse fasi da studiare dal punto di vista ergonomico. Il nostro modello, infatti, ha come scopo quello di essere un prodotto componibile dal cliente direttamente sul luogo di utilizzo e così facendo ha nella componibilità il suo punto di forza e il suo punto critico in fase di progettazione.

L'assemblaggio può essere spesso interpretato come intuitivo se si fa riferimento a manodopera con esperienza nel campo, ma le stesse operazioni eseguite per la prima volta presentano difficoltà sia dal punto di vista della sequenza delle operazioni da effettuare, sia dalla capacità di essere in grado di riuscire con successo nei passaggi critici.

Dovendo scegliere quali problematiche affrontare, abbiamo suddiviso lo studio in due rami principali: verifica delle condizioni limite per i lavori di installazione delle componenti; analisi e verifica delle soluzioni alternative per la progettazione del sistema di giunzione fra i sottoassiemi principali. Come già accennato, un aspetto non trascurabile nell'assemblaggio di un prodotto è la sequenza stessa delle operazioni. Se ci si pone poi, come in questo caso, nell'ipotesi di fornire il prodotto a operatori con esperienza ridotta o nulla nel settore specifico si comprende meglio quanto tale studio sia necessario. Nella scelta delle operazioni da controllare abbiamo tenuto conto della sequenza, valutato tempi e livello di precisione del risultato raggiungibile, ma non siamo intervenuti riprogettando le fasi e la sequenza. Abbiamo invece puntato l'attenzione sulla verifica dei passaggi intermedi per poter capire quale fosse il limite della condizione operativa, quali i rischi per l'operatore e quali le opzioni libere per intervenire di conseguenza, suggerendo le alternative da prescrivere per la buona riuscita delle manovre.

Differente metodo è stato utilizzato nell'analisi e verifica delle soluzioni di giunzione, trattato nel capitolo 3, dove lo studio ha

portato non solo alla verifica delle componenti esistenti, ma si è resa necessaria anche una riprogettazione di alcune parti. Ciò ha influenzato di conseguenza la sequenza delle operazioni e la ricerca degli utensili adatti per rendere fattibili le nuove operazioni.

2.1 Caso studio: il quadro di distribuzione elettrica componibile

Di seguito presentiamo l'oggetto del nostro studio: un quadro di distribuzione elettrica componibile progettato da Skema S.p.a.. La Skema S.p.a. è un'azienda leader nel settore dei quadri di distribuzione. La sua clientela è molto variegata, costituita da industrie dell'ambito manifatturiero, società commerciali, di servizi, di impiantistica industriale e civile sia italiane che internazionali. L'azienda offre una gamma completa di prodotti per il settore dei sistemi integrati per la distribuzione dell'energia, che vanno dalle sottostazioni di media/bassa tensione fino ai sistemi di supervisione e controllo.

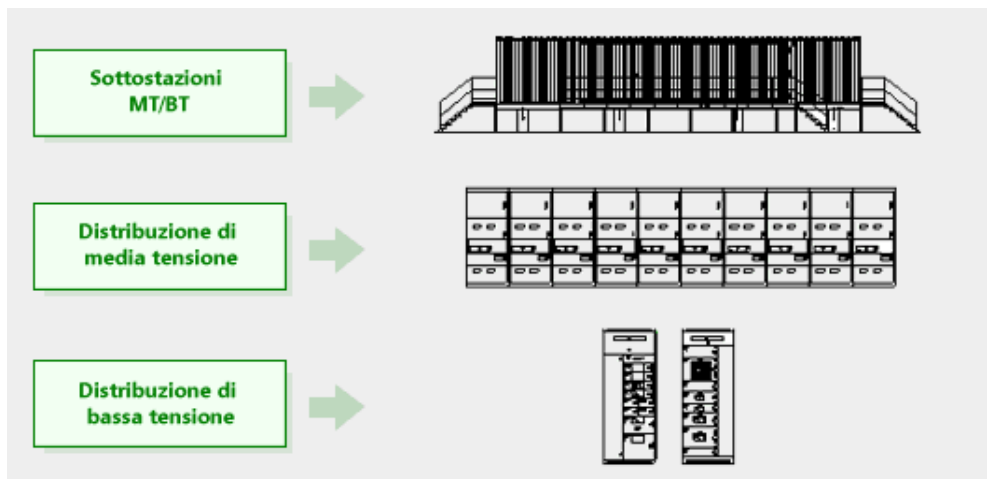


Figura 2.1. Gamma dei modelli prodotti da Skema S.p.a.

Nel nostro caso ci soffermeremo maggiormente sulle sottostazioni di bassa tensione, quadri PC (Power Center).

I quadri di distribuzione in bassa tensione, sono progettati per correnti fino a 6300 A e destinati ad applicazioni che richiedono elevate prestazioni e alto livello d'affidabilità. Questi modelli solitamente sono installati a valle dei trasformatori di potenza o gruppi generatori e contengono gli interruttori generali di arrivo e di distribuzione dell'impianto in bassa tensione.

Sono costituiti principalmente da due scomparti normalizzati affiancabili tra loro e adatti a qualsiasi configurazione d'impianto, schema elettrico e luogo d'installazione. Per distinguerli durante la nostra trattazione definiremo *colonna* lo scomparto con le derivazioni e *castello* la parte principale nella quale si inseriscono anche i pannelli di controllo.

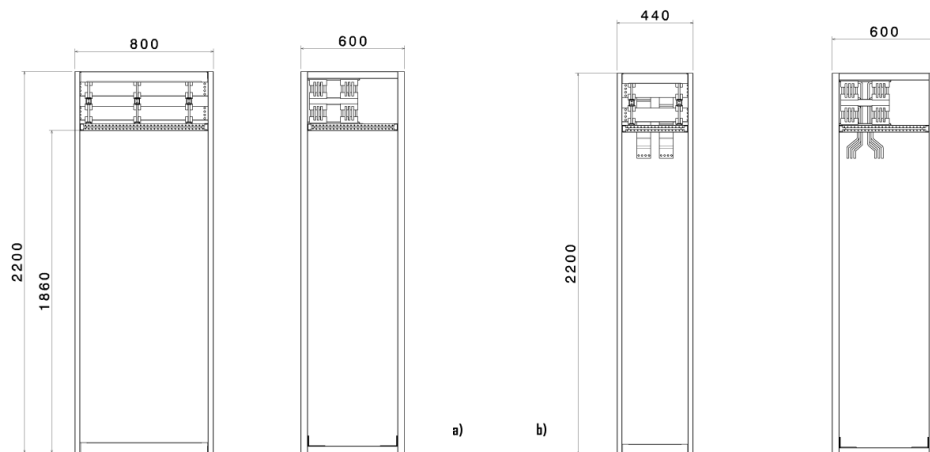


Figura 2.2. Tavole modello: a) comparto castello, b) comparto colonna

Lo scomparto, infatti, è costituito da una serie di elementi standardizzati, la cui tecnica di assemblaggio è stata studiata per poter consentire all'utente operazioni di modifica e/o espansione in accordo con le norme di sicurezza. Questi elementi sono racchiusi da un rivestimento metallico che serve per garantire la protezione contro i contatti con parti attive e la penetrazione di corpi estranei liquidi come previsto dalle normative (CEI EN 60529). L'involucro metallico esterno, costituito da lamiera zincata o verniciata, riveste ogni componente ed è sostenuto da un telaio primario, sul quale vengono installate:

- ✓ le apparecchiature di potenza;
- ✓ gli alloggiamenti e le apparecchiature di controllo e monitoraggio di sistema;

- ✓ le connessioni di potenza, poste a lato dove si affianca la colonna, costituite da delle piccole lamiere di rame dette *fazzoletti*;
- ✓ il sistema di sbarre di alimentazione, costituito normalmente da 3 barre in rame per ognuna delle rispettive 4 fasi

Nel nostro studio tratteremo le problematiche riguardanti il *castello*, il sottoassieme con le fasi, e il problema della giunzione fra i due scomparti realizzato dalle lamiere dette *fazzoletti*.

2.2 Analisi delle operazioni

Uno degli scopi principali dell'analisi ergonomica in campo industriale è quello di verificare se determinate operazioni possono essere effettuate senza rischi per l'operatore. Con la definizione di rischi si intende sia il pericolo oggettivo per la propria incolumità in una determinata operazione, dovuta ad esempio alle condizioni operative oppure agli utensili che l'operatore è costretto ad utilizzare, sia un pericolo a lungo termine dovuto alla ripetizione dell'azione nel tempo, che potrebbe far nascere problemi di fatica per l'operatore nel medio periodo e gravi danni alla salute a lungo termine.

Dato il caso in esame, abbiamo concentrato la nostra attenzione sulla seconda categoria di rischi, sebbene coscienti del fatto che l'ambiente nel quale andiamo ad operare rimanga comunque uno dei settori più rischiosi per infortuni dovuti al non corretto utilizzo di attrezzature e per la non adeguata protezione dell'operatore.

Ripercorrendo le fasi dell'assemblaggio che portano alla composizione e all'installazione del quadro elettrico a partire dalle singole parti, è risultato subito evidente che l'installazione del sottoassieme *castello* rappresentava un'operazione molto rischiosa, sia dal punto di vista del montaggio sia perché rappresenta uno dei passaggi più importanti. Le fasi che costituiscono il *castello*, infatti, vanno ad interfacciarsi direttamente con i rami di derivazione della *colonna*, di conseguenza è richiesto un alto livello di precisione.

Si è quindi verificato che, partendo dalla struttura del telaio già montata, l'installazione del *castello* per singole componenti, andando cioè ad assemblare le fasi una alla volta sulla struttura

principale, presentava non poche difficoltà. I problemi riguardavano non solo la capacità di riuscire a realizzare le singole operazioni, fissaggio del telaio del *castello* al telaio principale, fissaggio delle fasi, dei supporti e dei distanziali, ma soprattutto il livello di precisione che si riusciva ad ottenere.

La precisione fra le barre che compongono la singola fase e l'allineamento delle quattro fasi che devono poi accoppiarsi con la successiva componente sono aspetti molto critici. Tanto più che il montaggio in sequenza delle fasi, partendo dalle due fasi inferiori, non permette margine di errore. Una volta effettuato l'accoppiamento con i distanziali e i supporti per le fasi superiori è praticamente impossibile correggere l'allineamento. Per ovviare a questa problematica si è pensato di verificare la possibilità di montare a banco il sottoassieme *castello* per poi fissarlo al telaio principale. Il montaggio a banco presenta alcuni vantaggi come ad esempio la possibilità di controllare e verificare più rapidamente l'allineamento delle fasi e un miglioramento non indifferente dello spazio di manovra per l'operatore.

Una seconda operazione che si è pensato di verificare riguarda la confidenza nella movimentazione dell'assieme del quadro. Risulta, infatti, molto probabile che questi quadri vengano montati in serie e di conseguenza è necessario capire se sia possibile allineare il quadro ad altri. Si suppone comunque che tale spostamento sia dell'unità di alcune decine di centimetri, considerando che le installazioni vengano fatte in maniera contigua. La criticità qui sta nel capire se è possibile effettuare questa operazione manualmente o se sia necessario prescrivere del materiale ausiliario per lo spostamento.

2.3 Il metodo del NIOSH

Tra le metodologie più usate per questo genere di verifiche vi è quella del metodo del NIOSH (*National Institute of Occupational Safety and Health*) che nel 1981¹⁰ ha messo appunto un sistema per catalogare le operazioni in base al rischio che potrebbero causare agli operatori. Tale metodo negli ultimi anni ha avuto larga diffusione per le analisi ergonomiche di massima su semplici

¹⁰ Work Practices Guide for Manual Lifting (NIOSH WPG, 1981)

operazioni soprattutto da quando lo studio è stato aggiornato con dei dati e delle correzioni di coefficienti nel 1991¹¹ e nel 1993¹². La diffusione del metodo è dovuta principalmente al suo facile utilizzo: partendo da dati antropometrici di massima (sesso, altezza, peso) riducendo il movimento complessivo in semplici operazioni elementari (spinta, sollevamento, traino, trasporto), valutando carichi effettivi e tipologia di impugnatura si può immediatamente classificare l'operazione e valutarne il rischio della ripetitività nel tempo.

Ad esempio per l'operazione di sollevamento basta calcolare un indice di esposizione (IE) dividendo il peso effettivo sollevato per il peso limite raccomandato.

$$IE = \frac{PS}{PLR}$$

Per determinare il peso limite raccomandato si utilizza la formula:

$$PLR = PS * CP * A * B * C * D * E * F$$

dove

PLR: peso limite raccomandato

PS: peso sollevato

Gli altri coefficienti si ricavano dalle tabella di seguito:

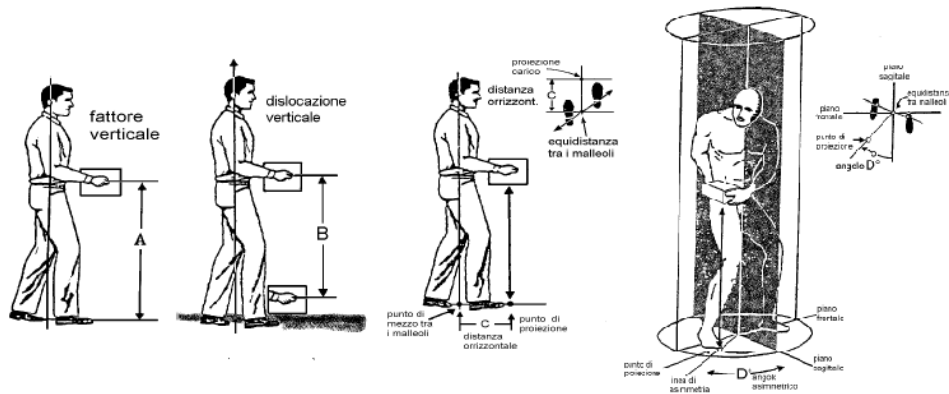


Figura 2.3. Esempio di posture da cui ricavare i coefficienti

¹¹ Scientific Support Documentation for the Revised 1991 NIOSH Lifting Equation, Technical Contract Reports, May 8, 1991

¹² Revised NIOSH Equation for the Design and Evaluation of Manual Lifting (Water, Putz-Anderson, Garg and Fine, 1993)

(CP) - COSTANTE DI PESO (Kg)								
ETA'	MASCHI				FEMMINE			
> 18 ANNI	30				20			
15-18 ANNI	20				15			

(A) - ALTEZZA DA TERRA DELLE MANI ALL'INIZIO DEL SOLLEVAMENTO								
ALTEZZA(cm)	0	25	50	75	100	125	150	>175
FATTORE	0.78	0.85	0.93	1.00	0.93	0.85	0.78	0.00

(B) - DISLOCAZIONE VERTICALE DEL PESO FRA INIZIO E FINE DEL SOLLEVAMENTO								
DISLOCAZIONE(cm)	25	30	40	50	70	100	170	>175
FATTORE	1.00	0.97	0.93	0.91	0.88	0.87	0.85	0.00

(C) - DISTANZA ORIZZONTALE TRA LE MANI E IL PUNTO DI MEZZO DELLE CAVIGLIE - (DISTANZA DEL PESO DAL CORPO - DISTANZA MASSIMA RAGGIUNTA DURANTE IL SOLLEVAMENTO)								
DISLOCAZIONE(cm)	25	30	40	50	55	60	>63	
FATTORE	1.00	0.83	0.63	0.50	0.45	0.42	0.00	

(D) - ANGOLO DI ASIMMETRIA DEL PESO (IN GRADI)								
DISLOCAZ.ANGOLARE	0	30°	60°	90°	120°	135°	>135°	
FATTORE	1.00	0.90	0.81	0.71	0.62	0.57	0.00	

(E) - GIUDIZIO SULLA PRESA DEL CARICO		
GIUDIZIO	BUONO	SCARSO
FATTORE	1.00	0.90

(F) - FREQUENZA DEI GESTI (N. ATTI AL MINUTO) IN RELAZIONE ALLA DURATA								
FREQUENZA	0.20	1	4	6	9	12	>15	
CONTINUO (1ora)	1.00	0.94	0.84	0.75	0.52	0.37	0.00	
CONTINUO (1-2 ore)	0.95	0.88	0.72	0.50	0.30	0.21	0.00	
CONTINUO (2-8 ore)	0.85	0.75	0.45	0.27	0.15	0.00	0.00	

Tabella 2.1. Tabella coefficienti del calcolo del peso limite raccomandato

Normalmente l'indice si divide in tre fasce:

- verde: < 0.75 attività a basso rischio residuo,
- gialla: 1 presenza di rischio debole da tenere sotto controllo,
- rossa: > 1 rischio richiedente intervento

Analogamente si effettua il calcolo per le attività di spinta, traino e trasporto, attraverso l'utilizzo di altre tabelle dove si riesce a ricavare il fattore di riferimento in base a quote di movimentazione, peso e frequenza dell'operazione. Ovviamente questi risultati vanno poi adattati secondo i dati antropometrici di sesso, età e peso relativi agli operatori.

Il risultato sarà sempre ridotto ad un fattore di rischio che suddivide il pericolo in tre zone evidenziano le operazioni senza rischi (verde), quelle dove sarebbe meglio rivedere qualcosa (giallo) e quelle molto rischiose da evitare e modificare radicalmente (rosso).

Nel caso studiato abbiamo utilizzato un programma di studio ergonomico, Jack, che presenta già uno strumento per la valutazione del NIOSH. Soprattutto ci consente una valutazione più corretta delle posture poiché già implementate nelle librerie. Tuttavia, come evidenziato meglio nel paragrafo successivo, attraverso le animazioni ci si è resi conto della difficoltà nel gestire il vincolo di messa a terra del manichino. Per questo si è deciso di replicare l'analisi con il modulo Delmia di Catia per avere un riscontro fra i due risultati.

Anche Delmia ha uno strumento per l'analisi del NIOSH per operazioni elementari, in grado quindi di analizzare le posizioni di partenza e di arrivo del manichino e di classificarle in base al rischio di ripetitività.

Nonostante i due programmi usino codici e linguaggi di programmazione diversi per la gestione dei gradi di libertà e abbiano librerie antropometriche di diversa derivazione, abbiamo comunque confrontato i dati poiché si trattava nel nostro caso di operazione semplici, come sollevamento e spinta. Di conseguenza ci interessava più verificare la correttezza dei risultati di massima, una volta evidenziato in Jack il non corretto mantenimento del vincolo a terra, che non giungere ad un confronto diretto fra le prestazioni e le proprietà dei singoli programmi.

Poiché nel nostro caso ci troviamo di fronte ad operazioni che non hanno un'elevata frequenza, anzi spesso sono operazioni con un unico sforzo, non si possono utilizzare la formula e le tabelle del

NIOSH direttamente. Per ovviare a questo problema il programma Jack offre delle applicazioni, sviluppate sulla base di database creati da analisi effettuate con il metodo del NIOSH, che consentono di analizzare la postura e l'andamento degli sforzi nel tempo.

2.3.1 Low Back Analysis

La Low Back Compression Analysis è uno strumento di analisi che consente di valutare le forze che agiscono sulla parte bassa della schiena di un essere umano, in qualsiasi postura e condizione di carico. Possiamo quindi determinare in tempo reale, grazie alle animazioni, quali sono le condizioni che superano i limiti posti dalle linee guida del NIOSH.

Quest'applicazione fornisce uno strumento di analisi che utilizza un complesso modello biomeccanico che incorpora i più recenti dati anatomici e fisiologici per le forze di compressione che si riflettono sui dischi lombari della colonna vertebrale L4/L5.

Il modello indica:

- forze di taglio e compressione a livello dei dischi lombari L4/L5 vertebrale, confrontandole con i valori limite del NIOSH
- momenti di reazione spinali, sagittali e assiali su L4/L5 che rappresentano l'effetto dei pesi nella parte superiore del corpo
- livello di attività del gruppo muscolare toracico necessario per equilibrare il momento spinale.

