

9. Banco prova per esperimenti di rovesciamento statici e dinamici

Per motivi di sicurezza, durante le prove di marcia sul circuito di prova della Linde S.p.A., abbiamo limitato l'angolo di rovesciamento del veicolo di prova a 15°. Le riprese video di questa serie di prova permette quindi di valutare i movimenti dell'operatore soltanto fino a questo angolo di rovesciamento. La verifica della sequenza dei movimenti oltre 15° è tuttavia inammissibile per un controllo funzionale di dispositivi di sicurezza. Da questa serie di considerazioni è scaturita l'idea di realizzare un'attrezzatura di prova che permette delle ricerche più spinte.

Tutte le sperimentazioni e le serie di prove finora svolte relativamente al comportamento di rovesciamento e alle sequenze di movimenti del carrello elevatore con operatore a bordo o non abbracciano l'intero processo di rovesciamento, o sono poco indicativi, in quanto al posto dell'operatore viene impiegato un manichino. La tabella 9.1 riporta un compendio delle diverse serie di prove svolte nelle singole condizioni di prove.

Tavola sinottica dei procedimenti di prova finora adottati nell'ambito dei carrelli elevatori			
no.	ciclo di prova	condizioni della prova	obbiettivi della prova
DIN 15138			
1	(prova statica) rovesciamento di un carrello elevatore partendo da fermo	senza operatore e senza manichino con un carico di prova ad un'altezza di sollevamento considerevole	verifica della stabilità in senso longitudinale
2	(prova statica) rovesciamento di un carrello elevatore partendo da fermo	senza operatore e senza manichino con un carico di prova all'altezza di sollevamento prescritta	verifica della stabilità in senso longitudinale
3	(prova statica) rovesciamento di un carrello elevatore partendo da fermo	senza operatore e senza manichino con un carico di prova ad un'altezza di sollevamento considerevole	verifica della stabilità in senso longitudinale
4	(prova dinamica) rovesciamento di un carrello elevatore in marcia	senza operatore, senza manichino e senza carico di prova	verifica della stabilità in senso trasversale
Studi della Hyster Company			
1	(prova statica) rovesciamento laterale statico (rovesciamento da fermo) di un carrello elevatore con pedana di rovesciamento e di trattenimento	con operatore e con manichino angolo di rovesciamento: da 0 a 90 ° velocità: 0 km/h	sequenza dei movimenti dell'operatore durante il rovesciamento. Modalità di azione dei sistemi di trattenimento. Prova di diversi tipi di sedile.
2	(prova dinamica) sterzata in curva rovesciamento laterale dinamico di un carrello elevatore: con velocità al di sotto e al di sopra del limite di rovesciamento	con manichino raggio della curva: ca. 5 m velocità di sterzata in curva: da 19 a 24 km/h	sequenza dei movimenti dell'operatore durante il rovesciamento. Modalità di azione dei sistemi di trattenimento. Prova di diversi tipi di sedile.
3	(prova dinamica in rampa) superamento di un bordo di una rampa (in retromarcia e in avanti)	senza operatore, ma con manichino angolo di spunto: 90 e 60° altezza rampa: 1,3 m velocità: ca. 5 km/h	verifica del tipo di incidente: incidenti in rampa. Modalità di intervento delle cinture di sicurezza.
4	(prova statica in rampa) rovesciamento statico di un carrello elevatore sul suo asse trasversale nell'area della rampa	senza operatore, ma con manichino altezza rampa: 1,3 m velocità: 0 km/h	verifica del tipo di incidente: incidenti in rampa. Modalità di intervento delle cinture
5	simulazione a computer per il rovesciamento laterale		andamento velocità ed accelerazione durante il processo di rovesciamento. Sequenza di movimenti dell'operatore.

Tavola sinottica dei procedimenti di prova finora adottati nell'ambito dei carrelli elevatori			
no.	ciclo di prova	condizioni della prova	obiettivi della prova
prove del laboratorio FTL in collaborazione con la Linde S.p.A.			
1	(prova dinamica) descrizione di un cerchio sul posto (in retromarcia e in avanti) con un dispositivo di sostegno	con operatore raggio di curva: 3,5 m / 5,5 m velocità in curva: da 14 a 18,5 km/h angolo di rovesciamento: ca. 15°	sequenza dei movimenti dell'operatore durante la descrizione di un cerchio. Modalità di azione dei sistemi di trattenimento. Prove di diversi tipi di sedili.
2	(prova dinamica) sterzata in curva con un carrello elevatore dotato di dispositivo di sostegno	con operatore raggio di curva: da ca. 4 m a 8 m velocità in curva: da 16,5 a 26 km/h angolo di rovesciamento: ca. 15°	sequenza di movimenti dell'operatore durante la descrizione del cerchio. Modalità di azione dei sistemi di trattenimento. Prove di diversi tipi di sedili.

Tabella 9.1: serie di prove e relative condizioni in cui sono state effettuate relativamente allo studio del rovesciamento di carrelli elevatori a forche.

La tabella evidenzia la necessità di effettuare altri studi di rovesciamento con l'operatore, per la sequenza dei movimenti durante l'intero processo di rovesciamento ed individuare i punti deboli dei sistemi di trattenimento.

9.1 Concezione e struttura del banco di prova

Nella prima fase di sviluppo abbiamo messo a confronto alcune proposte ed abbiamo elencato le possibilità di esecuzione di un'attrezzatura di prova (tabella 9.2). Nel fare ciò abbiamo operato una distinzione tra le attrezzature di prova statiche e dinamiche. Altri criteri sono stati la velocità raggiungibile e quindi l'accelerazione trasversale ottenibile, l'angolo di rovesciamento, le prove di marcia possibili ovvero quelle simulabili e la valutazione, se fosse meglio impiegare un manichino od un operatore per effettuare le prove stesse.

Un compendio dei diversi approcci all'attrezzatura di prova ed ai relativi parametri è riportato alla tabella 9.2.

rezzature per prove		dinamiche																			
liche relo vatore	dispositivo di ribalta- mento sedile	carrello elevatore		carrello con dispositivo di sostegno		carrello elevatore telecomandato		giostra con elevatore carrello		giostra con dispositivo di ribaltamento sedile		carrello su traiettoria circolare condotta		carrello su traiettoria circolare condotta e dispositivo di ribaltamento sedile		sistema a curve / binari					
		$V < V_{rovesc}$	$a < a_{rovesc}$	$0 - V_{rovesc}$	$0 - a_{rovesc}$	V_{rovesc}	a_{rovesc}	$0 - V_{rovesc}$	$0 - a_{rovesc}$	V_{rovesc}	a_{rovesc}	$0 - V_{rovesc}$	$0 - a_{rovesc}$	$0 - V_{rovesc}$	$0 - a_{rovesc}$	V_{rovesc}	a_{rovesc}	$0 - V_{rovesc}$	$0 - a_{rovesc}$	V_{rovesc}	a_{rovesc}
-	-	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: regolabile	a, v: fissi per ciascuna unità di prova	a, v: fissi per ciascuna unità di prova	a, v: fissi per ciascuna unità di prova	a, v: fissi per ciascuna unità di prova	a, v: fissi per ciascuna unità di prova	a, v: fissi per ciascuna unità di prova	a, v: fissi per ciascuna unità di prova
$\gamma = 0 - 90^\circ$ operatore/ manichino	$\gamma = 0 - 90^\circ$ operatore/ manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore	$\gamma = 0^\circ$ operatore	$\gamma = 0^\circ$ operatore	$\gamma = 0^\circ$ operatore	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0^\circ$ operatore / manichino	$\gamma = 0 - 90^\circ$ operatore/ manichino
		descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	descrizione di un cerchio sul posto	sterzata in curva
		sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva	sterzata in curva
		frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva	frenatura in curva

velocità; a = accelerazione trasversale; γ = angolo di rovesciamento

bella 9.2: Soluzioni di attrezzature per prove

Con un'attrezzatura di prova si devono riprodurre prove di rovesciamento statiche e dinamiche, nonché la manovra "descrizione di un cerchio sul posto" e, se possibile, anche "sterzata in curva". Le prove dovrebbero fornire indicazioni in merito a:

- effetto dei sistemi di trattenimento nella situazione di incidente rovesciamento
- sperimentazione di differenti sedili di guida e di nuove soluzioni
- sperimentazione di accessori applicati al posto guida (poggia-spalle, poggia-fianchi e braccioli)
- sequenza dei movimenti dell'operatore impegnato nella prova durante lo svolgimento dell'incidente
- misurazione di velocità, accelerazioni e forze
- determinazione dell'attimo in cui l'operatore si distacca dal sedile durante il processo di rovesciamento

Visti i requisiti per il banco prova, in un primo stadio del progetto abbiamo scelto una piattaforma come segmento di un disco rotante, su cui si trova un dispositivo di ribaltamento del sedile. Tale dispositivo può ribaltarsi da 0 a 90°, per effetto della forza centrifuga. L'angolo di rovesciamento viene limitato da un dispositivo di trattenimento. Come unità di azionamento sono state in esame diverse possibilità. Tutte le soluzioni provenivano inizialmente dal settore dei parchi divertimento e dalle giostre. È stato previsto un motoriduttore al centro. Un'altra soluzione sarebbe potuta essere un disco rotante azionato da rulli di scorrimento. Alla fig. 9.3 è riportato il primo bozzetto di un'attrezzatura per prove.

