

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale



Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica

Valutazione sperimentale dell'effetto della frenata pre-crash sulla protezione dell'occupante

Relatore

Prof. Cristina Bignardi

Tutor aziendale

Dott. Danilo Barberis

Dott. Alessio Melloncelli

Candidata

Anna Michiardi

Anno accademico: 2018/2019

Sommario

Il campo della sicurezza automobilistica è sempre in continua evoluzione e tecnologie innovative vengono costantemente introdotte sul mercato. La domanda degli acquirenti per auto più sicure, in gran parte favorita dall'attività svolta dagli enti che si occupano di rating, porta infatti i costruttori a realizzare sistemi di sicurezza all'avanguardia.

I dispositivi di sicurezza delle automobili vengono generalmente suddivisi in due categorie: la sicurezza passiva comprende l'insieme di dispositivi che intervengono per proteggere gli occupanti quando si verifica un urto mentre la sicurezza attiva include le tecnologie che agiscono in modo preventivo per evitare che l'urto si verifichi.

Oggi la sicurezza attiva sta assumendo sempre più importanza e tecnologie anticollisione come i sistemi di frenata autonoma di emergenza sono ormai ampiamente diffusi: se da un lato questi sistemi contribuiscono a ridurre notevolmente la velocità di impatto, dall'altro la frenata attuata subito prima dell'urto porta però gli occupanti ad avanzare a causa della decelerazione subita, scostandosi così dalla posizione nominale sulla base della quale sono stati progettati i sistemi di ritenuta. Affinché l'airbag svolga al meglio la sua funzione e sia in grado di attutire l'urto nel miglior modo possibile, è invece importante che nell'istante immediatamente precedente l'impatto l'occupante si trovi in posizione ottimale e che la distanza tra testa ed air-bag sia la massima possibile. Per questo motivo alcuni produttori hanno sviluppato dei sistemi pre-crash che integrano i vantaggi offerti dalla sicurezza attiva e dalla sicurezza passiva, sfruttando dei pretensionatori elettrici reversibili che serrano le cinture di sicurezza subito prima dell'urto in modo tale da limitare l'avanzamento dell'occupante.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi, realizzato presso il centro sicurezza FCA, è quello di valutare l'effetto della frenata pre-crash sulla protezione dell'occupante. A tal fine sono state eseguite delle prove su pista effettuando frenate di diversa entità e registrando per mezzo di un potenziometro l'avanzamento dell'occupante a causa della decelerazione subita nel corso della frenata. Le prove sono state eseguite con un volontario corrispondente alle caratteristiche di un 50° percentile seduto sul sedile passeggero e successivamente ripetute con tre diversi manichini: HIII 50° percentile, HIII 5° percentile e THOR 50° percentile. Dall'analisi dei risultati ottenuti è stato possibile quantificare l'avanzamento dell'occupante e valutare quanto i valori registrati con i diversi manichini possano essere confrontati con quelli del passeggero reale.

Indice

1 Introduzione	1
1.2 Sicurezza attiva e passiva	2
1.3 Anthropomorphic Test Devices (ATD)	2
1.3.1 Manichini per urto frontale	3
1.3.2 Manichini per urto laterale	5
1.3.3 Manichini per urti posteriori	6
1.3.4 Manichini bambini	7
2 Norme di omologazione	8
2.2 ECE 94	8
2.3 ECE 137	12
2.4 ECE 95	14
2.5 ECE 135	16
3 Rating sulla sicurezza	18
3.2 EuroNCAP.....	19
3.2.1 Protezione degli occupanti adulti	21
3.2.2 Sicurezza dei bambini	25
3.2.3 Protezione degli utenti vulnerabili della strada	25
3.2.4 Safety assist.....	27
3.2.5 Roadmap EuroNCAP 2025	30
3.2.6 EuroNCAP advanced reward	31
4 Sistemi pre-crash	34
4.2 Volkswagen Proactive Occupant Protection	34
4.3 Audi Pre-Sense	35
4.4 Toyota Pre-Crash Safety System.....	36
4.5 Nissan Pre-Crash Seat Belt.....	39
4.6 Mercedes-Benz Pre-Safe	39
4.7 Honda Collision Mitigation Braking System	42
5 Effetto della frenata pre-crash sulla protezione degli occupanti	43
5.2 Simulazioni numeriche	44
5.3 Valutazione sperimentale dell'avanzamento nel corso della frenata	47
5.3.1 Prove di frenata con volontario corrispondente al 50° percentile.....	50
5.3.2 Prove di frenata con Hybrid III 50° percentile	52
5.3.3 Prove di frenata con Hybrid III 5° percentile	57
5.3.4 Prove di frenata con manichino THOR 50° percentile.....	62
6 Conclusioni e sviluppi futuri	67
6.2 Conclusioni.....	67
6.3 Sviluppi futuri.....	68
Bibliografia	70

Indice delle figure

Figura 1-1: Hybrid III 50° percentile [3]	3
Figura 1-2: strumentazione del manichino Hybrid III 50° percentile [3].....	4
Figura 1-3: THOR 50° percentile [3].....	4
Figura 1-4: EuroSID-2 [4]	5
Figura 1-5: WorldSID [4]	6
Figura 1-6: BioRID II [5].....	6
Figura 1-7: manichini della famiglia Q [6]	7
Figura 2-1: valori limite nel Neck Injury Criterion [7]	10
Figura 2-2: valori limite nel Neck Injury Criterion [7]	10
Figura 2-3: criterio di forza sul femore [7]	11
Figura 2-4: rappresentazione dell'angolo di impatto, ECE 135 [10].....	16
Figura 3-1: distribuzione dei programmi NCAP nel mondo [12]	19
Figura 3-2: test frontale disassato [15].....	21
Figura 3-3: test frontale su tutta la lunghezza [15]	22
Figura 3-4: test di impatto laterale [15]	22
Figura 3-5: test del palo [15].....	23
Figura 3-6: test del colpo di frusta [15].....	23
Figura 3-7: test AEB urbano [15]	24
Figura 3-8: test AEB per pedoni [17]	26
Figura 3-9: test AEB per ciclisti [17].....	26
Figura 3-10: global vehicle target [19]	28
Figura 3-11: scale colore per l'assegnazione del punteggio CCRm [19].....	29
Figura 3-12: scale colore per l'assegnazione del punteggio CCRs [19]	29
Figura 4-1: integrazione tra sicurezza attiva e passiva.....	34
Figura 4-2: funzionamento del sistema Audi Pre-Sense Front [24].....	35
Figura 4-3: funzionamento delle sospensioni attive [25].....	36
Figura 4-4: range d'azione dei sensori radar [26]	36
Figura 4-5: risposta del Pre-Crash Safety System ad una probabile collisione [26]	37
Figura 4-6: funzionamento dell'intelligent headrest [27]	38
Figura 4-7: valutazione comparativa del NIC con e senza poggiatesta Pre-Crash [27].....	38
Figura 4-8: funzionamento del sistema Pre-Crash [28]	39
Figura 4-9: Pre-Safe Impulse Side [31]	40
Figura 4-10: efficacia di Pre-Safe Impulse Side nel test palo [32]	41
Figura 4-11: efficacia di Pre-Safe Impulse Side nel test barriera [32].....	41
Figura 4-12: efficacia di Pre-Safe Impulse Side nel test barriera [32].....	42
Figura 5-1: effetto di AEB e MSB sulla posizione dell'occupante	43
Figura 5-2: Madymo Human model [35].....	44
Figura 5-3: simulazioni numeriche della fase pre-crash	45
Figura 5-4: valori di HIC per l'urto con e senza AEB/MSB.....	46
Figura 5-5: decelerazione della vettura nelle quattro prove di frenata	48
Figura 5-6: potenziometro fissato al caschetto.....	49
Figura 5-7: manichino posizionato sul sedile passeggero	49
Figura 5-8: passeggero in posizione avanzata.....	50
Figura 5-9: massimo avanzamento del volontario umano nelle quattro prove	50
Figura 5-10: forze esercitate dalla cintura nelle prove con il volontario umano	51
Figura 5-11: massimo avanzamento dell'HIII 50° percentile nelle quattro prove	52
Figura 5-12: sistema di riferimento.....	52

Figura 5-13: curve di accelerazione testa – Hybrid III 50° percentile	53
Figura 5-14: curve di accelerazione torace – Hybrid III 50° percentile.....	53
Figura 5-15: curve di accelerazione bacino – Hybrid III 50° percentile	54
Figura 5-16: Forze collo in x e z – Hybrid III 50° percentile.....	55
Figura 5-17: momento collo in y – Hybrid III 50° percentile	55
Figura 5-18: forze esercitate dalla cintura – Hybrid III 50° percentile	56
Figura 5-19: HIII 5° posizionato sul sedile passeggero	57
Figura 5-20: massimo avanzamento dell’HIII 5° percentile nelle quattro prove	58
Figura 5-21: posizione della testa dell’HIII 5° prima e dopo la frenata	58
Figura 5-22: curve di accelerazione testa – Hybrid III 5° percentile	59
Figura 5-23: curve di accelerazione torace – Hybrid III 5° percentile.....	59
Figura 5-24: curve di accelerazione bacino – Hybrid III 5° percentile	60
Figura 5-25: forze collo in x e in z – Hybrid III 5° percentile	60
Figura 5-26: momento collo in y– Hybrid III 5° percentile	61
Figura 5-27: forze esercitate dalla cintura – Hybrid III 5° percentile	61
Figura 5-28: THOR posizionato sul sedile passeggero	62
Figura 5-29: massimo avanzamento del THOR nelle quattro prove.....	62
Figura 5-30: posizione della testa del THOR prima e dopo la frenata	63
Figura 5-31: curve di accelerazione testa - THOR.....	63
Figura 5-32: curve di accelerazione torace - THOR	64
Figura 5-33: curve di accelerazione bacino - THOR	64
Figura 5-34: velocità angolari testa - THOR	65
Figura 5-35: velocità angolari torace - THOR	65
Figura 5-36: velocità angolari bacino - THOR	66
Figura 5-37: forze esercitate dalla cintura - THOR	66

Indice delle tabelle

Tabella 3-1: programmi NCAP nel mondo	18
Tabella 3-2: fattori di peso per le quattro aree di valutazione.....	20
Tabella 3-3: criteri di bilanciamento	20
Tabella 3-4: pulse di diversa severità per la prova del colpo di frusta	24
Tabella 5-1: entità delle frenate nelle quattro prove	47

1 Introduzione

Il tema della sicurezza automobilistica sta assumendo sempre più importanza negli ultimi anni, al fine di ridurre il più possibile il numero di incidenti stradali o almeno il numero di morti e lesioni gravi. Se da un lato è in continuo aumento la quantità di vetture circolanti sulle strade, dall'altro è quindi indispensabile costruire veicoli sempre più sicuri e dotati di tecnologie di sicurezza all'avanguardia.

Nonostante la maggiore diffusione di innovativi sistemi di sicurezza abbia permesso di migliorare notevolmente le prestazioni delle autovetture, il numero di decessi sulle strade è però ancora oggi troppo elevato: nel solo 2017 si sono registrati circa 25.000 morti per incidenti stradali nell'Unione Europea, di cui più di 3.000 in Italia. [1]

Per fare fronte a questo problema e sensibilizzare gli acquirenti verso il tema della sicurezza sono nate delle 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 che simulano la risposta biomeccanica dell'occupante. I rating vengono periodicamente aggiornati con parametri sempre più severi e questo induce i produttori a migliorare costantemente le proprie vetture, superando di gran lunga le prestazioni minime richieste dalle norme omologative.

L'Unione Europea attua inoltre misure per contribuire ad una maggiore sicurezza stradale elaborando periodicamente programmi che tutti gli stati membri si impegnano a rispettare. L'ambizioso obiettivo a lungo termine dell'UE è in particolare 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, l'assistente al mantenimento della corsia di marcia, l'avviso di superamento del limite di velocità, l'avviso di collisione con pedoni e ciclisti [2].

1.2 Sicurezza attiva e passiva

I dispositivi di sicurezza delle automobili vengono generalmente suddivisi in due categorie: sicurezza attiva e sicurezza passiva.

La sicurezza passiva comprende tutti quei sistemi atti a proteggere gli occupanti della vettura nel caso in cui si verifichi un incidente, limitando il più possibile la gravità delle lesioni. Si attivano in seguito all'urto e sono generalmente progettati in modo tale da assorbire la maggior parte dell'energia cinetica, riducendone così il trasferimento all'occupante. Rientrano in questa categoria gli airbag, le cinture di sicurezza, la struttura rinforzata della scocca, i poggiatesta e la colonna dello sterzo collassabile.

La sicurezza attiva comprende invece tutte quelle tecnologie preventive che intervengono per impedire che si verifichi un incidente. Rientrano in questa categoria dispositivi molto diffusi come ABS (Anti-lock Braking System) e ESC (Electronic Stability Control) ma anche i più moderni Sistemi Avanzati di Assistenza alla Guida (ADAS). Questi ultimi sfruttano principalmente sensori radar, sensori ottici e telecamere per monitorare la zona attorno alla vettura e intervengono in modo autonomo o mediante avvisi al conducente per evitare collisioni e garantire una guida più sicura.

Esempi di ADAS ampiamente diffusi sulle vetture di nuova costruzione sono il cruise control adattivo, il sistema di monitoraggio dell'angolo cieco, la frenata autonoma di emergenza, i sistemi di miglioramento della visuale notturna, il monitoraggio dell'attenzione del guidatore, gli assistenti al cambio e al mantenimento della corsia di marcia.

1.3 Anthropomorphic Test Devices (ATD)

Per studiare i parametri biomeccanici degli urti e valutare il rischio di lesioni si utilizzano gli ATD (Anthropomorphic Test Devices), ovvero dei manichini a grandezza naturale che riproducono nel modo più fedele possibile il corpo umano. Sono strumentati con numerosi accelerometri, potenziometri e celle di carico grazie ai quali vengono misurate e registrate le accelerazioni, le forze e i momenti a cui il manichino è sottoposto durante le prove d'urto.

La strumentazione e le caratteristiche dei manichini variano in base al tipo di impatto che si vuole simulare e ne esistono di molteplici dimensioni, in grado riprodurre varie fasce di età e diverse corporature.

Per i manichini adulti le dimensioni vengono espresse in percentili:

- 5° percentile (50 kg e 152 cm): simula una donna di bassa statura; il 5% della popolazione occidentale sta al di sotto di questa taglia.
- 50° percentile (77 kg e 175 cm): simula un uomo di dimensioni medie; il 50% della popolazione occidentale sta al di sotto di questa taglia.
- 95° percentile (100 kg e 188 cm): simula un uomo di grande corporatura; il 95% della popolazione occidentale sta al di sotto di questa taglia.

1.2.1 Manichini per urto frontale

I manichini per urto frontale sono nati principalmente con l'intento di testare l'efficacia dei sistemi di ritenuta nel prevenire lesioni alla testa, al torace e alle gambe [3]; il manichino più utilizzato per questo tipo di urto è l'Hybrid III, introdotto a partire dal 1976 come sostituto del precedente modello Hybrid II.



Figura 1-1: Hybrid III 50° percentile [3]

Il cranio è costituito da un blocco di alluminio con un rivestimento rimovibile in vinile; il collo è invece una struttura segmentata di gomma e alluminio, in grado di riprodurre i movimenti umani di flessione-estensione.

La struttura della gabbia toracica è realizzata con 6 costole di acciaio e materiale polimerico smorzante che simula le caratteristiche di forza-deformazione del torace. All'interno del tronco si trova poi una spina dorsale cilindrica in gomma che riproduce la postura di una persona seduta e si unisce alla struttura del bacino.

Tutte le parti del manichino possono essere strumentate con accelerometri e celle di carico in grado di misurare i momenti, le forze e le accelerazioni agenti sulle varie strutture anatomiche.

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)

Figura 1-2: strumentazione del manichino Hybrid III 50° percentile [3]

A partire dal 2020 l'Hybrid III verrà sostituito nelle prove di urto frontale EuroNCAP dal manichino di ultimissima generazione THOR (Test device for Human Occupant Restraint).



Figura 1-3: THOR 50° percentile [3]

La realizzazione di questo nuovo ATD è stata fortemente voluta dal NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) con l'obiettivo di realizzare un manichino in grado di migliorare la biofedeltà, incorporando una strumentazione specifica che garantisca prestazioni superiori.

Rispetto all' Hybrid III il THOR contiene infatti una strumentazione più ampia ed efficiente e presenta notevoli miglioramenti per quanto riguarda la cinematica di varie zone e movimenti del corpo:

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

1.2.2 Manichini per urto laterale

I test di urto laterale sono indispensabili per la realizzazione di vetture sicure anche in caso di impatto dal lato, spesso più severo rispetto ad un urto frontale in quanto la distanza tra l'occupante e l'ostacolo impattante è minore. Lo sviluppo di specifici manichini per questo tipo di urto è di fondamentale importanza e ha contribuito alla realizzazione di strutture delle porte più resistenti e di airbag laterali che proteggano testa, collo e torace [4].

Le norme di omologazione UNECE per l'urto laterale prevedono l'utilizzo del manichino EuroSID-2, sviluppato da un consorzio di ricercatori e costruttori di auto europei nei primi anni 2000 per sostituire il precedente modello EuroSID-1. Negli Stati Uniti si utilizza una versione modificata chiamata EUROSID-2 with Rib Extensions



Figura 1-4: EuroSID-2 [4]

Le prove EuroNCAP di urto laterale contro barriera deformabile e di urto palo prevedono invece l'utilizzo del WorldSID, le cui caratteristiche antropometriche sono state progettate sulla base di una serie di dati che rispecchiano le dimensioni medie della popolazione mondiale. La realizzazione di questo ATD è nata dalla volontà dell'International Organization for Standardization (ISO) di avere a disposizione un manichino universale che rendesse più omogenee le valutazioni dei crash test ed è stata supportata da produttori automobilistici ed istituzioni organizzative di tutto il mondo.



Figura 1-5: WorldSID [4]

1.2.3 Manichini per urti posteriori

Lo standard per gli urti posteriori è il manichino BIORID II, utilizzato per valutare le lesioni sulla colonna vertebrale causate dai tamponamenti a bassa velocità.

La caratteristica principale di questo manichino è la fedele ricostruzione della colonna vertebrale costituita da un totale di 24 vertebre, di cui 5 lombari, 12 toraciche e 7 cervicali. Le vertebre sono intervallate da elementi in gomma che permettono di riprodurre la flessione del collo quando avviene un tamponamento; un sistema di elastici che simula la muscolatura garantisce inoltre ottime prestazioni per quanto riguarda la biofedeltà. [5]



Figura 1-6: BioRID II [5]

1.2.4 Manichini bambini

Per garantire la sicurezza dei bambini e valutare le prestazioni offerte dai seggiolini, è importante avere a disposizione manichini che simulino peso e dimensioni per tutte le fasce di età.

I manichini bambini usati nei test EuroNCAP appartengono alla famiglia di manichini Q, che sono presenti in più dimensioni per coprire le varie età fino ai 10 anni: Q0, Q1, Q1.5, Q3, Q6, Q10. Nati come successori dei precedenti modelli della famiglia P, sono gli unici manichini progettati per essere utilizzati sia in urto frontale che in urto laterale. [6]



Figura 1-7: manichini della famiglia Q [6]

2 Norme di omologazione

Per potere essere immessa sul mercato una vettura deve superare le prove di omologazione previste dalle normative vigenti nel paese in cui viene venduta.

Per quanto riguarda 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. I paesi dell'Unione Europea hanno inoltre 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 descritte nella normativa, soddisfa tutti i criteri di prestazione richiesti.

Nel presente lavoro di tesi verranno analizzate le norme di omologazione riguardanti la sicurezza, in particolar modo quelle relative alla protezione degli occupanti in urto frontale (ECE 94 e ECE 137), urto laterale (ECE 95) e urto palo (ECE 135).

2.2 ECE 94

La normativa ECE 94 [7] contiene le disposizioni relative all'omologazione dei veicoli di categoria M1¹ per quanto riguarda la protezione degli occupanti in caso di urto frontale.

- La prova viene eseguita alla velocità di 56 km/h contro una barriera deformabile con struttura di alluminio a nido d'ape fissata ad una massa non inferiore a 7×10^4 kg ancorata al suolo e allineata perpendicolarmente alla traiettoria del veicolo di prova. L'allineamento deve essere tale per cui il 40% della larghezza del veicolo si sovrapponga alla parte anteriore della barriera e che il primo contatto avvenga sul lato della colonna dello sterzo.
- Su entrambi i sedili anteriori viene posizionato un manichino corrispondente alle specifiche dell'Hybrid III 50° percentile maschio con caviglia a 45°.

¹ categoria M1: veicoli adibiti al trasporto di persone con al massimo 8 posti a sedere oltre a quello del conducente

- Il volante deve essere 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.
- I sedili devono essere sistemati in modo tale per cui il loro punto H² si trovi nella posizione centrale di marcia, con gli schienali regolabili 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 e riporta i seguenti criteri di prestazione in ambito biomeccanico che devono essere necessariamente rispettati per ottenere l'omologazione:

▪ Criterio di prestazione testa

- Se durante l'urto la testa del manichino non viene a contatto con nessuna parte della vettura, il test risulta superato.
- Se avviene il contatto tra la testa e la vettura, il valore dell'HPC (Head Performance Criterion), deve essere minore o uguale a 1000 e l'accelerazione testa risultante non deve superare gli 80g per più di 3ms.

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

a è l'accelerazione risultante della testa espressa in g e calcolata a partire dalle componenti triassiali dell'accelerazione, misurate con una CFC di 1000.

t_1 e t_2 , espressi in secondi, rappresentano rispettivamente l'istante di tempo in cui inizia il contatto testa e quello in cui termina la registrazione e si raggiunge il valore massimo di HPC.

