

POLITECNICO DI TORINO

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE

Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

Tesi di Laurea Magistrale

**New generation crash test  
dummies: characterization of  
displacement sensor alternatives**



**Relatore**  
Prof.ssa Cristina Bignardi

**Studente**  
Alessandra DE VITIS

**Supervisore aziendale**  
**Centro Sicurezza FIAT**  
Dott. Alessio Melloncelli

---

ANNO ACCADEMICO 2019 – 2020



*“Domani sarà tardi per rimpiangere la  
realtà, è meglio viverla!”*

*VR*

*Ai miei genitori*



# Sommario

La sicurezza in ambito automobilistico è in continua evoluzione per limitare il numero d'incidenti stradali e offrire massima protezione alle vittime coinvolte. Questo è reso possibile dall'evoluzione che l'elettronica ha subito negli ultimi decenni. La principale misura di precauzione consiste, sicuramente, nell'introduzione di dispositivi di ritenuta passivi e attivi, alcuni dei quali sono divenuti ormai obbligatori dal punto di vista normativo. È, perciò, sempre più solito sottoporre i nuovi veicoli a prove di crash test effettuate da enti autonomi. In Europa opera Euro NCAP (European New Car Assessment Program), il cui scopo è quello di valutare realisticamente il rischio provocato dai moderni autoveicoli. L'importanza che sta assumendo la sicurezza automobilistica si riscontra nella scelta di autovetture maggiormente sicure da parte dei consumatori, e di conseguenza, nell'interesse che i produttori di autoveicoli stanno riponendo nella scala di valutazione sulla sicurezza di ciascun veicolo. Le case automobilistiche eseguono quotidianamente diversi test sulle proprie auto andando a simulare la risposta dell'occupante nei vari tipi di urto, con l'ausilio di diversi ATD (Anthropomorphic Test Dummy). La seguente tesi di laurea, realizzata presso il Centro Sicurezza FIAT, ha come scopo lo studio di diversi sensori di nuova generazione utili alla valutazione della compressione del torace nei diversi tipi di urto, urti frontali e laterali per i quali vengono utilizzati rispettivamente il THOR-50M e il WorldSID-50M. Dopo una iniziale rassegna dei sensori presenti sul mercato, ci si è concentrati sullo studio di due sensori implementando un setup sperimentale che prevede impatti dinamici di una singola costola toracica di WorldSID-50M e il sensore in esame.

# Indice

<b>1</b>	<b>Sicurezza dell'autoveicolo</b>	<b>9</b>
1.1	Tipologie di sicurezza	9
1.2	Analisi incidenti	10
1.3	Definizione delle prove	10
1.4	Definizione dei criteri di prestazione	12
1.5	Scale di severità di lesione	12
1.6	Omologazioni	14
1.6.1	ECE R94	15
1.6.2	ECE R137	20
1.6.3	ECE R95	21
1.6.4	ECE R135	23
<b>2</b>	<b>Euro NCAP</b>	<b>25</b>
2.1	Prove di rating Euro NCAP	25
2.1.1	Adult occupant protection	26
2.1.2	Child occupant protection	31
2.1.3	Vulnerable road user protection	33
2.1.4	Safety assist	33
2.2	Evoluzione di Euro NCAP	33
2.2.1	Ultima revisione rating 2020	34
2.3	Antropomorphic test device	36
2.3.1	Cenni storici ATD	37
2.3.2	Manichini per urto frontale	41
2.3.3	Manichini per urto laterale	43
2.3.4	Manichini per urto posteriore	43
2.3.5	Manichini bambini	44
2.4	Biodefeltà	44
2.4.1	Curve di rischio	46
2.5	THOR-50M	49
2.5.1	Strumentazione ATD	51
2.6	WorldSID-50M	57
2.6.1	Strumentazione ATD	58

<b>3</b>	<b>Sensori di compressione del torace</b>	<b>63</b>
3.1	Lesioni degli occupanti . . . . .	63
3.1.1	Biomeccanica del trauma toracico . . . . .	64
3.2	Nuovi sensori di schiacciamento per una migliore biofedeltà . . . . .	67
3.2.1	2D IR-TRACC . . . . .	67
3.2.2	3D IR-TRACC . . . . .	81
3.2.3	2D S-TRACK . . . . .	92
3.2.4	3D S-TRACK . . . . .	97
3.2.5	RibEye . . . . .	98
3.2.6	KIR-TRACC . . . . .	105
3.2.7	SPIRAL Track . . . . .	107
<b>4</b>	<b>4 Svolgimento ed elaborazione di prove su costola</b>	<b>109</b>
4.1	Setup di prova . . . . .	109
4.2	Procedura di prova . . . . .	110
4.2.1	Raccolta dati . . . . .	111
4.2.2	Test matrix . . . . .	112
4.3	Acquisizione dati . . . . .	113
4.3.1	Sistema di acquisizione EME . . . . .	113
4.4	Elaborazione dei dati . . . . .	127
4.4.1	Analisi di prove sperimentali a 0° e altezza 200 mm . . . . .	129
4.4.2	Analisi di prove sperimentali a 0° e altezza 400 mm . . . . .	132
4.4.3	Analisi di prove sperimentali a 15° e altezza 200 mm . . . . .	135
4.4.4	Analisi di prove sperimentali a 15° e altezza 400 mm . . . . .	138
4.5	Test di ipotesi: differenza tra medie di due distribuzioni normali, varianze incognite uguali . . . . .	140
4.5.1	Analisi statistica delle prove: sviluppo del test di ipotesi . . . . .	143
4.6	Valutazione biomeccanica per la sicurezza dell'occupante . . . . .	149
4.7	Valutazione della ripetibilità . . . . .	151
	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>155</b>
	<b>A Risultati delle prove sperimentali</b>	<b>157</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>163</b>



# Capitolo 1

## Sicurezza dell'autoveicolo

La sicurezza stradale è uno dei temi maggiormente discussi nell'ultimo decennio allo scopo di minimizzare il numero di vittime e feriti che si verificano a causa degli incidenti stradali. Al fine di sensibilizzare gli acquirenti verso il tema della sicurezza sono nate agenzie di rating che si occupano di valutare le vetture sotto questo punto di vista, sottoponendole ad una serie di crash test con manichini antropomorfi i quali simulano la risposta biomeccanica dell'occupante. I rating vengono periodicamente aggiornati con parametri sempre più severi e ciò induce i produttori a migliorare costantemente le proprie vetture, superando di gran lunga le prestazioni minime richieste dalle norme omologative.

L'Unione Europea, inoltre, attua misure per contribuire ad una maggiore sicurezza stradale elaborando periodicamente programmi che tutti gli Stati membri si impegnano a rispettare. L'obiettivo a lungo termine dell'UE è quello di azzerare il numero di vittime e lesioni gravi entro il 2050, con il traguardo intermedio del - 50% nel decennio 2020-2030. A tale scopo, propone l'obbligo di dotare tutti i veicoli di nuova produzione con innovativi dispositivi di sicurezza, tra cui la frenata automatica di emergenza ASB (Active Safety Brake) obbligatoria proprio a partire dal 2020, l'assistente al mantenimento della corsia di marcia (Lane Keep Assist), l'avviso di superamento del limite di velocità, e l'avviso di collisione con pedoni.

### 1.1 Tipologie di sicurezza

Il miglioramento della sicurezza dei veicoli è stato reso possibile prendendo in considerazione la richiesta dei consumatori circa veicoli robusti e sicuri, ed è proprio la continua ricerca e la continua innovazione ad aver promosso l'introduzione di ulteriori sistemi di sicurezza, alcuni dei quali sono ormai diventati obbligatori. È possibile distinguere sistemi di sicurezza preventiva, attiva e passiva. La sicurezza **preventiva** cerca di evitare o prevenire un incidente in condizioni di guida normali. Rientrano in questa categoria tutti i sistemi che favoriscono il benessere, la

concentrazione di guida, una buona visuale ed altri. La sicurezza **attiva** sfrutta i sistemi all'avanguardia come ABS (Antilock Braking System), EBD (Electronic Brakeforce Distribution) ed ESC (Electronic Stability Control) per ridurre la possibilità che si verifichi un incidente in condizioni di emergenza. La sicurezza **passiva** ha l'obiettivo di ridurre il rischio e la severità delle lesioni. Per ottenere questo risultato è necessario lavorare sull'energia trasferita agli occupanti: la struttura dei veicoli è progettata in maniera tale da assorbire la maggior parte dell'energia cinetica dell'impatto, cercando di minimizzare la quota trasferita agli occupanti. I sistemi di ritenuta, invece, sono progettati in modo tale da garantire il minor danno possibile agli occupanti. I dispositivi di sicurezza passivi includono le cinture di sicurezza, i poggiatesta, gli airbag e il sistema di ritenuta. Vi sono diverse normative riguardo la sicurezza passiva dei veicoli: oltre alle norme omologative, necessarie per introdurre sul mercato un nuovo veicolo, vi sono altri test opzionali ideati da Euro NCAP, programma europeo di valutazione dei nuovi modelli di automobili, che consentono di assegnare una valutazione della sicurezza espressa in stelle per assistere i consumatori ad effettuare un confronto tra i veicoli.

## 1.2 Analisi incidenti

Per definire le condizioni di prova, gli strumenti da analizzare ed i parametri da considerare per poter valutare le prestazioni di un veicolo dal punto di vista della sicurezza, si esegue l'analisi delle caratteristiche degli urti che possono coinvolgerlo. In questa fase si individuano tre tipologie di attività.

**Classificazione delle tipologie di analisi (Accident Type).** Si stabiliscono sulla base delle caratteristiche quali i tipi di urto più frequenti, la tipologia dei mezzi coinvolti e i parametri che ne caratterizzano la severità.

**Tipologie di lesione (Injuries Typology).** Si definiscono in base alla dinamica dell'incidente e solitamente si fa una ripartizione percentuale delle lesioni per segmento corporale identificandone le cause.

**Priorità di intervento (Priorities).** Sulla base delle informazioni raccolte nelle attività precedenti si definiscono le problematiche che necessitano di un intervento prioritario.

## 1.3 Definizione delle prove

In base ai risultati ottenuti dall'analisi sugli incidenti è possibile operare delle scelte inerenti alla definizione delle condizioni di prova. Le procedure di prova si distinguono in tre categorie: prove di normativa, prove di rating e prove del costruttore.

Le **prove di normativa** sono prove di urto dal superamento delle quali dipende l'omologazione del veicolo e quindi la possibilità di essere immesso sul mercato. La definizione del grado di severità delle condizioni di prova è competenza dell'autorità ministeriale, che deve decidere entro quali limiti ha intenzione di proteggere gli utenti dalla strada.

Esistono diverse normative di omologazione che si differenziano in base al Paese in cui l'autoveicolo deve essere immesso in commercio. L'elenco dei regolamenti è il seguente:

- Internazionale
  - ECE (United Nations Economic Commission for Europe);
  - EU (EG-Directive).
  
- Nazionale
  - Stati Uniti (FMVSS) amministrati dalla US Highway Traffic Safety Administration (NHTSA);
  - Canada (CMVSS);
  - China (Guobiao standards);
  - South Korea (KMVSS);
  - Australia (ADR, Australian Design Rules);
  - Japan (Test Requirements and Instructions for Automobile Standards);
  - India (AIS, Automotive Industry Standards, IS Indian Standards).
  
- Provinciale
  - California State, United States (CARB, California Air Resources Board).

Le **prove di rating** consistono in test che permettono di determinare, tra i veicoli che hanno superato le prove di normativa, quelli che presentano le prestazioni di sicurezza passiva più elevate. I risultati ottenuti vengono utilizzati per stabilire un voto finale il quale riassume il grado di sicurezza offerto dal veicolo. Queste prove vengono condotte da enti indipendenti dai costruttori di autoveicoli e i risultati vengono resi pubblici con lo scopo di informare i consumatori. In Europa l'ente che sviluppa questo tipo di test è Euro NCAP, nato dopo il corrispettivo ente Nord Americano USNCAP. Informazioni più dettagliate su questo tipo di prove verranno date nel Capitolo 2.

Le **prove del costruttore** sono test che la casa produttrice decide di eseguire autonomamente su componenti al fine di migliorarne le prestazioni.

## 1.4 Definizione dei criteri di prestazione

Nell'incidentistica stradale si definisce "lesione" un'alterazione fisiologica originata da una sollecitazione meccanica, la cui gravità viene stabilita in base a delle apposite scale mediche, mentre il "criterio di lesione" è un parametro fisico correlato alla severità della lesione stessa. L'approccio biomeccanico presuppone l'ottenimento di curve che definiscano il grado di lesione di un determinato segmento del corpo in base al valore identificativo del parametro fisico rappresentativo del comportamento meccanico di quel tratto del corpo umano. I parametri fisici considerati sono: forze, accelerazioni, deformazioni, momenti, ecc. Si definisce "criterio di prestazione" il valore di un criterio di lesione, misurato su un manichino antropomorfo e biofedele posto all'interno del veicolo sottoposto a prova d'urto, che non deve essere superato. Per ogni tipo di urto, e per ciascun segmento corporeo, vengono definiti i criteri di lesione (Injury Criteria), i massimi valori tollerati dal corpo umano (Human Tolerance Levels) e infine i criteri di prestazione (Performance Criteria) definiti in base alle sollecitazioni rilevate dai manichini e al livello di tolleranza umana.

## 1.5 Scale di severità di lesione

La ricostruzione biomeccanica di un incidente autostradale deve determinare le cause e le conseguenze di una lesione. I criteri di prestazione, "Injury Criteria", consentono di misurare su un ATD (Anthropomorphic Test Device) un criterio di lesione per ottenere una risposta in termini di rischio. La gravità delle lesioni è descritta mediante diverse tipologie di scale di severità: scale mediche, di tipo tendenzialmente anatomiche o tendenzialmente fisiologiche, e particolari criteri di severità. Tra queste le uniche che possono essere utilizzate per definire i criteri di lesione e di prestazione per ogni segmento corporeo sono le scale anatomiche [1]. La scala di severità AIS (Abbreviated Injury Criteria) è la scala anatomica maggiormente utilizzata per identificare la gravità delle lesioni in ambito automobilistico. La prima versione è stata pubblicata nel 1969 negli USA e introdotta nel 1971, tuttavia nel corso degli anni sono stati introdotti importanti aggiornamenti.

Il punteggio assegnato ad una lesione, tramite scala AIS, descrive tre aspetti della lesione mediante sette numeri:

- Genere;
- Posizione;
- Gravità.

Un esempio di punteggio assegnato con la scala AIS ad una lesione è il seguente:

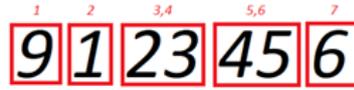


Figura 1.1: Esempio di punteggio scala AIS.

In particolare, una lesione è identificata con sette cifre:

1. Regione del corpo lesionata;
2. Tipo di struttura anatomica;
3. Organo;
4. Lesione specifica;
5. Severità del punteggio.

La regione del corpo è identificata con un numero da 1 a 9, mentre la struttura anatomica è individuata con un numero da 1 a 6, come mostrato nella Tabella ??:

Tabella 1.1: Definizione cifre scala AIS.

CODICE AIS	REGIONE DEL CORPO	TIPO DI STRUTTURA ANATOMICA	ORGANO (ES: NEL CASO DEL TORACE)	LESIONE SPECIFICA
1	Capo	Intero distretto	Cuore	Lacerazione
2	Volto	Vasi	Bronchi	Frattura
3	Collo	Nervi	Diaframma	...
4	Torace	Organi interni	Esofago	
5	Addome	Strutture scheletriche	...	
6	Rachide	Perdita di coscienza		
7	Arto superiore			
8	Arto inferiore			
9	Altri traumi			

La scala di severità AIS, riportata in Tabella 1.2 mostra un punteggio da uno a sei: 1 corrisponde a una lesione meno grave, 6 corrisponde ad una lesione massima.

I valori numerici della scala hanno come scopo quello di definire il livello di severità, non indicano la gravità relativa e non possono essere utilizzati per valutare lesioni multiple. In questo caso, si può utilizzare il valore AIS massimo (definito come MAIS) registrato per una particolare regione del corpo e assumere tale valore come misura della severità complessiva delle lesioni.

Per le lesioni multiple, si utilizza maggiormente un'altra scala, l'ISS (Injury Severity Score). Si tratta di un indice globale per il lesionato e si ricava a partire dall'AIS mediante la seguente formula [2]:

Tabella 1.2: Esempio severità della lesione con scala AIS

PUNTEGGIO AIS	SEVERITÀ DELLA LESIONE	ESEMPIO	AIS% MORTE
1	Minore	Lacerazione superficiale	0
2	Moderata	Sterno fratturato	1 – 2
3	Seria	Frattura aperta dell'omero	8 – 10
4	Severa	Trachea perforata	5 – 50
5	Critica	Lacerazione del fegato con perdita di tessuto	5 – 50
6	Massima	Distacco totale dell'aorta	100
9	Sconosciuta		

$$ISS = AIS_1^2 + AIS_2^2 + AIS_3^2$$

Come si evince dall'uguaglianza, l'ISS è dato dalla somma dei quadrati dei punteggi AIS più elevati nelle tre regioni corporee maggiormente lesionate. A differenza dell'AIS, Injury Severity Score divide il corpo in sei regioni corporee, come illustrato in Tabella 1.3.

Tabella 1.3: Scala IIS

ISS	
1	Capo e collo
2	Volto
3	Torace + rachide
4	Addome + rachide
5	Arti + bacino
6	Altri traumi

Confrontando le due scale, si osserva come l'ISS unifichi alcune regioni del corpo rispetto all'AIS.

In Tabella 1.4, è riportato il rischio di mortalità in funzione del valore di ISS.

## 1.6 Omologazioni

Per poter essere immessa sul mercato, una vettura deve superare le prove di omologazione previste dalle normative vigenti nel Paese in cui viene venduta. Per quanto

Tabella 1.4: Rischio di mortalità - Scala IIS.

ISS	RISCHIO DI MORTALITÀ
1 - 3	0.000
4 - 8	0.001
9 - 14	0.005
15 - 19	0.040
20 - 24	0.080
25 - 29	0.160
30 - 34	0.260
35 - 39	0.370
40 - 44	0.500
45 - 49	0.650
50 - 54	0.850
55 -	1.000

concerne il mercato Europeo, le norme omologative sono stabilite da diverse direttive e regolamenti, il cui scopo è quello di garantire che i veicoli di nuova costruzione rispettino i requisiti minimi previsti dalla legge. Inoltre, i Paesi dell'Unione Europea hanno aderito alla convenzione della Commissione Economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UNECE), le cui direttive prevedono una serie di norme di omologazione che vengono adottate da tutti i 56 paesi membri dell'ECE. L'omologazione viene rilasciata solo se il veicolo, sottoposto alle condizioni di prova previste dalla normativa, soddisfa tutti i criteri di prestazione richiesti. Le norme omologative si differenziano in base al tipo di urto. In particolare, nei paragrafi successivi verranno analizzate le norme riguardanti gli urti frontali (ECE R94 e ECE R137) e gli urti laterali (ECE R95 e ECE R135).

### 1.6.1 ECE R94

L'ECE 94 è la normativa che tratta le disposizioni uniformi relative all'omologazione dei veicoli per quanto riguarda la protezione degli occupanti in caso di collisione frontale. Questo regolamento si applica ai veicoli di categoria M1<sup>1</sup> con massa totale

---

<sup>1</sup>M1: veicoli adibiti al trasporto di persone, che hanno massimo 8 posti a sedere oltre il sedile conducente.

autorizzata non superiore a 2,5 tonnellate. Altri veicoli possono essere approvati su richiesta del costruttore. Gli elementi e le caratteristiche della procedura di prova sono descritti qui di seguito [3]:

**Barriera:** la barriera presenta una faccia anteriore deformabile ed è perpendicolare entro  $\pm 1^\circ$  rispetto alla direzione di marcia del veicolo di prova. È fissata ad una massa non inferiore a  $7 \cdot 10^4$  kg. Il veicolo si sovrappone alla faccia della barriera del  $40\% \pm 20$  mm. La massa del veicolo presentato deve essere la massa a vuoto.

**Regolazioni dell'abitacolo:** il volante deve essere posto in una posizione definita dal produttore oppure, in assenza di raccomandazioni, deve essere posto a metà tra i limiti del suo range di regolazione; i vetri mobili devono essere chiusi; la leva del cambio deve essere in posizione neutra; i pedali devono essere posti nella normale posizione di riposo; le porte devono essere chiuse ma non bloccate; tetti apribili devono essere chiusi; i parasole devono trovarsi nella posizione di riposo; lo specchietto retrovisore interno deve essere nella normale posizione d'uso; i braccioli anteriori e posteriori devono essere abbassati.

**Sedili:** i sedili regolabili longitudinalmente devono essere sistemati in modo che il loro punto H<sup>2</sup> sia nella posizione centrale di marcia; gli schienali se regolabili devono essere impostati in modo che l'inclinazione del tronco sia più vicino possibile a quella raccomandata dal fabbricante o, in assenza di raccomandazioni, a  $25^\circ$  verso la parte posteriore della verticale.

**Anthropomorphic Test Dummy:** su entrambi i sedili anteriori viene installato un ATD corrispondente all'Hybrid III 50° percentile maschio con caviglia a  $45^\circ$ .

**Velocità:** la velocità al momento dell'impatto deve essere di 56 km/h.

Il documento della normativa descrive come devono essere eseguite le procedure di preparazione del veicolo e il posizionamento dei manichini. Inoltre, nell'ECE R94 vengono descritti alcuni parametri biomeccanici utili per valutare i criteri di prestazione:

- L'HPC (Head Performance Criterion) viene calcolato, quando avviene il contatto della testa, per la durata totale tra l'istante di contatto iniziale e l'istante di contatto finale. È soddisfatto quando durante il test non vi è alcun contatto tra la testa e qualsiasi componente del veicolo. Se dovesse verificarsi un contatto, in quel caso l'HPC verrebbe calcolato nel seguente modo:

---

<sup>2</sup>Punto H: è la posizione teorica relativa dell'anca di un occupante, il punto di articolazione tra busto parte superiore del corpo.

$$HPC = (t_1 - t_2) \left[ \frac{1}{(t_1 - t_2)} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5}$$

- $a$ : accelerazione risultante rispetto al COG (center of gravity) della testa espressa in unità di accelerazione di gravità.

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

I valori misurati per l'accelerazione della testa ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) sono filtrati con un CFC (Channel Frequency Class) di 1000.

- $t_1 - t_2$ : intervallo di tempo tra l'inizio del contatto con la testa e la fine della registrazione per cui il valore di HPC è massimo.

I valori di soglia sono rappresentati da  $HPC < 1000$ ,  $A < 1000$  per 3 ms.

Si osservi che nei capitoli seguenti ci si riferirà all'HPC come HIC (Head Injury Criterion) in accordo con la terminologia utilizzata dall'Euro NCAP, in quanto ci soffermeremo principalmente sulle prove di rating di questo ultimo.

- NIC (Neck Injury Criterion) sono i criteri di lesione del collo determinati dal calcolo della forza assiale a compressione  $F_z(-)$ , della forza assiale a trazione  $F_z(+)$  e delle forze di taglio longitudinali  $F_x(+)$  sull'interfaccia testa/collo. I valori misurati di forza assiale e forza di taglio sono filtrate con un CFC di 1000.

I valori limite in questo caso sono determinati dai grafici in Figura 2.2:

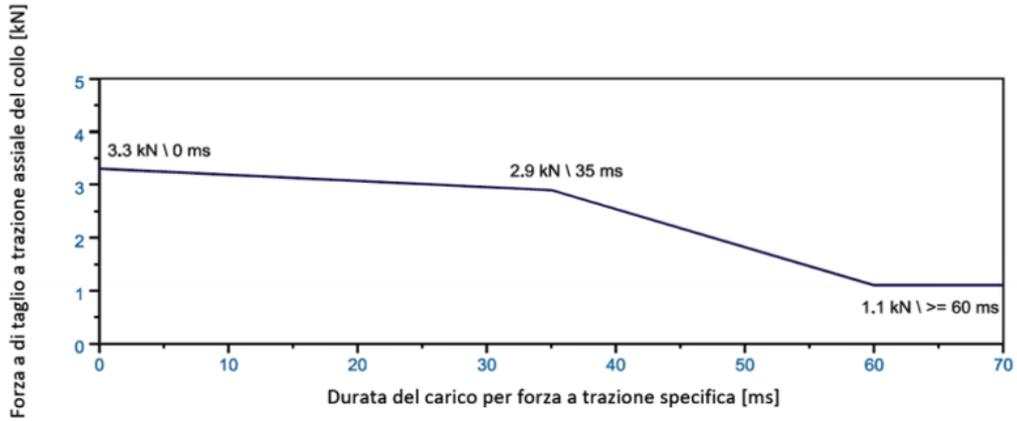
La forza di trazione assiale e la forza di taglio perpendicolare all'interfaccia collo/testa sono misurate con un CFC di 1000.

- Il criterio di compressione del torace (THCC) è indicato dal valore assoluto di compressione del torace tra lo sterno e la colonna vertebrale ed è filtrato con un CFC di 180.

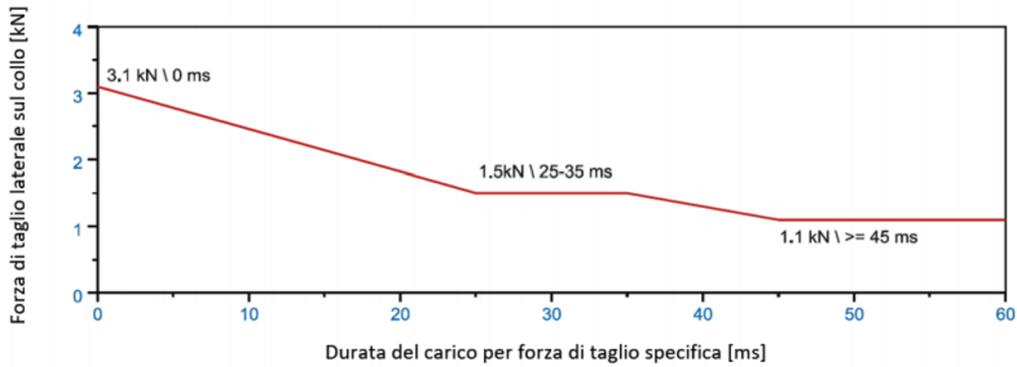
$$THCC \leq 42 \text{ mm}$$

- Il criterio viscoso (VC) è determinato dal prodotto istantaneo della compressione del torace e della velocità di deflessione della costola (ottenuta come differenziazione della compressione) entrambi misurati con un CFC di 180.

$$VC = \max(v(t) \cdot C(t))$$



(a)



(b)

Figura 1.2: (a) e (b) valori limite criteri di lesione del collo (NIC).

- $V(t)$ : velocità di deflessione calcolata;
- $C(t)$ : compressione calcolata;

$$C(t) = \left(\frac{D}{0.14}\right) \quad \text{e} \quad V(t) = \left(\frac{dD}{dt}\right)$$

$$VC = \max\left(\frac{D}{0.14} \frac{dD}{dt}\right)$$

$$VC \leq 1.0 \text{ m/s} \cdot 1.0 \text{ m/s}$$

- Il criterio forza del femore (FFC) è determinato dal carico di compressione trasmesso assialmente su ogni femore dell'ATD misurato con un CFC di 180. Tale parametro non deve eccedere il criterio di forza-tempo mostrato in Figura 1.3.

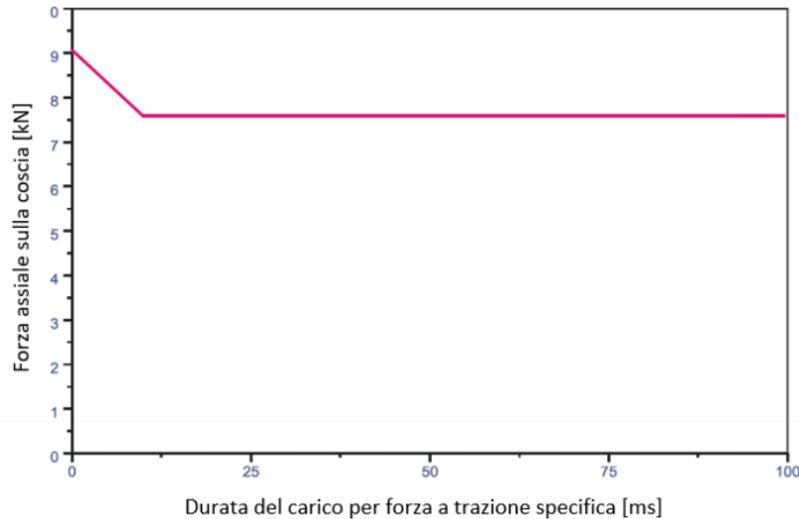


Figura 1.3: valori limite criteri di lesione del femore (FFC).

- Il criterio di compressione della tibia (TCFC) è determinato dal carico di compressione trasmesso assialmente su ciascuna tibia del manichino.

$$TCFC \leq 8 \text{ kN}$$

- L'indice della tibia (TI) è determinato dai momenti flettenti ( $M_X$  e  $M_Y$ ) misurati con un CFC di 600. Questo valore si misura nel seguente modo:

$$TI = \left| \frac{M_R}{(M_C)_R} \right| + \left| \frac{F_Z}{(F_C)_Z} \right|$$

- $M_x$ : momento flettente attorno all'asse  $x$ ;
- $M_y$ : momento flettente attorno all'asse  $y$ ;
- $M_R = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2}$
- $(M_C)_R$ : momento flettente critico. Deve essere pari a 225 N m;
- $F_Z$ : forza assiale di compressione in direzione  $z$ ;
- $(F_C)_Z$ : forza di compressione critica in direzione  $z$ . Deve essere pari a 35.9 kN.

Valore di soglia:

$$TI \leq 1.3$$

Negli altri allegati della norma è mostrata la procedura di disposizione dei manichini, la determinazione del punto H e la strumentazione utilizzata per le prove di misura.

### 1.6.2 ECE R137

Dal 2020, il regolamento ECE R137 è entrato a far parte delle norme omologative dell'Unione Europea, con l'obiettivo di migliorare la valutazione dell'efficacia dei sistemi di ritenuta in urto frontale. Tale regolamento [4], è applicato ai veicoli di categoria M1 con peso massimo ammissibile al di sotto di 3,5 tonnellate nel caso di urto frontale, e prevede una prova a 50 km/h con overlap tra vettura e barriera del 100%.

- La barriera consiste in un blocco di cemento armato largo almeno 3 m e alto 1.5 m, con spessore tale da raggiungere un peso complessivo di almeno 70 tonnellate. La faccia anteriore è verticale e perpendicolare all'asse della corsa, ricoperta da tavole di compensato spesse 20 mm.
- Un manichino corrispondente alle specifiche dell'Hybrid III 50° percentile uomo è posizionato sul sedile guidatore e uno corrispondente alle specifiche dell'Hybrid III 5° percentile donna sul sedile del passeggero.
- Il volante deve trovarsi nella posizione standard definita dal costruttore o, in assenza di indicazioni specifiche, in una posizione intermedia tra i limiti del suo range di movimento. I finestrini e il tettuccio devono essere chiusi; la leva del cambio in posizione neutra, le porte chiuse ma non bloccate.
- Il sedile del guidatore deve essere sistemato in modo tale che il punto H si trovi nella posizione centrale. Il punto H del sedile passeggero, invece, deve trovarsi nella posizione definita dal costruttore o, in assenza di indicazioni specifiche, in una posizione intermedia tra quella centrale e il tutto avanti. Gli schienali, se regolabili, devono essere sistemati in modo tale che l'inclinazione risultante del tronco del manichino sia il più vicino possibile a quella definita dal costruttore o, se non specificato, a 25° indietro rispetto alla verticale.

Il documento della normativa descrive come devono essere eseguite le procedure di preparazione del veicolo e il posizionamento dei manichini. Vengono riportati anche i criteri di prestazione in ambito biomeccanico i quali devono essere necessariamente rispettati per ottenere l'omologazione.

- HPC (Head Performance Criterion) viene calcolato, quando avviene il contatto della testa, per la durata totale tra l'istante di contatto iniziale e l'istante di contatto finale. È soddisfatto quando durante il test non vi è alcun contatto tra la testa e qualsiasi componente del veicolo. Non deve superare il valore 1000 e l'accelerazione risultante della testa non deve superare gli 80 g per più di 3 ms.

$$HPC < 1000$$

$$A < 80 \text{ g per } 3 \text{ ms}$$

- NIC (Neck Injury Criterion) non deve superare i seguenti valori:
  - La forza di trazione assiale sul collo deve essere minore o uguale a 3.3 kN per il 50° percentile uomo e minore o uguale a 2.9 kN per il 5° percentile donna.
  - La forza di taglio all'interfaccia testa/collo non deve superare 3.1 kN per il 50° percentile uomo e 2.7 kN per il 5° percentile donna.
  - Il momento flettente del collo sull'asse  $y$ ,  $M_y$ , non deve superare i 57 N m in estensione, per entrambi i manichini.

### 1.6.3 ECE R95

La normativa ECE R95 [5] contiene disposizioni relative all'omologazione dei veicoli per garantire la protezione degli occupanti in un impatto laterale. Tale regolamento è rivolto ai veicoli M1 e N1<sup>3</sup> in cui il punto R<sup>4</sup> del sedile più basso non dista più di 700 mm dal livello del suolo e con una massa di riferimento 0, massa a vuoto del veicolo, aumentata di 100 kg (ossia la massa dell'ATD e della strumentazione).

Gli elementi e le caratteristiche della procedura di prova sono descritti di seguito:

- La prova viene eseguita con la vettura ferma e una barriera mobile deformabile che muovendosi in direzione perpendicolare all'asse longitudinale della vettura, la impatta alla velocità di 50 km/h.

---

<sup>3</sup>N1: veicoli destinati al trasporto di merci, aventi massa massima non superiore a 3,5 tonnellate.

<sup>4</sup>Punto R: punto di riferimento del sedile si intende un punto di progetto definito dal costruttore del veicolo per ciascuna posizione di seduta e stabilito rispetto al sistema di riferimento tridimensionale.

- La barriera deformabile ha una massa totale di  $950 \pm 20$  kg che include due parti: un dispositivo d'urto costituito da 6 blocchi di alluminio a nido d'ape, ai quali sono fissati anteriormente e posteriormente delle piastre di alluminio e un carrello sul quale si monta il dispositivo d'urto. Il piano verticale longitudinale mediale della barriera deve essere perpendicolare al piano verticale longitudinale mediale del veicolo.
- Un manichino corrispondente alle specifiche dell'EuroSID-2 50° percentile maschio viene posizionato sul sedile anteriore lato urto.
- Temperatura: la temperatura dell'ATD al momento dell'impatto laterale deve essere di  $22 \pm 4$  °C.
- Velocità: la velocità della barriera mobile al momento dell'impatto deve essere di  $50 \pm 1$  km/h.

La normativa descrive come devono essere eseguite le procedure di preparazione del veicolo e il posizionamento dei manichini. Vengono poi riportati i seguenti criteri di prestazione in ambito biomeccanico che devono essere necessariamente rispettati per poter ottenere l'omologazione.

- HPC (Head Performance Criterion) deve essere minore o uguale a 1000; quando non c'è contatto tra la testa del manichino e la vettura esso non viene misurato o calcolato, ma si registra "No Head contact".
- RDC (Rib Deflection Criterion) è pari al valore massimo di deflessione su ogni costola determinato dai trasduttori di spostamento del torace, filtrato alla frequenza di canale di 180 Hz. Questo valore deve essere minore o uguale a 42 mm.

$$RDC \leq 42 \text{ mm}$$

- VC (Criterio viscoso):

$$VC \leq 1.0 \text{ m/s}$$

- Criterio di protezione dell'addome (APF): il picco della forza addominale è il valore massimo della somma delle tre forze ( $x, y, z$ ) misurate dai trasduttori montati 39 mm sotto la superficie del lato incidente.

$$APF \leq 2.5 \text{ kN}$$

- PSPF (Pubic Symphysis Peak Force): criterio di prestazione del bacino. È la forza massima misurata da una cella di carico sulla sinfisi pubica del bacino. Questa è misurata con un CFC di 600.

$$PSPF \leq 6 \text{ kN}$$

Negli altri allegati della norma sono presenti descrizioni tecniche sull'ATD e sulla barriera utilizzata.

#### 1.6.4 ECE R135

La normativa ECE 135 [6] contiene disposizioni relative all'omologazione dei veicoli per quanto riguarda l'urto laterale palo. I veicoli interessati sono quelli di categoria M1 con massa fino a 3500 kg, e veicoli di categoria N1 in cui l'angolo compreso tra un piano orizzontale passante per il centro dell'assale anteriore e un piano trasversale angolare passante per il centro dell'assale anteriore e per il punto R del sedile del guidatore è minore di 22° oppure, il rapporto tra la distanza del punto R del sedile guidatore dal centro dell'assale posteriore e la distanza del punto R del sedile guidatore dal centro dell'assale anteriore è minore di 1,30.

- La prova viene eseguita alla velocità di 32 km/h con urto sul lato guidatore contro un palo di diametro pari a 254 mm. La direzione con cui la vettura si muove, deve formare un angolo di 75° rispetto all'asse longitudinale del veicolo.
- Sul sedile guidatore si posiziona un manichino corrispondente alle specifiche del WorldSID 50° percentile maschio.

La normativa descrive come devono essere eseguite le procedure di preparazione del veicolo e il posizionamento dei manichini. Vengono inoltre riportati i seguenti criteri di prestazione in ambito biomeccanico i quali devono essere necessariamente rispettati per poter ottenere l'omologazione:

- HPC (Head Performance Criterion) non deve essere superiore a 1000.
- SPC (Shoulder Performance Criterion) misura la massima forza laterale mediante una cella di carico montata tra l'articolazione della spalla e la costola della spalla. Questa è filtrata con un CFC di 600 Hz.

$$SPC \leq 3 \text{ kN}$$

- THCC (Thorax Compression Criterion) misura la deflessione massima delle costole toraciche. Questa misura, si ottiene con un sensore di flessione e viene filtrata con un CFC di 600 Hz.

$$THCC \leq 55 \text{ mm}$$

- APC (Abdominal Performance Criterion) misura la massima deflessione delle costole addominali con un sensore di flessione, filtrando con un CFC di 600 Hz.

$$APC \leq 65 \text{ mm}$$

- L'accelerazione risultante nella zona bassa della spina dorsale non deve superare il valore di 75 g per più di 3 ms.
- PSPF (Pubic Symphysis Peak Force)

$$PSPF \leq 3.36 \text{ kN}$$

# Capitolo 2

## Euro NCAP

Per garantire la sicurezza degli autoveicoli oltre alle prove omologative obbligatorie, descritte nel precedente capitolo, vi sono ulteriori test di rating, differenti in base al mercato a cui si fa riferimento, che consentono di effettuare una valutazione più severa della sicurezza degli autoveicoli, con lo scopo di minimizzare gli incidenti stradali e di conseguenza il numero di decessi. In questo capitolo si fa riferimento agli standard definiti dall'ente Euro NCAP per il mercato Europeo.

### 2.1 Prove di rating Euro NCAP

Il programma europeo di valutazione delle nuove auto (Euro NCAP), fondato nel 1997 e sostenuto dall'Unione Europea, ha come obiettivo definire la modalità di valutazione della sicurezza passiva dei veicoli omologati mediante l'introduzione di specifici protocolli di prova. Il protocollo di valutazione originale dell'Euro NCAP è stato sviluppato dal TRL e dal Vehicle Safety Consultants Ltd; successive versioni del protocollo sono state redatte dall'Euro NCAP Secretariat introducendo dei cambiamenti che hanno portato allo schema di valutazione complessivo. Il rating fornito da Euro NCAP è espresso con un punteggio che va da 0 a 5 stelle basato sui risultati ottenuti in quattro aree di valutazione delle quali sono stati rilasciati dei documenti specifici [7]:

- Assessment protocol – Adult Occupant Protection (AOP);
- Assessment protocol – Child Occupant Protection (COP);
- Assessment protocol – Vulnerable Road User Protection (VRU);
- Assessment protocol – Safety Assist (SA).

La valutazione complessiva tiene in considerazione il punteggio ottenuto in ognuna di queste sezioni, il quale viene normalizzato sulla base del massimo punteggio



ottenibile. Si ottiene una valutazione complessiva di 5 stelle nel momento in cui si raggiunge in punteggio massimo in ognuna di queste quattro aree. I protocolli e i criteri di valutazione forniti dall'Euro NCAP devono riflettere lo stato dell'arte per cui sono in continua fase di sviluppo. Nella valutazione possono essere inclusi nuovi test e, se necessario, i più vecchi possono essere aggiornati.

### 2.1.1 Adult occupant protection

Oltre ai quattro protocolli di valutazione elencati in precedenza, viene fornito un documento separato che descrive il metodo e i criteri in base ai quali viene valutata la valutazione di sicurezza globale sulla base delle prestazioni della vettura in ciascuna delle aree di valutazione di cui sopra. L' Adult Occupant Protection (AOP) riguarda le valutazioni effettuate nell'area della Protezione degli occupanti adulti, in particolare il punteggio per questa sezione si ottiene dai seguenti test [8]:

- Mobile Progressive Deformable Barrier (MPDB),
- Full Width Rigid Barrier,
- Side Mobile Barrier,
- Side Pole,
- Far Side Impact,
- Whiplash.

#### Impatto frontale

**Mobile progressive deformable barrier (MPDB)** introdotto da gennaio 2020, il test MPDB simula la collisione frontale tra due vetture a velocità moderatamente elevate. In quasi tutti gli incidenti di questo tipo, solo una parte della larghezza frontale del veicolo viene coinvolta, poiché le due vetture sono disassate. I dati

sugli incidenti mostrano che disassamenti moderati sono i più comuni in Europa. In questo test, il veicolo utilizzato viaggia ad una velocità di 50 km/h con una sovrapposizione del 50% contro una barriera deformabile montata su un carrello da 1400 kg, anch'esso in movimento con una velocità di 50 km/h [9].

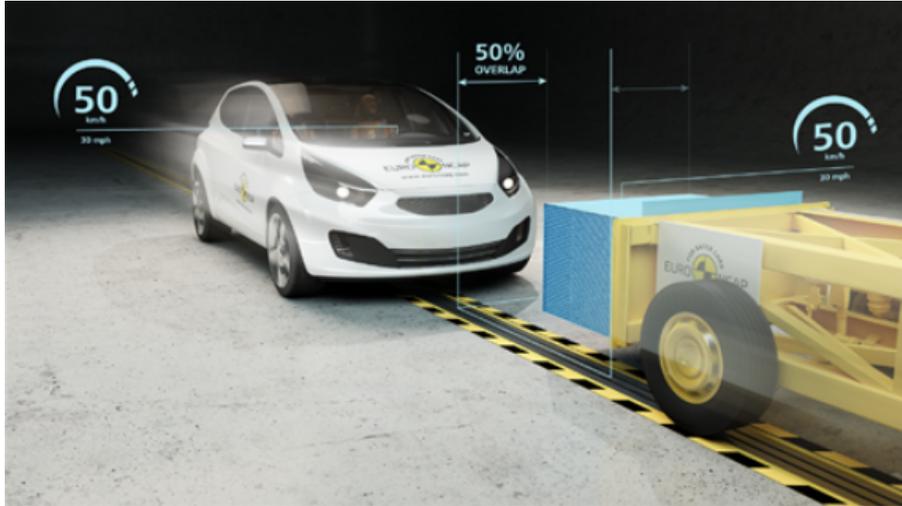


Figura 2.1: test MPDB Euro NCAP.

La barriera simula l'estremità anteriore di un altro veicolo. In questa prova vengono utilizzati due manichini "uomo adulto", in particolare sul sedile conducente viene posizionato il THOR, e due manichini "bambino" Q6 e Q10 sui sedili posteriori. Manichini, veicolo e carrello sono dotati di sensori che rilevano le forze e le decelerazioni a cui sarebbero sottoposti gli occupanti. Il THOR-50M, è un dispositivo di test altamente sofisticato e sensibile, sviluppato per valutare con precisione le lesioni alla testa, al collo, al torace e all'addome. Il test valuta diversi aspetti della sicurezza di un'auto: le forze d'urto devono essere efficacemente orientate sulle parti del veicolo in cui l'energia può essere facilmente assorbita; la zona di assorbimento di impatto frontale deve collassare in modo controllato, limitando quanto più possibile la deformazione dell'abitacolo. Allo stesso tempo, non deve esporre gli occupanti a livelli di decelerazione pericolosamente elevati. Per evitare lesioni importanti, il movimento all'indietro del volante e dei pedali deve essere limitato. Inoltre, il modo in cui il carrello decelera nell'impatto e i danni causati dal veicolo di prova alla barriera deformabile indicano l'efficienza con cui i due elementi hanno interagito. Veicoli che portano a decelerazioni estremamente elevate del carrello o che causano una deformazione localizzata molto marcata vengono indicati come aventi una "compatibilità" scarsa.

**Full width rigid barrier** introdotto nel 2015, serve a simulare una vettura più rigida, poiché le strutture veicolo negli ultimi anni sono diventate più rigide. Una

migliore rigidità strutturale si traduce in una maggiore decelerazione dei segmenti del corpo, che deve essere gestita con l'impiego di sistemi di ritenuta sui sedili anteriori e posteriori durante l'impatto. Queste decelerazioni possono causare lesioni gravi soprattutto al torace dei passeggeri più vulnerabili, piccoli o giovani. In questo tipo di test, Euro NCAP testa la vettura facendola impattare contro una barriera rigida sovrapponibile alla velocità di 50 km/h. All'interno della vettura, sono posti due manichini Hybrid III 5° percentile donna, di cui uno posizionato sul sedile conducente e l'altro sul sedile posteriore. Il test intende valutare la sicurezza dei sistemi di ritenuta anteriore e posteriore. Le decelerazioni del torace e il grado di deflessione del torace sono soggetti a limiti severi e questo incoraggia i produttori nell'adozione di sistemi di ritenuta più sofisticati [10].



Figura 2.2: test Full Width Rigid Barrier Euro NCAP.

### Impatto laterale

**Side mobile barrier** introdotto nel 1997 e aggiornato nel 2015, in questo test Euro NCAP proietta una barriera mobile deformabile contro la fiancata della vettura di prova alla velocità di 50 km/h. All'interno della vettura vengono posizionati un manichino WorldSID 50° percentile sul sedile del conducente e due manichini "bambino", Q6 e Q10, collocati nei rispettivi sistemi di ritenuta sul sedile posteriore. Il test ha come scopo quello di garantire che le parti più vulnerabili del corpo siano adeguatamente protette. A questo proposito, sono state rafforzate le strutture intorno al montante scocca (tra le portiere), l'adozione di airbag laterali o a tendina e lo sviluppo di strutture di assorbimento energia più sofisticate nei sedili e nei pannelli portiera. I tempi e l'intervento degli airbag devono essere controllati attentamente per garantire la migliore protezione possibile [11].



Figura 2.3: test Side impact Euro NCAP.