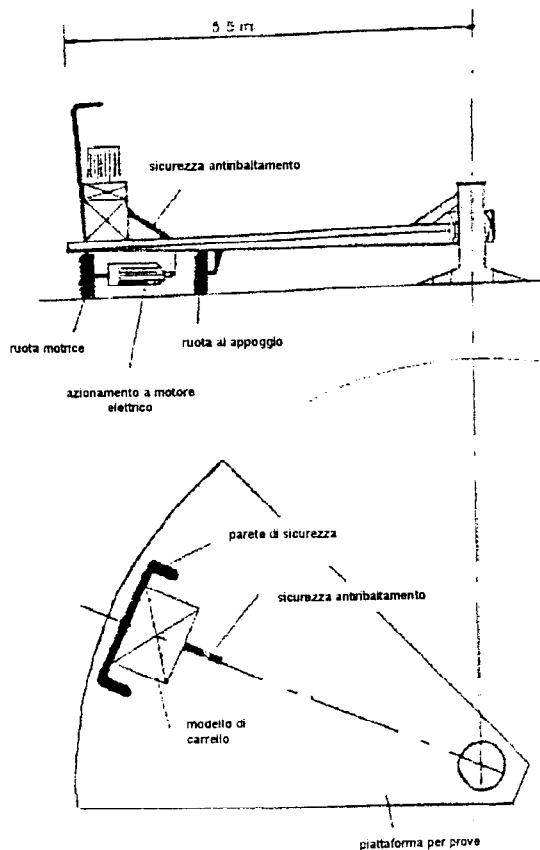


Fig. 9.3: Primo bozzetto di una piattaforma rotante per prove

Quando si è cominciato a riflettere sulla realizzazione del banco prova, si è pensato di incaricare una ditta specializzata con esperienza nella costruzione di giostrine della progettazione di dettaglio e del montaggio. Visti i costi (quotazione stimata ca. DM 140.000,-) , l'ipotesi è stata scartata e di conseguenza anche il primo bozzetto.

Considerando che l'azionamento copre la voce principale dei costi, abbiamo deciso di impiegare un carrello elevatore a forche come azionamento, e preferibilmente un carrello elettrico.

Con questo approccio sono stati sviluppati due bozzetti differenti. Nel bozzetto illustrato a fig. 9.4 il carrello viene accoppiato ad una colonna centrale per mezzo di tiranteria, per evitare che il carrello si spezzi compiendo delle curve a velocità sostenuta. Le possibilità di analisi in riferimento alla sequenza dei movimenti dell'operatore sono ovviamente limitate, in quanto l'accelerazione trasversale ottenibile dipende dalla massima velocità del carrello e non è possibile simulare un rovesciamento. Si dovrebbe posizionare un dispositivo di ribaltamento sul montante, di modo che un operatore azioni il carrello ed un'altra persona partecipi alla prova a bordo del dispositivo di ribaltamento sulle forche. Anche in questo caso l'accelerazione trasversale troppo ridotta impedisce la simulazione di un carrello elevatore mediante questo dispositivo di rovesciamento.

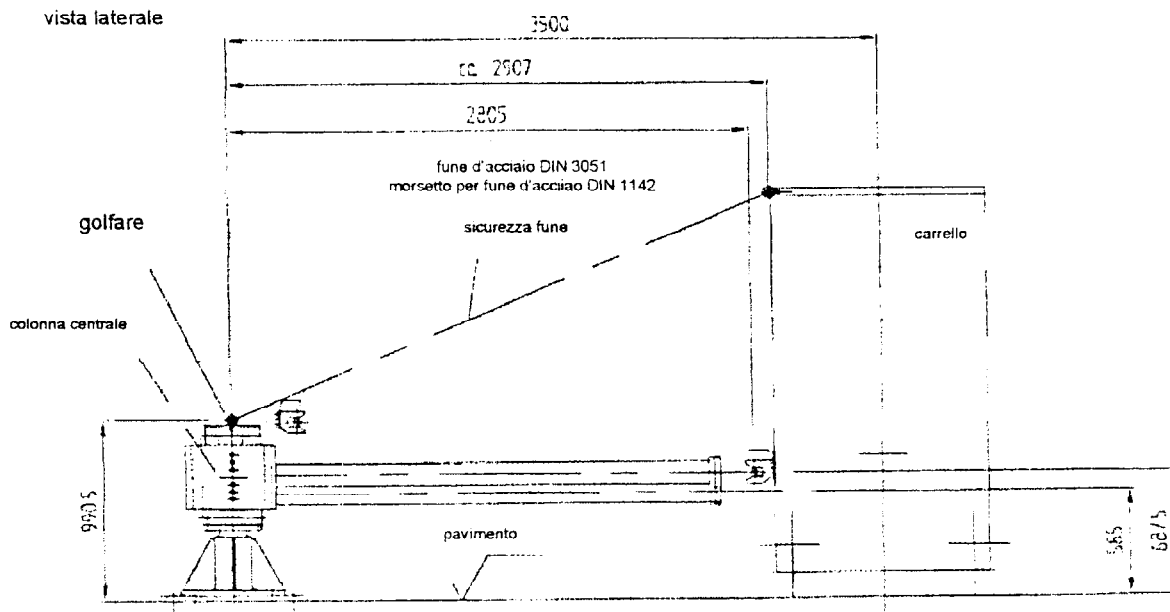


Fig. 9.4: Bozzetto 2: banco prova con carrello condotto

Nel bozzetto riportato alla fig. 9.5 il carrello viene accoppiato ad una colonna centrale ed anche ad una piattaforma posta di fronte al carrello stesso. Su questa piattaforma si trovano un dispositivo di ribaltamento ed un di dispositivo di trattenimento per limitare l'angolo di rovesciamento. Il vantaggio rispetto al progetto della fig. 9.4 consiste nel fatto che il carrello può descrivere un raggio più piccolo del dispositivo di ribaltamento. Ciò comporta che l'accelerazione trasversale sul dispositivo di ribaltamento sia maggiore che non sul carrello e si possano effettuare prove di rovesciamento senza sottoporre il carrello elevatore ad accelerazioni trasversali critiche.

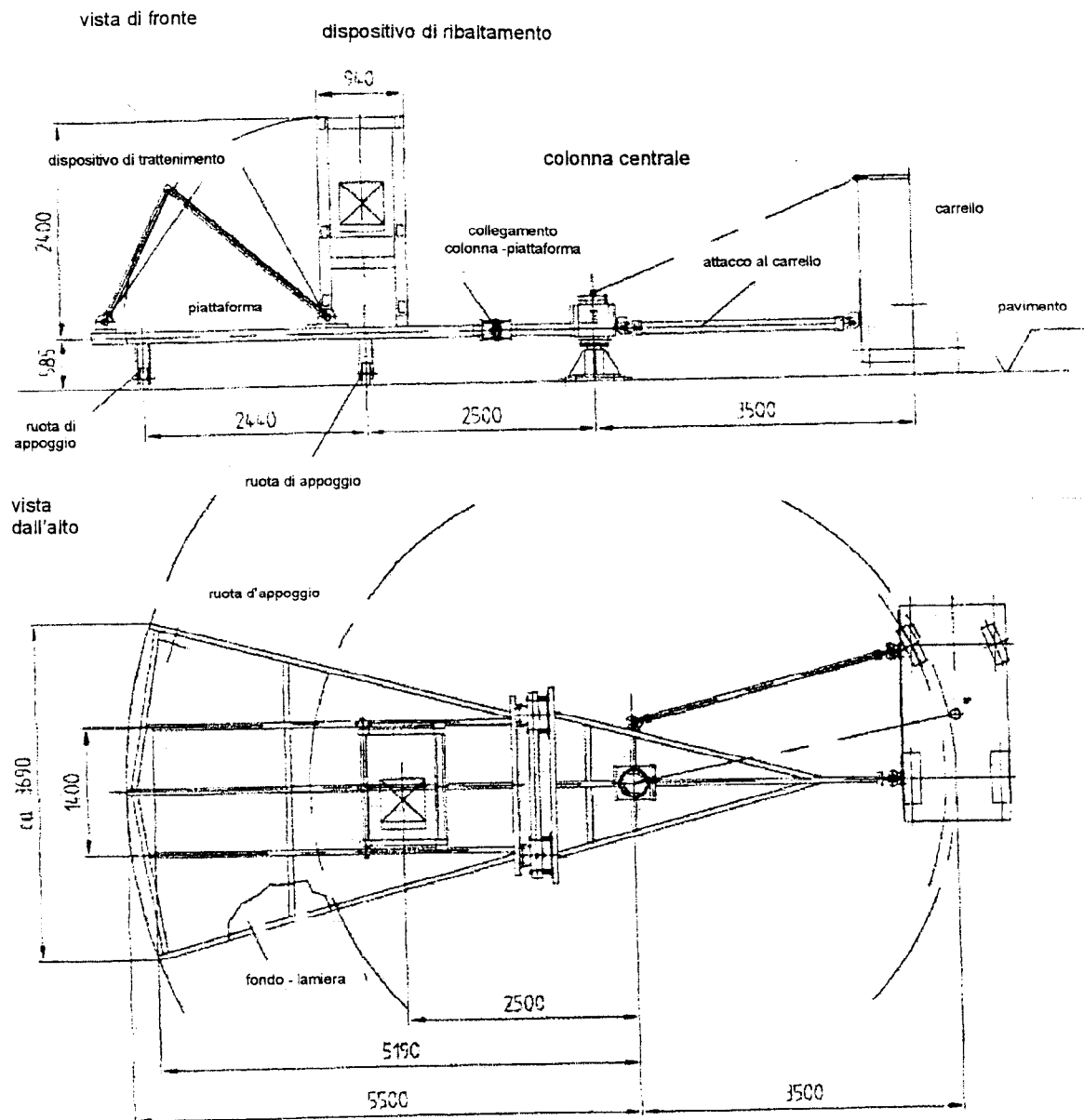


Fig. 9.5: Bozzetto 3: banco prova con carrello condotto e dispositivo di ribaltamento

Lo schema di azionamento che prevedeva un carrello elevatore secondo il bozzetto 3 appariva troppo costoso, a dispetto di tutti i vantaggi individuati, per cui si è sviluppato un quarto bozzetto in cui di un carrello elevatore elettrico rimaneva solo l'assale traente ed una batteria per l'alimentazione di corrente a fare da unità motrice. L'assale traente può essere montato a questo punto direttamente sotto la piattaforma del dispositivo di ribaltamento, e anche per la batteria c'è spazio sufficiente sulla piattaforma. L'intero braccio con il carrello sul lato opposto alla piattaforma può essere di conseguenza eliminato. Contemporaneamente si faceva strada l'idea di rendere mobile il dispositivo di ribaltamento sulla piattaforma in modo che durante la descrizione del cerchio il dispositivo di ribaltamento potesse essere spostato verso il centro del raggio, per simulare la manovra di marcia "sterzata in curva". Questo bozzetto è illustrato alla fig. 9.6. Tuttavia, per il dispositivo di ribaltamento mobile bisogna procurare un azionamento a sé stante. Anche l'aspetto della sicurezza per l'operatore di prova non era stato chiarito, per cui anche questa soluzione veniva momentaneamente accantonata.