² Punto H: punto teorico che rappresenta la posizione dell'anca dell'occupante, ovvero il centro di rotazione torace-bacino

▪ Criterio di prestazione collo

- Il momento flettente del collo, misurato attorno ad un asse laterale all'interfaccia testa/collo con una CFC di 600, non deve superare i 57 Nm.
- Il valore del NIC (Neck Injury Criterion) non deve superare i limiti rappresentati dai seguenti grafici:

Neck tension criterion

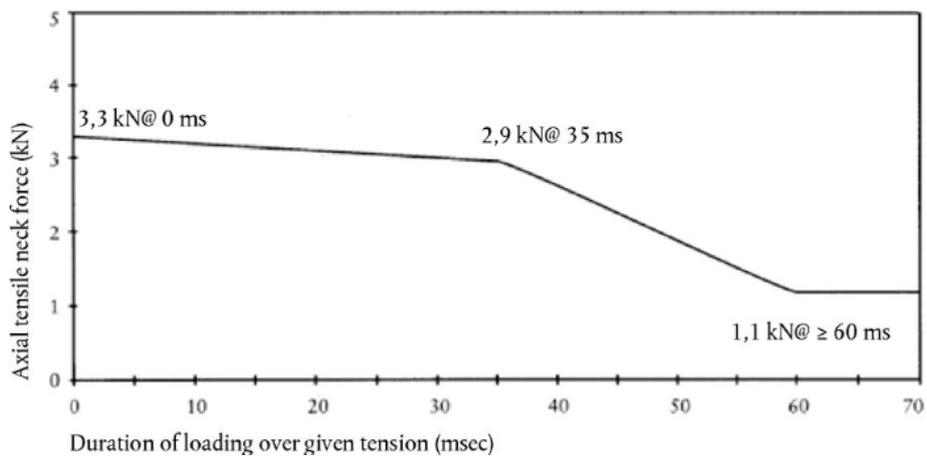


Figura 2-1: valori limite nel Neck Injury Criterion [7]

Neck shear criterion

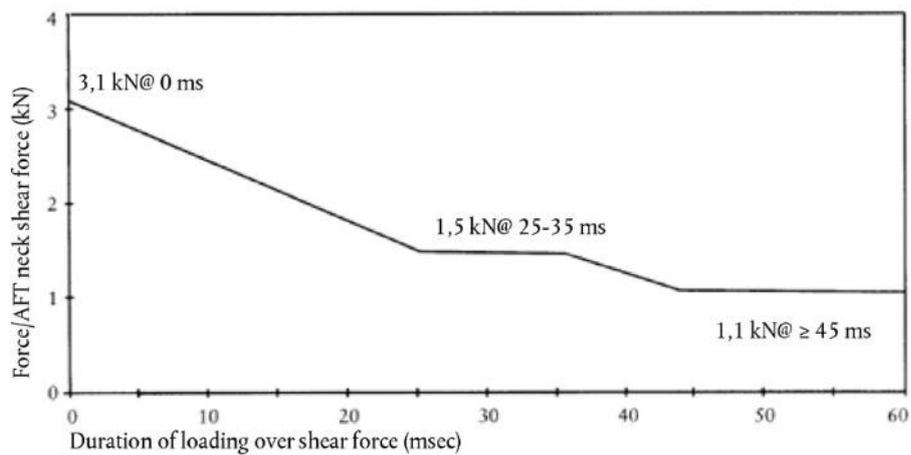


Figura 2-2: valori limite nel Neck Injury Criterion [7]

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

Il momento flettente del collo, misurato attorno ad un asse laterale all'interfaccia testa/collo con una CFC di 600, non deve superare i 57 Nm.

▪ Criterio di prestazione torace:

- Il criterio di schiacciamento del torace, calcolato come il valore assoluto della sua deformazione misurata con una CFC di 180, non deve superare i 42 mm.
- Il criterio di viscosità ($V \cdot C$) non deve essere superiore a 1 m/s e si calcola con la seguente formula:

$$VC = \max [1.3 \cdot (V(t) \cdot C(t))]$$

$C(t)$ e $V(t)$ rappresentano rispettivamente la compressione dello sterno e la sua velocità di deformazione all'istante di tempo t , entrambi calcolati a partire dalla deformazione del torace $D(t)$ espressa in metri e misurata con una CFC di 180.

$$C(t) = \frac{D(t)}{0.229}$$

$$V(t) = \frac{8(D(t+1) - D(t-1)) - (D(t+2) - D(t-2))}{12\Delta t}$$

Δt è l'intervallo di tempo che intercorre tra una misurazione della deformazione e quella successiva e vale al massimo 1.25×10^{-4} secondi.

- Criterio di forza sul femore: è determinato dalla forza di compressione assiale sul femore del manichino misurata con una CFC di 600 e non deve superare le caratteristiche forza/tempo riportate nel seguente grafico:

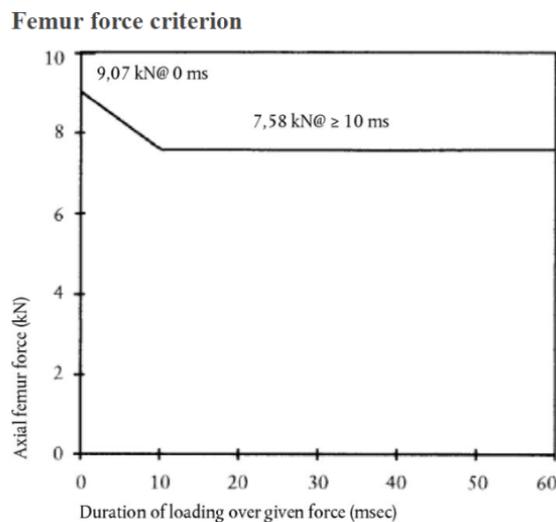


Figura 2-3: criterio di forza sul femore [7]

▪ Criteri di prestazione tibia:

- La forza di compressione trasmessa assialmente sulla tibia del manichino non deve superare 8 kN.
- L'indice della tibia (TI) viene calcolato sia al vertice che alla base della tibia e in nessuno dei due casi deve superare il valore di 1.3

$$TI = \left| \frac{M_R}{(M_c)_R} \right| + \left| \frac{F_z}{(F_c)_z} \right|$$

$$M_R = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2}$$

M_x = momento flettente attorno all'asse x

M_y = momento flettente attorno all'asse y

$(M_c)_R$ = momento flettente critico, considerato tale a 225 Nm

F_z = forza di compressione assiale nella direzione Z

$(F_c)_z$ = forza di compressione critica nella direzione z, considerata tale a 35,9 kN

Le forze di compressione assiale e i momenti flettenti vengono misurati con una CFC di 600.

2.3 ECE 137

A partire dal 2020 il regolamento ECE 137 entrerà a far parte delle norme omologative dell'Unione Europea, al fine di valutare al meglio l'effettiva efficacia dei sistemi di ritenuta in urto frontale.

La norma [8] contiene le disposizioni relative all'omologazione dei veicoli di categoria M1 con massa a pieno carico inferiore a 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 essere 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 deve invece 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.

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:

▪ Criterio di prestazione testa:

- Il valore dell'HPC non deve superare 1000 e l'accelerazione testa risultante non deve superare 80 g per più di 3 ms.

▪ Criteri di prestazione collo:

- 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 non deve eccedere i 57 Nm in estensione, per entrambi i manichini

- Criteri di prestazione torace:
 - Il criterio di schiacciamento del torace, calcolato come il valore assoluto della sua deformazione misurata con una CFC di 180, non deve superare 42mm per il 50° percentile uomo e 34mm per il 5° percentile donna
 - Il criterio viscoso ($V \cdot C$) non deve superare 1 m/s^2 per entrambi i manichini
- Criterio di prestazione femore:
 - Il criterio di forza sul femore, corrispondente alla forza di compressione trasmessa assialmente su ciascun femore espressa in kN e misurata con una CFC di 600, non deve essere maggiore di 9.07 kN per il 50° percentile uomo e 7 kN per il 5° percentile donna

2.4 ECE 95

La normativa ECE 95 [9] contiene le disposizioni relative all'omologazione dei veicoli di categoria M1 e N1³ per quanto riguarda la protezione degli occupanti in caso di urto laterale.

- 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.
- La barriera deformabile ha una massa totale di 950 kg e si compone di 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.
- Un manichino corrispondente alle specifiche dell'EuroSID-2 cinquantesimo percentile maschio viene posizionato sul sedile anteriore lato urto.

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:

³ Categoria N1: veicoli destinati al trasporto merci, con massa non superiore a 3.5 tonnellate

▪ Criterio di prestazione testa:

- Nel caso in cui ci sia contatto tra la testa del manichino e la vettura, il valore dell'HPC (Head Performance Criterion), calcolato nell'intervallo di tempo che intercorre tra gli istanti iniziale e finale del contatto, non deve essere maggiore di 1000.

▪ Criterio di prestazione torace:

- Il criterio di deformazione, calcolato come il valore massimo di deformazione misurato su una qualsiasi costola e filtrato con una CFC di 180 Hz, deve essere inferiore o uguale a 42 mm
- Il Criterio viscoso ($V \cdot C$) deve essere inferiore o uguale a 1m/s

$$VC = \max [V(t) \cdot C(t)]$$

$C(t)$ e $V(t)$ rappresentano rispettivamente la compressione dello sterno e la sua velocità di deformazione all'istante di tempo t , entrambi calcolati a partire dalla deformazione del torace $D(t)$ espressa in metri e misurata con una CFC di 180.

$$C(t) = \frac{dD}{0.14}$$

$$V(t) = \frac{8(D(t+1) - D(t-1) - (D(t+2) - D(t-2)))}{12\Delta t}$$

Δt è l'intervallo di tempo che intercorre tra una misurazione della deformazione e quella successiva e vale al massimo 1.25×10^{-4} secondi.

▪ Criterio di prestazione bacino:

- La forza massima sulla sinfisi pubica, misurata con una CFC di 600, deve essere minore o uguale a 6 kN

▪ Criterio di prestazione addome:

- La massima forza interna sull'addome, calcolata come il valore massimo della somma delle tre forze misurate dai trasduttori con una CFC di 600 Hz, deve essere minore o uguale a 2.5 kN

2.5 ECE 135

La normativa ECE 135 [10] contiene le disposizioni relative all'omologazione dei veicoli per quanto riguarda l'urto laterale palo. Si applica ai veicoli di categoria M1 con massa fino a 3500 kg e ai 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 R⁴ del sedile del guidatore è minore di 22° oppure in cui 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 e l'urto avviene sul lato guidatore contro un palo di diametro 254 mm. La direzione in cui si muove la vettura deve formare un angolo di 75° rispetto all'asse longitudinale del veicolo

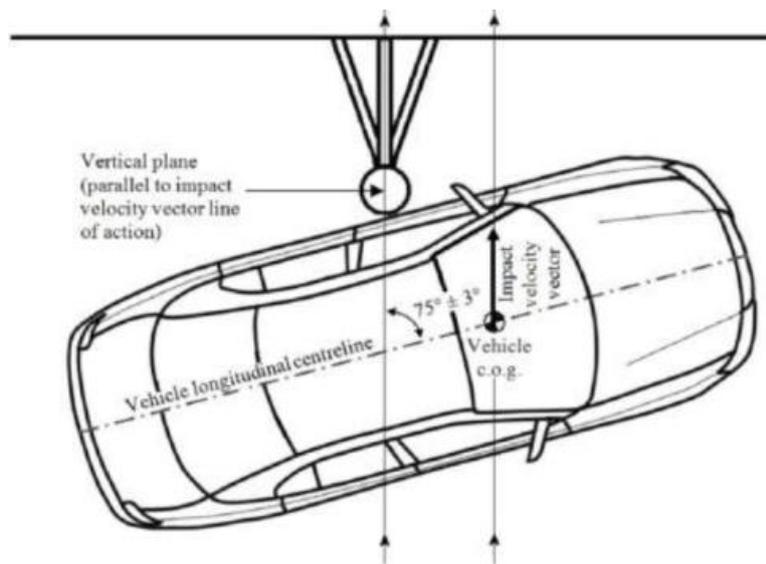


Figura 2-4: rappresentazione dell'angolo di impatto, ECE 135 [10]

- Sul sedile guidatore si posiziona un manichino corrispondente alle specifiche del WorldSID 50° percentile maschio

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

⁴ Il punto R è un punto di riferimento del sedile.

▪ Criterio di prestazione testa:

- Il valore dell'HPC non deve essere superiore a 1000

▪ Criterio di prestazione spalla:

- La massima forza laterale misurata dalla cella di carico montata tra l'articolazione della spalla e la costola della spalla, filtrata con un CFC di 600 Hz, non deve superare i 3 kN

▪ Criterio di prestazione torace:

- La massima deflessione delle costole toraciche, misurata dal sensore di flessione e filtrata con un CFC di 600 Hz, non deve essere maggiore di 55mm

▪ Criterio di prestazione addome:

- La massima deflessione delle costole addominali, misurata dal sensore di flessione e filtrata con un CFC di 600 Hz, non deve essere maggiore di 65mm
- L'accelerazione risultante nella zona bassa della spina dorsale non deve superare il valore di 75g per più di 3 ms e viene calcolato con la seguente formula:

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

a_x è l'accelerazione longitudinale della spina dorsale del manichino misurata rispetto al tempo e filtrata con un CFC di 180 Hz.

a_y è l'accelerazione laterale della spina dorsale del manichino misurata rispetto al tempo e filtrata con un CFC di 180 Hz.

a_z è l'accelerazione verticale della spina dorsale del manichino misurata rispetto al tempo e filtrata con un CFC di 180 Hz.

▪ Criterio di prestazione bacino:

- La massima forza misurata dalla cella di carico sulla sinfisi pubica e misurata con un CFC di 600 Hz non deve essere maggiore di 3.36 kN.

3 Rating sulla sicurezza

Oltre alle prove di omologazione che devono obbligatoriamente essere superate per potere introdurre una nuova vettura sul mercato, i veicoli vengono inoltre sottoposti a test condotti da enti che si occupano di valutarne la sicurezza. Le prove effettuate da questi enti hanno contribuito in modo decisivo a concentrare l'attenzione degli acquirenti e dei produttori di veicoli verso il tema della sicurezza automobilistica, sottoponendo le vetture a prove sempre più severe. Questo induce infatti i costruttori a migliorare le prestazioni delle proprie vetture in modo tale da ottenere il massimo del punteggio ed essere più competitivi sul mercato.

Il primo programma NCAP (New Car Assessment Program) è stato fondato nel 1978 negli Stati Uniti dalla National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) allo scopo di promuovere la costruzione di auto sempre più sicure fornendo agli acquirenti una valutazione sulla protezione degli occupanti offerta dai diversi modelli presenti in commercio. Nel corso degli anni sono poi stati fondati altri programmi NCAP in diverse aree geografiche e oggi sono presenti nel mondo 9 organizzazioni che si occupano di rating sulla sicurezza. [11]

	Anno di fondazione	Area geografica
ANCAP	1993	Australia e Nuova Zelanda
ASEAN NCAP	2011	Sud-Est Asiatico
C-ENCAP	2006	Cina
EuroNCAP	1997	Europa
IIHS	1959 (programma di rating dal 1992)	Nord America
JNCAP	1995	Giappone
KNCAP	1999	Corea
LATIN NCAP	2010	America Latina e Caraibi

Tabella 3-1: programmi NCAP nel mondo

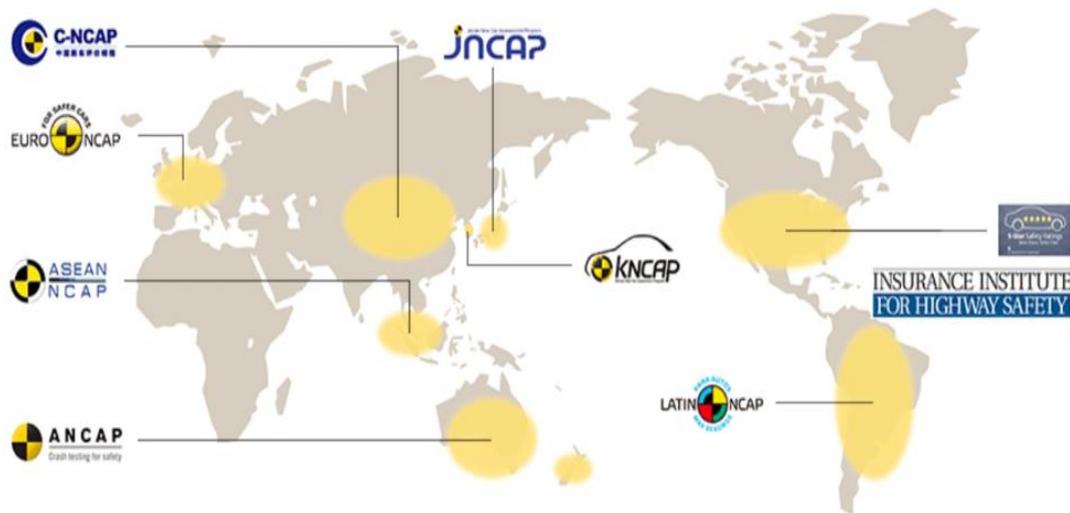


Figura 3-1: distribuzione dei programmi NCAP nel mondo [12]

3.2 EuroNCAP

EuroNCAP è l'ente che valuta le vetture destinate al mercato europeo ed è uno di quelli che più di tutti sta marcando l'importanza dei sistemi di sicurezza attiva, attribuendole un peso importante nelle valutazioni.

Il rating fornito da EuroNCAP è espresso con un punteggio che va da 0 a 5 stelle e si basa sui risultati ottenuti in quattro aree di valutazione: [13]

- Protezione dell'occupante adulto
- Protezione dei bambini
- Protezione degli utenti vulnerabili della strada
- Safety assist

La valutazione complessiva tiene in considerazione il punteggio ottenuto per ognuna di queste sezioni, che viene normalizzato sulla base del massimo punteggio ottenibile. Per attribuire le stelle della valutazione complessiva si fa poi una media pesata dei punteggi delle quattro aree, ognuna delle quali ha un peso diverso in base all'importanza che le viene attribuita.

Anno	2016/2017	2018/2019	2020
Protezione adulti	40 %	40 %	40 %
Protezione bambini	20 %	20 %	20 %
Protezione pedoni	20 %	20 %	20 %
Safety assist	20 %	20 %	20 %

Tabella 3-2: fattori di peso per le quattro aree di valutazione

Esistono poi dei criteri di bilanciamento che devono essere rispettati per l'attribuzione della valutazione complessiva: se in una delle sezioni non viene raggiunta la minima percentuale di punteggio richiesta, il numero di stelle attribuite viene abbassato:

	Protezione adulti	Protezione bambini	Protezioni pedoni	Safety assist
5 stelle	80 %	80 %	60 %	70 %
4 stelle	70 %	70 %	50 %	60 %
3 stelle	60 %	60 %	40 %	50 %
2 stelle	50 %	50 %	30 %	40 %
1 stella	40 %	40 %	20 %	30 %

Tabella 3-3: criteri di bilanciamento

A partire dal 2016 EuroNCAP ha inoltre introdotto la possibilità di ottenere una doppia valutazione in stelle, in base all'equipaggiamento di sicurezza presente sulla vettura testata. Una prima valutazione viene sempre assegnata alla vettura dotata dell'equipaggiamento di sicurezza montato di serie su tutte le versioni vendute nel mercato europeo ma in alcuni casi può essere attribuita anche una seconda valutazione, in base a test condotti su un veicolo equipaggiato con i pacchetti opzionali safety pack che includono sistemi di sicurezza attiva. Grazie a questa doppia valutazione è più facile comprendere il vantaggio di un equipaggiamento di sicurezza avanzato e quanto i sistemi anticollisione possano contribuire a migliorare la sicurezza stradale [14].

Di seguito verranno brevemente descritte le prove condotte da EuroNCAP per assegnare le valutazioni delle quattro aree.

3.2.1 Protezione degli occupanti adulti

Il punteggio per questa sezione viene assegnato sulla base dei risultati ottenuti in 6 diversi test: test frontale disassato, test frontale su tutta la lunghezza, impatto laterale, test del palo, colpo di frusta, AEB urbano [15].

Test frontale disassato: simula l'urto tra due vetture all'incirca dello stesso peso che viaggiano a 50 km/h



Figura 3-2: test frontale disassato [15]

- La vettura di prova impatta contro una barriera deformabile alla velocità di 64 km/h
- L'allineamento è tale per cui il 40% della larghezza della vettura è sovrapposto alla barriera
- Due manichini Hybrid III 50° percentile maschio sono posizionati sui sedili anteriori e due manichini bambino Q6 e Q10 sui sedili posteriori.

Test frontale su tutta la lunghezza: questo test è ideato per valutare l'efficacia dei sistemi di ritenuta anteriori e posteriori

- La vettura di prova impatta contro una barriera rigida alla velocità di 50 km/h
- Due manichini Hybrid III 5° percentile donna sono posizionati sul sedile del guidatore e sul sedile posteriore



Figura 3-3: test frontale su tutta la lunghezza [15]

Impatto laterale: questo test è stato ideato per valutare se le parti più vulnerabili come testa e collo sono adeguatamente protette anche in caso di urto laterale che, a causa del poco spazio disponibile per assorbire l'energia cinetica, è solitamente molto più critico rispetto ad un urto frontale.



Figura 3-4: test di impatto laterale [15]

- Una barriera mobile deformabile viene spinta con una velocità di 50 km/h contro la fiancata della vettura
- Un manichino Hybrid III 50° percentile maschio è posizionato sul sedile del guidatore e due manichini bambini Q6 e Q10 sono posizionati sui sedili posteriori.

Test del palo: riproduce l'urto laterale di una vettura contro un palo rigido di diametro 254 mm ed è ideato per valutare la protezione per la testa offerta dalla vettura

- Il veicolo è posizionato ad un angolo di 15° rispetto alla perpendicolare della direzione di movimento e l'urto avviene a 32 km/h
- Un manichino worldSID 50° percentile maschio è posizionato sul sedile del guidatore



Figura 3-5: test del palo [15]

Colpo di frusta: il test del colpo di frusta prevede delle prove dinamiche su slitta per valutare l'efficacia della protezione offerta dal sedile e dal poggiatesta.

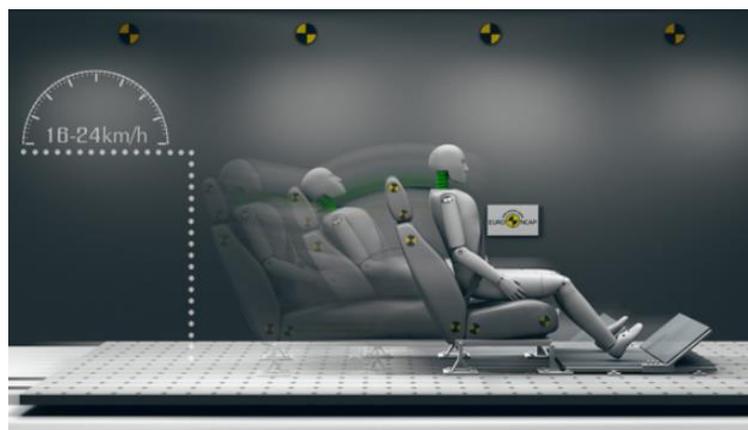


Figura 3-6: test del colpo di frusta [15]

- La prova prevede di utilizzare un manichino BIORID e di eseguire prove su slitta impostando tre pulse⁵ di diversa severità:

	ΔV	Accelerazione media
Bassa severità	16.1 km/h	42.35 m/s ²
Media severità	15.65 km/h	47.85 m/s ²
Alta severità	24.45 km/h	63.15 m/s ²

Tabella 3-4: pulse di diversa severità per la prova del colpo di frusta

AEB urbano: si tratta di un test ideato per valutare le prestazioni dei sistemi di frenata autonoma di emergenza (AEB).

Per testare la vettura di prova si usa un veicolo target che rappresenta la replica 3D di un veicolo generico e si eseguono 3 prove in 3 diversi scenari, a velocità comprese tra 10 km/h e 50 km/h:

- Vettura testata e veicolo target allineati
- Vettura testata sfalsata a sinistra del veicolo target
- Vettura testata sfalsata a destra del veicolo target

Se il sistema riesce ad evitare la collisione si attribuisce il punteggio massimo ma vengono attribuiti alcuni punti anche solo se viene diminuita la velocità di impatto.