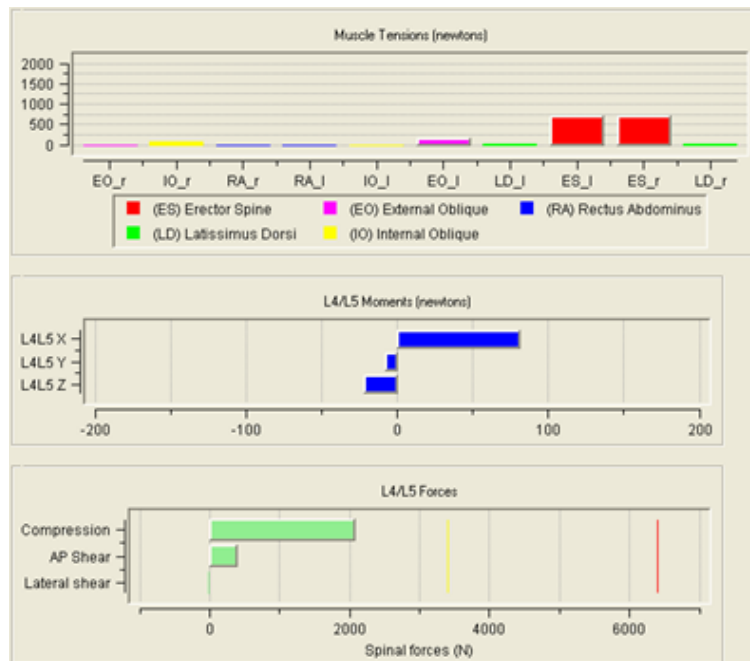


Figura 2.4. Esempio risultati LBA

In particolare si può puntare l'attenzione su un diagramma che riguarda la distribuzione del momento lungo i dischi lombari L4/L5 dove si può predire il carico del momento attraverso l'istogramma del tronco.

Qui si suddivide in sezione la colonna vertebrale, si evidenziano le regioni retto addominale, obliquo esterno, gran dorsale e degli erettori spinali e puntualmente si va a ricavare il valore del contributo del muscolo e di conseguenza si ricava il momento distribuito.¹³

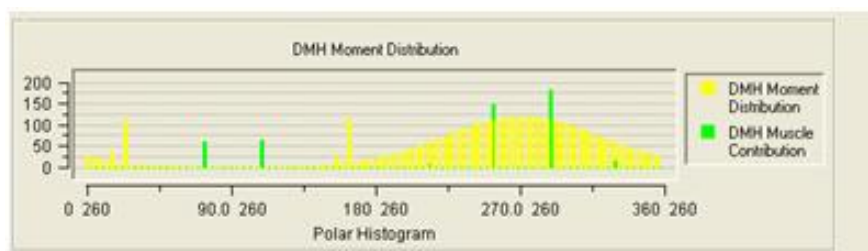


Figura 2.5. Esempio risultati dell'istogramma del momento distribuito

¹³ U. Raschke, B.J. Martin, D.B. Chaffin - J. Biomechanics - *Distributed Moment Histogram: A neurophysiology based method of agonist and antagonist trunk muscle activity prediction*. Vol 29 (12) pp. 1587-1596

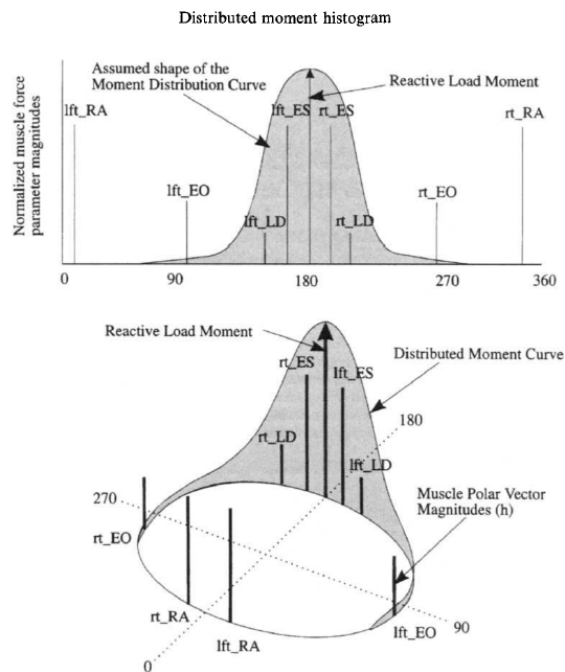
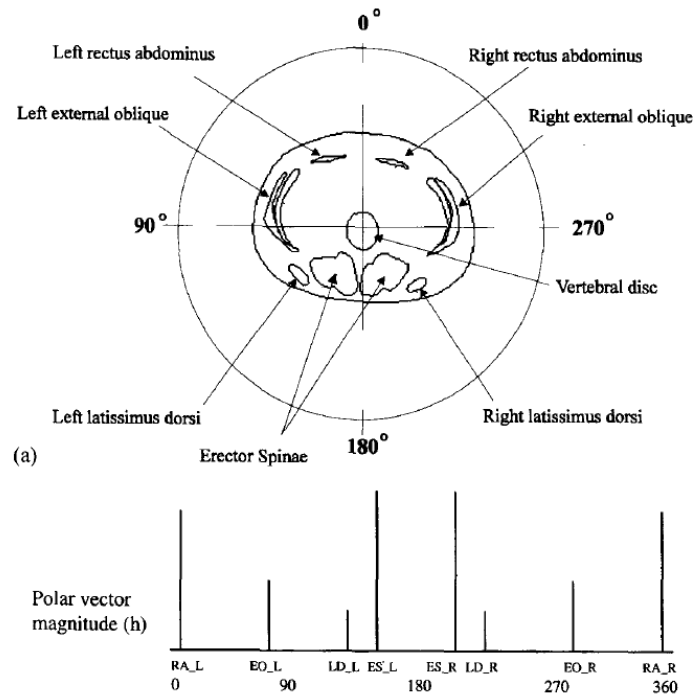


Figura 2.6. Esempio di elaborazione dell'istogramma della momento distribuito

2.3.2 Static Strength Analysis

La Static Strength Analysis è uno strumento utile per valutare la percentuale di popolazione in grado di svolgere un compito a partire da una determinata postura. Sono preimpostati i limiti delle forze a seconda del percentile di popolazione analizzato in accordo con i dati relativi al metodo del NIOSH.

Di conseguenza si analizzano le forze necessarie per effettuare un lavoro prescritto, le parti maggiormente sollecitate scomponendo i risultati fra:

- gomiti
- spalle
- tronco
- anche
- ginocchia
- caviglia

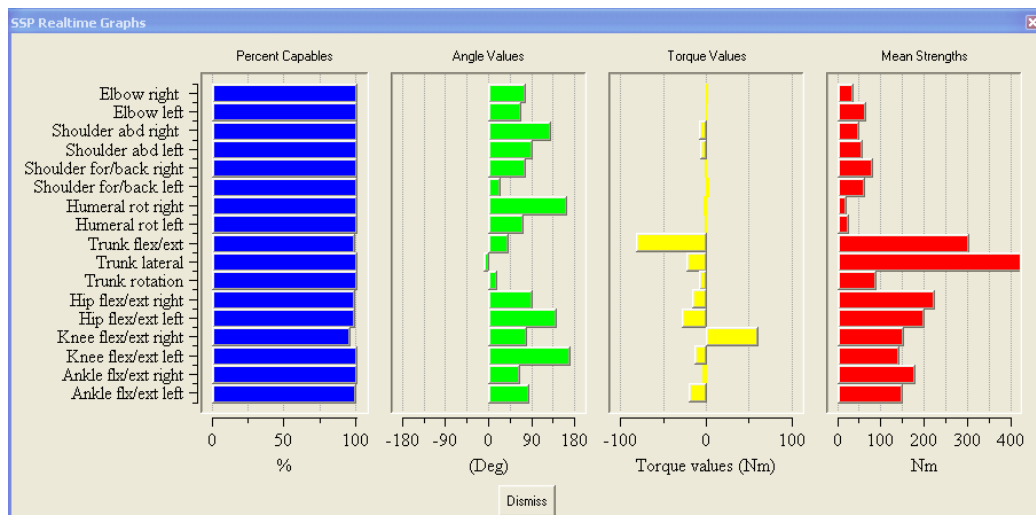


Figura 2.7. Esempio risultati SSA

Entrando più nel dettaglio si è in grado di ricavare gli angoli di rotazione i momenti e le flessioni laterali per spalle, gomiti, omeri, anche, ginocchia e caviglie.

2.3.3 Ovako Posture

Lo strumento OWAS (Ovako Working Posture Analysis System) fornisce un metodo semplice per controllare rapidamente il confort delle posture e determina l'urgenza di avviare misure correttive. Sulla base dei dati si valuta il disagio relativo ad una postura di lavoro basandosi sul posizionamento delle braccia, della schiena e delle gambe.

Il metodo assegna alla postura un punteggio che indica l'urgenza di l'adozione di misure correttive per ridurre il potenziale di rischio della postura. Il vantaggio di questo strumento è costituito dalla rapidità di risposta dei risultati. Soprattutto durante un'animazione si è in grado di capire quali movimenti danneggino maggiormente il manichino ed intervenire di conseguenza anche in fase di analisi della manovra.

Lo strumento OWAS assegna un voto per una posizione specifica e suggerisce una variazione correttiva per focalizzare meglio l'attenzione sul problema rilevato.

I voti proposti possono essere di 4 tipi:

- Livello 1: La postura è normale, senza bisogno di interventi correttivi.
- Livello 2: La postura può avere qualche effetto nocivo; non è necessaria immediata correzione, ma potrebbe essere necessario intervenire nel tempo.
- Livello 3: La postura ha un effetto nocivo; occorre attuare misure correttive il più presto possibile.
- Livello 4: La postura ha un effetto molto dannoso; le misure correttive devono essere prese immediatamente oppure è necessario cambiare postura e carico.

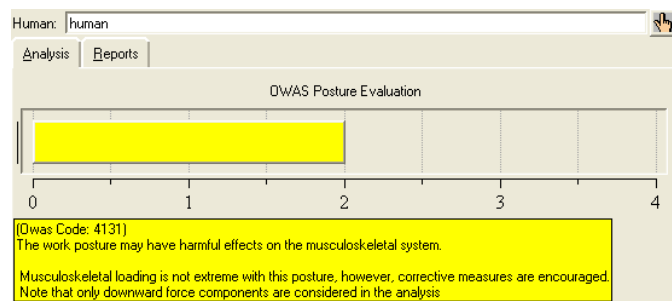


Figura 2.8. Esempio risultati OWAS

2.3.4 Rapid Upper Limb Analysis

Lo strumento Rapid Upper Limb Assessment (RULA) è utile per valutare la postura per quanto concerne il rischio di disturbi per gli arti superiori.

Valutare rapidamente un compito manuale in base alla sua capacità di esporre i lavoratori al rischio di disturbi dovuti a carichi eccessivi o al non corretta distribuzione degli stessi, in caso di carichi asimmetrici.

Lo studio è adatto sia per posture statiche sia per operazioni con alte frequenze di ripetizioni.

RULA utilizza un sistema di punteggio basato sulla postura, l'uso dei muscoli e le forze o pesi assegnati per una particolare attività. Questi punteggi sono presentati in una finestra di dialogo, insieme con il livello d'allarme che scaturisce dal confronto con i dati del metodo del NIOSH.

I livelli d'allarme possibili sono:

- Livello 1: postura accettabile se non mantenuta o ripetuta per lunghi periodi
- Livello 2: necessarie ulteriori indagini ad altri livelli, possono esser richieste modifiche
- Livello 3: si richiedono modifiche al più presto
- Livello 4: sono necessarie immediate modifiche

The screenshot shows the 'Rapid Upper Limb Assessment (RULA)' software interface. It has three tabs: 'Task Entry', 'Reports', and 'Analysis Summary'. The 'Analysis Summary' tab is active, displaying the following data:

Category	Item	Value
Job Information	Job Title:	
	Location:	
	Comments:	
	Job Number:	
Analyst Information	Analyst:	
	Date:	
Body Group A Posture Rating	Upper arm:	4
	Lower arm:	2
	Wrist:	3
	Wrist Twist:	1
	Total:	4
Muscle Use (A)	Muscle Use:	Normal, no extreme use
	Force/Load:	< 2 kg intermittent load
	Arms:	Supported
Body Group B Posture Rating	Neck:	3
	Trunk:	3
	Total:	4
Muscle Use (B)	Muscle Use:	Normal, no extreme use
	Force/Load:	< 2 kg intermittent load
Legs and Feet Rating	Rating:	Standing, weight even. Room for weight changes.
Grand Score	Grand Score:	4
	Action:	Further investigation needed. Changes may be required.

At the bottom of the window, there is an 'Update Analysis' button and 'Usage' and 'Dismiss' buttons.

Figura 2.9. Esempio risultati RULA

2.4 Verifica dell'installazione del castello

Come già accennato la problematica del posizionamento del castello è una delle più rischiose e una delle operazioni che merita la massima attenzione soprattutto se si considera un operatore inesperto.

In questa fase proponiamo solo la verifica dell'installazione. Non ci siamo preoccupati di entrare nel dettaglio per riprogettare le fasi di assemblaggio ma abbiamo operato considerando le dimensioni e le quote del prototipo e tutti i suoi vincoli di progettazione derivanti dalle normative.

Ovvero considerando il sottoassieme montato a banco, si cerca di capire se e quanti operatori possano servire per portare a termine la manovra.

2.4.1 Le problematiche della manovra

Per poter effettuare la simulazione abbiamo deciso di importare il modello CAD del sottoassieme interessato, calcolando peso e distribuzione del baricentro.

Abbiamo deciso di fare alcune ipotesi semplificative per la manovra e per il modello utilizzato:

- il modello di partenza è stato molto alleggerito da componenti irrilevanti dal punto di vista degli ingombri, poiché rendevano difficile l'elaborazione dell'animazione, ma si è utilizzata comunque la parte essenziale della struttura per controllare altezza di installazione e impugnatura;
- la simulazione riguarda un sollevamento da terra del sottoassieme, anche se ci sarebbe la possibilità di un'altezza di partenza differente dovuta al montaggio a banco, ci siamo voluti tutelare ponendoci nel caso più estremo e verificando le risposte dell'intero movimento;
- l'analisi dell'impugnatura è stata effettuata in maniera distinta dall'analisi con animazione dell'operazione per alleggerire i vincoli sulle mani in fase di animazione.

2.4.2 La simulazione con Jack

Quindi abbiamo implementato un'animazione del movimento da far fare al manichino, definendo una postura di partenza e una postura finale, replicando nella tabella del NIOSH le informazioni utili.

Poiché Jack predispone i vincoli interni del manichino in base alle posture di partenza abbiamo dovuto ricercare fra le librerie le posture più appropriate per la nostra operazione. La posizione di partenza è stata selezionata come uno *squat*, classica posizione di inizio sollevamento per carichi pesanti.

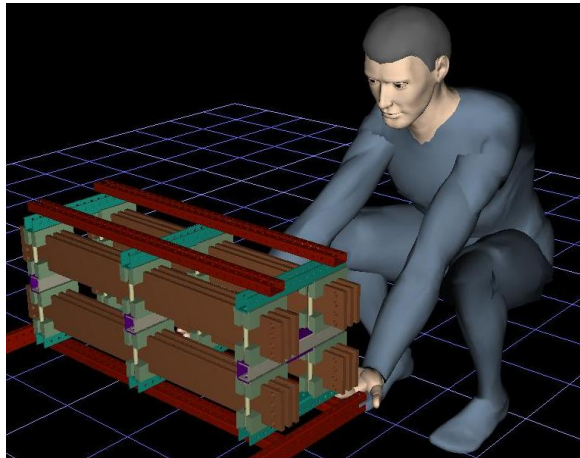


Figura 2.10. *Postura squat*

La postura come si può notare è stata corretta solo sul verso di impugnatura delle braccia, aspetto questo non indifferente nel calcolo del NIOSH, passando da una posizione di abduzione ad una di adduzione per i muscoli delle spalle. La comodità dell'impugnatura e il verso delle braccia e delle spalle che accompagnano il movimento influenzano i gradi di libertà fra spalla e colonna vertebrale e le relative sollecitazioni che vengono scaricate sul resto del corpo.

Per l'impugnatura abbiamo anche effettuato delle prove di presa per capire se il sostegno del telaio potesse risultare sufficiente per il carico applicato. Alla fine abbiamo optato per una postura di massimo carico con palmo aperto e abbiamo distribuito il carico su entrambe le mani ponendo un carico di 30 kg su ogni mano.

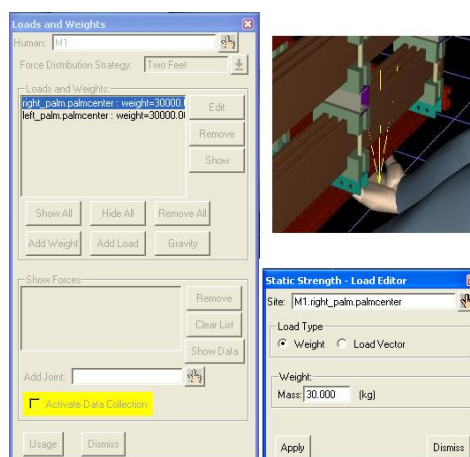


Figura 2.11. *Carico mano*

Abbiamo quindi testato la reazione del manichino una volta impostato il carico con la postura di partenza. Ci siamo accorti subito che l'influenza del carico era notevole per quanto riguarda gli sforzi su spalle e colonna vertebrale mentre era meno rilevante, nonostante il vincolo di contatto con il suolo, per le gambe.

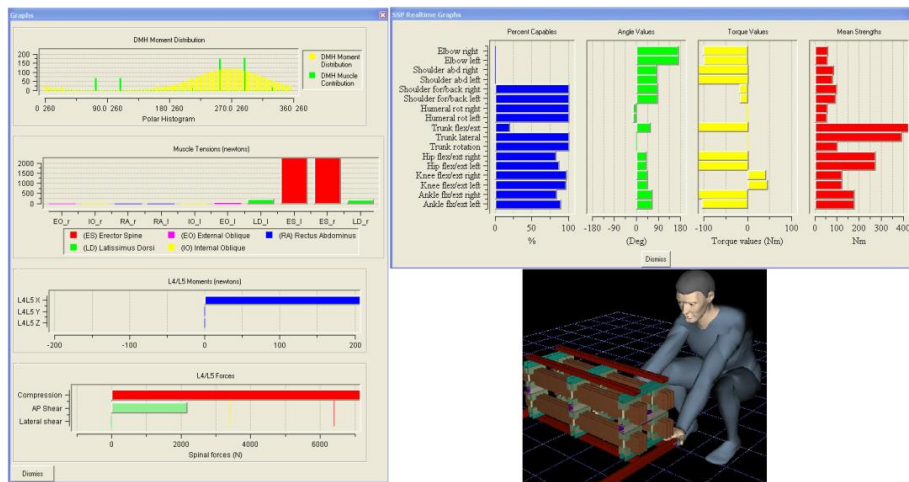


Figura 2.12. Risultati SSP e LBA per squat

Anche impostando successivamente la postura finale si è riscontrato lo stesso problema. Dall'animazione abbiamo capito che nella transizione fra le due postture il manichino non eseguiva dei movimenti fluidi ma reimpostava i gradi di libertà fra le due postture, passando dalla posizione iniziale alla finale, attraverso una posizione di relax dove azzerava ogni grado di libertà. Per ovviare a questo problema e rendere la simulazione più realistica, abbiamo dovuto interporre, in questo caso come in tutte le altre simulazioni, delle postture intermedie per rendere il movimento realistico e risultati veritieri. Nonostante la ridefinizione del modello di animazione attraverso l'uso di posizioni intermedie i risultati sono molto critici riguardo al rischio di questa operazione.