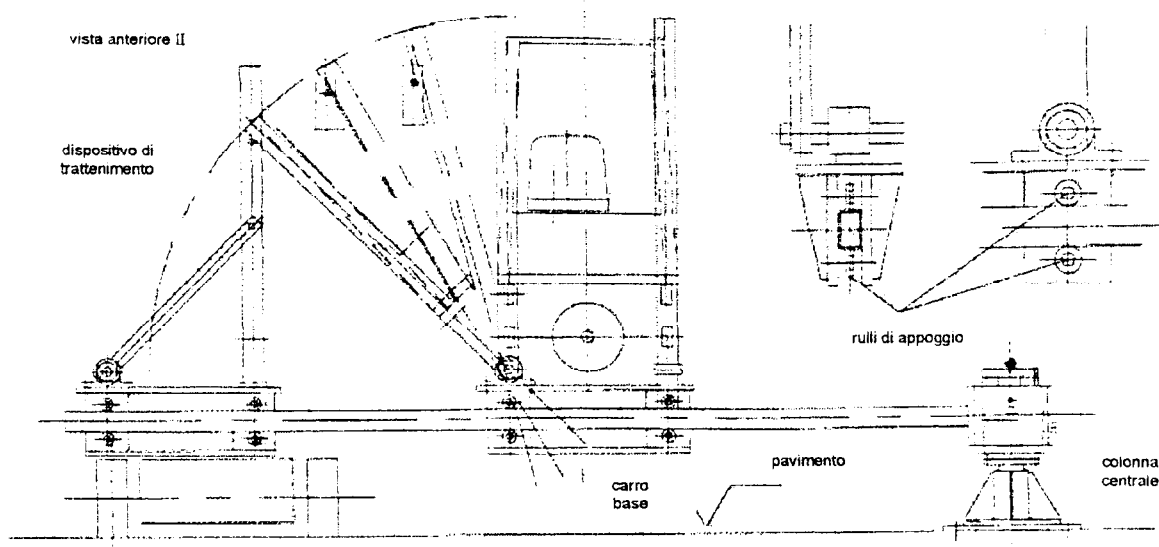


Fig. 9.6: Bozzetto 4: banco prova con assale motore e dispositivo di ribaltamento mobile

Il bozzetto definitivo assomigliava moltissimo al bozzetto 4, ma senza il dispositivo di ribaltamento mobile. La versione provvisoria è costituita da una piattaforma – montata su un asse di rotazione – un dispositivo di ribaltamento con relativo dispositivo di trattenimento – con cui si possono ottenere diversi angoli di rovesciamento a passi di 15° - un assale motore, due ruote di appoggio ed una batteria.

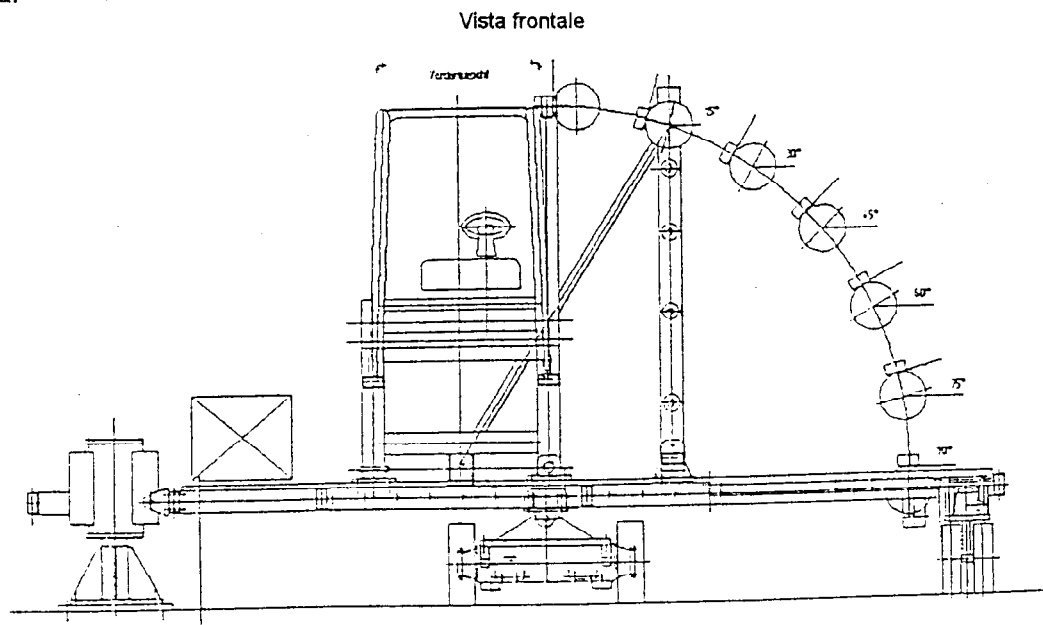


Fig. 9.7: Bozzetto 5: banco prova

Per questo bozzetto la Linde S.p.A. ha messo a disposizione dei componenti di un carrello elettrico della famiglia E 16. Più precisamente si trattava di:

- una cabina di guida con collegamento per il controllo pilota del motore
- un assale motore
- due ruotini di appoggio

L'alimentazione di energia è stata fornita da una batteria (modello 4PzW 400WF) messa gentilmente a disposizione dalla *Varta S.p.A.* a titolo di promozione del progetto di ricerca.

La figura seguente mostra il banco prova completamente montato. La corrente pilota viene trasferita alla sezione di potenza dell'assale motore mediante un supporto ad anello collettore montato sulla colonna centrale. Esiste la possibilità di azionare il banco prova anche dal carrello. Da entrambe le posizioni, sia dal posto di guida che dal pulpito di comando esiste la possibilità di interrompere l'alimentazione di corrente in caso di emergenza mediante un apposito interruttore. Per altri motivi di sicurezza è possibile effettuare una frenatura di emergenza, vale a dire che l'alimentazione di energia non viene interrotta, bensì la corrente di marcia viene invertita, di modo che si verifichi un immediato rallentamento del dispositivo di prova.

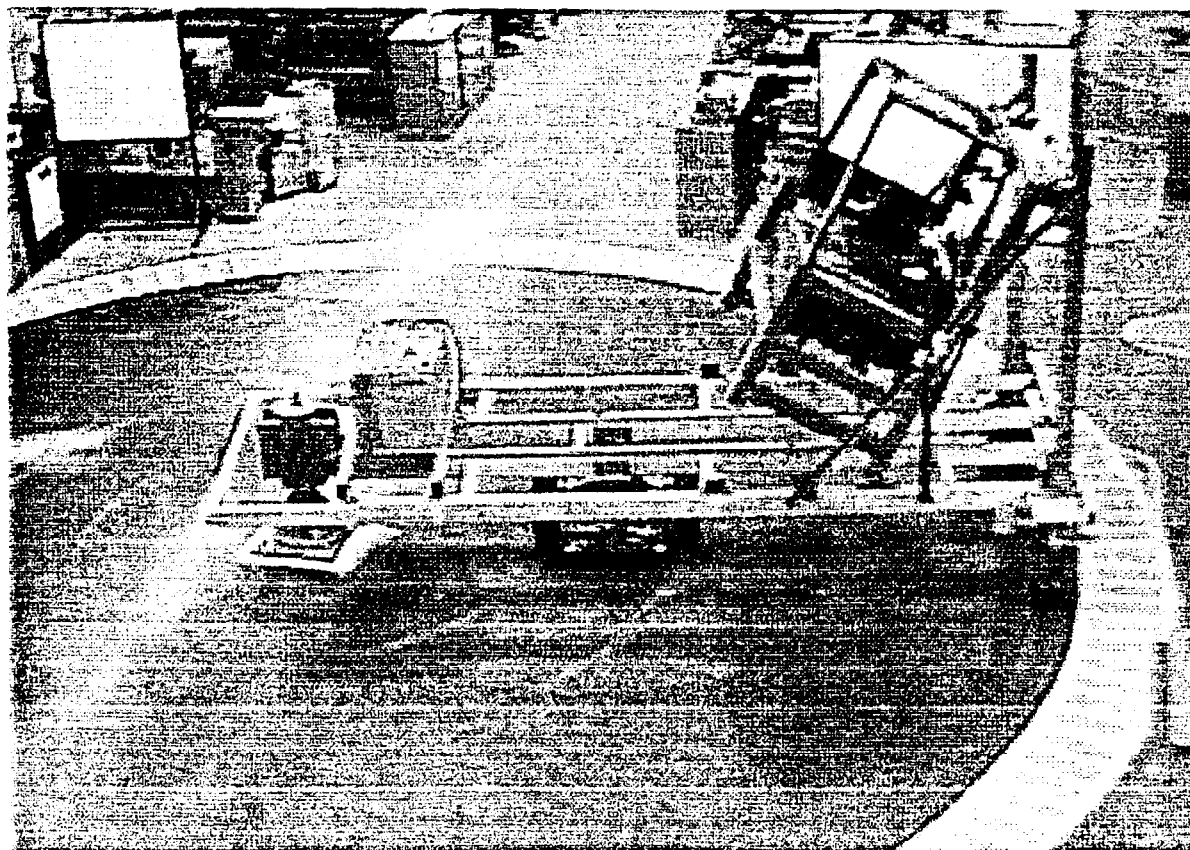


Fig. 9.3: banco prova nel laboratorio di tecnologie di produzione dell'Università di Duisburg