Figura 3-7: test AEB urbano [15]

⁵ Pulse: curva accelerazione-tempo

3.2.2 Sicurezza dei bambini

La valutazione sulla sicurezza dei bambini viene attribuita sulla base di 3 diverse aree [16]:

- Prestazioni del seggiolino: si usano manichini Q6 e Q10 posizionati sui sistemi di ritenuta e si esegue un test per valutare la protezione offerta in caso di impatto frontale o laterale. Se i valori registrati di movimento testa, carico sul collo e accelerazione torace sono sufficientemente bassi, se il manichino non viene espulso dal seggiolino e se non viene a contatto con le strutture interne della vettura, si attribuisce un punteggio positivo.
- Predisposizioni del veicolo: viene attribuito un punteggio se la vettura prevede degli attacchi ISOFIX, etichettature I-Size, istruzioni chiare per disabilitare l'airbag.
- Controllo installazione del seggiolino: per attribuire il punteggio di questa sezione vengono eseguite delle prove con una serie di seggiolini diffusi sul mercato per verificare se tutti quanti possano essere installati in modo semplice e sicuro nella vettura di prova. Vengono valutati in particolar modo 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.

3.2.3 Protezione degli utenti vulnerabili della strada

In questa sezione viene valutata la protezione offerta dal veicolo nel caso di collisione con gli utenti vulnerabili della strada valutandone le lesioni a testa, cosce e polpacci. Vengono inoltre assegnati dei punteggi aggiuntivi per le vetture dotate di sistemi di frenata automatica in grado di riconoscere pedoni e ciclisti, evitando l'impatto o mitigandone i danni [17].

Per valutare le lesioni dovute all'impatto con testa, cosce e polpacci si utilizzano dei dispositivi in grado di simulare le zone del corpo di interesse e si eseguono test a 40 km/h valutando la protezione offerta dai vari punti d'impatto sul frontale dell'auto. Questo test incoraggia in particolar modo l'utilizzo di strutture in grado di assorbire l'energia cinetica come ad esempio i cofani "pop-up" che in caso di impatto si sollevano leggermente in modo tale da attutire l'urto.

Il test AEB per i pedoni comprende una serie di prove condotte in diversi scenari, che riproducono situazioni di guida reali e potenzialmente pericolose:

- Pedone che attraversa improvvisamente la strada provenendo dal lato passeggero
- Pedone che attraversa improvvisamente la strada provenendo dal lato guidatore
- Bambino che esce da dietro un'auto in sosta, dal lato passeggero
- Scenario longitudinale con pedone allineato alla vettura
- Scenario longitudinale con il pedone che cammina lateralmente lungo la strada

Per simulare i pedoni si usano dei target con articolazioni mobili in grado di simulare la camminata umana e i test per alcuni di questi scenari vengono eseguiti sia di giorno che di notte, in modo tale da riprodurre il più possibile le condizioni di guida reali.

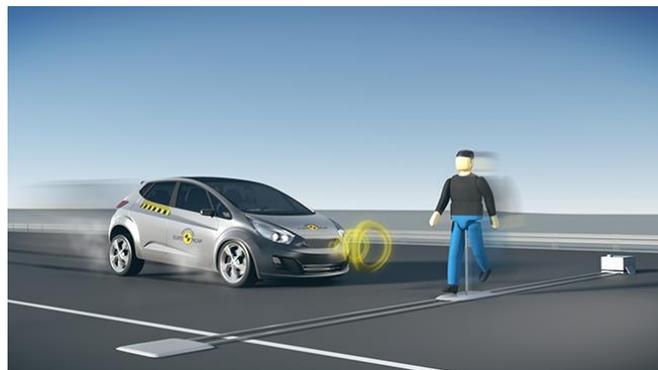


Figura 3-8: test AEB per pedoni [17]

Per il test AEB ciclisti la prova prevede invece due scenari:

- Ciclista che attraversa la strada
- Ciclista che si muove nella stessa direzione della vettura



Figura 3-9: test AEB per ciclisti [17]

Viene assegnato un punteggio maggiore ai sistemi in grado di frenare in tempo evitando la collisione ma alcuni punti vengono attribuiti anche nel caso in cui si riesca a ridurre la velocità dell'impatto riducendo così la gravità delle lesioni.

3.2.4 Safety assist

La sezione di valutazione safety assist comprende una serie di test per valutare i più diffusi sistemi di assistenza al conducente, le cui prestazioni vengono valutate in condizioni di guida normale e in scenari di impatto tipici [18]:

- ESC (Electronic Stability Control): il sistema di controllo elettronico della stabilità interviene autonomamente nel caso in cui il guidatore stia perdendo il controllo del veicolo, migliorandone la stabilità e riducendo la perdita di trazione. EuroNCAP ha introdotto questo test nel 2009 eseguendo delle prove a 80 km/h con sterzata improvvisa fino a 270° valutando lo spostamento laterale, la stabilità e la capacità del veicolo di seguire una traiettoria diritta. Dal 2014 l'ESC non rientra più nella valutazione safety assist in quanto la sua adozione è diventata obbligatoria su tutte le vetture di nuova costruzione.
- Avviso cinture di sicurezza: questo test serve per valutare l'efficacia dei sistemi che emettono un segnale ottico e acustico in caso di mancato allacciamento delle cinture di sicurezza. Durante il test la cintura viene allacciata e slacciata più volte in modo tale da verificare la durata e l'efficacia dei segnali emessi. Il punteggio assegnato per questo test è maggiore se anche i sedili posteriori sono dotati di un sistema in grado di rilevare la presenza dell'occupante ed emettere un segnale se la cintura non è allacciata.
- Limitatori di velocità: i sistemi di limitazione della velocità offrono un valido aiuto al conducente e lo assistono durante la guida fornendo continue informazioni riguardanti la velocità del veicolo e in alcuni casi impedendo di superare una velocità limite preimpostata o determinata in base al riconoscimento automatico dei cartelli stradali. EuroNCAP promuove l'adozione di tali sistemi e ne valuta l'efficacia testandone le seguenti funzioni:
 - Informazioni fornite al conducente sull'attuale limite di velocità
 - Avviso fornito al conducente se la velocità del veicolo è superiore al limite impostato
 - Capacità di impedire attivamente il superamento del limite di velocità impostato, o di mantenere la marcia entro tale limite
- Sistemi di mantenimento della corsia: queste tecnologie, introdotte nella sezione safety assist a partire dal 2014, intervengono per correggere la traiettoria del veicolo, inviando una segnalazione al conducente o agendo leggermente sullo sterzo. I test

vengono eseguiti con diversi tipi di demarcatore della corsia: linea tratteggiata, linea continua, bordo strada non contrassegnato da una linea. Per assegnare il punteggio si usa come metodo di valutazione la misura del DTLE (Distance To Line Edge), ovvero la distanza tra il bordo più esterno dello pneumatico e la linea di delimitazione della corsia nell'istante in cui il sistema interviene.

Punteggi aggiuntivi vengono inoltre assegnati alle vetture dotate anche di avviso di allontanamento dalla corsia di marcia e di monitoraggio dell'angolo cieco.

- AEB interurbano: questo test valuta i sistemi di frenata automatica in grado di agire tempestivamente nel caso in cui la vettura, proseguendo a velocità più elevate tipiche della guida su strada extraurbana, si trovi di fronte ad un ostacolo improvviso.

Le prove EuroNCAP valutano le funzioni di frenata automatica e di avviso anticollisione in 3 differenti scenari [19]:

- 1) Car-to-Car Rear Stationary (CCRs): avvicinamento ad un veicolo fermo. Il test viene eseguito per diverse velocità, comprese tra 30 km/h e 80 km/h.
- 2) Car-to-Car Rear Moving (CCRm): avvicinamento ad un veicolo che sta procedendo a 20 km/h. Il test viene eseguito per diverse velocità, comprese tra 30 km/h e 80 km/h.
- 3) Car-to-Car Rear Braking (CCRb): guida dietro ad un veicolo che procede a velocità costante di 50 km/h e frena improvvisamente (frenata dolce e frenata brusca: 2 m/s^2 e 6 m/s^2).

Per le prove CCRs e CCRm si testano diversi overlap tra le due vetture.

Per emulare la vettura che precede quella testata si utilizza un GVT (Global Vehicle Target) che è in grado di simulare un veicolo di categoria M1 e può essere riconosciuta da telecamere, sensori radar e sensori LIDAR usati dai sistemi di frenata automatica.



Figura 3-10: global vehicle target [19]

Si eseguono i test per diverse velocità di prova. EuroNCAP assegna un punteggio elevato alle vetture in grado di evitare l'impatto ma alcuni punti vengono assegnati anche solo se si riesce a ridurre la velocità, sulla base delle seguenti scale colore.

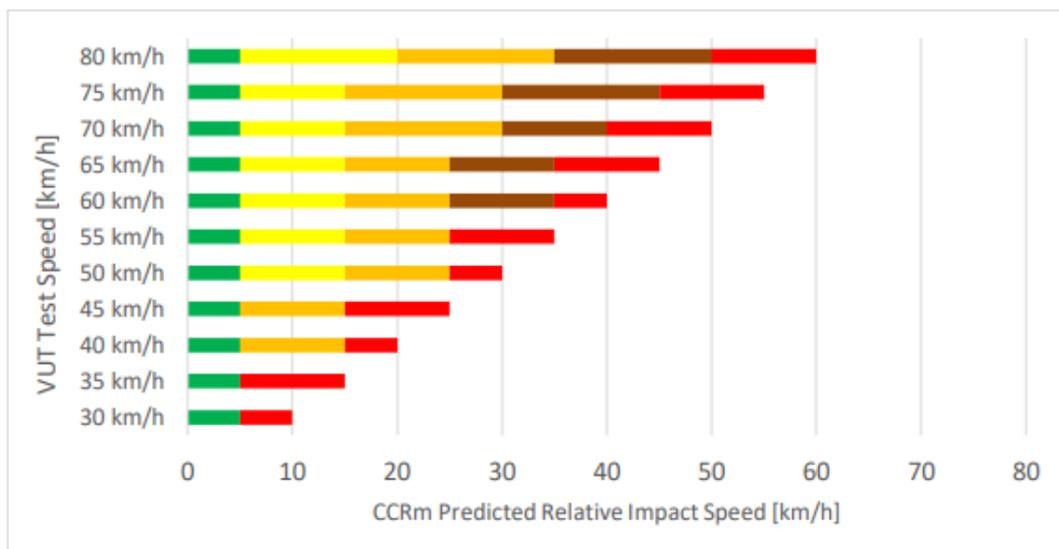


Figura 3-11: scale colore per l'assegnazione del punteggio CCRm [19]

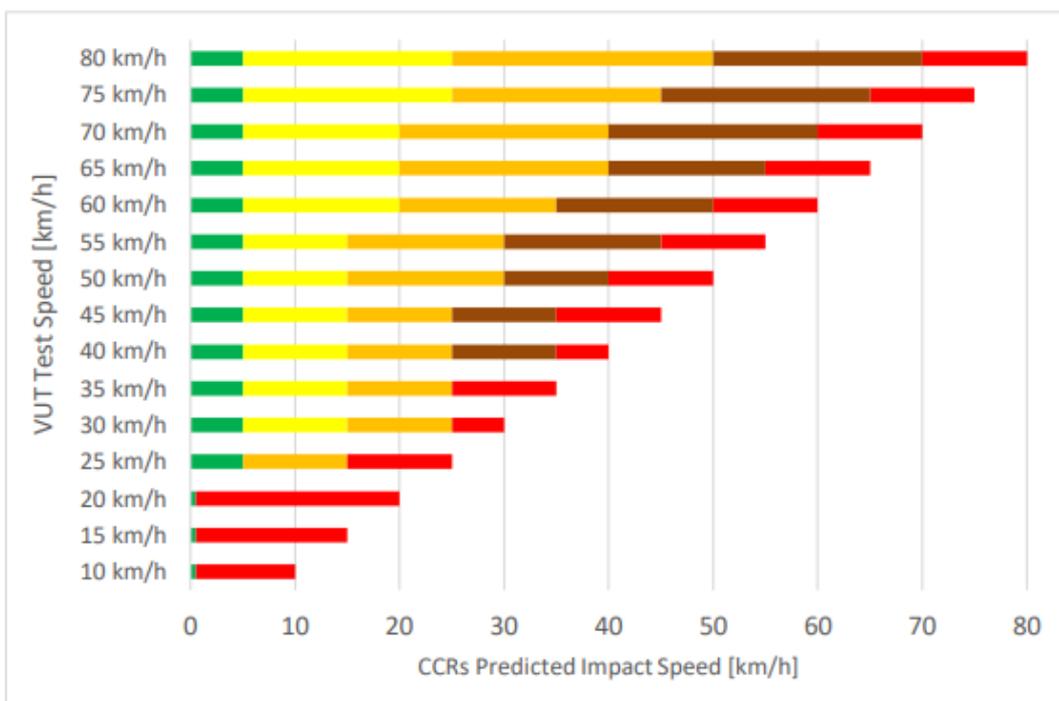


Figura 3-12: scale colore per l'assegnazione del punteggio CCRs [19]

3.2.5 Roadmap EuroNCAP 2025

Il programma di rating EuroNCAP è sempre in continua evoluzione e i test vengono costantemente aggiornati per tenere in considerazione gli avanzamenti tecnologici nel campo della sicurezza automobilistica. Ogni 5 anni viene pubblicata una roadmap che contiene le linee guida sui futuri sviluppi del programma, in modo tale che le case costruttrici possano tenersi aggiornate sui nuovi metodi di valutazione. Uno degli effetti principali dei continui aggiornamenti del rating è infatti quello di indurre i costruttori ad offrire le più avanzate tecnologie di sicurezza come standard su tutti i segmenti di auto.

Nella roadmap pubblicata per il quinquennio 2020-2025 [20] viene discussa l'introduzione nel programma di rating di nuovi ADAS (Advanced Driver Assistance System) e tecnologie anticollisione, grazie ai quali è possibile migliorare significativamente la sicurezza stradale. La maggior parte degli incidenti sono causati da errori umani e distrazione alla guida e per questo EuroNCAP prevede degli incentivi per l'introduzione di tecnologie di driver monitoring, in grado di rilevare situazioni di guida critiche, avvisare il conducente del pericolo e se necessario intervenire in modo autonomo. L'inserimento di queste tecnologie nella valutazione complessiva verrà introdotta per stadi, partendo da quei sistemi che sono già disponibili sul mercato.

L'introduzione di dispositivi di sicurezza in grado di sterzare autonomamente in caso di pericolo potrebbe inoltre ridurre notevolmente il numero e la gravità di urti frontali o di incidenti che coinvolgono gli utenti vulnerabili della strada; nonostante esistano già tutte le tecnologie necessarie, questi sistemi sono però ancora poco diffusi ed EuroNCAP valuta la possibilità di introdurli nello schema di rating a partire dal 2022.

La frenata autonoma di emergenza (AEB) è invece stata introdotta nel programma di rating già a partire dal 2014, prima per lo scenario di collisione posteriore e successivamente per l'attraversamento pedoni. Le prestazioni dei sistemi AEB continueranno però ad evolversi e EuroNCAP ha individuato tre possibili scenari che potranno essere implementati nei futuri schemi di valutazione:

- I. Incidenti che avvengono in retromarcia e coinvolgono pedoni, tipicamente a basse velocità uscendo dai posteggi. Ogni anno in Europa si registrano circa 1400 pedoni feriti gravemente per questo tipo di collisioni ed è perciò importante l'introduzione di sistemi di assistenza alla guida che ne rilevino la presenza e, se necessario, frenino autonomamente. EuroNCAP prevede infatti di

introdurre questo scenario nei test dell'AEB per gli utenti vulnerabili della strada entro il 2020.

- II. Collisioni che avvengono agli incroci a causa di mancate precedenza o durante la svolta. Test per questo tipo di scenario saranno introdotti a partire dal 2020 e coinvolgeranno target che simulano altre auto, pedoni o biciclette.
- III. Collisioni frontali: i test per questo scenario sono previsti a partire dal 2022

EuroNCAP prevede infine di inserire nello schema di valutazione degli incentivi per l'introduzione di tecnologie di comunicazione v2x a partire dal 2024. Si tratta di moderne tecnologie wireless che permettono ai veicoli di scambiare informazioni con gli altri veicoli o con le infrastrutture, in modo tale da individuare la presenza di eventuali ostacoli prima ancora che questi possano essere rilevati da sensori ottici e radar. In base alle informazioni ricevute, l'auto può infatti avvertire il conducente di un imminente pericolo e se necessario interagire con i sistemi di frenata autonoma per evitare l'urto.

3.2.6 EuroNCAP advanced reward

Al fine di promuovere l'introduzione di innovativi sistemi di sicurezza, a partire dal 2010 EuroNCAP assegna un premio aggiuntivo per tutte quelle vetture dotate di sistemi di assistenza alla guida che siano in grado di migliorare la sicurezza della vettura ma che non vengono ancora considerati nella valutazione complessiva in stelle.

Le tecnologie per le quali è prevista l'assegnazione del premio EuroNCAP advanced sono [21]:

- Avviso di angolo cieco: sfruttando telecamere, sensori radar o ultrasuoni, il sistema monitora il tratto laterale e posteriore della vettura per rilevare l'eventuale presenza di veicoli che si trovano nel punto cieco e non sono visibili né dallo specchietto retrovisore né da quelli laterali. Se il guidatore manifesta l'intenzione di volere cambiare corsia attivando gli indicatori luminosi di svolta e il sistema rileva la presenza di un veicolo in avvicinamento nella corsia in cui si sta immettendo, si attiva una spia luminosa lampeggiante sullo specchietto laterale. Questa tecnologia può contribuire ad evitare il verificarsi di numerosi incidenti che avvengono soprattutto in autostrada, quando un veicolo si affianca all'altro in fase di sorpasso.

- Sistemi di mantenimento della corsia: grazie a una telecamera montata dietro allo specchietto retrovisore questi sistemi sono in grado di riconoscere i delimitatori di corsia ed emettere un segnale di pericolo nel caso in cui la vettura oltrepassi la segnaletica orizzontale senza che vengano attivati gli indicatori di direzione. Alcuni di questi sistemi possono anche intervenire autonomamente per riportare la vettura all'interno della corsia nel caso in cui il conducente, nonostante l'avviso di pericolo, non intervenga rapidamente.

I sistemi di mantenimento della corsia venivano valutati come advanced reward fino al 2013 e a partire dal 2014 sono stati introdotti nella sezione safety assist della valutazione complessiva in stelle.

- Attention assist: si tratta di sistemi in grado di rilevare la disattenzione del conducente analizzando eventuali sterzate improvvise, comportamento tipico di un guidatore che si distrae e poi riprende improvvisamente la concentrazione. In questo caso il sistema emette segnali ottici ed acustici per invitare il conducente a fare una sosta e a sospendere momentaneamente la guida.
- E-call: sono sistemi in grado di attivare autonomamente una chiamata di emergenza nel caso in cui si verifichi un incidente, indicando l'esatta posizione del veicolo. Viene stabilita una comunicazione vocale tra la vettura e il call center, in modo tale che gli occupanti, se sono in grado di farlo, possano fornire le informazioni necessarie. Il sistema può inoltre determinare la gravità dell'incidente in base alla decelerazione del veicolo e all'attivazione degli airbag e comunicare al centro di assistenza i dati utili all'intervento dei soccorsi.
- Sistemi di miglioramento della visuale: si tratta di sistemi utili a migliorare la visuale notturna nelle strade non rettilinee. La direzione dei fari si adatta alla curvatura della strada ruotando il fascio di luce lungo la direzione di svolta, permettendo così al conducente di vedere eventuali ostacoli con maggiore anticipo.
- Autonomous Emergency Braking (AEB): è un sistema di frenata autonoma che agisce nel caso in cui, in presenza di un ostacolo che rappresenta un imminente pericolo di impatto, il conducente non inizi in tempo la frenata. In questo caso l'AEB avverte dell'imminente pericolo tramite un segnale ottico ed acustico. Se il guidatore non interviene, il sistema frena autonomamente cercando di evitare l'impatto o almeno di ridurre la velocità di collisione in modo tale da mitigarne le

conseguenze. Per rilevare la presenza di ostacoli davanti alla vettura i sistemi AEB utilizzano sensori LIDAR (Light Detection And Ranging), sensori ottici e telecamere.

I sistemi di frenata automatica di emergenza sono stati valutati come advanced reward fino al 2014, anno in cui l'AEB interurbano è stato introdotto nella sezione safety assist della valutazione complessiva in stelle.

- Multi Collision Brake: è un sistema che frena autonomamente nel caso in cui avvenga un incidente, per evitare che l'auto vada a collidere con altre vetture o con oggetti presenti sulla strada, provocando così un secondo urto. Vengono inoltre attivate le luci di emergenza per avvisare i veicoli che sopraggiungono del potenziale pericolo. Questo tipo di sistemi rappresenta un valido aiuto per la protezione degli occupanti; in molti casi gli incidenti comportano infatti degli urti secondari che possono essere molto pericolosi in quanto i sistemi di sicurezza passiva come airbag e cinture sono già stati utilizzati durante il primo impatto e anche l'integrità della struttura è generalmente compromessa.
- Sistemi Pre-Crash: si tratta di sistemi di prevenzione degli incidenti che interagiscono con l'ESC e sfruttano sensori radar o ottici per prevedere un possibile urto e attuare le misure preventive necessarie a proteggere gli occupanti. La maggior parte di questi sistemi agisce pretensionando le cinture elettriche in modo tale da portare i passeggeri nella posizione ottimale per affrontare l'urto e chiudendo i finestrini e i tettucci apribili, evitando così l'ingresso di oggetti estranei nella vettura.

4 Sistemi pre-crash

Alcune case automobilistiche hanno ideato dei sistemi di protezione degli occupanti che integrano le prestazioni offerte dalla sicurezza attiva e dalla sicurezza passiva, attuando misure preventive reversibili pochi istanti prima che si verifichi un urto. Per riconoscere una situazione di guida critica e stabilire la probabilità che avvenga la collisione, interagiscono con l'ESC (Electronic Stability Control) e sfruttano generalmente gli stessi sensori radar e laser utilizzati dai sistemi avanzati di assistenza alla guida.

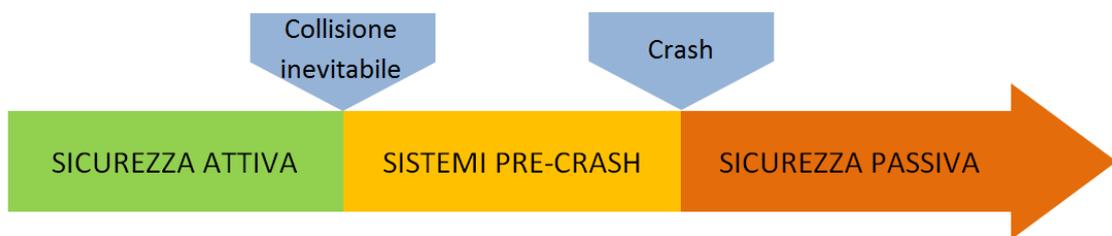


Figura 4-1: integrazione tra sicurezza attiva e passiva

Di seguito verranno brevemente descritte alcune tecnologie pre-crash ideate da diverse case automobilistiche.