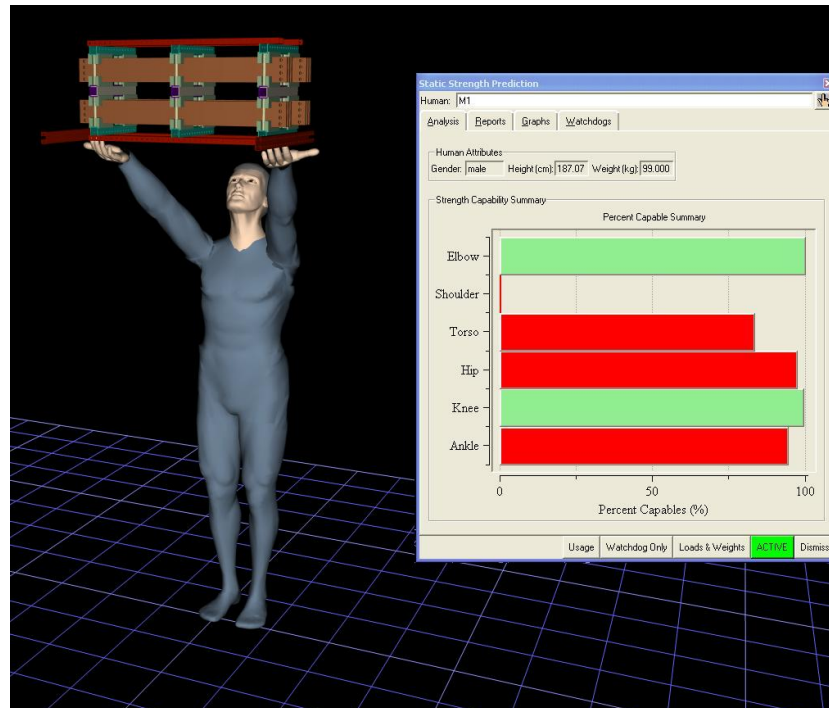


Figura 2.13. Risultati postura alta SSP

Sebbene non sia un'operazione con elevata ripetitività, avendo considerato l'operazione come un sollevamento isolato, il rischio principale è generato dal carico eccessivo.

2.4.3 La simulazione con Delmia

La simulazione con Jack, comunque, evidenziava problemi per la perdita del vincolo a terra del manichino e per confrontare i dati ottenuti abbiamo deciso di replicare la simulazione anche usando Catia e il manichino Delmia.

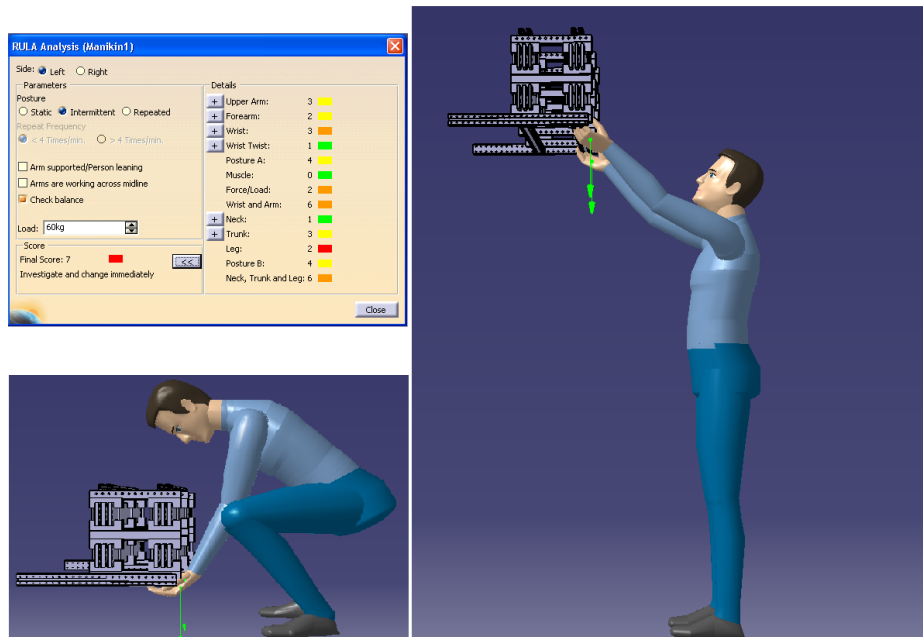


Figura 2.14. Posture e analisi RULA con carico

Come per il precedente programma, anche in questo caso avevamo un modello di simulazione prestabilito per l'analisi del sollevamento secondo le tabelle del metodo del NIOSH. Ovviamente si dovevano ricercare delle posizioni di arrivo e partenza simili a quelle reali e applicare un carico pari a quello utilizzato in Jack. Anche l'analisi effettuata con Delmia ha dato risultato negativo, individuando questa volta anche un carico limite in base alla sequenza di operazioni scelte, pari alla metà del carico utilizzato.

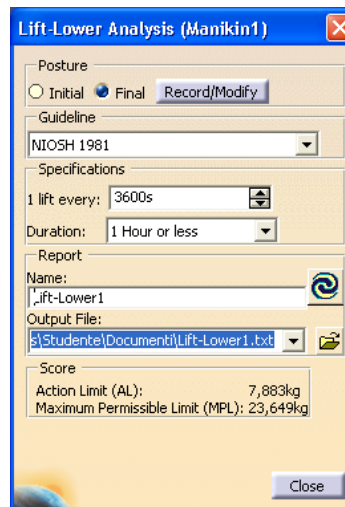


Figura 2.15. Risultati NIOSH

2.4.4 Risultati e soluzioni

Da queste simulazioni quindi si può dedurre che ci troviamo di fronte ad un'operazione comunque rischiosa per la salute dell'operatore. Nella simulazione ci siamo messi nelle condizioni operative peggiori facendo partire l'operazione di sollevamento direttamente da terra. Tuttavia seguendo l'animazione si capisce che anche montandola a banco il risultato non cambia poiché lo sforzo principale non è dovuto tanto alla postura di partenza quanto al carico elevato.

Di conseguenza qualora questa operazione dovesse essere effettuata in loco sarebbe consigliabile l'utilizzo di un muletto o di altro mezzo di movimentazione. Al massimo occorrerebbe utilizzare due operatori per il sollevamento e un terzo per il fissaggio del castello sul telaio principale. L'operazione di fissaggio, inoltre, dovrebbe essere di breve durata, in quanto anche lo sforzo statico degli operatori ne risentirebbe.

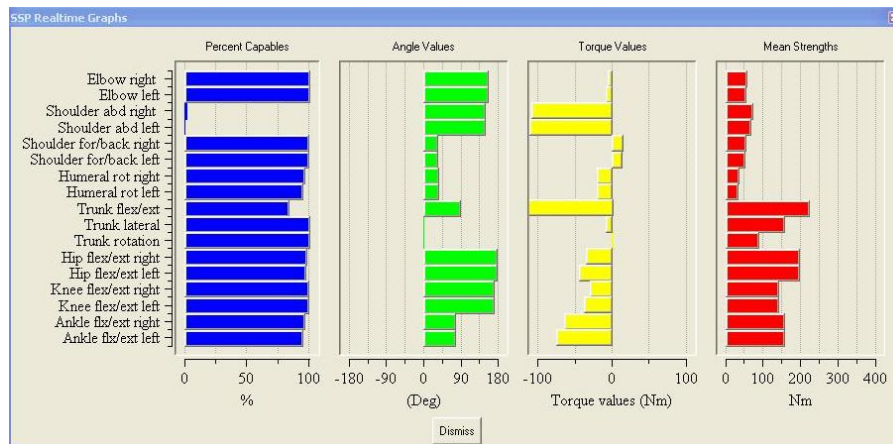


Figura 2.16. Risultato statico per l'installazione del castello

2.5 Movimentazione della colonna

L'altra operazione su cui ci siamo fermati, è stata quella riguardante la movimentazione orizzontale della colonna. Solitamente, infatti, il comparto del castello va accostato alla colonna con le derivazioni. Le due parti sono costituite da due telai distinti che vanno poi accostati in modo da permettere alle 4 fasi del castello di agganciarsi tramite una giunzione. Inoltre, come già accennato precedentemente, spesso questi quadri elettrici sono montati in serie, per cui più modelli devono essere affiancati e devono essere connessi fra loro sullo stesso livello. Quindi è evidente che su questo prototipo che si assembla in versione modulare riveste un ruolo fondamentale la movimentazione orizzontale.

2.5.1 Le problematiche della manovra

La simulazione va ad analizzare la manovra del singolo operatore di movimentare la colonna in orizzontale, spingendo e accostando i modelli fra loro.

Anche qui per affrontare la simulazione con Jack abbiamo dovuto fare delle approssimazioni:

- il peso della colonna è stato determinato in maniera qualitativa 1000 N;
- si è trascurato qualsiasi modello di attrito anche perché non implementato nel programma;
- si è tenuto conto della sola movimentazione che porta ad accostare le due colonne valutandola dell'ordine di 30 cm;
- si è valutata la struttura completa di pannelli in modo da poter permettere il corretto posizionamento dei palmi del manichino.

2.5.2 La simulazione con Jack

In Jack per la decisione della postura siamo intervenuti correggendo la posizione di trasporto di carico pesante. Correggendo la postura di partenza, orientando le braccia per effettuare la spinta, abbiamo posizionato le braccia orizzontalmente e impresso un cinematismo alle gambe per simulare la camminata. Nelle impostazioni del cinematismo abbiamo soppresso qualsiasi collegamento fra il movimento degli arti inferiori e svincolando l'andamento della colonna vertebrale e delle spalle.

Dovendo caricare il manichino con delle forze passive, si è poi suddiviso il carico di 1000N in due forze agenti contemporaneamente al centro delle mani.

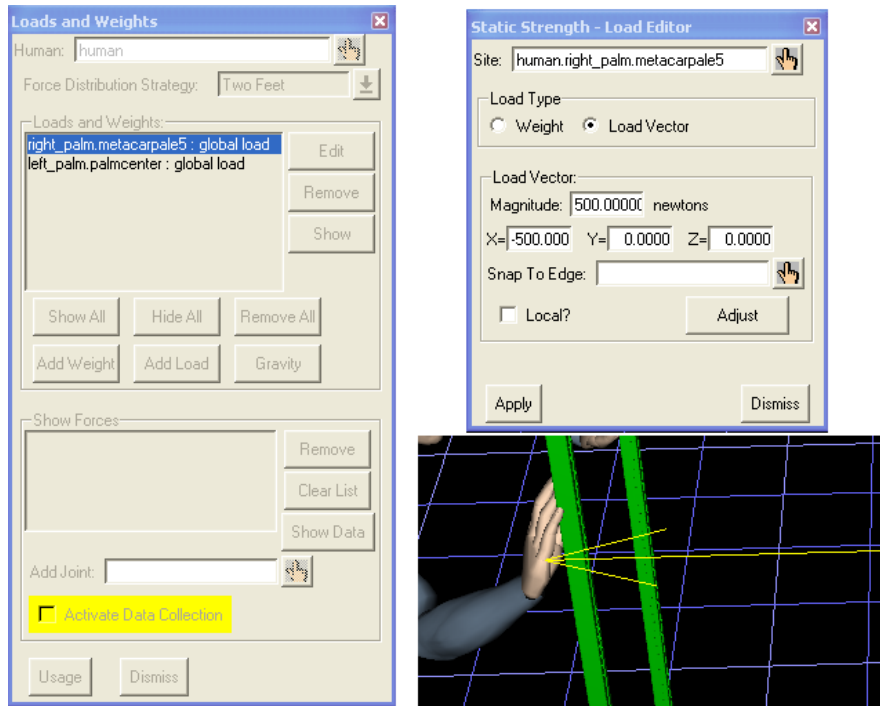


Figura 2.17. Forza scambiata sulle mani

Una volta creata l'animazione si è potuto notare che la postura soffriva particolarmente il carico eccessivo durante la camminata soprattutto per le braccia, le spalle e colonna vertebrale. Anche in questo caso però, come nel precedente, perdeva senso il contributo degli arti inferiori.

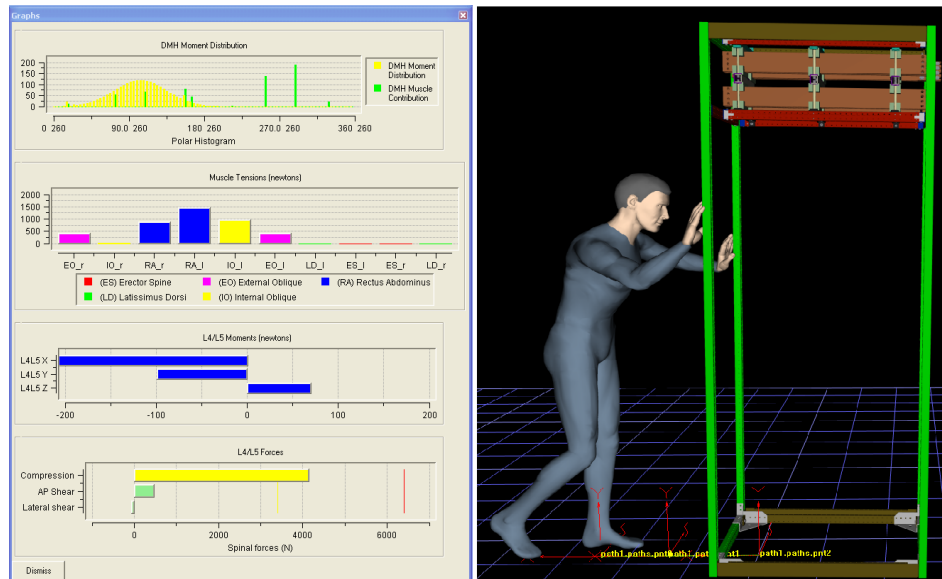


Figura 2.18. Risultati LBA

Essi rimanevano fedeli al percorso definito dalla traiettoria di avvicinamento della colonna, ma, avendo svincolato nel cinematismo della camminata il contributo delle gambe da quello della colonna vertebrale, i risultati non erano molto pertinenti a quello che avviene nella realtà. Per movimentare la colonna, infatti, è necessario far agire una forza su di essa. Nel caso del manichino, è ovvio che per imporre tale forza la reazione debba esser scaricata sulle gambe durante il percorso cosa che non avviene una volta impostato il movimento.

2.5.3 La simulazione con Delmia

Come nel caso precedente abbiamo utilizzato Catia e il modulo Delmia per verificare la bontà dei risultati raggiunti.

Per simulare lo spostamento secondo i criteri del metodo del NIOSH è stato così sufficiente scegliere la postura corretta per l'azione e per la forza che andava esercitata, applicandola uguale e contraria al centro delle mani.

Effettuando una prima analisi statica si è già intuito che il carico era eccessivo e metteva in crisi la postura per la colonna vertebrale e le gambe. In questo metodo infatti il manichino è sempre considerato

a terra quindi le gambe scambiano reazioni e il loro contributo è effettivo per calcolare lo sforzo di tutti gli altri gradi di libertà.

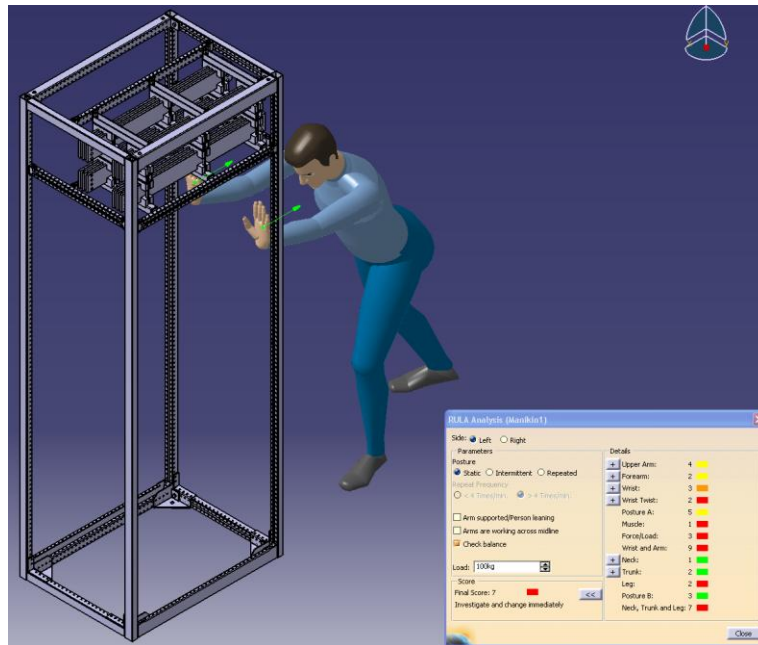


Figura 2.19. Risultati forza sui palmi e RULA

Per poter dare senso dinamico alla simulazione è stato sufficiente impostare lo schema del NIOSH per la movimentazione settando i parametri base per ripetitività (10p/h) e distanza minima da percorrere (2m) per ottenere risultati del tutto simili all'analisi effettuata con Jack.

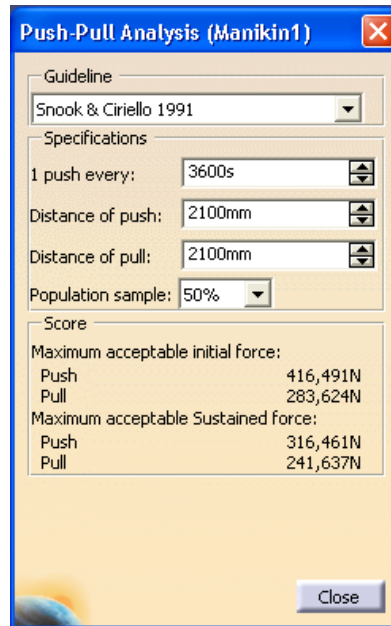


Figura 2.20. Risultati Push/Pull

2.5.4 Risultati e soluzioni

In valore assoluto infatti lo stress fisico del manichino rimane troppo elevato: spalle, braccia e colonna vertebrale accusano livelli di sforzo troppo alti e anche le gambe ne risultano affaticate.

Risulta pertanto evidente che per riuscire ad accostare le due parti bisogna utilizzare due operatori o dei carrelli che consentano la movimentazione.

Capitolo 3

Il problema della giunzione: analisi e riprogettazione

In questo capitolo tratteremo un altro problema affrontato sotto l'aspetto ergonomico: la realizzazione della giunzione fra colonna e castello.

Qui ci siamo trovati di fronte ad un problema differente rispetto a quelli trattati nel Capito 2. Prima dovevamo solo verificare la realizzazione di alcune manovre, adesso ci si occupa di un problema specifico: la giunzione. L'analisi ergonomica qui ha lo scopo di far emergere le problematiche del componente, della realizzazione della sua funzione, e di proporre eventuali soluzione alternative, nel rispetto dei vincoli di progettazione.

Poiché le problematiche di riprogettazione sono molto articolate e coinvolgono diversi ambiti di studio, da quello elettromagnetico a quello strutturale, abbiamo preferito concentrare la nostra attenzione su alcuni aspetti:

- la funzione che andavamo ad analizzare;
- i vincoli di cui si doveva tener conto;
- la soluzione che in partenza viene adottata da Skema Spa, nel rispetto delle normative in termini di sicurezza e funzione del prodotto.

Come conseguenza di tali riflessioni, abbiamo effettuato le simulazioni suddividendo lo studio in due problematiche: la connessione fra le fasi del castello e le derivazioni della colonna; il fissaggio delle componenti alle fasi tramite imbullonatura.