**Side-pole** introdotto nel 2001 e aggiornato nel 2015, il test Euro NCAP riproduce l’urto laterale di una vettura contro un palo rigido avente diametro di 254 mm alla velocità di 32 km/h. La vettura è posizionata perpendicolarmente alla direzione di movimento, oppure, a partire dal 2015, con un angolo di  $15^\circ$  rispetto alla perpendicolare della direzione di movimento. All’interno della vettura viene posizionato un solo manichino WorldSID 50° percentile uomo sul sedile conducente. Il test ha come scopo valutare la protezione offerta dalla vettura per il capo del conducente. Essendo il carico sulla vettura così localizzato, la deformazione potrebbe essere elevata e il palo potrebbe penetrare molto nell’abitacolo. Senza una protezione efficace, il palo colpirebbe la testa del conducente causando un trauma grave. Gli airbag testa, spesso airbag a tendina montati al di sopra dei finestrini, ma a volte anche airbag torace/testa montati nel sedile, sono diventate soluzioni comuni che necessitano di una grande cura [12].

**Far side impact** introdotto nel 2020, il test cerca di affrontare il problema degli impatti “da lontano”. Quasi la metà degli occupanti feriti in impatti laterali si trova dalla parte opposta rispetto alla persona colpita. Questo tipo di incidenti, possono provocare lesioni gravi, a seconda di quanto il conducente si muova lateralmente nell’impatto e del fatto che un altro occupante sia seduto o meno sul sedile del passeggero. Attualmente, sono stati introdotti dei dispositivi per ridurre gli infortuni in questi incidenti. Si tratta di un airbag centrale, posizionato verticalmente tra i due occupanti anteriori al fine di limitare lo scostamento dell’occupante più lontano e proteggere dagli urti reciproci tra gli occupanti dei sedili anteriori. Nel caso di veicoli dotati di questo dispositivo, Euro NCAP installa due occupanti dei sedili anteriori nel Side Mobile Barrier e nel Side Pole con lo scopo di dimostrare che la



Figura 2.4: test side-pole Euro NCAP.

soluzione proposta risulta efficace per gli impatti da entrambi i lati e riduce l'interazione tra gli occupanti. Ulteriori test vengono effettuati sulla carrozzeria completa del veicolo agganciata ad una slitta, la quale replica le accelerazioni sperimentate dal veicolo nei test laterali e palo, esponendo un solo manichino seduto sul lato opposto. In entrambe le prove in slitta viene rilevato lo "scostamento" del manichino, e allo stesso tempo il manichino rileva forze e decelerazioni, in particolare nella testa, nel collo, nel torace e nell'addome [13].

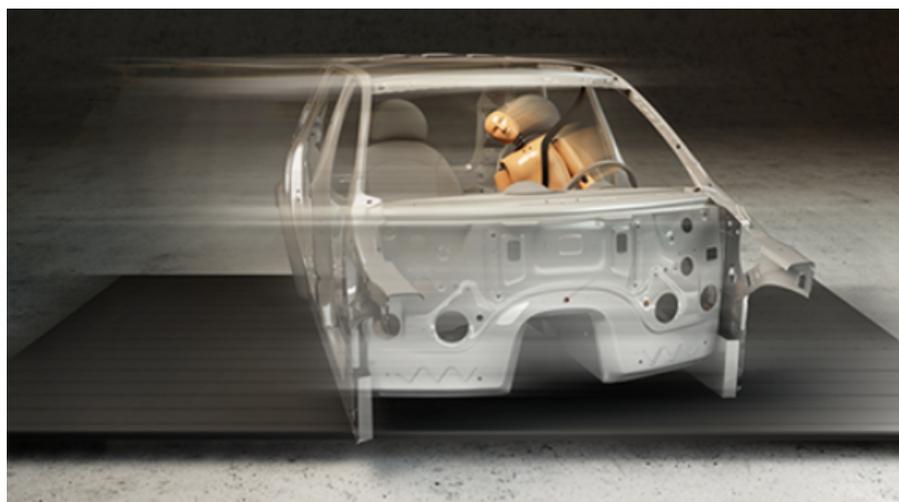


Figura 2.5: test far side Euro NCAP.

## Impatto da tamponamento

**Whiplash** introdotto nel 2009, il test prevede delle prove dinamiche su slitta per valutare l'efficacia della protezione offerta da poggiatesta e sedile. In particolare, le prove dinamiche effettuate sono tre, in cui si intendono rappresentare le forze d'urto responsabili delle lesioni e valutare le proporzioni geometriche dei poggiatesta anteriori e posteriori. La valutazione delle proporzioni geometriche intende stabilire se il poggiatesta è posizionabile in modo da proteggere efficacemente il capo impedendone il movimento eccessivo. Le prove dinamiche con l'impiego di una slitta indicano se il sedile e il poggiatesta funzionano adeguatamente nell'offrire una valida protezione contro il colpo di frusta, in scenari di collisione tipici [14]

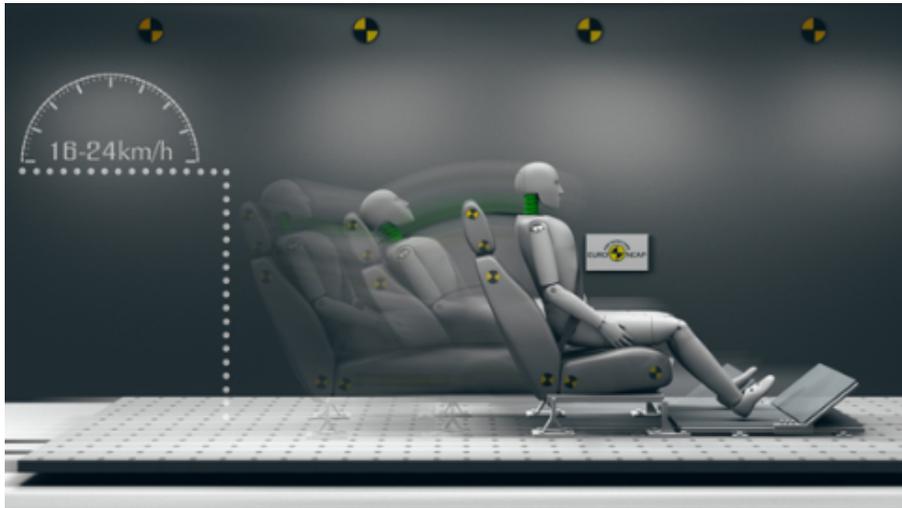


Figura 2.6: test far whiplash Euro NCAP.

### 2.1.2 Child occupant protection

La valutazione circa la sicurezza dei bambini viene effettuata considerando tre aspetti principali:

- La protezione offerta dai sistemi di ritenuta nei test di impatto frontale e laterale;
- La capacità del veicolo di accogliere sistemi di ritenuta per i bambini di varie dimensioni;
- La disponibilità di predisposizioni per il trasporto sicuro di bambini all'interno della vettura.

Nel 2003 Euro NCAP ha introdotto il rating sulla protezione dei bambini negli autoveicoli per fornire informazioni più chiare ai consumatori sui risultati di questi

test. Nell'ambito di questa valutazione, Euro NCAP ha utilizzato manichini di 18 mesi e di 3 anni, collocati nei sistemi di ritenuta per bambini (CRS) raccomandati dai produttori, nei test di impatto frontale e laterale. Nel 2009 il punteggio relativo alla protezione dei bambini entra a far parte del sistema di rating complessivo [15].

Successivamente si è iniziato a valutare la capacità di un veicolo di ospitare in modo sicuro e corretto un'ampia gamma di CRS; proprio per questo motivo viene considerata la cosiddetta "top pick list" (TPL) in cui sono presenti i più comuni sistemi di ritenuta per bambini disponibili sul mercato europeo. Attualmente la protezione dei bambini viene valutata in statica e dinamica con prove su TPL. A partire dal 2016, la parte relativa ai test dinamici è stata rivista sostituendo i manichini bambini di 18 mesi e 3 anni con manichini rispettivamente di 6 e 10 anni. Vengono effettuate prove di urto frontale e laterale, e se i valori registrati di movimento della testa, carico sul collo e di accelerazione del torace sono sufficientemente bassi, se il manichino non viene espulso dal seggiolino e se non viene a contatto con le strutture della vettura, Euro NCAP premia il veicolo. Per quanto riguarda la predisposizione del veicolo, viene attribuito punteggio se nella vettura sono presenti degli attacchi ISOFIX, etichettature "I-Size", interruttore per disabilitare gli airbag anteriori con chiare istruzioni per l'utente e seggiolini integrati.



Figura 2.7: CRS installation check.

Infine, per attribuire un punteggio a questa sezione, vengono eseguite delle prove su una serie di seggiolini noti in modo da verificarne l'installazione semplice e sicura nella vettura di prova. Sono oggetto di valutazione la lunghezza della cintura di sicurezza, la posizione della fibbia della cintura, l'accessibilità dell'ancoraggio ISOFIX e la stabilità del sistema di ritenuta del bambino.

### 2.1.3 Vulnerable road user protection

Attraverso questi test Euro NCAP valuta la capacità della vettura di proteggere gli occupanti, ma anche verificare il modo in cui il veicolo protegge gli utenti vulnerabili della strada, come i pedoni e i ciclisti che potrebbero essere coinvolti nell’impatto. Nei test effettuati si valuta il rischio di lesioni alla testa, al bacino, alle cosce e ai polpacci. I veicoli che mostrano prestazioni soddisfacenti possono guadagnare ulteriori punti se adottano un sistema di frenata automatica di emergenza (AEB) in grado di riconoscere la presenza di un pedone o un ciclista sulla strada [16].

### 2.1.4 Safety assist

Quest’area di valutazione è stata introdotta di recente e in essa si vanno a classificare tutti i sistemi di mitigazione degli urti. I test vengono effettuati sulle principali tecnologie di assistenza al conducente in grado di promuovere una marcia sicura, evitare incidenti e diminuire le lesioni. Euro NCAP valuta la funzionalità e le prestazioni di questi sistemi in condizioni di guida normale e in scenari di impatto tipici [17].

## 2.2 Evoluzione di Euro NCAP

Dal 1997 ad oggi, Euro NCAP ha investito milioni di euro per testare numerosi veicoli contribuendo a salvare vite umane. Rispetto ai test iniziali sono stati fatti numerosi miglioramenti per ciò che riguarda la sicurezza, cambiando il design dei veicoli, aggiungendo airbag, includendo allarmi acustici per l’allacciamento delle cinture, tutti finalizzati a ridurre il numero di incidenti [18]. Grazie all’azione di Euro NCAP nel campo automobilistico, la domanda di sicurezza da parte degli utenti è aumentata e di conseguenza l’insistente competizione tra i costruttori sta portando ad un continuo miglioramento per la sicurezza delle vetture. A tal proposito, le modifiche imposte da Euro NCAP sono in continua evoluzione aumentando i requisiti minimi per il raggiungimento delle cinque stelle. In particolare, gli aggiornamenti dei protocolli esistenti e la pubblicazione di nuovi, avviene in seguito al lavoro svolto dal Rating Group di Euro NCAP, un’assemblea temporanea delle principali parti interessate rappresentate nel Consiglio di amministrazione di Euro NCAP. Ogni cinque anni viene pubblicata una roadmap in cui vengono inserite le linee guida sugli sviluppi futuri del programma, in modo che anche le case produttrici possano aggiornarsi su eventuali nuovi metodi di valutazione. Uno degli effetti principali di questi aggiornamenti è quello di indurre i costruttori ad offrire le più avanzate tecnologie di sicurezza come standard su tutti i segmenti di auto [19].

Nella roadmap pubblicata per il quinquennio 2020-2025, riportata in Tabella 2.1, viene discussa l’introduzione nel programma di rating di nuovi ADAS (Advanced Driver Assistance System) e tecnologie anticollisione, grazie alle quali è possibile

migliorare la sicurezza stradale. Statisticamente, la maggior parte degli incidenti risultano causati da errori umani e distrazione alla guida, per questo motivo Euro NCAP prevede degli incentivi per l'introduzione di tecnologie driver monitoring, in grado di rilevare situazioni di guida critiche e avvisare il conducente del pericolo. L'introduzione di dispositivi di sicurezza in grado di sterzare automaticamente in caso di pericolo, consentirebbero una notevole riduzione in numero e gravità di urti frontali o di incidenti che coinvolgono gli utenti vulnerabili della strada. Questi sistemi risultano essere ancora poco diffusi al momento, nonostante l'importante avanzamento tecnologico degli ultimi tempi. A tal fine, Euro NCAP valuta la possibilità di introdurli nello schema di rating a partire dal 2022. Altro sistema di assistenza che ricopre un ruolo importante riguarda la frenata (frenata autonoma di emergenza – AEB) introdotto nel 2014, in un primo momento per lo scenario di urto posteriore e successivamente per l'attraversamento dei pedoni. Anche in questo caso Euro NCAP prevede delle evoluzioni, in particolare in tre scenari diversi:

- Incidenti in retromarcia che coinvolgono pedoni: è prevista l'introduzione di questo scenario che coinvolge gli utenti vulnerabili della strada entro il 2020.
- Collisioni che avvengono agli incroci a causa di mancate precedenza o durante la svolta: anche l'introduzione di questo è prevista entro il 2020.
- Collisioni frontali: i test per questo scenario sono previsti a partire dal 2022.

Inoltre, Euro NCAP in questa roadmap prevede l'inserimento degli incentivi per sistemi di comunicazione v2x a partire dal 2024. Si tratta di moderni sistemi wireless che consentono ai veicoli di scambiare informazioni con altri veicoli o con le infrastrutture, in modo da rilevare la presenza di ostacoli prima che questi possano essere individuati dai sensori ottici posti nell'autoveicolo. In base ai dati rilevati, l'auto può avvertire il conducente di un imminente pericolo e se necessario è possibile interagire con i sistemi di frenata autonoma per evitare la collisione. Altre innovazioni previste, come possiamo vedere nella timeline in Tabella 2.1, sono: sistemi di protezione per colpo di frusta, rivisitazione dei sistemi di protezione di pedoni e ciclisti, rilevazione della presenza di bambini in auto. In particolare, quest'ultima innovazione può essere utile nei casi di abbandono di bambini piccoli in auto, permettendo così di ridurre, se non evitare, questo tipo di decessi.

### **2.2.1 Ultima revisione rating 2020**

Ogni due anni, il programma europeo di valutazione delle auto nuove aggiorna e rafforza i suoi protocolli di prova. Quest'anno sono stati introdotti nuovi test per rispondere ad alcune esigenze nella protezione degli occupanti, migliorare la protezione post-incidente e promuovere l'ultima tecnologia avanzata di assistenza alla guida. Un cambiamento chiave riguarda l'implementazione di una nuova barriera

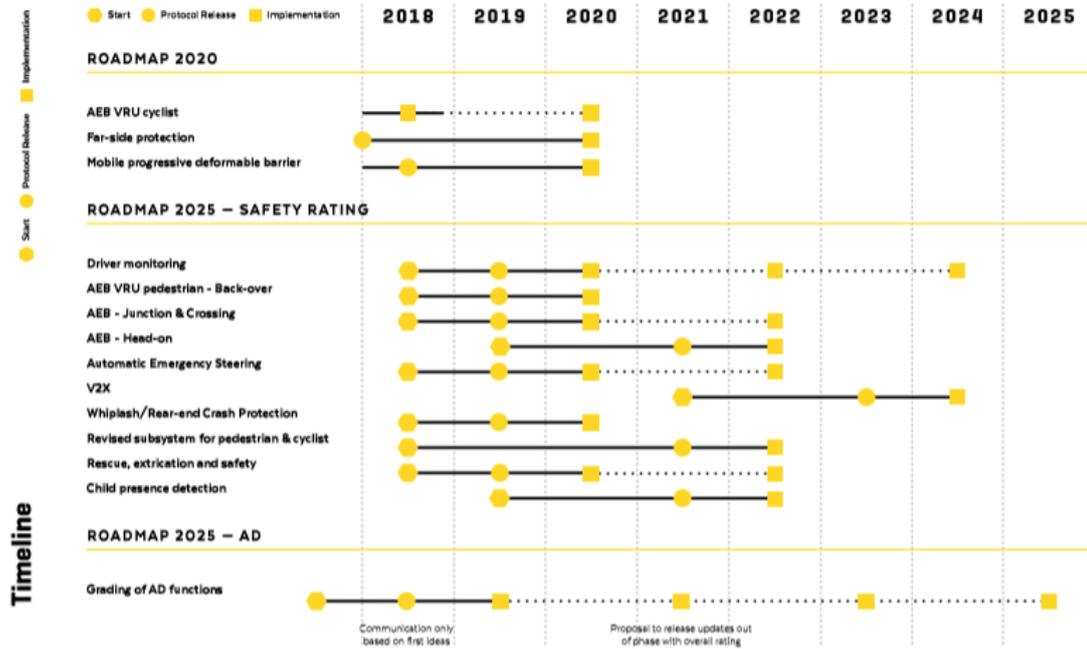


Tabella 2.1: Timeline roadmap Euro NCAP dal 2018 al 2025.

mobile (MPDB) per il crash test frontale, in sostituzione al test ODB, utilizzato da Euro NCAP negli ultimi 23 anni. Questo nuovo crash test non solo valuta la protezione degli occupanti all'interno dell'auto, ma valuta anche il modo in cui le strutture front-end delle auto contribuiscono alle lesioni nel partner di collisione. Importanti innovazioni riguardano la barriera mobile deformabile progressiva e il metodo unico per valutare la compatibilità dei veicoli, nonché l'adozione del manichino di prova "THOR". Gli impatti collaterali rappresentano la seconda più alta frequenza di decessi o lesioni gravi. Gli ultimi aggiornamenti riguardanti quest'area di valutazione della sicurezza includono adeguamenti della velocità e della massa della barriera, aumentando la gravità del test. Più significativamente, Euro NCAP valuta per la prima volta la protezione dagli impatti laterali, concentrandosi sulla protezione del conducente e sulla potenziale interazione tra conducente e passeggero anteriore. Con quest'ultimo test, la protezione offerta dalle contromisure nuove per il mercato come gli airbag centrali può essere adeguatamente verificata. Euro NCAP continua a testare l'ultima generazione di sistemi di prevenzione degli incidenti e assistenza alla guida. Si aggiungono nuovi scenari di test per la valutazione della tecnologia AEB per le auto e gli utenti vulnerabili della strada, tra cui situazioni di ripiegamento oppure la svolta da un incrocio. Inoltre, viene intrapreso il primo passo per valutare i sistemi di monitoraggio circa lo stato del conducente, progettati per rilevare l'affaticamento e la distrazione del conducente, nell'ambito della valutazione del sistema di assistenza alla sicurezza. Anche la sicurezza

post-incidente gioca un ruolo fondamentale nella sopravvivenza agli incidenti. In collaborazione con CTIF, International Association of Fire & Rescue Services, Euro NCAP ha sviluppato nuove regole di rating per promuovere una migliore sicurezza post-incidente. I produttori saranno ricompensati nel momento in cui le informazioni sul salvataggio risultano accurate e facilmente disponibili. Euro NCAP verifica inoltre la facilità di estrazione, le maniglie delle porte elettriche, ecc. E supporta le funzioni avanzate di eCall. Questi cambiamenti rappresentano i pilastri principali dei nuovi protocolli Euro NCAP 2020. L'impatto di questi aggiornamenti, così come alcune modifiche minori, sarà significativo. Pertanto, i consumatori dovranno fare attenzione nel confrontare i risultati più recenti con le valutazioni degli anni precedenti [20].

## 2.3 Antropomorphic test device

Il Crash Test Dummy è uno strumento di prova calibrato che viene utilizzato per misurare il potenziale di lesioni umane in incidenti stradali. L'ATD simula il comportamento del corpo umano e mediante sensori e trasduttori montati su di esso è in grado di fornire una risposta in termini di forze (di schiacciamento, piegamento o torsione del corpo), di accelerazione e di momenti generati durante un incidente. Per ogni tipologia di impatto si utilizza un ATD differente sia sotto il punto di vista meccanico/sensoristico che per quanto riguarda le dimensioni espresse in percentili. I manichini di distinguono in [21]:

- 5° percentile: simula una donna di bassa statura con altezza di 152 cm, peso di 50 kg, ed è così chiamato in quanto il 5% della popolazione occidentale sta al di sotto della sua taglia.
- 50° percentile: si riferisce ad un uomo medio con altezza di 175 cm e peso di 77 kg, in questo caso il 50% della popolazione occidentale sta al di sotto della sua taglia.
- 95° percentile: rappresenta un uomo di altezza 188 cm e con peso di 100 kg, il 95% della popolazione occidentale sta al di sotto della sua taglia.

I sensori principali utilizzati negli ATD sono:

- **Accelerometri:** si tratta di una resistenza che si modifica per effetto dell'accelerazione dovuta all'impatto. Il cambiamento di resistenza si traduce in una variazione di tensione; a ciascun valore di tensione corrisponde un valore di accelerazione. È fondamentale conoscere non solo il valore assoluto di accelerazione ma anche il tempo in cui essa è applicata;
- **Celle di carico:** costituite da una o più resistenze che comprimendosi generano una tensione;

- **Sensori di compressione del torace:** esistono diverse tipologie e servono a valutare la compressione del torace e la sua velocità dovuta in parte ai sistemi di ritenuta.

Quest'ultima tipologia di sensori sarà oggetto di studio nel seguente lavoro di tesi svolto presso il Centro Sicurezza Fiat di Orbassano.

### 2.3.1 Cenni storici ATD

Le origini dello studio e dello sviluppo dei crash dummies risale alla fine del 1800. Nel 1869 Mary Ward fu la prima vittima registrata di incidente automobilistico, a Parsonstown in Irlanda. Alcuni anni più tardi, nel settembre 1899, Henry Bliss "passò alla storia" come la prima vittima di un incidente automobilistico nel Nord America, dopo che fu investito mentre scendeva da un tram a New York. Da quel giorno, oltre 20 milioni di persone in tutto il mondo hanno perso la vita a causa di incidenti automobilistici. Il bisogno di un mezzo per analizzare e attenuare gli effetti degli incidenti stradali sul corpo umano si sviluppò rapidamente subito dopo la commercializzazione dell'automobile (intorno al 1890) e quando l'auto diventò significativa nella vita quotidiana, verso il 1930, il numero di morti per incidente stava raggiungendo una quota preoccupante. I tassi di mortalità superarono i 15,6 incidenti ogni 100 milioni di miglia per veicolo e continuavano a crescere; i progettisti di veicoli interpretarono questi dati come una chiara indicazione della necessità di fare delle ricerche per rendere più sicuri i loro prodotti. Nel 1930, l'interno di un'auto non era un luogo sicuro neanche in caso di collisione a velocità ridotta. I cruscotti erano costruiti in metallo rigido, il piantone dello sterzo non era pieghevole e ovunque vi erano pomelli, pulsanti e leve sporgenti. Non si conoscevano le cinture di sicurezza e in un impatto frontale gli occupanti venivano scagliati contro il parabrezza, lasciando poche speranze di evitare gravi ferite o di morire. La struttura stessa del veicolo era rigida, e le forze d'urto erano trasmesse direttamente agli occupanti del veicolo.

La Wayne State University di Detroit fu la prima a iniziare un intenso lavoro di raccolta dati riguardo gli effetti sul corpo umano dovuti a scontri a velocità elevata. Sul finire degli anni Trenta non vi erano però risultati affidabili circa le risposte del corpo umano sottoposto ad estreme sollecitazioni fisiche, e non vi erano nemmeno strumenti adatti a misurare tali risposte. La biomeccanica era un campo della scienza allo stadio iniziale. Era quindi necessario utilizzare diversi soggetti per costruire i primi set di dati. I primi soggetti utilizzati per i test furono dei cadaveri umani. Essi venivano usati per ottenere informazioni fondamentali circa la capacità del corpo umano di resistere alle forze di schiacciamento e di strappo che si verificavano solitamente negli incidenti ad alte velocità. Per finalità simili, si facevano cadere dei cuscinetti a sfera d'acciaio sul cranio, oppure si lanciavano i corpi giù nei pozzi degli ascensori inutilizzati contro lastre di acciaio. Inoltre, cadaveri con rudimentali accelerometri venivano legati all'interno delle automobili

e sottoposti a collisioni frontali e a rollover. Ad ogni modo, lavorare con i cadaveri presentava tanti problemi non solo per questioni etiche e morali relative al lavoro con i morti, ma anche problemi di ricerca. La maggior parte dei cadaveri disponibili erano adulti anziani e di razza caucasica, morti per cause non violente; essi non rappresentavano una parte omogenea delle vittime per incidente. Le vittime per incidente non potevano essere utilizzate poiché ogni dato raccolto con gli esperimenti poteva essere compromesso dalle precedenti lesioni del cadavere [22].

Le informazioni raccolte dalla ricerca sui cadaveri, erano già state usate per la costruzione di simulacri umani dal 1949, quando "Sierra Sam" fu creato da Samuel W. Alderson ai Laboratori di Ricerca Alderson (ARL) e dalla Sierra Engineering Co. per testare i seggiolini eiettabili per gli aerei e i sistemi di trattenuta per i piloti. Agli inizi degli anni Cinquanta, Alderson e Grunman produssero un manichino che venne usato per effettuare crash test sia con veicoli a motore che con aeroplani. Questo manichino, chiamato "Sierra Sam" era alto 183 cm, pesava 91 kg, articolato e aveva faccia e testa molto realistiche. Questo fu il primo di tutti i lavori che Humanetics e le società precedenti hanno svolto. Sempre nel 1950 la base militare Holloman Air Force Base condusse crash test usando il manichino ARL VIP 50th e Sierra Sam. Successivamente Alderson continuò a produrre quella che chiamata la serie VIP-50, costruita specificamente per la General Motors e la Ford, ma che fu adottata anche dal National Institute of Standards and Technology. Nel 1971 la General Motors sviluppò il primo manichino Hybrid I, che combinava gli aspetti più funzionali dei predecessori ARL e Sierra 50th maschio. A partire da quel momento, un lavoro considerevole ha portato alla creazione di manichini sempre più sofisticati.



Figura 2.8: Manichino Sierra Sam

Nel 1972 venne sviluppata la versione successiva con il nome Hybrid II, che presentava un miglioramento dei sensori di spalla, colonna vertebrale e ginocchia. Subito dopo, nel 1973 fu introdotto l'Hybrid II 50th maschio e la National Highway Transportation Safety Administration (NHTSA) sottoscrisse un accordo con la General Motors per produrre un modello che superasse le prestazioni di Hybrid II in un numero di aree specifiche. Benché si fossero ottenuti diversi miglioramenti rispetto ai test sui cadaveri, Hybrid I e Hybrid II erano ancora molto rudimentali, e il loro uso era limitato allo sviluppo e al test delle cinture di sicurezza. C'era bisogno di un manichino che permettesse ai ricercatori di trovare strategie per la riduzione di infortuni.



Figura 2.9: Hybrid II-50M

Fu proprio a causa di questa necessità che nel 1976 la General Motors introdusse il manichino Hybrid III 50th maschio. La base Hybrid III è l'ATD 502, un manichino di prova avanzato sviluppato da General Motors nel 1973 con NHTSA. Esso presentava una testa antropometrica simile a quelle che si avevano nelle prove fatte su cadavere, le quali venivano fatte impattare su superfici rigide, ed una colonna vertebrale curva con cui si riusciva a riprodurre la postura di seduta in auto di una persona umana. L'Hybrid III maschio è un manichino alto 168 cm e pesa 67 kg. Esiste anche la versione femminile alta 152 cm e di 50 kg, e infine la versione bambino che simula la corporatura di un bambino di 6 anni e 3 anni. I trasduttori contenuti nel Hybrid III permettono di misurare le componenti di accelerazione lineare ortogonale della testa e del torace, le reazioni del piano sagittale



Figura 2.10: Hybrid III-50M

(forze assiali e di taglio e momento flettente) tra la testa e il collo, lo spostamento dello sterno relativo al dorso toracico e i carichi assiali sui femori [22]. Nel 1979 NHTSA iniziò il primo New Car Assessment Program (NCAP). Questo programma era stato ideato per condurre test standardizzati in tutti i modelli auto disponibili al pubblico. NCAP, a sua volta, ha portato al sistema di classificazione della sicurezza a cinque stelle. Il 1979 fu anche l'anno in cui venne sviluppato il manichino SID (Side Impact Dummy), per la valutazione degli effetti del crash test nell'impatto laterale del veicolo. Questo manichino venne sviluppato in maniera congiunta da NHTSA e dall'istituto di ricerca sui trasporti dell'università di Michigan. Nel 1983 venne introdotto il manichino LRE (Limb Restraint Evaluator) da System Research Laboratories (SRL) in associazione con ARL. Di questi manichini ne vennero prodotti solo due per U.S Air Force, e furono utilizzati per valutare gli

effetti dell'attrezzatura di equipaggiamento sugli arti in caso di lancio ad alta quota. Tale manichino venne sostituito nel 1986 da ADAM (Advanced Dynamic Anthropomorphic Manikin). Esso fu utilizzato come supporto nello sviluppo di avanzati seggiolini eiettabili negli aerei militari; ne furono prodotti solo sei originariamente, sei grandi e sei piccoli, utilizzati per i test su paracadute, seggiolini eiettabili e torre di lancio. Successivamente, negli anni '90 lo studio si focalizzò sulle versioni dei manichini che erano stati sviluppati fino a quel momento. In particolare, vennero apportate delle modifiche ad Hybrid III, alla famiglia dei manichini SID, e venne condotto uno studio in merito alla protezione dell'occupante in urto posteriore che portò nel 1997 allo sviluppo del manichino BioRID. Nel 1994-1995 venne progettato da Humanetics il SID-II, manichino basato sull'ATD Hybrid III 5th percentile in grado di soddisfare le esigenze di protezione del veicolo ad impatto laterale e valutare le lesioni provocate alla testa, al collo e al torace [22].

L'EuroSID (ES) è il primo ATD per urti laterali sviluppato in Europa ed utilizzato per l'applicazione del regolamento R95. L'EuroSID-2 rappresenta la seconda generazione della famiglia EuroSID, il quale presenta aggiornamenti consigliati dagli utenti e dai regolatori di tutto il mondo. Presenta un design migliorato in grado di realizzare un manichino armonizzato che rispettasse i vari standard. Venne sviluppato dal programma SID-2000, un consorzio di ricercatori europei, produttori automobilistici e produttori fittizi, coordinato da TNO dei Paesi Bassi. La sua evoluzione è rappresentata da EuroSID-2RE 50° percentile armonizzato per urti laterali. A differenza del precedente, le estensioni delle nervature in grado di mitigare le interferenze dello schienale, una staffa di estensione della costola posteriore sul lato di impatto di ciascuna nervatura, insieme ad una guida di estensione della costola posteriore, forniscono una interazione maggiormente realistica con gli schienali dei veicoli rispetto a quanto fatto dal manichino originale.



Figura 2.11: EuroSID-50M

In seguito a quest'ultimo, venne sviluppato dalla WorldSID Task Group ed assemblato per la prima volta nel 2008, il WorldSID (Worldwide Harmonized Side Impact Dummy). Si tratta di un ATD avanzato progettato da Humanetics in collaborazione con esperti del settore e del governo. Il WorldSID-50M rappresenta l'antropometria di un maschio medio e viene utilizzato come strumento di test normativo e di ricerca con lo scopo di valutare il rischio di lesioni negli impatti laterali e valutando le interazioni tra il passeggero ed il veicolo. Esiste il WorldSID-5F, versione ridotta di WorldSID-50M, realizzato dalla Commissione Economica per l'Europa (ECE) con l'obiettivo di offrire maggiori capacità di valutazione per impatti collaterali.



Figura 2.12: WorldSID-50M

L'inizio del nuovo millennio, insieme con lo sviluppo di nuove tecnologie, ha permesso di continuare lo studio su ATD. Già a partire dai primi anni '90, iniziò a farsi strada l'idea di sviluppare un manichino per urto frontale, che fosse molto più fedele dal punto di vista biologico rispetto ad Hybrid III e con un'accuratezza non ottenibile da altri manichini. Fu così che dopo diversi studi e diverse versioni sviluppate, nel 2012 venne rilasciato da Humanetics il manichino THOR-50M, sviluppato con il supporto dato da NHTSA. THOR mostra importanti progressi in ambito di biofedeltà e rilevamento, con strumentazione notevolmente ampliata e migliore gestione degli utenti. È ad oggi l'ATD più sofisticato utilizzato nei crash test frontali permettendo una valutazione del trauma di tutto il corpo.



Figura 2.13: Thor-50M

### 2.3.2 Manichini per urto frontale

I manichini per urto frontale nascono con l'intento di testare l'efficacia dei sistemi di ritenuta per prevenire lesioni alla testa, al torace e alle gambe; quello utilizzato nelle prove di urto frontale Euro NCAP da marzo 2004 a novembre 2019 è stato l'Hybrid III 50° percentile (Figura 2.10). Il cranio è costituito da un blocco di alluminio con un rivestimento rimovibile in vinile; il collo consiste in una struttura segmentata di gomma e alluminio, in grado di riprodurre i movimenti umani di flessione-estensione. La gabbia toracica è realizzata con sei costole di acciaio e materiale polimerico smorzante che simula le caratteristiche di forza-deformazione del torace. All'interno del tronco si trova una spina dorsale cilindrica in gomma che riproduce la postura di una persona seduta e si unisce alla struttura

del bacino. Il femore e la tibia possono essere strumentati per prevedere la frattura ossea e il ginocchio può valutare la lesione del legamento dalla tibia al femore. Le gambe inferiori sono intercambiabili con le versioni strumentate. Tutte le parti del manichino possono essere strumentate con accelerometri e celle di carico, in grado di misurare le forze, i momenti e le accelerazioni che agiscono sulle varie strutture anatomiche. Nella Tabella ?? è possibile prendere visione di tutta la strumentazione presente in un Hybrid III 50° percentile [23].

Tabella 2.2: strumentazione di Hybrid III 50° percentile.

Location	Description	Channels
Head:	3 Accelerometers in a triaxial array Up to 15 Accelerometers	Ax, Ay, Az (HIC) 5X Ax, Ay, Az Head Rotation
Neck:	Six-Axis Upper Neck Load Cell Six-Axis Lower Neck Load Cell	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz
Clavicle:	Biaxial Load Cell (Left and Right)	Fx, Fz
Humerus:	Four-Axis Load Cell (Left and Right)	Fx, Fy, Mx, My
Thorax:	3 Accelerometers in a triaxial array Chest Displacement Transducer Four-Axis Rib/Spine Load Cells Five-Axis Thoracic Spine Load Cell	Ax, Ay, Az (Chest Accel) Dx (Std. equipment) Fx, Fy, Fz, My Fx, Fy, Fz, Mx, My
Lumbar Spine:	Three-Axis Lumbar Spine Load Cell	Fx, Fz, My
Pelvis:	3 Accelerometers (or triax pack) Submarining Load bolts	Ax, Ay, Az Fx (3 per side)
Femur:	Uniaxial Femur Load Cell or Six-Axis Upper Femur Load Cell	Fx (per leg) Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz (per leg)
Knee:	Knee Displacement	Dx (per knee)
Lower Legs*:	Biaxial Knee Clevis Load Cell Four-Axis Upper Tibia Load Cell Four-Axis Lower Tibia Load Cell	Fz (per leg) Fx, Fz, Mx, My (per leg) Fx, Fy, Mx, My (per leg)
Ankle:	Five-Axis Load Cell	Fx, Fy, Fz, Mx, My (per leg)
Toe:	Toe Load Cell	Fz (per foot)

\*Special four channel configurations are available in the upper and lower tibia load cells.

A partire dal 2020, Hybrid III è stato sostituito dal manichino di ultima generazione THOR (Test device for Human Occupant Restraint). Questo presenta una strumentazione notevolmente ampliata, un numero maggiore di sensori rispetto all'Hybrid III e miglioramenti in ambito biomeccanico. La realizzazione e l'introduzione di questo nuovo ATD è stata fortemente voluta da NHTSA con l'obiettivo di realizzare un manichino in grado di apportare miglioramenti sulla biofedeltà, incorporando una strumentazione specifica che possa garantire prestazioni migliori. Rispetto all'Hybrid III, si sono avuti miglioramenti nella cinematica di varie zone e movimenti del corpo:

- Flessione del collo e riproduzione più fedele della contrazione muscolare;
- Migliore interazione del torace e delle spalle con i sistemi di ritenuta;
- Giunti flessibili nella colonna vertebrale;
- Minore accoppiamento del bacino rispetto al movimento del femore;
- Maggiore biofedeltà nella risposta del femore a carichi assiali.

### 2.3.3 Manichini per urto laterale

I manichini per impatto laterale hanno dato il loro contributo per la realizzazione di vetture sicure per questo tipo di impatto, che molto spesso risulta essere più severo rispetto all'impatto frontale in quanto la distanza tra occupante e ostacolo è minore. Inoltre, il loro sviluppo ha portato alla realizzazione di nuovi strumenti per la sicurezza passiva come strutture delle porte più resistenti e airbag laterali per la protezione di testa, collo e torace. Come visto nel capitolo precedente, le norme di omologazione UNECE per urto laterale prevedono l'utilizzo del manichino EuroSID-2; questo è stato sviluppato da un consorzio di ricercatori, produttori di automobili e di manichini europei nel 2000 per sostituire la vecchia versione EuroSID-1. Fanno parte della categoria di manichini per urto laterale anche i WorldSID: tali manichini vengono utilizzati da Euro NCAP nelle prove di urto laterale contro barriera deformabile, urto palo e Far Side. Le caratteristiche antropometriche di questo manichino sono state progettate sulla base di una serie di dati che rispecchiano la popolazione mondiale di occupanti. La realizzazione di questo ATD è stata voluta dall'International Organization for Standardization (ISO) con lo scopo di avere a disposizione un manichino universale che potesse rendere più omogenee le valutazioni dei crash test. Il WorldSID include una strumentazione che consente non solo di valutare il rischio di lesioni in base a tutti i criteri di impatto laterale noti, ma anche di valutare le interazioni tra occupante e sistema di ritenuta [24].

### 2.3.4 Manichini per urto posteriore

I manichini per urto posteriore sono stati introdotti con lo scopo di eseguire delle valutazioni su test in cui le velocità sono relativamente basse e il cui impatto causa lesioni da colpo di frusta; gli effetti di questi sono molto difficili da quantificare, ma risultano essere molto debilitanti per la persona che li subisce. Inoltre, questi impatti possono causare serie lesioni al collo, richiedendo tempi lunghi di recupero o persino lasciando danni permanenti a collo e colonna vertebrale, in particolare nelle donne e negli anziani. I test effettuati con tali manichini possono essere utilizzati per determinare l'efficacia dei poggiatesta sui sedili per prevenire il movimento eccessivo di testa e collo. Lo standard per urti posteriori è il manichino BioRID-II, utilizzato per valutare le lesioni sulla colonna vertebrale causate da tamponamenti

a bassa velocità. È il manichino biofedelico posteriore più avanzato, la sua colonna vertebrale è costituita da 24 vertebre separate: 5 lombari, 12 toraciche e 7 cervicali, ed è installata all'interno di una guaina in silicone con collegamenti a perno alle vertebre, in modo da riprodurre la flessione del collo nel momento in cui avviene il tamponamento; inoltre, un sistema di rondelle, paraurti in uretano e molle, simula la muscolatura garantendo ottime prestazioni per quanto riguarda la biofedeltà [25].

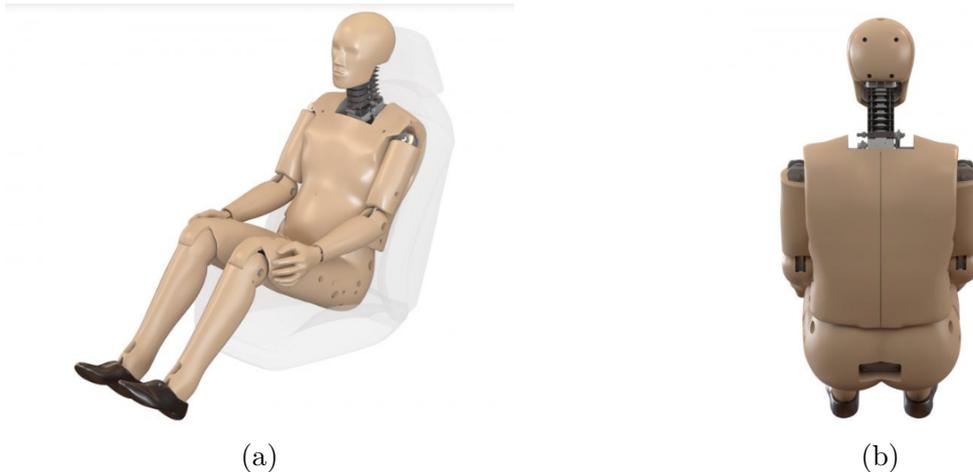


Figura 2.14: BioRID-II: (a) vista frontale e (b) vista posteriore.

### 2.3.5 Manichini bambini

Per quanto riguarda la sicurezza dei bambini e la valutazione delle prestazioni offerte dai seggiolini, sono stati sviluppati manichini che simulano il peso e le dimensioni per tutte le fasce di età. Negli anni si sono susseguite molte versioni di manichini bambini: alla fine degli anni '70 fu sviluppata la famiglia P, una serie di manichini che coprono diverse età fino a 10 anni. I manichini usati per le prove Euro NCAP fanno parte della famiglia Q (Figura 2.15): questi sono stati introdotti nel 1993 come successori dei manichini della famiglia P. Rispetto alla famiglia P, questi non solo sono avanzanti dal punto di vista delle caratteristiche biomeccaniche e antropometriche, ma sono anche considerati manichini “multidirezionali” poiché possono essere utilizzati sia nei test di impatto frontale che laterale [26].

## 2.4 Biodefeltà

Il Bio Rank System quantifica la capacità di un manichino di impattare contro un muro similmente a quanto fa un cadavere (Biofedeltà esterna) e l'abilità di un ATD di replicare le risposte di un cadavere che meglio prevedono le potenziali lesioni (Biofedeltà interna). A partire da dicembre 2008 erano disponibili cinque manichini



Figura 2.15: Manichini della famiglia Q.

di impatto laterale: EuroSID-1, ES-2, SID H3, BIOSID e WorldSID. Nessuno di questi manichini, eccetto il WorldSID, mostrava un livello di biofedeltà “buono” riferendosi alla scala ISO di biofedeltà, mostrata in Tabella 2.3.

Tabella 2.3: Scala ISO di biofedeltà.

<b>Eccellente</b>	> 8,6 a 10
<b>Buono</b>	> 6,5 a 8,6
<b>Discreto</b>	> 4,4 a 6,5
<b>Marginale</b>	> 2,6 a 4,4
<b>Inaccettabile</b>	0 a 2,6

Solo il WorldSID era in grado di ottenere una classificazione complessiva di biofedeltà pari a 8,0 (“buona”).

ISO ha definito la valutazione di biofedeltà per le 6 regioni del corpo del WorldSID:

$$B_i = \frac{\sum j (V_{i,j} (\sum W_{i,j,k} R_{i,j,k}))}{\sum W_k}$$

- $B_i$ : è la valutazione della biofedeltà della regione del corpo;
- $V_{i,j}$ : è il fattore di ponderazione per ogni condizione di prova ( $j$ ) per una data regione del corpo ( $i$ );

- $W_{i,j}$ : è il fattore di ponderazione per ciascuna risposta per la quale è fornito un requisito;
- $R_{i,j,k}$ : è la valutazione di quanto una determinata risposta soddisfa i suoi requisiti. ( $R_{i,j,k}=10$  se la risposta soddisfa il requisito;  $R_{i,j,k}=5$  se la risposta rientra nei limiti del requisito;  $R_{i,j,k}=0$  se nessun requisito è soddisfatto).
- $i$ : rappresenta la regione del corpo;
- $j$ : rappresenta la condizione di prova per una data regione del corpo  $i$ ;
- $k$ : rappresenta la risposta per una data condizione di test  $j$  per una data regione del corpo  $i$ .

Come mostrato in Tabella 2.4, il WorldSID ha ottenuto la migliore valutazione complessiva e anche le migliori valutazioni per la testa, il torace e l'addome.

Tabella 2.4: Valutazione di Biofedeltà dei manichini di impatto laterale.

	Testa	Collo	Spalla	Torace	Addome	Bacino	Complessivo
<b>WorldSID</b>	10,0	5,3	10,0	8,2	9,3	5,1	8,0
<b>BioSID</b>	6,7	6,7	7,3	6,3	3,8	4,0	5,7
<b>ES-2</b>	5,0	4,4	5,3	5,2	2,6	5,3	4,6
<b>EuroSID-</b>	15,0	7,8	7,3	5,4	0,9	1,5	4,4
<b>USDOT-SID</b>	0,0	2,5	0,0	3,1	4,4	2,5	2,3

### 2.4.1 Curve di rischio

Una curva di rischio corrisponde ad una modellizzazione statistica di dati biomeccanici per prevedere il rischio di infortunio. Le curve di rischio mettono in relazione i parametri quantificabili con le scale AIS di severità dell'infortunio per valutare la protezione degli occupanti nei test di impatto. Sono costruite correlando le misure in scala dell'ATD con le lesioni da parte dei PMHS (post-mortem-human-subjects) nelle stesse condizioni di test. Le curve di rischio di lesioni sono costruite per il livello di lesioni  $AIS \geq 3$ , ad eccezione della spalla le cui curve sono realizzate con un livello di lesione  $AIS \geq 2$ . Inoltre, per il torace, l'addome e il bacino sono state costruite ulteriori curve relative ad un  $AIS \geq 2$  o  $AIS \geq 4$  perché i dati sulle lesioni del PMHS erano meglio bilanciati a questi livelli di lesione. Si riportano nella Tabella 2.5 i parametri utilizzati ed il livello AIS per la costruzione delle curve di rischio.

I manichini rappresentano soggetti maschi adulti di taglia media, mentre i PMHS non corrispondono generalmente a questa categoria per cui è necessario tenere conto

Tabella 2.5: Parametri e livello AIS per la costruzione delle curve di rischio.

Regione del corpo	Parametri	AIS
<b>Testa</b>	HIC	AIS ≥ 3
<b>Spalla</b>	Forza massima della spalla Y	AIS ≥ 2
<b>Torace</b>	Deflessione massima delle costole addominali e toraciche; VC massimo delle costole addominali e toraciche;	AIS ≥ 3 e AIS ≥ 4
<b>Addome</b>	Deflessione massima delle costole addominali; VC massimo delle costole addominali; Accelerazione della parte inferiore della colonna vertebrale di 3 ms;	AIS ≥ 2 e AIS ≥ 3
<b>Bacino</b>	Forza massima bacino Y; Accelerazione bacino di 3 ms;	AIS ≥ 2 e AIS ≥ 3

di questa differenza di antropometria. Questo avviene andando ad eseguire un ridimensionamento della risposta di un PMHS  $xx$ th percentile: calcolo della velocità di impatto necessaria ad indurre le stesse lesioni sia sul PMHS 50th percentile che sul PMHS  $xx$ th percentile. Un ulteriore adeguamento da fare riguarda l'età: i manichini sono costruiti per simulare un maschio di 45 anni, per cui, per ciascun soggetto di *PMHS*, è stata eseguita una regressione lineare per determinare il livello *AIS* in funzione dell'età e dei dati in scala del manichino. Per un generico *PMHS $x$* :

$$AISx = a \cdot scaled\_dummy\_datax + b \cdot PMHS\_agex + c$$

- *AIS $x$* : è il valore di *AIS* per un campione  $x$ ;
- *PMHS $_agex$* : è l'età del *PMHS*;
- *scaled\\_dummy\\_datax*: dati dell'ATD in scala corrispondenti a un *PMHS $x$*
- $a, b, c$ : coefficienti di regressione lineare.