4.2 Volkswagen Proactive Occupant Protection

Il sistema di sicurezza Volkswagen Proactive Occupant Protection [22] è in grado di rilevare la probabilità che stia per verificarsi un incidente, ad esempio a seguito dell'attivazione della frenata assistita, ed attua una serie di misure necessarie a migliorare la protezione degli occupanti:

- Attivazione del pretensionatore elettrico delle cinture nei sedili anteriori
- Riposizionamento automatico dei sedili anteriori nella posizione ottimale per massimizzare la protezione offerta dai sistemi di sicurezza passiva in caso di urto

In situazioni di guida critiche, identificate ad esempio dall'attivazione dell'ESC, i finestrini laterali e il tettuccio apribile vengono inoltre automaticamente chiusi.

[23] In alcune vetture il sistema Proactive Occupant Protection è anche in grado di rilevare un possibile pericolo che sopraggiunge da dietro, sfruttando i sensori radar usati dal sistema di monitoraggio dell'angolo cieco per rilevare posizione e velocità delle

vetture che seguono. Analizzando queste informazioni il sistema calcola la probabilità che avvenga un tamponamento, attua le misure preventive utili a minimizzare gli effetti della collisione e attiva le luci di emergenza.

Sulle vetture a marchio Skoda viene invece montato il sistema chiamato Crew Protect Assist, del tutto analogo al Proactive Occupant Protection.

Entrambi i sistemi sono stati premiati con l'EuroNCAP Advanced Reward.

4.3 Audi Pre-Sense

Il sistema di sicurezza Audi Pre-Sense Basic [24] analizza le informazioni provenienti dai sensori dell'ESC e se rileva una situazione di pericolo interviene chiudendo finestrini e tettuccio, attivando il pretensionatore elettrico delle cinture di sicurezza e le luci di emergenza.

Esistono poi delle espansioni del Sistema Pre-Sense basic.

- **Pre-Sense Front:** monitora il traffico antistante la vettura ed è in grado di rilevare la possibilità che si verifichi una collisione. In questo caso emette un primo segnale ottico e acustico per allertare il conducente e se questo non interviene, un segnale tattile rappresentato da una breve frenata. Se il conducente preme il pedale del freno, il sistema interviene assistendo la frenata. Se invece il guidatore continua a non intervenire, il sistema attua una frenata parziale corrispondente a circa un terzo della massima forza frenante, chiude finestrini e tettuccio, attiva le luci di emergenza e pretensiona le cinture di sicurezza. Per le vetture dotate del più avanzato sistema Pre-Sense Plus è prevista inoltre un'ulteriore azione, rappresentata dall'attivazione della massima forza frenante circa mezzo secondo prima dell'impatto, quando questo non può più essere evitato.

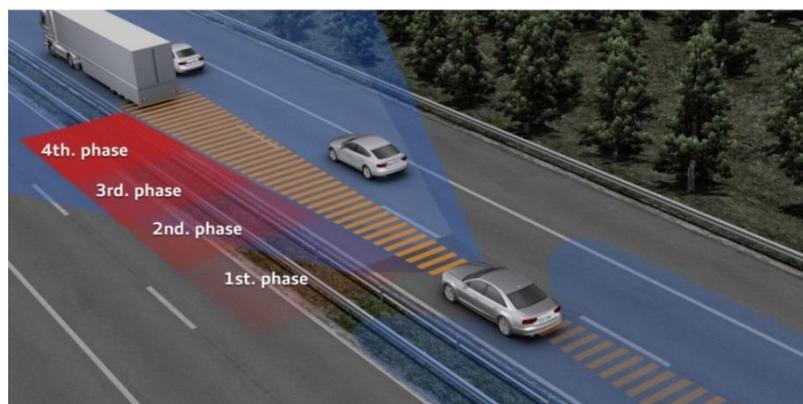


Figura 4-2: funzionamento del sistema Audi Pre-Sense Front [24]

Pre-Sense Rear: utilizza i sensori radar del sistema di monitoraggio dell'angolo cieco per rilevare la possibilità che avvenga un tamponamento e in questo caso chiude finestrini e tettuccio, pretensiona le cinture e muove i sedili nella posizione ottimale.

Pre-Sense Side [25]: funziona fino alla velocità di 60 km/h e interviene nel caso in cui i sensori radar rilevino la probabilità di un imminente urto laterale. In questo caso, oltre alla messa in atto di tutte quelle misure preventive previste dal sistema Pre-Sense, vengono azionate anche le sospensioni attive: in questo modo la vettura viene sollevata dal lato in cui avviene l'urto di circa 80 mm in una frazione di secondo. La maggior parte della forza di impatto viene così indirizzata nella zona più resistente del veicolo (pianale e sottoporta), con una riduzione fino al 50% del carico agente sulla zona toracica e addominale degli occupanti.



Figura 4-3: funzionamento delle sospensioni attive [25]

Nel 2012 Pre-Sense Basic e Pre-Sense Plus hanno ottenuto il premio EuroNCAP advanced.

4.4 Toyota Pre-Crash Safety System

Grazie a dei sensori radar ad onde millimetriche il sistema scansiona la zona attorno alla vettura e riconosce sia gli ostacoli di fronte che eventuali vetture che sopraggiungono dalle zone laterali, in particolar modo agli incroci. [26]

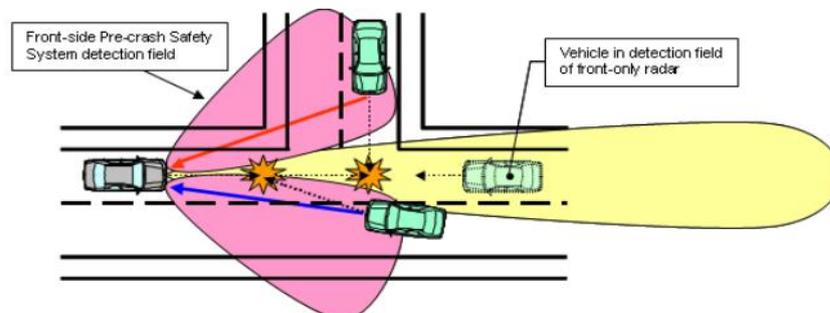


Figura 4-4: range d'azione dei sensori radar [26]

Se viene rilevata un'elevata probabilità di collisione, si attivano una serie di misure preventive atte a mitigare le conseguenze dell'impatto:

- Collision warning: segnale ottico e acustico per avvertire il conducente di una probabile collisione
- Pre-crash Brake Assist: sistema di frenata assistita che si attiva non appena il conducente tocca il pedale del freno, applicando la massima forza frenante possibile.
- Pre-Crash Seat Belts: cinture elettriche che si pretensionano subito prima dell'impatto per trattenere l'occupante e ridurre le lesioni
- Side-airbag Control: se c'è un'elevata probabilità che avvenga un urto laterale gli airbag si preparano all'apertura.

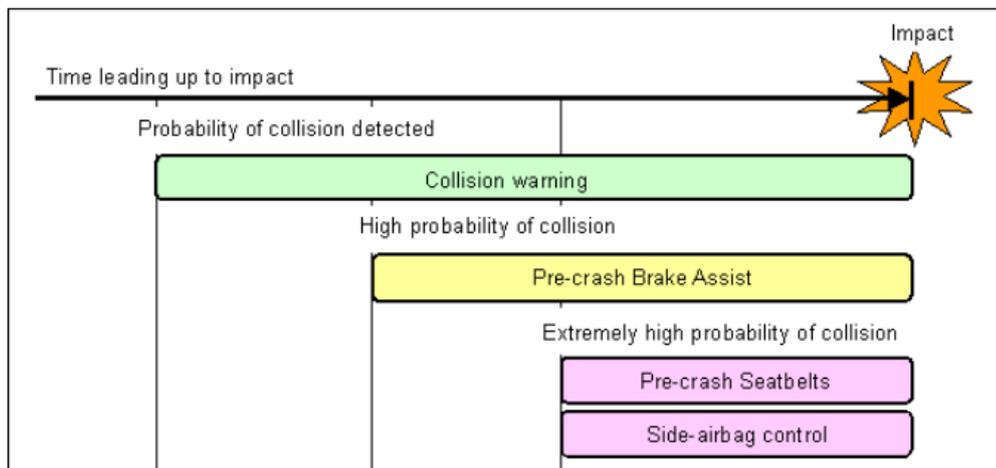


Figura 4-5 risposta del Pre-Crash Safety System ad una probabile collisione [26]

Toyota ha inoltre ideato un sistema Pre-Crash che agisce in caso di imminente pericolo di tamponamento per mitigare le lesioni causate dal colpo di frusta [27]: grazie ad un sensore radar installato nel paraurti posteriore l'unità di controllo monitora costantemente posizione e velocità delle vetture che sopraggiungono da dietro e se determina con elevata probabilità che sta per avvenire un tamponamento attiva le luci di emergenza e i pre-crash intelligent headrest. Questi ultimi sono dei poggiatesta elettrici in grado di muoversi in avanti per avvicinarsi il più possibile alla testa dell'occupante prima che avvenga la collisione, riducendo in questo modo le lesioni al collo causate dal colpo di frusta. Il suo movimento totale massimo è di 60 mm e la superficie contiene dei sensori capacitivi che misurano la distanza tra testa e poggiatesta in modo tale da arrestare il movimento subito prima che avvenga il contatto.

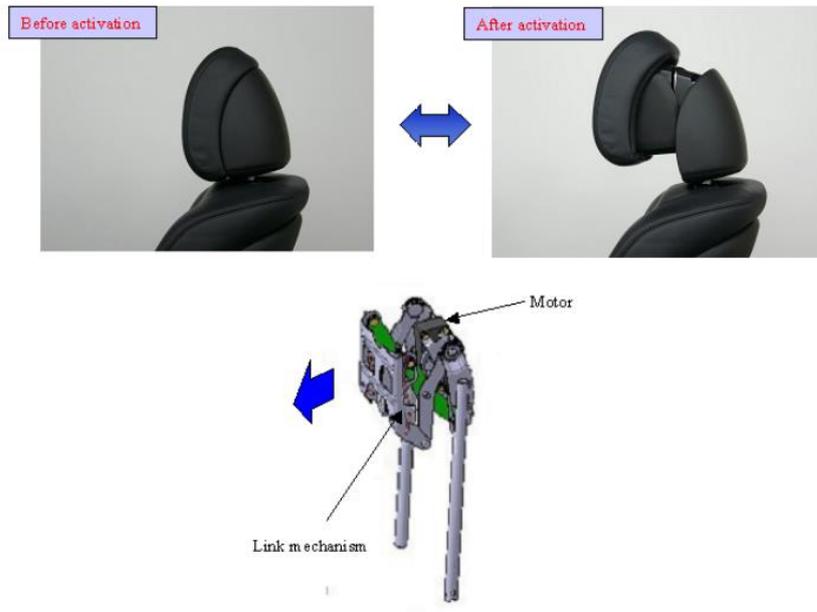


Figura 4-6: funzionamento dell'intelligent headrest [27]

Test condotti su slitta impostando una ΔV di 16 km/h e utilizzando un manichino BioRID II hanno dimostrato che l'adozione dei poggiatesta Pre-Crash può ridurre il Neck Injury Criteria del 50%.

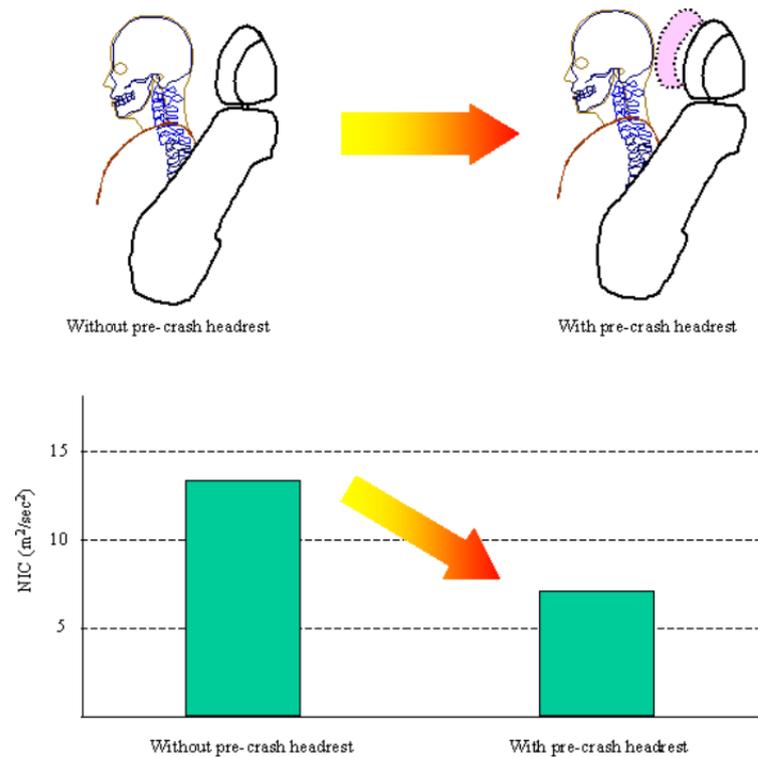


Figura 4-7: valutazione comparativa del NIC con e senza poggiatesta Pre-Crash [27]

4.5 Nissan Pre-Crash Seat Belt

Nissan ha ideato un sistema Pre-Crash che attiva i pretensionatori elettrici delle cinture di sicurezza se viene rilevata [28]:

- Una frenata di emergenza attuata dall'AEB
- Una frenata di emergenza attuata dal guidatore, sulla base degli input ricevuti dal freno

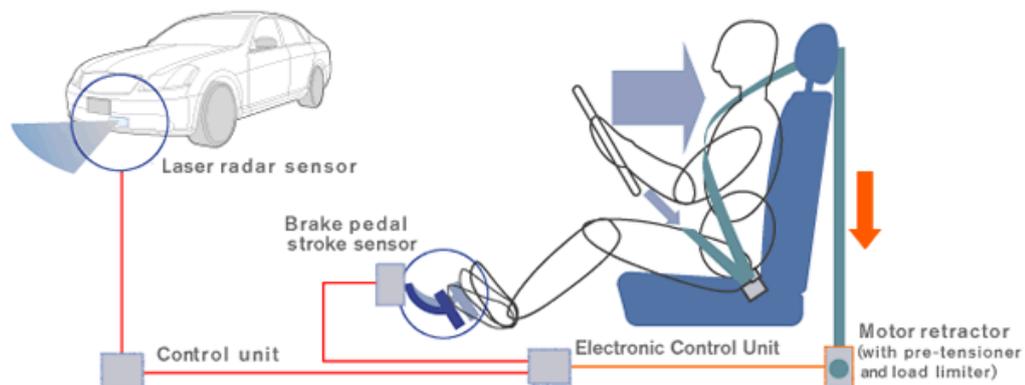


Figura 4-8: funzionamento del sistema Pre-Crash [28]

L'unità elettronica di controllo, analizzando gli input ricevuti dal sensore che misura la forza esercitata sul freno e dal radar montato sul paraurti anteriore, stabilisce se è in corso una frenata di emergenza e attiva il pretensionatore elettrico delle cinture. In questo modo il movimento in avanti dell'occupante dovuto all'inerzia durante la frenata viene ridotto ed egli può così trovarsi al momento dell'impatto in una posizione migliore per massimizzare l'effetto dei sistemi di sicurezza passiva.

4.6 Mercedes-Benz Pre-Safe

Il sistema Pre-Safe [29] si serve di una serie di sensori per monitorare costantemente il movimento dell'auto e gli input del guidatore. Se rileva una condizione di guida critica e quindi un imminente pericolo di collisione, attua le misure necessarie per preparare gli occupanti all'urto: pretensiona le cinture elettriche, aggiusta la posizione dei sedili e dei poggiatesta, chiude finestrini e tettuccio.

Esistono poi delle estensioni del sistema Pre-Safe.

Pre-Safe Brake [30]: è un sistema di frenata automatica che monitora la zona antistante la vettura utilizzando sensori radar a corto e lungo raggio e agisce in due fasi:

- Circa 1.6s prima dell'impatto emette tre segnali acustici e attua una frenata parziale corrispondente al 40% della massima forza frenante.
- Se il conducente non interviene e la collisione è inevitabile, circa 0.6 secondi prima che questa avvenga, applica la massima forza frenante per ridurre la severità dell'impatto.

I sistemi Pre-Safe e Pre-Safe Brake hanno ottenuto il premio EuroNCAP Advanced.

Pre-Safe Impulse Side: è ideato per proteggere l'occupante in caso di urto laterale, spesso più severo rispetto ad un frontale in quanto la distanza tra l'occupante e l'ostacolo impattante è minore e anche l'airbag ha meno tempo e spazio a disposizione per dispiegarsi.

Se i sensori rilevano un'elevata probabilità di urto laterale, viene gonfiata una camera d'aria all'interno dello schienale. L'occupante riceve così un impulso laterale che lo spinge verso il centro della vettura, aumentando di circa 40 mm la sua distanza dal punto di impatto. In questo modo l'air-bag laterale ha più spazio per dispiegarsi, il contatto tra l'occupante e la struttura avviene in ritardo e con una minore velocità di intrusione. Lo spostamento dell'occupante nella direzione dell'impatto riduce inoltre la sua velocità relativa rispetto alla struttura rientrante e perciò sarà minore la quantità di energia cinetica che deve essere dissipata.[31]



Figura 4-9: Pre-Safe Impulse Side [31]

Uno studio [32] condotto dal gruppo Daimler AG riporta i dati relativi a due crash test laterali condotti al fine di valutare l'efficacia del sistema pre-safe side nel ridurre i valori di schiacciamento torace:

- I. Urto palo a 29 km/h, angolo di impatto 90° e manichino EuroSID2-re
- II. Urto a 50 km/h contro barriera mobile deformabile di massa 1450 kg con manichino SID2s

Per entrambi i tipi di urto l'effetto dello spostamento dell'occupante si riflette in una riduzione dello schiacciamento torace che è maggiore nella zona superiore del tronco e decresce man mano spostandosi verso le costole inferiori.

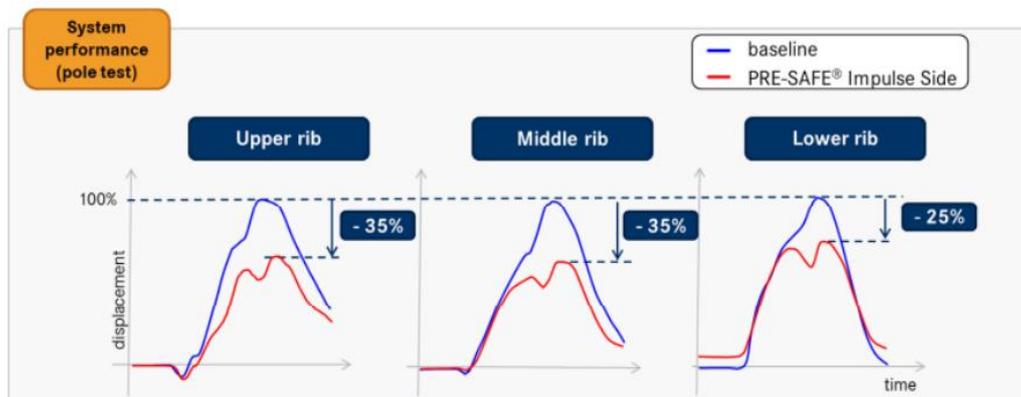


Figura 4-10: efficacia di Pre-Safe Impulse Side nel test palo [32]



Figura 4-11: efficacia di Pre-Safe Impulse Side nel test barriera [32]

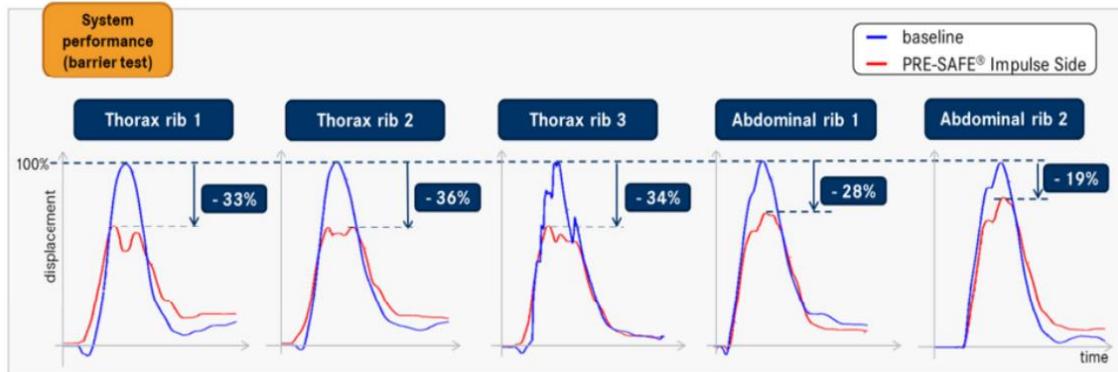


Figura 4-12: efficacia di Pre-Safe Impulse Side nel test barriera [32]

Pre-Safe Sound [32]: è un sistema ideato per proteggere l'orecchio degli occupanti dal suono acuto che si genera durante l'urto: se rileva un imminente pericolo di collisione emette attraverso l'impianto audio della vettura un rumore rosa⁶, in grado di attivare un riflesso naturale che fa contrarre il muscolo stapedio dell'orecchio; la contrazione del muscolo indebolisce il collegamento tra tamburo e orecchio interno proteggendo quest'ultimo dall'elevata pressione acustica.

4.7 Honda Collision Mitigation Braking System

Il Collision Mitigation Braking System [33] è un sistema di frenata automatica che agisce per velocità superiori a 15 km/h e grazie a dei sensori radar rileva eventuali ostacoli presenti in un range di 100 m davanti alla vettura. Se viene rilevata la presenza di un ostacolo inizia un processo di allerta al conducente diviso in 3 stadi progressivi:

1. Segnale acustico e visivo (circa tre secondi prima dell'impatto)
2. Segnale tattile tendendo 3 volte la cintura e frenata parziale (circa 2 secondi prima dell'impatto)
3. Quando l'impatto non è più evitabile il sistema tende le cinture dei sedili anteriori grazie a dei pretensionatori reversibili e applica un'elevata forza frenante, che può essere eventualmente implementata dall'azione del guidatore.

Il sistema Honda Collision Mitigation Braking System ha ottenuto il premio EuroNCAP advanced nel 2010.

⁶ Rumore rosa: segnale la cui potenza è maggiore per le componenti a bassa frequenza

5 Effetto della frenata pre-crash sulla protezione degli occupanti

Nei crash test tradizionali si assume che la posizione degli occupanti nell'istante in cui avviene l'impatto sia quella standard, definita dai protocolli di prova. Nella maggior parte dei casi reali l'urto è però preceduto da una frenata di emergenza attuata dall'AEB (Autonomous Emergency Braking) o dal conducente stesso: l'occupante, a causa della decelerazione subita, tende così ad avanzare, scostandosi dalla posizione nominale sulla base della quale sono stati progettati i sistemi di ritenuta.