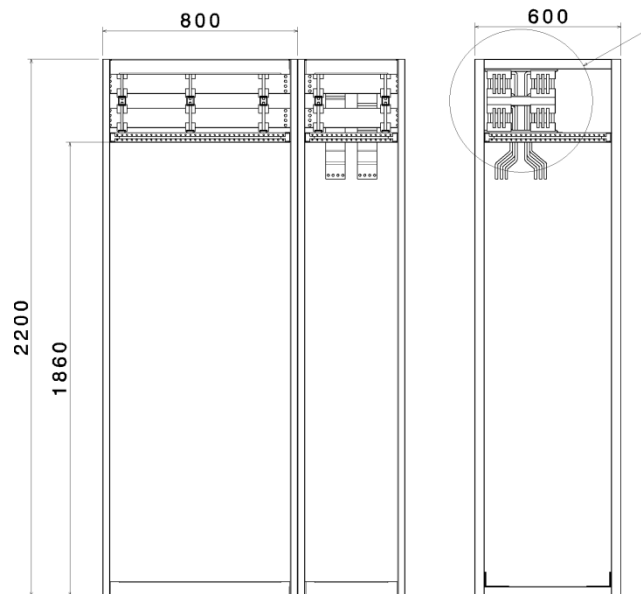


Figura 3.1. *Giunzione fra castello e colonna*

Grazie alle simulazioni siamo stati in grado di capire quali fossero i punti da correggere e su quali si poteva intervenire, offrendo delle soluzioni alternative. Da tutte le varianti, elaborate sulla base dei risultati ottenuti, è emersa la soluzione migliore aiutandoci per la validazione con l'utilizzo dei manichini.

3.1 Analisi della giunzione: scopo e vincoli

Per realizzare la giunzione fra i due sottoassiemi, della *colonna* e del *castello*, si fa riferimento alle quattro fasi. Queste, prima di avere una funzione strutturale, hanno il vincolo fondamentale di dover trasmettere la corrente elettrica. Trattandosi di un problema di trasmissione di corrente elettrica occorre tener presenti alcuni vincoli derivanti dalle leggi fondamentali dell'elettromagnetismo:

- Le quattro fasi vanno sempre tenute separate fra di loro;

- la distanza fra di esse non può esser variata in quanto predisposte secondo le normative in modo tale da minimizzare gli effetti delle forze elettromagnetiche generate dal passaggio di corrente (vedi Fig. 3.2);
- la singola fase è composta da tre barre, poste a distanza fissata, 10mm secondo normative, le quali devono trasferire una sola volta la corrente alle derivazioni per evitare corto circuito.

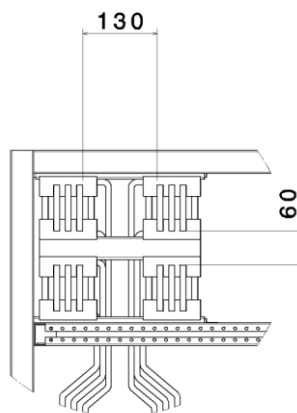


Figura 3.2. Dettaglio quote: distanze fra le fasi

La giunzione deve avere delle caratteristiche specifiche per quanto riguarda il caso in esame, poiché si tratta di un modello componibile. Di conseguenza deve avere i seguenti vincoli:

- consentire alle due parti di esser montate in maniera indipendente;
- permettere il passaggio di corrente nel rispetto delle leggi fondamentali dell'elettromagnetismo;
- essere struttura in modo tale da consentire la fase di installazione da parte dell'operatore;
- essere situata in una posizione raggiungibile, di facile ispezione e che consenta la fase di inserimento e fissaggio delle viti.

Siamo partiti da una configurazione derivante dai normali modelli forniti da Skema S.p.a.. La soluzione prevedeva l'utilizzo di *fazzoletti*, fogli di rame delle stesse dimensioni delle barre, che nei modelli standard vengono inseriti in fase di montaggio fra il due sottoassiemi e fissati tramite delle viti sulle fasi.

Evidentemente questa operazione effettuata in officina, con manodopera esperta, presenta il vantaggio di avere pochi problemi e operando in ambiente industriale si hanno a disposizione diversi supporti tecnici e utensili versatili in grado di sopperire a difficoltà di montaggio.

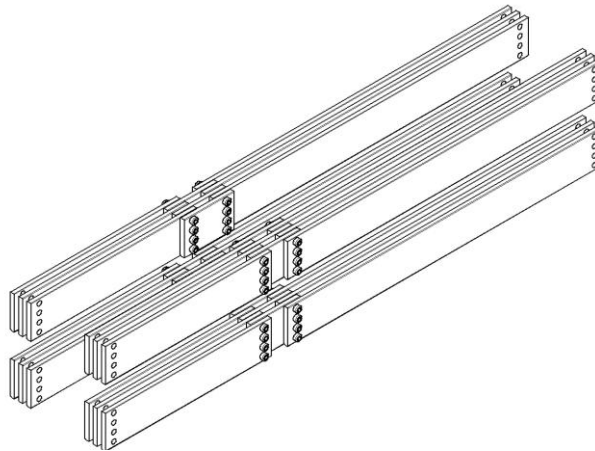


Figura 3.3. Fasi con giunzione standard

Per effettuare le nostre simulazioni invece ci siamo posti nelle condizioni peggiori, ipotizzando una manodopera dalla scarsa esperienza nel settore specifico, materiali di supporto ed utensili ridotti al minimo (scale, blocchi di supporto e utensili di normale uso industriale) per facilitare la costituzione di un kit d'assemblaggio da fornire insieme con il prodotto finale.

Tali limitazioni si sono rivelate essenziali nelle simulazioni che riportiamo di seguito in quanto, oltre la normale analisi ergonomica sulle posture e sui rischi degli sforzi agenti corpo umano, abbiamo lavorato maggiormente sulle aree di manovra. Ci siamo occupati di problemi inerenti l'interferenza fra manichino e struttura del modello per evidenziare le limitazioni dello spazio di lavoro, che compromettono il buon esito delle operazioni.

Proprio per analizzare lo spazio di lavoro è stato anche fondamentale testare per queste operazioni il campo visivo e il controllo che esso garantisce all'operatore. Le operazioni alla cieca, trattando il caso di manodopera con scarsa esperienza, possono

essere un problema non trascurabile o difficile soluzione. Non si riesce ad avere un parametro di controllo oggettivo ma si può fare affidamento su strumenti disponibili in *Jack* come il cono di vista e la visuale del manichino.

3.2 Funzione di collegamento tra castello e colonna

La realizzazione del collegamento tra *castello* e *colonna* avviene tramite dei *fazzoletti* posti tra le fasi e le derivazioni. Tale soluzione è derivata dai modelli standard prodotti da Skema Spa. Di seguito si riporta l'analisi di questa funzione e la riprogettazione del componente per consentire la riuscita del collegamento.

3.2.1 Le problematiche dell'assemblaggio

In fase di assemblaggio tale funzione deve garantire la sicurezza del collegamento delle fasi e l'eventuale sostituzione delle parti. Data la geometria della singola fase e i vincoli dovuti alle legge dell'elettromagnetismo era scontato ricadere in un soluzione che prevedesse dei *fazzoletti* dimensionalmente compatibili con lo spazio di 10 mm lasciato fra le barre delle fasi.

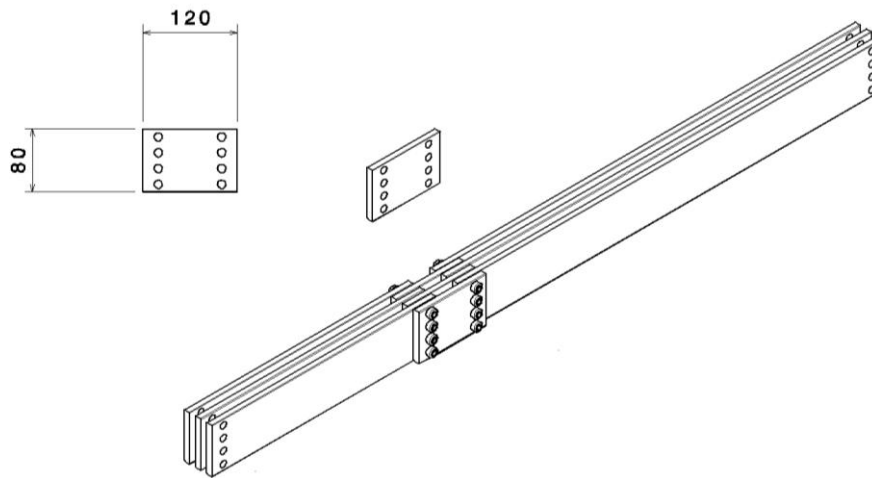


Figura 3.4. Dettaglio fazzoletto giunzione standard

Dal punto di vista del ciclo tecnologico, i *fazzoletti* vengono realizzati tranciando dalla barra principale la porzione interessata, poi vengono realizzati i fori per il passaggio delle viti e infine si smussano i contorni per facilitare l'operazione di inserimento dei fazzoletti fra le fasi.

Normalmente l'inserimento è fatto manualmente sfruttando il gioco di 1 mm lasciato nominalmente fra le barre. Ma l'operazione di solito viene eseguita in officina in sequenza, partendo dalle fasi inferiori senza la presenza di ulteriori ingombri. Nel nostro caso invece ci troviamo ad aver già assemblati ed installati i due sottoassieme *colonna* e *castello*, quindi la difficoltà sta nell'inserimento delle componenti con lo spazio rimasto libero.

3.2.2 La simulazione con Jack

Nella simulazione abbiamo impostato prima di tutto le due vie d'accesso classiche per questa operazione: dall'alto e frontale. Da una prima valutazione è risultato subito evidente scartare l'accesso dall'alto perché la fase critica veniva coperta e l'inserimento era impraticabile.

Ragionando invece sull'inserimento frontale, abbiamo posizionato un blocco di sostegno per permettere al manichino di assumere una postura di controllo corretta rispetto all'area della manovra, partendo

dal braccio destro completamente disteso. Si è scelta un'altezza di 55 cm che ci consentiva con un manichino fissato sul 50° percentile di avere un buono spazio di manovra. L'operazione in questo caso viene effettuata come se fosse un'operazione di ricerca in alto.

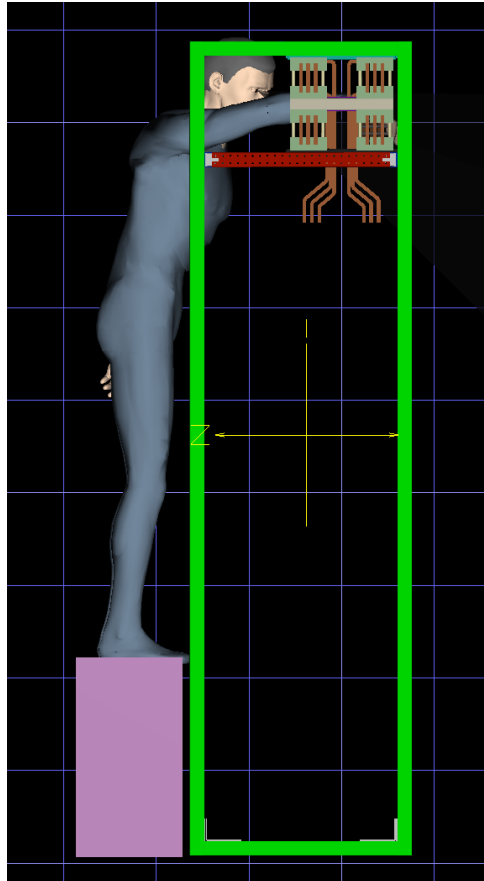


Figura 3.5. Schema postura e condizioni operative manichino

A questo punto abbiamo valutato l'impugnatura del *fazzoletto*. Tenendo conto del movimento che si doveva compiere, inserimento dall'alto, e dell'oggetto, una piastra, abbiamo modificato la presa rendendola congrua con il componente, vincolandolo al centro delle dita. Abbiamo preferito questo tipo di vincolo poiché non potevamo sopprimere i gradi di libertà del fazzoletto ma dovevamo consentire che lo stesso assecondasse i movimenti della mano nell'inserimento.

La mano così è libera di eseguire il movimento trascinando dietro il componente. Per visualizzare meglio i problemi di ingombro

abbiamo utilizzato una funzione che permette di evidenziare tutte le collisioni fra il *fazzoletto* e il resto del modello.

Combinando tutti i movimenti della spalla e del braccio è evidente che non si riesce ad inserire il pezzo. Il problema centrale è di tipo dimensionale. La luce fra le fasi superiori ed inferiori è minore rispetto a quella che servirebbe al pezzo per entrare anche attraverso una piccola rotazione iniziale della mano.

Inoltre anche potendo inserire orizzontalmente il pezzo non si riesce ad effettuare l'inserimento e la rotazione contemporaneamente poiché il gioco fra le barre di una fase è di 1 mm, troppo poco per permettere l'inserimento.

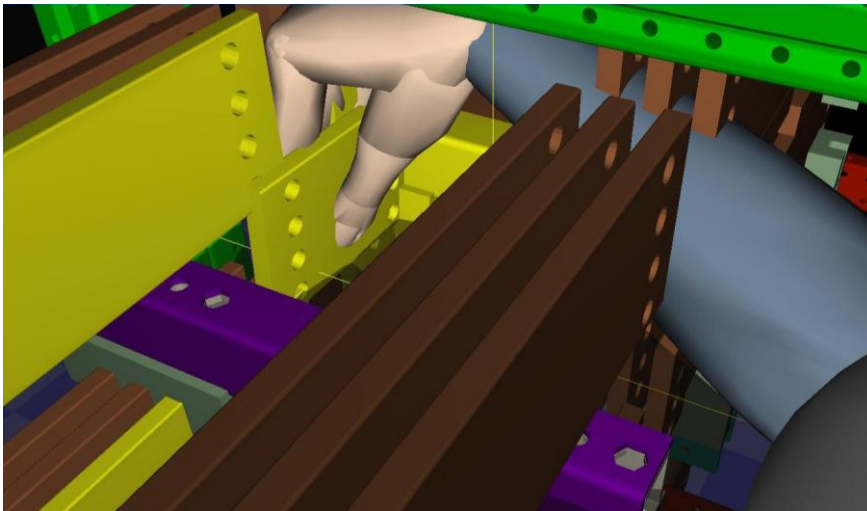


Figura 3.6. Simulazione inserimento fazzoletto

3.2.3 Risultati e progettazione delle alternative

Dalle analisi effettuate è emersa: una difficoltà dimensionale nel gestire il componente e un limitato spazio di manovra per il braccio del manichino.

Per riprogettare i componenti siamo intervenuti su due fattori.

A livello dimensionale abbiamo provato a cambiare la geometria del componente. Non potendo intervenire sul profilo o sullo spessore, per ovvie ragioni di accoppiamento con gli spazi lasciati fra le fasi,

abbiamo pensato di dividere in orizzontale il *fazzoletto* in due componenti. Il pezzo era costituito da una piastra con 4 fori per lato, suddividendolo in due si creavano due *fazzoletti* che garantivano maggiore possibilità di manovra soprattutto per la rotazione e l'inserimento.

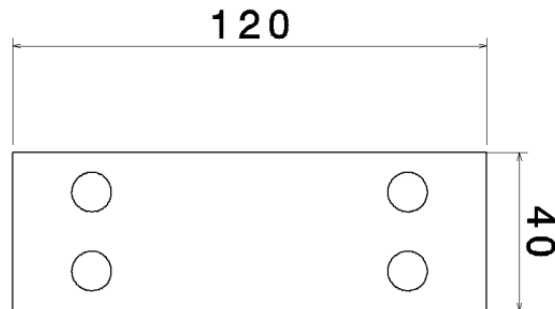


Figura 3.7. Soluzione *fazzoletti piccoli*

Abbiamo subito capito che nell'andare a testare questa soluzione con il manichino bisognava avere un grande controllo visivo sull'operazione, poiché sicuramente dimezzando le dimensioni doveva aumentare la precisione e il controllo da parte dell'operatore.

Andando ad intervenire sull'altro fattore, abbiamo cercato di compattare la soluzione ad uno dei sottoassiemi. Per fare ciò abbiamo realizzato un modello di *fazzoletto* con delle asole sul lato del castello. Così facendo è possibile che la giunzione venga fissata prima su di un lato, realizzando anche la funzione del centraggio, e poi accostando l'altra componente si rende possibile la giunzione fra le due parti, come già verificato precedentemente.

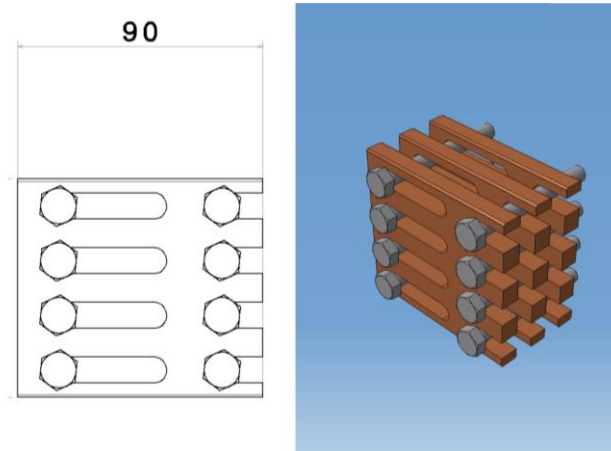


Figura 3.8. Soluzione con le asole

La soluzione con le asole inoltre consente di non inserire i fazzoletti successivamente, di non aumentare il numero di pezzi, aumentando il rischio di dispersione, e permette di facilitare la manovra di inserimento nelle derivazioni. Una volta accostate le componenti e allentate le viti lo scorrimento permette l'inserimento delle giunzioni nel lato colonna.

La valutazione dei cono di vista in questo caso consente di avere poco margine per controllare l'operazione. Poiché le operazioni principali di centraggio vengono effettuate preliminarmente, il controllo visivo serve solo a verificare lo scorrimento del pezzo fino al termine del profilo dell'asola.

3.2.4 Verifica della soluzione finale

Verificando le soluzioni trovate tramite le simulazioni spesso però non si può tener conto dei limiti tecnologici di alcune soluzioni.

È il caso della soluzione a *fazzoletti piccoli* che nelle simulazioni non ha riscontrato problemi di nessun tipo, a parte il limitato campo visivo. Tuttavia nella realizzazione dei *fazzoletti piccoli* insorgono dei problemi di natura tecnologia legati al ciclo produttivo. I *fazzoletti* prima tagliati dalla barra principale e poi forati presentano una lieve curvatura sul lato di afferraggio della macchina per la foratura.

La curvatura impedisce alle componenti di scorrere fra le barre creando problemi soprattutto per la fase di centraggio con i fori. Anche ripensando il ciclo tecnologico, effettuando prima la foratura, poi il taglio e la fase di smussatura dei bordi, il successivo ritiro del materiale contribuisce ugualmente all'incurvamento del pezzo. Dimezzando l'altezza, la lunghezza del pezzo diventa la dimensione dominante e risente di tutti i ritiri del materiale.