La relazione tra un PMHS di età ignota ( $x$ ) e uno di età pari a 45 anni:

$$a \cdot scaled\_dummy\_datax + b \cdot PMHS\_agex + c = a \cdot scaled\_dummy\_data45 + b \cdot 45 + c$$

$$\rightarrow scaled\_dummy\_data45 = scaled\_dummy\_datax + ba \cdot (PMHS\_agex - 45)$$

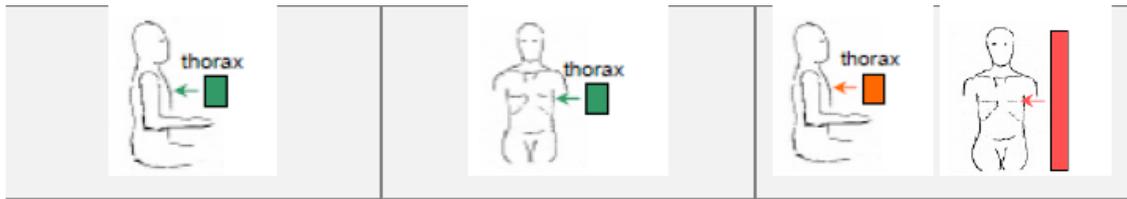
Le curve di rischio di lesione sono state costruite per un maschio adulto di 45 anni e correlate alle lesioni di un PMHS mediante *scaled\\_dummy\\_data45* [27]. Le

regioni del corpo di maggior interesse durante il lavoro di tesi, come si vedrà nei capitoli seguenti, saranno il torace e l'addome. A tal proposito verranno descritti unicamente i test eseguiti su tali regioni del corpo del PMHS.

## Torace

Si riportano le prove eseguite per il torace nella Tabella 2.6.

1° TEST: 3 test eseguiti sullo stesso PMHS: i primi due sono test con impattore a bassa velocità e il terzo test è un test di Slitta o con impattore ad alta velocità.



2° TEST: 2-4 test eseguiti sullo stesso PMHS: da 3.6 a 10.2 m/s. 1 test eseguito su un dato PMHS ad alta velocità (da 6 a 8.7 m/s).



3° TEST: 5 test eseguiti sullo stesso PMHS: i primi tre a bassa velocità (1.5 m/s) e gli altri due a velocità maggiore.

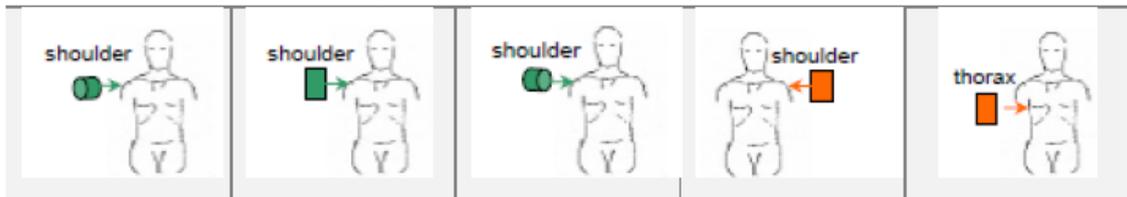


Tabella 2.6: test di impatto sul torace del PMHS

## Addome

I test condotti su PMHS per ottenere le curve di rischio per l'addome consistono in test con impattore a rigidità variabile. Ogni PMHS era sospeso in posizione eretta, con le braccia posizionate sopra la spalla e le mani sopra la testa, come mostrato in Figura 2.16.

I test condotti sono riassunti nella Tabella 2.7

In Figura 2.17 sono riportate le curve di rischio del WorldSID 50th relative a:

- Forza su spalla con  $AIS \geq 2$ ;

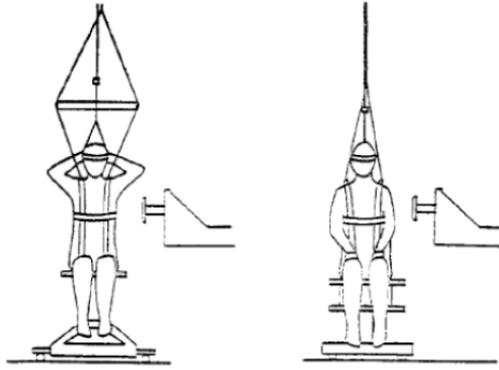


Figura 2.16: test di impatto sull'addome del PMHS

Tabella 2.7: Elenco dei test di impatto su addome.

TEST	IMPATTATORE	ANGOLO DI IMPATTO	VELOCITÀ DI IMPATTO
1	Rigido	30° gradi in avanti	9.8
2	Arcel 310 (1.5 lb/f3)	Laterale	6.3
3	Arcel 310 (1.5 lb/f3)	Laterale	9.7
4	Arcel 310 (3 lb/f3)	Laterale	9
5	ETHAFOAM LC-200	Laterale	6
6	ETHAFOAM LC-200	Laterale	11

- Deflessione delle costole toraciche-addominali con un  $AIS \geq 3$ ;
- Deflessione delle costole addominali con un  $AIS \geq 2$ ;
- Forza su bacino con  $AIS \geq 3$ .

Ad esempio, con riferimento alla Figura 2.17a, (curva di rischio della forza massima su spalla), per un valore di forza massima su spalla pari a 2000 N, nel caso di WorldSID 50th percentile, il 10% della popolazione con età pari a 45 anni presenta un valore di  $AIS \geq 2$  (frattura della spalla senza compromettere la respirazione). In conclusione, le curve di rischio servono per testare l'ATD e per stabilire i valori limite dei parametri biomeccanici di una specifica prova di crash test [27].

## 2.5 THOR-50M

La novità dell'anno, come accennato all'inizio del capitolo, riguardo l'urto frontale, è rappresentata dall'introduzione nelle prove di rating del manichino THOR. Si tratta quindi di un manichino di nuova generazione, al cui interno vi è una strumentazione innovativa rispetto a quella vista nei manichini utilizzati prima del 2020. Caratteristica principale che rende il manichino in questione interessante da

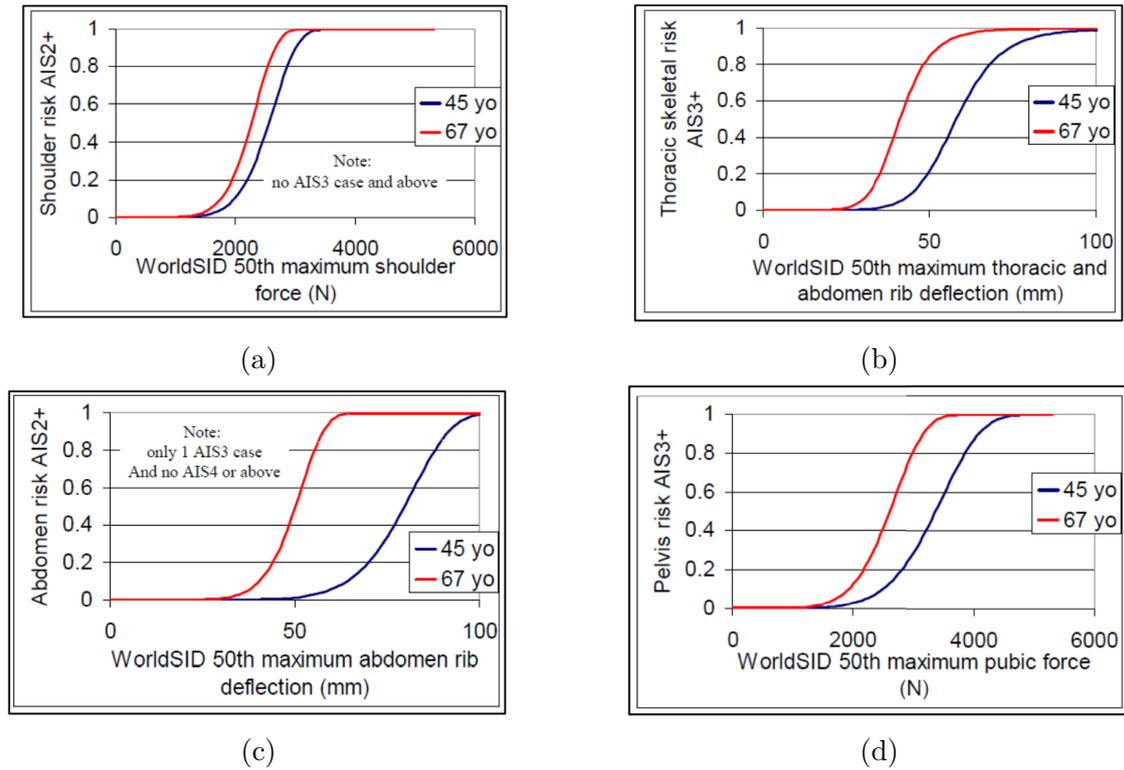


Figura 2.17: curve di rischio

un punto di vista funzionale nello studio degli urti frontali, è la sua elevata biofedeltà. La nuova strumentazione, le sue caratteristiche meccaniche, insieme alla sua massa, le sue dimensioni e la sua risposta dinamica, rappresentano in maniera ottimale quelle che sono le risposte dell'essere umano all'urto. Lo scheletro è stato realizzato curando ogni dettaglio ed è possibile osservarlo soprattutto nel caso del torace che comprende le prime 7 paia di costole, definite dal punto di vista anatomico "costole vere". Nell'uomo esse sono quelle che si uniscono allo sterno tramite le cartilagini costali, e la loro dimensione aumenta man mano che ci si sposta dalla prima alla settima. Dal punto di vista costruttivo sono state rappresentate solo le prime 7 paia poiché sono quelle che danno risposta dominante durante l'urto. La cura del dettaglio emerge anche andando ad osservare la colonna vertebrale, assemblata con l'obiettivo di fornire al manichino la capacità di assumere diverse posizioni di seduta nei test. In essa sono presenti due giunti flessibili capaci di fornirle un determinato grado di flessione ed elasticità: uno nella parte alta della spina, in corrispondenza della zona superiore del torace, e l'altro nella zona lombare della colonna vertebrale. La biofedeltà del manichino emerge anche guardando altre articolazioni come quella sterno-clavicolare e l'articolazione della spalla, il cui movimento replica perfettamente quello umano [28].

### 2.5.1 Strumentazione ATD

È stato detto che una delle caratteristiche principali del nuovo ATD è la strumentazione innovativa contenuta al suo interno. In questo paragrafo si effettuerà in suddivisione in aree anatomiche delle quali saranno descritti tutti i sensori presenti.



Figura 2.18: (a) assemblaggio scatola cranica e (b) piastra di montaggio per accelerometri.

**Testa** sono contenuti per lo più sensori accelerometrici di tipo monoassiale e biasiale. La disposizione all'interno del cranio di questi sensori è visibile in Figura 2.18a. Sulla struttura in Figura 2.18b sono posizionati sette accelerometri uniaxiali orientati in diverse direzioni; tre di questi si trovano nel centro di gravità della testa, due nella parte anteriore ed altri due nella parte posteriore. La struttura è montata su una piastra che ospita anche un sensore chiamato **Tilt Sensor** (cerchiato in rosso). Obiettivo degli accelerometri è quello di permettere la ricostruzione della cinematica della testa, mentre i Tilt Sensor forniscono una misura di inclinazione nelle direzioni anteriori, posteriori e laterali. Sul VOLTO sono presenti cinque celle di carico uniaxiali, rappresentate in Figura 2.19, utili nella valutazione dell'impatto nella regione del volto. La disposizione delle celle di carico sulla superficie facciale è la seguente:

- Una su ciascun occhio, destro e sinistro;
- Una su ciascuna guancia, destra e sinistra;
- Una al centro del mento.

**Collo** la struttura è complessa, nella parte superiore e inferiore del collo sono presenti coppie di celle di carico a sei assi che forniscono i dati di carico primari per la struttura del collo, ossia le forze lungo x, y e z ed i momenti lungo gli stessi. Altre

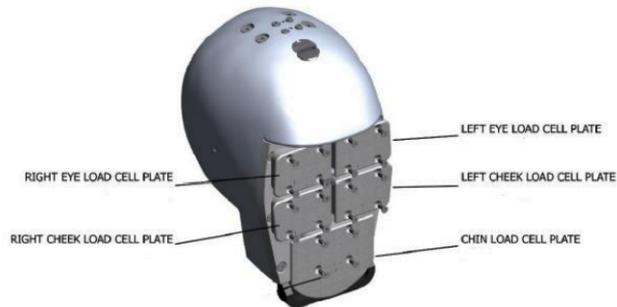


Figura 2.19: Disposizione delle di carico sul volto.

due coppie di celle di carico, in questo caso di tipo uniassiale, sono collocate sulle due molle: una su quella anteriore e l'altra sulla posteriore. Il posizionamento delle celle di carico sulle molle è utile per misurare la forza di compressione in queste due parti del collo. Infine, nella regione del condilo è presente un potenziometro rotativo che fornisce una misura della posizione relativa della testa rispetto alla sommità del collo.

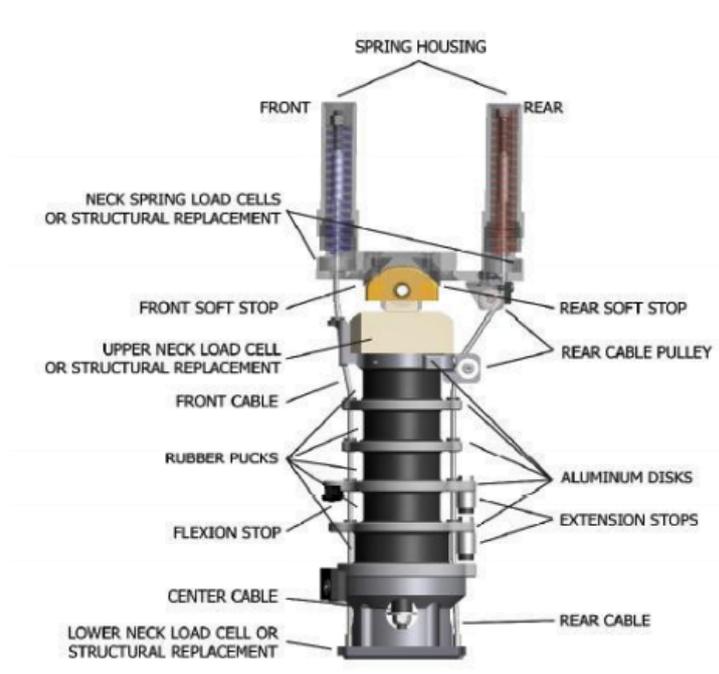


Figura 2.20: struttura del collo.

**Torace** rappresenta una delle parti più importanti del manichino, su cui vengono fatte valutazioni relative allo schiacciamento delle costole durante l'urto e successiva valutazione dei rischi. Relativamente alla misura della deflessione delle costole, sono presenti all'interno della gabbia toracica quattro 3D IR-TRACCs, di cui due posizionati a livello della terza e due della sesta costola, ed effettuano una misura della deflessione tridimensionale della gabbia toracica nel punto di attacco. La misura data da 3D IR-TRACC oltre alla deflessione è quella di rotazione: il sensore oltre ad una compressione DS0, registra anche una rotazione attorno agli assi  $y$  e  $z$ .

Sul piatto sternale è presente un accelerometro uniassiale utilizzato per la misura delle accelerazioni agenti sullo sterno e, più in generale sulla zona centrale della gabbia toracica; queste accelerazioni possono essere causate da elementi dei sistemi di ritenuta, come ad esempio l'airbag, o nel momento in cui il torace viene a contatto con il volante e quindi con una parte rigida.

**Colonna vertebrale** nella parte superiore della spina (Figura 2.22), a livello del collo, è posizionato uno dei quattro Tilt Sensor; i restanti si trovano rispettivamente a livello del torace, della parte lombare e del bacino. Questi sensori così disposti misurano l'orientamento angolare relativo del manichino nelle direzioni antero-posteriore e laterale.

A livello antropomorfo in T12 vi è una cella di carico a cinque assi fornisce i dati di carico primari per la struttura del dorso, che include le forze nelle direzioni  $x$ ,  $y$  e  $z$  ed i momenti nelle direzioni  $x$  e  $y$ . Oltre alla cella di carico, sulla T12 è presente anche un accelerometro tri-pack, ossia un blocco su cui sono montati tre accelerometri uniassiali (blocco tri-pack). Altri blocchi accelerometrici si trovano a livello della T1 e nel centro di gravità del torace.

**Addome** l'addome superiore riempie il volume presente tra le tre costole più basse. Esso è costruito con materiali deformabili per produrre una risposta di compressione che sia simile ai dati provenienti da test su cadavere umano. All'interno è contenuto un accelerometro mono-assiale il quale misura l'accelerazione generata su questa parte di addome durante l'impatto con qualche oggetto, come

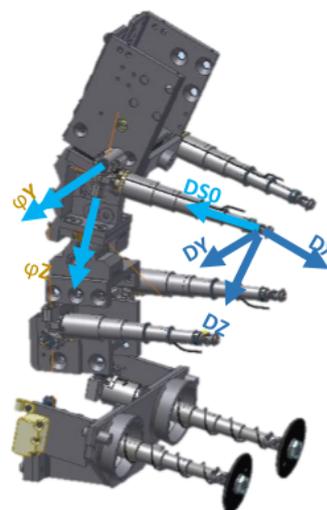


Figura 2.21: disposizione 3D IR-TRACC nel THOR

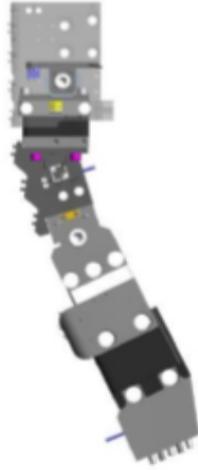


Figura 2.22: meccanica della colonna vertebrale.

un airbag oppure la parte bassa del volante. Nell'estremità posteriore questo componente presenta una parte che consente il suo attacco alla colonna vertebrale del manichino.

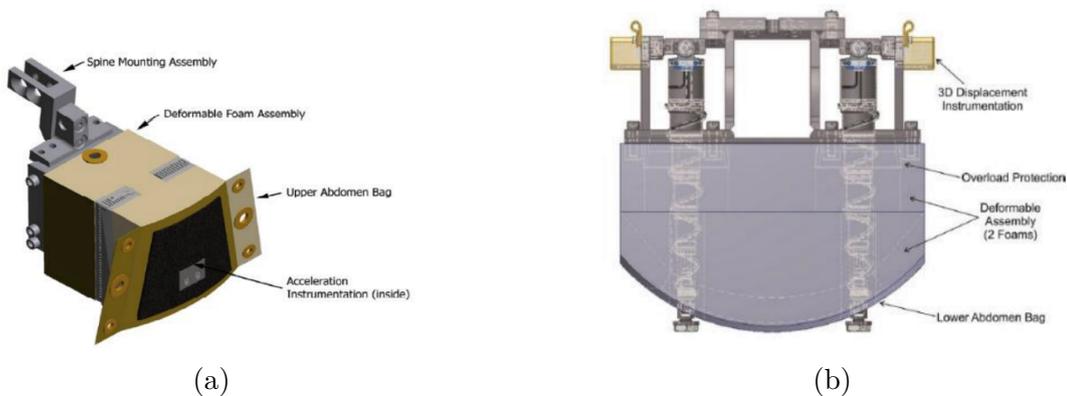


Figura 2.23: Assemblaggio addome (a) superiore e (b) inferiore.

L'addome inferiore è la regione del corpo umano compresa tra la parte bassa della gabbia toracica e la cintura pelvica. Anche in questo caso il componente è realizzato con materiali deformabili, in modo da produrre una risposta di compressione simile a quella ottenuta nei test fatti su cadavere umano. Questa regione del corpo è soggetta principalmente al carico della cintura di sicurezza, poiché durante l'impatto il ramo addominale della cintura esercita una forza in grado di evitare lo scivolamento in avanti del manichino (submarining). In Figura 2.23b è possibile

osservare il componente rappresentativo dell'addome inferiore. La strumentazione contenuta all'interno consiste di due IR-TRACCs, i quali forniscono dati sulla completa deflessione nei punti di ancoraggio sulla superficie addominale durante l'evento di impatto. Come la parte superiore, anche quella inferiore viene ancorata alla colonna vertebrale mediante un montante posto nella parte posteriore del componente.

**Bacino** si tratta sostanzialmente di una rappresentazione meccanica del bacino umano. L'assemblaggio consiste in una base e due ali in alluminio, progettati per approssimare il più possibile la geometria della struttura ossea pelvica umana. Nella realizzazione del bacino per il THOR sono state mantenute le posizioni di due importanti punti: i punti H ed i punti ASIS<sup>1</sup>. La loro importanza è dovuta al fatto che sono in grado di fornire posizioni che possono essere correlate direttamente al bacino umano. La struttura è stata realizzata in modo da poter essere ospitata all'interno della pelle del manichino. Dal punto di vista della strumentazione, è possibile osservare in Figura 2.23b, la presenza di diversi tipi di sensori sulla struttura del bacino. Un accelerometro tri-pack è montato nella cavità posteriore del bacino, e misura le accelerazioni del baricentro pelvico nelle tre direzioni principali. Sono presenti due celle di carico acetabolari che si trovano nell'articolazione dell'anca, una a destra e una a sinistra, e misurano i carichi che vengono trasferiti attraverso i femori alla struttura pelvica. Nella regione iliaca ASIS si trova una coppia di celle di carico a due assi: questa misura una forza  $F_x$  esercitata dal ramo addominale della cintura sulla cresta iliaca del bacino, insensibile alla posizione della cintura sull'ileo, e un momento  $M_y$  che invece fornisce proprio la posizione della cintura nella zona dell'ileo. Avere una lettura dell'uscita pari a zero significherebbe che il centro di pressione del ramo della cintura si trova sull'asse neutro della cella di carico. Se la cintura si trovasse sopra l'asse neutro, si verificherebbe una lettura del momento positivo, mentre con la cintura posizionata sotto l'asse neutro si avrebbe un output del momento flettente negativo.

**Arti superiori** sono collegati alla struttura meccanica rappresentativa della clavicola e delle spalle, la cui funzione è quella di collegare gli arti superiori alla colonna vertebrale e al torace. Le spalle sono state progettate in modo da replicare la geometria e il movimento di quelle umane, e un collegamento clavicolare simile a quello dell'uomo è stato realizzato per garantire maggiore biofedeltà nell'interazione tra le spalle e i sistemi di ritenuta del veicolo.

Da un punto di vista strumentale, gli arti superiori contengono quattro celle di carico, disposte rispettivamente sul braccio destro e sulla clavicola destra così come sul braccio sinistro e sulla clavicola sinistra. Durante l'impatto del veicolo,

---

<sup>1</sup>ASIS: Anterior Superior Iliac Spine.

il manichino si dirige in avanti, le braccia sono disposte in direzione del volante su cui poggia con le mani: è importante che le celle diano una misura del carico che agisce sulle braccia e sulla clavicola nel momento in cui il manichino si muove verso il volante.



Figura 2.24: (a) arti superiori, spalle e clavicola e (b) posizione della cella di carico nel braccio.

**Arti inferiori** sono costituiti da una parte superiore rappresentata dal femore e dal ginocchio, e una parte inferiore che si estende dalla parte alta della tibia fino al piede. Il femore del THOR consiste in una struttura assiale con una boccia ideata per creare una risposta biofedele lungo l'asse del femore nel momento in cui si verifica l'impatto del ginocchio con una parte rigida.

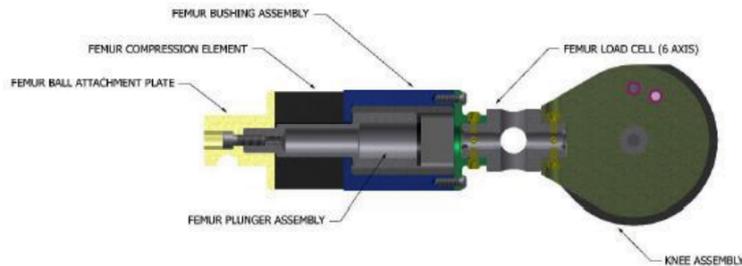


Figura 2.25: Femore THOR 50-M.

Entrambi i femori sono strumentati con una cella di carico a sei assi, situata tra il ginocchio e la parte bassa del femore. Queste celle forniscono dati di carico primari per la struttura del femore producendo in output i valori di forza e momento lungo gli assi  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Nelle prove di rating in cui è prevista l'applicazione del THOR su vettura, effettuate al Centro Sicurezza, sono state montate sul manichino le

gambe di Hybrid III 50° percentile. Ciò è dovuto alla tipologia di prova a cui si fa riferimento: Euro NCAP non ha adottato le THOR legs per le sue prove, decidendo di sostituirle con le gambe strumentate di Hybrid III. Nelle prove di rating americane, invece, vengono utilizzate le gambe strumentate del THOR. Viene quindi operata una modifica a livello del ginocchio: su di esso viene montato il potenziometro e la tibia di Hybrid III e tolti tibia e potenziometro relativi al THOR. Il potenziometro montato nel ginocchio (knee slider) viene utilizzato per misurare lo scorrimento dell'articolazione durante l'impatto: in particolare esso permette di valutare lo spostamento relativo tra femore e tibia. Le ginocchia possono essere collegate in modo che il potenziometro sia montato all'interno o all'esterno. Il montaggio del potenziometro all'interno consente di accedere facilmente alla vite di regolazione del ginocchio durante il posizionamento del manichino. Tuttavia, è possibile che in alcune condizioni di prova possano esserci elevate probabilità di danneggiamento dei potenziometri: in casi del genere è possibile che il tecnico di prova specifichi una posizione di montaggio esterna. La tibia risulta strumentata con due celle di carico multi-asse, di cui una disposta nella parte superiore e una in quella inferiore, utilizzate per la misura di forze e momenti su questo segmento osseo.



Figura 2.26: Tibia con relative celle di carico.

## 2.6 WorldSID-50M

Il manichino WorldSID (Worldwide harmonized Side Impact Dummy), come anticipato nei paragrafi precedenti, è un ATD da Crash Test utilizzato per valutare il rischio di danno degli occupanti di un veicolo in un impatto laterale. Può essere impiegato per test standard e normativi, ma anche come strumento di ricerca. Il WorldSID 50th percentile rappresenta un uomo adulto di mezza taglia le cui misure antropometriche sono armonizzate con una larga gamma di dati circa le dimensioni e l'inerzia che fanno riferimento alle caratteristiche della popolazione mondiale di occupanti dei veicoli. Lo sviluppo di questo manichino nasce dall'esigenza di utilizzare un unico manichino da impatto laterale che fosse basato su dati antropometrici globali, in modo da migliorare la valutazione della sicurezza dei veicoli in questo ambito. Tra le diverse motivazioni che hanno spinto lo sviluppo di questo manichino, vi era sicuramente quello di standardizzare prove normate ed avere

un manichino con un grado di biofedeltà maggiore rispetto agli altri: ciò avrebbe garantito che i risultati ottenuti fossero consistenti e non ambigui, e significato una riduzione dei costi per i produttori di veicoli (ad esempio i costi dei sistemi di ritenuta). Dopo una serie di prototipi, nel 2005 il documento ISO 15830/2005: “Road vehicles – Design and performance specifications for the WorldSID 50th percentile male side-impact dummy”, definisce univocamente le caratteristiche del nuovo WorldSID 50th. Il risultante WorldSID 50th percentile di uomo adulto ha una massa di 74,35 kg, una altezza in piedi di 1753 mm e una altezza da seduto di 911 mm. Quasi tutte le regioni del corpo prevedono un nuovo ed innovativo design, differenziando il WorldSID da tutti gli altri manichini esistenti [29].

### 2.6.1 Strumentazione ATD

Il WorldSID è in grado di alloggiare 207 possibili canali di sensori ed associato cablaggio, e più di 192 canali di registrazione con un opzionale data acquisition system (DAS) interno al manichino.

**Testa** il nucleo della testa è essere dotato di tre sensori di velocità angolare (ARS), un accelerometro triassiale lineare e un sensore di inclinazione a due assi. In particolare, l’ARS lungo  $y$  è montata nella camera anteriore destra, l’ARS lungo  $z$  è montato nella camera posteriore sinistra, mentre l’ARS lungo l’asse  $x$  è montato nella camera posteriore destra. L’accelerometro lineare triassiale invece, si trova nella camera anteriore destra e il sensore di inclinazione nella camera posteriore destra. La strumentazione presente nella camera posteriore destra deve essere installata prima rispetto alla strumentazione nella camera anteriore destra. Anche la cella di carico del collo superiore viene considerata parte della strumentazione del gruppo testa.

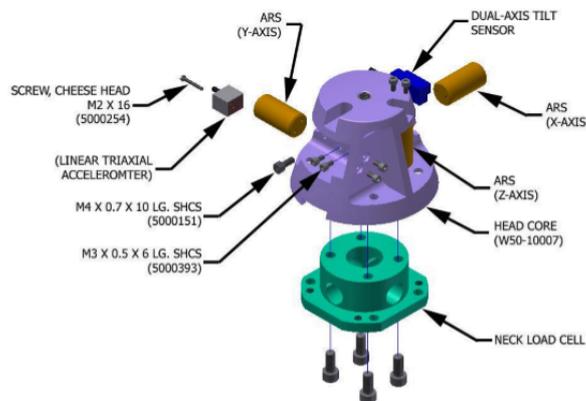


Figura 2.27: Strumentazione della testa del WSID-50M.

**Collo** l'assemblaggio del collo prevede una cella di carico del collo inferiore (la cella di carico del collo superiore è considerata parte del gruppo testa come accennato in precedenza). Un accelerometro triassiale può essere montato in una rientranza nella parte posteriore della staffa del collo inferiore.

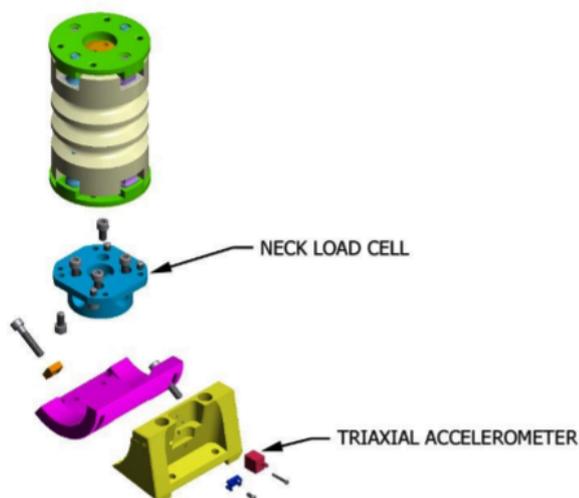


Figura 2.28: Strumentazione del collo di WSID-50M.

**Spalla/torace/addome** struttura che ricopre un ruolo fondamentale nella valutazione di schiacciamento del torace durante un urto laterale. Si tratta di un complesso costale che vede 6 costole su entrambi i lati della colonna vertebrale, di cui 1 costola di spalla, 3 toraciche e 2 addominali. Le costole, come da normativa ISO/DIS 15830, vengono strumentate con IR-TRACCs 2D di Humanetics, oppure possono essere sostituiti da strumenti in grado di portare agli stessi risultati. Nel corso di questo lavoro, vedremo l'applicazione di sensori alternativi all'IR-TRACC 2D atti a valutare lo schiacciamento del torace. Il sensore è fissato da un lato alla piastra laterale (sterno), e dall'altro alla staffa di montaggio dove è presente un accelerometro triassiale lineare la quale si aggancia in corrispondenza della costola interna (Figura 2.29). Rispetto alle altre, nella costola di spalla il sensore ha orientamento di 180°, inoltre, sulla parte esterna vi è montata una cella di carico utile a misurare la forza di impatto su braccio e spalla registrata in fase di urto.

**Colonna vertebrale** la strumentazione contenuta nella colonna vertebrale include un accelerometro triassiale lineare montato direttamente sulla spinebox in corrispondenza della parte superiore. Un secondo accelerometro triassiale lineare è montato su una staffa fissata alla spinebox nella posizione T4 vicino alla posizione



Figura 2.29: (a) strumentazione del torace e (b) dettaglio IR-TRACC 2D

della vertebra toracica T12. Un gruppo accelerometro angolare, che include accelerometri rotazionali per misurare l'accelerazione angolare degli assi  $x$  e  $z$ , oltre a un sensore di inclinazione a doppio asse, è montato vicino alla parte inferiore della spinebox.

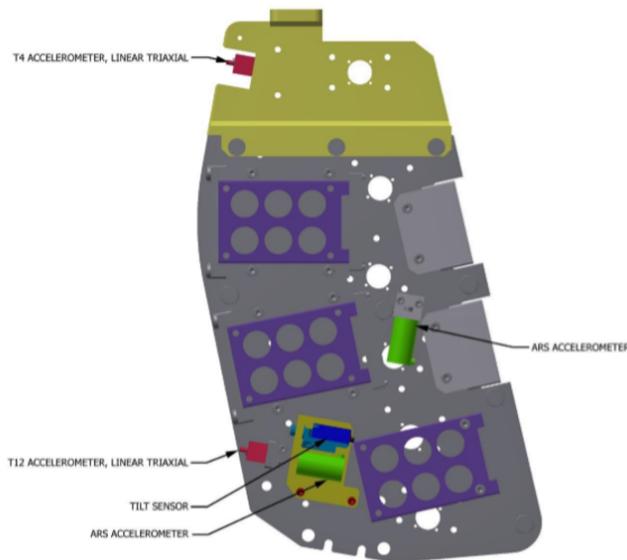


Figura 2.30: Strumentazione spinebox.

**Bacino** la strumentazione pelvica per il WorldSID include celle di carico della colonna vertebrale a livello pubico, sacroiliaco e lombare. Una batteria ed un contenitore possono essere montati sul fondo del gruppo bacino. La cavità al cui interno alloggia la strumentazione pelvica può essere dotata di un accelerometro triassiale

lineare e di un sensore di inclinazione a due assi, oppure può essere montato un sensore angolare.

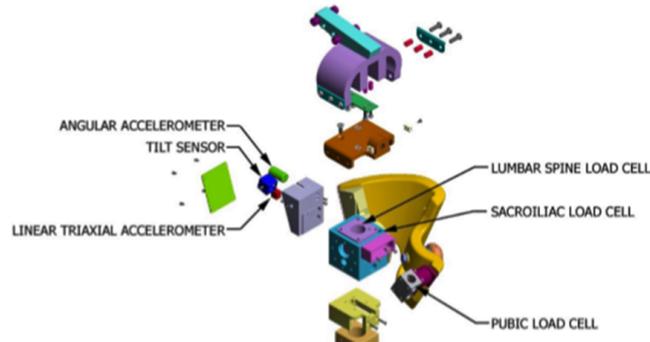


Figura 2.31: Strumentazione pelvica.

**Arti inferiori** la strumentazione riguardante la parte superiore della gamba, ossia il femore, include una cella di carico a livello del collo femorale, gruppo DAS e una cella di carico universale della gamba. La strumentazione relativa al ginocchio prevede il gruppo potenziometro del gomito e una cella di carico per valutare il contatto del ginocchio. La parte inferiore della gamba invece, viene strumentata con due celle di carico.

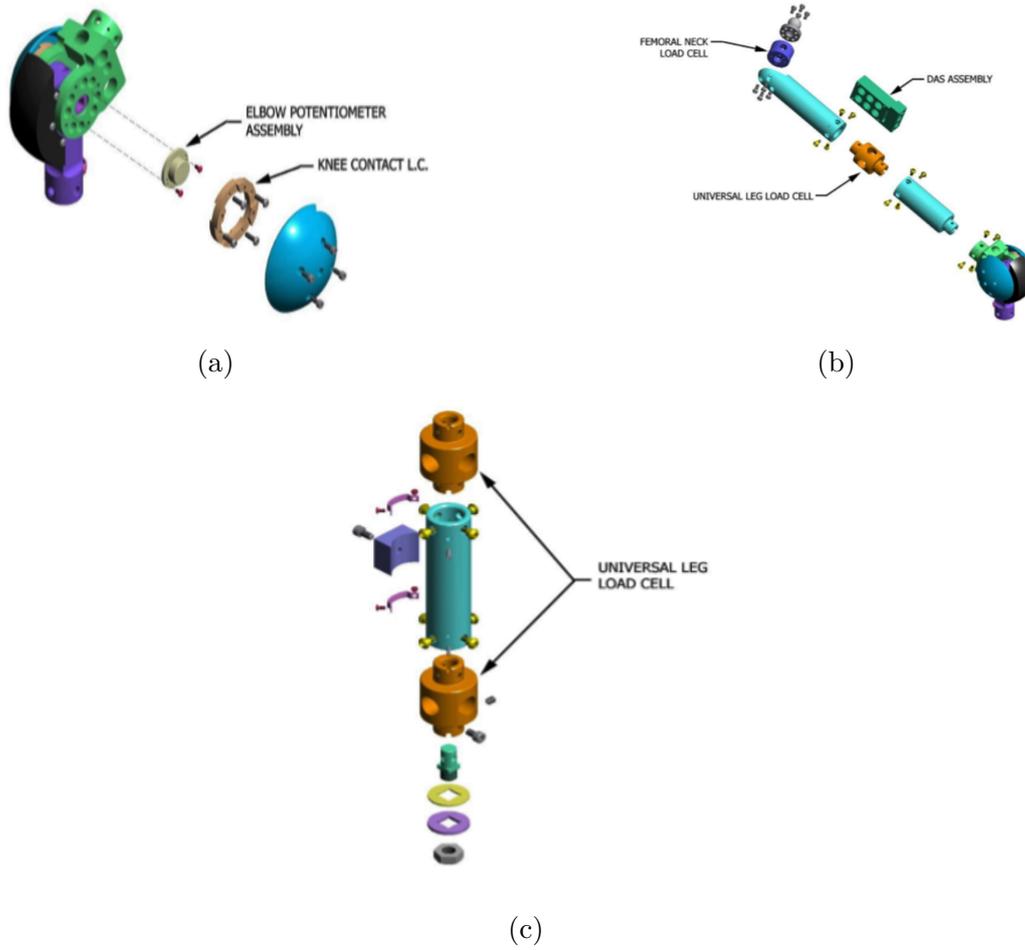


Figura 2.32: (a) strumentazione parte superiore, (b) strumentazione del ginocchio e (c) strumentazione parte inferiore

## Capitolo 3

# Sensori di compressione del torace

### 3.1 Lesioni degli occupanti

Le lesioni degli occupanti di un'autovettura sono condizionate dall'utilizzo e dall'azionamento dei sistemi di ritenuta (cinture di sicurezza, pretensionatori, airbag). Non è sempre facile riconoscere il meccanismo lesivo, spesso legato a più circostanze, tra le quali si inseriscono il malfunzionamento ed il mal posizionamento delle cinture di sicurezza, l'inadeguato assetto posturale dell'occupante, la vicinanza dall'airbag ed altro. I sistemi di contenimento attuali, nello specifico la cintura di sicurezza a tre punti, se da un lato riducono le lesioni potenzialmente mortali, dall'altro possono essere responsabili di lesioni minori multiple e disseminate. In incidenti ad elevata velocità, superando i limiti di resistenza degli organi o della corporatura ossea, possono verificarsi contusioni, fratture ossee e danni viscerali anche gravi. La mobilità del corpo, rispetto al torace frenato dalla cintura, favorisce distrazioni del rachide cervicale con possibile interessamento vertebrale. La clavicola immobilizzata promuove la torsione della spalla contro-laterale con la possibilità di impatto di quest'ultima contro le strutture dell'abitacolo. È stato osservato che le lesioni dirette sono legate all'effetto meccanico indotto dalla cintura sulle zone di pressione (fegato, torace), mentre le lesioni indirette sono svincolate dall'uso della cintura e si realizzano per mobilizzazione di alcuni organi per effetto di meccanismi di accelerazione-decelerazione e trasmissione delle forze. Nel meccanismo indiretto sono prevalenti le lesioni rachidee: nei casi più lievi inducono semplice distrazione dei legamenti vertebrali, mentre nei casi più gravi si può giungere a fratture intersomatiche. Il tratto lombare è spesso caratterizzato da traumi da torsione esterna, i quali si verificano quando la parte superiore del corpo del cinturato tende a compiere una rotazione intorno all'asse della cintura toracica mentre il bacino è bloccato dal nastro addominale. Nello specifico si tratta di una flessio-rotazione anteriore

proporzionale all'inerzia del corpo e nella maggior parte dei casi si ottiene una frattura caratteristica da compressione cuneiforme antero-laterale del corpo vertebrale. A livello toracico, si osservano frequenti lesioni della gabbia toracica, per lo più fratture costali, prodotte dal meccanismo diretto della cintura di sicurezza, i cui monconi possono indurre lesioni polmonari con pneumotorace ed enfisema sottocutaneo. Per quanto riguarda le lesioni viscerali, quindi il tratto meno protetto dalla cintura, queste sono indotte da un meccanismo diretto per compressione-schiacciamento, ovvero da meccanismo indiretto per decelerazione e trasmissione di forza. Le lesioni epatiche nei soggetti cinturati sono dovute a compressione diretta del nastro ventrale, soprattutto in caso di "submarining", ovvero lo scivolamento del corpo anteriormente e verso il basso. L'errato posizionamento della cintura al di sotto della spalla, invece, può favorire lesioni della milza fino a rottura causando una imponente emorragia retroperitoneale, dovuta al meccanismo indiretto per azione delle forze di accelerazione-decelerazione. È anche possibile l'interessamento della carotide per schiacciamento diretto del vaso per cintura mal posizionata, ovvero per ipertensione del collo. Le lesioni da airbag interessano volto e capo sottoforma di abrasioni, contusioni e lesioni oculari. Il meccanismo, responsabile di tali lesioni, è indotto dal violento impatto dell'airbag esploso contro il volto. I danni oculari vanno da semplici abrasioni corneali fino al distacco della retina. Da considerare anche le complicanze sull'orecchio dovute allo scoppio dell'airbag, con possibili vertigini, deficit acustici neurosensoriali. Questo tipo di lesioni possono derivare da un meccanismo traumatico diretto per impatto dell'airbag sul padiglione auricolare in un soggetto che presenta il busto ruotato rispetto al senso di marcia, ossia indotto dal rumore provocato dal gonfiaggio dell'airbag [30].

### 3.1.1 Biomeccanica del trauma toracico

Il trauma toracico, come accennato del paragrafo precedente, è prodotto per contusione o penetrazione di oggetti nella parete ossea del petto umano (costole, sterno, colonna vertebrale) e nei suoi organi interni quali cuore, polmoni, fegato, milza e reni. Le lesioni toraciche vengono associate ad una mortalità significativa proprio a causa dei potenziali danni agli organi vitali contenuti nella cavità toracica. Questi traumi sono responsabili di un numero rilevante di morti e feriti gravi negli incidenti automobilistici, secondi solo ai traumi cranici, e sono riscontrati negli utenti più "deboli" della strada (pedoni, motociclisti), ma anche negli occupanti di veicoli coinvolti in incidenti stradali, durante l'impatto con le componenti interne e rigide dell'abitacolo (airbag, volante, plancia). In un traumatismo diretto, il petto viene colpito da un oggetto in movimento oppure impatta contro una struttura fissa e, la parete toracica assorbe la sollecitazione trasmettendola agli organi interni. A causa della rapida decelerazione della cavità toracica, con andirivieni degli organi intratoracici per via dell'inerzia, si generano forze di torsione e taglio nei punti dove tali organi si fissano al corpo, con possibili conseguenti lesioni o rotture. La grande

quantità di prove sperimentali biomeccaniche ha condotto all'introduzione di diversi criteri lesivi per impatti sul torace. Alcuni studi hanno indagato sugli effetti dell'età sul limite di tolleranza del trauma toracici in impatti frontali, in relazione all'utilizzo o meno dei sistemi di ritenuta, concludendo quanto segue [31]:

- La metà degli occupanti con lesioni AIS 3+ al torace sono stati coinvolti in collisioni con  $\Delta V \leq 40$  km/h;
- Nella metà degli occupanti più anziani (50 anni) sono state riscontrate lesioni al torace per  $\Delta V \leq 34$  km/h;
- Il tasso delle lesioni toraciche degli occupanti anziani era più del doppio di quella degli occupanti giovani.

I principali meccanismi lesivi del torace sono:

**Traumi costali** portano all'instabilità della gabbia toracica ed alla possibile penetrazione di segmenti ossei verso gli organi interni. Tali traumi risultano direttamente correlati alla forza di compressione esercitata sulle costole, che possiedono una notevole elasticità e che permettono ampia escursione flessionale prima di giungere a rottura (frattura). Il criterio di valutazione di questa lesione può essere applicato a tutti gli impatti diretti sul petto e offre diversi livelli di tolleranza in relazione alle differenti caratteristiche anatomiche interindividuali.

**Lesioni agli organi interni** possono riguardare sia lesioni polmonari sia lesioni rivolte ad altri organi interni. Le lesioni polmonari possono verificarsi a seguito dello schiacciamento del torace (con o senza frattura costale) e, a differenza delle fratture costali, sono dipendenti dalla velocità di impatto. Alle alte velocità, un'onda di compressione o pressione viene trasmessa ai polmoni attraverso la parete toracica, generando possibili lesioni al letto capillare degli alveoli (contusione polmonare). La lacerazione e/o perforazione del tessuto polmonare può comportare uno pneumotorace o emotorace. Nel primo caso la cavità pleurica è riempita di aria, nel secondo caso di sangue. Per ciò che riguarda il cuore, per elevate velocità si possono verificare lesioni dei principali vasi sanguigni localizzati a livello del torace, come l'aorta. La rottura aortica può avvenire in diverse circostanze: a causa della forza di trazione e/o di taglio, della compressione diretta sulla colonna vertebrale, o a causa di un eccessivo aumento improvviso della pressione endoluminale.