Se da un lato i sempre più diffusi sistemi di frenata autonoma di emergenza (AEB) contribuiscono a ridurre il rischio di lesioni evitando l'urto o diminuendo la velocità di impatto, dall'altro la conseguente variazione nella posizione dell'occupante può dunque influire negativamente sulla protezione offerta dai sistemi di sicurezza passiva.

Affinché l'airbag svolga al meglio la sua funzione e sia in grado di attutire l'urto nel miglior modo possibile, è invece importante che nell'istante immediatamente precedente l'impatto l'occupante si trovi in posizione corretta e che la distanza tra testa e volante sia la massima possibile. In caso contrario lo scoppio dell'airbag potrebbe infatti avvenire troppo vicino alla testa dell'occupante, amplificando la gravità delle lesioni.

Per questo motivo molti costruttori hanno implementato degli innovativi sistemi di sicurezza pre-crash che integrano le prestazioni offerte dalla sicurezza attiva e dalla sicurezza passiva, facendo interagire l'AEB con dei pretensionatori elettrici reversibili (Motorized Seat Belt) che intervengono alcuni millisecondi prima dell'inizio della frenata limitando l'avanzamento dell'occupante.

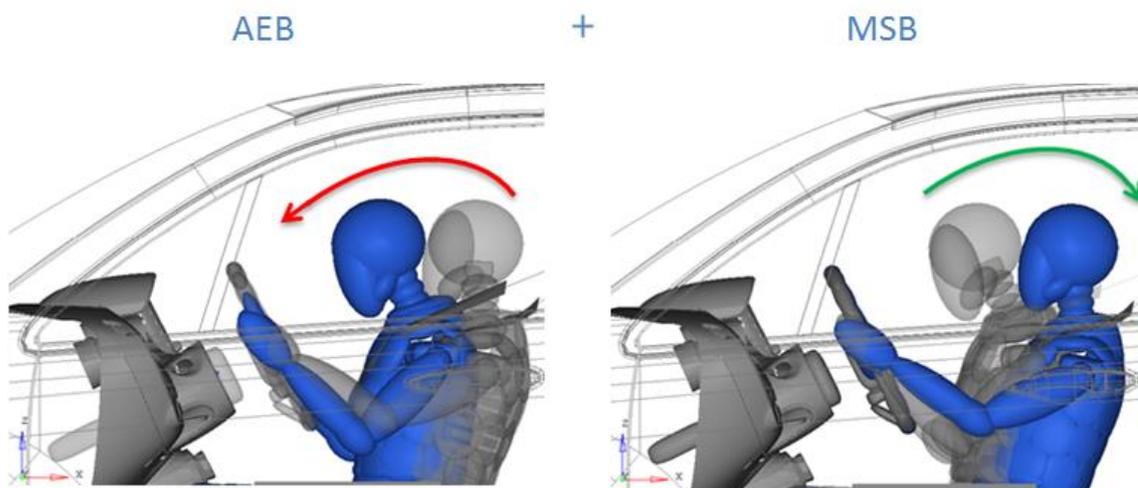


Figura 5-1 Effetto di AEB e MSB sulla posizione dell'occupante

L'azione combinata di queste due tecnologie può infatti potenzialmente migliorare la protezione offerta in caso di urto, in quanto l'AEB riduce la velocità di impatto e di conseguenza il rischio di lesioni e allo stesso tempo la cintura motorizzata mantiene l'occupante nella posizione ottimale per garantire l'efficacia dei sistemi di ritenuta.

5.2 Simulazioni numeriche

Simulazioni numeriche della fase pre-crash effettuate con il software Madymo hanno dimostrato l'efficacia di utilizzare un pretensionatore elettrico reversibile che si attiva contemporaneamente all'intervento dell'AEB [34].

Per effettuare la simulazione è stato utilizzato un modello di ATD corrispondente a un 50° percentile chiamato Human Model. Questo modello, sviluppato da TASS International, è stato ideato proprio per riprodurre il comportamento degli occupanti nelle condizioni pre-crash e comprende una muscolatura attiva in grado di contrarsi in risposta alle decelerazioni causate dalla frenata.

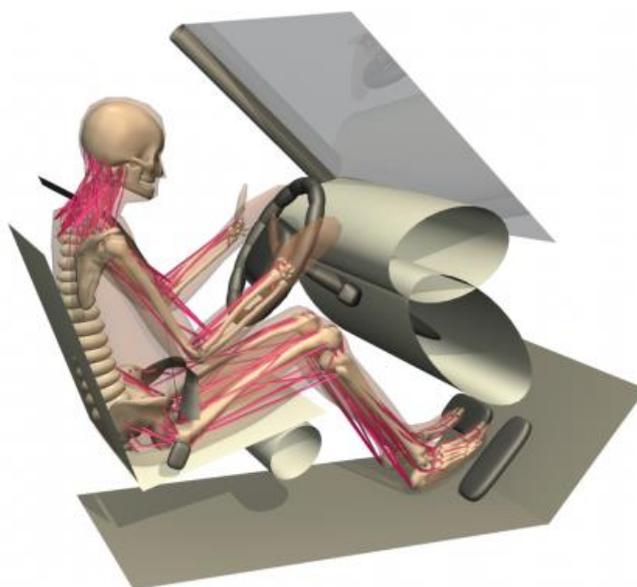


Figura 5-2 Madymo Human model [35]

I risultati della simulazione della fase pre-crash con lo Human Model riportano un avanzamento della testa dell'occupante in seguito all'intervento dell'AEB di 87 mm.

Ipotizzando invece la contemporanea attivazione della cintura motorizzata, l'avanzamento risultante si riduce da 87 a 25 mm.

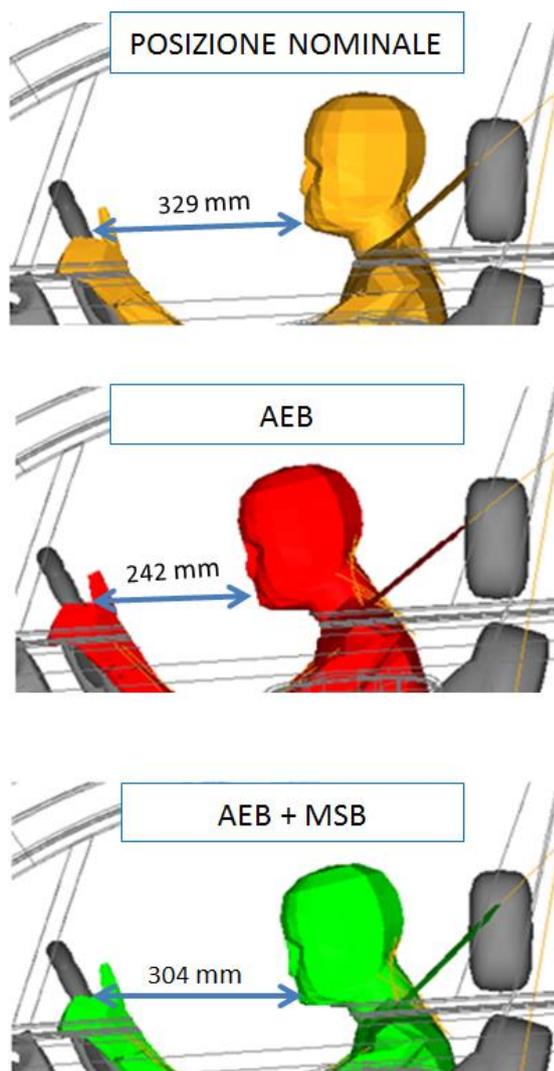


Figura 5-3: simulazioni numeriche della fase pre-crash

Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni della fase pre-crash sono poi state effettuate delle simulazioni di urto contro barriera rigida ipotizzando di partire da una velocità iniziale di 50 km/h, ridotta a 30 km/h in seguito all'intervento dell'AEB.

È stato infine calcolato l'Head Injury Criterion (HIC)⁷ per tre diversi scenari:

- Urto senza AEB: 50 km/h
- Urto con AEB: 30 km/h
- Urto con AEB a 30 km/h + MSB⁸

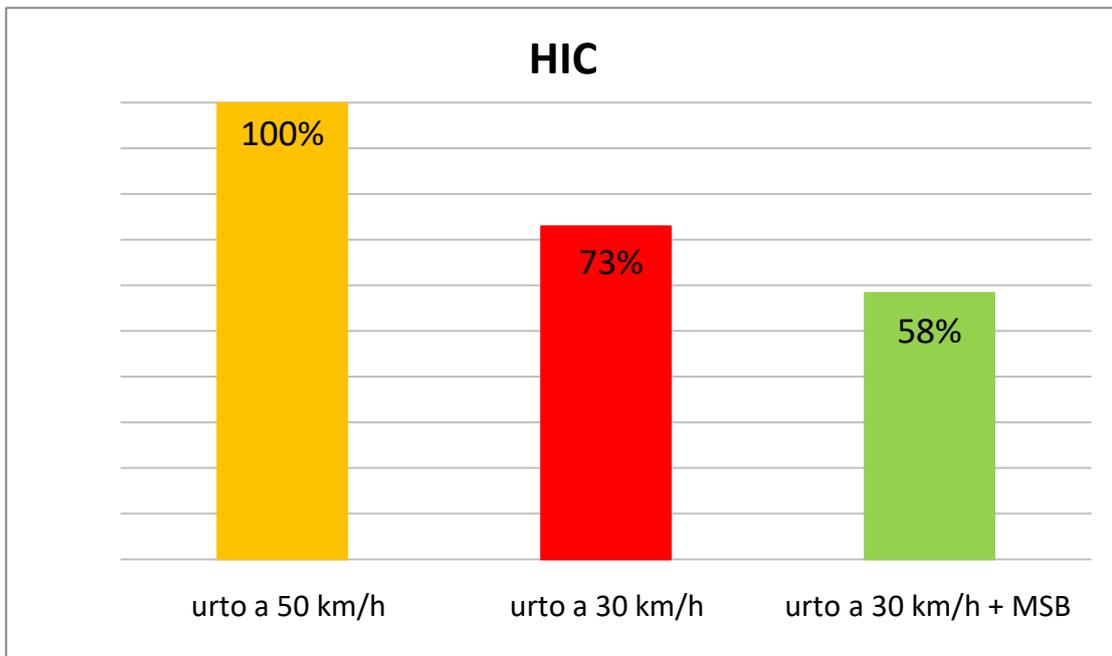


Figura 5-4: valori di HIC per l'urto con e senza AEB/MSB

I risultati ottenuti mostrano come il solo intervento dell'AEB possa ridurre il valore del criterio di lesione testa del 27 %. Questo significa che l'utilizzo di un sistema di frenata autonoma di emergenza, pur causando lo spostamento dell'occupante dalla posizione ottimale, contribuisce comunque a ridurre il rischio di lesioni grazie alla diminuzione della velocità di impatto.

Ipotizzando infine di introdurre anche la cintura di sicurezza motorizzata e quindi limitando l'avanzamento causato dall'AEB, l'Head Injury Criterion si riduce di un ulteriore 15%, per una riduzione complessiva del - 42% rispetto all'urto a 50 km/h, senza frenata di emergenza.

⁷ HIC: criterio di lesione testa, calcolato a partire dalle componenti triassiali di accelerazione del centro di massa

⁸ Motorized Seat Belt

5.3 Valutazione sperimentale dell'avanzamento nel corso della frenata

I protocolli di prova previsti per valutare la protezione offerta in caso di urto prevedono di posizionare il manichino nella posizione standard, senza tenere in considerazione l'eventuale avanzamento degli occupanti a causa della frenata di emergenza.

Per riprodurre in modo più realistico un crash test sarebbe invece opportuno riuscire a valutare gli scenari di guida dinamici che intervengono pochi istanti prima dell'urto.

L'obiettivo principale del presente lavoro di tesi è infatti stato quello di raccogliere dei dati sperimentali sulla cinematica degli occupanti sottoposti alla decelerazione della frenata.

A tal fine sono state effettuate delle prove su pista eseguendo quattro frenate di diversa entità e misurando per ognuna di queste l'avanzamento della testa dell'occupante:

	Velocità iniziale	Velocità finale
1° prova	20 km/h	0 km/h
2° prova	40 km/h	0 km/h
3° prova	60 km/h	0 km/h
4° prova	80 km/h	0 km/h

Tabella 5-1: entità delle frenate nelle quattro prove

Per eseguire le prove è stata scelta un'auto sportiva, dotata di un'elevata capacità frenante. Dalla rete CAN della vettura sono inoltre stati registrati i dati relativi a:

- Velocità
- Accelerazione longitudinale
- Attivazione freno
- Attivazione ABS

Dai dati relativi all'attivazione del freno è stato possibile risalire agli esatti istanti di tempo relativi all'inizio e alla fine della frenata.

È stato inoltre verificato che la velocità della vettura prima della decelerazione, registrata dalla rete CAN, corrispondesse all'incirca alla velocità iniziale prevista per le quattro prove, rispettivamente di 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h.

La massima decelerazione della vettura, registrata dalla rete CAN, è risultata essere di circa 1g in tutte le prove.

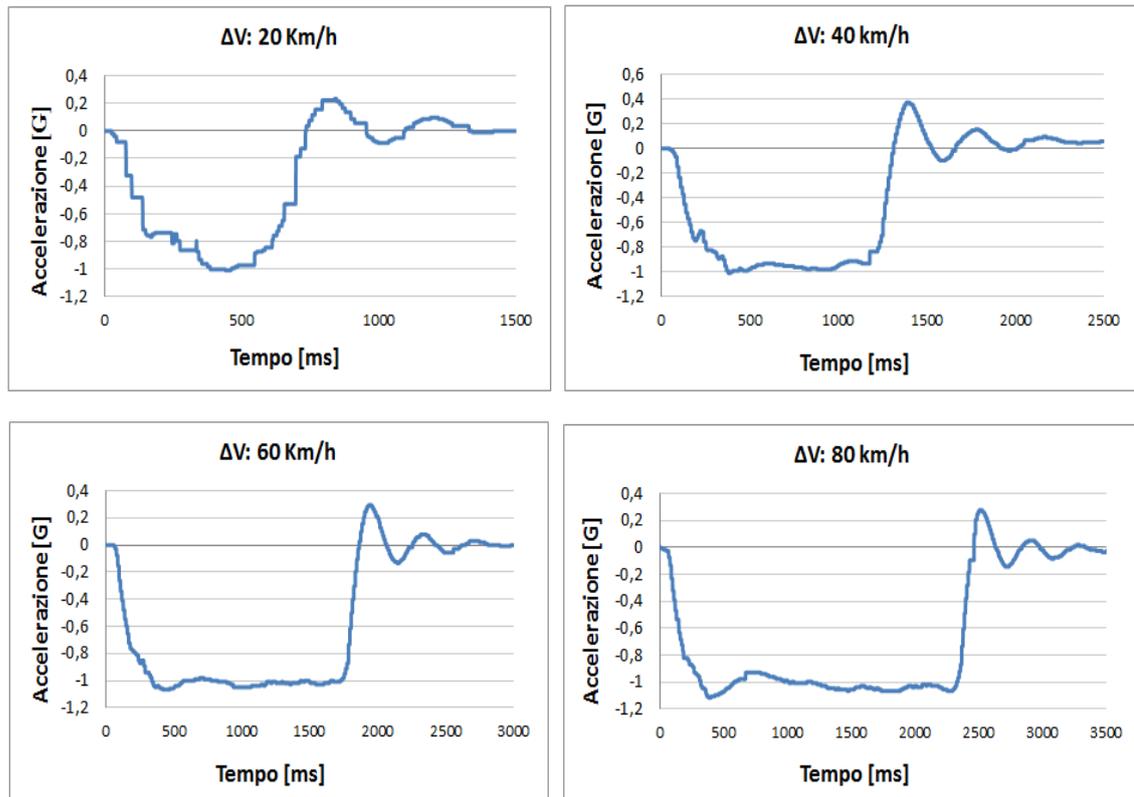


Figura 5-5: decelerazione della vettura nelle quattro prove di frenata

Le prove sono state eseguite con un volontario corrispondente alle caratteristiche di un 50° percentile seduto sul sedile passeggero e successivamente ripetute con tre diversi manichini strumentati con accelerometri su testa, torace e bacino:

- Hybrid III 50° percentile
- Hybrid III 5° percentile
- THOR 50° percentile

L'escursione in avanti della testa è stata misurata per mezzo di un potenziometro fissato al tetto della vettura e collegato ad un caschetto indossato dall'occupante. Due tensiometri sono inoltre stati montati sulla cintura di sicurezza per misurarne la forza esercitata su spalla e bacino.

Potenziometro



Figura 5-6: potenziometro fissato al caschetto



Figura 5-7: manichino posizionato sul sedile passeggero

5.3.1 Prove di frenata con volontario corrispondente al 50° percentile

Per quantificare sperimentalmente l'avanzamento causato dalla frenata, un volontario corrispondente alle caratteristiche di un 50° percentile si è seduto sul sedile passeggero indossando il caschetto a cui è collegato il potenziometro.

Per rendere la prova più realistica, è stato chiesto al passeggero di tenere gli occhi chiusi in modo tale che, non sapendo esattamente quando sarebbe iniziata la frenata, riuscisse a mantenere la muscolatura il più possibile rilassata.



Figura 5-8: passeggero in posizione avanzata

L'avanzamento della testa registrato dal potenziometro è risultato essere molto simile nelle quattro prove, con un valore medio di 325 mm.



Figura 5-9: massimo avanzamento del volontario umano nelle quattro prove

La forza esercitata dalla cintura, misurata con i tensiometri, aumenta all'aumentare della velocità della prova e raggiunge un valore massimo sulla spalla di circa 600 N per la frenata a 80 km/h.

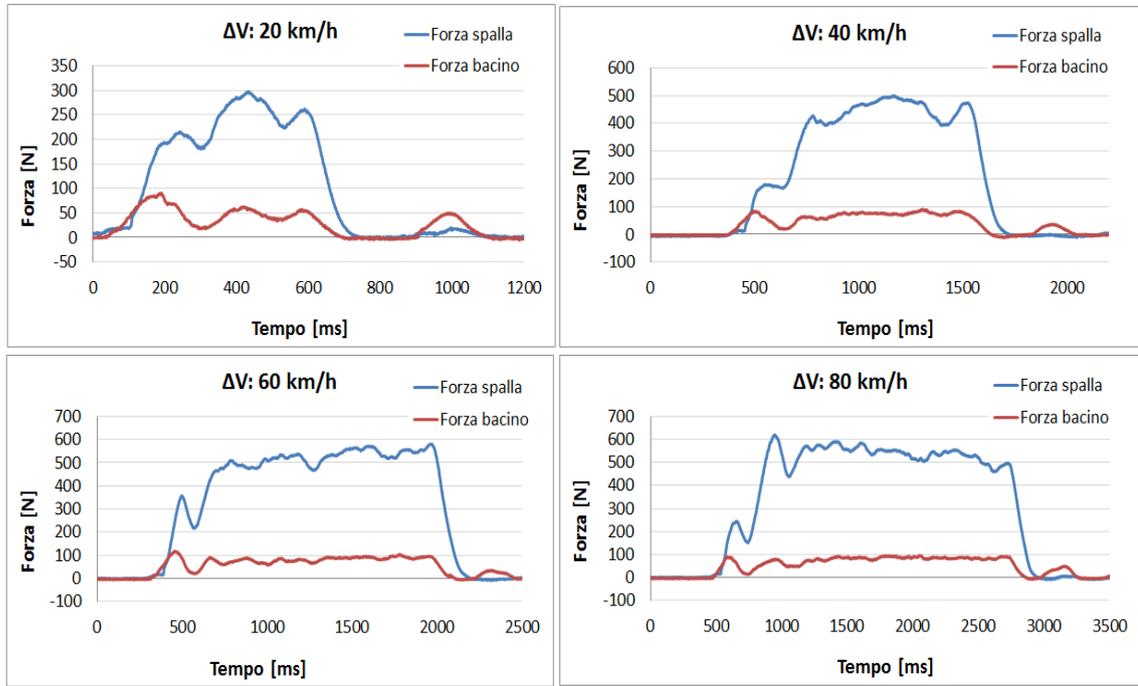


Figura 5-10: forze esercitate dalla cintura nelle prove con il volontario umano

5.3.2 Prove di frenata con Hybrid III 50° percentile

Nelle prove eseguite con l'ATD HIII 50° percentile è stato registrato un avanzamento della testa molto basso se paragonato a quello del passeggero umano, risultante in un valore medio di 53 mm. Questo è probabilmente dovuto al fatto che l'ATD è stato progettato per valutare la biomeccanica dell'occupante in caso di urto e presenta quindi minore biofedeltà nel riprodurre il comportamento umano per basse decelerazioni.

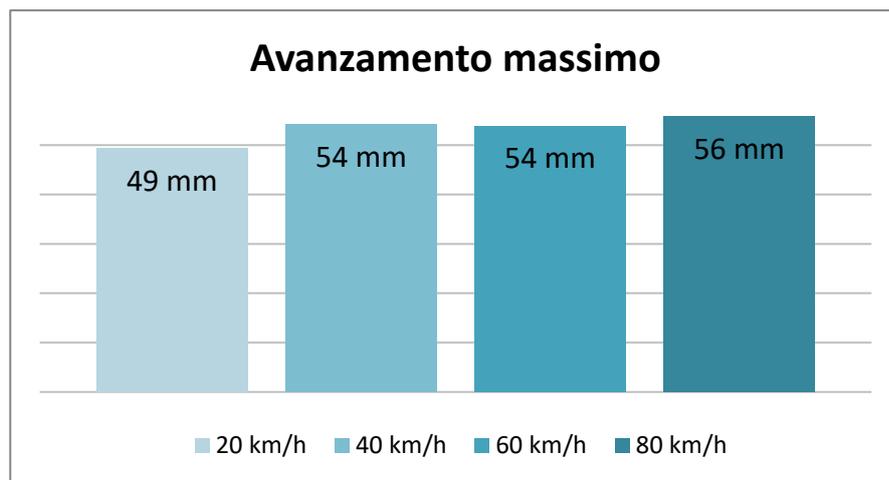


Figura 5-11: massimo avanzamento dell' HIII 50° percentile nelle quattro prove

Oltre agli avanzamenti della testa, per i manichini strumentati è stato possibile registrare anche le accelerazioni delle varie parti del corpo e forze e momenti agenti sul collo.