9.2 Valutazione cinematica del banco prova

L'assale motore del dispositivo di prova è ricavato da un carrello elettrico della famiglia E16 ed è dichiarato con una velocità massima di 15,3 km/h senza carico. L'assale è stato montato con una distanza del punto medio dalla colonna centrale di 2400 mm. Le velocità periferiche raggiungibili per la piattaforma sono quindi in funzione del posizionamento dell'assale e quindi della velocità angolare. Più vicino al centro del raggio è montato l'assale, maggiori saranno le velocità angolari ottenibili. La relazione tra la distanza del punto centrale dell'assale e la velocità angolare viene esemplificata dal diagramma 9.1. Le velocità angolari raggiungibili sono valori massimi, dato che nella funzione è stata impiegata la velocità massima dell'assale motore.

Il calcolo della velocità angolare per la piattaforma si ottiene da: $\omega = \frac{v_{\text{azionamento}}}{r_{\text{azionamento}}}$

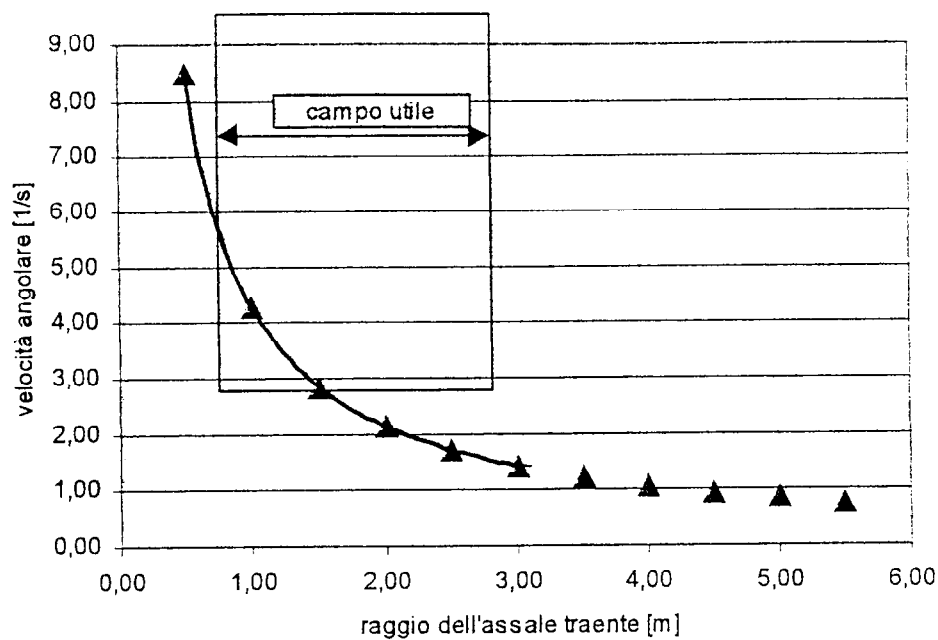


Diagramma 9.1: velocità angolare massima raggiungibile in funzione della distanza dal centro dell'assale motore

L'assale motore può essere posizionato con una distanza del centro compresa tra 1500 e 4500 mm. In funzione di ciò si ottengono velocità angolari da $2,83 \text{ s}^{-1}$ a $0,94 \text{ s}^{-1}$. Sulla base delle velocità angolari si possono determinare a questo punto le velocità periferiche con cui il dispositivo di ribaltamento si muove lungo la traiettoria circolare. La velocità periferica del dispositivo di ribaltamento è in funzione dalla sua posizione sulla piattaforma nonché dalla velocità angolare massima raggiungibile, vale a dire del posizionamento dell'assale motore, come mostrato al diagramma 9.1. Il diagramma 9.2 che segue mostra l'interrelazione tra le distanze del punto centrale del dispositivo di ribaltamento e dell'azionamento e le velocità periferiche massime possibili del dispositivo di ribaltamento.

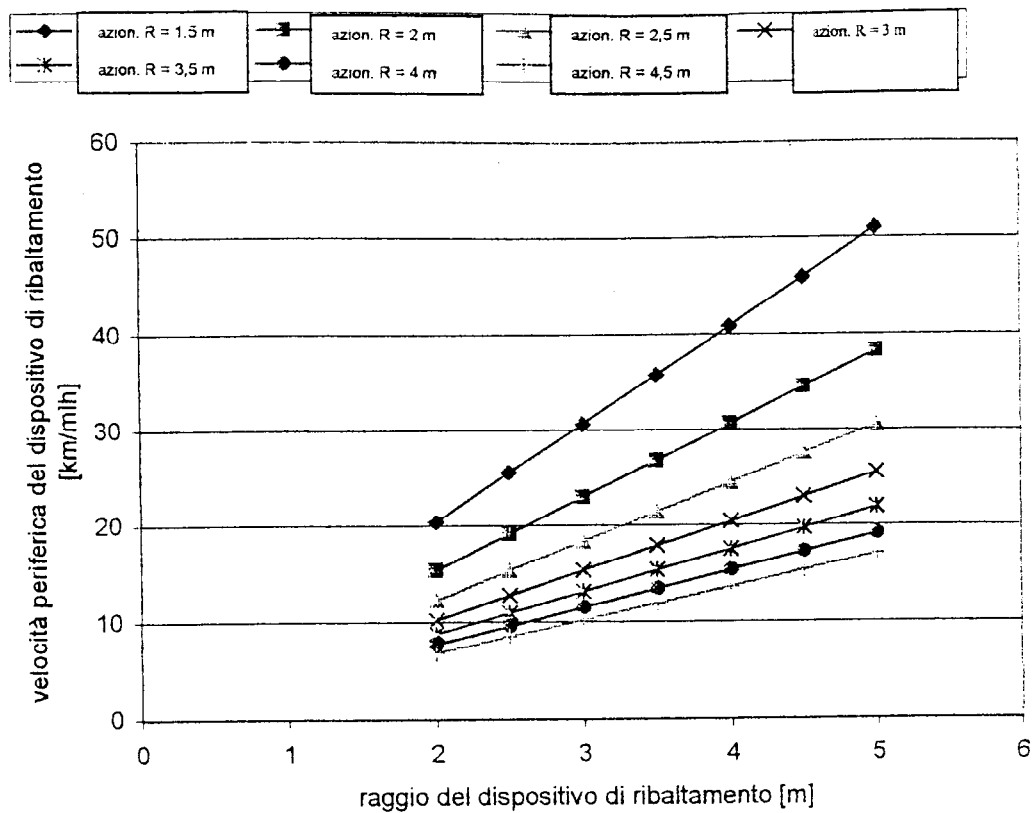


Diagramma 9.2: velocità periferiche massime del dispositivo di ribaltamento in funzione del posizionamento sulla piattaforma e della distanza dell'azionamento dal centro del cerchio

La massima velocità periferica è teoricamente intorno a ca. 50 km/h sul bordo più esterno della piattaforma. All'altezza del sedile dell'operatore il banco prova, con un raggio di 4,4 m rispetto alla colonna centrale ed applicando l'assale motore a 2500 mm dal punto di rotazione, raggiunge una velocità periferica di ca. 25 km/h, ciò che corrisponde ad un'accelerazione trasversale di ca. 1,1 g. Per inclinare la cabina il dispositivo di ribaltamento necessita di un'accelerazione trasversale di almeno 0,45 g, a seconda dell'altezza del baricentro impostata. Al diagramma 9.3 è mostrato, con le stesse modalità del diagramma 9.2, la relazione tra il posizionamento del dispositivo di ribaltamento e dell'azionamento e l'accelerazione trasversale.