Le prove di crash test condotte a livello europeo (EuroNCAP) ed americano (NHTSA) hanno stabilito un livello di tolleranza per le accelerazioni risultanti sul torace in urti frontali. Questo parametro è misurato con un accelerometro triassiale posto sulla colonna vertebrale del manichino ed il suo valore è di 60 g nell'intervallo

di 3 ms. La seguente formula quantifica la probabilità di lesioni toraciche AIS 4+, che per accelerazioni di 60 g risulta essere pari al 36%.

$$Prob(AIS4+) = \frac{1}{[1 + \exp 5.55 - 0.693a]}$$

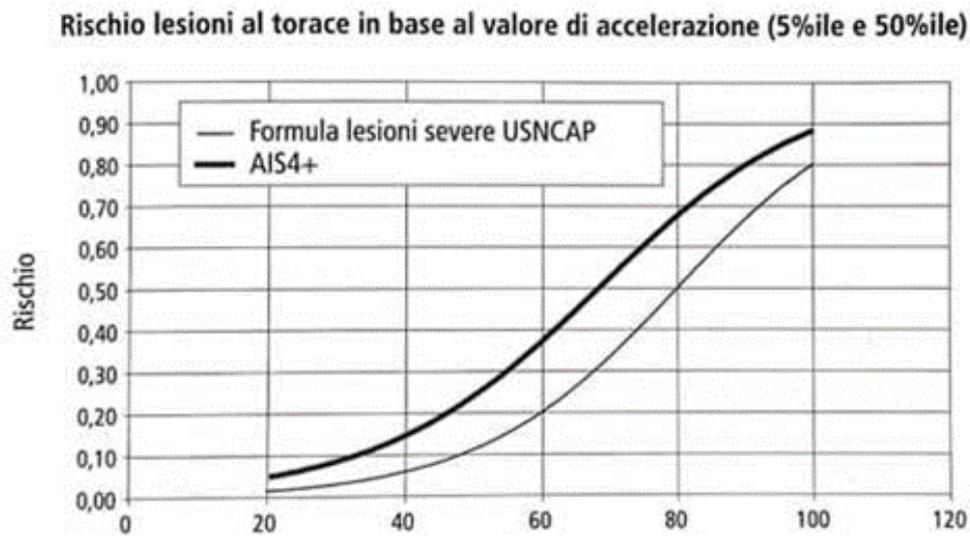


Figura 3.1: Accelerazione torace clip 3ms (g)

I principali criteri di lesività del torace sono:

- TTI (Thoracic Trauma Index): criterio di valutazione lesiva dipendente degli individui (peso ed età) e dalle accelerazioni laterali (sul lato dell'impatto) di picco della colonna vertebrale inferiore e della gabbia toracica. Il TTI può essere utilizzato come indicatore della performance delle autovetture per urti laterali;
- CTI (Combinated Thorax Index): misura delle lesioni del torace ed è definito dalla combinazione della massima deformazione dello sterno e della massima accelerazione risultante sul torace;
- VC (Viscosity Criterion): valore massimo del prodotto, dipendente dal tempo, tra la velocità di deformazione(V) e la funzione di compressione istantanea (C);

## 3.2 Nuovi sensori di schiacciamento per una migliore biofedeltà

La necessità di valutare il comportamento del corpo umano in caso di sollecitazioni molto elevate in ambito automobilistico sfocia nella nascita di ATD. L'affidabilità delle informazioni fornite dai manichini, dipende dalla loro biofedeltà, ossia dalla capacità di replicare fedelmente il comportamento del corpo umano negli incidenti e fornire la corretta misura delle sollecitazioni a cui è sottoposto. Nel capitolo 2, è stata descritta l'evoluzione subita dagli ATD negli ultimi anni e il livello di biofedeltà raggiunto con lo sviluppo dei manichini WorldSID e THOR. La ricerca di una elevata biofedeltà corre parallelamente allo sviluppo di nuovi sensori in grado di fornire misure sempre più precise. Obiettivo di questo lavoro di tesi è confrontare diversi sensori di spostamento atti a valutare la deformazione del torace in urto frontale e laterale. Ad oggi, sul mercato sono disponibili molti tipi di strumenti di misura progettati in modo meccanico e ottico in grado di rilevare lo spostamento e che vengono assemblati in ATD quali WorldSID-50M e Thor-50M. Tuttavia, tali strumenti presentano ancora molti dei problemi sulla riproducibilità, ripetibilità, durata, affidabilità e precisione, motivo per il quale vengono tutt'oggi studiati. Tra questi dispositivi vi sono:

- 2D IR-TRACC/3D IR-TRACC;
- 2D S-TRACK/3D S-TRACK;
- Rib-EYE;
- KIR-TRACC;
- Spiral-TRACK.

### 3.2.1 2D IR-TRACC

#### Descrizione generale

IR-TRACC (Infra Red Telescoping Rod for Assessment of Chest Compression) prodotto da Humanetics, è un potenziometro ottico caratterizzato da un'asta telescopica in acciaio inossidabile alle cui estremità sono presenti due LED, disposti frontalmente tra loro: il primo LED consiste in un emettitore di luce infrarossa, il secondo in un ricevitore (fototransistor). Il principio di funzionamento che si trova alla base è di tipo foto-ottico: la luce infrarossa emessa dal primo LED fuoriesce attraverso una lente di plastica facente parte dell'alloggiamento, i raggi di luce divergono quindi dal LED secondo una forma conica. L'irradianza emessa è correlata alla distanza tra emettitore e ricevitore secondo una legge di proporzionalità inversa quadratica:

$$I = f\left(\frac{1}{d^2}\right)$$

Dove:

- $I$  rappresenta l'irradianza;
- $d$  la distanza.

La corrente nel LED ricevente è correlata linearmente all'irradianza (ossia dipende dalla quantità di luce che raggiunge il fototransistor). Tale corrente viene convertita in voltaggio e linearizzata ( $d = f(1/\sqrt{I})$ ), per cui, il voltaggio di output misurato dopo il segnale amplificato sarà:

$$V_{out} \propto I \propto \left(\frac{1}{d^2}\right)$$

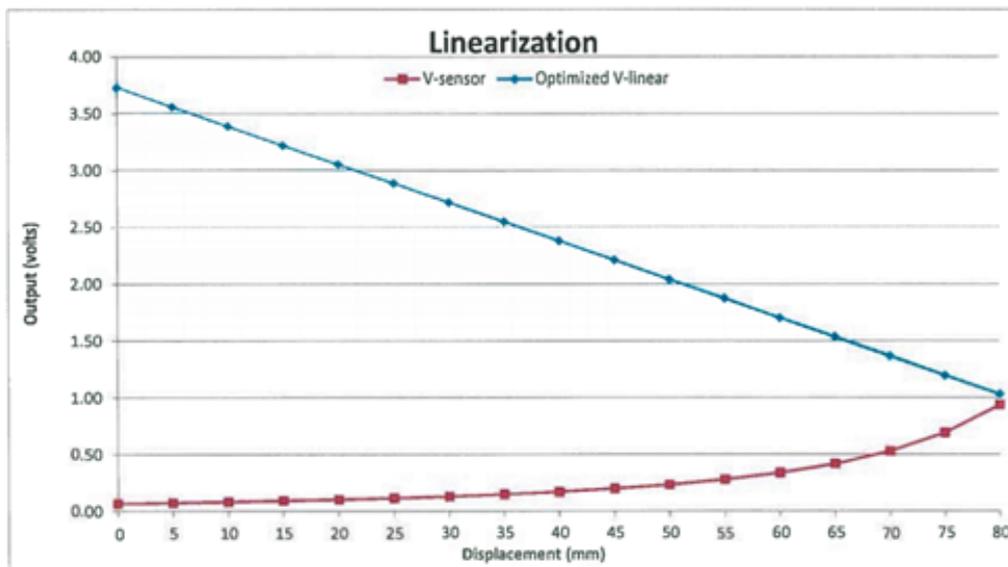


Figura 3.2: Linearizzazione della tensione di output

Da questo ne deriva che:

- una maggiore distanza tra i LED implica un basso voltaggio in output (voltaggio di output quando il sensore è completamente esteso: 65 mV)
- Una minore distanza tra i LED implica un alto voltaggio in output (voltaggio di output quando il sensore è completamente compresso: 1,1 V) [32].

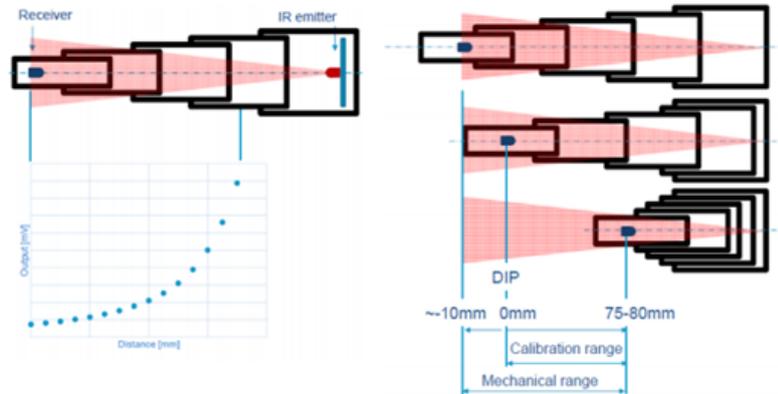


Figura 3.3: Principio di funzionamento dell'IR-TRACC, con riferimento alla configurazione totalmente estesa e totalmente compressa.

L'IR-TRACC offre un vantaggio rispetto ai tradizionali potenziometri per la deflessione del torace consentendo più punti di misurazione per ATD e il tracciamento dello spostamento del punto 2D o 3D ad alta velocità e a lungo raggio (fino a 90 mm di spostamento). La versione 2D dell'IR-TRACC prevede l'accostamento di un potenziometro angolare al sensore lineare.

### Geometria

Da un punto di vista geometrico, il sensore IR-TRACC presenta una corsa dell'asta telescopica compresa tra un massimo di poco superiore ai 140 mm ed un minimo intorno ai 68 mm. In Tabella 3.1 sono riassunte le caratteristiche geometriche salienti di un IR-TRACC.

Tabella 3.1: caratteristiche geometriche dell'IR-TRACC.

Geometrical requirements	Values
Min length	$\leq 68$ mm
Max length	$\geq 140$ mm
Rotation at spinebox around z	$\pm 45^\circ$
Rotation at spinebox around x for shoulder	$+45^\circ$ (up)
	$-15^\circ$ (down)
Rotation at spinebox around x for thorax and abdomen	$\pm 15^\circ$
Rotation at outer rib around z	$\pm 44^\circ$

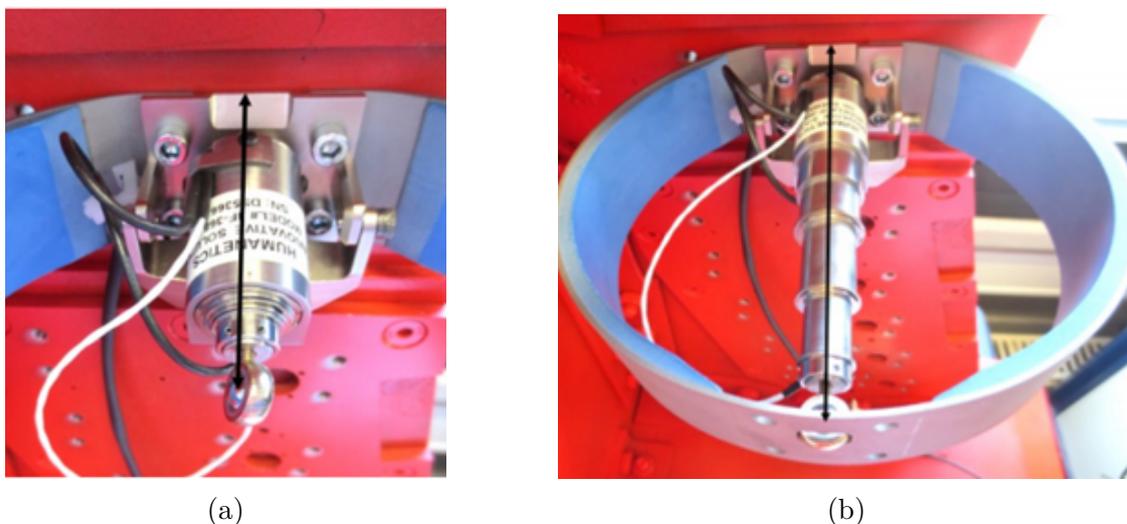


Figura 3.4: (a) lunghezza minima IR-TRACC e (b) lunghezza massima IR-TRACC.

Come si può notare, la costola di spalla necessita di una maggiore rotazione verso l'alto, al contrario, le costole di torace e addome sono limitate in rotazione dalla presenza di costole adiacenti. Lungo l'asse  $z$ , al sensore è consentita una rotazione di  $\pm 45^\circ$ , ossia  $45^\circ$  in avanti e indietro rispetto alla direzione di impatto [33].

### Assemblaggio

L'assemblaggio del sensore alla costola del manichino avviene attraverso diversi tipi di "bracket" (a seconda della tipologia di costola) e "head" (Figura 3.5). I potenziometri, disponibili al Centro Sicurezza Fiat, sono agganciati al bracket tramite Head di tipo "a1".

Queste parti sono adatte per il montaggio del sensore sul solo lato destro o sinistro del torace del manichino, oppure per l'uso simultaneo con entrambi i lati strumentati (Tabella 3.10).

### Calibrazione

A partire dal 2015, EuroNCAP ha permesso l'implementazione del sensore 2D IR-TRACC sul manichino WorldSID nei protocolli di impatto laterale. I parametri di infortunio si basano sulla compressione laterale delle costole e ciò richiede il calcolo della posizione delle costole rispetto al sistema di coordinate della colonna vertebrale. Per facilitare questo processo, è stata sviluppata la procedura di verifica della posizione zero, applicabile alle attuali versioni del sensore. Nello specifico le versioni in uso su manichino WorldSID 50M sono [34]:

- IF-367 (torace/addome);

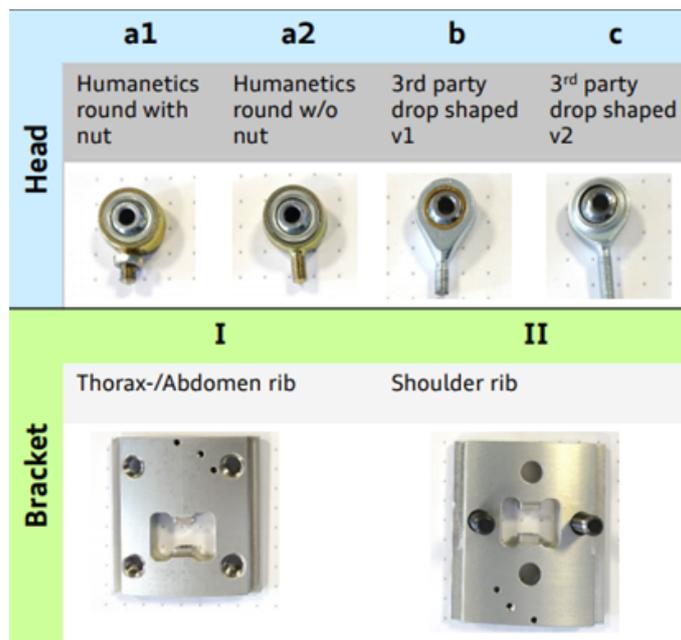


Figura 3.5: varianti di Head e Bracket per IR-TRACC.

(a)

PART NO.	QTY	DESCRIPTION
IF-368	1	2D IR-TRACC for shoulder WorldSID 50M
IF-367	5	2D IR-TRACC for thorax & abdomen ribs WorldSID 50M
3670-08	6	Non struck side ballast rib clamps

(b)

PART NO.	QTY	DESCRIPTION
IF-368	2	2D IR-TRACC for shoulder WorldSID 50M
IF-367	10	2D IR-TRACC for thorax & abdomen ribs WorldSID 50M

Tabella 3.2: 2D IR-TRACC per strumentazione (a) lato singolo e (b) su entrambi i lati

- IF-368 (spalla).

Nel momento in cui i parametri della posizione zero vengono implementati correttamente nel sistema di acquisizione, l'uscita in mm dell'IR-TRACC corrisponde al

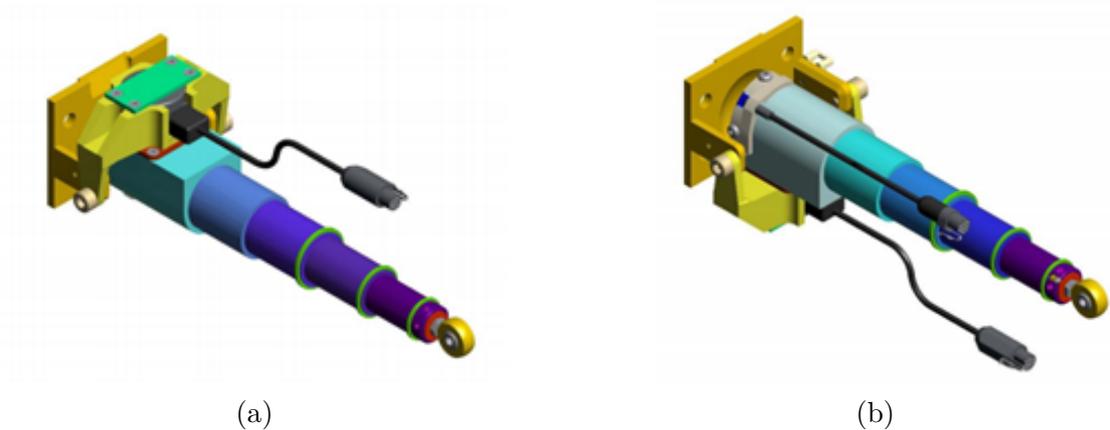


Figura 3.6: (a) Torax/Abdomen Rib: IF-367 e (b) Shoulder Rib: IF-368.

suo raggio pari alla distanza tra il perno della scatola e il perno della costola. La differenza più significativa consiste nella riduzione del raggio di uscita dell'IR-TRACC in mm all'aumento della compressione delle costole.

L'IR-TRACC può essere calibrato utilizzando le procedure di calibrazione del potenziometro lineare convenzionali. Humanetics offre anche un dispositivo di calibrazione da banco (TE-3700-IRKIT, Figura 3.7) progettato per consentire una determinazione accurata dei fattori di scala e della linearità. Questo dispositivo di calibrazione permette il fissaggio di entrambe le estremità dell'asta telescopica, è dotato di una trasmissione a ingranaggi meccanici e una pinza micrometrica digitale per una misurazione precisa della distanza, voltmetro di precisione e alimentazione interna. Un foglio di calcolo è fornito per la misura della linearità e della sensibilità in mm/Volt. Il potenziometro rotazionale viene calibrato secondo procedura standard.

### Procedure di calibrazione

**Calibrazione della lunghezza assoluta** Humanetics ha sviluppato una procedura di calibrazione della lunghezza assoluta per 2D IR-TRACC in cui l'output in millimetri (mm) viene espresso in lunghezza assoluta rispetto al centro di rotazione. In questa procedura si ottiene anche l'angolo di riferimento: lunghezza assoluta e angolo di riferimento sono rilevanti per il WorldSID-50M. La calibrazione della lunghezza assoluta si sviluppa parallelamente alla procedura di lunghezza standard che dovrebbe precedere la fase di calibrazione della lunghezza assoluta [35].

Questa procedura si svolge in tre fasi:

- La calibrazione della lunghezza viene eseguita secondo la procedura standard di calibrazione IR-TRACC (reference Service Bulletin "IR-TRACC Harmonized

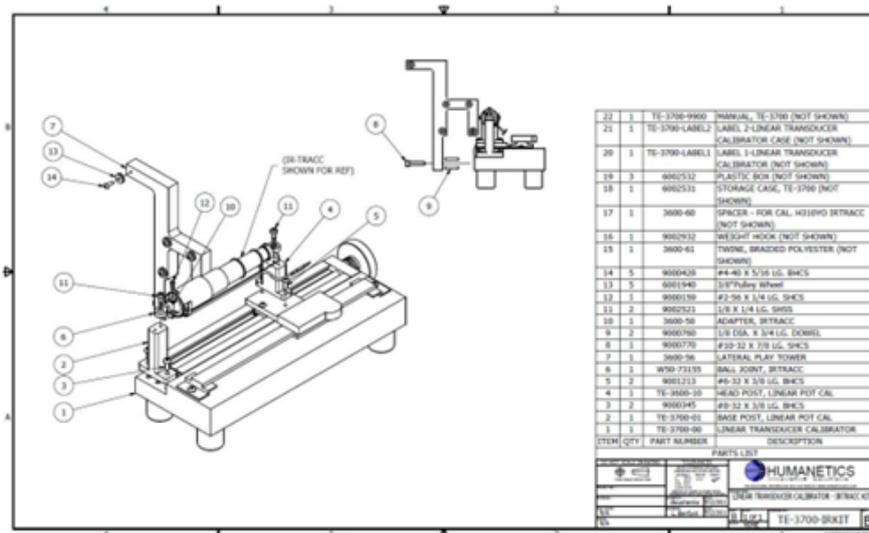


Figura 3.7: TE-3700-IRKIT, dispositivo di calibrazione.

Certification”, febbraio 2014.) in cui il sensore di angolo deve essere calibrato secondo procedura esistente;

- Il 2D-IR-TRACC viene montato sul dispositivo di riferimento part 11220 (Figura 3.8) in modo accurato e nella posizione di riferimento definita. Ciò consente di trovare parametri tra cui "Intercetta assoluta" e "Angolo di riferimento". Questi parametri sono necessari per il calcolo della posizione in coordinate  $x$  e  $y$ ;
- Convalidare i risultati della calibrazione. I dati ottenuti in posizione 1 e 2 su dispositivo di riferimento sono utilizzati per valutare la polarità del sensore angolare e per controllare se le coordinate  $x$  e  $y$  calcolate (e anche angolo e lunghezza) corrispondono alle posizioni note predefinite sull'attrezzatura. Quest'ultimo passaggio conferma che la calibrazione sia stata eseguita correttamente. In caso di mancata corrispondenza, tutti i passaggi precedenti devono essere riesaminati e corretti fino a quando i risultati non corrispondono ai valori attesi.

**Calibrazione Tubes In-Out (TIO)** Nel tempo, Humanetics ha rivisto la procedura di calibrazione per gli IR-TRACC al fine di aumentarne la qualità e l'accuratezza, introducendo la calibrazione "Tubes in-out". La procedura consiste in un miglioramento circa la procedura di calibrazione standard dello spostamento implementata a partire dalla fase di sviluppo del sensore nell'agosto 2013. La calibrazione Tubes In-Out (TIO) risulta efficace se applicata a tutti gli IR-TRACC con revisione



Figura 3.8: dispositivo di fissaggio part 11220.

R4 e R5, inclusi i modelli 2D e 3D. Per le precedenti versioni di IR-TRACC, fino alla revisione R3, si continua a calibrare secondo la procedura standard [36].

Nei precedenti metodi di calibrazione dell'IR-TRACC utilizzati, non venivano prese in considerazione le posizioni dei singoli tubi e gli eventuali errori correlati sono stati spiegati come una non linearità. Nella “tubes in-out”, al contrario, si tiene conto delle posizioni dei tubi durante la calibrazione minimizzando così un qualsiasi errore rimanente. La taratura dello spostamento si ottiene acquisendo i dati di calibrazione in due condizioni di spostamento: tubes-in (dentro) e tubes-out (fuori) ad ogni intervallo di calibrazione. La TIO consente il calcolo della linearizzazione ottimizzata, dell'esponente e della sensibilità lineare, applicando la tensione media di entrambe le condizioni del tubo nel range di applicazione pertinente. La durata massima di errore tra tube-in e tube-out viene calcolata ad ogni intervallo di calibrazione e ciò viene riportato sul foglio di calibrazione. Quindi, in questo caso, il nuovo requisito del passaggio è basato sull'intervallo massimo di errore per ogni intervallo di calibrazione. L'attuazione di tale procedura consente a Humanetics di produrre IR-TRACC con errori minori e quindi risultati più accurati. Anche in questa procedura, l'attrezzatura a disposizione è data dal dispositivo di calibrazione TE-3700-IRTKIT (Figura 3.7).

**Zero-Position Verification** La verifica della posizione zero è applicabile a tutte le versioni degli IR-TRACC 2D implementati nel WorldSID, che siano a destra o a sinistra della colonna vertebrale. Vi sono due importanti vantaggi nella verifica della posizione zero. Innanzitutto, l'uscita del 2D IR-TRACC fa in modo che la posizione effettiva della costola sia nota in qualsiasi momento consentendo un controllo della posizione delle costole tra prove differenti e la presenza di eventuali deformazioni rispetto alle prove precedenti. Una deformazione può essere indicativa di un problema con il set permanente delle costole o con i parametri di verifica

errati. Nel momento in cui si varia la posizione di un IR-TRACC da sinistra a destra, l'operatore è tenuto a correggere il parametro dell'angolo di riferimento in acquisizione o in post process. Tutti gli altri parametri di verifica e le formule di post-elaborazione sono indipendenti dall'orientamento dell'IR-TRACC. La procedura di verifica della posizione zero deve essere eseguita dopo la sostituzione di un sensore angolare, poiché strumenti di questo tipo influenzano l'intercettazione della posizione zero e l'angolo di offset, il fattore di calibrazione e la polarità. Anche la calibrazione della lunghezza dell'IR-TRACC deve essere eseguita in seguito alla sostituzione di tale sensore. Il kit del dispositivo di verifica 2D IR-TRACC (Figura 3.9) può essere utilizzato per verificare la posizione zero [37].

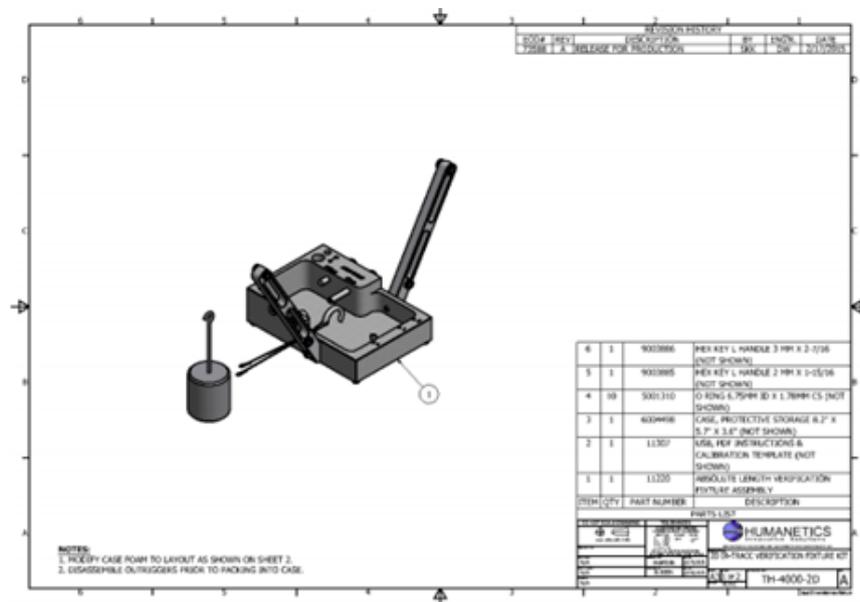


Figura 3.9: TH-4000-2D, Kit di fissaggio Zero-Position Verification 2D IR-TRACC.

### Teoria di procedura

Quando la posizione zero di IR-TRACC 2D non è implementata, i dati di lunghezza e angolo sono rappresentati in un sistema di coordinate polari che non è definito, né fissato con precisione. La verifica della posizione zero definisce il sistema di coordinate secondo SAE-J211<sup>1</sup> sulla colonna vertebrale e fissa i parametri del singolo sensore a questo sistema di coordinate. I parametri rilevanti dei singoli sensori sono determinati a livello di assemblaggio con una procedura di verifica riproducibile e tracciabile [34].

<sup>1</sup>Standard SAE-J211: Instrumentation for Impact Test.

Tabella 3.3: esempio foglio di calibrazione 2D IR-TRACC.

2D IR-TRACC ASSEMBLY- ZERO-POSITION VERIFICATION SHEET									
Applies for Right Hand Side IRTRACC Orientation									
IRTRACC		Angle Sensor			Date	Calculate IRTRACC Radius with Cal Factor: $R = (V_{\text{sensor}} \wedge -0.4514) * 33.87 + 11.62$			
Test No.	101614053170	Test Nr.	101620140Q5978	TEST No.		Original Calibr Intercept [mm]	111.99		
Model No.	IF-367-R-257	Model / SN	3670-11s	Technician	your name	Linearization exponent	-0.4514		
Serial No.	053170	Ang cal/polarity	-0.003169	V <sub>out</sub> /V <sub>exc</sub> /deg	23.2 / 45	Calibration Factor [mm/V]	33.867		
Calibration Range [mm]	80	Excitation [V]	5.0060	REF Length [mm]	105	Zero-Position Intercept [mm]	11.62		
IRTRACC Pos0 [V]	0.1058	Angle Pos0 [V]	-0.0504	Offset <sub>sensor</sub> [deg]	3.18	φ <sub>ref</sub> [deg]	R [mm]	x [mm]	y [mm]
IRTRACC pos0 tubes-in [V]	0.1055	Ang pos0 near [V]	-0.0562	φ <sub>ref</sub> RIGHT	-86.82	90.4	105.1	-0.7	105.1
IRTRACC pos0 tubes-out [V]	0.1060	Ang pos0 far [V]	-0.0446	Ang cal/polarity	-0.003169	89.6	104.9	0.7	104.9
IRTRACC pos1 [V]	0.0918	Ang pos1 [V]	0.2541	φ <sub>ref</sub> LEFT	93.18	70.8	111.2	36.6	105.0
IRTRACC pos2 [V]	0.0777	Ang pos2 [V]	0.4009	φ <sub>ref</sub> FRONT	3.18	61.5	118.9	56.7	104.6

Il foglio di verifica fornisce la formula per calcolare il raggio R (Radius) di IR-TRACC in [mm] a partire dalla tensione di uscita utilizzando l'esponente di linearizzazione, il fattore di calibrazione [mm/V] e l'intercetta posizione zero [mm]. Questi valori possono essere implementati in DAS o in software di data analysis (post-process). Quando implementati, i parametri danno il raggio calibrato dell'IR-TRACC (lunghezza pivot-to-pivot). I parametri del sensore angolare tra cui Cal Factor, Polarity e Offset determinano l'angolo dell'IR-TRACC in un sistema di coordinate. Le coordinate polari di raggio R e angolo possono essere convertite in coordinate cartesiane x e y utilizzando le funzioni trigonometriche seno e coseno.

Vari sistemi DAS richiedono l'inserimento della sensibilità di IR-TRACC in [V/mm] e dell'intercetta zero in [V] (inverso del fattore di calibrazione). Altri sistemi DAS applicano unità di misura in base al sistema SI in [m] per la lunghezza e [rad] per l'angolo. È molto importante utilizzare l'unità corretta poiché ciò influenzerà i risultati di output. Il foglio di verifica fornisce un riepilogo dei parametri di calibrazione in varie unità per IR-TRACC e sensore angolare (Tabelle 3.4 e 3.5). Esiste anche una formula alternativa per il calcolo del raggio R in [mm] a partire dalla tensione di uscita del sensore utilizzando Esponente, Sensibilità [V/mm] e Intercetta zero [Vlineare].

Tabella 3.4: Parametri IR-TRACC (esempio).

Summary of IRTRACC calibration parameters			SI UNITS	
Linearization exponent [-]		-0.4514		
Calibration Factor	[mm/V]	33.867	0.033867	[mV]
Zero-Position Intercept	[mm]	11.62	0.01162	[m]
Sensitivity	[V <sub>exc</sub> /mm]	0.02953	29.53	[V <sub>exc</sub> /m]
Zero Intercept [V <sub>exc</sub> ]			0.3433	
<b>Calculate IRTRACC Radius using Sensitivity:</b>				
$R = (V_{\text{sensor}} \wedge -0.4514 + 0.3433) / 0.02953$				

Tabella 3.5: Parametri sensore angolare (esempio).

Parameters WorldSID50 thorax / abdomen & Q10 lower lateral (Angle sensor sits on top of IR TRACC)			
	Left	Frontal	Right
$\phi_{REF}$ [deg]	93.18	3.178	-86.82
$\phi_{REF}$ [Rad]	1.626	0.05546	-1.515
Angle Cal/Polarity [Vsen/Vexc/deg]	-0.003169		
[Vsen/Vexc/Rad]	-0.1815		
Parameters for upside-down mounted 2D-IRTRACC (Angle sensor sits below IR-TRACC) WorldSIDSF & WorldSID50 shoulder & Q10 (except lower lateral)			
	Left		Right
$\phi_{REF}$ [deg]	-86.82		93.18
$\phi_{REF}$ [Rad]	-1.515		1.626
Angle Cal/Polarity [Vsen/Vexc/deg]	0.003169		
[Vsen/Vexc/Rad]	0.1815		

Gli IR-TRACC 2D sono implementati in vari orientamenti nel manichino: lato sinistro, lato destro, frontale (nel Q10). L'attuale procedura è stata sviluppata con l'intenzione di mantenere le funzioni trigonometriche per post-elaborazione identica e indipendente dall'orientamento dell'IR-TRACC nel manichino. Il sistema di coordinate scelto segue SAE-J211. In questo sistema, le coordinate x e y sono positive nel quadrante frontale del manichino, e l'angolo è 0 quando allineato con l'asse x positivo e crescente secondo la regola della mano destra. In Figura 3.10 è possibile osservare il lato destro del torace, il sensore angolare visto dall'alto, che riflette gli IR-TRACC del torace e dell'addome. Quando IR-TRACC è allineato con l'asse y l'angolo deve leggere  $+90^\circ$ .

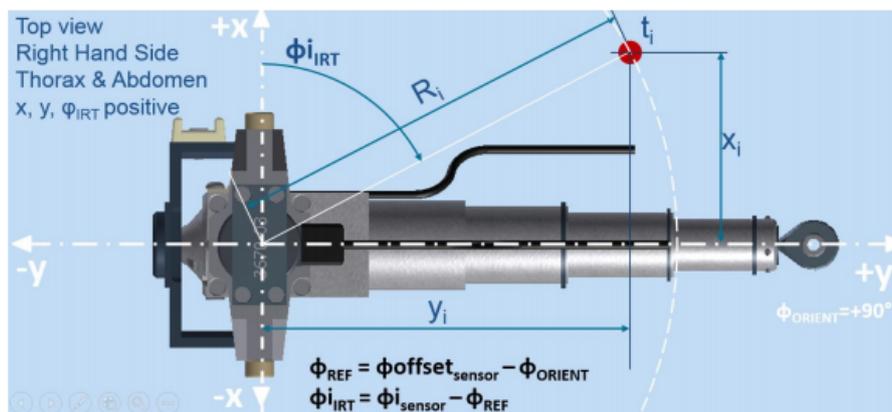


Figura 3.10: Assemblaggio 2D IR-TRACC nel sistema di coordinate per il lato destro, visto dall'alto.

L'orientamento di IR-TRACC nel manichino si riflette in due parametri:

- la polarità del sensore angolare, la quale definisce la direzione positiva dell'angolo;
- l'angolo di orientamento  $\Phi_{ORIENT}$ , il quale definisce l'orientamento angolare di IR-TRACC rispetto alla scatola toracica.

La procedura di verifica della posizione zero considera accettabili i dati standard di orientamento,  $\Phi_{ORIENT} = + 90^\circ$ , e il sensore angolare rivolto verso l'alto. In questa posizione, vengono determinati la polarità e l'angolo di offset del sensore ( $\Phi_{offsetsensor}$ ). L'angolo di riferimento  $\Phi_{REF}$  prende in considerazione l'angolo di orientamento e l'angolo di offset. Può succedere che in alcune applicazioni, il 2D IR-TRACC venga montato capovolto. Quando si è in questa situazione, (sensore angolare sotto IR-TRACC), la polarità del sensore angolare presenta segno opposto (da + a - o da - a +) in modo da ottenere un output positivo secondo il sistema di coordinate. Poiché la polarità dell'angolo e l'angolo di offset sono collegati, invertire la polarità comporta un effetto sull'angolo di offset. Sulla base dei valori ottenuti nell'orientamento standard, il foglio di verifica fornisce l'angolo di riferimento  $\Phi_{REF}$  e la polarità per tutti i possibili orientamenti dell'IR-TRACC nel dummy. Nel momento in cui un operatore implementa un sensore nel manichino e nel sistema di acquisizione dati o eventualmente ne cambia l'orientamento, deve essere applicata la seguente procedura:

1. Controllare il relativo foglio di verifica per il numero di serie del sensore;
2. Prendere nota dell'orientamento del sensore nel manichino (sinistro, destro o anteriore e su o giù);
3. Selezionare nella tabella i valori di angolo di riferimento  $\Phi_{REF}$  e polarità relativi all'orientamento richiesto;
4. Notare che i valori sono forniti in due unità: gradi e radianti. Assicurarsi di selezionare la corretta unità di misura;
5. Immettere i valori nel software DAS e/o Data Analysis (post-elaborazione).

### Data post-processing

La Figura 3.10 mostra l'IR-TRACC 2D di torace e sul lato destro (direzione di impatto) nel sistema di coordinate locale della colonna vertebrale. Le formule per calcolare la posizione della costola in coordinate x e y sono di seguito riportate. I parametri presenti nelle formule sono definiti nella Tabella 3.4 e nella Figura 3.10. Le formule di calcolo sono applicabili in tutti e 4 i quadranti del sistema di coordinate, a condizione che l'angolo di riferimento e la polarità corretti vengano

implementati in base all'orientamento dell'insieme (vedere paragrafo precedente). Un aspetto molto importante che riguarda l'IR-TRACC è la sua non linearità. Essendo un dispositivo non lineare, l'offset al tempo 0 non deve essere azzerato dal sistema di acquisizione dati, poiché ciò invaliderà la misurazione. Inoltre, nessuno dei due canali dell'angolo deve essere azzerato, poiché l'angolo è fissato al sistema di coordinate. Se l'azzeramento dell'offset a  $t_0$  è predefinito dal DAS, allora l'IR-TRACC e le tensioni angolari a  $t_0$  devono essere memorizzate insieme al data-set.

### Formule di calcolo

$$R[mm] = (V_{IRT}^{EXP}) * \text{Calibration Factor}[mm/V] + \text{Zero-Position Intercept [mm]}$$

$$R[mm] = \frac{V_{IRT}^{EXP} + \text{Zero-Intercept}[V]}{\text{Sensitivity}[V/mm]}$$

$$\Phi_{REF} = \Phi_{offset_{sensor}} - \Phi_{ORIENT}[deg]$$

$$\Phi_{iIRT} = \Phi_{i_{sensor}} - \Phi_{REF}, \quad \Phi_{0IRT} = \Phi_{0_{sensor}} - \Phi_{REF}[deg]$$

$$x = R * \cos([\Phi_{IRT}), \quad x_0 = R + 0 * \cos(\Phi_{0IRT}), \quad x_i = R_i * \cos(\Phi_{IRT})$$

$$D_x = x_i - x_0[mm]$$

$$y = R * \sin([\Phi_{IRT}), \quad y_0 = R + 0 * \sin(\Phi_{0IRT}), \quad x_i = R_i * \sin(\Phi_{IRT})$$

$$D_y = y_i - y_0[mm]$$

Il software per l'elaborazione e l'interpretazione è scritto in un foglio di calcolo (MS Excel) e consente di calcolare la deflessione delle costole in direzione  $x$  e  $y$  nel sistema di coordinate fittizie e la conseguente deformazione della costola nel piano  $xy$ .  $L_0$  è la lunghezza di riferimento di ogni singolo IR-TRACC, ossia la distanza da perno a perno all'istante  $t_0$  che può essere ottenuta dalla misurazione effettuata prima del test, oppure il valore nominale può essere utilizzato se non è presente alcuna deformazione permanente nelle costole. Per il WorldSID-50M, il valore nominale del perno alla distanza di rotazione a  $t_0$  dell'IR-TRACC è di 119,88 mm. Inoltre, è importante che l'input per la compressione e la rotazione siano sincronizzati nel tempo.

Le seguenti formule vengono utilizzate nel foglio di calcolo:

Tabella 3.6: parametri di calcolo, simboli e descrizione.

PARAMETER	DESCRIPTION
$t_0, t_i$ [s]	Time zero, Time i
$V_{IRT}$ [V]	IR-TRACC output
EXP	Linearization exponent IR-TRACC output
Calibration Factor [mm/V]	Linearized voltage calibration factor IR-TRACC
Sensitivity [V/mm]	Linearized voltage Sensitivity IR-TRACC
Zero-Position Intercept [mm]	IR-TRACC offset length in pivot co-ordinate system
Zero-intercept [ $V_{int}$ ]	IR-TRACC linearized offset voltage (used with Sensitivity V/mm)
$R, R_0, R_i$ [mm]	Sensor Radius at $t_0$ , at $t_i$
$x, x_0, x_i$ [mm]	x- co-ordinate, x at $t_0$ , x at $t_i$
$y, y_0, y_i$ [mm]	y- co-ordinate, y at $t_0$ , y at $t_i$
$Dx_i$ [mm]	Deflection in x direction at $t_i$
$Dy_i$ [mm]	Deflection in y direction at $t_i$
$\phi_{ORIENT}$ [degrees]	Orientation angle of assembled IR-TRACC, see Figure 5-19
$\phi_{offset\_sensor}$ [degrees]	Sensor offset angle Zero-Position verification, see Figure 5-19
$\phi_{REF}$ [degrees]	Reference angle, see Figure 5-19
$\phi_{sensor}, \phi_{0\_sensor}, \phi_{i\_sensor}$ [degrees]	Angle sensor output, at $t_0$ , at $t_i$
$\phi_{IRT}, \phi_{0\_IRT}, \phi_{i\_IRT}$ [degrees]	IR-TRACC angle along z-axis, at $t_0$ and at $t_i$

$$x_i = (L_0 - d_{yi}) * \sin \Phi_{xyi}$$

$$y_i = (L_0 - d_{yi}) * \cos \Phi_{xyi}$$

$$R_i = \sqrt{(x_i^2 + y_i^2)}$$

L'uscita dei sensori  $d_{yi}$ ,  $\Phi_{xyi}$  e il passo temporale possono essere inseriti nelle colonne del foglio di calcolo. I risultati di  $x_i$ ,  $y_i$  e  $R_i$  vengono riportati nelle colonne adiacenti.

Successivamente all'implementazione dei parametri di verifica, alla calibrazione e la post-elaborazione del canale secondo il foglio di calibrazione, è importante controllare le polarità e l'uscita dei sensori del manichino con un sistema di acquisizione dati in tempo reale (DAS) e post-elaborazione attiva dei canali dati. Le polarità corrette sono fornite nella Tabella 3.7.

Il valore tipico dichiarato in tabella è l'output atteso quando l'IR-TRACC è assemblato nel dummy. I valori sono indicativi e possono variare: ad esempio, quando il manichino è seduto in un veicolo, le costole vengono ruotate in avanti a causa dell'interazione con il sedile. Se una (o più) delle polarità non corrisponde,

Tabella 3.7: parametri di risposta dopo post-processing.

PARAMETER	POSITION	MANIPULATION	EXPECTED OUTPUT	TYPICAL STARTING VALUE	
Angle $\phi_{RT}$	Left	Push rib forward	Angle increases (to zero)	$\sim -90$ degrees	
	Right		Angle decreases (to zero)	$\sim +90$ degrees	
$x^*$	Left		X increases		$\sim 0$ mm
	Right				
Radius R	Left	Compress rib	Radius decreases (to zero)	$\sim +118$ mm	
	Right				
$y^*$	Left		Y increases (to zero)		$\sim -118$ mm
	Right				

è necessario controllare tutti i parametri di calibrazione e corretto. Qualora non venisse rilevato alcun errore, potrebbe esserci una polarità invertita da qualche parte nella catena di misurazione. Si consiglia di eseguire (o ripetere) la procedura di verifica della posizione zero utilizzando l'esatta catena di misurazione utilizzata per l'acquisizione di dati fittizi.

### 3.2.2 3D IR-TRACC

#### Descrizione generale

Il THOR 50M, Frontal Anthropomorphic Test Device, introdotto nelle prove di rating Euro NCAP a partire dal 2020, è implementato con 6 potenziometri di spostamento tridimensionali in torace e addome in grado di misurare la deformazione. I potenziometri in questione sono i 3D IR-TRACC, composti da due trasduttori angolari e uno di spostamento. L'uscita combinata dei due angoli ( $\phi_Y$ ,  $\phi_Z$ ) e dello spostamento ( $D_{S0}$ ) permette di calcolare una posizione dell'estremità delle costole nello spazio 3D ( $D_x$ ,  $D_Y$  e  $D_Z$ ). Le analisi 3D degli spostamenti nel manichino THOR-M sono complessi. Tra i tanti fattori, ciò è dovuto al gran numero delle variabili coinvolte. Pertanto, è importante conoscere come implementare gli IR-TRACC nel manichino e il sistema di misurazione [38].

#### Geometria

L'estremità anteriore del sensore è agganciata alla costola o all'addome mentre l'estremità posteriore alla spina dorsale del dummy. Il manichino THOR ha sei unità, tutte basate su componenti simili che sembrano tutti uguali, ma in realtà nessuna delle unità presenti nel manichino è identica.

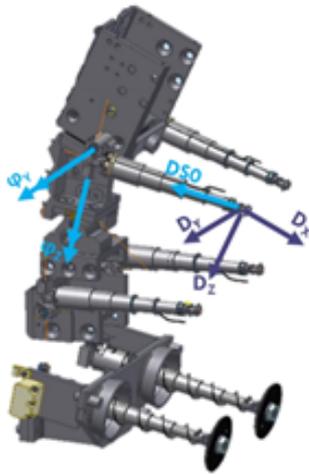


Figura 3.11: Sei versioni di 3D IR-TRACC nel THOR dummy

Vi sono versioni per lato sinistro e lato destro, versioni per torace superiore, inferiore e addome. In particolare, i sei potenziometri sono agganciati ai singoli segmenti della colonna vertebrale del manichino, ossia della colonna vertebrale superiore, della colonna vertebrale inferiore e della zona lombare. Questi segmenti sono separati da elementi flessibili e/o regolabili (superiore e inferiore) in quanto non hanno una posizione fissa l'uno rispetto all'altro. I potenziometri 3D misurano la deflessione tridimensionale rispetto ai singoli segmenti della colonna vertebrale e per questo tutte le unità hanno un proprio sistema di coordinate locali della colonna vertebrale. I sistemi di coordinate locali seguono il sistema di coordinate ATD generalmente accettato secondo SAE-J211. I potenziometri del torace superiore utilizzano il sistema

del torace inferiore utilizzano il sistema di coordinate LTS (Lower Thoracic Spine) e i potenziometri addominali utilizzano il sistema di coordinate LS (Lumbar Spine) (Figura 3.12).

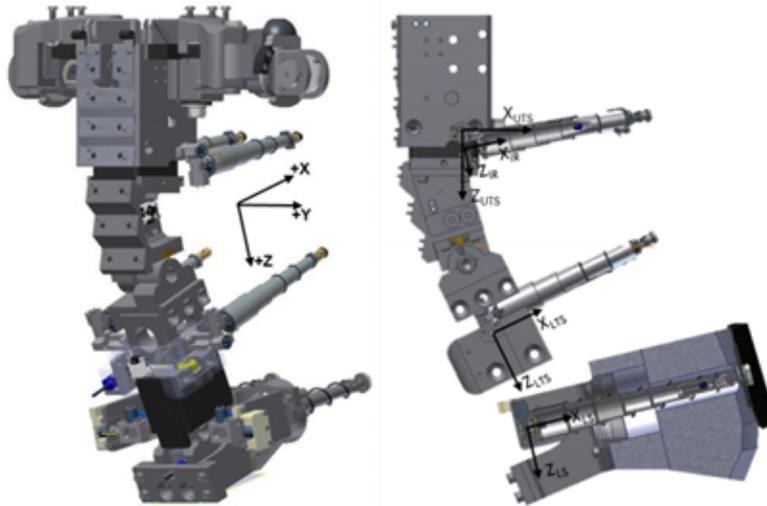


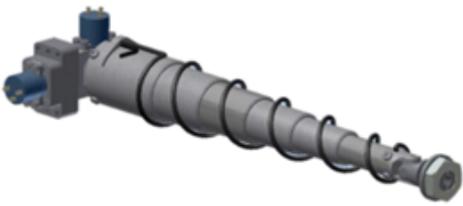
Figura 3.12: Sistema di coordinate globale del manichino (sinistra) e sistema di coordinate locale della colonna vertebrale (destra).

Nella Tabella 3.8 sono presentate in dettaglio le diverse versioni di potenziometri

implementati nel manichino THOR. In particolare, viene messo in evidenza il valore di “centerline offset” per singola tipologia e l’orientamento del sensore angolare lungo l’asse z. Le tipologie di sensori sono:

- 472-3550 Upper Left;
- 472-3560 Upper Right;
- 472-3570 Lower Right;
- 472-3580 Lower Left;
- 472-4730-1 Abdomen Left;
- 472-4730-2 Abdomen Right.