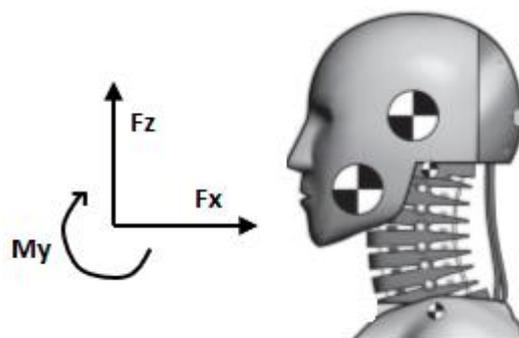


Figura 5-12: sistema di riferimento

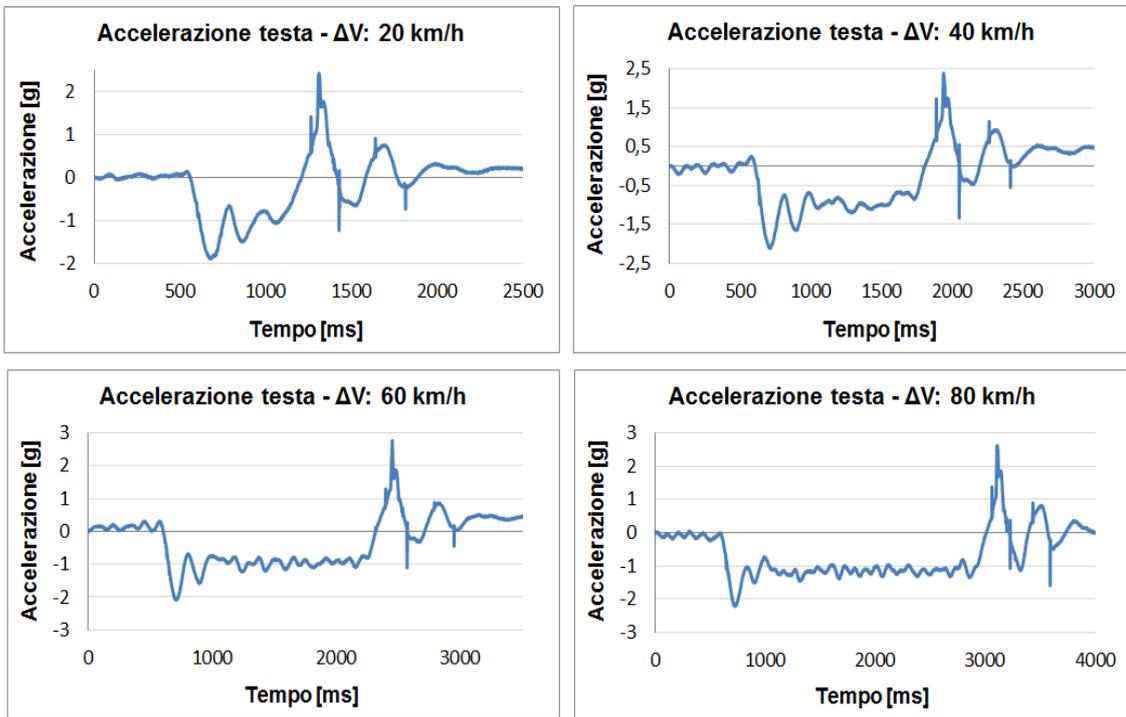


Figura 5-13: curve di accelerazione testa – Hybrid III 50° percentile

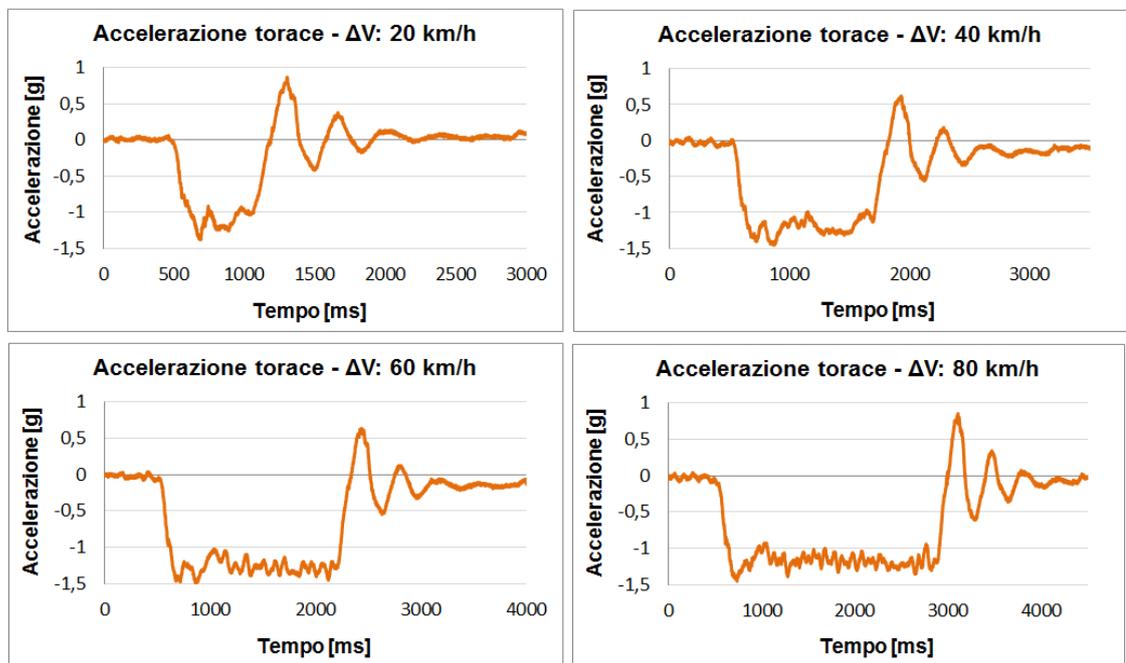


Figura 5-14: curve di accelerazione torace – Hybrid III 50° percentile

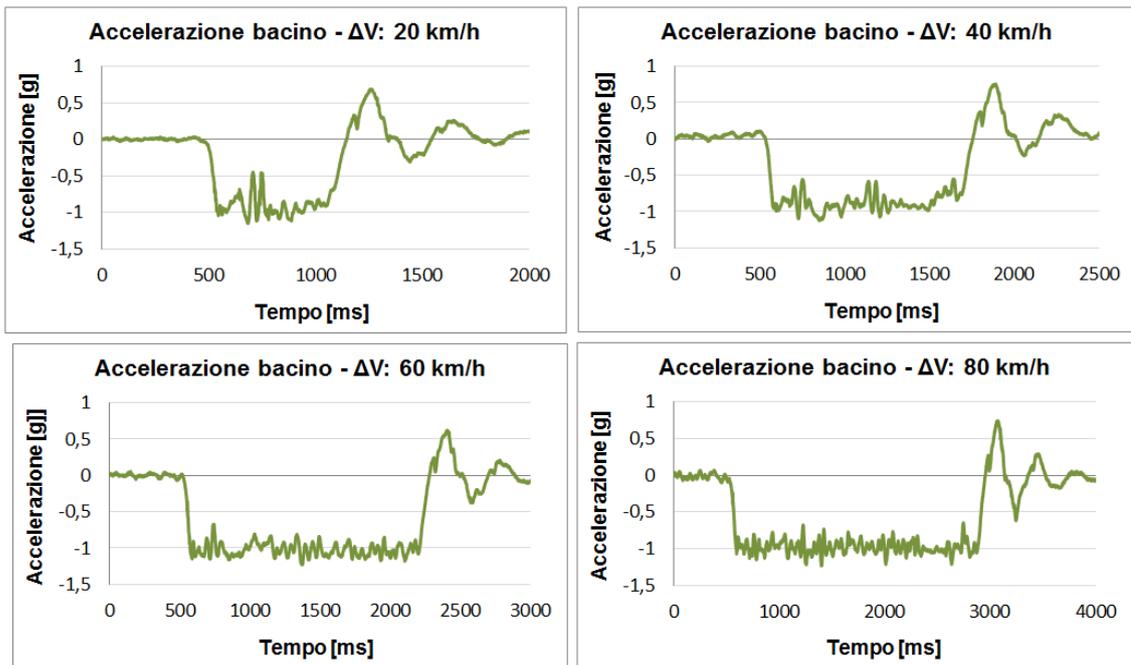


Figura 5-15: curve di accelerazione bacino – Hybrid III 50° percentile

Si può notare come tutte le curve presentino una prima accelerazione negativa, corrispondente alla decelerazione della vettura e al conseguente avanzamento del manichino. Successivamente si registrano invece dei picchi positivi che corrispondono al ‘rimbalzo’ subito dal manichino nel ritornare nella posizione di partenza.

Le accelerazioni misurate su testa, torace e bacino risultano simili per tutte e quattro le prove in quanto la decelerazione subita, cioè quella registrata dalla rete CAN della vettura, è sempre di circa 1 g.

L’accelerazione del bacino è di circa 1 g, esattamente come la decelerazione della vettura; il bacino è infatti trattenuto dalla cintura a tre punti e la sua accelerazione relativa rispetto all’auto è pressoché nulla.

Il torace subisce invece un’accelerazione maggiore, di circa 1.5 g, in quanto avanza leggermente a seguito della frenata e ha quindi un movimento relativo rispetto all’auto.

La testa registra un’accelerazione ancora più elevata, con un valore massimo di circa 2 g, poiché ha maggiore libertà di movimento e si muove in avanti rispetto al sistema di riferimento vettura.

Nelle immagini sottostanti vengono rappresentate le curve di forze e momenti agenti sul collo. Per il sistema di riferimento si rimanda alla figura 5-12

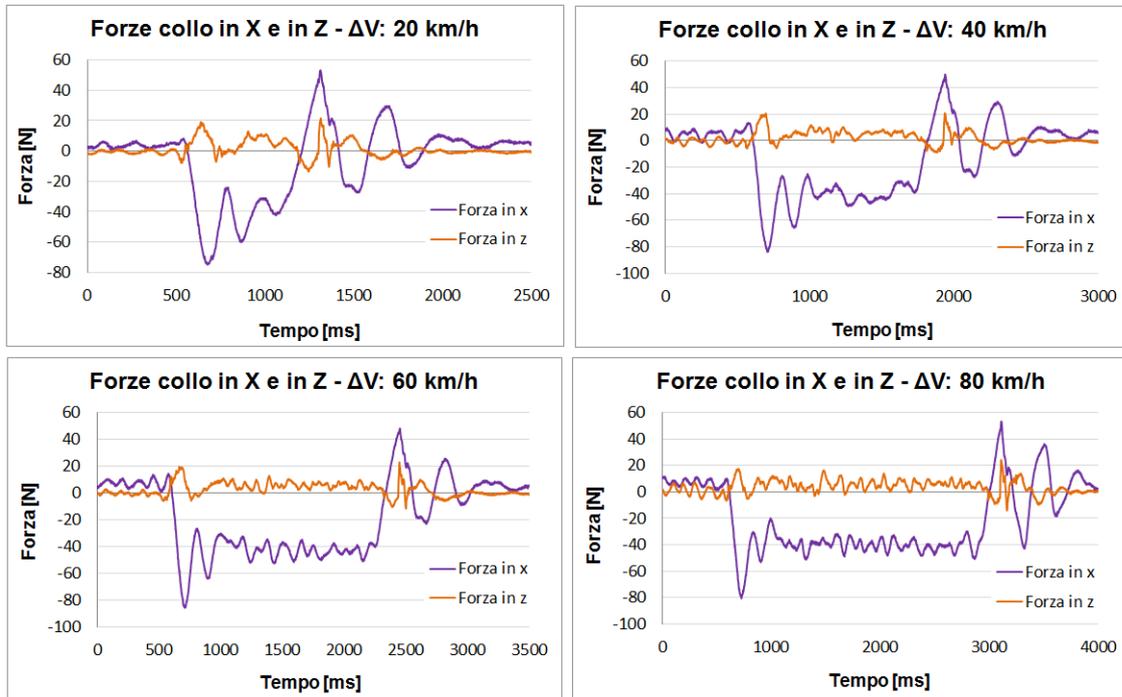


Figura 5-16: Forze collo in x e z – Hybrid III 50° percentile

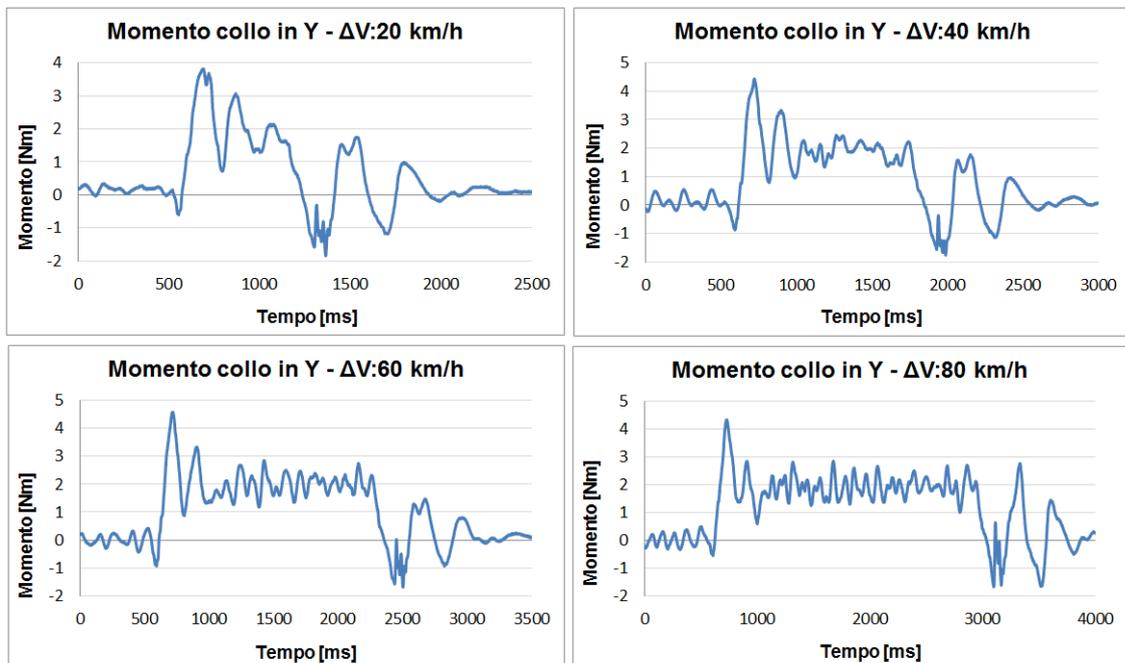


Figura 5-17: momento collo in y – Hybrid III 50° percentile

La forza lungo l'asse x, registrata dalle celle di carico poste nel collo del manichino, risulta essere negativa in quanto il collo, a causa della decelerazione, subisce una forza che lo porta ad avanzare.

Il momento attorno all'asse y è inizialmente positivo poiché spalle e torace vengono trattenuti dalla cintura di sicurezza mentre la testa tende ancora ad avanzare, provocando una flessione all'indietro del collo. Successivamente si registrano poi dei picchi negativi corrispondenti all'effetto del 'colpo di frusta' subito dal collo quando la testa, al termine della frenata, ritorna nella posizione iniziale.

I tensiometri montati sulla cintura riportano all'incirca la stessa forza per tutte e quattro le prove, con un valore massimo poco superiore a 150 N e quindi molto più basso rispetto al passeggero reale.

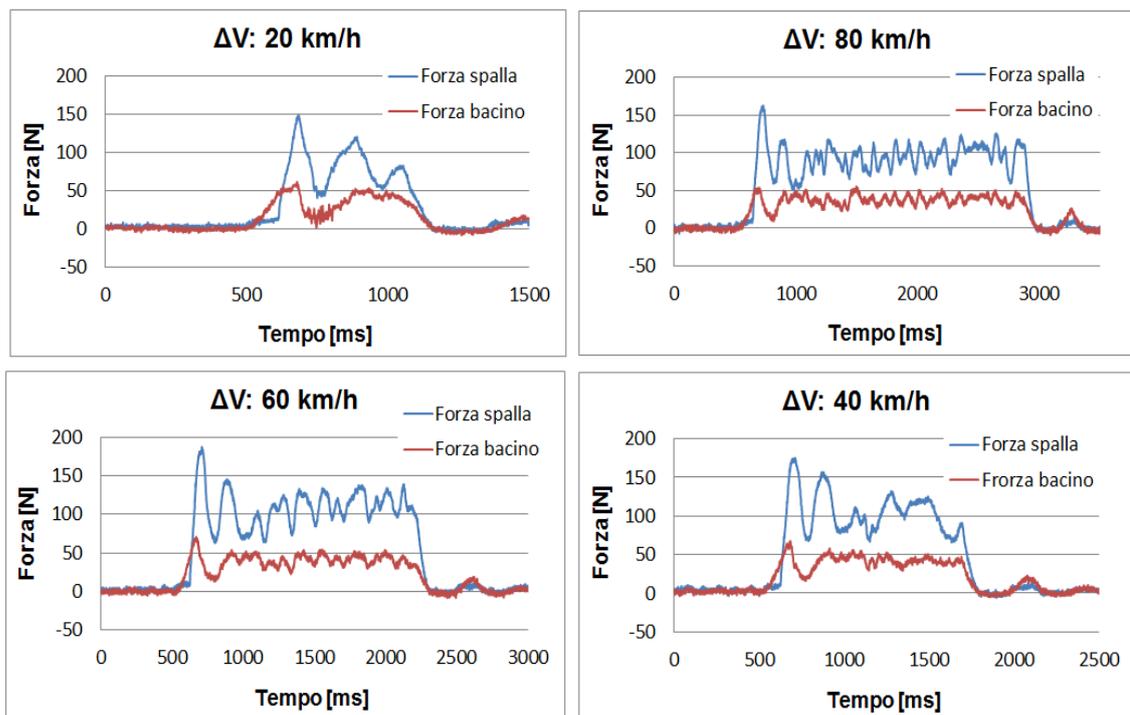


Figura 5-18: forze esercitate dalla cintura – Hybrid III 50° percentile

5.3.3 Prove di frenata con Hybrid III 5° percentile

Le stesse quattro prove di frenata sono state eseguite anche con l'ATD HIII 5° percentile, corrispondente alle caratteristiche fisiche di una donna di piccola corporatura.



Figura 5-19: HIII 5° posizionato sul sedile passeggero

Anche in questo caso sono stati registrati degli avanzamenti della testa più bassi rispetto a quelli misurati con il passeggero umano, con un valore medio di 76 mm. Come ci si poteva aspettare, l'avanzamento di questo ATD è comunque maggiore rispetto a quello del 50° percentile in quanto più leggero.

A causa di problemi riscontrati in fase di acquisizione, non sono stati registrati i dati relativi alla frenata a 40 km/h ma si può presupporre che, in modo analogo a quanto riscontrato nei test effettuati con gli altri tipi di occupante, i dati non siano molto differenti per le diverse velocità di prova.

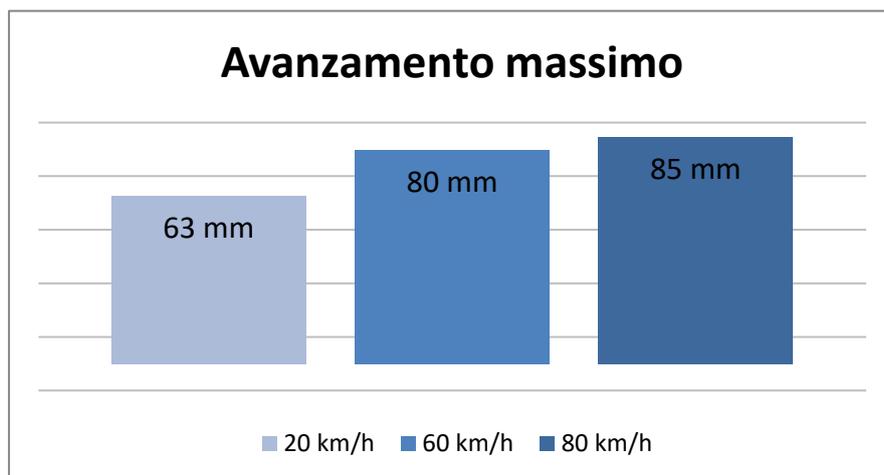


Figura 5-20: massimo avanzamento dell' HIII 5° percentile nelle quattro prove

Nella figura sottostante viene rappresentata la posizione della testa del manichino prima della frenata (a sinistra) e nel momento di massimo avanzamento (a destra).

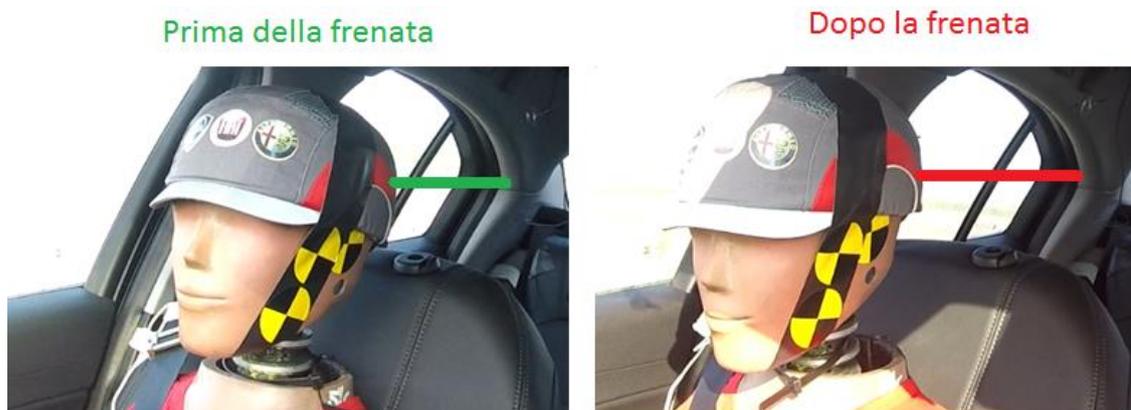


Figura 5-21: posizione della testa dell'HIII 5° prima e dopo la frenata

Nel seguito verranno riportati i grafici relativi all'accelerazione di testa, torace e bacino, forze e momenti agenti sul collo e forza esercitata dalla cintura di sicurezza.

In modo analogo a quanto riscontrato per l'HIII 50° percentile, le curve di accelerazione non riportano differenze significative tra le quattro prove.