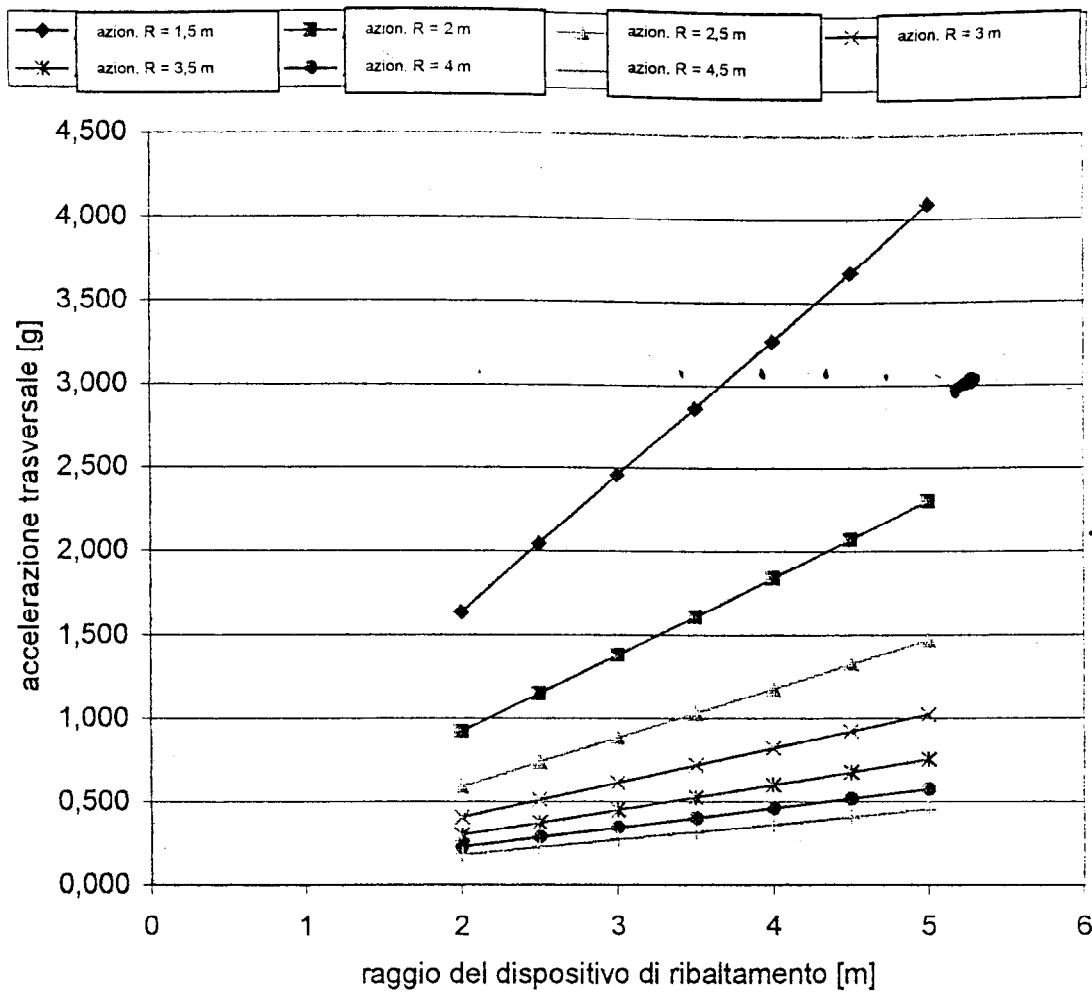


Diagramma 9.3: accelerazioni trasversali massime del dispositivo di ribaltamento in funzione del posizionamento sulla piattaforma e dalla distanza dell'azionamento del centro del cerchio.

9.3 Prove di rovesciamento statiche e dinamiche per determinare le accelerazioni durante il rovesciamento

9.3.1 Struttura della prova

Per determinare le accelerazioni durante il ribaltamento della cabina sul banco prova sono state condotte due prove durante le quali sono state registrate la velocità della piattaforma, l'angolo di rovesciamento e le accelerazioni sui tre assi.

Prova 1: rovesciamento statico fino a 90° senza marcia: misurazione delle componenti dinamiche di accelerazione durante il rovesciamento dal punto morto (27,5°)

Prova 2: descrizione di un cerchio con rovesciamento dinamico fino a 90°: misurazione delle accelerazioni totali con una marcia con accelerazione costante dalla condizione di fermo fino al rovesciamento.

Misurazione della velocità

La velocità angolare istantanea ω_P della piattaforma rappresenta l'unità grandezza di misura che descriva direttamente la condizione di marcia e da cui è possibile teoricamente calcolare tutte le altre grandezze di misura. Conoscendo ω_P si ottiene la velocità di marcia del dispositivo di ribaltamento oppure anche la velocità di traiettoria di un qualsiasi punto P con il raggio r_P dall'asse di rotazione sulla piattaforma oppure della cabina di guida rispetto a

$$V_P = r_P * \omega_P \quad (9.1)$$

Per determinare ω_P viene misurata l'accelerazione trasversale $a_{\text{trasversale, esterna}}$ che agisce nel punto più lontano dalla mezzeria della piattaforma. Da essa si ricava con la distanza del sensore dall'asse di rotazione $r_a = 4900 \text{ mm}$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{a_{q^*a}}{r_a}} \quad (9.2)$$

Con queste relazioni è possibile rappresentare V_P direttamente come funzione della grandezza di misura $a_{\text{trasversale, esterna}}$

$$V_P = r_P * \sqrt{\frac{a_{q^*a}}{r_a}} \quad (9.3)$$

Misurazione dell'accelerazione

Per la rilevazione delle accelerazioni che agiscono effettivamente in un determinato punto della cabina di guida è disponibile un registratore di accelerazione su tre assi K-Beam 8390A2 della Kistler Instrument Corporation che funziona su base capacitiva e per ciascuno dei tre assi dà una tensione proporzionale all'accelerazione, che al contrario del B12/500 viene applicata direttamente alle entrate analogiche della registrazione dei valori misurati.

Misurazione dell'angolo di rovesciamento

Per la misurazione della corsa viene impiegato un registratore di corsa analogico a cavo della ditta ASM con la sigla WS2.1-2500-10V-L10. La relazione tra la tensione emessa dal registratore di corsa e l'angolo istantaneo di rovesciamento è stabilita tramite una tabella di interpolazione, che è stata formulata con l'ausilio di un comparatore angolare ottico.

I sensori sopra descritti ricevono la propria tensione di alimentazione da fonti differenti. L'amplificatore di misura ad alta frequenza alimenta il registratore di accelerazione uniassiale B 12/500 con una tensione di alimentazione nominale di 2,5 Volt. Il segnale di uscita viene trasferito mediante un anello collettore integrato sull'asse di rotazione della piattaforma all'esterno verso il punto di misura, in corrispondenza del quale si trova l'amplificatore di misura. Una batteria esterna a 12 Volt alimenta un registratore di corsa a cavo ed un sensore triassiale K-Beam 8390A2 che

richiede una tensione nominale tra 9 e 20 Volt DC. I suoi segnali percorrono un cavo schermato e si spostano dall'asse di rotazione della piattaforma in verticale verso l'alto e al di sopra del dispositivo di ribaltamento verso l'esterno fino al punto di misurazione.

Nel corso delle prime prove dinamiche il dispositivo di controllo manuale della velocità della piattaforma si è rivelato insufficiente per raggiungere ovvero mantenere una velocità esatta. A tal fine si devono creare delle condizioni di prova riproducibili. Con la modifica apportata è stato possibile regolare la velocità di marcia partendo dal programma di misurazione DasyLab. Un servomotore attinto dal modellismo è viene pilotato mediante una scheda di controllo collegata a monte dall'uscita analogica della rilevazione dei valori misurati con un segnale di tensione e raggiungere la posizione predeterminata dal controllo di velocità per effetto della tensione presente.

Per determinare le interrelazioni dinamiche sul banco prova, il sensore di accelerazione triassiale viene dapprima applicato in una collocazione la cui posizione geometrica consenta un'interpretazione facile dei valori misurati da questo registratore e dell'interazione generale. Per avere queste semplificazioni, si deve scegliere una posizione in cui gli assi del sensore si trovino perpendicolari al movimento di rotazione, e precisamente sia in riferimento alla descrizione di un cerchio, sia in riferimento al movimento di rovesciamento. Viene scelta una posizione sulla mezzeria radiale della piattaforma, in verticale lungo l'asse di rovesciamento. L'altezza sull'asse di rovesciamento ai fini di questa misurazione è fissata a 1000 mm.

9.3.2 Rovesciamento statico fino a 90°

Per la prova statica si è dovuta creare come premessa una condizione che ammettere come unica forza agente che provocasse il rovesciamento l'accelerazione di gravità. Nel corso di prove preliminari si è potuto quantificare l'angolo in cui il baricentro totale del dispositivo di ribaltamento si trova in verticale rispetto all'asse di rovesciamento nella misura di $\gamma_0 = 27^\circ$. All'inizio della misurazione abbiamo fatto partire il dispositivo di ribaltamento da un angolo di $\gamma = 27.5^\circ$ da una posizione di fermo e abbiamo salvato sotto forma di file tutti e cinque i canali di entrata della scheda di interfaccia con la frequenza di 200Hz per una durata di 20 s.

Per limitare la quantità di dati, viene considerato soltanto il caso di fattispecie, la cui durata è di 1,53 s. Visto che il sistema all'inizio della misurazione si trova in una condizione di riposo, come primi valori misurati sugli assi presi a riferimento y (tangenziale al movimento di rovesciamento) e z (radiale al movimento di rovesciamento) si configurano le componenti dell'accelerazione di gravità in riferimento all'angolo di partenza. Durante il processo di rovesciamento, che viene terminato a 90° con la battuta sul cilindro di frenatura, gli andamenti dell'asse y e z corrispondono qualitativamente ai risultati della simulazione:

i valori dell'asse radiale z aumentano in modo costante al crescere dell'angolo di rovesciamento da -0,89 g fino a ca. +0,7 g. Nel momento dell'impatto agiscono per un breve momento -2,1 g. L'andamento corrisponde al fatto che la componente dell'accelerazione di gravità che agisce in negativo sull'asse radiale, che diminuisce al crescere dell'angolo, contrasta l'accelerazione radiale in aumento. Con un angolo di ca. 68° le forze che agiscono in opposizione vengono compensate.