Tabella 3.8: Differenti versioni dei sensori 3D IR-TRACC.

	Part Number 472-XXXX	Range [mm]	Base	Offset $\delta$ [mm]	Z-angle sensor
	3550 Upper Left  3560 Upper Right (shown)	90	Narrow	+15.65	Down
	3570 Lower Right (shown)  3580 Lower Left	90	Wide	-15.65	Up
	4730-1 Abdomen Left  4730-2 Abdomen Right (shown)	120	-	0	Up

### Assemblaggio 3D IR-TRACC

Di seguito vengono riportate le viste esplose dei singoli sensori, l'orientamento e le relative parti utili all'assemblaggio.

#### 1. 472-3550 Upper Left e 472-3560 Upper Right 3D IR-TRACC

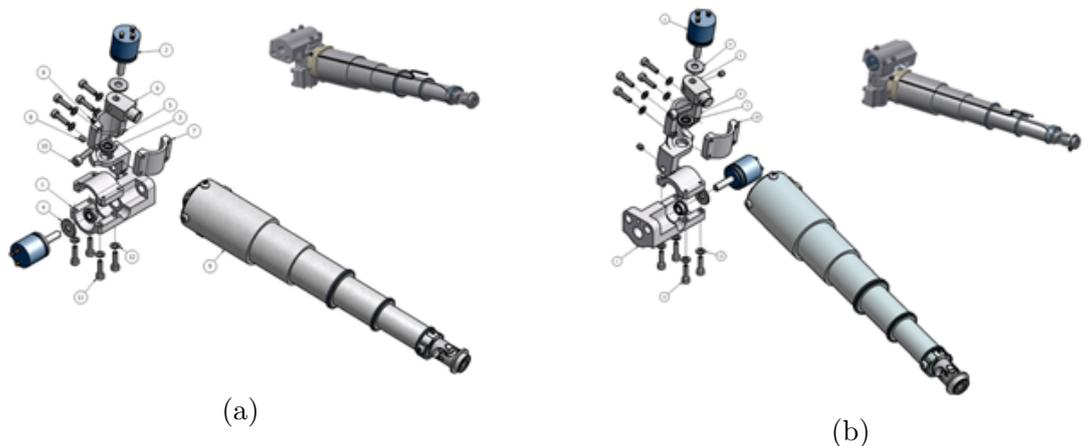


Figura 3.13: IR-TRACC: (a) upper left e (b) upper right.

#### 2. 472-3580 Lower Left e 472-3570 Lower Right 3D IR-TRACC

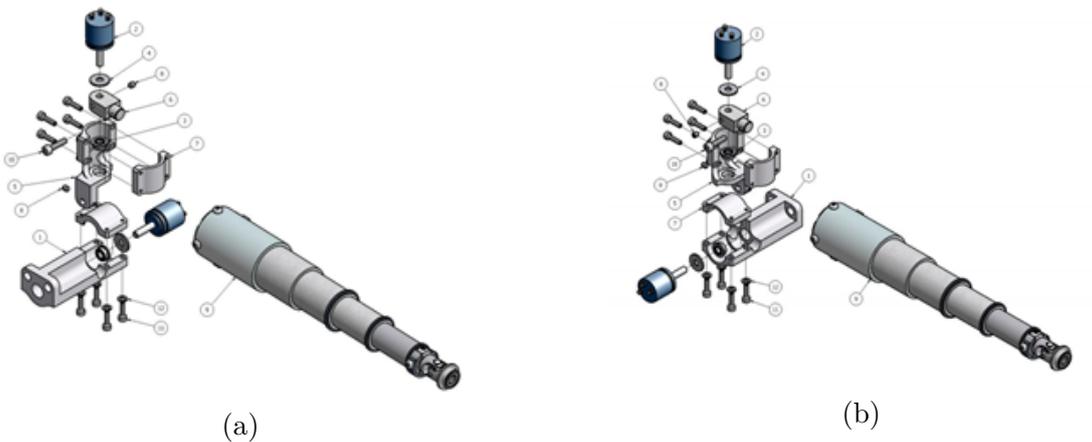


Figura 3.14: IR-TRACC: (a) lower left e (b) lower right.

La differenza tra il montaggio del gruppo IR-TRACC Upper e IR-TRACC Lower è nella base: per il sensore Upper si usa la parte 472-3551 (narrow) mentre per il sensore Lower si utilizza la parte 472-3571 (wide). A tale proposito vedere la

tabella 3.8. Inoltre, i sensori Upper Left e Lower Right differiscono dai sensori Upper Right e Lower Left per l'utilizzo di un Arm Mounting Bracket differente. In tabella 3.10 è possibile prendere visione della distribuzione delle quattro diverse parti su tutti e quattro gli IR-TRACC 3D nel torace.

Tabella 3.9: distribuzione parti 3D IR-TRACC.

	Upper Right	Upper Left	Lower Right	Lower Left
472-3552, Bracket		X	X	
472-3562, Bracket	X			X
472-3571, Base			X	X
472-3551, Base	X	X		

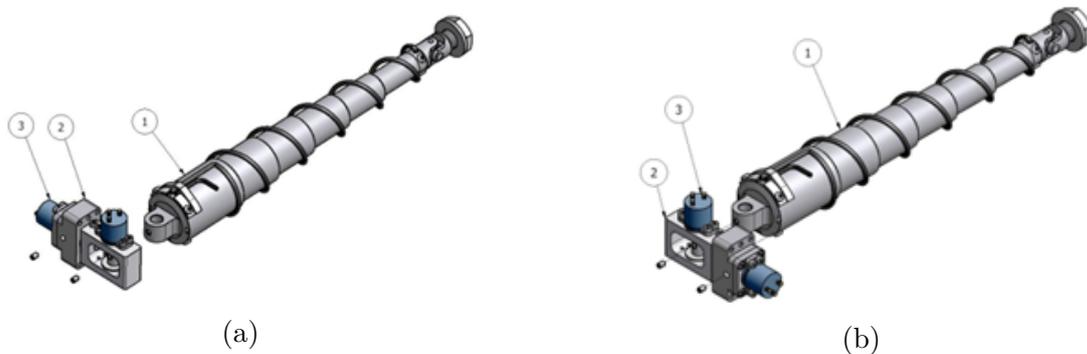


Figura 3.15: (a) Abdomen left 3D IR-TRACC e (b) Abdomen right 3D IR-TRACC.

### 3. 472- 4730-1 Abdominal Left e 472-4730-2 Abdominal Right 3D IR-TRACC

#### Calibrazione del sensore

**Calibrazione dello spostamento** Il 3D IR-TRACC, come detto in precedenza, può essere calibrato utilizzando le procedure di calibrazione del potenziometro lineare convenzionale. Sono disponibili modelli di calibrazione in MS-EXCEL e procedure per raccogliere ed elaborare la calibrazione dati. La procedura di calibrazione Tubes in-out, applicata per IR-TRACC di revisione R4 e superiori, utilizza il modello di calibrazione EN-FO-00008C. Per le revisioni precedenti a R4, si applica la procedura EN-PR-00013C la quale usa il modello di calibrazione EN-FO-00007C.

**Calibrazione del potenziometro angolare** Anche per la calibrazione dei potenziometri angolari si utilizzano metodi convenzionali integrando preferibilmente

la calibrazione integrata con il modello EN-FO-00014C o EN-FO-00015C e applicare un intervallo di calibrazione di  $\pm 75^\circ$  dall'uscita di 0 Volt al centro del range.

Tabella 3.10: Procedure e modelli disponibili.

Document Number	Part Number	Description	Application Model Number
EN-PR-00013C	11427	Harmonized Calibration Procedure	without "R4" or "R5"
EN-FO-00007C	11427	Harmonized Calibration Template	without "R4" or "R5"
EN-PR-00014C	11428	Tubes In-Out Calibration Procedure	R4 and R5
EN-FO-00008C	11428	Tubes In-Out Calibration Template	R4 and R5
EN-FO-00013C	11600	Stand-alone 3D IR-TRACC Zero-Position Verification Template for External Use	All models
EN-FO-00014C	11600	3D IR-TRACC Zero-Position Verification Integrated Harmonized Template for External Use	without "R4" or "R5"
EN-FO-00015C	11600	3D IR-TRACC Zero-Position Verification Integrated Tubes In-Out Template for External Use	R4 and R5

### Zero-Point Verification

L'attrezzatura utilizzata in questa procedura ha tre scopi:

1. Impostare i sensori 3D IR-TRACC lungo i rispettivi sistemi di coordinate locali per ottenere le posizioni zero di spostamento e angolo nel sistema di coordinate della colonna vertebrale locale;
2. Ottenere le polarità del sensore angolare nel sistema di coordinate locali;
3. Verificare se un'intera catena di misura riproduce posizioni note sull'attrezzatura dopo la calibrazione con l'implementazione di parametri e software di elaborazione.

Il dispositivo di azzeramento consente di impostare tutte e sei le versioni 3D IR-TRACC in 3 posizioni. I blocchi distanziatori inclusi servono per ospitare i seguenti trasduttori:

- 472-3550 in alto a sinistra e 472-3560 in alto a destra: utilizzare il distanziatore 2;
- 472-4730-1 Addome sinistro e 472-4730-2 Addome destro: utilizzare il distanziatore 6;
- 472-3570 in basso a destra e 472-3580 in basso a sinistra: nessun distanziatore.

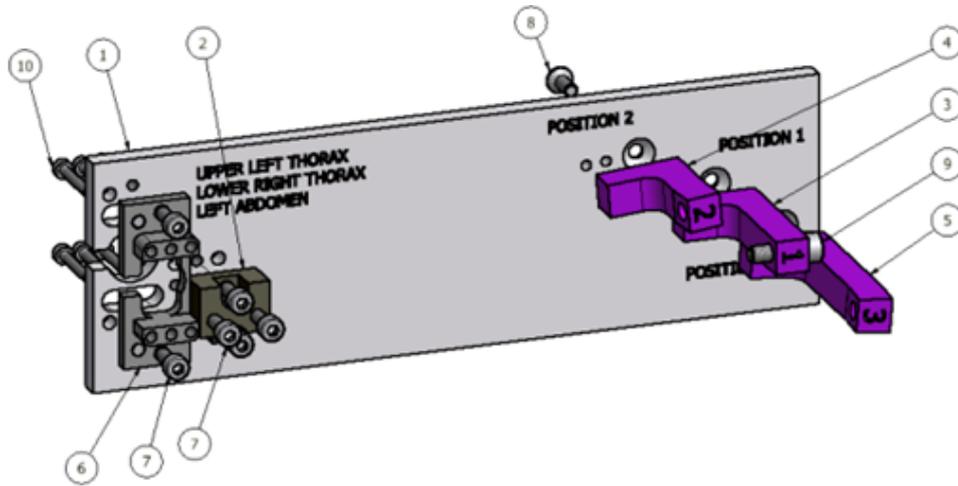


Figura 3.16: TF-472-6000.

Lo strumento di ispezione da banco TF-472-6000 è progettato per manipolare gli IR-TRACC 3D per THOR attraverso il loro movimento. Ogni grado di libertà,  $\phi_Y$ ,  $\phi_Z$  e  $R$ , può essere manipolato sia in positivo che in negativo. Questo è critico in quanto ogni sensore avrà una componente nella deflessione complessiva calcolata e se una qualsiasi polarità dovesse non essere corretta, si avrebbe un effetto significativo sul valore di deflessione ma questo potrebbe non essere inizialmente ovvio. Inoltre, i gruppi di IR-TRACC sono orientati in modo diverso in varie posizioni del manichino, quindi la verifica delle polarità può creare confusione. Ad esempio, potrebbero essersi verificati due IR-TRACC simili posti uno accanto all'altro sul banco e spostati in modo simile ci si attende polarità opposte una volta installato nel manichino. Avere un dispositivo e una tabella di riferimento circa gli output previsti rimuove ogni confusione. L'apparecchiatura orienta il sensore 3D IR-TRACC nella posizione ZERO (contrassegnata come POSIZIONE 1 sull'attrezzatura) dove  $\phi_Y$  e  $\phi_Z$  sono impostati su zero rispetto al sistema di coordinate della colonna vertebrale locale. Anche il raggio  $R$  è impostato su un valore noto, dipendente dal tipo di 3D IR-TRACC installato.

**Modelli Zero-Position Verification** Il modello di verifica della posizione zero in MS-EXCEL (EN-FO-00013C) per la raccolta e l'elaborazione dei dati crea una tabella con polarità e valori attesi per ogni tipo di 3D IR-TRACC e indica se i valori trovati corrispondono ai risultati attesi. Il risultato della procedura è un insieme di parametri del trasduttore 3D per l'implementazione in un qualsiasi Data Acquisition System (DAS) in modo strutturato e tracciabile. È inoltre disponibile un modello di verifica della calibrazione 3D integrato in MS-EXCEL. Questi modelli combinano l'estensione modello di verifica della posizione zero e modelli di calibrazione di spostamento e angolo e consente la raccolta dei dati di calibrazione da trasduttori di

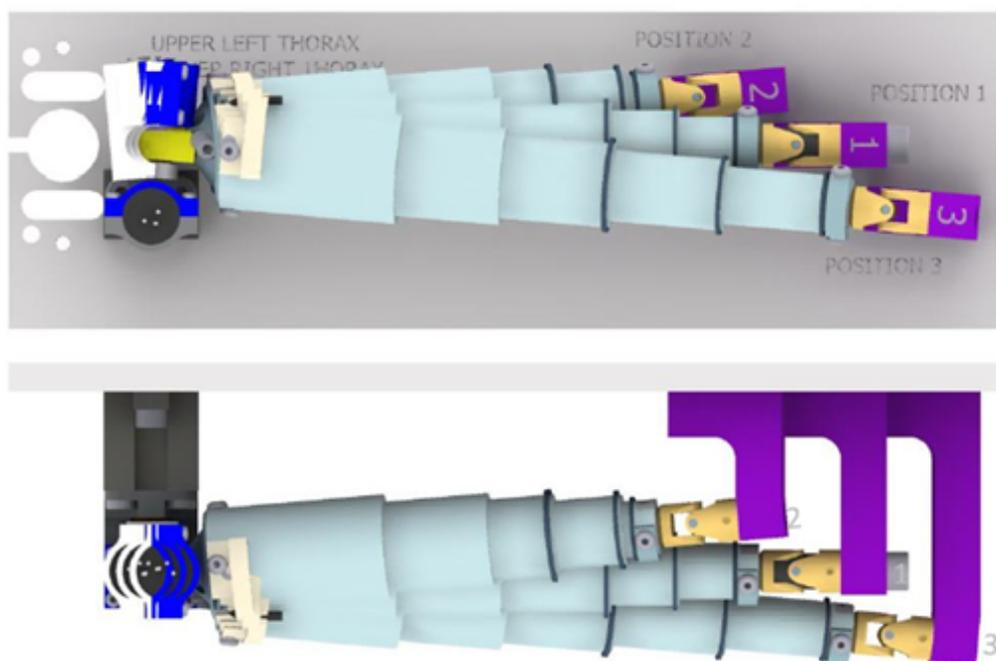


Figura 3.17: Upper left Thorax, posizione 1,2,3 (vista direzione  $-Y, +Z$ ).

spostamento, trasduttori di angolo e verifica della posizione zero in un documento. I parametri di calibrazione rilevanti vengono copiati tra i vari fogli in MS-EXCEL. Si consiglia di utilizzare il modello integrato in quanto riduce il lavoro e riduce la possibilità di commettere errori di immissione dei dati quando i numeri vengono copiati digitando a mano. Il modello di verifica della calibrazione 3D integrato è il documento EN-FO-00014C (senza R4 o R5 nel numero di modello) e EN-FO-00015C (modelli R4 e R5). Il dispositivo di installazione utilizza entrambi i lati della piastra di base per accogliere l'assemblaggio di entrambi i lati, destro e sinistro. Tutti e tre i montanti ed i distanziatori possono essere montati su entrambi i lati della piastra di base, la quale è stata incisa per identificare quale gruppo è montato su quale lato. I sensori toracici superiori si montano sul blocco spaziatore TF472-6002 come mostrato di seguito.

I sensori toracici inferiori si montano nella stessa posizione dei gruppi torace superiori ma senza il blocco spaziatore.

I sensori addominali si montano sul blocco distanziatore TF-472-6006 sul bordo più posteriore della piastra di base.

I fogli di verifica della posizione zero mostrano una panoramica dei fattori di calibrazione dei tre sensori montati nella parte superiore. Vengono forniti formule ed esempi per calcolare il raggio  $R$  e gli angoli basandosi sui parametri presenti sul foglio. In fondo al foglio una tabella presenta le coordinate note sul dispositivo

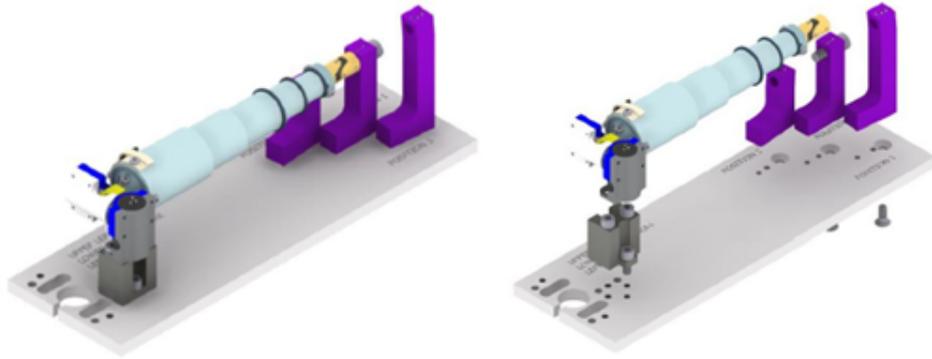


Figura 3.18: Upper Left Thorax 3D IR-TRACC: vista assemblaggio (sinistra), vista esplosa (destra).

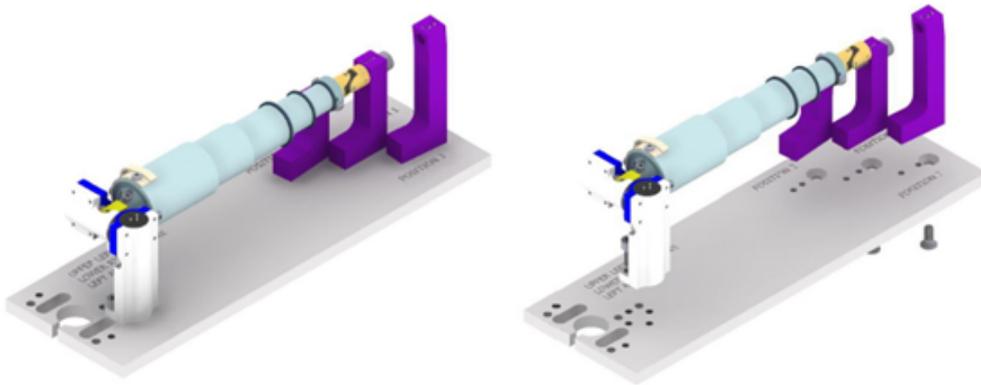


Figura 3.19: Lower right Thorax 3D IR-TRACC: vista assemblaggio (sinistra), vista esplosa (destra).

di verifica e le coordinate calcolate in base alle uscite del sensore secondo le funzioni matematiche che saranno descritte successivamente. Si noti che le deviazioni dell'angolo  $z$  del sensore influiscono sulle coordinate  $x$  e soprattutto  $y$  mentre le deviazioni del sensore dell'angolo  $y$  influenzano le coordinate  $x$  e principalmente  $z$ .

**Implementazione dei parametri nei sistemi di acquisizione dati** Il foglio di verifica della posizione zero fornisce i parametri di calibrazione per tutti e tre i sensori. I parametri sono forniti in più unità in modo da supportare vari sistemi DAS. La sensibilità è data in volt per unità ingegneristica e il valore inverso, il fattore di calibrazione, in unità ingegneristiche per volt. È importante applicare un offset angolare fisso nel sistema DAS, in modo che l'angolo di uscita dei sensori rimanga allineata con i sistemi di coordinate locali.

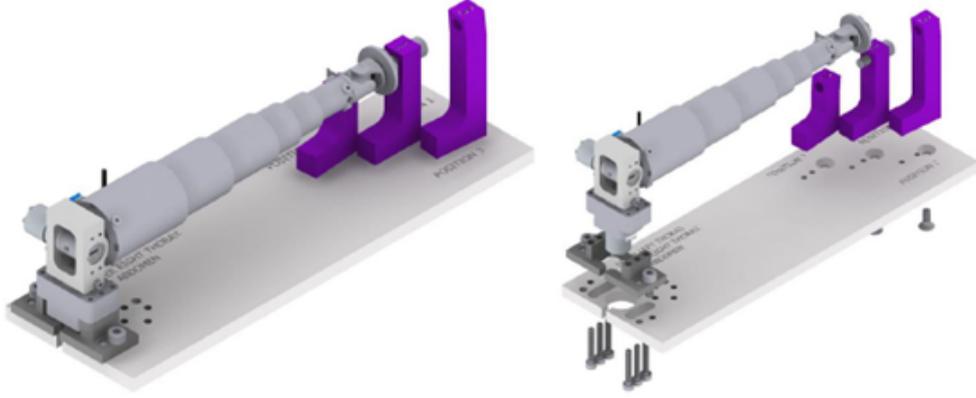


Figura 3.20: Left abdomen 3D IR-TRACC: vista assemblaggio (sinistra), vista esplosa (destra).

Per il trasduttore IR-TRACC, devono essere implementati l'esponente, il fattore di calibrazione e l'intercetta della posizione zero (offset in mm rispetto alla coordinata locale sistema). Se il sistema (DAS o software) lo consente, il centerline offset  $\delta$  dovrebbe essere implementato a livello di assemblaggio. I sensori toracici superiori e inferiori, e i sensori addominali possiedono tutti un diverso centerline offset, che influisce sull'elaborazione post-processing. Sia per i potenziometri angolari, che di spostamento, è necessario assicurarsi che i canali non siano corretti con l'offset all'istante  $t_0$ . L'azzeramento dei dati al tempo  $t_0$  invaliderà i dati del sensore IR-TRACC, inoltre i dati dell'angolo perderanno la connessione al sistema di coordinate locali della colonna vertebrale.

Applicare la classe di filtro CFC 180 su tutti i canali di angolo e spostamento. Applicare il filtraggio dei dati IR-TRACC dopo la linearizzazione. Il filtraggio del segnale IR-TRACC grezzo invaliderà i dati. Il sistema DAS calcola gli angoli  $Y$  e  $Z$  come segue:

$$\Phi_y = U_{ANY} * \frac{C_{ANY}}{U_{EX}} - \Phi_{OSY} \quad \text{e} \quad \Phi_z = U_{ANZ} * \frac{C_{ANZ}}{U_{EX}} - \Phi_{OSZ} [\text{deg}]$$

(da utilizzare se DAS applica il fattore di calibrazione);

$$\Phi_y = (U_{ANY} - U_{ANY1}) / S_{ANY} / U_{EX} \quad \text{e} \quad \Phi_z = (U_{ANZ} - U_{ANZ1}) / S_{ANZ} / U_{EX} [\text{deg}]$$

(da utilizzare se DAS applica la sensibilità).

Applicare il raggio di intercettazione zero  $I_R$  [mm] o la tensione di raggio di intercettazione zero  $[V_{LIN}]$  come offset fisso nei DAS per ottenere il raggio IR-TRACC in [mm] come output DAS, ad esempio, in codice ISO MME. Il sistema DAS calcola il raggio IR-TRACC come segue:

$R[\text{mm}] = (C_{IR} * U_{IR}^{EXP}) + I_R$  da utilizzare se DAS applica il fattore di calibrazione;

$R[\text{mm}] = (U_{IR}^{EXP} + I_{RV})/S_{IR}$  da utilizzare se DAS applica la sensibilità.

Dopo aver implementato i parametri del sensore nel DAS, si consiglia di ricontrollare i valori sull'apparecchiatura di azzeramento nella modalità online del DAS. Controllare che il sensore 3D replichi i raggi e gli angoli previsti come mostrato nel foglio di verifica.

### Data post-processing

L'elaborazione post-processing consiste nel calcolare le coordinate del centro dell'articolazione della costola toracica e della costola addominale rispetto al suo sistema di coordinate locale con le seguenti formule:

$$x_i = \delta * \sin(\varphi_{yi}) + R_i * \cos(\varphi_{yi}) * \cos(\varphi_{zi})[\text{mm}];$$

$$y_i = R_i * \sin(\varphi_{zi})[\text{mm}];$$

$$z_i = \delta * \cos(\varphi_{yi}) + R_i * \sin(\varphi_{yi}) * \cos(\varphi_{zi})[\text{mm}];$$

È importante applicare i valori corretti per  $\delta$  (indicati anche nel foglio di verifica della posizione zero):

$$\delta = +15.65 \quad \text{Upper IR-TRACC [mm]}$$

$$\delta = -15.65 \quad \text{Lower IR-TRACC [mm]}$$

$$\delta = 0 \quad \text{Abdomen IR-TRACC [mm]}$$

Calcolare la deflessione in x, y e z del centro dell'articolazione della costola e dell'addome con le seguenti formule:

$$D_{xi} = x_i - x_0 \quad [\text{mm}]$$

$$D_{yi} = y_i - y_0 \quad [\text{mm}]$$

$$D_{zi} = z_i - z_0 \quad [\text{mm}]$$

Calcolare la deflessione risultante del centro dell'articolazione di costola e addome con la seguente formula:

$$D_i = \sqrt{(D_{xi}^2 + D_{yi}^2 + D_{zi}^2)} \quad [\text{mm}]$$

### 3.2.3 2D S-TRACK

#### Descrizione generale

Nel documento ISO 15830, al punto 4, il sensore IR-TRACC, prodotto da Humanetics, viene indicato come il sensore utile a valutare la deflessione delle costole della spalla, del torace e dell'addome. In particolare, nella nota 8 si legge [39]:

“8) IR-TRACC model IF-363 (see ISO 15830-2:2013, Annex C) is a product supplied by Humanetics (formerly First Technology Safety Systems, Inc.), Plymouth, Michigan, USA. This information is given for the convenience of users of this part of ISO 15830 and does not constitute an endorsement by ISO of the product named. Alternative products may be used if they can be shown to lead to the same results.”

L'ultima frase afferma chiaramente che le alternative sono ammissibili.



Figura 3.21: S-TRACK.

Una valida alternativa è rappresentata dal sensore S-TRACK (Scissor-Track) prodotto da ATD LabTech per la valutazione dello spostamento di costole di spalla, torace e addome. A differenza dell'IR-TRACC, presenta un principio di funzionamento meccanico basato su un meccanismo “low-friction scissor” realizzato in acciaio inossidabile, il quale garantisce una misurazione della distanza assoluta trasferendo i movimenti di spostamento in linearità assoluta su un potenziometro in plastica conduttiva con un rapporto di conversione  $i = 4,5$ . Il segnale di uscita è lineare, per questo motivo non sono necessari la linearizzazione elettronica del segnale di misura o mezzi di calcolo. Inoltre, il semplice metodo di misurazione potenziometrica ha un basso consumo di corrente (corrente massima 10 mA a 10 V DC) e può funzionare a tensioni comprese tra  $V = 0,1\text{V}$  e  $V = 42\text{V}$  DC. In termini di velocità, accelerazione e durata, il sensore presenta:

- Velocità > 20 m/s (1,7 m/s su potenziometro);
- Accelerazione del binario a forbice > 5000 m/s<sup>2</sup>;
- Durata > 1 milione di colpi.

S-TRACK realizza misurazioni del percorso assoluto in alta risoluzione. Si adatta alle applicazioni esistenti per dimensioni, centro di gravità e peso e quindi è facilmente sostituibile senza modificare le caratteristiche fisiche del manichino da crash-test.

**Geometria** La geometria di S-TRACK presenta dimensioni, massa e interfacce che soddisfano la possibile sostituzione con i sensori IR-TRACC. Si tratta di sensori a forbice di alta precisione, priva di gioco, liscia, antipolvere e realizzata in acciaio inossidabile per utensili [40].

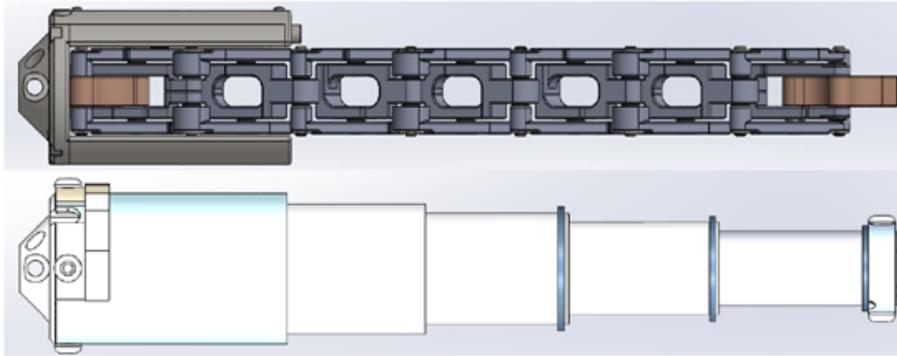


Figura 3.22: S-TRACK vs IR-TRACC.

Il campo di misura del sensore si mostra regolabile grazie agli elementi a forbice. Nelle due configurazioni principali di “Fully extended” e “Fully collapsed”, S-TRACK presenta una lunghezza complessiva di 153,9 mm e 58,4 mm rispettivamente come mostrato nelle figure seguenti (Figura 3.23a, Figura 3.23b). La corsa totale del binario a forbice meccanico è pari a 95 mm. Il sensore è completamente riparabile, in quanto tutti gli articoli lo sono singolarmente.

### Assemblaggio 2D S-TRACK

Come si è detto precedentemente, il sensore S-TRACK garantisce una elevata intercambiabilità, senza che vi sia la necessità di eseguire delle modifiche all’interno del manichino. L’assemblaggio all’interno del WorldSID 50M risulta facilitato da “bracket” del tutto compatibili con il componente costola del manichino. ATD LabTech propone le proprie bracket per entrambi i manichini per cui è prevista l’implementazione di questo tipo di sensori. In questo paragrafo ci limitiamo ad

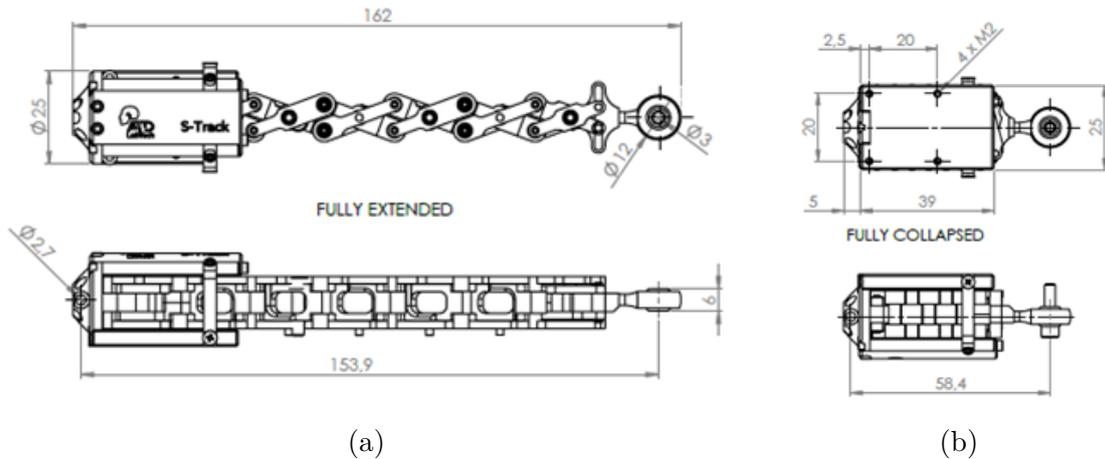


Figura 3.23: (a) configurazione “fully extended” e (b) configurazione “fully collapsed”.

analizzare il 2D S-TRACK, implementato in manichini per urto laterale (Figura 3.24).



Figura 3.24: 2D S-TRACK.

Nella figura in alto si evidenzia la differenza esistente tra bracket di spalla e bracket torace/addome a conferma della elevata intercambiabilità. Per quanto riguarda le “Head” del sensore, è possibile montare le stesse montate per il 2D IR-TRACC (Figura 3.5). Nello specifico, il sensore disponibile al Centro Sicurezza Fiat presenta una Head di tipo “a1”. Queste componenti sono utilizzate su entrambi i lati del manichino. ATD LabTech ha inoltre previsto un adattatore 3D per WorldSID 50M che prevede la presenza di un secondo potenziometro rotativo utile al calcolo della terza dimensione. Nell’adattatore vengono rispettate la massa, le dimensioni e il design di interfaccia dei sensori S-TRACK e IR-TRACC. A variare sono i cuscinetti del dispositivo, realizzati in bronzo e con una superficie maggiore. Una volta montato sul componente costola del manichino, l’adattatore consente un maggior grado di libertà lungo l’asse x, garantendo una rotazione da  $-24^\circ$  a  $5^\circ$ .

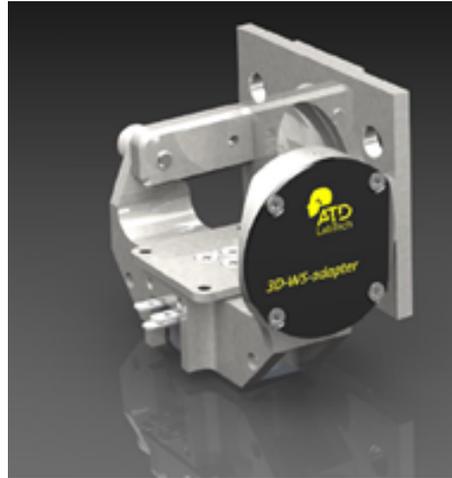


Figura 3.25: 2D S-TRACK.

### Calibrazione

Il sensore 2D S-TRACK viene calibrato secondo le procedure di calibrazione del potenziometro lineare convenzionali, mentre il potenziometro rotazionale viene calibrato secondo procedura standard. La sequenza di calibrazione viene eseguita in base alla calibrazione ed alla descrizione del sistema KW-DS0001 con una serie di misurazioni e 10 punti di misura. I valori dell'oggetto di prova e del sensore di riferimento vengono memorizzati, l'eccitazione del trasduttore viene attivata cinque minuti prima dell'inizio della calibrazione. Tutti i dispositivi di misura vengono accesi almeno un'ora prima dell'inizio della calibrazione. Le letture delle misurazioni, ed il risultato del calcolo, vengono mostrati in Tabella 3.11. I coefficienti lineari vengono calcolati con il metodo dei minimi quadrati.

### Zero-position verification

La verifica della posizione zero, come visto, è applicata a tutte le versioni di 2D IR-TRACC implementati nel WorldSID, indipendentemente che si trovino a destra o a sinistra della colonna vertebrale, ma è applicabile anche ai sensori 2D S-TRACK. La verifica viene eseguita come per l'IR-TRACC: l'uscita del sensore fa in modo che la posizione effettiva della costola sia nota in qualsiasi momento permettendo un controllo circa la posizione delle costole tra prove differenti e la presenza di possibili deformazioni rispetto alle prove precedenti. Nel momento in cui viene cambiata la posizione di un S-TRACK da sinistra a destra, l'operatore è tenuto a correggere il parametro dell'angolo di riferimento in acquisizione o in post-process. La procedura di verifica della posizione zero deve essere eseguita dopo la sostituzione di un sensore angolare, dal momento che questi strumenti influenzano l'intercetta della posizione zero e l'angolo di offset, il fattore di calibrazione e la polarità. Anche

Tabella 3.11: Esempio measurement chart.

**7 Measurement chart**

Displacement DS in mm	Readings in (mV/V) series		Lin. regr. (increasing) (mV/V)	rel. Interpolation error in %		hysteresis in % FS	Measurement uncertainty
	increasing	decreasing		increasing	decreasing		
0,000	458,8112	458,7675	458,2253	-0,08	-0,07	-0,01	20 $\mu$ m
-9,000	385,4057	385,3876	385,3737	0,00	0,00	0,00	
-18,000	311,8869	311,8359	312,5221	0,09	0,09	-0,01	
-27,000	239,6945	239,6971	239,6705	0,00	0,00	0,00	
-36,000	166,4580	166,4481	166,8189	0,05	0,05	0,00	
-45,000	94,2444	94,0794	93,9673	-0,04	-0,02	-0,02	
-54,000	20,7901	20,2525	21,1156	0,04	0,12	-0,07	
-63,000	-51,2475	-51,9682	-51,7360	-0,07	0,03	-0,10	
-72,000	-125,0647	-126,1441	-124,5876	0,07	0,21	-0,15	
-81,000	-197,1010	-198,9395	-197,4392	-0,05	0,21	-0,25	
-90,000	-270,2377	-272,9885	-270,2908	-0,01	0,37	0,38	

la calibrazione della lunghezza del potenziometro deve essere eseguita in seguito alla sostituzione di tale sensore. Anche in questo caso per verificare la posizione zero viene utilizzato il dispositivo di fixture TH-4000-2D, lo stesso utilizzato per il 2D IR-TRACC (Figura 3.8). La verifica della posizione zero definisce il sistema di coordinate secondo SAE-J211 sulla colonna vertebrale e fissa i parametri del singolo sensore a questo sistema di coordinate. I parametri rilevanti dei singoli sensori sono determinati a livello di assemblaggio con una procedura di verifica riproducibile e tracciabile. Il foglio di verifica fornisce la formula per calcolare il raggio R (Radius) in [mm] a partire dalla tensione di uscita utilizzando l'esponente di linearizzazione, il fattore di calibrazione [mm/V] e l'intercetta posizione zero [mm]. Essendo il sensore S-TRACK un sensore lineare, l'esponente di linearizzazione considerato sarà pari a 1. Questi valori possono essere implementati in DAS o in software di data analysis (post-process). Quando implementati, i parametri danno il raggio calibrato del potenziometro. I parametri del sensore angolare tra cui Calibration Factor, Polarity e Offset determinano l'angolo di S-TRACK in un sistema di coordinate. Le coordinate polari di raggio R e angolo possono essere convertite in coordinate cartesiane x e y utilizzando le funzioni trigonometriche seno e coseno. Vari sistemi DAS richiedono l'inserimento della sensibilità in [V/mm] e dell'intercetta zero in [V] (inverso del fattore di calibrazione). Altri sistemi DAS applicano unità di misura in base al sistema SI in [m] per la lunghezza e [rad] per l'angolo. È importante l'utilizzo dell'unità corretta poiché ciò influenzerà i risultati di output. Il foglio di verifica fornisce un riepilogo dei parametri di calibrazione in varie unità per potenziometro lineare e angolare.

### Data post-processing

Le formule utili al calcolo di posizione della costola in coordinate x e y sono riportate di seguito. Anche in questo caso le formule di calcolo sono applicabili in tutti e quattro i quadranti del sistema di coordinate, a condizione che l'angolo di riferimento e la polarità corretti vengano implementati in base all'orientamento dell'insieme. Aspetto importante che riguarda il sensore S-TRACK è la sua linearità. L'output lineare permette un'interpretazione più semplice ed immediata dei risultati.

### Formule di calcolo

$$R[mm] = \text{Distance Intercept [mm]} + \text{Calibration Factor [mm/V]} * U_{IR}^{EXP}$$

$$\Phi_{REF} = \Phi_{offset_{sensor}} - \Phi_{ORIENT}[deg]$$

$$\Phi_{iIRT} = \Phi_{i_{sensor}} - \Phi_{REF}, \quad \Phi_{0IRT} = \Phi_{0_{sensor}} - \Phi_{REF}[deg]$$

$$x = R * \cos([\Phi_{IRT}), \quad x_0 = R + 0 * \cos(\Phi_{0IRT}), \quad x_i = R_i * \cos(\Phi_{IRT})$$

$$D_x = x_i - x_0[mm]$$

$$y = R * \sin([\Phi_{IRT}), \quad y_0 = R + 0 * \sin(\Phi_{0IRT}), \quad x_i = R_i * \sin(\Phi_{IRT})$$

$$D_y = y_i - y_0[mm]$$

Il software per l'elaborazione e l'interpretazione è scritto in un foglio di calcolo (MS Excel) e consente di calcolare la deflessione delle costole in direzione x e y nel sistema di coordinate fittizie e la conseguente deformazione della costola nel piano xy.

### 3.2.4 3D S-TRACK

#### Descrizione generale

Il 3D S-TRACK rappresenta un'alternativa ai potenziometri tridimensionali implementabili in manichini per urto frontale, in particolare il THOR-50M. Attualmente al Centro Sicurezza Fiat non sono presenti manichini THOR al cui interno sono stati implementati gli S-TRACK. Da un punto di vista sensoristico non sussiste alcuna differenza se non la presenza di un potenziometro angolare aggiuntivo. L'uscita combinata dei due angoli ( $\phi_Y$ ,  $\phi_Z$ ) e dello spostamento (DS0) permette di definire la posizione dell'estremità delle costole nello spazio 3D ( $D_x$ ,  $D_y$  e  $D_z$ ).

## Geometria

Differenze sostanziali tra S-TRACK 2D e 3D, si riscontrano a livello geometrico per la particolare struttura della colonna vertebrale del THOR e la disposizione dei potenziometri di spostamento. Tali potenziometri sono agganciati ai singoli segmenti della colonna vertebrale del manichino, ossia della colonna vertebrale superiore, inferiore e della zona lombare. I segmenti, a loro volta, sono separati da elementi flessibili e/o regolabili (superiore e inferiore) in quanto non hanno una posizione fissa l'uno rispetto all'altro. I potenziometri 3D misurano la deflessione tridimensionale rispetto ai singoli segmenti della colonna vertebrale e per tale motivo tutte le unità hanno un proprio sistema di coordinate locale della colonna vertebrale. I sistemi di coordinate locali seguono il sistema di coordinate ATD generalmente accettato secondo SAE-J211. I potenziometri del torace superiore utilizzano il sistema UTS (Upper Thoracic Spine), i potenziometri del torace inferiore utilizzano il sistema di coordinate LTS (Lower Thoracic Spine) e i potenziometri addominali utilizzano il sistema di coordinate LS (Lumbar Spine). Per fronteggiare questa struttura, ATD ha previsto per THOR 50M due tipologie di sensori (schematizzati in Figura 3.26) i quali presentano dimensioni differenti a seconda della posizione di assemblaggio:

- S-TRACK Thorax 90 mm;
- S-TRACK Abdomen 120 mm.

I sensori toracici in configurazione “fully extended” misurano una lunghezza pari a 152,9 mm e 57,9 mm in configurazione “fully collapsed”, garantendo quindi una corsa meccanica totale pari a 95 mm. I sensori implementati a livello addominale invece misurano una lunghezza superiore pari a 192,3 mm in configurazione “fully extended” e 69,3 mm in configurazione “fully collapsed” permettendo quindi una corsa meccanica di 123 mm.

## Assemblaggio 3D S-TRACK

Nelle Figure 3.27a e 3.27b vengono riassunti i possibili assemblaggi dei sensori facendo uso degli adattatori 3D prodotti da ATD LabTech. Per il torace, si distinguono 2 tipi di adattatori di cui uno privo di offset (Figura 3.27a) mentre l'altro prevede un offset (Figura 3.27b) [41].

### 3.2.5 RibEye

Il RibEye è un sistema ottico di misurazione della deflessione multipunto delle costole toraciche e addominali di un ATD. Nello specifico questo sistema trova applicazione nel WorldSID-50M e quindi utilizzato per l'analisi di impatti laterali [42].

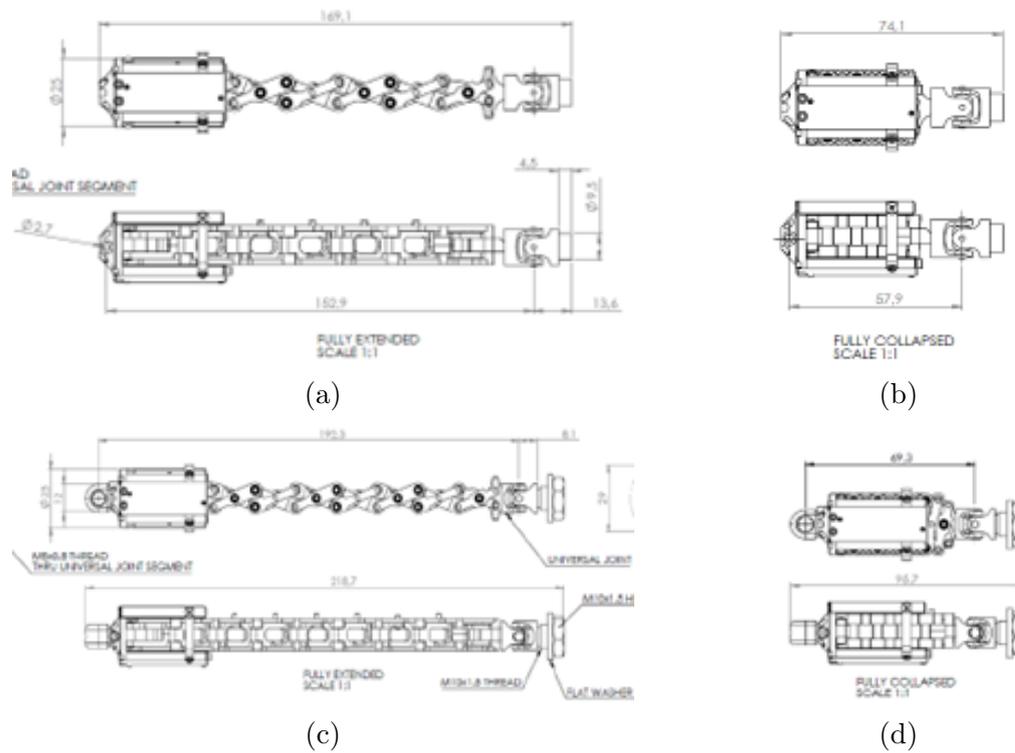


Figura 3.26: S-TRACK Thorax 90 mm: (a) configurazione "fully extended", (b) configurazione "fully collapsed"; S-TRACK Abdomen 90 mm: (c) configurazione "fully extended", (d) configurazione "fully collapsed"

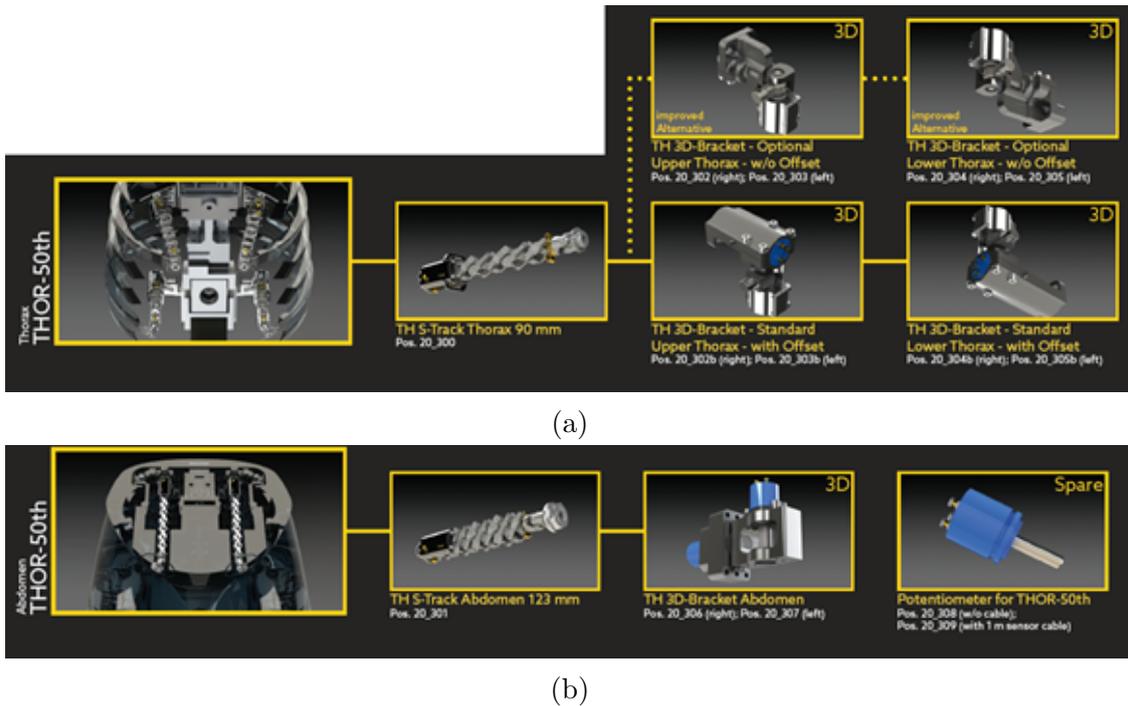


Figura 3.27: (a) assemblaggio S-TRACK Thorax 90 mm e (b) assemblaggio S-TRACK Abdomen 120 mm

### Descrizione generale

RibEye fornisce i dati di posizione lungo gli assi x, y e z attraverso 18 diodi emettitori di luce LED montati su costole del WorldSID e 6 sensori ottici montati lungo la scatola della colonna vertebrale (1 per costola). Su ciascuna delle 6 costole vengono montati 3 LED. Il RibEye per WorldSID può essere montato su entrambi i lati del manichino in modo da misurare impatti sia su lato sinistro che impatti su lato destro. Due set monitorano le posizioni dei LED ciascuno di tre sensori. In particolare, il set superiore di sensori utilizza filtri ottici rossi e monitora i LED rossi montati sulle prime tre costole: la costola della spalla, la prima e la seconda toracica. Il set inferiore di sensori, invece, utilizza filtri ottici blu e monitora i LED blu montati sulle tre costole inferiori: la terza toracica, la prima e la seconda addominale. Tutti tre i sensori devono rilevare la luce da un LED per poterne misurare la posizione.