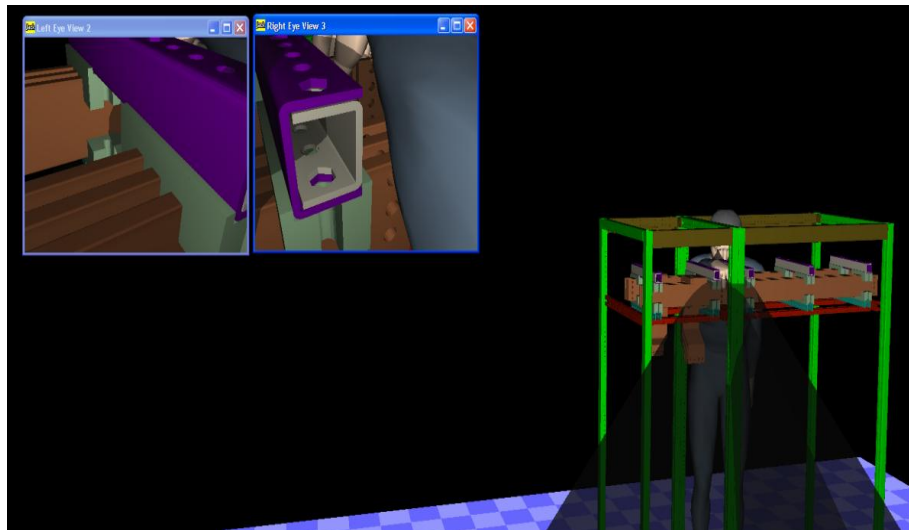


Figura 3.9. *Soluzione fazzoletti piccoli: controllo visivo*

La soluzione con le asole, al contrario non intervenendo sulle dimensioni di massima del pezzo, non risente di problemi di natura tecnologica. Anzi poiché lo sfruttamento delle asole per far scorrere i *fazzoletti* rappresenta una soluzione di facile realizzazione, ci aprirà un'altra opzione su cui lavorare anche in fase d'analisi della funzione di accoppiamento.

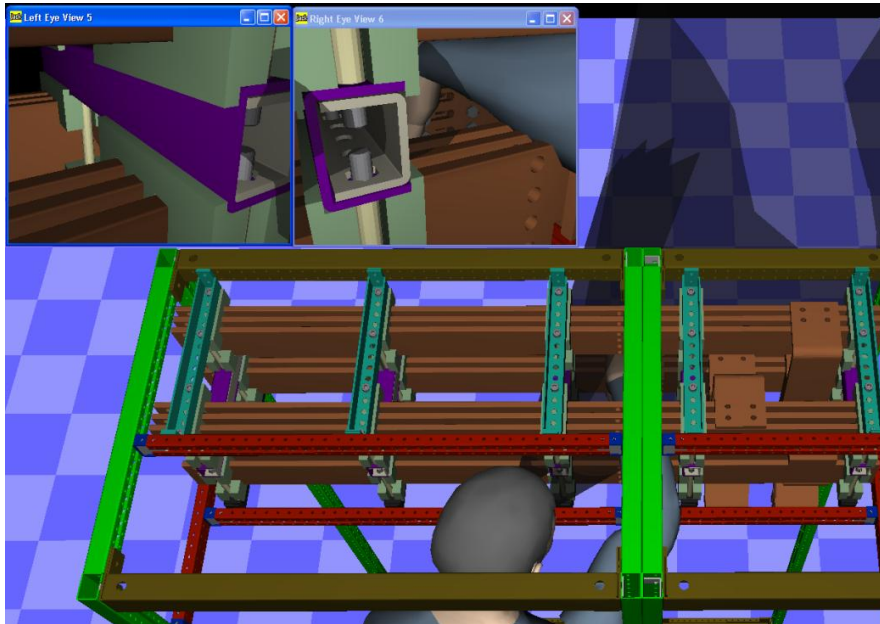


Figura 3.10. *Soluzione con le asole: controllo visivo*

Lo scorrimento, infatti, prevede uno sviluppo longitudinale del movimento e ciò rende possibile anche giocare con la lunghezza del componente, accorciando le derivazioni o le fasi del castello. Così si riesce a garantire il trasporto e il fissaggio dei sottoassiemi all'interno del telaio principale e a realizzare rapidamente la giunzione fra le componenti.

3.3 Funzione di accoppiamento per le fasi

Per accoppiare le fasi alle giunzioni nei modelli standard è utilizzato un sistema vite più dado. L'imbullonatura è costituita da 4 viti che servono ad assicurare il corretto accoppiamento secondo le dimensioni delle barre.

In questa fase analizzeremo il problema del serraggio delle viti, poiché ci si è subito accorti che lo spazio di manovra è ristretto. Di conseguenza gli ingombri influenzano sia la possibilità di introdurre utensili sia la capacità di poter esercitare il corretto serraggio fornendo la coppia adeguata.

Per gli utensili si è utilizzato un cricchetto. Nelle simulazioni, in fase preliminare, è stato utilizzato lo strumento presente nella libreria di *Jack*. Il nostro fine era quello di valutare gli ingombri e la capacità del manichino di riuscire a compiere il movimento di rotazione. Per la rotazione volendoci tutelare maggiormente abbiamo effettuato le analisi ponendo un vincolo di rotazione sull'asse del cricchetto di 10°.

Nelle fase analizzata si è tenuto conto del solo movimento compiuto dall'operatore per andare a serrare le viti, non del movimento di serrare il bullone. Il bullone, infatti, solitamente può essere fissato direttamente sui fori dell'ultima barra della fase. La fase di inserimento della vite e della rondella non creando particolare problemi e non è stata verificata.

3.3.1 I problemi: vie d'accesso e spazio d'azione

Per portare a compimento questa fase è necessario avere un ottimo spazio di manovra e una buona visuale sull'operazione.

Le vie d'accesso alla zona operativa, sia in fase di installazione sia in fase di manutenzione e sostituzione, sono essenzialmente due: una frontale dal lato dei pannelli di comando; una superiore dal retro dello scomparto.

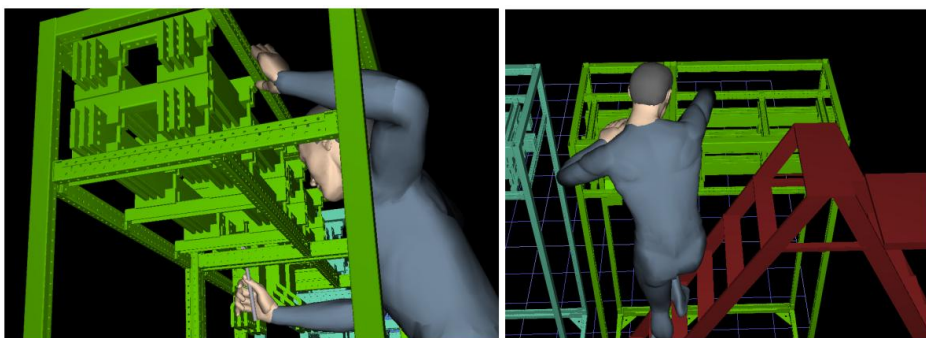


Figura 3.11. Vie d'accesso alla giunzione

Per l'operazione di serraggio attualmente si utilizza l'accesso dall'alto. L'accesso frontale non consente una buona visuale

sull'operazione e non viene utilizzato. Dal lato superiore invece si ottiene un buon controllo visivo anche perché assemblando in sequenza dalle fasi più basse a quelle più alte non si hanno rilevanti problemi di ingombro.

Nel nostro caso, invece, ci troviamo ad avere le fasi del *castello* già montate così come sono montate tutte le derivazioni. Se a queste poi aggiungiamo la struttura portante del telaio e le strutture secondarie dei distanziali e dei telai di supporto, lo spazio si riduce notevolmente.

La prima analisi è stata effettuata sul modello di partenza per capire quali fossero le problematiche da affrontare e dove fosse possibile intervenire per correggerle.

Ovviamente anche in questa situazione ci siamo messi nelle condizioni più sfavorevoli andando ed effettuare le nostre simulazioni sull'ultima fase, la prima in ordine di accoppiamento, poiché risulta la più distante dalla via d'accesso superiore e la più critica come livello di ingombri.

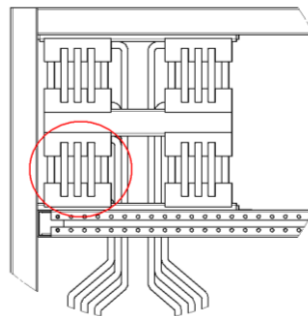


Figura 3.12. *Dettaglio fase critica per il montaggio della giunzione*

3.3.2 Le problematiche di lateralità

“Con il termine di lateralità si definisce genericamente l’asimmetria fra la metà destra e quella sinistra del corpo umano e, in senso più specifico, la parziale asimmetria funzionale dei due emisferi cerebrali, per la quale le funzioni cognitive e comportamentali più analitiche e razionali, tra cui il linguaggio, sono localizzate

*nell'emisfero sinistro, mentre quelle sintetiche ed imaginative sono nel destro [...] si ritiene che un'asimmetria morfologica tra gli emisferi cerebrali costituisca la base delle loro differenti competenze linguistiche e della dominanza manuale.*¹⁴

Giunti a questo punto dell'analisi anche per le nostre operazioni può assumere rilievo la problematica della lateralità intesa come parte predominante del corpo che riesce a portare a termine determinate azioni. Fino ad ora, infatti, nella verifica delle manovre di sollevamento e spinta non vi era la necessità di scegliere un lato dominante. Nel caso dell'inserimento del *fazzoletto* l'operazione era semplice e non richiedeva particolari abilità. Nella soluzione finale si tratta solo di spingere ed inserire il *fazzoletto* nelle derivazioni.

Adesso il problema ci porta a considerare un lato dominante in grado di effettuare l'operazione di inserimento della testa del cricchetto e di far agire una forza tale per cui si raggiunga la coppia di serraggio ottimale sulla vite.

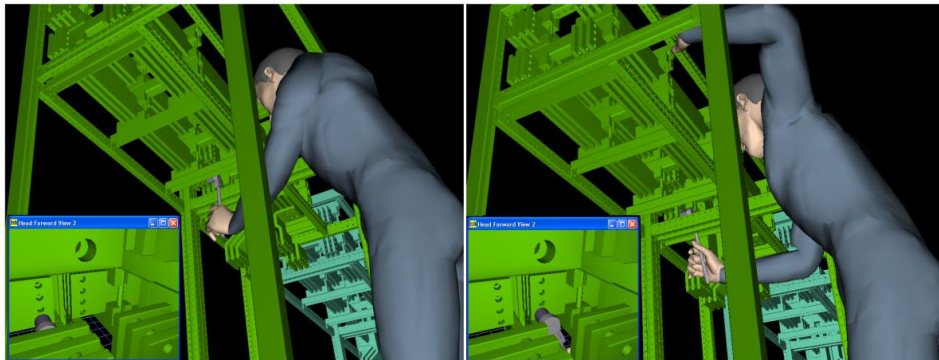


Figura 3.13. Lateralità nell'operazione di serraggio con dettaglio della vista

Nella fase iniziale dell'analisi, quando abbiamo utilizzato il modello assegnatoci in partenza utilizzando l'accesso dall'alto abbiamo utilizzato l'impugnatura destra poiché era quella che godeva di maggior spazio di manovra fra i distanziali e le traverse del telaio. Successivamente si è adoperata un'impugnatura sinistra, quando il caso lo richiedeva, per agevolare un controllo visivo sull'operazione. In fase di inserimento della testa del cricchetto sulla vite non vi è un problema di forza da applicare quanto la necessità di portare a termine correttamente l'operazione. L'impugnatura sinistra in base all'evoluzione della progettazione era un aspetto che poteva favorire il controllo visivo soprattutto nell'approccio frontale al modello.

¹⁴ G. Berlucchi, B. Rossi – L'enciclopedia italiana Treccani, Universo del Corpo.

3.3.3 La simulazione con Jack

Per rendere più realistica la nostra simulazione abbiamo deciso di usufruire di una modello di scala dalla libreria di *Jack* per l'accesso dall'alto, mentre per l'accesso frontale abbiamo utilizzato il blocco d'appoggio utilizzato nella simulazione dei *fazzoletti*.

Come postura di partenza si è utilizzato quella da lavoro in piedi con braccia supportate per l'approccio dall'alto, adattando la distribuzione del corpo ai gradini della scala. Mentre si è utilizzata la postura con braccio disteso per l'approccio frontale, andando a bilanciare lo sforzo sul braccio con l'utensile vincolando simmetricamente il braccio libero al telaio.

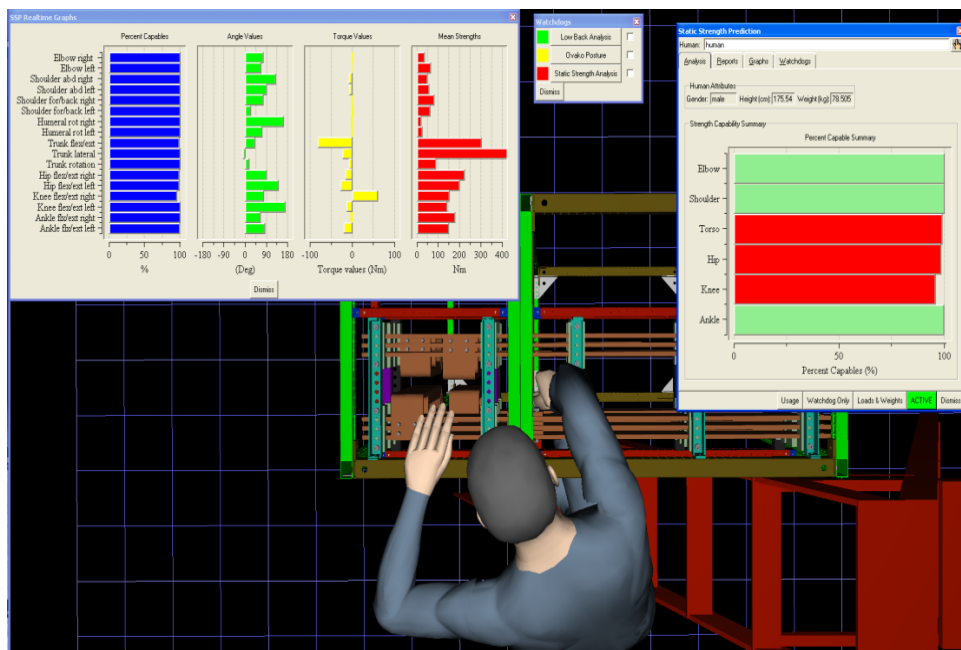


Figura 3.14. Serraggio dall'alto SSP

Per giungere a dei risultati pertinenti abbiamo inserito una forza passiva sul palmo del manichino di 10N. Il valore indicativo ci da un'idea dell'andamento dello sforzo nella postura raggiunta.

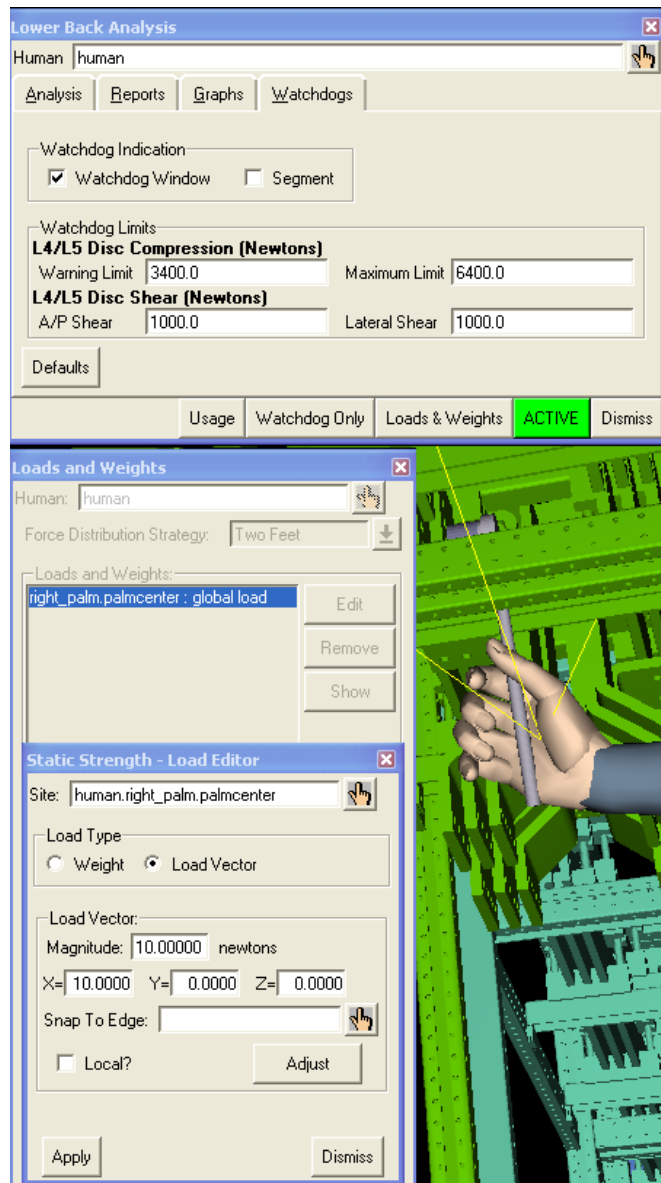


Figura 3.15. Carico per simulare coppia di serraggio

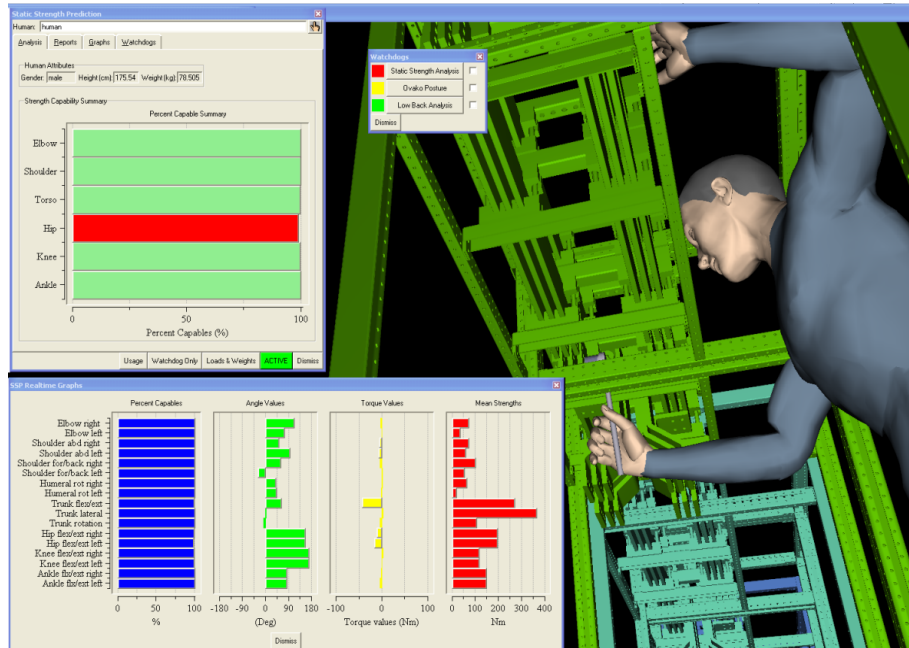


Figura 3.16. Serraggio dall'accesso frontale SSP

La prima analisi ci ha fatto capire che la manovra eseguita dall'accesso superiore del *castello* era molto difficile poiché molto vicina al telaio principale. Ciò limita di molto lo spazio di manovra del braccio e di conseguenza il movimento di rotazione per il serraggio. Lo si può notare dai valori rischiosi degli sforzi per il tronco, le anche e le ginocchia che soffrono della distribuzione della postura degli arti superiori.

Da invece una differente risposta la simulazione con accesso frontale. Qui aiuta molto la simmetria della postura che continua a mantenere il manichino.

Per questo motivo abbiamo continuato nelle nostre simulazioni ad utilizzare l'approccio frontale, perché in partenza ci garantiva una migliore condizione di sforzo. Inoltre questa postura ci offriva uno spunto di partenza valido per trovare delle alternative.

3.3.4 Ricerca e progettazione delle alternative

Come primo approccio, quindi, abbiamo provato a verificare la soluzione dall'alto andando a cambiare la postura del telaio del castello, cercando di aumentare lo spazio a disposizione.