Sull'asse y tangenziale viene registrato come valore iniziale 0,46 g. Questo valore non si modifica più con il crescere dell'angolo ad eccezione di un lieve abbassamento a ca. 0,35 g a partire da ca. 68°, cioè dal punto di equilibrio delle forze sull'asse radiale. Ci si aspetta un andamento continuo, in cui l'accelerazione di gravità che agisce maggiore intensità via via che aumenta l'angolo, e l'accelerazione angolare tangenziale anch'essa in salita con l'angolo si annullano reciprocamente. Questo fatto viene comprovato anche dall'andamento lineare della velocità angolare lungo l'angolo (incremento costante = accelerazione angolare costante). All'impatto viene registrata un'accelerazione di frenatura di -3 g durante 0,01 s, mentre la velocità angolare raggiunge poco prima il suo massimo con 2,6 s⁻¹.

I punti disturbati ben visibili, in corrispondenza di ca. 48° e 63° nell'andamento di tutti gli assi sono probabilmente da ricondursi alle rugosità o simili effetti di attrito nei cuscinetti dell'asse di rovesciamento. L'interferenza di entità ben maggiore, che si presenta a partire da ca. 80° potrebbe derivare da un movimento dell'asse di rovesciamento nel gioco dei cuscinetti che si innesta dopo l'attraversamento dello zero del sistema con un certo ritardo inerziale.

Le due pagine seguenti riportano le figure 9.9 e 9.10:

Fig. 9.9: accelerazioni con rovesciamento statico $b = f(t)$

Fig. 9.10: accelerazioni con rovesciamento statico $b = f(\gamma)$

Fig. 9.9: accelerazioni con rovesciamento statico $b = f(t)$

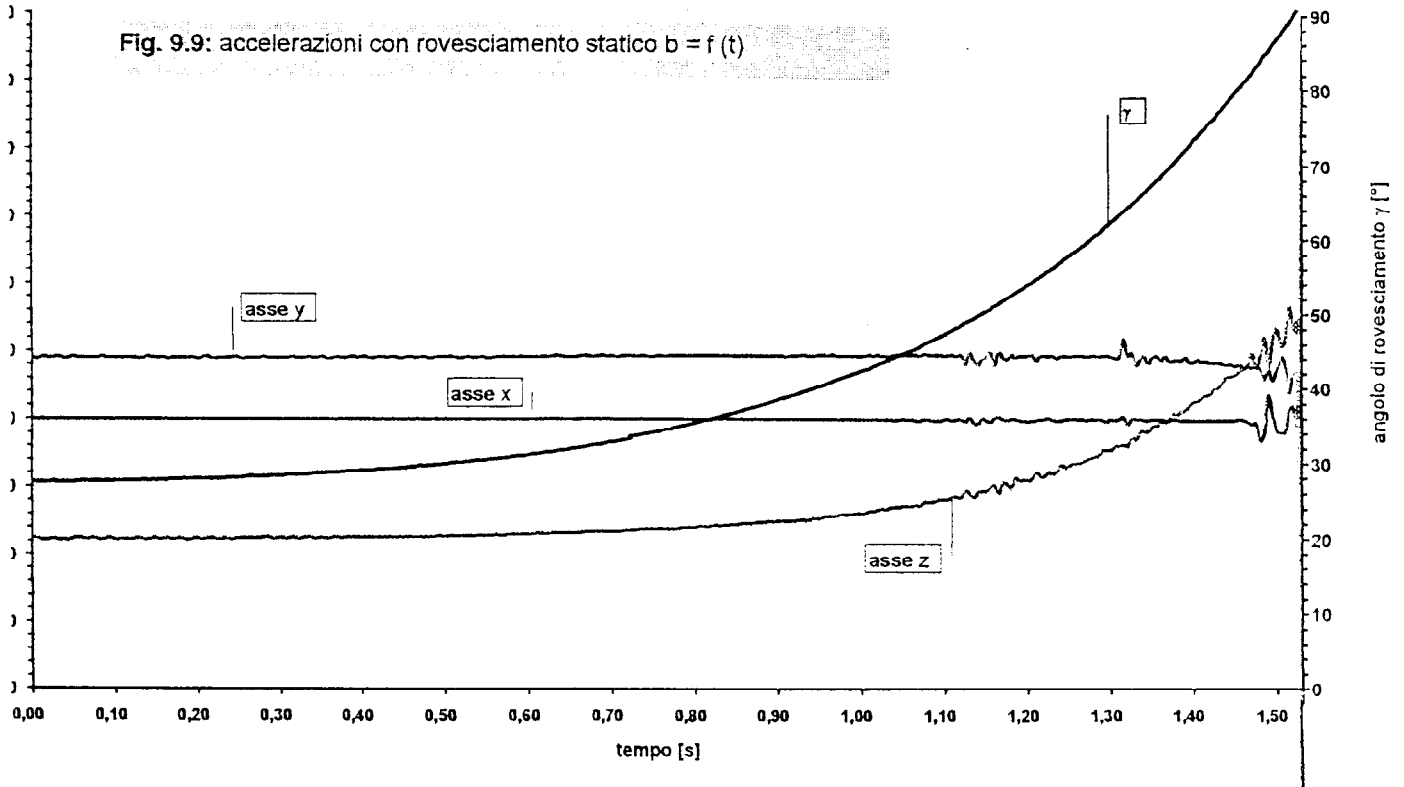
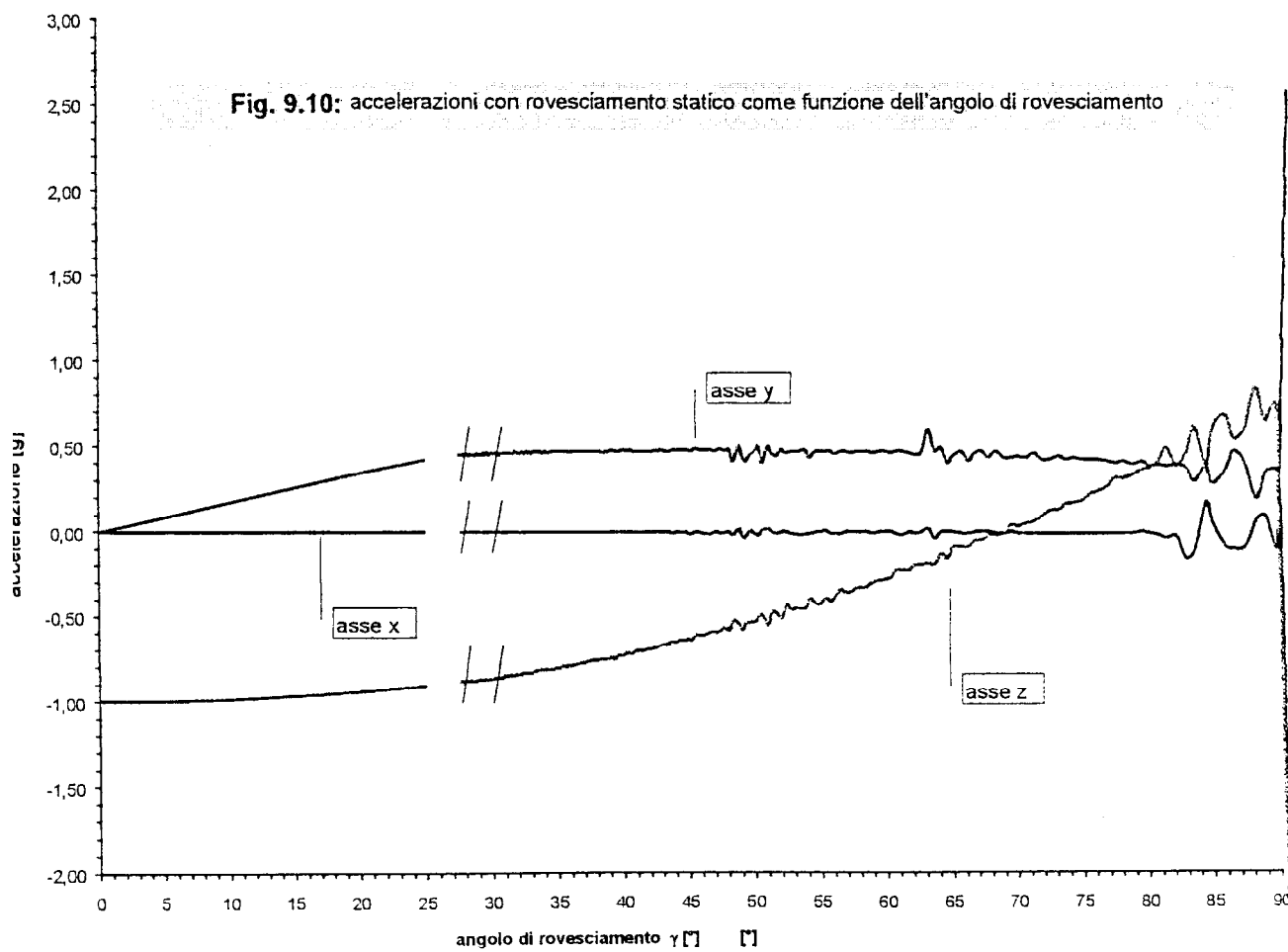


Fig. 9.10: accelerazioni con rovesciamento statico come funzione dell'angolo di rovesciamento



9.3.3 Rovesciamento dinamico fino a 90°

Con questa prova dinamica il nostro intento era quello di avere un'accelerazione partendo dalla condizione fino a raggiungere una velocità costante, un breve mantenimento di questa velocità, un'ulteriore accelerazione, mantenimento eccetera fino al rovesciamento della cabina. Dopo l'impatto la piattaforma è rotolata via, contrariamente a alla frenata brusca del veicolo che si verifica nella realtà in caso di rovesciamento laterale. L'intero processo è stato attuato in 1 min e registrato con una frequenza di 200 Hz.