Come accennato, su una singola costola sono montati tre LED. Le Figure 3.29a e 3.29a mostrano un sistema Rib-Eye implementato in un WorldSID. I LED centrali (middle LED) sono allineati lungo il lato sinistro o destro del manichino. I LED “forward”, che precedono il LED centrale, sono più vicini alla parte anteriore del manichino, al contrario, i LED “rearward” sono più vicini alla parte posteriore del manichino. Il controller del RibEye viene montato sul lato del manichino non

coinvolto nell’impatto. Inoltre, nello stesso contenitore è presente la batteria del RibEye.

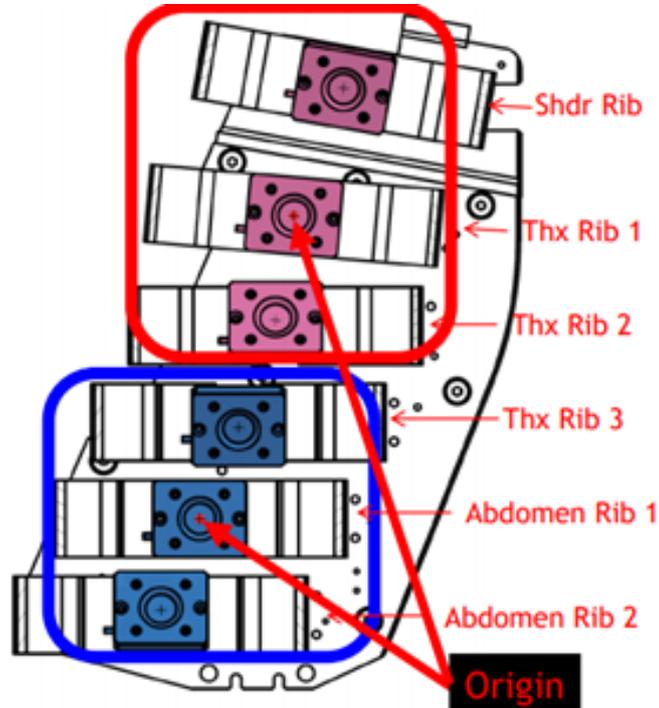


Figura 3.28: Set di sensori: filtri rossi e filtri blu.

A livello di acquisizione, con questo tipo di sistema è possibile raccogliere fino a 25 secondi di dati ad una frequenza di campionamento di 10 kHz. La memoria è installata nel controller: una scheda Micro-SD memorizza tutti i 25 secondi di dati da un test e la memoria flash integrata memorizza 1,7 secondi di dati (da -200 ms a 1500 ms) che vengono conservati dopo lo spegnimento dell’alimentazione. In caso di interruzione dell’alimentazione esterna, RibEye funzionerà con batterie interne. La comunicazione è via Ethernet.

### Installazione RibEye

Il LED è saldato su un circuito stampato rivestito in metallo (MCPCB). I blocchi di montaggio angolati vengono utilizzati su quattro delle sei costole del manichino: spalla, seconda costola toracica, terza toracica e seconda addominale. Sulla spalla e sulla terza costola toracica, i LED sono montati sul bordo inferiore delle costole. Mentre sulla seconda costola toracica e la seconda addominale, i LED sono montati sul bordo superiore delle costole. Sulle due costole rimanenti del manichino, la prima toracica e la prima addominale, i tre LED sono piatti, vengono installati senza alcun blocco angolato. Il LED centrale della spalla è epossidico in un blocco

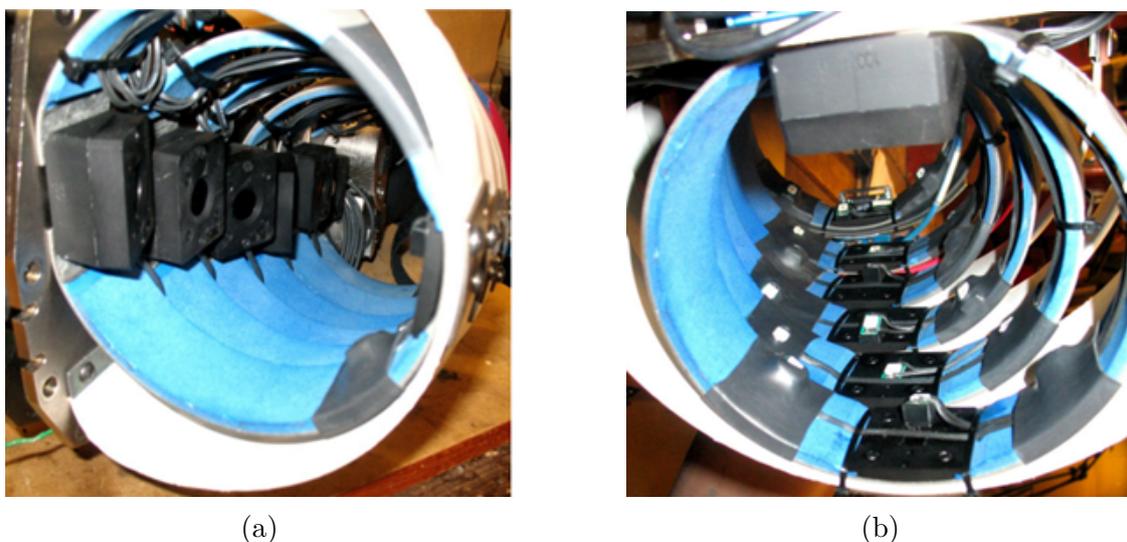


Figura 3.29: (a) sensori RibEye montati su dummy e (b) LED RibEye montati su dummy.

angolato, il quale è fissato ad una piastra. La piastra dell'adattatore viene fissata al morsetto interno per costole della spalla. Anche i LED centrali (middle LED) di costole toraciche e addominali sono montati sulle piastre interne del morsetto costale. Quando si utilizza il RibEye come strumento di misura della deflessione del torace, gli accelerometri devono essere rimossi, poiché possono causare riflessi o bloccare la luce LED ai sensori. Se è necessario utilizzare accelerometri, questi devono essere verniciati di nero opaco o rivestiti con nastro adesivo nero per evitare riflessi. I LED, forward e rearward, sono tenuti in posizione sulla costola grazie ad un nastro biadesivo ad alta resistenza e una guaina termorestringente. Sono generalmente montati a 35 mm dal centro della costola, come mostrato in Figura 3.30. La dimensione di 35 mm è la distanza in linea retta. I LED devono essere montati sulle piastre prima che quest'ultime siano installate nel manichino. Su ogni costola devono essere montati prima i LED rearward, poi i LED centrali e infine quelli forward.

### Test su RibEye

Per valutarne l'accuratezza, l'abilità nel catturare la deflessione massima e la posizione ottimale dei LED forward e rearward, sono state eseguite diverse prove [43]. Tali prove consistono in impatti dinamici a singola costola, in cui l'impattore viene fatto impattare a diverse velocità, angoli differenti e posizioni con incremento di 10 mm. Il trio di LED, presente sulla costola, fornisce la stima di deflessione più verosimile in ogni istante temporale di ogni test. Al fine di individuare il trio migliore,

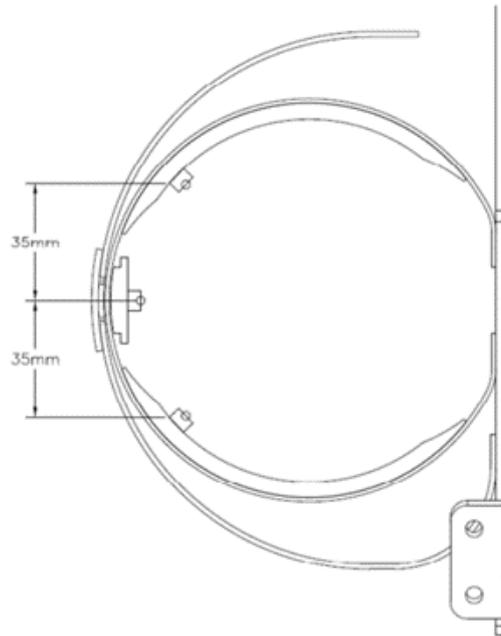


Figura 3.30: posizione dei LED forward e rearward.

si calcola l'errore medio e l'errore massimo tra tutti i dati. Il RibEye presenta un range di misura finito (Figura 3.31).

Potrebbero verificarsi codici di errore in due casi:

- Superamento del range del sensore;
- Uno o più sensori sono bloccati o vedono molta luce ambientale.

Lo scorso anno, NHTSA ha implementato il RibEye in prove di crash test. In particolare, sono stati eseguiti:

- 1 test di barriera deformabile mobile per impatto laterale (MDB) basato sulla procedura NCAP corrente;
- 1 test del palo rigido per impatto laterale basato sulla procedura FMVSS 214 corrente.

Oltre alla variazione del sistema di misura, in questi test sono state eseguite ulteriori modifiche tra cui la rimozione delle maniche della tuta WorldSID per consentire alle braccia di muoversi più liberamente, nonché per impedire che la luce ambientale penetri nella cavità toracica, e la divisione del Thorax Pads, ossia il cuscinetto toracico in foam il quale viene tagliato in 5 pezzi per coprire ogni costola individualmente. Ciò previene lo strappo tra le costole causato da quelle costole

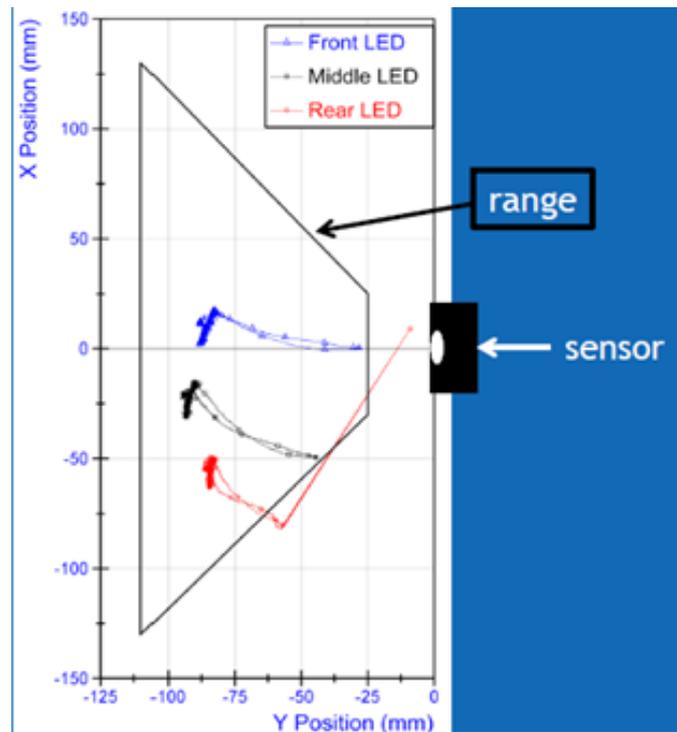


Figura 3.31: range di misura.

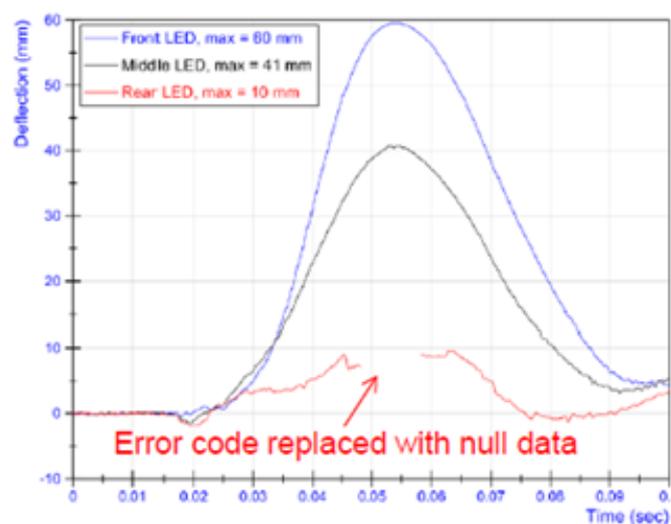


Figura 3.32: Esempio di codice di errore per superamento del range del sensore.

che si muovono indipendentemente una, rispetto all'altra. Una caratteristica che differenzia questo sistema di misura rispetto a sistemi di misura a singolo punto, è la possibilità di mappare il contorno della costola ed effettuare una analisi software

in grado di ricostruire la deflessione della costola e valutare la compressione letta dalla terna di LED.

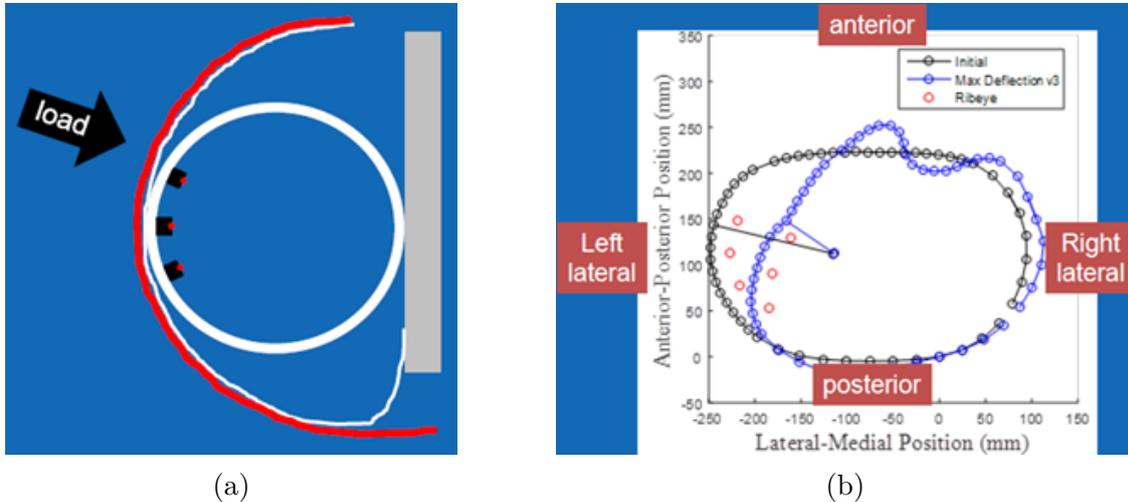


Figura 3.33: (a) Schema del sistema costola-RibEye e (b) analisi contorno costola.

Per concludere, il RibEye può essere considerato un sistema di misura sufficientemente preciso. In condizioni di carico dinamico a costola singola, ha dimostrato di poter catturare con successo la massima deflessione della costola (Figura 3.46). Nella maggior parte dei crash test per urto laterale invece, il LED RibEye forward ha misurato una deflessione massima della costola rispetto a quello centrale e rearward, confermando il vantaggio di avere un sistema di misura multipunto.

### 3.2.6 KIR-TRACC

Il KIR-TRACC (Kistler Infra Red – Telescoping Rod for Assessment of Chest Compression) di Kistler è un sensore di spostamento per la determinazione della compressione di torace e addome implementabile nel WorldSID-50M e nel THOR-50M. Il sensore può essere utilizzato in entrambi gli ATD solo in combinazione con dispositivo meccanico corrispondente abbinato alla misurazione di posizione e altri sensori di misurazione. La compressione del torace e della deformazione addominale nell'ambito di una simulazione di incidente viene eseguita allo scopo di valutare la sicurezza degli occupanti dei veicoli [45].

#### Descrizione generale

Il principio di funzionamento di Kistler IR-TRACC si basa su una procedura foto-ottica. La luce nella gamma degli infrarossi viene emessa da un LED a infrarossi (IR) con luminanza e intensità di radiazione, ricevute da un fotodiodo opposto

con elevata sensibilità alla luminanza e sensibilità spettrale congruente. La potenza radiante misurata dal fotodiodo viene convertita elettricamente in corrente, la quale è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal LED al fotodiodo. La corrente così prodotta viene ulteriormente elaborata in modo tale che il segnale all'uscita del sensore possa essere convertito mediante un'approssimazione polinomiale al variare di distanza e, quindi, al variare di lunghezza nella zona di deformazione del tronco. Sia il LED del trasmettitore che il fotodiodo sono installati in un'asta telescopica che può essere unita longitudinalmente [46].



Figura 3.34: (a) Schema del sistema costola-RibEye e (b) analisi contorno costola.

Il sensore è caratterizzato da:

- WS-50 "ready"/THOR;
- Misurazione della lunghezza stress-free fino a 50 m/s;
- Dimensioni compatte e design duraturo;
- Tolleranze di produzione strette per bassa sensibilità laterale;
- Segnale di uscita: polinomio di terzo grado;
- Ricevitore standardizzato per calibrazione e installazione semplici;
- DTI "ready";

### Specifiche

- Range di misurazione: 90 mm (standard) - 120 mm (addome THOR);
- Tensione di alimentazione: 5 V;
- Formato di uscita: Polinomio cubico;
- Elevata resistenza agli urti (max): 200 g;

- Peso: 125 g (standard) - 160 g (THOR addome);
- Disponibile in versione DTI e analogica.

### Applicazione

Gli ATD presi in considerazione, sono dotati di un numero di sensori che va dai 6 (nel THOR) ai 12 (nel WorldSID in caso di entrambi i lati strumentati). Al fine di valutare la compressione, i sensori sono montati in un apparecchio adattato alla posizione di misurazione (contenuto negli assiemi). Oltre al KIR-TRACC, ogni apparecchio ospita uno o due sensori angolari in modo che le unità complete misurino la deformazione del busto, rendendo così determinabili i parametri della lesione. La combinazione delle informazioni di spostamento angolare con lo spostamento longitudinale di KIR-TRACC consente di determinare chiaramente la deformazione 2D o 3D attraverso la posizione della parte anteriore del sistema di misura.

### 3.2.7 SPIRAL Track

SPIRALE Hi Co., Ltd ha sviluppato in collaborazione con JASTI Co., Ltd un nuovo dispositivo di misurazione. Il brevetto di questo nuovo ed epocale sviluppo da un punto di vista funzionale e strutturale, che prende il nome di SPIRAL Track, è stato registrato in Giappone e internazionalmente negli Stati Uniti, in Europa, Cina, India, Corea e Taiwan e il prototipo è stato completato lo scorso febbraio. Questo nuovo dispositivo è stato introdotto in EuroNCAP e NHTSA e si prevede un ampio utilizzo nell'industria della sicurezza automobilistica [47].

#### Descrizione generale

SPIRAL Track è uno strumento di misura meccanico dotato di una non linearità inferiore all'1% con prestazioni elevate circa la capacità di tracciamento grazie al design superiore del gioco "zero".



Figura 3.35: SPIRAL Track.

È composto da 4 a 6 cilindri dotati di scanalature a spirale. Tutte le maniche si espandono e si contraggono misurando lo spostamento di torace e addome del manichino mediante sensori angolari. In corrispondenza della base, vengono assemblati 3 set di sensori di rotazione (asse x, asse y, asse z) affinché venga rilevato anche lo spostamento obliquo. I vantaggi presentati dal dispositivo sono senza dubbio la linearità, la bassa probabilità di contraccolpo, e la mancanza

di ritardo. I Manichini in cui questi sensori trovano applicazione sono: THOR-50M, WorldSID-50M, Manichini della serie Q [48].

## Capitolo 4

# 4 Svolgimento ed elaborazione di prove su costola

### 4.1 Setup di prova

Per eseguire le prove su costola è stato utilizzato il dispositivo “Drop rig”, un banco di prova presente presso la sala taratura del Centro Sicurezza FIAT, progettato per certificare le costole dei manichini ES-1 ed ES-2, i quali devono essere certificati secondo specifiche procedure. Il dispositivo è stato progettato nell’anno 1994 [49].

#### Specifiche

- Dimensioni Lunghezza x larghezza x Altezza in mm: 300 x 300 x 6000;
- Corrente di collegamento: 230 V;
- Specifiche elettromagnetiche: 24V DC / 0,62A;
- Massa dell’impattore: 7,78 kg;
- Diametro dell’impattore: 150 mm;
- Velocità di caduta del peso (max): 4 m/s.

Il banco di prova prevede la presenza di due cavi guida completamente verticali e paralleli alla struttura del banco. La tensione richiesta per tali cavi è di circa 250 N. Il magnete presente, il cui compito è quello di sostenere l’impattore, è collegato ad un’alimentazione di 12 V CC.



Figura 4.1: dispositivo “Drop rig”.

Ai fini della prova da eseguire, sul piano del banco è stata montata una lastra di alluminio simile quella in dotazione, con fori che permettono l’assemblaggio dei seguenti componenti:

- Costola di Worldsid-50M: in particolare è stata usata la 1a costola toracica, costituita da una parte metallica esterna ed un materiale di smorzamento nella parte interna.
- Sensore di schiacciamento (IR-TRACC e S-TRACK): la costola è stata strumentata così come lo è in un manichino adibito per crash test. Oltre al potenziometro di schiacciamento, in corrispondenza del bracket è stato montato un accelerometro lineare uniassiale.

## 4.2 Procedura di prova

Da manuale, le condizioni in cui è consigliato lavorare su tale banco richiedono una temperatura di 18-22°C ed una umidità del 10-70%. Una volta montata la strumentazione descritta nel precedente paragrafo, si procede con l’attivazione della scatola di controllo del magnete per mezzo dell’interruttore principale a destra della scatola. Una volta attivato il magnete, si aggancia l’impattore. Da questo momento è possibile impostare l’altezza manualmente andando a modificare la lunghezza del tenditore a vite sopra il magnete. Successivamente si imposta il software per

l'acquisizione del test. Inoltre, per cercare di riprodurre quanto più è possibile le condizioni della costola all'interno del manichino, sia dal punto di vista strumentale ma anche meccanico, sulla superficie dell'impattore è stato aggiunto uno strato di "foam" poiché le costole di WS-50M sono protette da un Thorax Pad dello stesso materiale. In più tale materiale aiuta a preservare le parti metalliche da un impatto diretto. Si procede al rilascio dell'impattore premendo simultaneamente i 2 pulsanti "FIRE". Quando il peso viene rilasciato dall'operatore, prima che impatti la costola, si attiva il trigger che dà il segnale al computer per acquisire i dati. Nell'istante di impatto tra pendolo e costola, il potenziometro inizierà a misurare la compressione della costola. Al termine della prova si rimuove il peso e si procede a scaricare i dati.

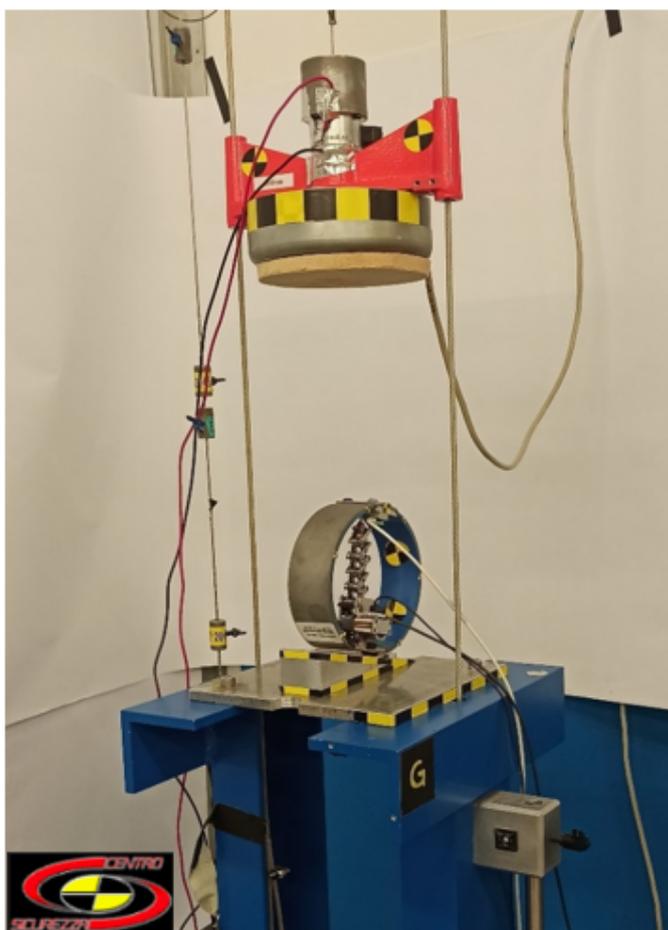


Figura 4.2: Setup di prova.

### 4.2.1 Raccolta dati

Vengono raccolti i dati di 3 canali:

Tabella 4.1: Canali acquisiti.

Canali	Filtri
Spostamento	CFC 180
Rotazione	CFC 180
Accelerazione	CFC 180

Altri parametri di cui si tiene conto nelle prove:

Tabella 4.2: Parametri di prova.

Temperatura (°C)	21.0-22.0
Umidità (%)	59.0-63.8
Velocità di impatto (m/s)	1.98-2.8

## 4.2.2 Test matrix

Lo scopo delle prove è valutare lo schiacciamento della prima costola toracica di un WorldSID attraverso un impatto dinamico a costola singola. Come già detto, il manichino di cui si studia il comportamento a livello toracico è un manichino da impatto laterale, per cui si tenta di replicare tale condizione. Per farlo si sceglie di impostare il sistema costola-sensore con un orientamento di  $0^\circ$ : in questo caso il sensore risulta allineato all'asse y, coincidente con l'asse lungo il quale avviene l'impatto. Oltre all'impatto laterale, si vuole osservare cosa succede in caso di impatto laterale-palo. Qui, il sistema costola-sensore viene ruotato di  $15^\circ$  verso destra rispetto all'asse y. Una volta impostato l'orientamento, sono state scelte le altezze di prova nel rispetto del principio fisico di conservazione dell'energia. Le altezze di caduta considerate per ciascun orientamento sono rispettivamente 200 e 400 mm. Il primo ciclo di prove, ad altezza 200 mm, permette di lavorare a basse energie ed in una condizione, che può essere definita, di sicurezza per l'elettronica coinvolta nel setup. In seguito ai risultati ottenuti, si decide di raddoppiare l'altezza dell'impatto e valutare così il sistema costola-sensore per energie superiori. Nella tabella 4.3 è possibile prendere visione delle condizioni di prova applicate per entrambi i sensori. Per ogni configurazione di prova sono state eseguiti 6 test. Tra un test e quello successivo si attendono dai 15 ai 20 minuti.

Tabella 4.3: Test matrix.

	Angolo [deg]	Altezza di caduta [mm]
IR-TRACC	0	200
	0	400
	15	200
	15	400
S-TRACK	0	200
	0	400
	15	400

## 4.3 Acquisizione dati

Ai fini dell'acquisizione dei segnali di uscita dei sensori in esame, è stato messo a punto un allestimento elettronico esterno a quello proprio del banco di prova. L'allestimento consiste in:

- DAS EME;
- Software di acquisizione CrashDAS;
- Trigger esterno.

### 4.3.1 Sistema di acquisizione EME

#### Teoria di funzionamento DAS

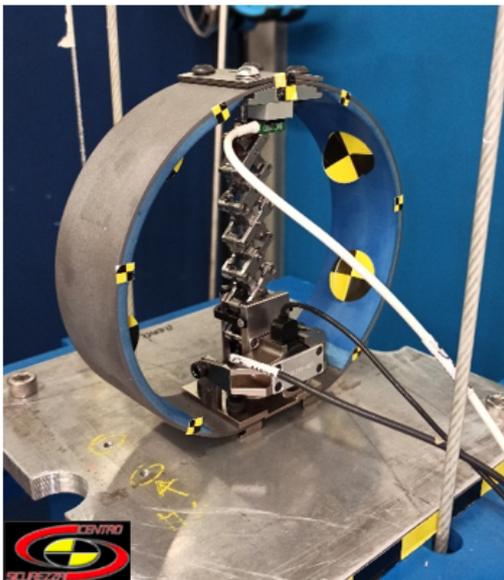
I sistemi di acquisizione dati di EME Corporation (DAS4800D) hanno una serie di caratteristiche tra cui alta velocità, estrema flessibilità, grande capacità di archiviazione, basso consumo energetico, comunicazioni a lunga distanza e notevole durata. Il sistema può acquisire dati analogici e digitali a velocità fino a 100 kHz e variare dinamicamente la velocità di registrazione complessiva e la frequenza dell'angolo del filtro. Il DAS risiede all'interno di un alloggiamento per strumentazione T6-6061 in alluminio. Il sistema è alimentato da una batteria esterna da 10-14,5 Volt (almeno 1700mAH) e comunica con un PC host/computer AT tramite una connessione Ethernet ad alta velocità. Il software sul computer controlla le operazioni del DAS. Il DAS comunica a velocità standard fino a 10 mbaud tramite un



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3: (a) IR-TRACC a  $0^\circ$ , (b) IR-TRACC a  $15^\circ$ , (c) S-TRACK a  $0^\circ$ , (d) S-TRACK a  $15^\circ$ .

Porta Ethernet 10baseT. L'elettronica include circuiti di distribuzione che gestiscono il consumo di energia dalla batteria principale di alimentazione. L'uso della memoria non volatile elimina la necessità di una batteria di backup della memoria. L'alimentazione digitale può essere accesa o spenta dal computer host in qualsiasi momento, mentre l'alimentazione analogica viene avviata in fase di calibrazione o

quando il DAS è armato. La circuiteria DAS prevede la calibrazione automatica dei singoli sensori. L' Offset e i guadagni per ogni canale sono completamente programmabili tramite il firmware integrato. Il programma DAS controlla anche il processo di acquisizione dei dati. Durante il test, la frequenza di campionamento e la frequenza dell'angolo del filtro possono essere modificate in un singolo campione. Tipicamente tale variazione avviene prima dell'attivazione del trigger o può essere ritardata in modo che avvenga un numero di secondi impostato dopo l'evento. Sono possibili fino a tre diverse velocità di registrazione durante un singolo test. La funzione di campionamento selettivo viene utilizzata per fornire velocità di trasmissione dati inferiori prima e dopo un evento (cioè impatto in caso di incidente). Le velocità più basse estendono il tempo di registrazione per queste parti di test. Durante l'evento effettivo viene utilizzata una velocità elevata per acquisire i dati ad alta frequenza. Il DAS contiene 32 megabyte (64 megabyte opzionali) di memoria. La memoria può essere distribuita ad un numero qualsiasi di canali in blocchi equivalenti per estendere il tempo di registrazione. Il front-end analogico alimenta, amplifica e compensa i segnali di ingresso del sensore in modo appropriato per la conversione da analogico a digitale. I livelli di eccitazione di 0, 2,5, 5 e 10 volt sono previsti per ogni singolo canale. Per ciascuna sorgente di alimentazione del trasduttore è previsto un circuito di protezione da sovracorrente individuale. Le amplificazioni possibili del segnale vanno da 1 a 10000. Ogni sensore è collegato ad un amplificatore di strumentazione all'estremità anteriore del canale analogico. Un'uscita DAC viene commutata sull'ingresso negativo dell'amplificatore tramite un Resistenza RCAL durante la calibrazione. Questa iniezione di segnale viene utilizzata per la calibrazione RCAL e adeguamenti di offset. Uno stadio di guadagno ed un filtro anti-alias a 6 poli la cui frequenza d'angolo può variare da 0,01 Hz a 10 kHz seguono il front-end dell'amplificatore di strumentazione. Tutti i canali sono simultaneamente campionato e poi convertiti A/D. Il software sul PC valuta automaticamente i sensori del tipo a ponte e del tipo a potenziometro. La sensibilità del sensore viene quindi utilizzata per visualizzare e registrare i risultati in unità ingegneristiche. Il programma configura l'impostazione della registrazione prima di un test e può avviare il processo di acquisizione dei dati. La diagnostica viene fornita per testare le comunicazioni link così come i sensori. Dopo l'acquisizione dei dati, il software può scaricare tutti i file dati o i dati di canali selezionati individualmente. Le registrazioni analogiche possono essere filtrate e convertite in file di dati ASCII o binari. La figura 4.4 mostra lo schema a blocchi di ogni canale indipendente del DAS4800D.

**Alimentazione** Ogni canale può selezionare 0, 2,50, 5,00, 10,00 volt o nessuna eccitazione tramite il software interruttori controllati. I tre alimentatori di eccitazione possono fornire ciascuno 1,0 A totale di corrente di alimentazione a qualsiasi combinazione di canali. Ogni canale è singolarmente limitato in corrente: 75 mA a 10 volt, 52 mA a 5 volt e 40 mA a 2,5 volt.

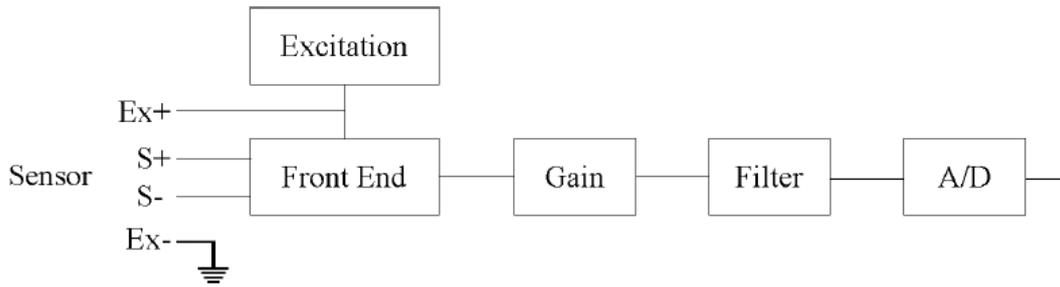


Figura 4.4: Panoramica dell'hardware del canale.

**Front-end** Ogni canale presenta un amplificatore di strumentazione differenziale in ingresso con sovratensione protezione e compensazione. L'amplificatore di ingresso ha un intervallo di modo comune di  $\pm 12$  e un intervallo differenziale di  $\pm 5$  volt. Il filtro di ingresso impedisce che qualsiasi rumore superiore a 25 kHz provochi distorsioni fornendo protezione in ingresso a 100 volt. Una tensione DAC attraverso le singole resistenze  $R_{cal}$  per ogni canale commutata in negativo il segnale di ingresso applica la compensazione dell'ingresso. Questa tecnica viene utilizzata per fornire la massima flessibilità per ingressi differenziali o single ended. L'offset effettivo all'ingresso dipende dal tipo di sensore e dalla sua impedenza di uscita a l'ingresso negativo. Una funzione alternativa dell'offset è simile alla calibrazione dello shunt tecnica utilizzata per sensori a ponte.

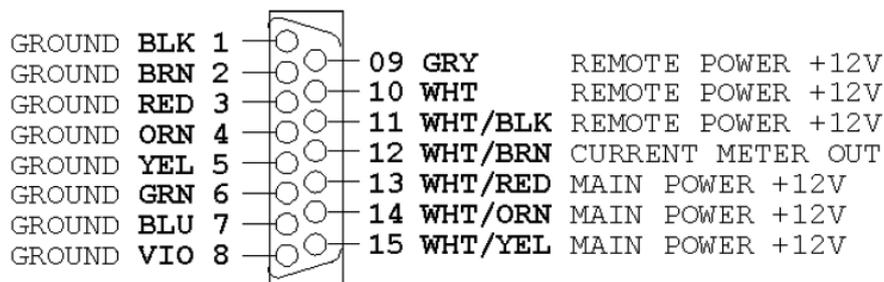
**Guadagno** Il guadagno del canale è implementato in due fasi per fornire una precisione nell'intervallo da 1 a 10000. Il guadagno interno è programmato come:  $(4096/I) * 10J$  dove  $I = da410a4095$ ;  $J = 0,1,2$ . La risposta in frequenza del guadagno è piatta a 100 kHz (trascurabile rispetto ai filtri). Il rumore in ingresso è 1 uv, il rumore in uscita è 0.8mv. Il range di output massimo dello stadio 2 è  $\pm 5$  volt.

**Filtro** Lo scopo del filtro anti-aliasing Butterworth a 6 poli tra lo stadio di guadagno e lo stadio del convertitore A/D rimuove qualsiasi componente del segnale superiore alla metà della frequenza di campionamento A/D. Queste frequenze apparirebbero come una distorsione a frequenza inferiore nei dati digitali. La frequenza di taglio nei filtri Butterworth può essere impostata tra 0,01 Hz e 10 kHz con un clock funzionante a 100 volte la frequenza di taglio. La curva di risposta standard è una curva di Butterworth a 6 poli con attenuazione di 30 dB/ottava e 3 dB alla frequenza di taglio.

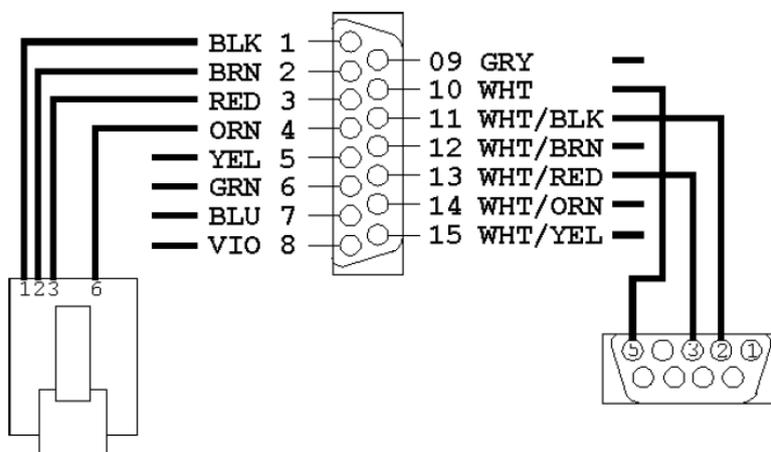
**Convertitore A/D** Il DAS4800D campiona tutti i canali contemporaneamente. Per ogni singolo canale sono previsti i convertitori. La risoluzione del convertitore

A/D è di 16 bit.

**Cablaggio** Per preparare il DAS è necessario collegare il connettore di alimentazione a 15 pin, e il connettore trigger/clock a 9 pin.



(a)



(b)

Figura 4.5: (a) Uscite del connettore di alimentazione a 15 pin e (b) Esempio di cablaggio tipico del connettore di comunicazione a 15 pin

**Selezione della batteria** La selezione della batteria appropriata per il funzionamento dell'unità DAS4800D è estremamente importante. EME consiglia vivamente di utilizzare batterie NiCAD o NiMH con una capacità di 1700 mAh o più alto. Si consiglia anche una batteria a 10 celle, visto i pacchi batteria NiCAD e NiMH tipicamente raggiungono 14,5 volt.

## Sistema

**Modalità di alimentazione** Il DAS4800D ha due modalità di alimentazione: digitale e completamente analogica. Il DAS4800D è in modalità digitale ogni volta

che viene acceso. Questa modalità assorbe circa 500 mA. Nella modalità digitale l'utente è in grado di comunicare con il DAS e trasferire i dati. La modalità completamente analogica viene attivata automaticamente ogni volta che viene fornita la definizione del canale nella schermata, ogni volta che l'utente si trova in una qualsiasi schermata di calibrazione, quando l'utente utilizza il monitor in real-time e quando si è nella schermata di inserimento. La modalità Full Analog attiva tutte le funzioni analogiche e i circuiti di eccitazione. Prima di eseguire le calibrazioni è importante far lavorare il DAS per almeno 5 minuti. Ciò fornisce tempo ai sensori per riscaldarsi e stabilizzarsi con il circuito DAS. Il DAS può impiegare fino a 30 minuti per stabilizzarsi completamente.

**LED di sistema** Sul pannello frontale del DAS sono presenti due LED. Il LED verde "ON" indica l'alimentazione, mentre il LED rosso "ARM" rappresenta lo stato di attivazione / attivazione. Quando il DAS è alimentato il LED "ON" si accenderà. Il LED "ARM" si accenderà all'avvio dell'inserimento. Il LED "ARM" si spegnerà quando viene rilevato un trigger e rimarrà spento durante la trasmissione dei dati raccolto. Il LED "ARM" può essere configurato con polarità opposta. Il LED "ON" si spegnerà al termine del ciclo di acquisizione dati.

**Input digitali** Gli ingressi digitali sono a 5 volt e sono collegati a terra per una transizione dell'evento. Nel menu di inserimento l'utente può configurare due eventi da utilizzare per il campionamento a più fasi. Questi due eventi funzioneranno come normali ingressi.

**Uscite digitali (opzionali)** Per ogni DAS sono incluse otto uscite digitali. Tali uscite consistono in interruttori FET con una resistenza di 10 ohm, una tensione di carico di 80 volt e una corrente di carico di 75 mA. Le uscite sono temporizzate in base al punto di trigger. Il tempo viene inserito in secondi. Questi devono essere impostati prima di procedere con il menu di inserimento.

**Uscita trigger** Sul DAS è presente una uscita trigger corrispondente ad un connettore a 7 pin. In Figura 4.6 è mostrato il circuito per l'uscita del trigger.

**Monitor di corrente di alimentazione in uscita** Il DAS possiede un monitor interno di corrente della batteria che emette una tensione per la corrente. Il rapporto di uscita è 1 volt su 1 A. L'uscita è presente sul pin 12 del connettore di alimentazione a 15 pin.

**Uscita del comparatore alimentazione principale** L'uscita del comparatore è a 5 volt nel momento in cui l'alimentazione principale del DAS è maggiore di 10,5

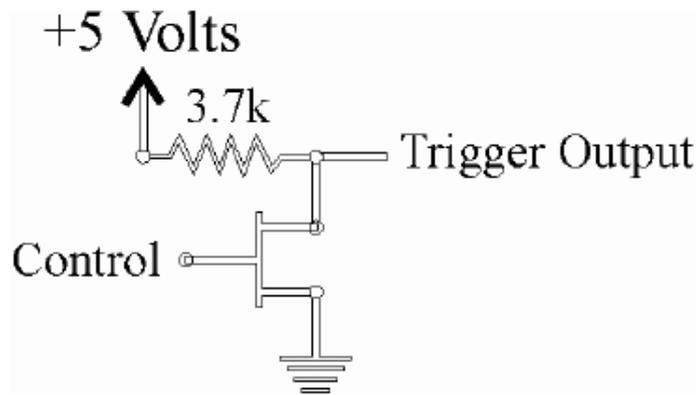


Figura 4.6: Circuito di output del trigger.

Volt, mentre è basso (massa) quando l'alimentazione principale è inferiore a 10,5 Volt. Questa uscita corrisponde al pin 3 del connettore trigger/clock.

### Collegamento del sensore

**Collegamento input analogico** Per utilizzare lo strumento, è necessario determinare il tipo e il numero di sensori da utilizzare, e determinare il canale appropriato per azionare ciascun sensore.

**Funzionamento input differenziale** Per interfacciare un trasduttore di tipo ponte al DAS, vengono fornite quattro connessioni. La sorgente di alimentazione è collegata alla sommità del ponte. Le due uscite del ponte sono collegate ai due ingressi dell'amplificatore di strumentazione. È prevista una connessione a terra al fondo del ponte (Figura 4.7). Per i trasduttori a ponte, la calibrazione viene utilizzata per controllare l'impedenza del sensore. Quando la tensione del convertitore A/D viene modificata, il cambio di passo avverrà all'uscita del ponte. La variazione di tensione è correlata alla tensione DAC, al valore della resistenza RCAL e all'impedenza del sensore.

Durante la calibrazione controllata dal computer, il guadagno del canale viene calcolato in base all'impedenza nota del sensore. Inoltre, i valori calcolati possono essere confrontati con i valori attesi ed i risultati precedenti della calibrazione per determinare se c'è un problema con un particolare canale. Una volta completata la calibrazione, la tensione del DAC viene impostata dal computer su un valore, che corregge eventuali squilibri nel ponte. Ciò azzerava l'uscita del canale e fornisce la portata massima del segnale utilizzabile.

**Funzionamento single-ended** I sensori single-ended, come i trasduttori di posizione potenziometrici, sono collegati al DAS con tre connessioni. La sorgente di

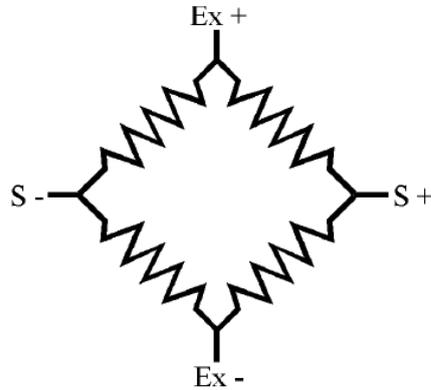


Figura 4.7: Schema di collegamento per trasduttori a ponte.

alimentazione è collegata ad un'estremità del sensore mentre l'altra estremità è a terra. L'uscita è collegata all'ingresso positivo dell'amplificatore per strumentazione (Figura 4.8). Nella modalità single ended, la tensione di uscita del canale è proporzionale alla differenza tra la tensione di ingresso del sensore e la tensione del convertitore A/D.

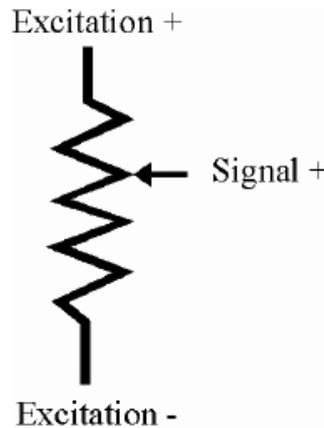


Figura 4.8: Connessione single-ended del sensore.