Anche migliorando le condizioni di accesso però la postura rimane molto forzata. A tal punto che nascono condizioni di sforzo critiche che si ripercuotono sempre su tutto il corpo. Inoltre l'operatore non ha controllo visivo sull'operazione a causa del telaio e della posizione della spalla, che per affondare con braccio e cricchetto, impedisce una postura regolare del tronco.

Giunti ad un punto morto con lo sviluppo dell'analisi dall'accesso superiore abbiamo pensato di ribaltare in fase di riprogettazione la problematica. Tenendo fede ai risultati ottenuti in fase di riprogettazione del componente *fazzoletto*, eravamo giunti alla conclusione della progettazione tramite asole.

Questa permetteva il minore ingombro e la riuscita dell'operazione. Inoltre ci offriva un valido spunto di lavoro andando a sviluppare lo scorrimento, permettendo così di poter giocare molto sulla lunghezza della giunzione.

Per sfruttare in maniera metodica questa soluzione abbiamo fatto una panoramica con le possibili soluzioni. In tutto abbiamo ottenuto quattro configurazioni da poter testare, costruite sviluppando lo schema che segue.

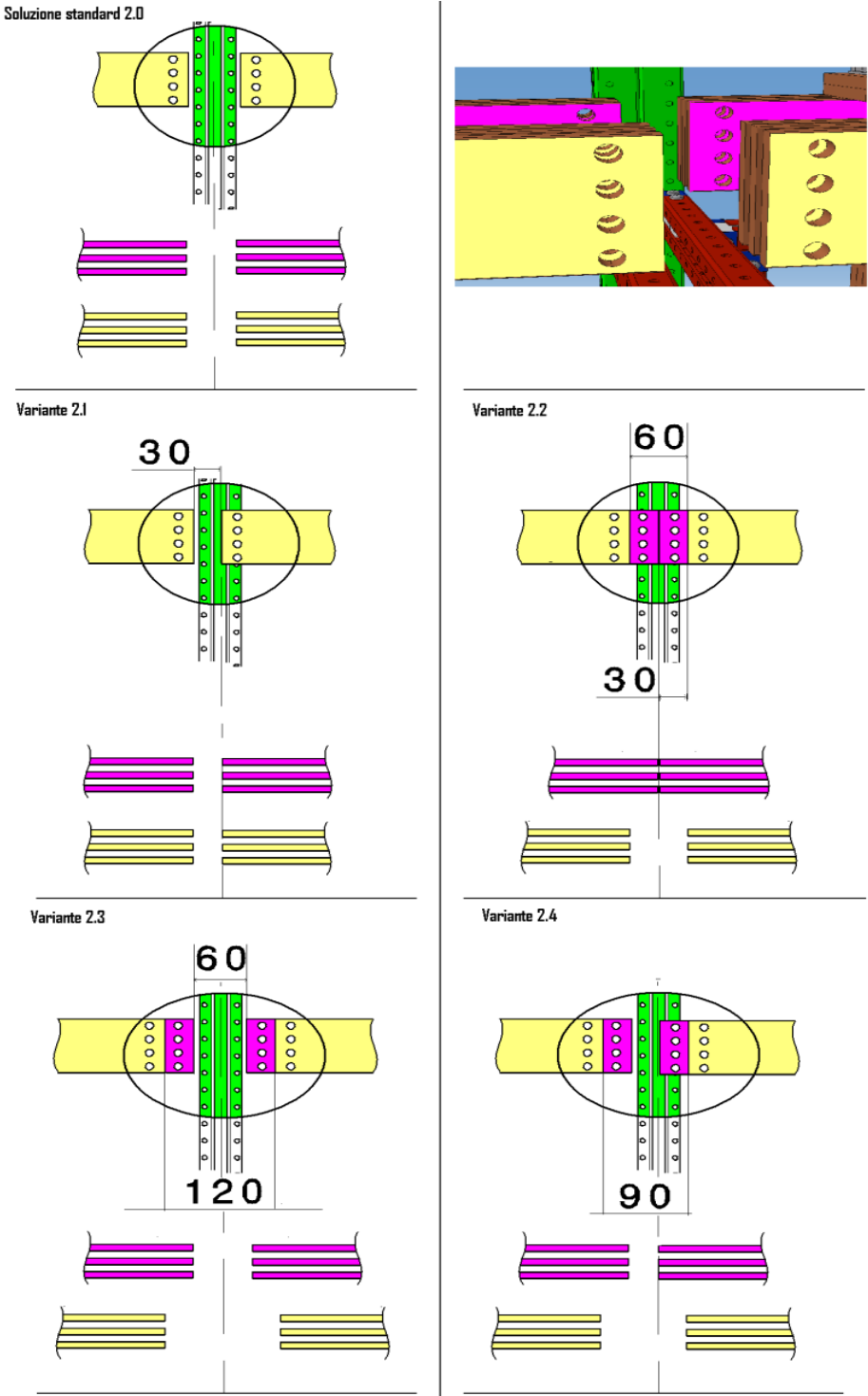


Figura 3.17. Schema delle varianti di giunzione, in viola le fasi posteriori e in giallo le fasi anteriori

I vincoli che ci siamo dati parametrizzando la lunghezza delle componenti sono stati:

- la luce minima per accedere ai fori delle fasi posteriori, quando queste vengono scalate, è di 30 mm, distanza che consente l'inserimento dell'inserto per il serraggio;
- il massimo rientro per le fasi posteriori deve essere contenuto comunque all'interno del telaio per non creare problemi con la movimentazione.

Dato che le nuove soluzioni, avevano come obiettivo quello di migliorare lo spazio di lavoro abbiamo analizzato nuovamente entrambe le vie d'accesso. Per tale lavoro *Jack* si è rivelato molto utile per accorciare i tempi di implementazione delle simulazioni. Caricando su uno stesso scenario i modelli con le quattro soluzioni e impostando la postura del manichino, si è rivelato semplice effettuare l'analisi di tutte le configurazioni in maniera ciclica. Come riferimento si è tenuto conto del caso peggiore ovvero dell'avvitamento più basso della fase critica.

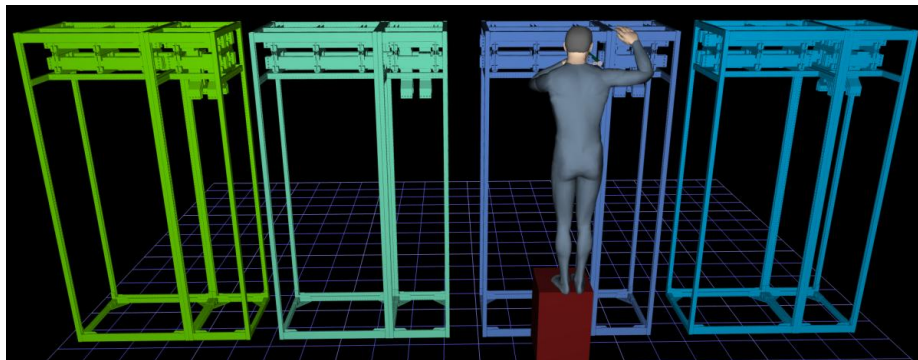


Figura 3.18. Implementazione della simulazione sui modelli delle varianti

3.3.5 Verifica delle soluzioni

Date le quattro combinazioni possibili si è subito notato che alcune di esse sono incompatibili con dei vincoli della struttura.

La variante 2.3, ad esempio, prevede l'arretramento sia dal lato *castello* sia dal lato delle derivazioni, con la fase critica che scala rispetto a quelle frontali. In questo modo gli attacchi delle derivazioni

frontali vanno a cadere sulla struttura dei distanziali e del telaio, rendendo impossibile il passaggio delle viti.

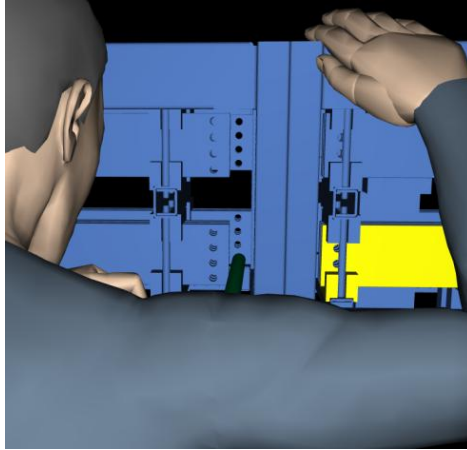


Figura 3.19. *Dettaglio errore nella variante 2.3*

La soluzione 2.1 presentava alcuni vantaggi se analizzata dall'accesso frontale. L'operazione risultava non rischiosa con buoni valori di postura. Soprattutto con impugnatura mancina si riusciva ad ottenere un buon livello di controllo visivo.

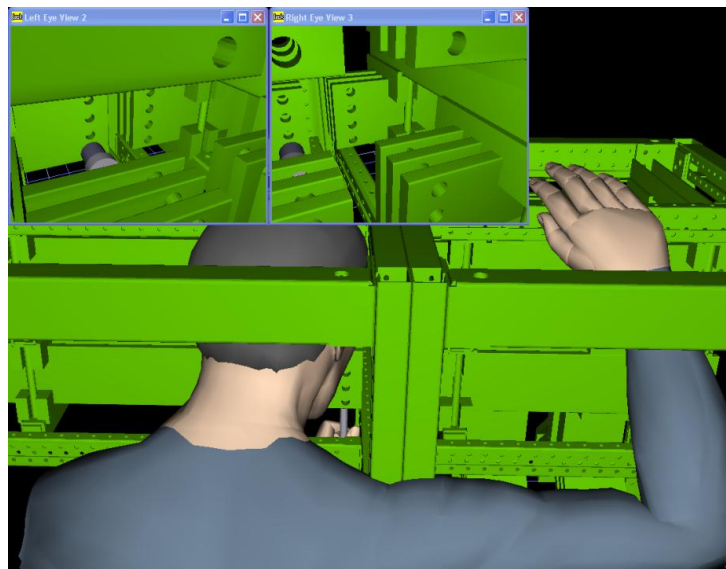


Figura 3.20. *Dettaglio vista impugnatura sinistra variante 2.1*

Tuttavia questa soluzione non presenta nessuna scalatura relativa della fasi. Per raggiungere le fasi posteriori si è costretti ad operare

direttamente con il cricchetto dal lato inferiore del castello. Nel caso reale questa via è spesso ostruita dai pannelli di comando e comunque lo spazio è appena sufficiente per permettere il passaggio della mano.

Per tali ragioni abbiamo continuato le nostre simulazioni, valutando l'attacco frontale, attraverso l'uso di una prolunga per cricchetto, simulandone l'ingombro con un cilindro in prima battuta.

Le soluzioni 2.2 e 2.4 presentavano entrambe problemi dal punto di vista dimensionale.

La prima non è da considerarsi realizzabile in quanto fa andare in corto il sistema creando un contatto diretto fra le fasi e le derivazioni poste dietro.

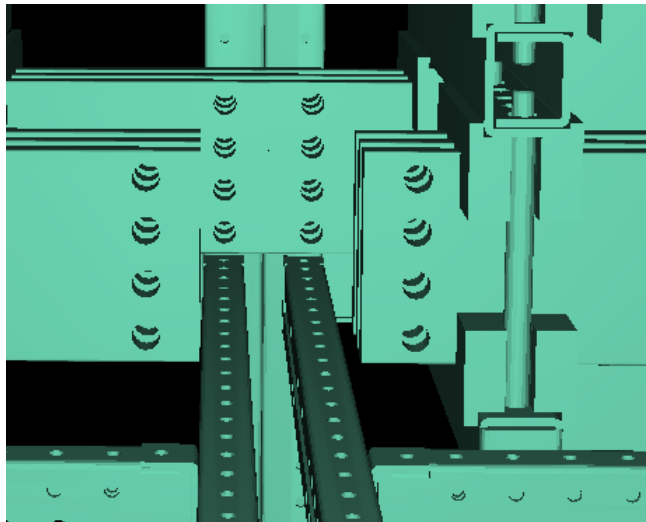


Figura 3.21. *Dettaglio errore nella variante 2.2*

La 2.4 invece prevede l'utilizzo di *fazzoletti* più lunghi, aumentando la distanza per il collegamento posto davanti. La dimensione dei *fazzoletti* dovrebbe essere notevole in quanto si deve consentire il rientro attraverso le asole all'interno del castello per una distanza di 90 mm.

Le analisi compiute su quest'ultima variante tuttavia hanno evidenziato una buona riuscita dell'operazione e una postura molto facile da adattare soprattutto adottando la prolunga.

Ripetendo l'operazione con entrambe le impugnature si capisce che si riescono ad ottenere dei valori accettabili per lo sforzo. Inoltre questa postura anche con attacco destro non disturba la simmetria del corpo, vincolando la mano libera sul telaio.

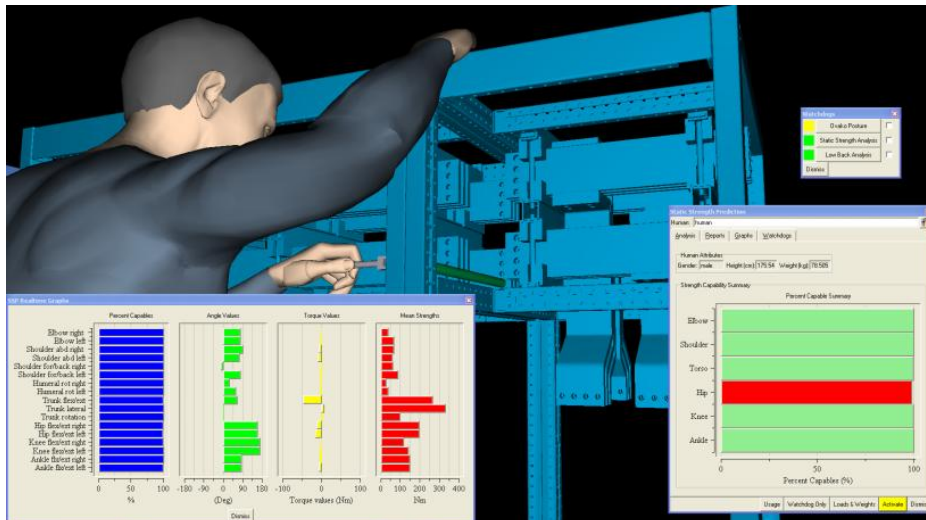


Figura 3.22. Variante 2.4 SSP

Abbiamo proseguito l'analisi valutando anche il contributo che poteva derivare dall'altra via d'accesso. Qui si è notato che la postura in generale non crea problemi per tutte le soluzioni. Si ha invece uno scarso controllo visivo dell'operazione in generale. Per questa via d'accesso l'unico beneficio notevole è dato dalla configurazione 2.4. Aumentando la distanza relativa fra le fasi si permette il movimento di rotazione di avambraccio e polso che consente la rotazione sul cricchetto.

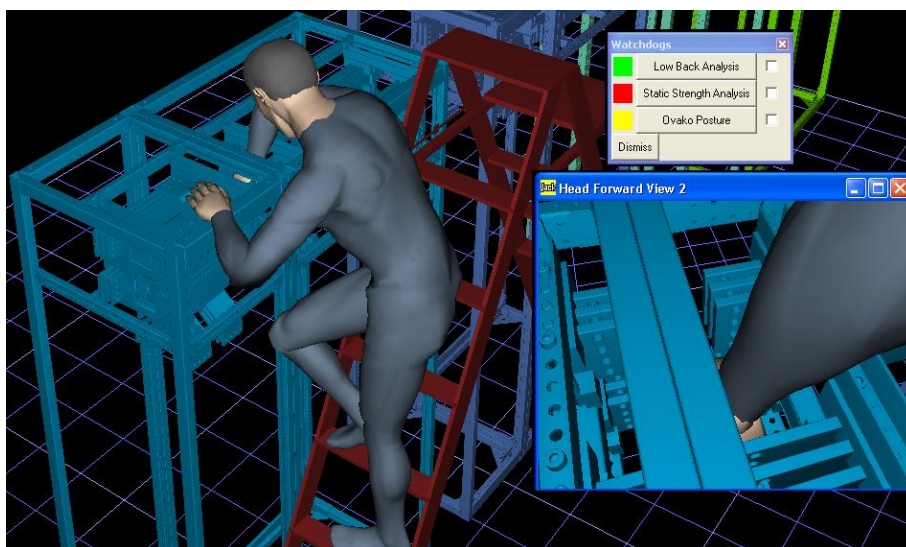


Figura 3.23. Variante 2.4: visuale

Tuttavia il peso della distanza fra le fasi poste davanti nella soluzione 2.4 è notevole a causa dei problemi di progettazione che si ripercuotono sul telaio e sulle asole.

Per questo motivo si è tornati a puntare l'attenzione sulla variante 2.2, cercando di capire se fosse possibile intervenire su quel punto di contatto, ripensando le dimensioni delle barre per le fasi posteriori.

CAPITOLO 4

Soluzioni finali

In questo capitolo si presenteranno le soluzioni finali alle quali siamo giunti dopo le fasi di simulazione e riprogettazione delle componenti.

Essenzialmente la soluzione migliore è quella che in seguito verrà definita come *corta*, poiché prevede una diversa dimensione delle barre che compongono le fasi.

Inoltre di seguito si propone una soluzione alternativa che prevede l'utilizzo di una giunzione a tre fori al posto dei soliti quattro. Ovviamente ci si rende conto che un cambiamento del genere comporta uno stravolgimento non da poco sia dal punto di vista elettromagnetico sia dal punto di vista strutturale. Per noi però risultava prioritario verificare lo studio ergonomico anche con una variante del genere.

Tale soluzione, infatti, rimane solo come proposta di progettazione e scaturisce dalle analisi effettuate nel capitolo precedente quando si è fatto uso di una prolunga per il cricchetto nell'approccio frontale.

Si è verificata però la correttezza della soluzione e la sua realizzabilità dal punto di vista dell'analisi ergonomica e delle fasi di assemblaggio; approfondendo anche nei dettagli quest'ultima soluzione, ricercando gli utensili in grado di poterla realizzare.

4.1 Soluzione corta

Quella che qui viene presentata come soluzione *corta* deriva direttamente dall'analisi effettuata sul modello riprogettato delle fasi. Il modello 2.2 di partenza, infatti, prevedeva le fasi posteriori accostate e quelle poste sul lato frontale poste a distanza maggiore.

Così facendo si creava un luce per poter permettere l'accesso alle viti posteriori e non si distanziavano troppo le fasi frontali. In tal modo era possibile mantenere una lunghezza della giunzione tale per cui poteva ancora essere utilizzata la soluzione con le asole. Il problema che era stato messo in evidenza da subito in fase di studio della variante 2.2 derivava dal contatto diretto fra le fasi del *castello* e le derivazioni. Per ovviare a questo problema, mantenendo una distanza sufficiente a garantire l'accesso dell'inserto e della prolunga ai fori posteriori, si è deciso di accorciare la distanza fra i fori e il bordo laterale della barra.

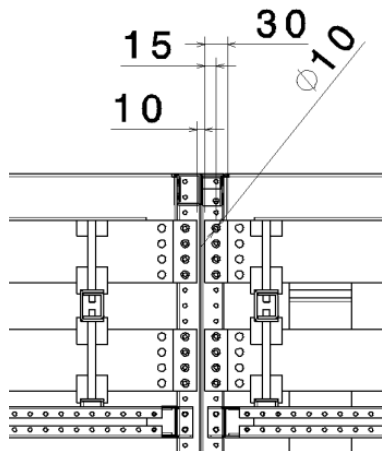


Figura 4.1. Dettaglio soluzione corta

Accorciando la distanza da 20 mm a 15 mm si riesce a guadagnare una distanza di 10 mm fra le fasi e le derivazioni. Adottando questa soluzione non si hanno problemi dal punto di vista tecnologico e si riesce ad assicurare comunque il serraggio.