In primo luogo viene considerato l'intervallo di tempo dall'avviamento fino all'impatto a 90° per 33 sec. Un primo sguardo agli andamenti delle curve evidenzia un comportamento ad alta frequenza dei tre assi del sensore, dovuti all'elevata sensibilità del sensore e alla rigidità del sistema nel suo complesso, che trasferisce agli assi del sensore ogni piccola vibrazione quali ad es. quelle causate dalle irregolarità della carreggiata quasi senza ammortizzazione. Inoltre l'andamento della velocità di marcia mostra che la curva di marcia che ci si proponeva è stata pressoché raggiunta.

Il valore iniziale dell'asse z rimane costante intorno alla media di -1 per l'intervallo di tempo che va dall'avviamento fino all'inclinazione che si verifica dopo 31,4 s, come c'era da aspettarsi. Dopo l'inclinazione l'effetto dell'accelerazione di gravità viene compensato per gli stessi motivi individuati nel caso statico entro all'attraversamento dello zero che viene raggiunto con un angolo di circa 45°. Oltre questo valore si innesca un'accelerazione che si innalza fino all'impatto ed agisce verticalmente rispetto al sedile di massimo 2 g. Non è possibile accertare quali siano i valori di impatto effettivamente raggiunti basandosi sulla dispersione dei valori misurati che caratterizza la fase dopo l'impatto; si registra tuttavia un accenno di picchi su intervalli brevi di ca. 2,7 g.

Con l'innalzamento della velocità di marcia aumenta anche l'accelerazione radiale sull'asse y. All'inizio del processo di rovesciamento che ha inizio dopo 31,4 s con un angolo di 1°, l'accelerazione trasversale effettiva è pari a mediamente ca. 0,6 g con una velocità di marcia di 3,6 m/s. Durante il processo di rovesciamento che termina dopo 1,62 s, si individua sull'asse y un andamento equivalente al caso statico., ovvero un permanere pressoché costante sul valore iniziale ed un calo più deciso a 0,5 g scarsi a partire dal momento del passaggio per lo zero sull'asse z. Con l'impatto si può registrare per breve tempo un'accelerazione di frenatura di poco superiore a 3 g. A questo punto la velocità angolare del movimento di rovesciamento ha raggiunto un valore massimo di 3,5 s⁻¹.

Dato che i valori di accelerazione dell'azionamento sono soltanto modesti, l'asse z tangenziale non mostra quasi nessuna variazione quantitativa durante tutto il ciclo. All'inclinazione iniziale tuttavia è associato un decremento evidente del valore: quando la cabina inizia a rovesciamenti è richiesta energia per sollevare il baricentro. L'apporto di energia cinetica alla piattaforma viene ridotto, fatto che comporta una leggera frenatura. Mentre la velocità della piattaforma si riduce da 3,6 m/s a 3,1 m/s durante l'inizio di rovesciamento, la velocità della traiettoria del sensore continua ad aumentare, dato che il suo raggio rispetto all'asse di rotazione della piattaforma aumenta con l'angolo, così come regolato dalla relazione:

$$r_s = (2,57 + 1 * \sin\gamma)m \quad (9.4)$$

Da ciò, in base alla relazione delle velocità di traiettoria rispetto ai differenti raggi, deriva un incremento della velocità della traiettoria sul raggio del sensore. La differenza raggiunge al massimo 1,5 m/S.

Le due pagine seguenti riportate le figure 9.11 e 9.12:

Fig. 9.11: Rovesciamento dinamico, grandezze di misura come funzione del tempo

Fig. 9.12: Rovesciamento dinamico, grandezze di misura in riferimento all'angolo di rovesciamento

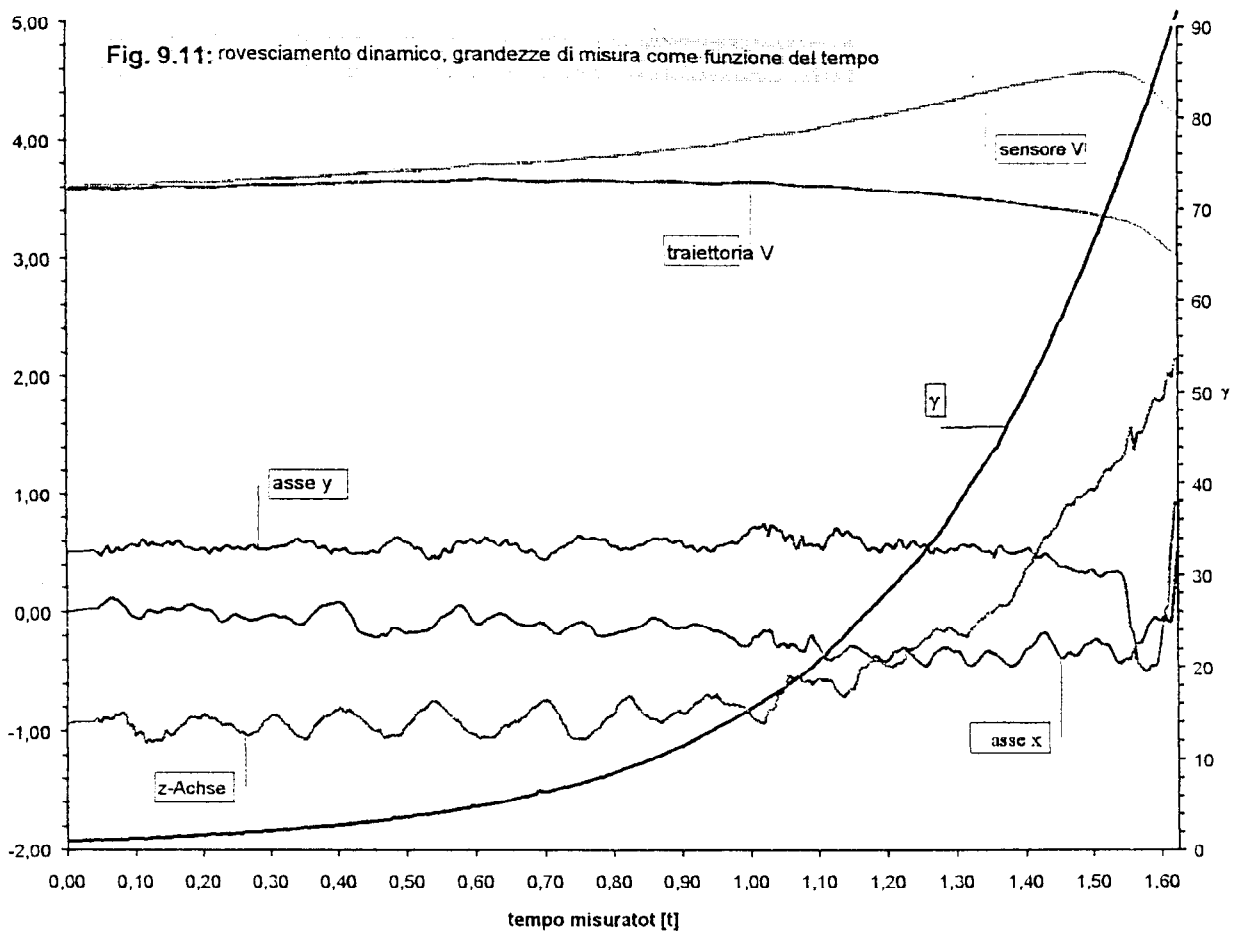
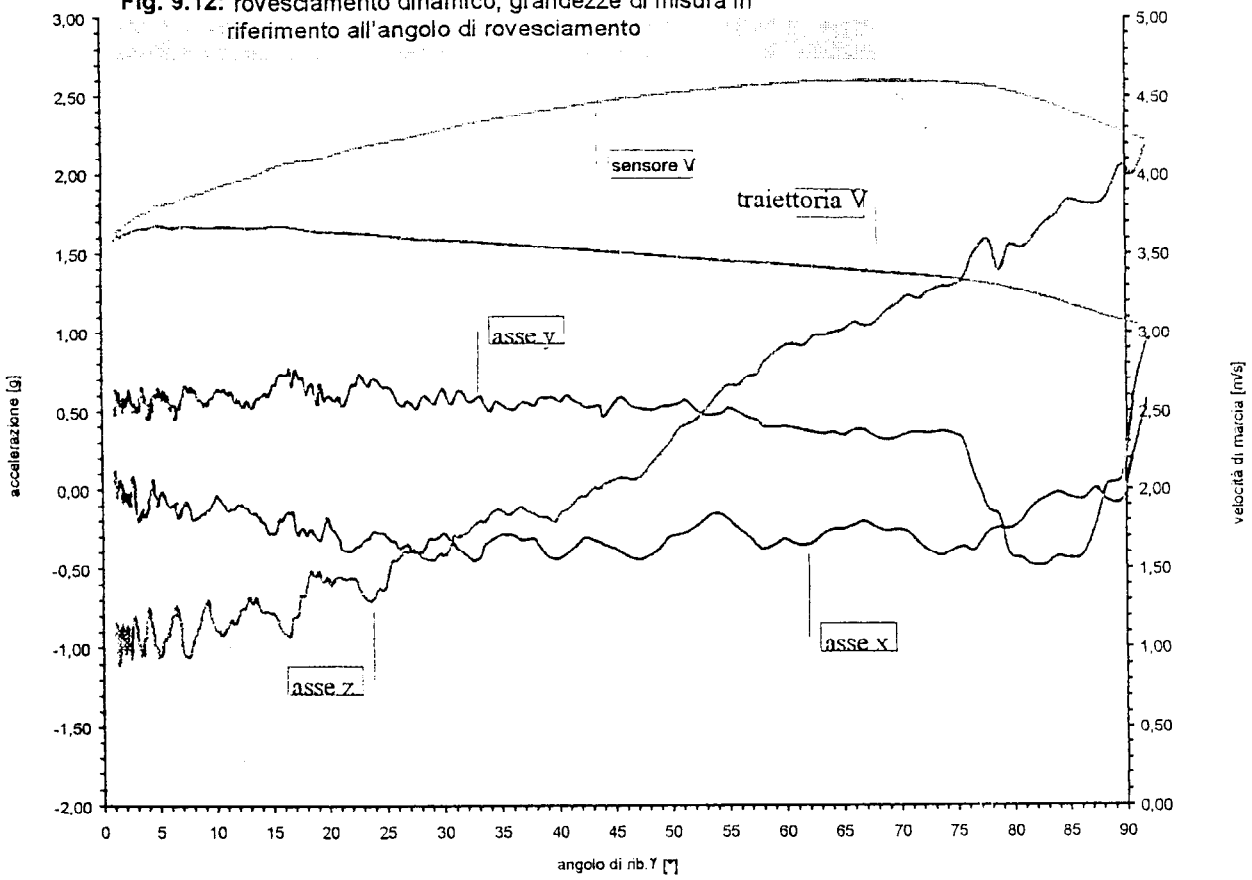