La tensione del DAC può compensare il segnale di ingresso all'interno della gamma di eccitazione. La calibrazione per sensori potenziometrici consiste in una calibrazione a due punti per stabilire le sensibilità, i guadagni e gli offset. L'utente sposta il sensore in due posizioni note. Le letture in queste due posizioni sono utilizzate per stabilire la sensibilità, il guadagno e l'offset richiesti per il canale.

## Software CrashDAS

L'interfaccia operatore è costituita da un programma guidato da menu che viene eseguito su un computer standard con una porta ETHERNET con cui comunicare il DAS. Le funzioni diagnostiche includono la capacità di testare la memoria DAS, le comunicazioni e canali analogici. Le funzioni di calibrazione includono una funzione per impostare una tabella di definizione dei canali. Ogni voce include il numero del canale, il tipo di calibrazione, il livello di eccitazione, l'impostazione del guadagno, l'impostazione dell'offset, l'intervallo previsto e la tolleranza dell'errore di calibrazione. Inoltre, menu sono previste selezioni per eseguire i diversi tipi di calibrazione. Esiste una funzione che consente all'utente di convertire i file di archiviazione dati binari in file ASCII da utilizzare con altri programmi. Le opzioni da seguire sono le seguenti:

1. TEST: routine di configurazione del test;
2. DIAGNOSTICA: routine di diagnostica hardware;
3. CANALI: definizione dei canali;
4. CALIBRAZIONE: routine di calibrazione del sensore;
5. MONITOR: monitoraggio dei canali in real-time;
6. ARM: Inserimento, attivazione, accensione, spegnimento e memoria;
7. CONVERT ASCII e routine di utilità di conversione binaria;
8. VISUALIZZA Visualizzazione/rappresentazione grafica dei dati

**1. Nome del test e configurazione delle comunicazioni** Scegliere l'unità desiderata per l'archiviazione dei file dati. La directory desiderata deve esistere sul disco rigido prima di immettere il nome del test. Successivamente, digitare il nome desiderato o selezionare un nome esistente dall'elenco di test disponibili. Tutte le funzioni del software utilizzeranno solo file di parametri e dati all'interno della directory selezionata. Le impostazioni di I/O vengono utilizzate per aggiornare le impostazioni di comunicazione utilizzate dal software per comunicare con i dati del sistema di acquisizione.

**2. Diagnostica** Viene effettuato un controllo di memoria all'interno del DAS: i dati nel DAS devono essere cancellati affinché il controllo della memoria passi. Inoltre, viene testato il collegamento di comunicazione tra il DAS e il software. Una finestra di stato mostrerà il successo o insuccesso.

**3. Definizione dei canali** È necessario avere le seguenti informazioni su ciascun sensore: il numero di canale che si desidera assegnare al sensore, il nome che descrive il canale, se il canale è un RCAL, JCAL o NOCAL, la tensione di eccitazione, le unità ingegneristiche (EU) di misura, l'attesa gamma in UE, la sensibilità del sensore e metà della resistenza del ponte.

**4. Calibrazione** I canali RCAL sono tipicamente sensori a ponte intero come estensimetri o sensori piezoresistivi. JCAL viene utilizzato per calibrazioni a due punti reali (come nel caso di potenziometri, termistori e celle di carico). Questa funzione viene utilizzata per calibrare i canali inseriti come RCAL nella definizione del canale. La procedura calcola un'effettiva impedenza di uscita del ponte ed esegue un bilanciamento automatico dei sensori a ponte differenziale.

**5. Monitor in real time** Con questa opzione è possibile visualizzare graficamente ed in formato numerico un singolo canale o più canali sovrapposti in tempo reale utilizzando varie funzioni.

**6. Arm** Il menu contiene le informazioni che impostano i parametri per un'acquisizione dati. Prima di un test, il DAS è configurato per la sequenza di acquisizione dati. Il processo è noto come armamento. Durante l'inserimento, tutte le informazioni di configurazione del canale vengono inviate al DAS, quindi viene eseguita l'acquisizione dei dati. La raccolta dei dati può essere ritardata per l'avvio tramite cavo o può iniziare immediatamente dopo l'inserimento. Il triggering può avvenire tramite una transizione "da basso ad alto" o "da alto a basso" sulla linea di ingresso trigger, o da un canale trigger di backup. Un'altra caratteristica del DAS è la possibilità di impostare due diverse frequenze di campionamento per 2 set di canali contigui e campionamento in più fasi. Il primo "dal più alto al più basso" o "dal più basso al più alto" la transizione (selezionata dall'utente) sul canale di eventi uno avvia la fase due. Il primo "dal più alto al più basso" o Livello di transizione "da basso ad alto" (selezionato dall'utente) sul canale degli eventi due dopo l'inizio di la fase due avvia la fase tre. Il tempo di modifica della frequenza di campionamento può essere ritardato qualsiasi numero di secondi dopo l'attivazione dell'evento. In genere questa funzione viene utilizzata per campionare in una bassa frequenza dal momento del trigger iniziale fino a poco prima di un evento. Quando si verifica un evento, cioè un impatto, un secondo trigger cambia la velocità di campionamento ad una più alta frequenza per il resto del test.

**7. Conversione file ASCII** Questa opzione offre la possibilità di convertire i dati binari DAS in un file ASCII. Inizialmente viene fornito la lunghezza in secondi del segmento di dati da convertire.

**8. Visualizzazione** Dopo aver scaricato i file dati, è possibile visualizzare e analizzare i risultati sul computer. Il software DAS consente di visualizzare graficamente sullo schermo in unità ingegneristiche i file trasferiti e convertiti in binari (file.FLT). I file convertiti in ASCII non possono essere visualizzati nel software.

### Schemi di collegamento dei potenziometri

I sensori convertono una grandezza fisica non elettrica, in questo caso lo spostamento, in una grandezza elettrica (tensione, corrente, resistenza). Scopo della conversione è quello di rendere possibile l'acquisizione e il trattamento del segnale da parte di sistemi di tipo elettronico. Nella maggior parte dei casi, non è possibile collegare direttamente il sensore con il sistema elettronico di elaborazione del segnale. I motivi possono essere:

1. l'uscita del sensore non è una tensione e dunque dev'essere convertita in tensione prima di poter essere trattata elettricamente;
2. l'intervallo di valori della grandezza elettrica prodotta dal trasduttore non presenta valori adeguati (deve essere amplificato);
3. l'uscita del trasduttore presenta un offset, cioè non si azzerava quando la grandezza misurata vale zero;
4. il sensore non è in grado di pilotare direttamente il sistema di elaborazione per problemi di impedenza;
5. è necessario filtrare in frequenza il segnale prodotto dal sensore (per ridurre una componente di rumore).

Il sensore S-TRACK, in qualità di potenziometro lineare viene collegato al DAS attraverso tre connessioni, come mostrato in Figura 4.9. La modalità di acquisizione utilizzata prevede una lettura "diretta" in cui la tensione di uscita del sensore viene data direttamente in ingresso al DAS. Nei test eseguiti, S-TRACK viene alimentato a +10 V.

Per quanto riguarda il sensore IR-TRACC, questo è caratterizzato da un input differenziale a quattro connessioni, come riportato in Figura 4.10. Generalmente nei manuali non viene indicato il modo in cui collegare il sensore al sistema di acquisizione. Una difficoltà maggiore in questo caso è data dalla non linearità del sensore. Nei test, IR-TRACC viene alimentato a +5V.

### Correzione della modalità di acquisizione

Nel primo loop di prove eseguito durante il lavoro di tesi, le uscite dei sensori sono state acquisite secondo le modalità indicate nel paragrafo precedente. In fase di post-processing, sono state riscontrate delle incompatibilità circa i valori di

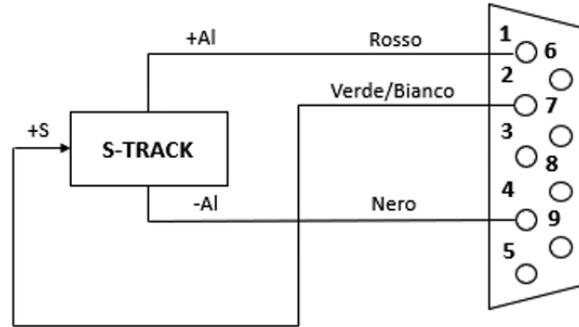


Figura 4.9: schema di connessione per potenziometri su connettore a vaschetta 9 pin.

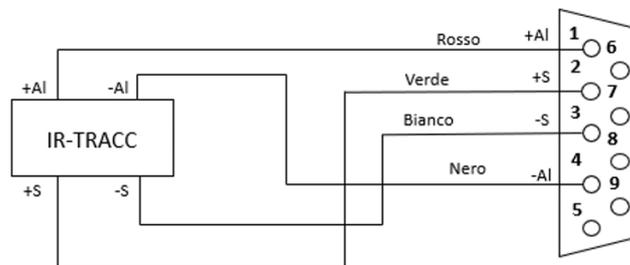


Figura 4.10: schema di connessione per trasduttori a ponte intero su connettore a vaschetta a 9 pin.

lunghezza iniziale del sensore quando questo è montato su costola. In particolare, l'irregolarità è stata riscontrata da parte del sensore IR-TRACC. In tabella 4.4, sono riportati i valori medi di lunghezza a riposo  $R_{max,mean}$  e di lunghezza post-compressione  $R_{min,mean}$  di entrambi i sensori nelle quattro configurazioni di prova. Come ampiamente discusso nel capitolo 3, IR-TRACC necessita di un post-processing più articolato il quale prevede la linearizzazione dell'uscita in tensione del sensore. La lunghezza (radius  $R$ ) del sensore si ottiene secondo la formula:

$$R = \left( V_{sens}^{EXP} \right) * \text{Calibration factor} + \text{Int}$$

Dove  $V_{sens}$ ,  $EXP$ , Calibration factor e Int rappresentano rispettivamente l'uscita in tensione del sensore, l'esponente di linearizzazione, il fattore di calibrazione [mm/V] e l'intercetta [mm].

Come riportato in Tabella 4.4, IR-TRACC su costola misura una lunghezza di partenza che non rispecchia la realtà. Ricorrendo ad una banale quanto diretta misura con metro, e supponendo di individuare l'esatto centro del sistema di riferimento del sensore, si rileva una lunghezza compresa tra 112 e 113 mm. Nei

test eseguiti, la lunghezza varia in un range compreso tra 119 e 123 mm. Si tratta quindi di una differenza di lunghezza dell'ordine di 6-10 mm non più trascurabile, che introduce un errore, altrettanto non trascurabile, nella valutazione dello schiacciamento complessivo. Errore questo, messo in risalto effettuando il confronto con S-TRACK, il quale nelle stesse condizioni di prova ha permesso di valutare in real-time la lunghezza del sensore quando la costola è a riposo, avendo uscita diretta in millimetri.

Tabella 4.4: Misure di lunghezza del sensore durante il primo loop di prove.

Configurazione di prova	IR-TRACC		S-TRACK	
	Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]
0° altezza 200 mm	119,39	83,14	110,98	77,36
0° altezza 400 mm	118,99	64,02	111,13	58,33
15° altezza 200 mm	122,62	90,15	110,61	83,27
15° altezza 200 mm	121,95	71,91	111,54	71,34

Da qui in poi hanno avuto luogo una serie di prove atte a risolvere l'incongruenza nella lettura elettrica di IR-TRACC. Per farlo, sono state considerate tre posizioni caratteristiche del sensore:

1. Sensore completamente esteso;
2. Sensore completamente compresso;
3. Sensore su costola.

Nella modalità di acquisizione in uso **ponte intero** si riscontra che:

Tabella 4.5: Tensione di uscita e corrispondente valore spostamento in mm misurate in lettura ponte intero.

	IR-TRACC [V]	IR-TRACC R [mm]
<b>Completamente esteso</b>	0,068	127,52
<b>Completamente compresso</b>	1,094	43,99
<b>Su costola</b>	0,102	107,22

Passando alla lettura **diretta**:

Tabella 4.6: Tensione di uscita e corrispondente valore spostamento in mm misurate in lettura diretta.

	IR-TRACC [V]	IR-TRACC R [mm]
<b>Completamente esteso</b>	0,083	117,03
<b>Completamente compresso</b>	1,106	43,84
<b>Su costola</b>	0,117	101,21

Da una prima analisi, si nota una corrispondenza nella misura di lunghezza del sensore quando questo si trova in configurazione completamente compressa. Questo può significare come, indipendentemente dalla modalità di acquisizione, il sensore possiede una stabilità maggiore per tensioni di uscita elevate. Non si può dire lo stesso nel caso di basse tensioni. Nelle prove di lettura diretta, si nota una leggera riduzione della variabilità di uscita che risulta ancora non trascurabile ai fini della valutazione dello schiacciamento.

Visti i risultati ottenuti, si sceglie di proseguire i test in lettura diretta, ma con l'aggiunta di un DC/DC converter, come mostrato in Figura 4.11. Il DC/DC converter consiste in un circuito che converte un livello di tensione continua non regolato in un altro valore di tensione continua regolato, più alto o più basso. Il convertitore utilizzato nei test è stato progettato per isolare l'alimentazione continua su carichi molto leggeri.

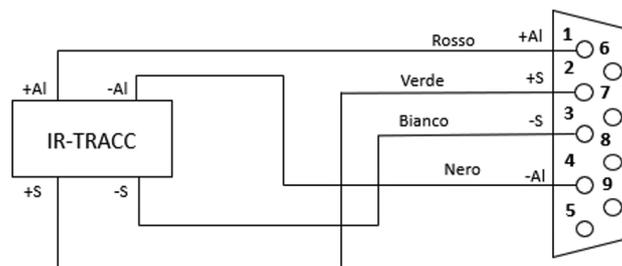


Figura 4.11: schema di connessione per potenziometri con aggiunta di DC-DC su connettore a vaschetta a 9 pin.

Il DC-DC presenta le seguenti specifiche:

- Tensione di ingresso (VDC): 3.3, 5, 12, 15, 24;
- Tensione di uscita (VDC): 5;
- Corrente di uscita (mA): 50;

- Efficienza (%): 66-72;
- Capacità di carico max: 470  $\mu\text{F}$ .

In Tabella 4.7 sono riportati i risultati ottenuti nei test a lettura diretta con aggiunta di DC-DC converter.

Tabella 4.7: tensione di uscita e corrispondente valore spostamento in millimetri misurate in lettura diretta e DC-DC.

	IR-TRACC [V]	IR-TRACC R [mm]
<b>Completamente esteso</b>	0,065	130,05
<b>Completamente compresso</b>	1,092	44,03
<b>Su costola</b>	0,092	108,5

Si evince quindi che il metodo di acquisizione corretto per il sensore IR-TRACC prevede lettura diretta e uso di un DC-DC con lo scopo di disaccoppiare l'alimentazione. In questo modo si ottengono uscite in tensione stabili, le quali forniscono un valore di lunghezza del sensore coerente con la posizione che porta all'introduzione di una variabilità di schiacciamento ridotta, come osservabile nei grafici in Figura 4.12.

### Valutazione della variabilità introdotta dai canali

Una volta risolta l'instabilità di lettura del sensore, si sceglie di verificare la presenza di una eventuale variabilità introdotta dai singoli canali del DAS. Nelle Tabelle 4.8a e 4.8b sono riportate le verifiche effettuate sui primi dieci canali per entrambe le modalità di lettura: "ponte intero" e "diretta". Nel caso di lettura diretta con DC-DC, le prove su canale presentano una variabilità di tensione ridotta. Ciò conferma la correttezza della modifica apportata in fase di acquisizione. Da qui in poi i test con IR-TRACC che analizzeremo saranno rilevati in modalità diretta con interposizione di un DC-DC converter.

## 4.4 Elaborazione dei dati

Si procede con l'analisi biomeccanica dei parametri di interesse, ponendo a confronto i risultati ottenuti da entrambi i sensori. Nello specifico, si valuta la variazione di lunghezza lineare del sensore (radius  $R$ ), la sua rotazione ( $\Phi$ ) e lo schiacciamento complessivo ottenuto dalla combinazione di entrambi ( $D_y$ ). Di seguito saranno riportati gli andamenti grafici di tali parametri.

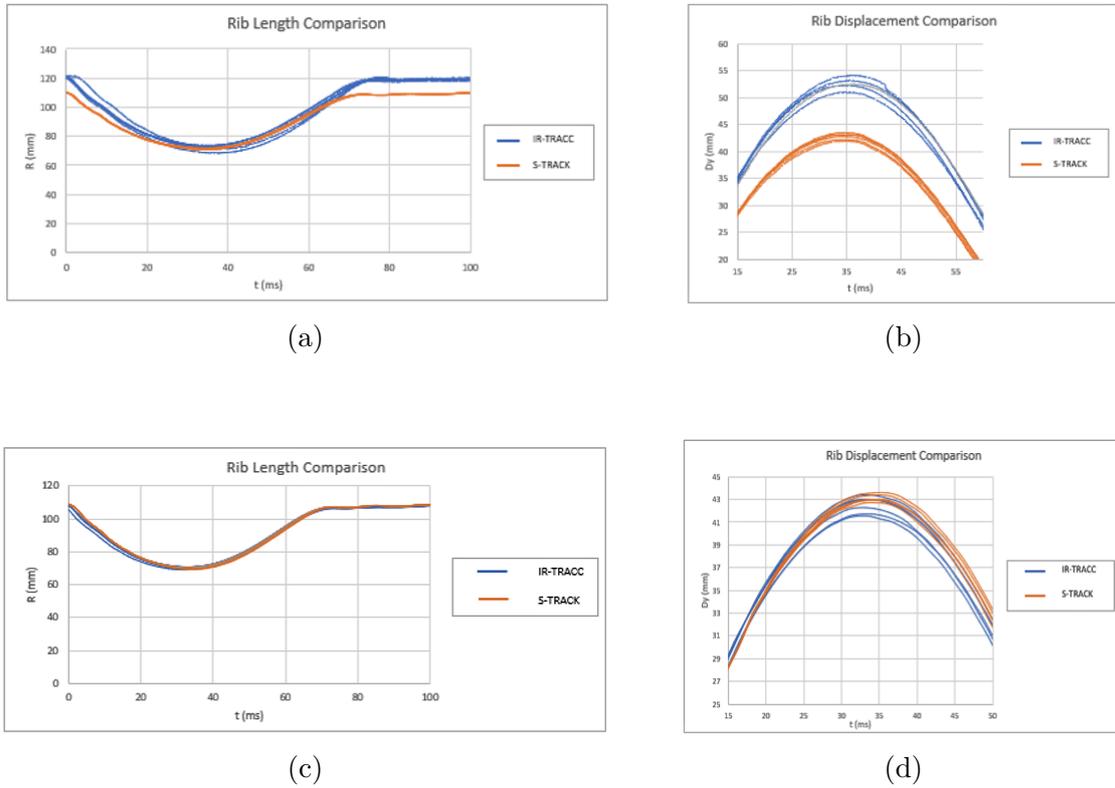


Figura 4.12: Test antecedente alla correzione: (a) lunghezza e (b) schiacciamento di IR-TRACC vs S-TRACK. Test successivo alla correzione: (c) lunghezza e (d) schiacciamento di IR-TRACC vs S-TRACK.

(a)

Canale	IR-TRACC [V]	IR-TRACC R [mm]
1	0,096	110
2	0,096	110
3	0,092	112
4	0,097	109,52
5	0,097	109,52
6	0,102	107,22
7	0,095	110,49
8	0,091	112,53
9	0,088	114,14
10	0,101	107,66

(b)

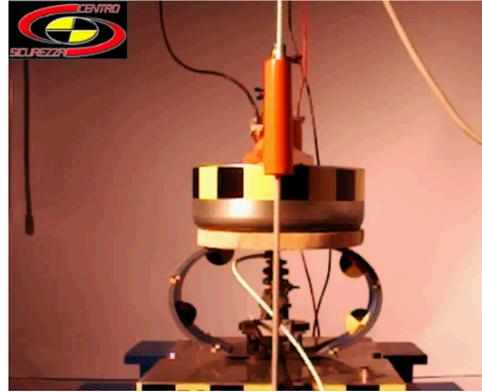
Canale	IR-TRACC [V]	IR-TRACC R [mm]
1	0,096	110
2	0,094	110,99
3	0,093	111,49
4	0,093	111,49
5	0,094	110,99
6	0,092	112
7	0,095	110,49
8	0,096	110
9	0,097	109,52
10	0,098	109,05

Tabella 4.8: Prove su canale: (a) Lettura ponte intero e (b) lettura diretta con DC-DC

### 4.4.1 Analisi di prove sperimentali a 0° e altezza 200 mm



(a)



(b)

Figura 4.13: Frame di prova del sensore (a) IR-TRACC e (b) S-TRACK a 0° e altezza 200 mm

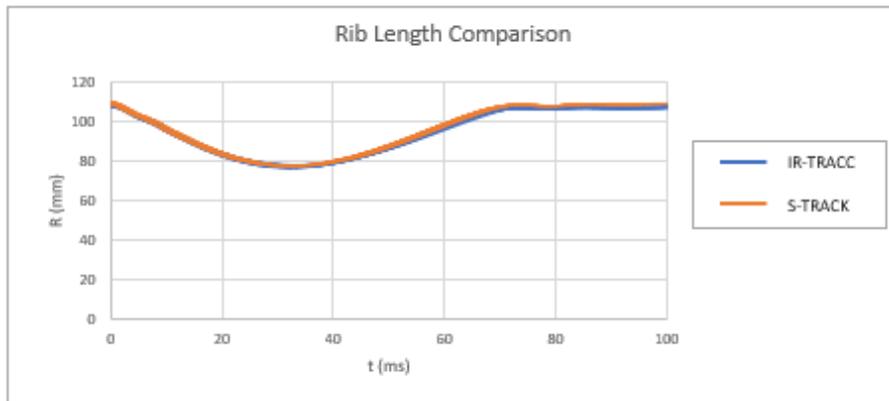


Figura 4.14: Curve di lunghezza del sensore: IR-TRACC vs S-TRACK.

Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
108,726	76,973	31,753
Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
110,055	77,611	32,443

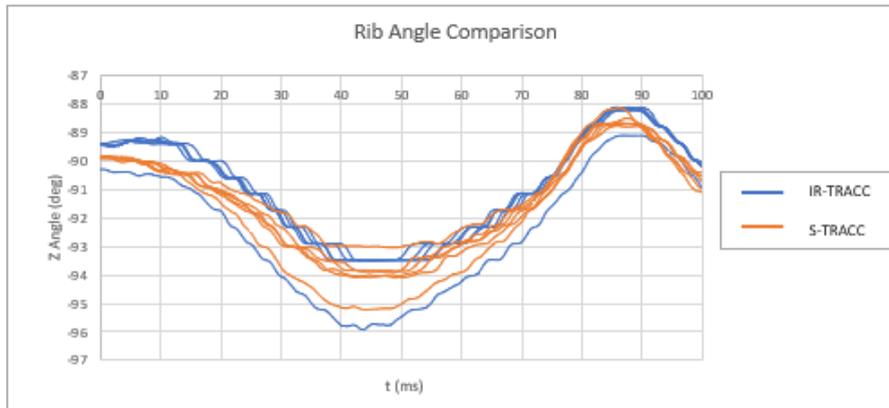


Figura 4.16: Curve della rotazione del sensore: IR-TRACC vs S-TRACK.

$\Phi_{max,mean}$ [deg]	$\Phi_{min,mean}$ [deg]	$\Delta\phi_{mean}$ [deg]
-88,331	-93,895	5,563
$\Phi_{max,mean}$ [deg]	$\Phi_{min,mean}$ [deg]	$\Delta\phi_{mean}$ [deg]
-88,571	-94,036	5,465

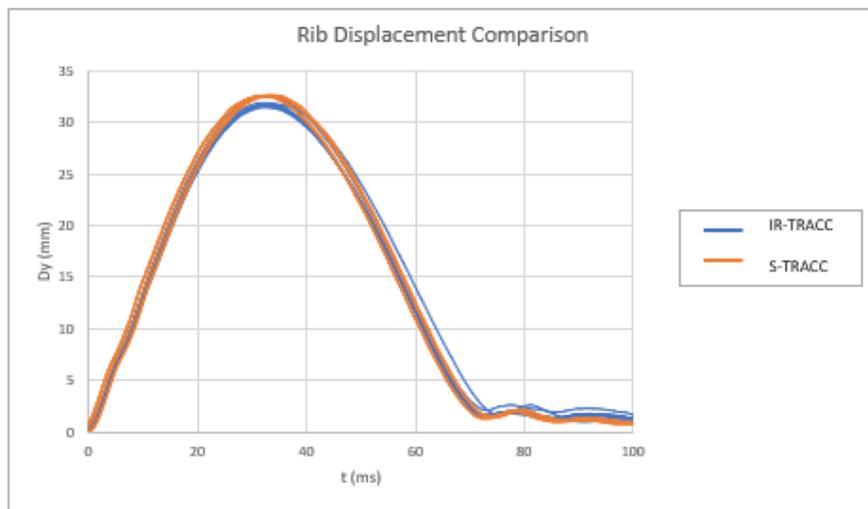
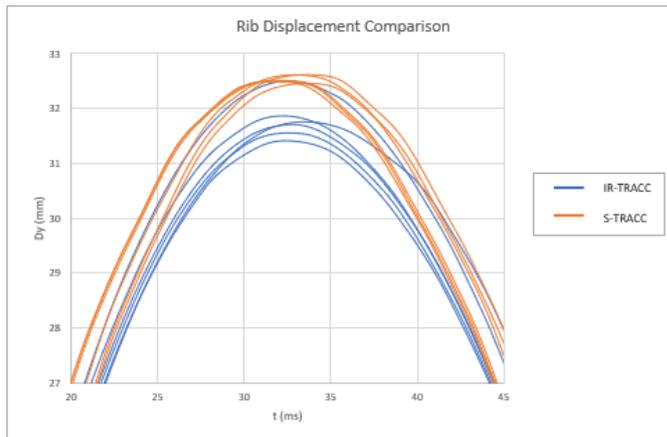


Figura 4.18: Curve di schiacciamento IR-TRACC vs S-TRACK.



**Dy,mean [mm]**

31,7985

**Dy,mean [mm]**

32,53

Figura 4.19: Ingrandimento del picco di schiacciamento IR-TRACC VS S-TRACK

#### 4.4.2 Analisi di prove sperimentali a 0° e altezza 400 mm



Figura 4.21: Frame di prova del sensore (a) IR-TRACC e (b) S-TRACK a 0° e altezza 400 mm

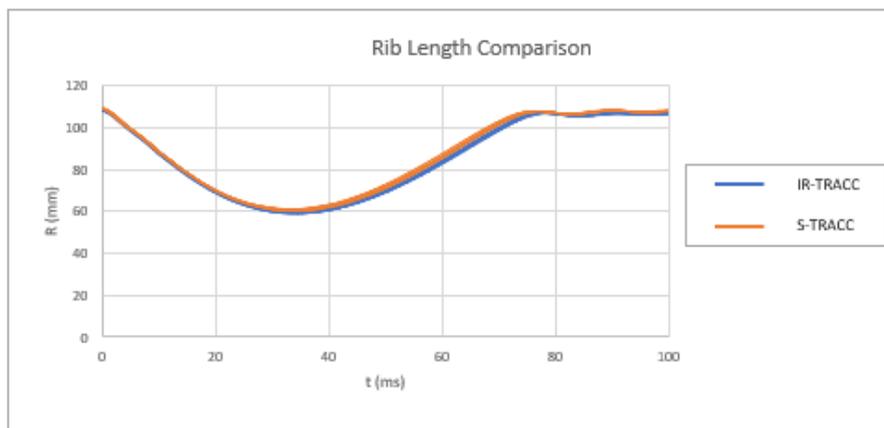


Figura 4.22: Curve di lunghezza del sensore: IR-TRACC vs S-TRACK.

Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
108,296	59,416	48,88
Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
109,303	60,56	48,743

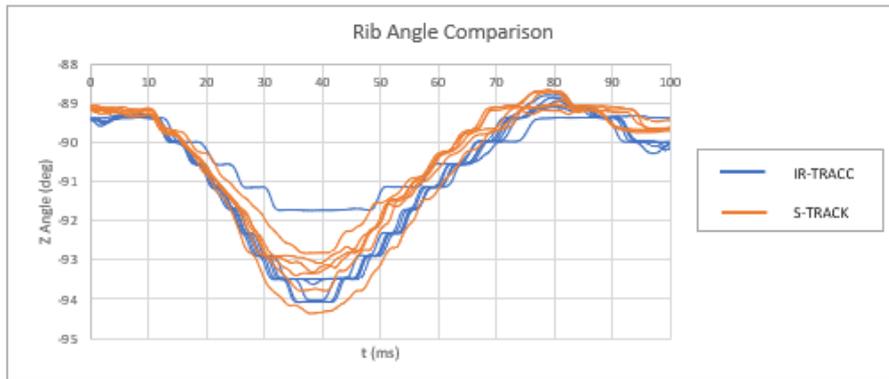


Figura 4.24: Curve della rotazione del sensore: IR-TRACC vs S-TRACK.

$\Phi_{max,mean}$ [deg]	$\Phi_{min,mean}$ [deg]	$\Delta\phi_{mean}$ [deg]
-89,026	-93,495	4,468
$\Phi_{max,mean}$ [deg]	$\Phi_{min,mean}$ [deg]	$\Delta\phi_{mean}$ [deg]
-88,838	-93,466	4,628

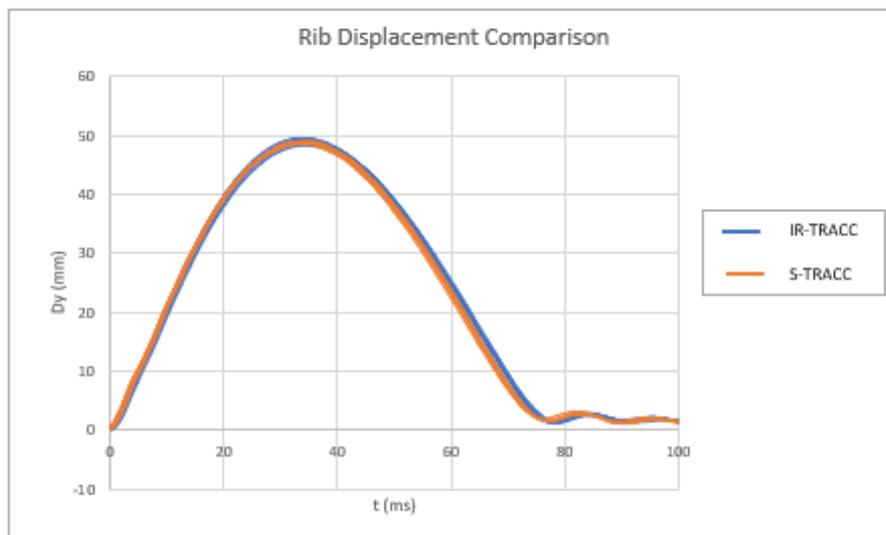
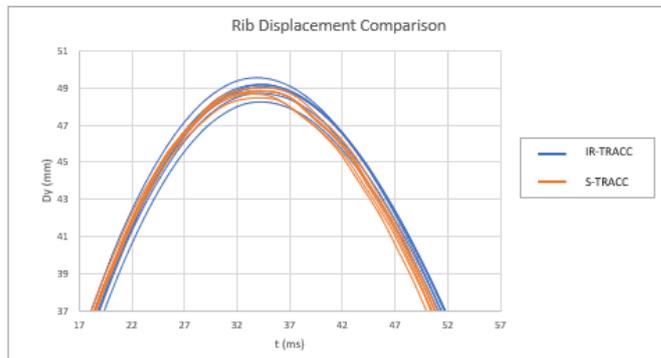


Figura 4.26: Curve di schiacciamento IR-TRACC vs S-TRACK.



**Dy,mean [mm]**

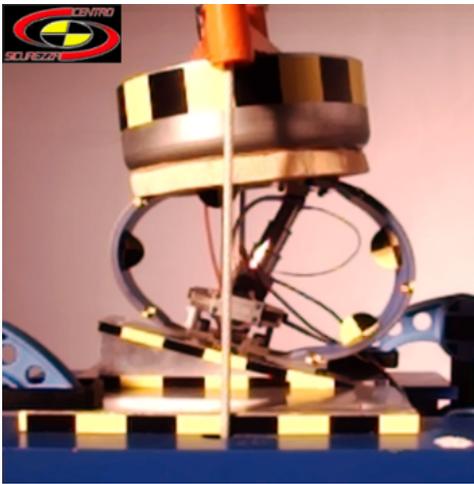
48,98

**Dy,mean [mm]**

48,77

Figura 4.27: Ingrandimento del picco di schiacciamento IR-TRACC VS S-TRACK

### 4.4.3 Analisi di prove sperimentali a 15° e altezza 200 mm



(a)



(b)

Figura 4.29: Frame di prova del sensore (a) IR-TRACC e (b) S-TRACK a 15° e altezza 200 mm

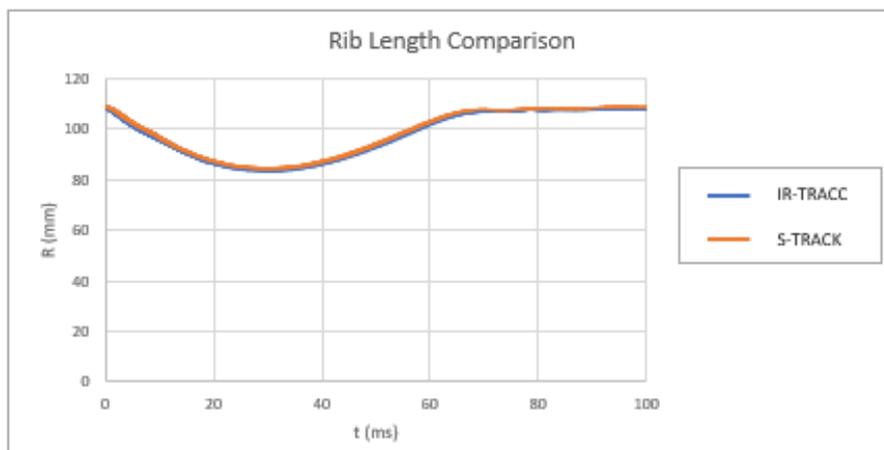


Figura 4.30: Curve di lunghezza del sensore: IR-TRACC vs S-TRACK.

Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
108,9383333	83,53166667	25,40666667
Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
109,375	84,445	24,93

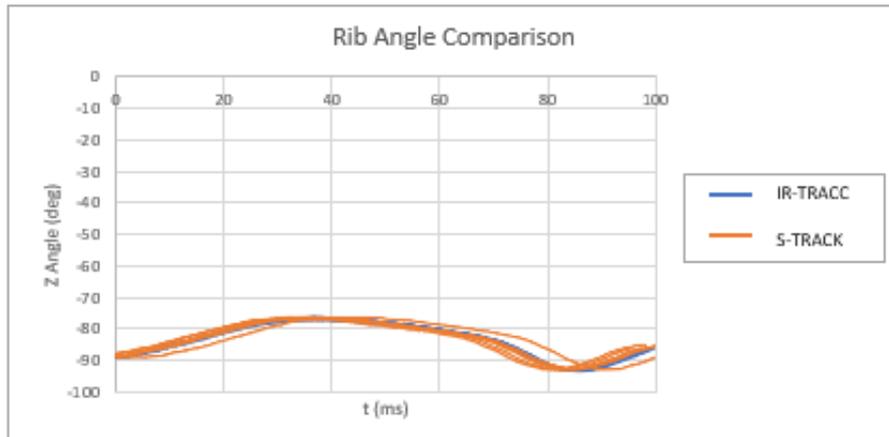


Figura 4.32: Curve della rotazione del sensore: IR-TRACC vs S-TRACK.

Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
108,938	83,531	25,406
$\Phi_{\text{max,mean}}$ [deg]	$\Phi_{\text{min,mean}}$ [deg]	$\Delta\phi_{\text{mean}}$ [deg]
-76,591	-92,971	16,38

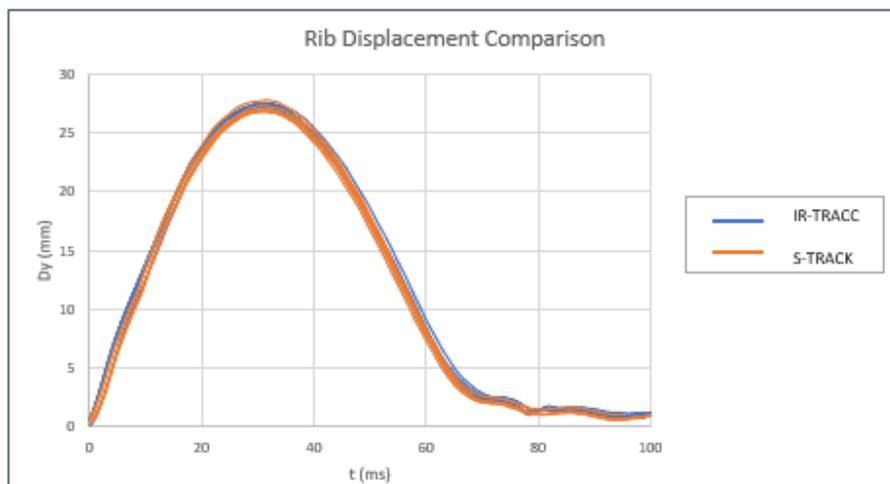
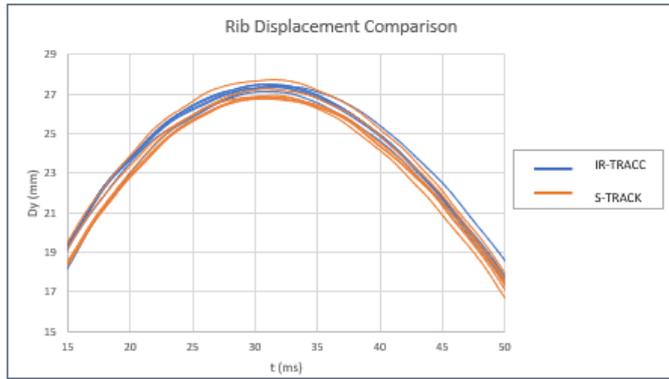


Figura 4.34: Curve di schiacciamento IR-TRACC vs S-TRACK.



**Dy,mean [mm]**

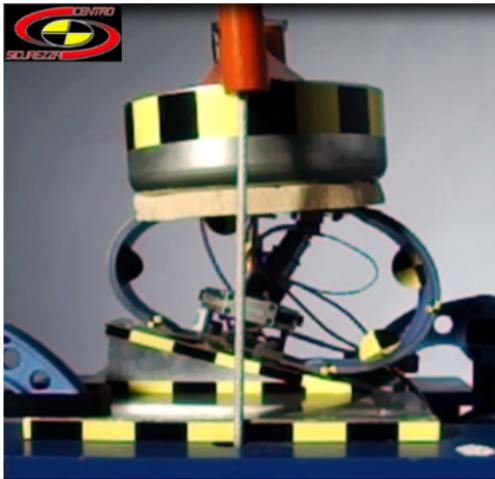
27,357

**Dy,mean [mm]**

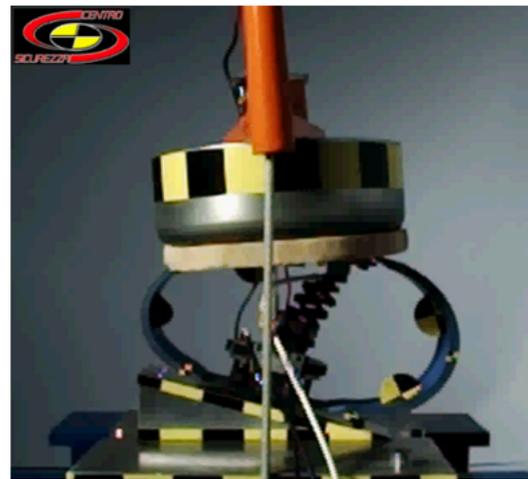
27,041

Figura 4.35: Ingrandimento del picco di schiacciamento IR-TRACC VS S-TRACK

#### 4.4.4 Analisi di prove sperimentali a 15° e altezza 400 mm



(a)



(b)

Figura 4.37: Frame di prova del sensore (a) IR-TRACC e (b) S-TRACK a 15° e altezza 400 mm

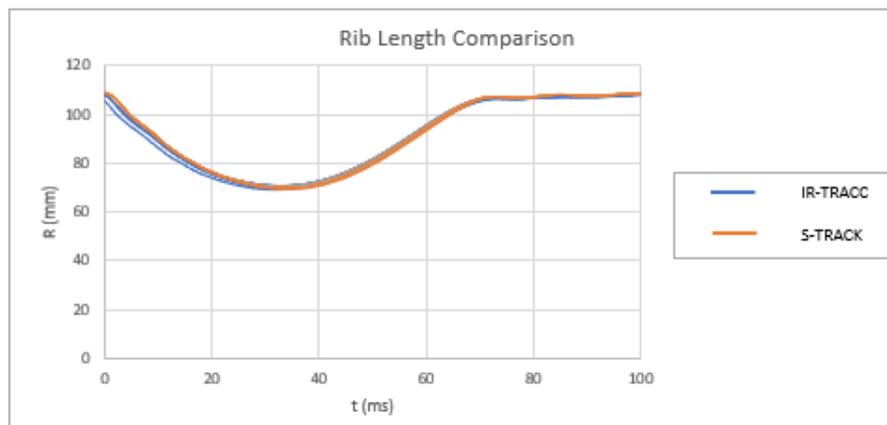


Figura 4.38: Curve di lunghezza del sensore: IR-TRACC vs S-TRACK.

Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
109,01	70,251	38,758
Rmax, mean [mm]	Rmin, mean [mm]	$\Delta R_{\text{mean}}$ [mm]
109,238	70,123	39,115

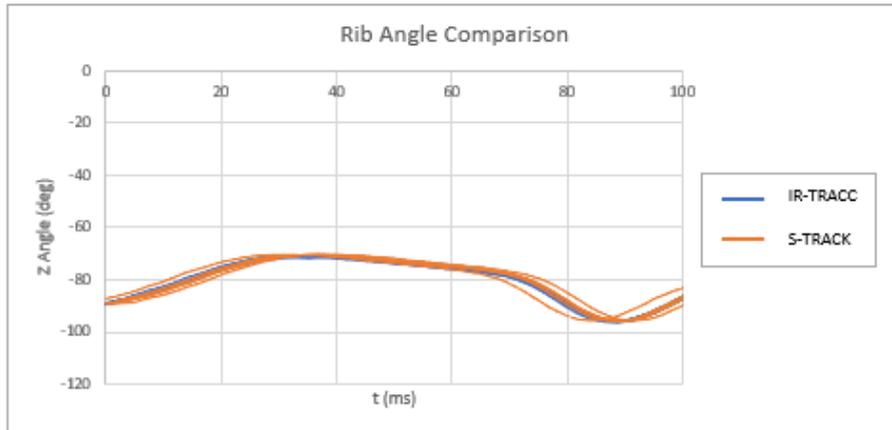


Figura 4.40: Curve della rotazione del sensore: IR-TRACC vs S-TRACK.

$\Phi_{max,mean}$ [deg]	$\Phi_{min,mean}$ [deg]	$\Delta\phi_{mean}$ [deg]
-70,885	-96,05	25,165
$\Phi_{max,mean}$ [deg]	$\Phi_{min,mean}$ [deg]	$\Delta\phi_{mean}$ [deg]
-70,426	-95,683	25,256

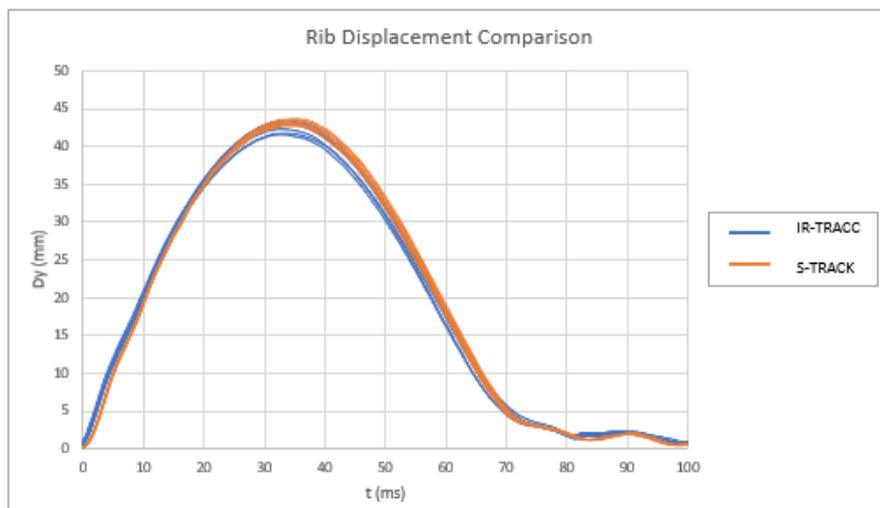


Figura 4.42: Curve di schiacciamento IR-TRACC vs S-TRACK.

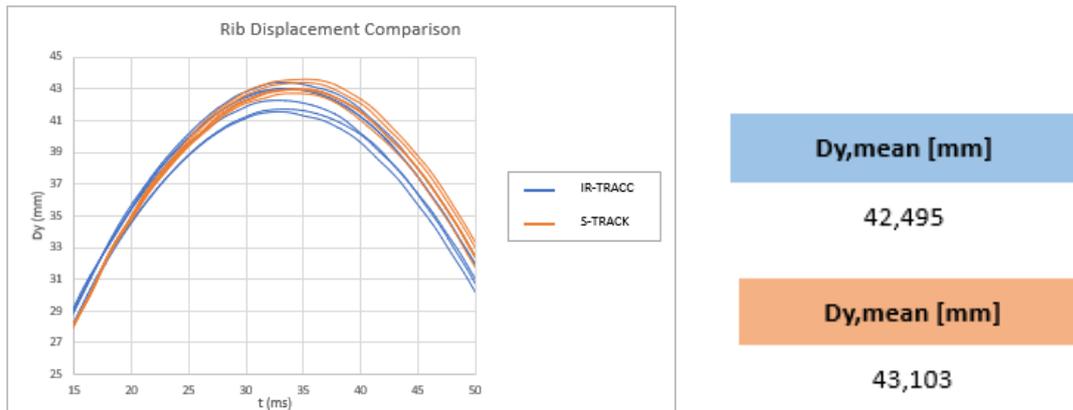


Figura 4.43: Ingrandimento del picco di schiacciamento IR-TRACC VS S-TRACK

Fatta eccezione per la prima configurazione di prova a bassa energia e velocità ( $0^\circ$  e altezza 200 mm), si può confermare come sia a livello numerico che grafico, esista un'ottima corrispondenza nella risposta di IR-TRACC e di S-TRACK.