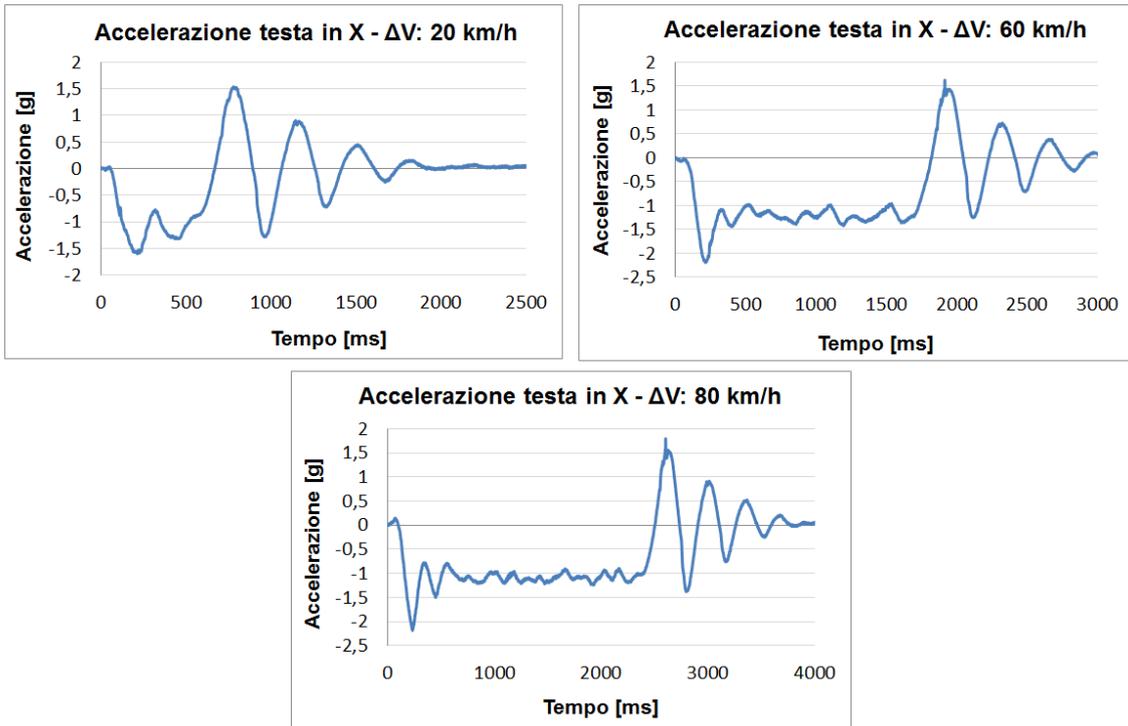


Figura 5-22: Curve di accelerazione testa – Hybrid III 5° percentile

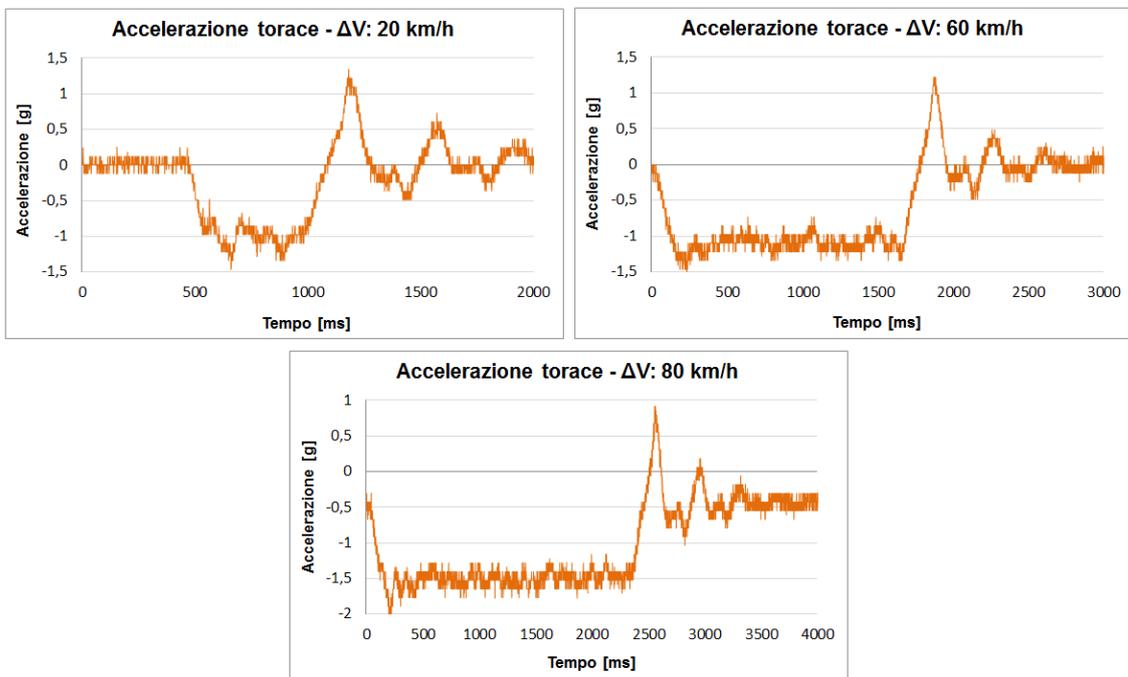


Figura 5-23: Curve di accelerazione torace – Hybrid III 5° percentile

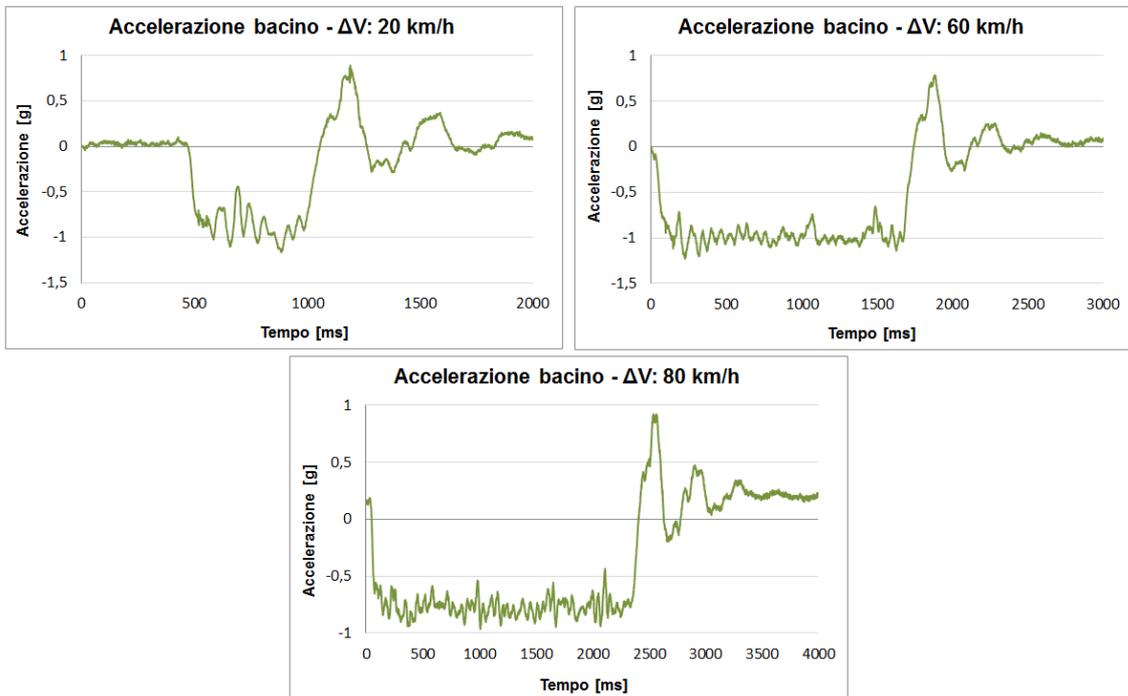


Figura 5-24: Curve di accelerazione bacino – Hybrid III 5° percentile

Nelle immagini sottostanti vengono rappresentate le curve di forze e momenti agenti sul collo. Per il sistema di riferimento si rimanda alla figura 5-12.

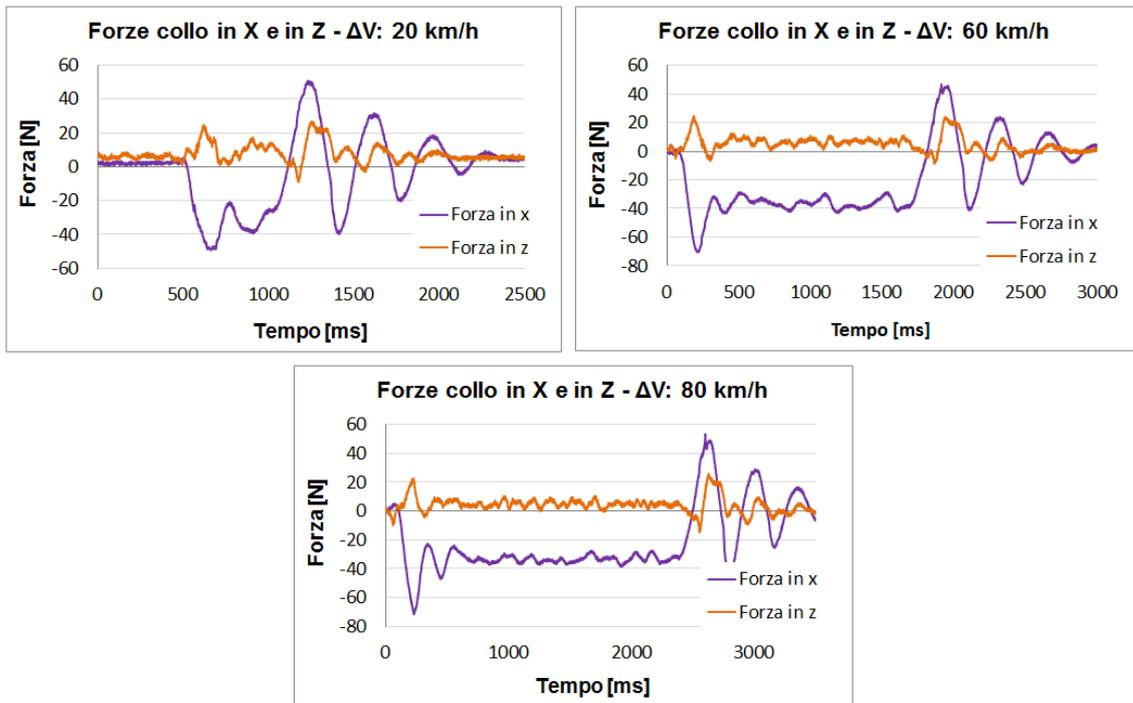


Figura 5-25: forze collo in x e in z – Hybrid III 5° percentile

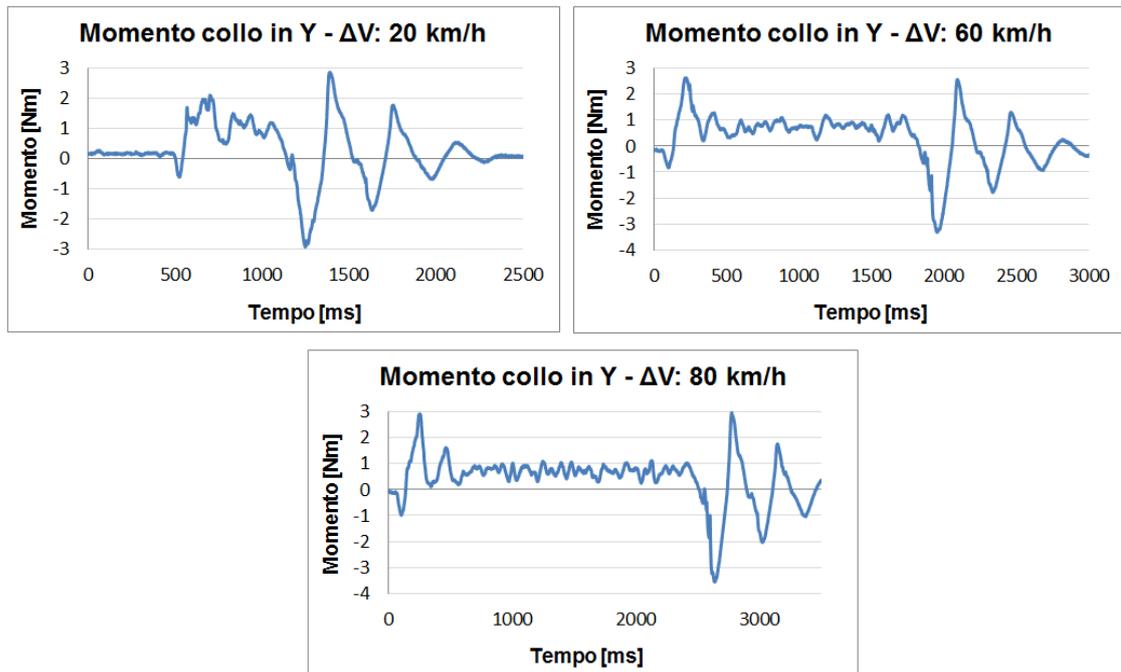


Figura 5-26: momento collo in y – Hybrid III 5° percentile

La massima forza esercitata dalla cintura è anche in questo caso nettamente inferiore rispetto a quanto registrato con il passeggero umano e corrisponde a circa 160 N

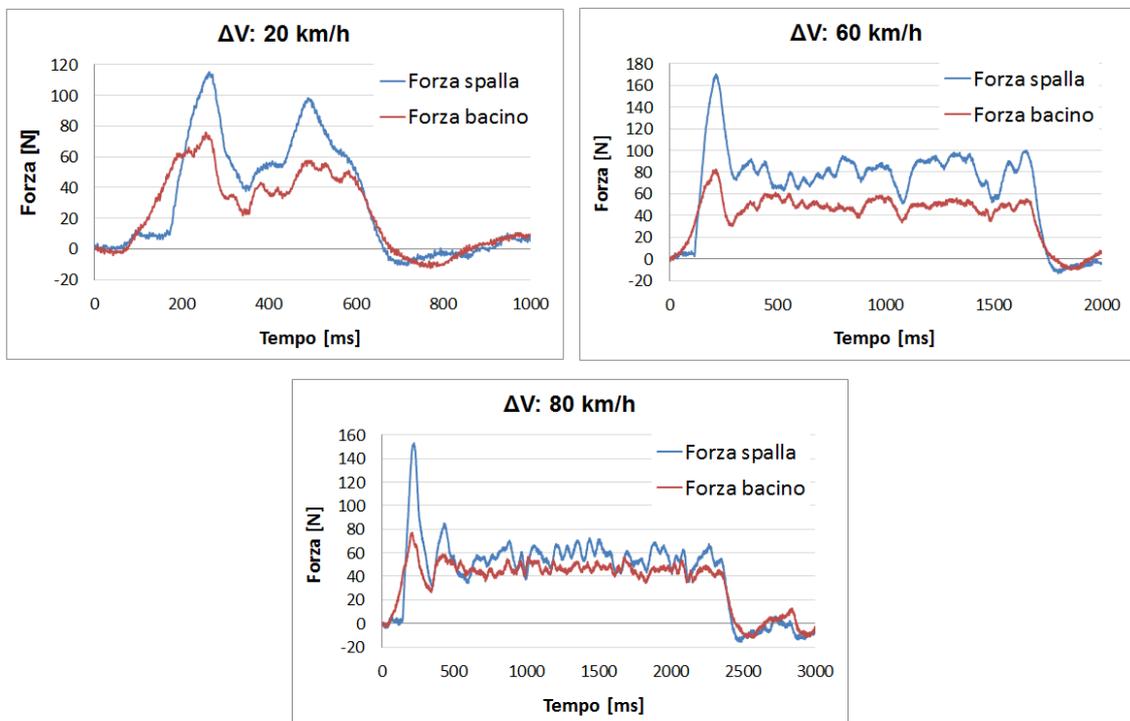


Figura 5-27: forze esercitate dalla cintura – Hybrid III 5° percentile

5.3.4 Prove di frenata con manichino THOR 50° percentile

Nelle prove eseguite con il manichino di nuovissima generazione THOR sono stati registrati degli avanzamenti nettamente superiori rispetto all' HIII, a dimostrazione della maggiore biofedeltà di questo manichino nel riprodurre il movimento umano.



Figura 5-28: THOR posizionato sul sedile passeggero

In questo caso l'avanzamento aumenta all'aumentare della velocità di prova, con un valore massimo di 157 mm per la frenata a 80 km/h.

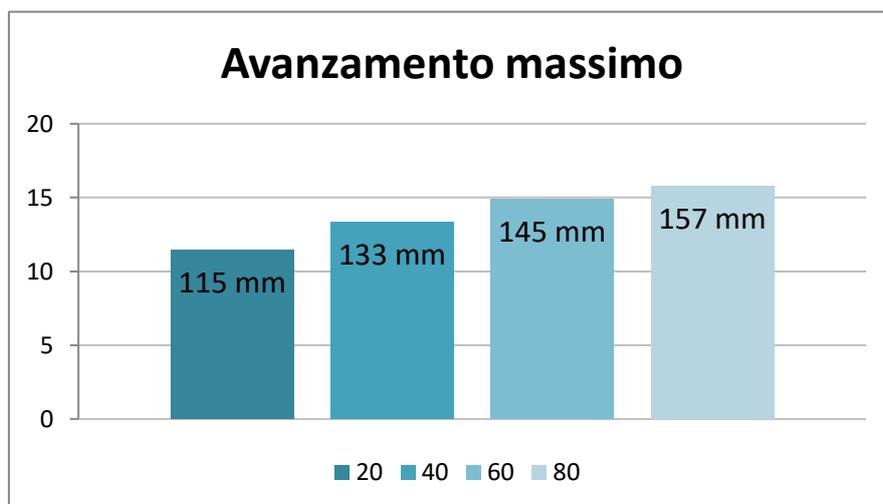


Figura 5-29: massimo avanzamento del THOR nelle quattro prove

Nella figura sottostante viene rappresentata la posizione della testa del manichino prima della frenata (a sinistra) e nel momento di massimo avanzamento (a destra)

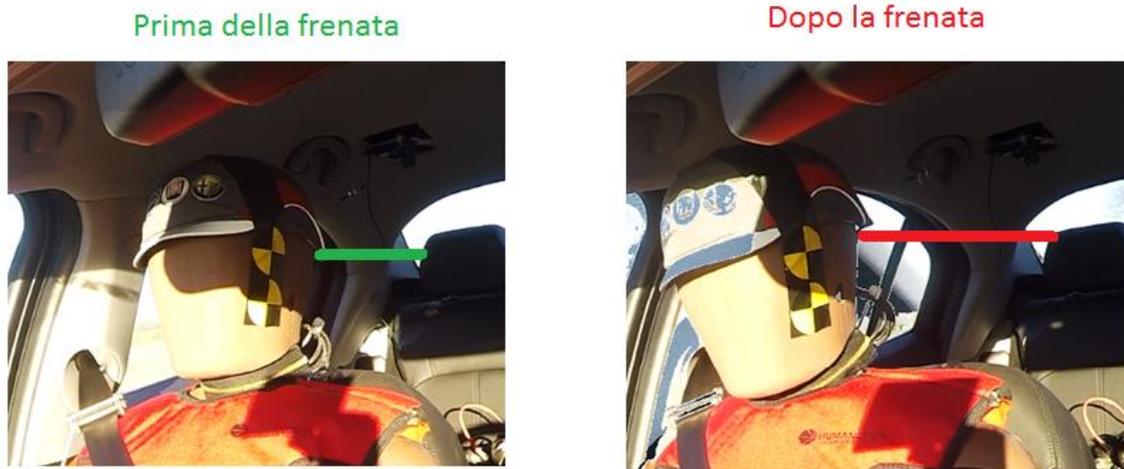


Figura 5-30: posizione della testa del THOR prima e dopo la frenata

Nel caso del THOR, che possiede una maggiore strumentazione, oltre alle accelerazioni di testa, torace e bacino, sono state registrate anche le rispettive velocità angolari.