4.1.1 Verifica delle vie d'accesso

Dai risultati delle simulazioni precedenti è evidente che l'accesso superiore da problemi rilevanti riguardo alla postura. Le difficoltà sono maggiori quando si va ad operare sulle fasi poste in basso, mentre su quelle superiori la postura torna ad essere accettabile.

Tuttavia Le difficoltà maggiori si hanno nel controllo visivo dell'operazione. Le fasi basse sono penalizzate dallo spazio ristretto e dalla presenza del braccio che occlude il campo visivo. Le fasi superiori sono penalizzate dalle traverse dei due telai che nascondono gli attacchi delle fasi posteriori ora molto vicini tra loro.

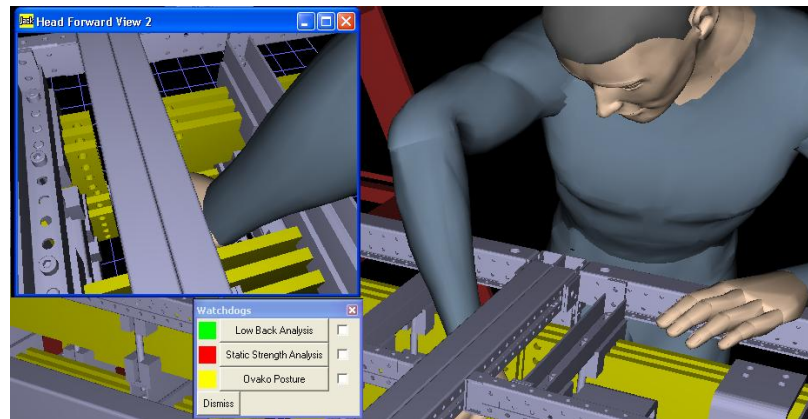


Figura 4.2. Soluzione corta: accesso superiore

La nuova configurazione è stata pensata in funzione della minore distanza dei fori dal bordo delle barre per favorire la luce fra gli attacchi e di conseguenza l'accesso frontale. I vantaggi per quanto riguarda il fattore ingombro sono rilevanti. Il campo visivo inoltre favorisce il controllo sulle operazioni e, poiché si utilizza una prolunga, la manovra di rotazione può essere libera da qualsiasi ostacolo e può essere eseguita con impugnatura destra.

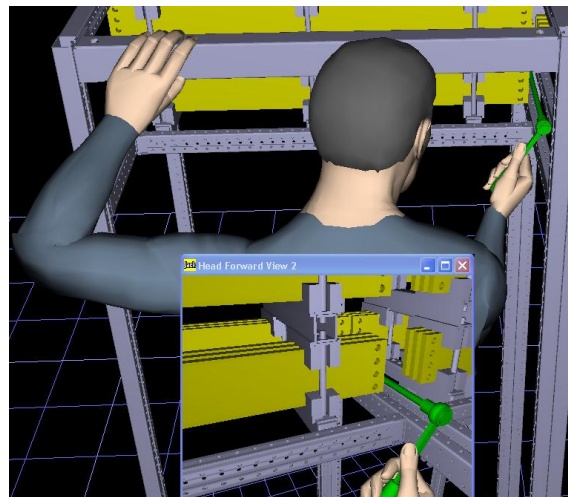


Figura 4.3. Soluzione corta: accesso frontale

Di conseguenza nella trattazione che seguirà abbiamo preferito utilizzare la via d'accesso frontale. Si può notare dalla Figura 4.3 che non si riesce ad ottenere una visuale completa con impugnatura destra, in particolare non si riescono a vedere le viti poste in basso per la fase critica, ma di sicuro si ha un controllo migliore. La manovra poi in queste condizioni non pare avere ostacoli particolari una volta scelta una prolunga con lunghezza di 250 mm.

4.1.2 La simulazione con Jack

Data la postura ottimale che consente la prolunga, la postura utilizzata di partenza è stata quella da lavoro a banco con braccia supportate. Per l'altezza d'accesso frontale si è utilizzato il solito supporto di 55 cm vincolando la pianta dei piedi per avere un riferimento fisso.

Le analisi non hanno evidenziato rischi sulla postura nell'eseguire la manovra. Anche implementando l'animazione si riscontra soltanto un picco per l'analisi statica dovuto alla postura delle anche.

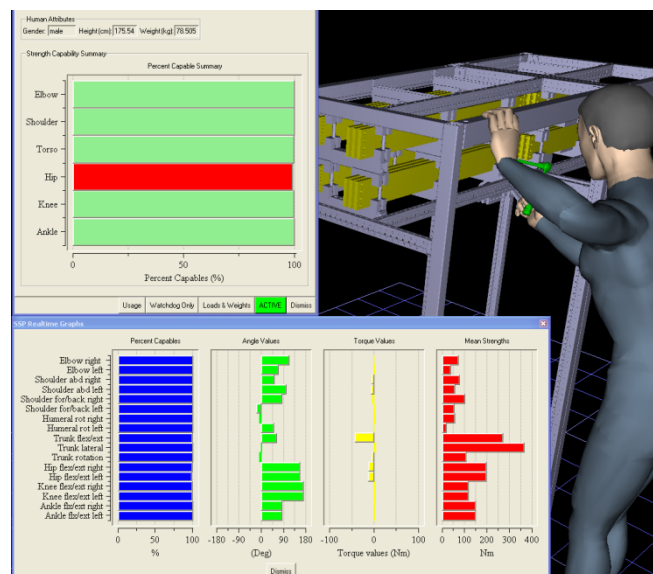


Figura 4.4. Soluzione corta SSP

Nel dettaglio si capisce che si tratta della ripercussione degli sforzi del tronco che hanno un picco quando si effettua la rotazione. Nonostante la postura sia coerente con un movimento realistico, arrivando a bilanciare la rotazione con la postura del braccio sinistro, che trova nel telaio un ottimo supporto, il picco di sforzi sulle anche non si riesce in alcun modo ad evitare.

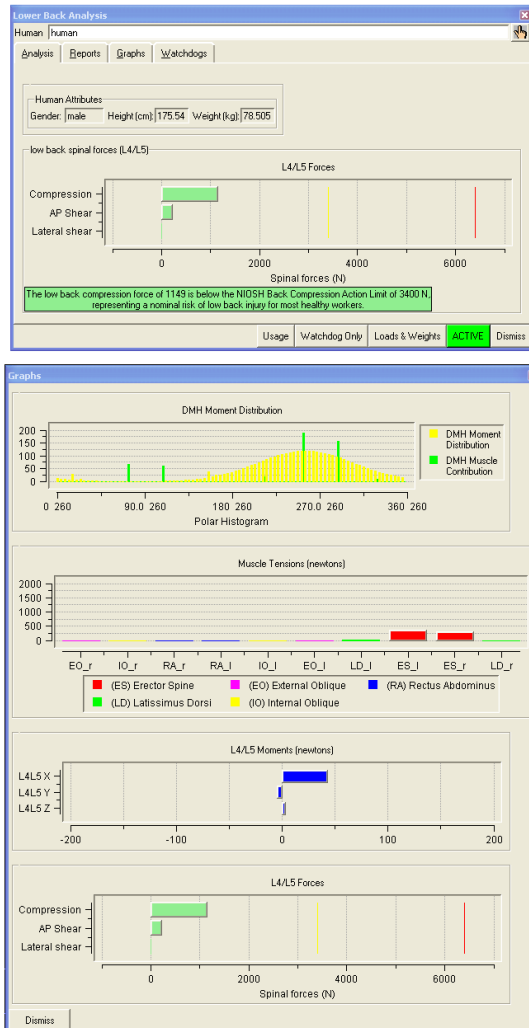


Figura 4.5. Soluzione corta LBA

Oltretutto andando a valutare il livello di stress a livello lombare per le vertebre L4/L5, attraverso la Low Back Analysis, non si riscontrano valori elevati di stress. Inoltre l'istogramma della distribuzione del momento ha un picco elevato sul lato destro

dovuto all'azione del carico di 10 N che abbiamo utilizzato per simulare la coppia resistente durante l'operazione.

L'unica difetto lo si riscontra solo con la OWAS dove i suggerimenti nello specifico non riguardano i carichi di esercizio ma un'attenzione generica riguardante la postura degli arti superiori, che di fatto si rispecchia anche nell'istogramma del momento. Tuttavia questo può essere addotto facilmente alla non simmetria degli arti superiori che porta fuori asse il baricentro caricandolo sul lato chiuso della postura.

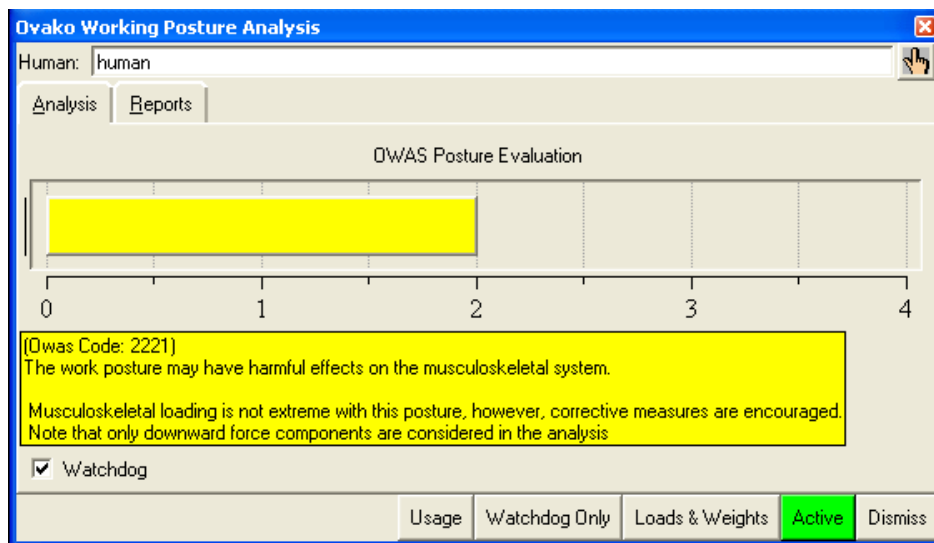


Figura 4.6. Soluzione corta OWAS

Come consigliato nella OWAS, poiché il carico è concentrato solo sugli arti superiori, siamo andati a controllare di che tipo di sforzo si stava trattando. Per fare ciò abbiamo analizzato la postura tramite la RULA e anche in questo caso non è dato un messaggio di rischio alto dovuto alla postura o al carico. Al massimo si valuta la postura come una postura da tenere sotto controllo e da cercare di migliorare in futuro. In ogni caso non la si può considerare una postura forzata o al limite dei carichi soprattutto se si considerano il braccio sinistro come vincolato alla struttura per bilanciare lo sforzo dell'impugnatura.

The screenshot shows the 'Rapid Upper Limb Assessment (RULA)' software window. It has three tabs: 'Task Entry', 'Reports', and 'Analysis Summary'. The 'Analysis Summary' tab is active. The interface includes several input fields for job details (Job Title, Location, Comments, Job Number, Analyst, Date). Below these are two posture rating sections: 'Body Group A Posture Rating' and 'Body Group B Posture Rating'. Body Group A includes ratings for Upper arm (4), Lower arm (2), Wrist (3), and Wrist Twist (1), with a Total of 4. Body Group B includes ratings for Neck (3) and Trunk (3), with a Total of 4. Below the ratings are boxes for 'Muscle Use' (Normal, no extreme use) and 'Force/Load' (< 2 kg intermittent load). A 'Legs and Feet Rating' section is also present, with the text 'Standing, weight even. Room for weight changes.' At the bottom, a yellow box displays the 'Grand Score: 4' and the action: 'Further investigation needed. Changes may be required.' There are 'Update Analysis', 'Usage', and 'Dismiss' buttons.

Figura 4.7. Soluzione corta RULA

4.1.3 Risultati e proposte

La via d'accesso migliore, per la soluzione corta, rimane quella con accesso frontale tramite l'inserimento di una prolunga sul cricchetto. Nonostante non si possa mantenere un controllo visivo su tutte le operazioni di serraggio, poiché la postura e la combinazione delle fasi rendono visibili solo i primi due fori delle fasi posteriori, l'analisi ergonomica non mostra rischi rilevanti di alcun genere per l'operatore.

L'invito che si fa è quello di fare attenzione alla ripetitività dell'operazione, che scaturisce direttamente dall'analisi statica della manovra. Non si può trascurare però lo sbilanciamento del corpo e il relativo affaticamento delle anche, nonostante si sia corretta la postura con il vincolo posto sul braccio non carico.

4.2 Soluzione a Tre fori

Una soluzione che invece è svincolata dalla parametrizzazione delle componenti ma che incide fortemente sugli aspetti progettuali è quella rappresentata dalla soluzione a tre fori.

Questa soluzione prevede di sostituire i quattro fori attuali della giunzione con 3 fori di diametro maggiore, per consentire il passaggio da dei fori per M8 a dei fori M10. Così facendo si possono lasciare le barre della lunghezza originale rimanendo con le stesse distanze per l'accesso frontale e ci si preoccupa del raggiungimento delle viti posteriori attraverso l'uso di prolungha adeguate. Come già dimostrato nella soluzione corta l'utilizzo della prolunga garantisce una buona mobilità per l'operatore e il controllo sull'operazione.

L'unico vincolo di questa soluzione è di tipo dimensionale. Bisogna infatti andare a capire se questa soluzione sia praticabile, se vi siano in commercio utensili in grado di realizzarla e quanto cambi tale approccio dal punto di vista dell'assemblaggio.

4.2.1 Ricerca degli utensili

Per verificare la fattibilità della nostra soluzione ci siamo interessati prima di tutto degli utensili che occorre in questa configurazione.

La soluzione a tre fori prevede l'utilizzo di una prolunga come nel caso della soluzione corta, ma adesso la prolunga deve passare attraverso i fori delle fasi poste davanti per l'accesso frontale.

Il primo cambiamento che abbiamo attuato riguardava il diametro dei fori. Il corretto serraggio delle barre della singola fase, togliendo una vite, non si poteva trascurare e per questo abbiamo fatto il passaggio dai fori M8 ai fori M10.

L'aumento del diametro dovuto alla riduzione del numero di viti portava come conseguenza una maggiore luce per consentire il

passaggio della prolunga. Si è passati da un diametro di 10 mm ad un diametro di 13.5 mm.

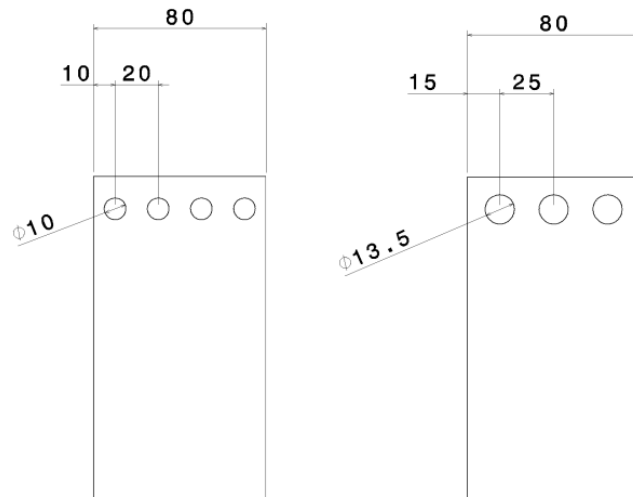


Figura 4.8. Quote: soluzione standard e soluzione 3 fori

In commercio siamo riusciti a trovare delle prolunghie prodotte da Facom che rispettavano i nostri vincoli sia per quanto riguarda il cricchetto sia per quanto riguarda la prolunga.

La prolunga quindi da 250 mm ci consente di raggiungere le viti posteriori passando attraverso il foro del diametro di 13.5 mm. Anche se lo stelo della prolunga è di 10 mm il vero problema per il passaggio attraverso i fori è dovuto al colletto per l'inserimento dell'inserto. Qui la dimensione critica come evidenziato dal catalogo è di 12,6 mm.

▼ **J. RALLONGES**

▷ Résistance ISO 3316, DIN 3123, NF E 74.366

➔	L	ΔΔ
	mm	g
J.208	50	62
J.209	75	86
J.210	125	127
J.215	250	230
J.217	500	445

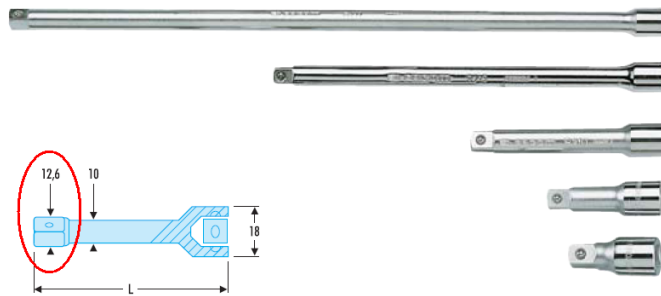


Figura 4.9. Prolunga Catalogo Facom

Di conseguenza siamo andati a rintracciare un cricchetto che fosse compatibile sia con la prolunga e con la tipologia di viti che andavamo ad utilizzare. Da catalogo abbiamo anche scelto una tipologia di cricchetto da 3/8" che ci consentisse di avere un angolo minimo per applicare la coppia con un angolo di 5°.

CLIQUETS ☑ 3/8"

▼ **CLIQUET "PAUME DE MAIN"**

J.161

▷ ISO 3315, DIN 3122, NF ISO 3315

- Angle de reprise 5°.
- Paume de main.
- Présentation : chromée satinée.

ΔΔ : 210 g.

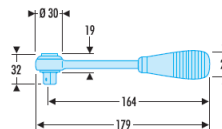
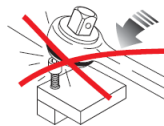


Figura 4.10. Cricchetto Catalogo Facom

Per completare il nostro kit per il serraggio delle viti a questo punto non rimaneva che scegliere un inserto compatibile con la prolunga e con le viti da M10. Nel catalogo abbiamo scelto un inserto a testa esagonale J17H

DOUILLES \square 3/8" OGV®

▼ J DOUILLES OGV® MÉTRIQUES 6 PANS ET 12 PANS

▷ ISO 2725-1, DIN 3124, NF ISO 2725-1



		S mm	Ø d1 mm	Ø d2 mm	t mm	L mm	Δ g
J.7H	J.7	7	11,0	17,6	6,0	27	24
J.8H	J.8	8	12,2	17,6	6,5	27	25
J.9H	J.9	9	13,5	17,6	6,7	27	25
J.10H	J.10	10	14,7	17,6	7,8	27	26
J.11H	J.11	11	16,0	17,6	9,0	27	27
J.12H	J.12	12	17,2	17,6	9,5	27	26
J.13H	J.13	13	18,3	17,4	10,4	30	36
J.14H	J.14	14	19,5	17,6	10,5	30	34
J.15H	J.15	15	20,8	18,9	12,0	30	38
J.16H	J.16	16	22	19,9	12,0	30	45
J.17H	J.17	17	23,4	21,7	13,0	30	52
J.18H	J.18	18	24,7	21,7	13,0	33	69
J.19H	J.19	19	26,0	22,7	14,0	33	62
J.20H	J.20	20	27,2	22,2	15,0	33	70
J.21H	J.21	21	28,5	23,5	16,0	33	75
J.22H	J.22	22	29,7	24,7	16,5	33	80
J.23H	J.23	23	31,0	26,0	16,5	33	90
J.24H	J.24	24	31,3	26,3	16,5	33	86



Figura 4.11. Inserto per M10 Catalogo Facom

Inoltre l'utilizzo del catalogo on-line di Facom consente di esportare direttamente i modelli cad degli utensili scelti. Abbiamo quindi prelevato i singoli elementi, li abbiamo assemblati e nel corso delle nostre simulazioni abbiamo utilizzato questo assieme per rendere le nostre simulazioni quanto più possibile attinenti alle condizioni reali.