## 4.5 Test di ipotesi: differenza tra medie di due distribuzioni normali, varianze incognite uguali

Si supponga di avere due distribuzioni normali con medie ignote,  $\mu_1$  e  $\mu_2$ , e varianze incognite ma uguali,  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ , si vuole verificare se [50]:

- **Ipotesi nulla**  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$
- **Ipotesi alternativa bilaterale**  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0$

Si considerino un campione casuale di  $n_1$  osservazioni  $x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}$  della prima popolazione e un campione casuale di  $n_2$  osservazioni  $x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,n}$  della seconda popolazione; le rispettive medie e varianze campionarie sono definite come  $\bar{x}_1$  e  $\bar{x}_2$ ,  $s_1^2$  e  $s_2^2$ . Il valore atteso della differenza tra medie campionarie  $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$  è:

$$E(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \mu_1 - \mu_2$$

quindi  $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$  è uno stimatore non distorto della differenza delle due medie; la varianza di  $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$  è

$$V(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \frac{\sigma^2}{n_1} + \frac{\sigma^2}{n_2} = \sigma^2 \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)$$

Di conseguenza è possibile combinare le due varianze campionarie  $s_1^2$  e  $s_2^2$  per ottenere lo stimatore di  $\sigma^2$ , definito *stimatore pooled* di  $\sigma^2$ :

$$s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Si può verificare che lo stimatore  $s_p^2$  può essere scritto come:

$$s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}s_1^2 + \frac{(n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}s_2^2 = \omega s_1^2 + (1 - \omega)s_2^2$$

dove  $0 \leq \omega \leq 1$ , per cui  $s_p^2$  risulta essere una media ponderata delle varianze campionarie  $s_1^2$  e  $s_2^2$ , pesata sui valori  $\omega$  e  $1 - \omega$  dipendenti dalle dimensioni campionarie  $n_1$  e  $n_2$ : se  $n_1 = n_2 = n$ , allora  $\omega = 0.5$ , quindi  $s_p^2$  risulta essere la media aritmetica di  $s_1^2$  e  $s_2^2$ . Il primo campione contribuisce con  $n_1 - 1$  gradi di libertà a  $s_1^2$  e il secondo campione contribuisce con  $n_2 - 1$  gradi di libertà, perciò  $s_p^2$  ha  $n_1 + n_2 - 2$  gradi di libertà.

La quantità:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

ha una distribuzione  $t$  di Student con  $n_1 + n_2 - 2$  gradi di libertà. Si può quindi utilizzare questa informazione per verificare le ipotesi iniziali, sostituendo  $\mu_1 - \mu_2$  con  $\Delta_0$ : la statistica test risultante, che ha distribuzione  $t$  di Student con  $n_1 + n_2 - 2$  gradi di libertà, è:

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - \Delta_0}{s_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

Quindi  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$  se  $-t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2} \leq t_0 \leq t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$

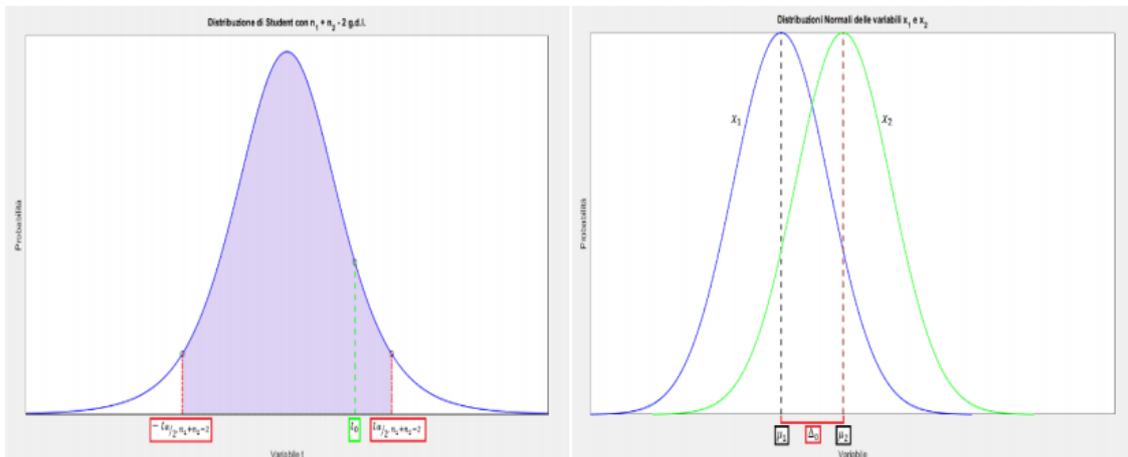


Figura 4.45: test di ipotesi per  $-t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} \leq t_0 \leq t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$ .

$$\begin{array}{ll}
 H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0 & \text{se} \quad -t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} > t_0 \quad \text{o} \quad t_0 > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} \\
 H_1 : \mu_1 - \mu_2 > \Delta_0 & \text{se} \quad t_0 > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}
 \end{array}$$

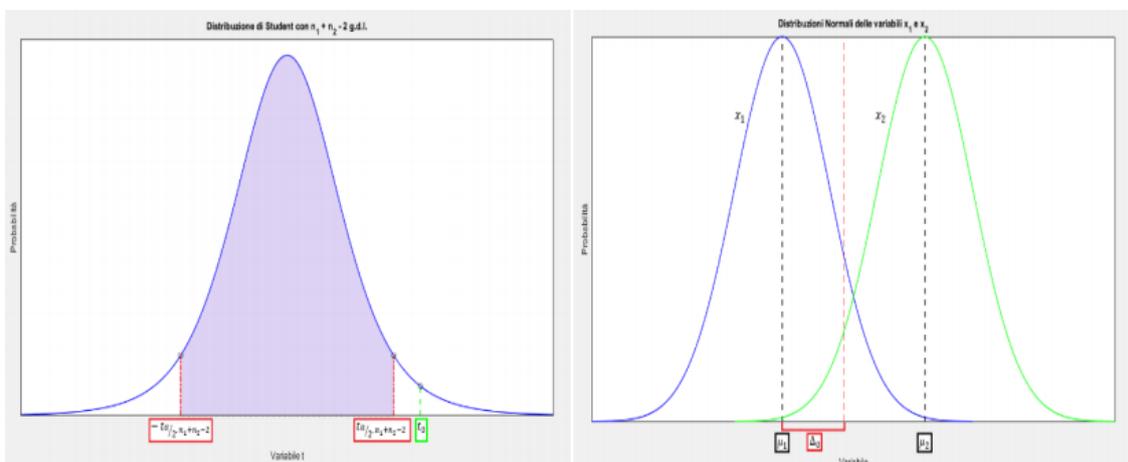


Figura 4.46: test di ipotesi per  $t_0 > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$ .

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 < \Delta_0 \quad \text{se} \quad -t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} > t_0$$

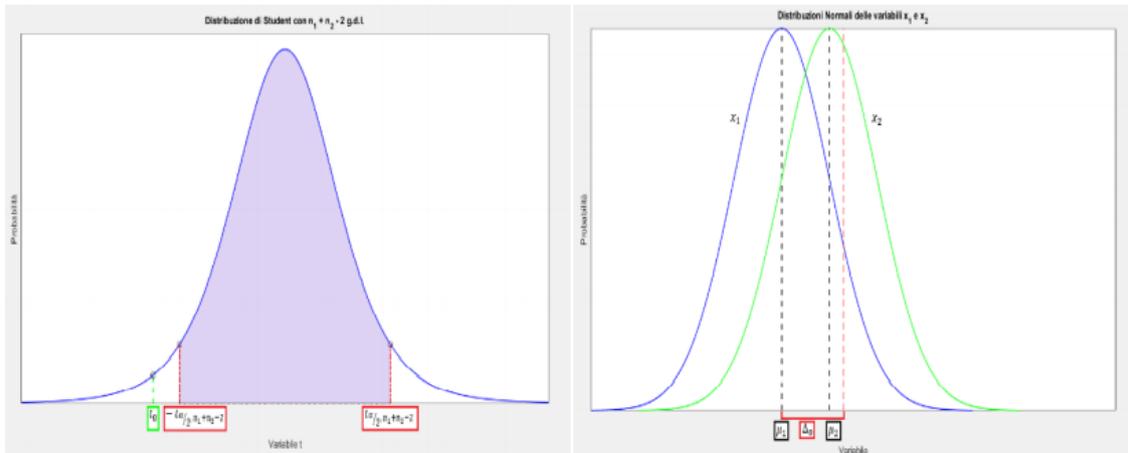


Figura 4.47: test di ipotesi per  $-t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} > t_0$ .

### 4.5.1 Analisi statistica delle prove: sviluppo del test di ipotesi

In questo studio si confrontano due insiemi di dati di cui non si conoscono i valori di media e deviazione standard delle due popolazioni. Inoltre, si ritiene che i dati sperimentali siano campioni indipendenti estratti da una variabile aleatoria distribuita secondo una distribuzione normale, di parametri:

- $x_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1)$  per IR-TRACC;
- $x_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2)$  per S-TRACK.

Si supponga anche che le due varianze,  $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$  siano uguali. L'ipotesi che si intende verificare è che i campioni abbiano la stessa media. A tale scopo, si sviluppa un test di ipotesi sulla differenza tra medie di due distribuzioni normali, varianze incognite, che, facendo riferimento alla terminologia utilizzata nel paragrafo precedente, presenta i seguenti parametri:

- $\Delta_0 = 0$
- **Ipotesi nulla**  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 \Rightarrow$  le risposte dei due sensori sono confrontabili (i dati appartengono alla stessa distribuzione);
- **Ipotesi alternativa bilaterale**  $H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \Rightarrow$  le risposte dei due sensori non sono confrontabili (i dati appartengono a due distribuzioni distinte).

Secondo il procedimento descritto nel paragrafo precedente, per confermare l'IPOTESI NULLA deve essere rispettata la seguente condizione:

$$-t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} \leq t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - \Delta_0}{s_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \leq t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$$

Dove:

- $\bar{x}_1$  e  $\bar{x}_2$  sono le medie campionarie rispettivamente di IR-TRACC e S-TRACK;
- $n_1$  e  $n_2$  sono le numerosità dei campioni di misure rispettivamente di IR-TRACC e S-TRACK;
- $s_p$  è lo *stimatore pooled*;
- $\alpha$  è il livello di significatività del confronto.

Il test d'ipotesi viene implementato in un foglio di calcolo tramite la funzione “Analisi dati”, la quale tra le varie opzioni, permette di realizzare un test- $t$  a due campioni assumendo uguali le varianze e un livello di significatività  $\alpha = 5\%$ . Si seleziona l'intervallo dei valori di schiacciamento per ognuna delle configurazioni imposte nel test matrix (Tabella 4.3).

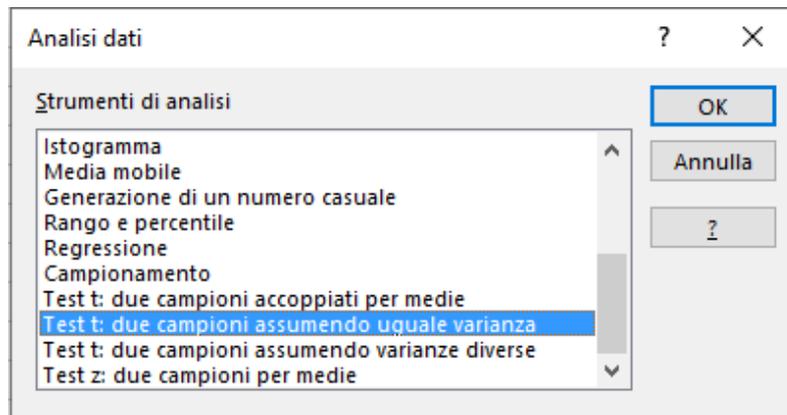


Figura 4.48: test  $t$ .

Nelle tabelle risultanti dall'analisi, sono riportati i valori di media, varianza, numero di osservazioni e la differenza ipotizzata tra le due medie (in questo caso nulla) per entrambi i campioni e per ciascuna delle configurazioni di prova. Da questi dati, la funzione calcola, la varianza pooled  $s_p^2$ , i gradi di libertà utilizzati per trovare i valori tabellati per il confronto, il valore di  $t_0$ , il livello di significatività massimo necessario a non rifiutare l'ipotesi nulla e il valore tabellato della distribuzione  $t$  relativa al quantile corrispondente, questi ultimi calcolati sia considerando una probabilità unilaterale (una coda) che bilaterale (due code). Affinché venga

confermata l'IPOTESI NULLA, si intende confrontare il valore della variabile  $t_0$  con il valore tabellato di  $t$  critico con le due code sapendo che l'ipotesi nulla viene rifiutata se il primo risulta maggiore del secondo. Si confronti  $t_0$  per ognuna delle configurazioni:

**Orientamento sensore  $\rightarrow 0^\circ$ , altezza di caduta dell'impattore  $\rightarrow 200$  mm**

Tabella 4.9: Elaborazione statistica: test di ipotesi  $0^\circ$  altezza 200 mm.

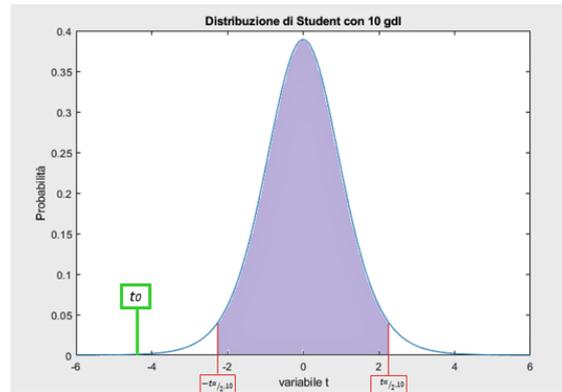
	IR-TRACC	S-TRACK
Media	31,7985	32,53
Varianza	0,1416411	0,00457
Osservazioni	6	6
Varianza pooled	0,07310555	
Differenza ipotizzata per le medie	0	
gdl	10	
Variabile $t_0$ calcolata	-4,685973016	
$P(T \leq t)$ una coda	0,000429839	
$t$ critico una coda	1,812461123	
$P(T \leq t)$ due code	0,000859677	
$t$ critico due code	2,228138852	

$$-t_{\alpha/2,10} = -2,228 \leq t_0 = -4,685 \leq t_{\alpha/2,10} = 2,228$$

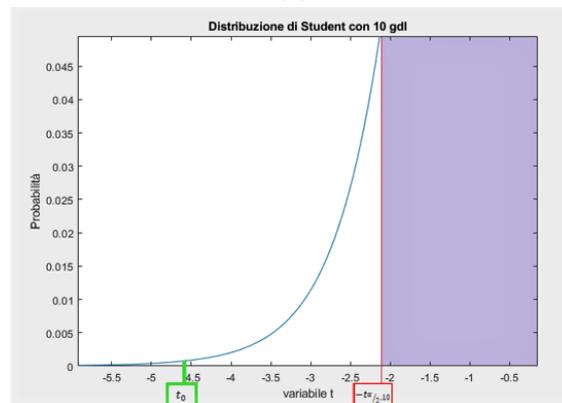
Dall'analisi si evince che l'ipotesi nulla viene rifiutata, poiché il valore della variabile  $t_0$  per un livello di confidenza del 95% si trova al di fuori dei limiti della distribuzione normale:

$$-t_{\alpha/2,10} > t_0$$

Viene quindi rispettata l'ipotesi alternativa bilaterale,  $H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ , secondo la quale i dati appartengono a due distribuzioni distinte. In altre parole, le risposte dei due sensori non possono considerarsi confrontabili. L'analisi statistica conferma quanto già notato in fase di analisi biomeccanica. In condizioni di bassa energia, IR-TRACC assume un comportamento insolito che si traduce con una riduzione di schiacciamento. Nonostante la differenza con lo schiacciamento rilevato dal sensore S-TRACK sia inferiore al millimetro non è possibile considerarla trascurabile.



(a)



(b)

Figura 4.49: (a) Distribuzione Test-t a  $0^\circ$  altezza 200 mm e (b) ingrandimento della distribuzione

**Orientamento sensore  $\rightarrow 0^\circ$ , altezza di caduta dell'impattore  $\rightarrow 400$  mm**

Tabella 4.10: Elaborazione statistica: test di ipotesi  $0^\circ$  altezza 400 mm.

	IR-TRACC	S-TRACK
Media	48,9875	48,77716667
Varianza	0,2031395	0,034168167
Osservazioni	6	6
Varianza <i>pooled</i>	0,118653833	
Differenza ipotizzata per le medie	0	
gdl	10	
Variabile $t_0$ calcolata	1,057615593	
$P(T \leq t)$ una coda	0,157554938	
t critico una coda	1,812461123	
$P(T \leq t)$ due code	0,315109876	
t critico due code	2,228138852	

4.5 – Test di ipotesi: differenza tra medie di due distribuzioni normali, varianze incognite uguali

$$-t_{\alpha/2,10} = -2,228 \leq t_0 = 1,057 \leq t_{\alpha/2,10} = 2,228$$

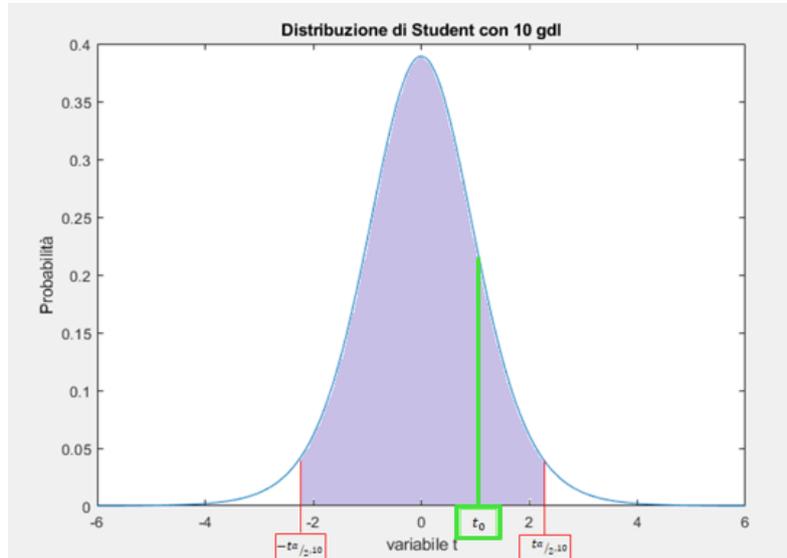


Figura 4.50: Distribuzione Test-t a 0° altezza 400 mm.

L'ipotesi nulla viene rispettata → le risposte dei sensori sono confortabili.

**Orientamento sensore → 15°, altezza di caduta dell'impattore → 200 mm**

Tabella 4.11: Elaborazione statistica: test di ipotesi 15° altezza 200 mm.

	IR-TRACC	S-TRACK
Media	27,35716667	27,04183333
Varianza	0,019132567	0,139722967
Osservazioni	6	6
Varianza pooled	0,079427767	
Differenza ipotizzata per le medie	0	
gdl	10	
Variabile t0 calcolata	1,937957878	
P(T<=t) una coda	0,04067782	
t critico una coda	1,812461123	
P(T<=t) due code	0,081355639	
t critico due code	2,228138852	

$$-t_{\alpha/2,10} = -2,228 \leq t_0 = 1,937 \leq t_{\alpha/2,10} = 2,228$$

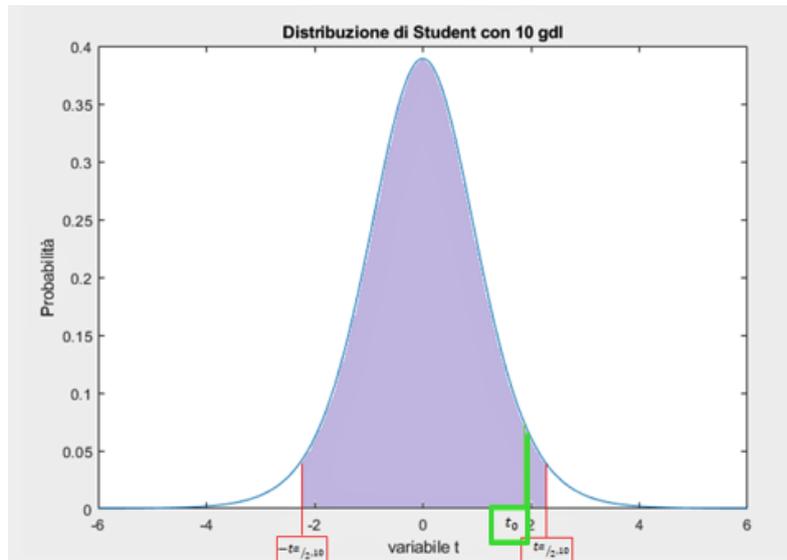


Figura 4.51: Distribuzione Test-t a 0° altezza 400 mm.

L'ipotesi nulla viene rispettata → le risposte dei sensori sono confortabili.

**Orientamento sensore → 15°, altezza di caduta dell'impattore → 400 mm**

Tabella 4.12: Elaborazione statistica: test di ipotesi 15° altezza 400 mm.

	IR-TRACC	S-TRACK
Media	42,49566667	43,10383333
Varianza	0,579913467	0,109493367
Osservazioni	6	6
Varianza pooled	0,344703417	
Differenza ipotizzata per le medie	0	
gdl	10	
Variabile t0 calcolata	-1,79415701	
P(T<=t) una coda	0,051513897	
t critico una coda	1,812461123	
P(T<=t) due code	0,103027793	
t critico due code	2,228138852	

$$-t_{\alpha/2,10} = -2,228 \leq t_0 = -1,784 \leq t_{\alpha/2,10} = 2,228$$

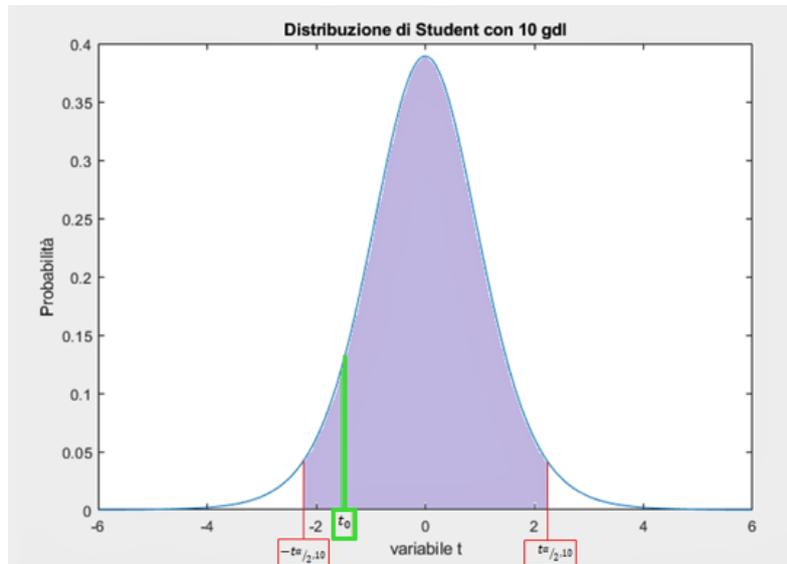


Figura 4.52: Distribuzione Test-t a 0° altezza 400 mm.

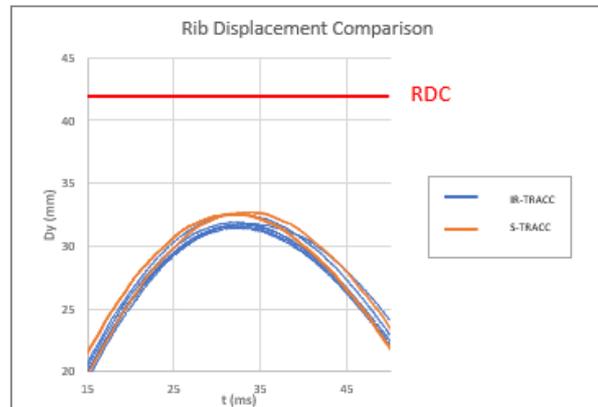
L'ipotesi nulla viene rispettata → le risposte dei sensori sono confortabili.  
Dal test di ipotesi, si evince come su 4 cicli di prove a differenti condizioni di impatto, 3 rispettino l'ipotesi nulla, per cui le due popolazioni, nonché i sensori IR-TRACC e S-TRACK, possono considerarsi confrontabili.

## 4.6 Valutazione biomeccanica per la sicurezza dell'occupante

Volendo valutare la correttezza dei valori ottenuti in termini di sicurezza stradale, si fa riferimento ai valori limite di compressione del torace contenuti nello standard ECE R95 e ECE R135. Come ampiamente descritto nel Capitolo 1, lo standard ECE R95 regola l'omologazione di veicoli per garantire la sicurezza degli occupanti in impatti laterali. A livello toracico, il limite di compressione delle costole (RDC: Rib Deflection Criterion) imposto non supera i 42 mm. Nello studio eseguito, gli impatti a 0° simulano la condizione di impatto laterale. Osservando i risultati:

**Impatto 0° altezza 200 mm**

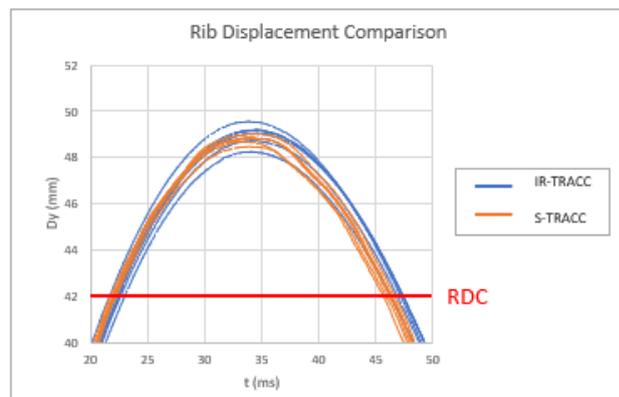
	IR-TRACC	S-TRACK
Dy [mm]	31,79	32,53



(a) Confronto tra schiacciamento e limiti di deflessione ECE R95 per 0° e 200 mm

**Impatto 0° altezza 400 mm**

	IR-TRACC	S-TRACK
Dy [mm]	48,98	48,77



(a) Confronto tra schiacciamento e limiti di deflessione ECE R95 per 0° e 400 mm

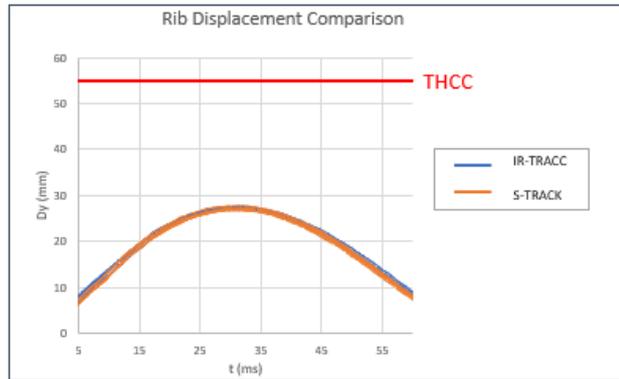
si deduce che il primo ciclo di prove a 200 mm produce uno schiacciamento che rientra ampiamente nei limiti dello standard. Non si può dire la stessa cosa per i test ad altezza di impatto pari a 400 mm, in cui il valore medio di compressione delle singole costole, per entrambi i sensori, supera di pochi millimetri il limite consentito, nel rispetto delle condizioni energetiche valutate in sede di setup.

Lo standard ECE R135, invece, regola la sicurezza degli occupanti in impatti laterali-palo. In questo caso, il criterio di compressione toracica (THCC: Thorax Compression Criterion) impone una deflessione massima delle costole non

superiore ai 55 mm. I test che simulano gli impatti laterali-palo, eseguiti con un orientamento pari a 15° forniscono i seguenti risultati:

**Impatto 15° altezza 200 mm**

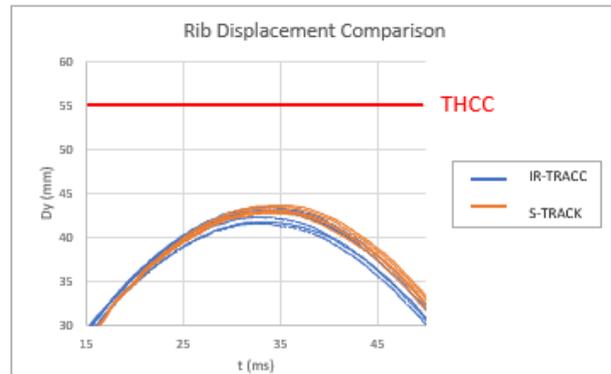
	IR-TRACC	S-TRACK
Dy [mm]	27,35	27,04



(a) Confronto tra schiacciamento e limiti di deflessione ECE R95 per 15° e 200 mm

**Impatto 15° altezza 400 mm**

	IR-TRACC	S-TRACK
Dy [mm]	42,49	43,1



(a) Confronto tra schiacciamento e limiti di deflessione ECE R95 per 15° e 400 mm

è evidente come la risposta di entrambi i sensori rientri pienamente nei limiti imposti dallo standard.

## 4.7 Valutazione della ripetibilità

In statistica, allo scopo di confrontare la variabilità tra due o più gruppi di dati, viene calcolato il *Coefficiente di Variazione (CV)*, indicatore di dispersione relativa

indipendente dalla distribuzione, il quale permette il confronto tra distribuzioni. Il CV viene espresso in percentuale in modo da ottenere il confronto della variabilità di gruppi di dati sia che essi siano espressi in unità di misura differenti oppure no.

In questo studio, il calcolo del CV, applicabile in vari campi tra cui quello automobilistico, mira a valutare la ripetibilità della risposta del sensore:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100$$

Dove:

- $\sigma$  deviazione standard;
- $\bar{x}$  media statistica.

*NTHSA (National Highway Traffic Safety Administration)* si avvale del calcolo di tale parametro statistico, in base al quale ha definito una classificazione della ripetibilità:

Tabella 4.13: Classificazione NTHSA del Coefficiente di Variazione.

<i>Valore CV</i>	<i>Valutazione</i>
0-5 %	<i>Excellent</i>
>5-8 %	<i>Good</i>
>8-10 %	<i>Marginal (accettabile)</i>
>10 %	<i>Poor (inaccettabile)</i>

Considerando le 4 tipologie di test effettuati:

(a)			(b)		
	IR-TRACC	S-TRACK		IR-TRACC	S-TRACK
Media	31,7985	32,53	Media	48,9875	48,77771
Dev Standard	0,37635	0,0676	Dev Standard	0,4507	0,1848
CV [%]	1,18	0,2	CV [%]	0,92	0,38

(c)			(d)		
	IR-TRACC	S-TRACK		IR-TRACC	S-TRACK
Media	27,3571	27,0418	Media	42,4956	43,1038
Dev Standard	0,1383	0,3737	Dev Standard	0,7615	0,3308
CV [%]	0,5	1,38	CV [%]	1,79	0,76

Tabella 4.14: Risultati CV a: (a) 0°, altezza 200 mm; (b) 0°, altezza 400 mm; (c) 15°, altezza 200 mm; (d) 15°, altezza 400 mm.

Facendo riferimento alla tabella 4.13, si può affermare come in tutti i casi vi sia una ripetibilità dei sensori eccellente. Nel dettaglio, osservando i valori di CV per IR-TRACC e S-TRACK nella singola condizione, si nota che i valori più alti sono presentati da IR-TRACC, fatta eccezione per gli impatti a 15° e 200 mm di altezza in cui il valore di CV più alto è dato dal sensore S-TRACK. Questo dimostra che, tra i due sensori, S-TRACK presenta una ripetibilità migliore.



# Conclusioni e sviluppi futuri

Nel seguente capitolo verranno riassunte le conclusioni sui dati sperimentali ottenuti e successivamente verranno esposti i possibili sviluppi futuri nello stesso ambito del lavoro di tesi svolto.

## Conclusioni

Alla luce dei risultati ottenuti dallo studio, è possibile formulare alcune considerazioni. La linearità del sensore S-TRACK ha costituito un enorme vantaggio, non solo nella facilità di gestione dei dati in fase di post-processing, ma anche nel mettere in discussione i test svolti con IR-TRACC inducendo alla correzione nella modalità di acquisizione. Acquisire il segnale in modalità diretta, come avviene per il sensore S-TRACK, ha portato ad avere letture di tensione coerenti alla lunghezza del sensore stesso e ad abbattere gran parte della variabilità. Durante il lavoro di tesi, infatti, è emerso come IR-TRACC sia maggiormente sensibile alle variazioni di tensione poiché, per costruzione, lavora su intervalli di tensione molto bassa (dell'ordine dei mV). Al contrario, S-TRACK lavora su tensioni di gran lunga superiori (dell'ordine dei V), le quali garantiscono una stabilità non indifferente nelle uscite elettriche del sensore. Quanto riportato sopra, ha permesso di effettuare correttamente le prove per entrambi i sensori. L'analisi biomeccanica circa la misura dello schiacciamento di una costola toracica, ha messo in rilievo alcune caratteristiche dei sensori. Come è stato possibile notare dai grafici di spostamento, la differenza tra i valori medi di schiacciamento dei due sensori è trascurabile. Questo viene ulteriormente confermato dall'analisi statistica eseguita, tramite il Test di Student, sulle distribuzioni campionarie di entrambi i sensori, secondo la quale le due popolazioni, nella maggior parte delle condizioni di prova, risultano confrontabili. Tali evidenze portano ad affermare che il sensore IR-TRACC, può essere sostituito dall'alternativo S-TRACK. Entrambi i sensori hanno dato prova di eccellente ripetibilità come confermato statisticamente dalla valutazione del Coefficiente di Variazione: i valori di CV sono ampiamente al di sotto del 5%, in particolare, la risposta migliore in fatto di ripetibilità nelle diverse condizioni di lavoro è stata presentata dal sensore S-TRACK.

## **Sviluppi futuri**

Il passo immediatamente successivo al lavoro svolto in questa tesi, comporta l'implementazione di un setup analogo, che prevede impatti dinamici su singolo componente in cui il sistema costola-sensore è dato da una costola del manichino THOR-50M, ed i sensori IR-TRACC e S-TRACK. In questa circostanza, sarebbe interessante osservare e valutare la deflessione 3D della costola svincolata dal sistema di 7 costole al quale è vincolata all'interno del manichino. Come descritto nei precedenti capitoli, il THOR è un ATD per impatti frontali ad alta biofedeltà introdotto nelle prove di rating Euro NCAP a partire da quest'anno e che ha visto l'utilizzo dei soli sensori IR-TRACC. Sarebbe perciò opportuno, alla luce dei risultati ottenuti in questo studio, implementare i sensori S-TRACK ed eseguirne il confronto. Ma nel mercato della sensoristica di deflessione del torace, oltre ad S-TRACK, esistono alternative ancora oggi in fase di sviluppo e quindi poco studiate, che potrebbero rappresentare una vera evoluzione nell'analisi biomeccanica delle lesioni del torace. Restando nell'ambito degli impatti laterali, riveste particolare interesse, il RibEye. Come già accennato, si tratta di un sistema di misura il cui funzionamento differisce dai sensori visti fino ad ora poiché esula dalla struttura a singolo punto permettendo in questo modo di misurare con estrema precisione la compressione massima, individuare il punto in cui avviene tale compressione e mappare l'intera costola allo scopo di osservarne la deformazione. Per ultimo, si potrebbe procedere con l'implementazione dei diversi dispositivi di misura all'interno di un ATD e sottoporlo ad impatti (laterali nel caso si faccia uso di un WorldSID e frontali in caso del THOR) che vedono coinvolte più costole. A differenza dello studio svolto, si valuterebbe in che modo lo schiacciamento delle costole viene influenzato da fattori esterni quali l'interazione delle costole stesse che potrebbero comportare dei fattori di disturbo nei confronti dell'analisi biomeccanica.

## Appendice A

# Risultati delle prove sperimentali

Nel seguito sono riportati i risultati delle prove sperimentali condotte in 4 diverse configurazioni: due diverse inclinazioni dei sensori IR-TRACC e S-TRACK,  $0^\circ$  e  $15^\circ$ , e due diverse altezze iniziali dell'impattore, 200 mm e 400 mm. Per ogni configurazione sono state effettuate 6 ripetizioni. Per ciascuna di queste, è stata valutata la lunghezza del sensore prima e dopo l'impatto, il suo orientamento e lo schiacciamento massimo risultante.

(a)

IR-TRACC test 0° altezza 200 mm						
N osservazioni	R <sub>max</sub> [mm]	R <sub>min</sub> [mm]	Φ <sub>max</sub> [deg]	Φ <sub>min</sub> [deg]	Dy [mm]	
1	109,59	78,09	-89,1	-95,92	31,756	
2	109,48	76,93	-88,22	-93,49	32,495	
3	108,44	76,49	-88,2	-93,49	31,865	
4	108,32	76,66	-88,16	-93,5	31,708	
5	108,3	76,8	-88,11	-93,49	31,555	
6	108,23	76,87	-88,2	-93,48	31,412	

(b)

S-TRACK test 0° altezza 200 mm						
N osservazioni	R <sub>max</sub> [mm]	R <sub>min</sub> [mm]	Φ <sub>max</sub> [deg]	Φ <sub>min</sub> [deg]	Dy [mm]	
1	110,39	77,88	-88,5	-94,09	32,612	
2	110,07	77,52	-88,68	-93,89	32,616	
3	110	77,58	-88,76	-93,04	32,456	
4	109,99	77,56	-88,7	-93,88	32,513	
5	109,95	77,53	-88,65	-94,1	32,492	
6	109,93	77,6	-88,14	-95,22	32,491	

Tabella A.1: Risultati sperimentali a 0° e altezza 200 mm: (a) IR-TRACC e (b) S-TRACK

(a)

IR-TRACC test 0° altezza 400 mm						
N osservazioni	Rmax [mm]	Rmin [mm]	Φmax[deg]	Φmin [deg]	Dy [mm]	
1	108,16	59,99	-88,87	-94,07	49,052	
2	108,1	59,81	-89,11	-93,563	48,246	
3	108,66	59,05	-89,32	-91,74	49,549	
4	108,29	59,4	-88,95	-94,04	48,719	
5	108,23	59,17	-89,1	-93,49	49,162	
6	108,34	59,08	-88,81	-94,07	49,197	

(b)

S-TRACK test 0° altezza 400 mm						
N osservazioni	Rmax [mm]	Rmin [mm]	Φmax[deg]	Φmin [deg]	Dy [mm]	
1	109,71	61,05	-88,94	-93,09	48,68	
2	109,29	60,43	-89,06	-92,83	48,858	
3	109,23	60,86	-88,94	-94,37	48,466	
4	109,22	60,41	-88,7	-93,39	48,832	
5	109,2	60,43	-88,67	-93,78	48,819	
6	109,17	60,18	-88,72	-93,34	49,008	

Tabella A.2: Risultati sperimentali a 15° e altezza 200 mm: (a) IR-TRACC e (b) S-TRACK

(a)

IR-TRACC test 15° altezza 200 mm					
N osservazioni	Rmax [mm]	Rmin [mm]	$\Phi$ max[deg]	$\Phi$ min [deg]	Dy [mm]
1	108,9	83,61	-76,95	-93,44	27,106
2	108,88	83,39	-76,95	-93,2	27,473
3	108,97	83,71	-76,4	-93,2	27,342
4	109,18	83,66	-77,09	-93,48	27,421
5	108,89	83,17	-77,35	-93,2	27,475
6	108,81	83,65	-76,21	-93,22	27,326

(b)

S-TRACK test 15° altezza 200 mm					
N osservazioni	Rmax [mm]	Rmin [mm]	$\Phi$ max[deg]	$\Phi$ min [deg]	Dy [mm]
1	109,73	84,23	-76,38	-92,97	27,711
2	109,32	84,63	-76,39	-93,01	26,801
3	109,28	84,12	-76,93	-92,92	27,25
4	109,32	84,46	-77,14	-92,96	26,914
5	109,3	84,64	-76,39	-92,98	26,744
6	109,3	84,59	-76,32	-92,99	26,831

Tabella A.3: Risultati sperimentali a 0° e altezza 400 mm: (a) IR-TRACC e (b) S-TRACK

(a)

IR-TRACC test 15° altezza 400 mm						
N osservazioni	Rmax [mm]	Rmin [mm]	Φmax[deg]	Φmin [deg]	Dy [mm]	
1	108,94	70,9	-71,65	-95,84	41,553	
2	109	69,67	-70,89	-96,12	43,012	
3	108,92	69,25	-70,56	-96,33	43,403	
4	108,8	70,9	-70,52	-96,1	41,718	
5	109,39	70,81	-71,13	-95,81	42,275	
6	109,01	69,98	-70,56	-96,1	43,013	

(b)

S-TRACK test 15° altezza 400 mm						
N osservazioni	Rmax [mm]	Rmin [mm]	Φmax[deg]	Φmin [deg]	Dy [mm]	
1	109,3	70,57	-70,51	-95,56	42,713	
2	109,26	70,32	-70,37	-95,61	42,986	
3	109,24	70,23	-70,42	-95,64	42,989	
4	109,23	70,31	-70,41	-95,62	42,932	
5	109,2	69,78	-70,42	-95,82	43,397	
6	109,2	69,53	-70,43	-95,85	43,606	

Tabella A.4: Risultati sperimentali a 15° e altezza 400 mm: (a) IR-TRACC e (b) S-TRACK



# Bibliografia

- [1] ANFIA, «Regolamentazione del settore Automotive,» 15 settembre 2015.
- [2] C. Bignardi, Corso univervitario di Bioingegneria meccanica -"Biomeccanica dai traumi da urto".
- [3] Europe, United Nation Economic Commission. UN ECE R94: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision.
- [4] Europe, United Nation Economic Commission. UN ECE R137: Uniform provisions concerning the approval of passenger cars in the event of a frontal collision with focus on the restraint system.
- [5] Europe, United Nation Economic Commission. UN ECE R95: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision.
- [6] Europe, United Nation Economic Commission. UN ECE R135: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their Pole Side Impact performance (PSI).
- [7] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/>.
- [8] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/>.
- [9] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/frontal-impact/mobile-progressive-deformable-barrier/>.
- [10] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/frontal-impact/full-width-rigid-barrier/>.
- [11] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/lateral-impact/side-mobile-barrier/>.
- [12] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/lateral-impact/side-pole/>.

- [13] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/lateral-impact/far-side-impact/>.
- [14] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/rear-impact/whiplash/>.
- [15] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/child-occupant-protection/>.
- [16] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/>.
- [17] «Euroncap» (Online). Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/safety-assist/>.
- [18] «Euroncap,» (Online). Available: [www.EuroNCAP.com/it/stampa-e-media/comunicati-stampa/euroncap-celebra-il-20-anniversario-dei-crash-test-salvavita/](http://www.EuroNCAP.com/it/stampa-e-media/comunicati-stampa/euroncap-celebra-il-20-anniversario-dei-crash-test-salvavita/).
- [19] EuroNCAP 2025 Roadmap.
- [20] «Euroncap,» (Online). Available <https://www.euroncap.com/en/press-media/press-releases/euro-ncap-presents-latest-overhaul-of-its-safety-rating/>.
- [21] «humaneticsatd,» (Online). Available: <http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/sideimpact>.
- [22] HUMANETICS. Crash Test Dummy history. [Online]<http://www.humaneticsatd.com/aboutus/dummy-history>.
- [23] HUMANETICS. (Online). <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/frontal-impact>
- [24] HUMANETICS. (Online). <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/side-impact>.
- [25] HUMANETICS. (Online). <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/rear-impact>.
- [26] HUMANETICS. (Online). <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/child>.
- [27] «Road vehicles — Injury risk curves to evaluate occupant protection in side impact». (Online).
- [28] Humanetics Innovative Solutions, Inc. THOR-M Advanced Male Dummy - Parts Catalog.
- [29] Humanetics Innovative Solutions, Inc. WorldSID 50th - User Manual.
- [30] Biomeccanica Forense (Online) Available: <https://www.biomeccanicaforense.com/lesioni-degli-automobilisti.html>.
- [31] Biomeccanica Forense (Online) Available: <https://www.biomeccanicaforense.com/labiomeccanica-dei-traumi.html>.
- [32] S. W Rouhana, A high-speed sensor for measuring chest deflection in crash test dummies, 1998.
- [33] WorldSID: Comparison of different deflection measurement 08.05.2018.

- [34] Humanetics Innovative Solutions, W50-9900 WorldSID 50M User Manual Rev K 2018.
- [35] Humanetics Innovative Solutions, Service Bulletin 2D IR-TRACC Absolute length and angle calibration, October 2014.
- [36] Humanetics Innovative Solutions, Service Bulletin IR-TRACC Tubes In-Out (TIO) Calibration, October 2015.
- [37] Humanetics Innovative Solutions, Service Bulletin 2D IR-TRACC Zero-Position Verification, October 2015.
- [38] Humanetics Innovative Solutions, Inc. THOR-50M 3D IR-TRACC User Manual, 2016.
- [39] ATD Labtech, Alternate Displacement Sensor for WorldSID, THOR-M-50th and Q-Dummies (V8).
- [40] ATD Labtech, The Displacement Sensor for WorldSID, THOR-M-50th and Q-Dummies.
- [41] ATD Labtech, (Online) Available: <https://www.atd-labtech.com/en/products/s-track/>.
- [42] BOXBORO System: HARDWARE USER MANUAL RibEye Multi-Point Deflection Measurement System: 3-Axis Version for the WorldSID 50th Male ATD.
- [43] NHTSA: Evaluation of the RibEye Multipoint Deflection Measurement System installed in the WorldSID-50M Dummy.
- [44] NHTSA: NHTSA's RR Evaluation of the WorldSID 50th Male ATD.
- [45] KISTLER: KIR-TRACC Deformation measuring for WS-50.
- [46] KISTLER: KIR-TRACC Deformation measuring for THOR-50M.
- [47] SPIRAL Hi Co.,Ltd: What is SPIRAL Track?
- [48] SPIRAL Track (Online) Available: <http://www.jasti.co.jp/>
- [49] First Technology, Innovative Solution: Drop rig Fixture.
- [50] D. C. Montgomery, Controllo statistico della qualità, editore McGraw-Hill Education, 2005.



# Ringraziamenti

Giunti al termine non posso non dedicare un pensiero a tutti coloro che hanno contribuito alla stesura di questa tesi.

Ringrazio la mia relatrice, Prof.ssa Bignardi per avermi permesso di vivere l'esperienza di tesi in azienda ed approfondire argomenti che sin da subito mi hanno affascinata.

Ringrazio il Dott. Becchio, per avermi accolta presso il Centro Sicurezza FIAT.

Grazie al mio tutor, il Dott. Alessio Melloncelli, per il supporto datomi in questo percorso di tesi.

Grazie a tutti i ragazzi dell'ufficio BOP, per avermi fatto sentire una di loro e con cui ho trascorso molto del mio tempo, passeggiatine post-pranzo comprese.

Un ringraziamento particolare va a Giulio Gertosio, per avermi seguito durante l'intero progetto, per la sua continua e costante disponibilità e per tutti i suoi validi consigli in merito alla mia futura carriera.

Ringrazio i miei genitori per il sostegno datomi in questi anni, per averci creduto insieme a me nonostante le difficoltà. In fondo, questo traguardo è anche loro, e per loro.

Grazie a mia sorella, per essermi stata accanto sempre e per essere rimasta sveglia le notti che precedevano un mio esame come fosse stato il suo.

Ringrazio Ugo, la mia metà, per avermi incoraggiata nei momenti bui e per aver condiviso insieme i traguardi raggiunti. Il destino lo ha portato lontano, per cui anche se non sarà presente fisicamente in questo giorno, so che lo sarà con il cuore.

Un grazie alle amiche di sempre, Nicoletta, Giorgia, Elisa e Graziana, per esserci in ogni momento e condividere con me questo traguardo nonostante la distanza.

Infine, ringrazio tutte le persone conosciute in questi anni, senza di loro non sarebbe stato lo stesso.