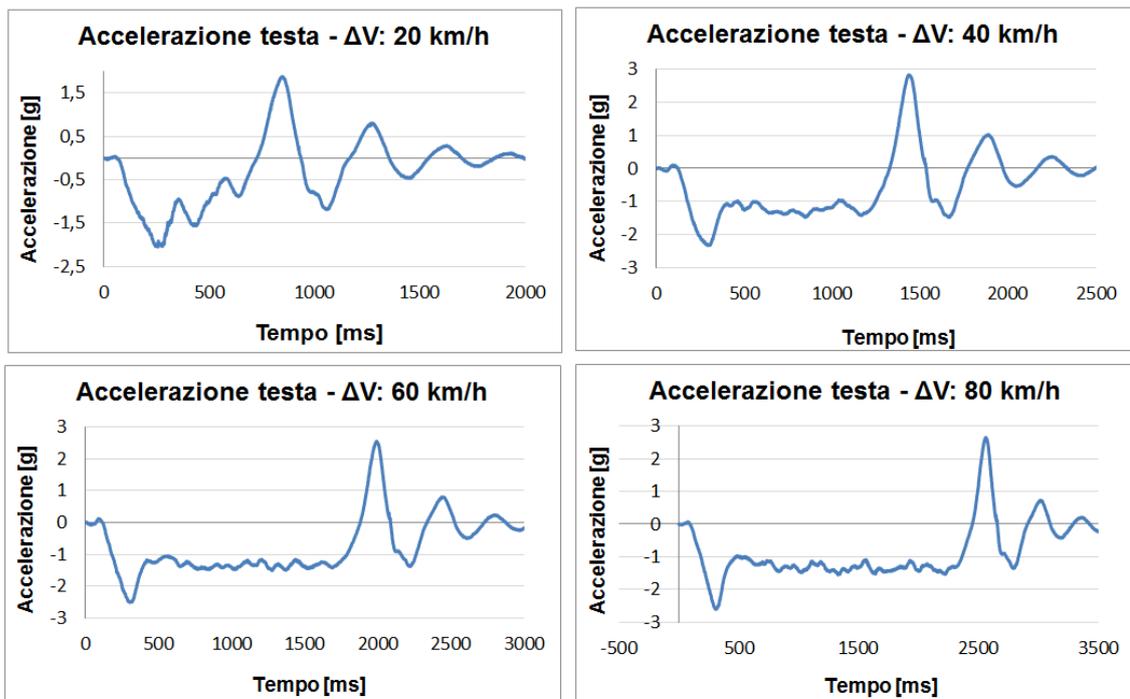


Figura 5-31: curve di accelerazione testa - THOR

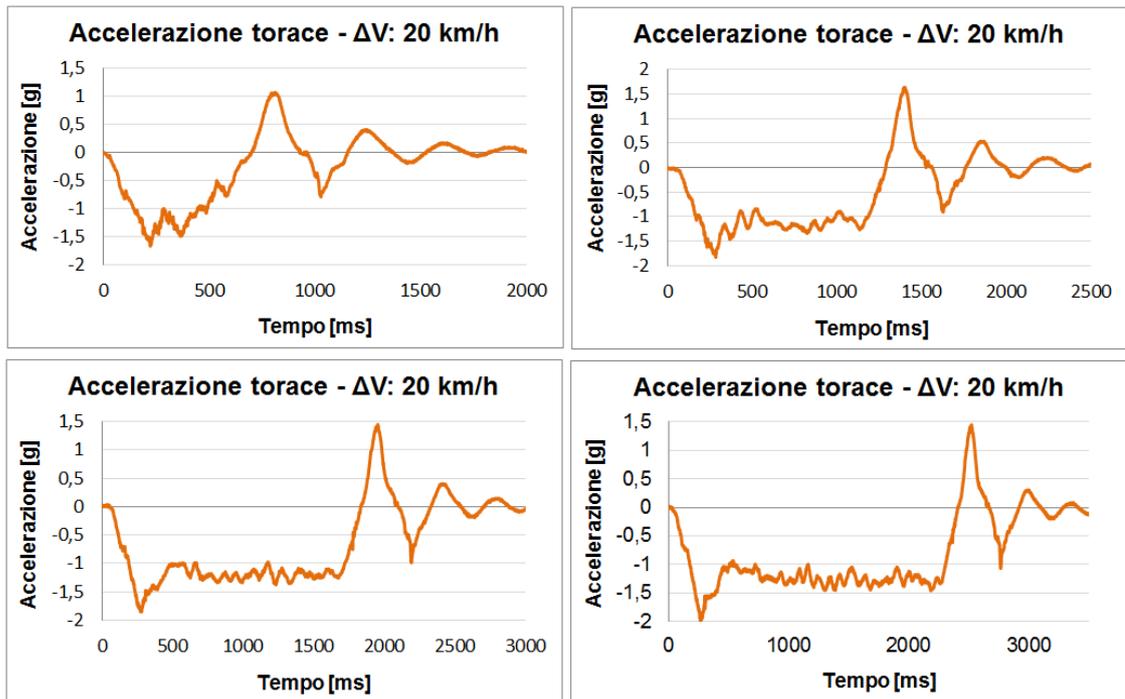


Figura 5-32: curve di accelerazione torace - THOR

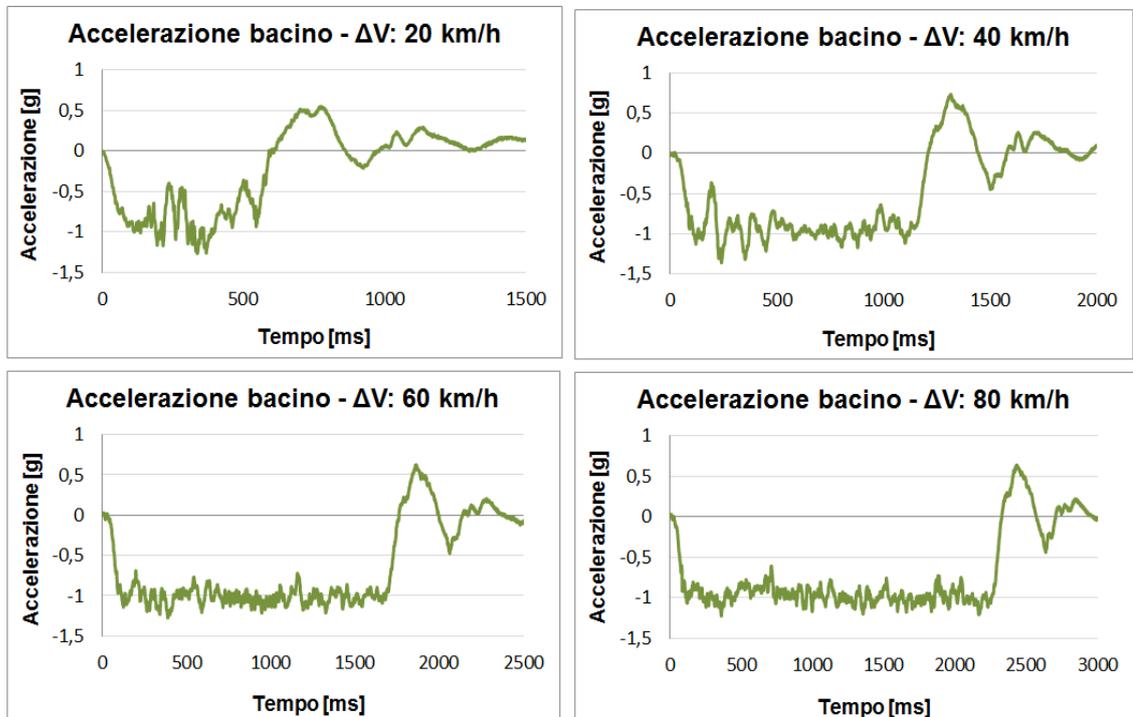


Figura 5-33: curve di accelerazione bacino - THOR

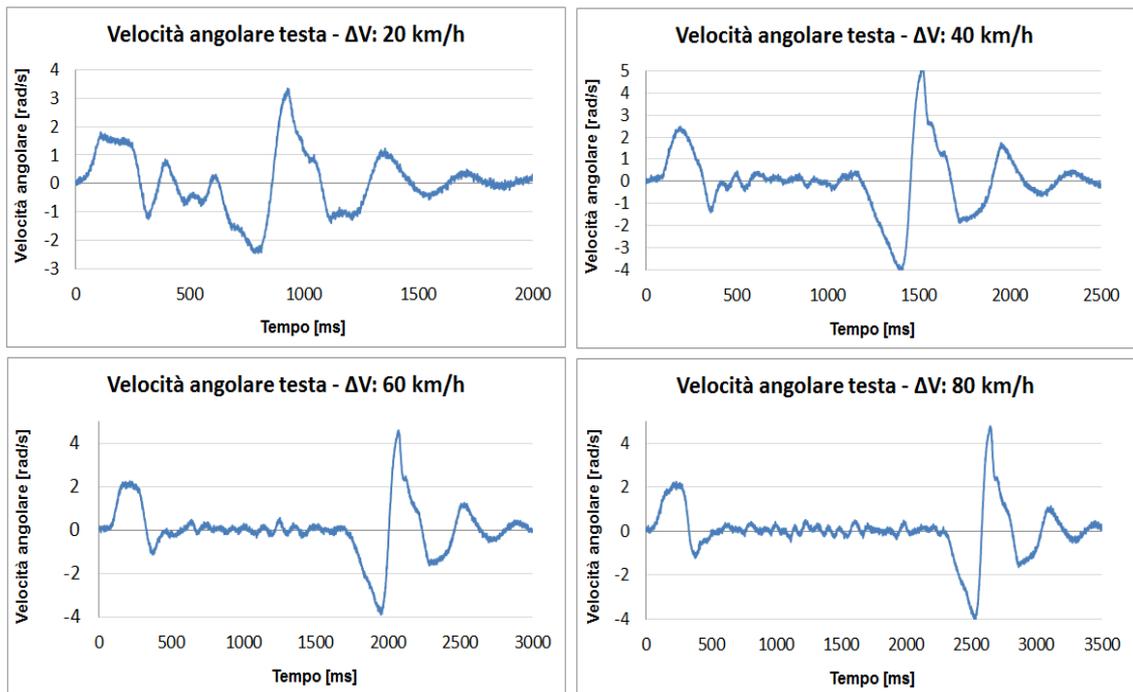


Figura 5-34: velocità angolari testa - THOR

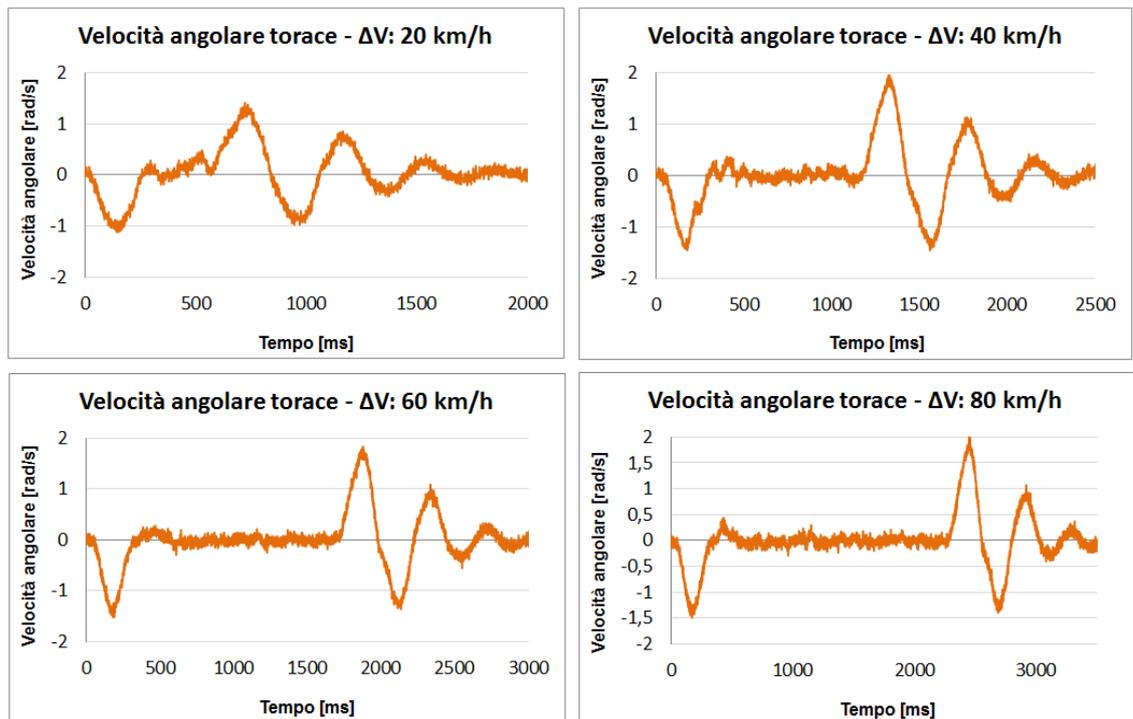


Figura 5-35: velocità angolari torace - THOR

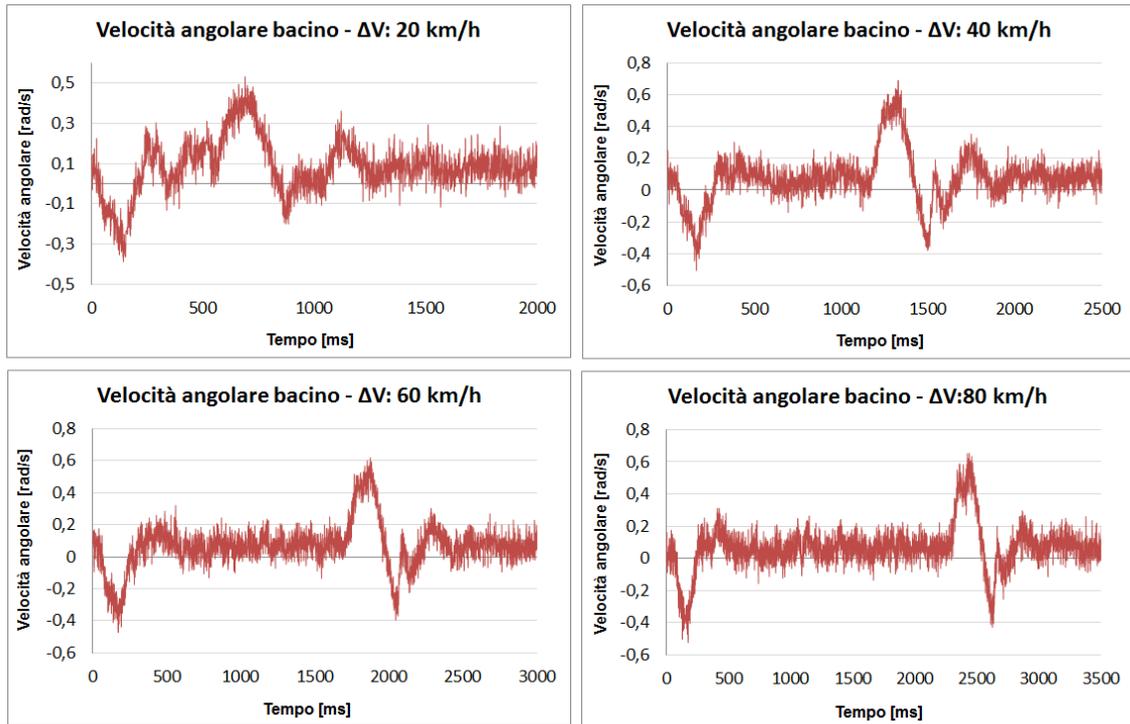


Figura 5-36: velocità angolari bacino - THOR

La forza esercitata dalla cintura di sicurezza sulla spalla è maggiore rispetto agli altri manichini, con un valore massimo di 250 N.

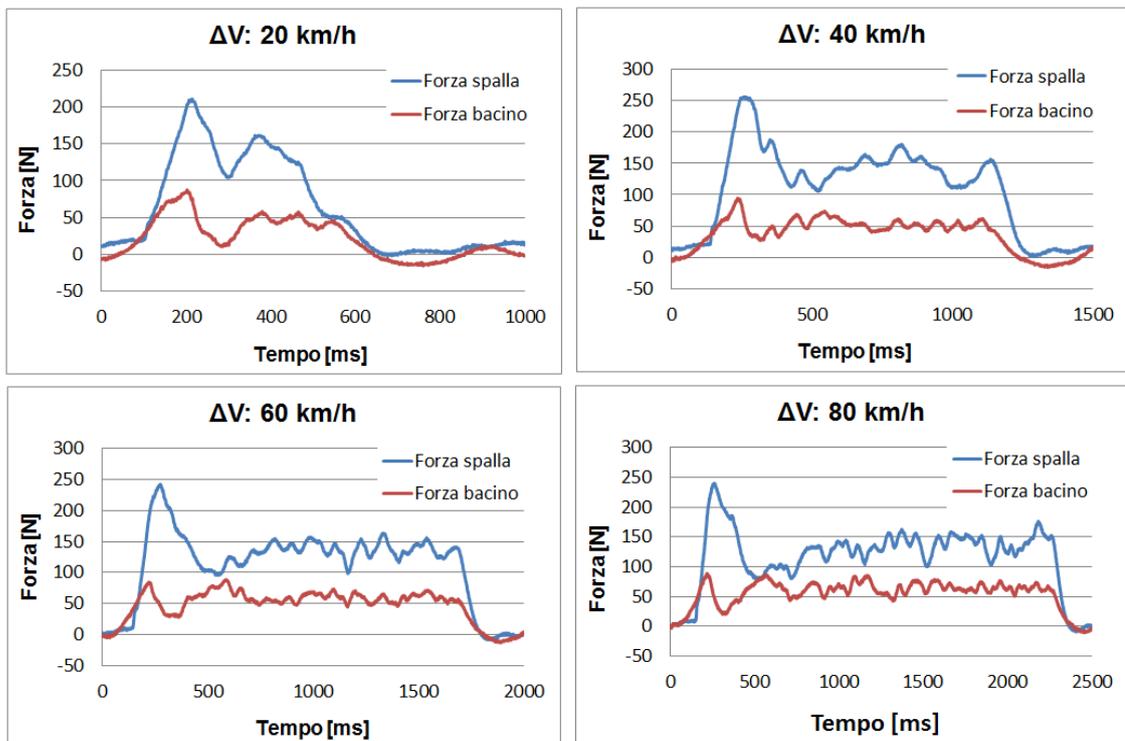


Figura 5-37: forze esercitate dalla cintura - THOR

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Nel presente capitolo verranno tratte alcune conclusioni sui dati sperimentali ottenuti e saranno esposti possibili sviluppi futuri del presente lavoro di tesi.

6.2 Conclusioni

L'analisi della cinematica dell'occupante durante la frenata di emergenza ha riportato risultati molto differenti tra l'occupante umano e i manichini da crash test. Per tutti i tipi di manichini è infatti stato rilevato un avanzamento minore, probabilmente a causa del fatto che questi non sono progettati per registrare movimenti a basse decelerazioni quanto piuttosto per reagire alle forti accelerazioni causate dall'urto.

Ciò nonostante, il manichino THOR ha però riportato un avanzamento quantitativamente più simile a quello dell'umano, a dimostrazione della sua maggiore biofedeltà rispetto all'HIII.

In particolare, il massimo avanzamento registrato per un passeggero reale risulta essere di 334 mm, contro i 157 mm del THOR e i 56 mm dell'HIII 50°; il manichino HIII 5° percentile, essendo più leggero, ha invece riportato un avanzamento maggiore (85 mm) rispetto allo stesso modello 50° percentile.

Un ulteriore fattore che potrebbe influenzare il diverso comportamento tra umano e manichino è l'aderenza tra torace e cintura: mentre il manichino possiede solo una maglietta molto aderente, il passeggero reale indossa solitamente un abbigliamento più voluminoso che potrebbe permettergli di avanzare ancora di qualche millimetro dopo che si è attivato il blocco della cintura.

Una grande variabilità è sicuramente presente anche nel comportamento del volontario umano in quanto lo stato di rilassamento o di contrazione muscolare può influire sulla cinematica dell'occupante. Nell'eseguire le prove è stato chiesto al passeggero di tenere gli occhi chiusi in modo tale che fosse il più possibile rilassato e non conoscesse l'esatto istante in cui sarebbe iniziata la frenata; ciò nonostante, l'occupante in una reale situazione pre-crash potrebbe in teoria essere ancora meno cosciente dell'imminente pericolo e quindi, essendo più rilassato, avanzare maggiormente. L'attivazione del pretensionatore elettrico poco prima della frenata di emergenza potrebbe infatti contribuire ulteriormente a limitare il movimento dell'occupante, inducendolo a contrarre la muscolatura del collo.

Per quanto riguarda le condizioni di prova, occorre innanzitutto considerare che mancano di ripetibilità ed essendo state fatte con un guidatore piuttosto che con un sistema di frenata autonoma, c'è l'incertezza introdotta dalla variabile umana. Per potere condurre un'analisi più precisa occorrerebbe poi effettuare più ripetizioni per ogni tipologia di occupante.

La vettura utilizzata per i test è inoltre un'auto sportiva in grado di raggiungere circa 1 g di decelerazione in frenata e non è rappresentativa di tutti i veicoli ma rappresenta un worst case in quanto molte delle auto maggiormente diffuse raggiungono in realtà decelerazioni minori.

Da questo set di prove sperimentali si può comunque dedurre che l'effettivo avanzamento dell'occupante sia in realtà maggiore rispetto a quanto ipotizzato con le simulazioni numeriche; il vantaggio offerto dall'utilizzo combinato di AEB e cintura motorizzata in termini di protezione dell'occupante potrebbe dunque essere superiore ai risultati ottenuti.

6.3 Sviluppi futuri

Sviluppi futuri del presente lavoro di tesi potranno essere ulteriori prove di frenata eseguite con più passeggeri reali, corrispondenti alle caratteristiche fisiche di diverse tipologie di occupante. Può inoltre essere utile condurre le prove con gli occupanti in diverso stato di contrazione muscolare (attento o rilassato), in modo tale da stabilire quanto uno stato rilassato, probabilmente più rappresentativo di una situazione reale, possa favorire l'avanzamento.

Si potrebbero poi effettuare delle prove di urto sistemando il manichino in posizione avanzata e confrontare i dati biomeccanici così ottenuti con quelli delle simulazioni numeriche.

Occorrerebbe inoltre stabilire quale sia il miglior tempo di attivazione del pretensionatore elettrico ed eventualmente valutare la modifica del tempo di sparo dell'airbag per adattarlo agli scenari pre-crash.

Bibliografia

- [1] ISTAT, «Incidenti stradali-anno 2017» 2018.
- [2] «L'Europa in movimento: la Commissione completa la sua agenda per una mobilità sicura, pulita e connessa» maggio 2018.
- [3] Humanetics, «<http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/frontal-impact>» [Online].
- [4] Humanetics, «<http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/side-impact>» [Online].
- [5] Humanetics, «<http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/rear-impact/biorid-ii>» [Online].
- [6] Humanetics, «<http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/children>» [Online].
- [7] UNECE, «R94: uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision».
- [8] UNECE, «R137 : uniform provisions concerning the approval of passenger cars in the event of a frontal collision with focus on the restraint system».
- [9] UNECE, «R95: uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision».
- [10] UNECE, «R135: uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their Pole Side Impact performance».
- [11] GlobalNCAP, «<http://www.globalncap.org/ncaps/>» [Online].
- [12] Toyota, «https://www.toyota-global.com/innovation/safety_technology/approach» [Online].
- [13] EuroNCAP, «ASSESSMENT PROTOCOL – OVERALL RATING,» 2016.
- [14] EuroNCAP, «<https://www.euroncap.com/it/info-su-euro-ncap/come-leggere-le-stelle/>» [Online].
- [15] EuroNCAP, «<https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/sicurezza-degli-adulti/>» [Online].
- [16] EuroNCAP, «<https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/sicurezza-dei-bambini/>» [Online].
- [17] EuroNCAP, «<https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/protezione-degli-utenti-vulnerabili-della-strada-vru/>» [Online].
- [18] EuroNCAP, «<https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/la-valutazione-in-dettaglio/safety-assist/>» [Online].
- [19] EuroNCAP, «Test protocol – AEB systems». 2017
- [20] EuroNCAP, «Roadmap 2025». 2017
- [21] EuroNCAP, «<https://www.euroncap.com/it/sicurezza-dei-veicoli/i-premi-in-dettaglio/>» [Online].
- [22] Volkswagen, «<https://www.volkswagen-newsroom.com/en/proactive-occupant-protection-system-3668>» [Online].
- [23] Volkswagen, «<http://inside.volkswagen.com/When-danger-comes-from-behind.html>» [Online].
- [24] Audi, «https://www.audi-technology-portal.de/en/electrics-electronics/safety-systems/audi-pre-sense_en» [Online].

- [25] Audi, «<https://www.audi-mediacenter.com/en/technology-lexicon-7180/driver-assistance-systems-7184>» [Online].
- [26] Toyota, «<https://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/305812>» [Online].
- [27] K. Matsubayashi, Y. Yamada, M. Iyoda, S. Koike, T. Kawasaki, M. Tokuda, Toyota Motor Corporation, 2007, «Development of Rear Pre-Crash Safety System For Rear-End Collisions»
- [28] Nissan, «<https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/pcs.html>» [Online].
- [29] Mercedes-Benz, «<https://www.mbusa.com/mercedes/benz/safety#module-1>,» [Online].
- [30] Mercedes-Benz, «<https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/PRE-SAFE-Brake-Automatic-emergency-braking-can-greatly-reduce-the-severity-of-a-head-to-tail-crash.xhtml?oid=9361528>,» [Online].
- [31] Mercedes-Benz, «<https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/innovation/protection-in-accident-scenarios-mercedes-benz-pre-safe/>,» [Online].
- [32] R. Schöneburg, M. Paurevic, M. Fehring, J. Richert, R. Bogenrieder, Daimler AG, 2015, «Evaluation of Occupant Protection Systems: FROM A PREVENTIVE TO A PRE-IMPACTING RESTRAINT SYSTEM»
- [33] EuroNCAP, «<https://www.euroncap.com/it/valutazioni-e-premi/premi-euro-ncap-advanced/2010-honda-collision-mitigation-brake-system/>,» [Online].
- [34] Technical coaching, Luigi Pisellini. 2014
- [35] Tass International, «<https://tass.plm.automation.siemens.com/madymo>,» [Online].

Ringraziamenti

Giunta al termine del mio percorso universitario, voglio ringraziare tutti coloro che hanno contribuito al raggiungimento di questo ambito traguardo.

Ringrazio prima di tutto i miei genitori che credono sempre in me e mi hanno permesso di raggiungere il mio obiettivo, sostenendo le mie scelte e supportandomi con il loro affetto.

Un ringraziamento speciale va a Davide che mi è sempre stato vicino e con infinita pazienza mi ha supportata ma soprattutto sopportata nei momenti più difficili, dispensando sempre buoni consigli.

Un grazie anche ai miei compagni di studio che con la loro presenza e l'aiuto reciproco hanno permesso di alleggerire questi anni di università rendendoli un'esperienza unica.

Vorrei infine ringraziare tutti coloro che accogliendomi al centro sicurezza FCA mi hanno aiutata nella realizzazione di questa tesi.

Un primo ringraziamento va ad Alessio, che con gentilezza e disponibilità mi ha accompagnata ed aiutata durante l'intero percorso.

Un grazie a tutto l'ufficio BOP che mi ha accolta con entusiasmo e simpatia, facendomi sempre sentire a mio agio.

Un grande ringraziamento va inoltre a Giorgio e a Marco, per il loro prezioso aiuto.