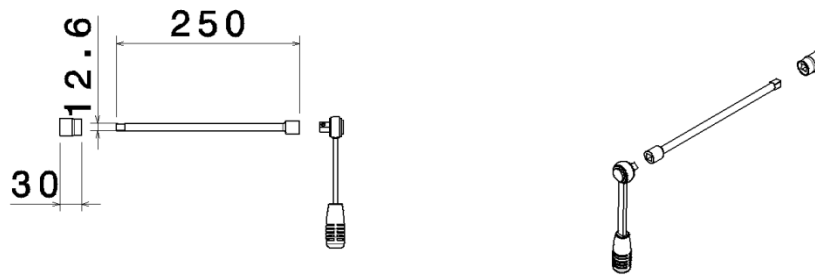


Figura 4.12. *Assieme utensile cad per simulazioni, Catalogo Facom*

4.2.2 Verifica degli ingombri

Per cercare la migliore postura per effettuare le simulazioni abbiamo fatto fede a quanto ricavato dalle precedenti analisi. La postura con ricerca dall'alto presenta le note difficoltà per quanto riguarda sia la postura del braccio sia il controllo visivo sull'operazione. Anche se in questo caso abbiamo un angolo di utilizzo di soli 5° non si riesce ad avere una postura comoda per il braccio destro che deve operare direttamente sul cricchetto.

La postura frontale, utilizzando la prolunga, presenta dei problemi per la riuscita dell'operazione soprattutto per quanto riguarda il controllo dell'operazione. Vista la particolarità di questa operazione, infatti, bisogna verificare se l'inserimento della prolunga e il successivo fissaggio dell'insero creino problemi dal punto di vista operativo.

L'inserimento della prolunga non crea problemi in quanto i fori hanno dimensione 13.5 mm e il colletto della prolunga, la parte più critica per il passaggio, è di 12.6 mm. La vera difficoltà a questo punto è l'inserimento dell'insero. Come evidente nella simulazione, mantenendo l'impugnatura destra siamo costretti a far reggere con la mano sinistra l'insero. La via d'accesso per il braccio sinistro come avevamo già detto prima è molto limitata. In quanto una volta montate le altre componenti del quadro si riesce ad avere uno spazio appena sufficiente per il passaggio di una mano.

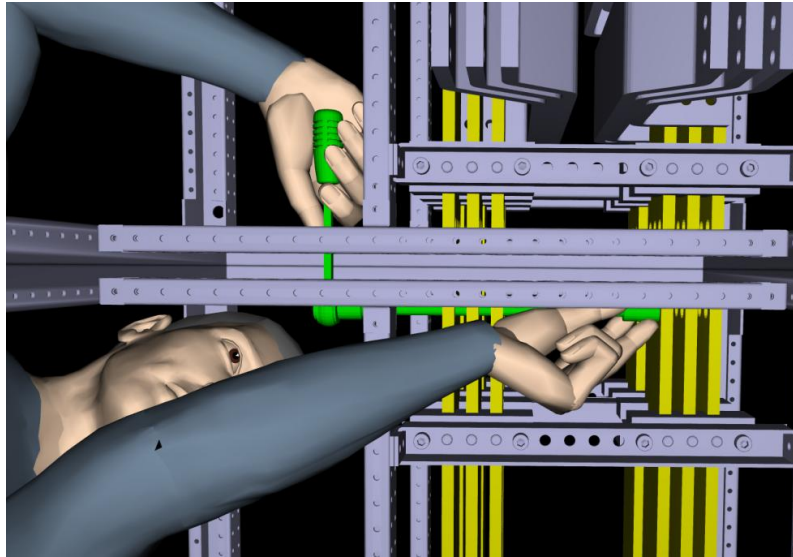


Figura 4.13. *Fissaggio inserto dopo aver fatto passare prolunga nella fase frontale*

Dalla nostra verifica l'operazione è possibile, anche se gli ingombri rendono difficoltoso il controllo diretto dell'operazione. La postura non permette una visione chiara dell'inserto ma se si considera che si tratta di un'operazione elementare, sostenuta solo per il fissaggio della testa, si può considerare l'operazione come temporaneamente ammissibile.

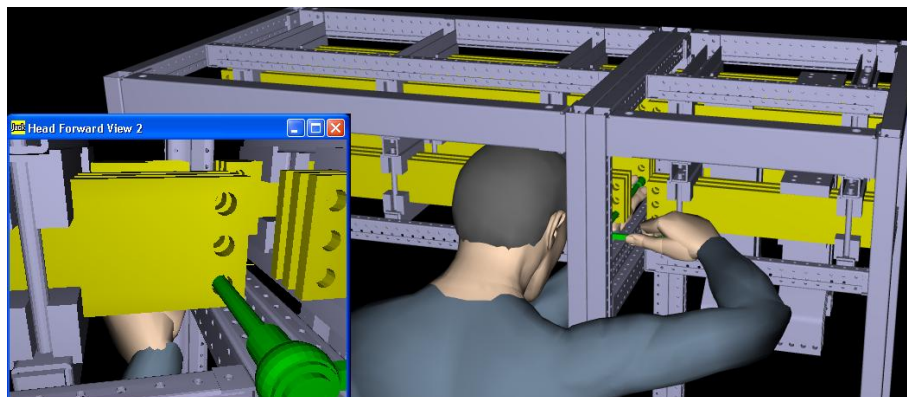


Figura 4.14. *Postura fissaggio inserto: controllo visivo*

4.2.3 La simulazione con Jack

Per le simulazioni con Jack quindi abbiamo utilizzato l'approccio frontale. La postura è stata la solita utilizzata già precedentemente per la validazione e lo studio delle varianti e per la verifica della soluzione corta. I risultati di conseguenza sono tutti abbastanza confrontabili con quelli ottenuti in precedenza. Soprattutto per quando riguarda gli sforzi concentrati sul gruppo delle vertebre L4/L5 e sul relativo istogramma del momento. Qui si evidenzia come il carico concentrato nel palmo destro per permettere la coppia di serraggio sposti l'andamento dell'istogramma sul lato destro della figura.

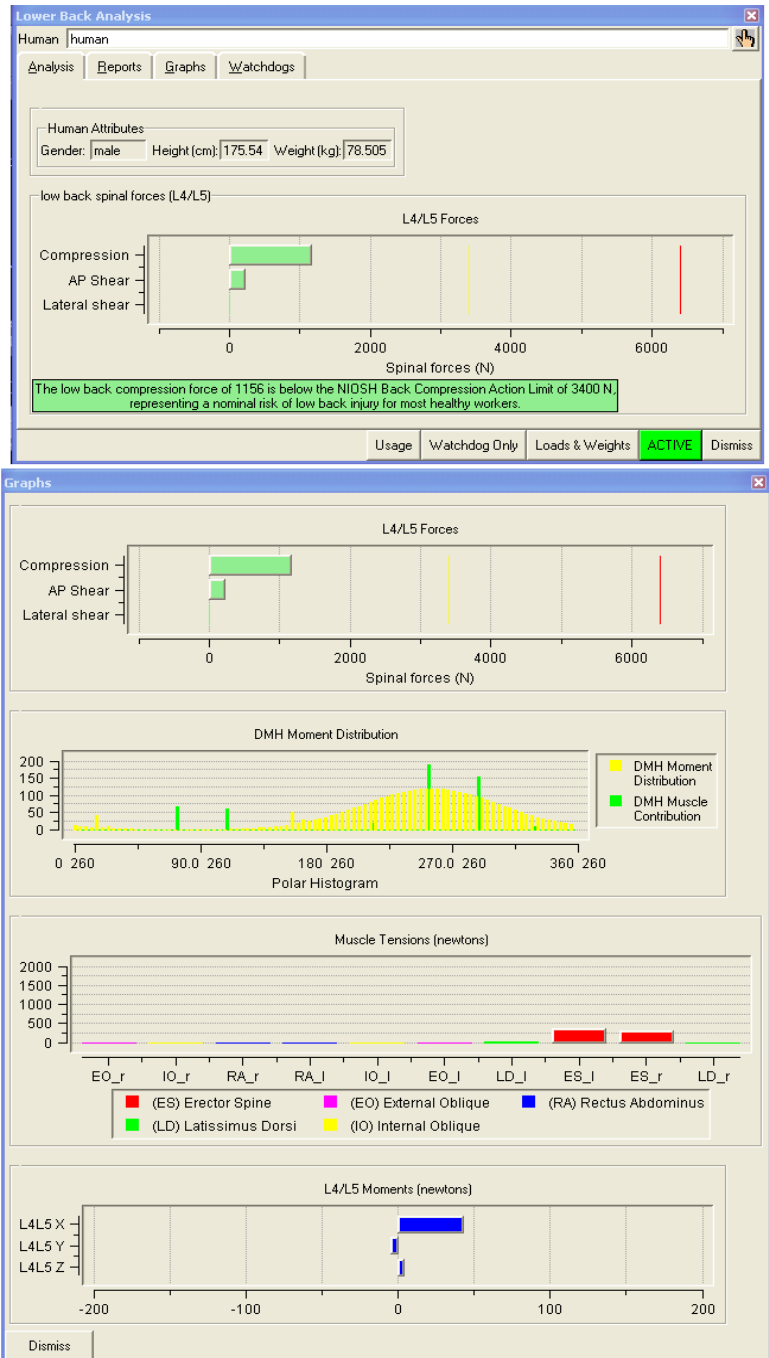


Figura 4.15. Soluzione a 3 fori LBA

Una differenza, se pur minima rispetto alla soluzione corta, si riscontra nell'analisi effettuata con la simulazione statica. Qui, infatti, dove prima avevamo riscontrato un margine di rischio per i nodi legati all'anca, adesso invece il parametro è rientrato nella norma.

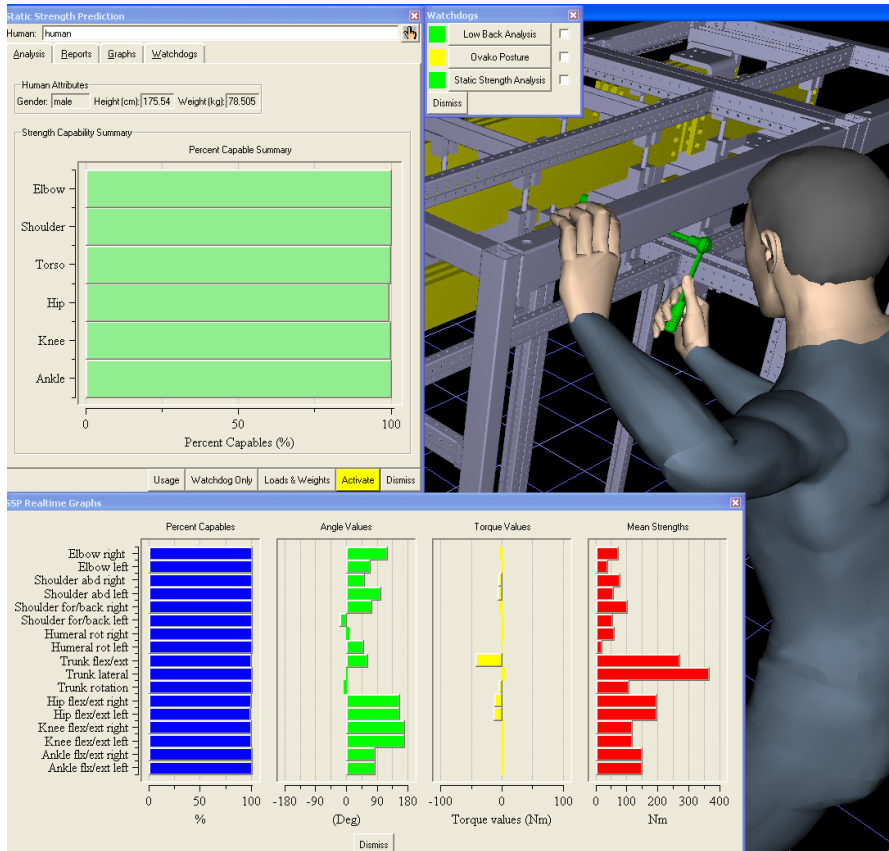


Figura 4.16. Soluzione a 3 fori SSP

La spiegazione di tale cambiamento può essere ricercata nel cambiamento della postura del braccio caricato. Nella soluzione a 3 fori infatti il braccio si sporge molto meno durante il movimento e di conseguenza è riportato molto più lungo l'asse principale del corpo umano, spostando relativamente di poco il baricentro e ridistribuendo meglio gli sforzi.

4.2.4 Risultati e proposte

La soluzione a tre fori, senza dubbio, presenta il vantaggio dal punto di vista tecnologico di far variare di poco le modalità di realizzazione delle componenti. Le fasi possono essere montate in maniera standard sul *castello* senza dover pensare a sfasamenti di nessun genere.

Il limite maggiore di questa soluzione dal punto di vista ergonomico è l'operazione alla cieca dell'inserimento dell'inserito sulla testa della prolunga. Tale operazione però la si può considerare come elementare e di facile verifica operativa.

Anche la realizzazione del prototipo e il controllo effettuato in officina su questa soluzione non ha dato modo di riscontrare problemi rilevanti su questa operazione.



Figura 4.17. Prototipo della soluzione a 3 fori e prova dell'inserimento della prolunga

Tuttavia la validazione ergonomica non implica nessuno studio o riscontro dal punto di vista strutturale per la giunzione o per le forze elettromagnetiche in gioco.

Capitolo 5

Conclusioni

In conclusione in questo lavoro si è voluto far emergere l'utilizzo dei manichini nel settore industriale. Essi vengono adoperati non solo per le analisi ergonomiche dell'interfaccia del prodotto con l'utente ma possono anche essere uno strumento per analizzare le criticità di operazioni già esistenti o una valida alternativa per l'analisi predittiva in fase di progettazione.

L'aspetto interessante della simulazione con i manichini virtuali, che abbiamo evidenziato in questo lavoro, rimane il contributo che essi riescono a dare in fase di progettazione. Offrono una valida alternativa per prevedere problematiche inerenti fasi di assemblaggio o operazioni specifiche e consentono di analizzare diverse varianti ricercando la soluzione che più si adatta sia ai vincoli progettuali sia ai vincoli operativi. Il caso che abbiamo studiato ci ha offerto l'opportunità di verificare delle operazioni elementari generiche e la possibilità di cercare delle soluzioni alternative per il problema della giunzione fra i comparti del modello di quadro elettrico componibile prodotto da Skema S.p.a..

Sicuramente la suddivisione dello studio fra operazioni di verifica per la movimentazione di carichi pesanti e analisi di specifiche fasi ci ha portato ad una distinzione fra tutte le tipologie di manichini presenti. Se, infatti, si può riconoscere un andamento simile per quanto riguarda le verifiche della movimentazione dei carichi, poiché tutti i modelli hanno come riferimento i medesimi dati del metodo del NIOSH, la stessa cosa non si può dire per quanto riguarda l'analisi delle operazioni specifiche. Per quanto si debba far riferimento sempre a manichini molto vicini alla meccanica del corpo umano in molti casi risulta difficile controllare questi modelli.

Nella gestione delle posture e nel controllo dei gradi di libertà dei singoli elementi del modello multy body si incontrano difficoltà non trascurabili poiché la verifica sistematica di tutti i vincoli per ogni elemento di ogni postura risulta un'operazione molto onerosa. Se poi si considera che dall'imposizione e dal controllo di questi vincoli scaturisce non solo il controllo che si riesce ad avere sul manichino

ma anche le modalità con cui vengono elaborati i risultati in termini di sforzi che agiscono sugli arti e sulla colonna vertebrale si possono intuire le problematiche correlate alla gestione dei manichini.

Operativamente risulta difficile gestire un modello con 135 gradi di libertà quando nella singola operazione si possono ritenere coinvolti pochi elementi. Senza dubbio l'utilizzo di posture di partenza adatte all'operazione può venire in aiuto preimpostando molti vincoli. Tuttavia quando si scopre che le braccia da sole hanno 64 gradi di libertà si capisce che far compiere delle operazioni controllate prossime a quelle reali rimane comunque un'impresa impegnativa. Soprattutto quando poi ci si rende conto che non tutti i gradi di libertà hanno la stessa importanza e sarebbe molto conveniente poter escludere alcuni gruppi di elementi a priori. Nel caso del controllo delle braccia sarebbe molto conveniente escludere gran parte dei gradi di libertà che legano il movimento delle braccia a tutta la colonna vertebrale permettendo così una gestione per gruppi dell'intero modello, così come avviene per le posture delle mani. Per esse infatti basta vincolare i gradi di libertà alle posture delle librerie esistenti per escludere dal controllo diretto gran parte degli elementi che ne costituiscono il modello. In futuro la capacità di poter gestire in maniera distinta per gruppi o per sottoassiemi tutto l'intero modello potrebbe consentire un più rapido raggiungimento dei risultati ottenuti e uno studio più mirato delle operazioni analizzate.

Bibliografia

[1] J. Mark Porter, Keith Case, Russell Marshall, Diane Gyi, Ruth Sims neé Oliver – International Journal of Industrial Ergonomics - ‘Beyond Jack and Jill’: designing for individuals using HADRIAN, No. 33 (2004) pp. 249–264

[2] Colin G. Drury - HUMAN FACTORS - *Human Factors in Industrial Systems: 40 Years*, Vol. 50, No. 3, June 2008, pp. 368–374

[3] Emilio C. Baraldi, Paulo C. Kaminski - Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries - *Ergonomic Planned Supply in an Automotive Assembly Line*, 2010, pp. 1–16

[4] Edem G. Tetteh, Niaz Latif, James D. McGlothlin, Jerry Peters - Human Factors and Ergonomics in Manufacturing - *Impacts of Frequency and Posture on Body Mass, Index in Manual Handling Tasks*, Vol. 19 (4) May 2009, pp. 329–343

[5] M.A. Forero Rueda, M.D. Gilchrist - Forensic Science International - *Comparative multibody dynamics analysis of falls from playground climbing frames*, No. 191 July 2009, pp. 52–57

[6] Tso-Liang Teng, Fwu-An Chang, Yung-Sheng Liu, Cheng-Ping Peng - Mathematical and Computer Modelling - *Analysis of dynamic response of vehicle occupant in frontal crash using multibody dynamics method*, No. 48 (2008), pp. 1724–1736

[7] Lars Fritzsche - Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, *Ergonomics Risk Assessment with Digital Human Models in Car Assembly: Simulation versus Real Life*, No. 20 (4) (2010), pp. 287–299

[8] Anders Sundin, Roland Anders Sundin, Roland Örtengren - Handbook of Human Factors and Ergonomics, Third Edition. – Chapter 39: *DIGITAL HUMAN MODELING FOR CAE APPLICATIONS*, Edited by Gavriel Salvendy 2006 John Wiley & Sons, Inc.

- [9] Dan Lamkull, Lars Hanson, Roland Örtengren - *International Journal of Industrial Ergonomics - A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: A case study within manual assembly of automobiles* No. 39 (2009), pp. 428–441
- [10] *Work Practices Guide for Manual Lifting* (NIOSH WPG, 1981)
- [11] *Scientific Support Documentation for the Revised 1991 NIOSH Lifting Equation*, Technical Contract Reports, May 8, 1991
- [12] *Revised NIOSH Equation for the Design and Evaluation of Manual Lifting* (Water, Putz-Anderson, Garg and Fine, 1993)
- [13] U. Raschke, B.J. Martin, D.B. Chaffin - *J. Biomechanics - Distributed Moment Histogram: A neurophysiology based method of agonist and antagonist trunk muscle activity prediction*. Vol 29 (12) pp. 1587-1596
- [14] G. Berlucchi, B.Rossi – *L'enciclopedia italiana Treccani, Universo del Corpo*.