Fig. 9.12: rovesciamento dinamico, grandezze di misura in riferimento all'angolo di rovesciamento



Con il rovesciamento dinamico a banco sono state misurate accelerazioni fino a 2 g in direzione centrifuga. Con un semplice modello a barra si ottengono valori leggermente maggiori in confronto alla prova a banco. L'andamento dell'accelerazione rispetto all'angolo di rovesciamento mostra anch'esso una buona corrispondenza. Se sul modello a barra si considera la forza inerziale si ottengono quasi gli stessi valori. Dato che la forza centrifuga deve essere ripartita nelle direzioni del sedile che si rovescia dell'angolo φ , si registra una buona corrispondenza di valori anche con l'andamento della forza tangenziale. Il modello a barra si dimostra quindi idoneo a stimare le forze massime possibili che agiscono sul sedile durante il rovesciamento.

Le forze che si manifestano durante l'impatto sono in funzione dell'elasticità del sistema del sedile del carrello e non possono essere individuate con il modello a barra.

9.4 Prove statiche e dinamiche con persone campione

Le prove di rovesciamento dinamiche effettuate nell'area della Linde S.p.A. di Aschaffenburg presentavano alcuni svantaggi. L'angolo di rovesciamento era limitato, fatto che rendeva possibile l'analisi soltanto all'inizio del rovesciamento stesso. La situazione atmosferica influenzava i risultati della prova, dato che con la carreggiata bagnata di pioggia il veicolo non si rovesciava, bensì slittava. Sul banco prova del laboratorio FTL di Duisburg siamo stati in grado di escludere tutte queste grandezze di influenza negativa. Per motivi di sicurezza, in questa serie di prova abbiamo verificato i sistemi di trattenimento con persone campione soltanto fino a un angolo di rovesciamento di 60°. A partire da 60° la cabina incontrava dei cilindri idraulici di frenatura e veniva frenata per i successivi 10° fino all'arresto con un rallentamento progressivo.

Sono stati provati i seguenti sistemi di trattenimento:

- sistema a cintura con sensore di rovesciamento meccanico (soluzione 14)
- sistema a staffa laterale integrata al sedile (soluzione 9)
- cancelletto spostabile integrato al veicolo (soluzione 21)

9.4.1 Prove di rovesciamento statiche con persone campione

È possibile immaginare il rovesciamento statico di un carrello elevatore nella realtà ad esempio nella situazione seguente: il carico nominale viene sollevato dallo scaffale alla piena altezza di sollevamento. Il baricentro dell'intero sistema si trova molto sopra il tetto della cabina, ed una minima forza laterale è sufficiente a superare il punto di rovesciamento. Visto che la velocità in questo caso è modesta, il processo può essere considerato statico.

Le prove sono state eseguite fino a raggiungere l'arresto dell'attrezzatura, e la cabina è stata sollevata fino al limite di rovesciamento utilizzando un carrello elevatore. La persona campione era seduta diritta o con il busto ruotato dietro verso destra per simulare una retromarcia lenta.

Per salvaguardare l'incolumità fisica delle persone campione si è lavorato dapprima con angoli di rovesciamento ridotti (30°, 45°). L'attrezzatura di prova è progettata per angoli maggiori con scalarità di 15° in 15°.

In tutte le prove di rovesciamento statiche l'operatore rimane sul sedile fino all'impatto. Non è stato possibile accertare uno scivolamento laterale o un rovesciamento con il busto oltre la staffa laterale (fig. 9.13). L'operatore, durante tutte le prove, si teneva ben stretto allo sterzo, si puntellava con le gambe, nella fase di rovesciamento proiettava il busto in avanti sopra lo sterzo ed inclinava contemporaneamente il busto allontanandolo dal lato dell'impatto in modo del tutto istintivo.



Fig. 9.13: Rovesciamento statico con persona campione, 60°

9.4.2 Prove di rovesciamento dinamiche con persone campione

Nel corso delle prove dinamiche la velocità di marcia sulla traiettoria circolare, pilotata dall'esterno viene innalzata lentamente fino al punto di rovesciamento. Ciò corrisponde in linea teorica ad una marcia con un carrello elevatore che venga portato a sterzare in una curva con raggio costante. Se l'accelerazione trasversale che si manifesta è sufficientemente grande, il carrello elevatore si rovescia. le figure da 9.14 a 9.16 mostrano l'andamento di una prova di rovesciamento dinamico con persone campione fino ad un angolo di rovesciamento massimo di 60°.

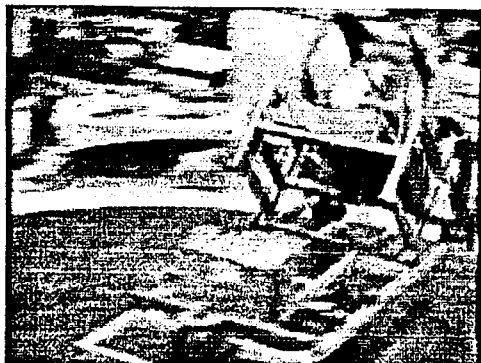


Fig. 9.14: Prova di rovesciamento dinamico: angolo di rovesciamento ca. 20°

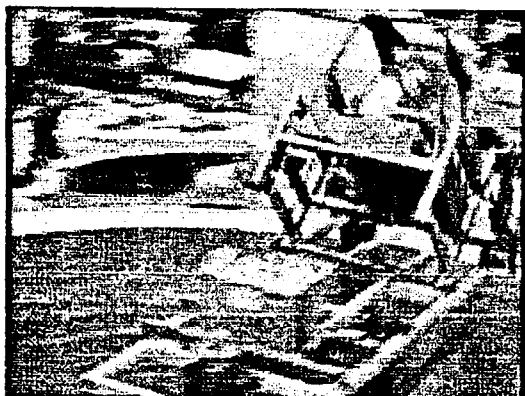


Fig. 9.15: Prova di rovesciamento dinamico: angolo di rovesciamento ca. 45°



Fig. 9.15: Prova di rovesciamento dinamico: angolo di rovesciamento ca. 60°, impatto

Per queste prove abbiamo allestito la cabina anche con un'imbottitura. L'operatore indossava un casco di protezione ed imbottiture nella zona delle spalle. Le sollecitazioni a cui è stato sottoposto nella fase di rovesciamento della prova sono state definite dall'operatore campione stesso come modeste.

Nell'istante dell'impatto le sollecitazioni sono divenute improvvisamente maggiori, pur senza dar luogo ad un rischio di ferimento.

Le immagini registrate dalla telecamera, che ora, per via delle grosse vibrazioni del sistema nel suo complesso, non raggiungevano più la risoluzione ottenuta precedentemente, danno l'impressione della dinamica della sequenza dei movimenti immediatamente prima dell'impatto. A dispetto della scarsa risoluzione delle immagini si può vedere che l'operatore ha poche difficoltà a rimanere sul sedile durante il rovesciamento (fig. 9.17). È soltanto l'urto in se stesso a proiettarlo verso l'esterno e a fargli perdere il controllo.



Fig. 9.17: Prova di rovesciamento dinamico 60°

Per questa prova abbiamo fissato la telecamera sul dispositivo di ribaltamento. La telecamera si è quindi rovesciata di 60° solidalmente all'operatore.

Nelle prove di rovesciamento statiche e dinamiche con persone campione (fino a 60° senza impatto della cabina sul dispositivo di trattenimento), tutti i sistemi di trattenimento forniscono all'operatore il necessario sostegno all'interno della cabina. Neppure durante le prove dinamiche è stato possibile accertare un rovesciamento del busto oltre la staffa laterale. Il sistema a cintura si bloccava con sufficiente anticipo e manteneva efficacemente l'operatore sul sedile.

Al momento dell'impatto la cintura si rivelava vantaggiosa, dato che contribuiva a fornire all'operatore un sostegno per opporsi alla forza in direzione del tetto di protezione. La staffa laterale ed il cancelletto non danno nessun sostegno per contrastare la spinta verso l'alto, per cui l'operatore al momento dell'urto viene sbalzato dal sedile.

Un considerevole rischio di ferimento al momento dell'impatto della cabina non si può escludere con nessuno dei sistemi di trattenimento analizzati. Non siamo in grado di formulare un'ipotesi circa l'entità di questo rischio. A tale scopo sarebbero necessarie delle analisi molto più approfondite che esulano dall'oggetto del presente progetto.