

INAIL

Quaderni di ricerca

Analisi e valutazione del comportamento dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta con differenti masse di prova.

Luigi Cortis, Francesca Maria Fabiani, Carlo Ratti,
Luca Rossi, Davide Geoffrey Svampa, Calogero Vitale

I *Quaderni di ricerca* dell'Inail sono lo strumento a disposizione dei ricercatori e dei ruoli professionali dell'Istituto per rendere pubblici i risultati più rilevanti delle loro attività; accolgono anche contributi di ricercatori esterni, che partecipano ai progetti dell'Inail.

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nei *Quaderni*, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

I *Quaderni* sono disponibili online all'indirizzo www.inail.it.

Comitato di redazione: Piero Altarocca, Paolo Bragatto, Massimo De Felice,
Benedetta Persechino, Patrizio Rossi.

Segreteria di redazione: Maria Castriotta, Tiziana Grassi, Toni Saracino, Maria Cristina Paoletti,
Alessandro Simonetta, Paolo Calabrese

INAIL - piazzale Giulio Pastore, 6 | 00144 Roma

ISBN 978-88-7484-348-0

Stampato presso la Tipolitografia INAIL - Milano, marzo 2014

Analisi e valutazione del comportamento dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta con differenti masse di prova.

Luigi Cortis, Francesca Maria Fabiani, Carlo Ratti, Luca Rossi, D. Geoffrey Svampa, Calogero Vitale

Sommario – Gli assorbitori di energia impiegati nei sistemi individuali di arresto caduta ed oggetto della norma europea UNI EN 355: 2003 pongono un importante problema di sicurezza. Essi infatti vengono testati con una massa di prova di 100 kg, nonostante il peso reale dei lavoratori sia diverso. Ciò influenza le caratteristiche costruttive degli stessi e, di conseguenza, le sollecitazioni sul corpo dell'operatore durante la caduta.

La problematica è stata affrontata in Gran Bretagna ove sono stati effettuati degli studi dall'Università di Loughborough e dalla Aston Business School sul peso degli addetti che effettuano lavori in quota. Essi sono stati realizzati per conto dell'Health and Safety Executive (HSE) – l'Istituto per la Sicurezza sul Lavoro Britannico [Hai-005]. Studi riguardo l'adeguatezza degli assorbitori di energia in relazione all'uso da parte di lavoratori pesanti sono stati eseguiti in Australia [Goh-010] in riferimento alla norma AS/NZL 1891/1: 2007 diversa dalla UNI EN 355: 2003.

Obiettivo della sperimentazione è verificare che utilizzando lo stesso assorbitore al variare della massa di prova, le decelerazioni sul corpo del lavoratore cambiano durante la caduta. Per contenerle tra i 2.3 g ed i 5 g, in relazione ai valori delle forze frenanti, potrebbe essere necessario introdurre delle classi che individuino le tipologie di assorbitori da impiegare nelle varie fasce di peso. Essi dunque potrebbero essere testati non solo con massa di 100 kg ma con taglie differenti (ad es. 60, 80, 100 e 120 kg).

A tal fine sono state effettuate delle prove impiegando masse da 60 e 80 kg mentre in una fase successiva della sperimentazione ne verranno utilizzate delle altre da 100 e 120 kg. Le tipologie di assorbitore adoperate sono tre e per ognuna sono state eseguite quattro cadute con altezza posta ad 1, 2, 3 e 4 m, la massima consentita dalla normativa.

La ricerca dimostra che un lavoratore di peso compreso tra 60 e 80 kg, in caso di caduta, subisce delle sollecitazioni superiori a quelle normalmente accettate ed è sottoposto a ridotte cadute frenate.

Tali risultati potranno essere trasferiti in ambito UNI e CEN al fine di valutare la possibile revisione della norma UNI EN 355.

Gli autori svolgono la propria attività presso l'Inail nel Dipartimento Tecnologie di Sicurezza. Si ringraziano Ivano Bevilacqua e Roberto Scaccia per la collaborazione. Questo *Quaderno* fa riferimento ai risultati relativi alla linea di ricerca L15 *La problematica del test masses relativa ai dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto* (Responsabile Luca Rossi) inserita nel programma di ricerca P03 DTS *La sicurezza nel settore delle costruzioni* (Responsabile Luigi Cortis) del Dipartimento Tecnologie di Sicurezza dell'Inail.

Indice degli argomenti

Premessa	7
1 Definizioni	8
2 Riferimenti storici	9
3 Danni sul corpo umano conseguenti all'arresto caduta	13
4 Analisi della caduta	15
5 Caratteristiche del sistema di collegamento	30
6 Test di caduta con torso di prova	31
6.1 Descrizione delle attrezzature e delle apparecchiature di prova	31
6.2 Componenti dei sistemi di arresto caduta utilizzati	36
6.3 Descrizione del test	38
6.3.1 Convenzioni	38
6.3.2 Test di caduta	38
7 Risultati delle prove	42
7.1 Generalità	42
7.2 Grafici relativi ad accelerazione e forze	46
8 Conclusioni	56
Riferimenti bibliografici	57
Legislazione	58
Norme tecniche	58

Premessa – I cantieri edili e, più in generale, il settore delle costruzioni sono fra i luoghi di lavoro a più alto indice di infortunio. In quest’ambito le cadute dall’alto rappresentano uno dei settori in cui tali problematiche assumono notevole rilevanza. I rischi possono essere eliminati e/o ridotti attraverso l’uso dei dispositivi di protezione collettiva (DPC). Quando ciò non è possibile vanno impiegati i dispositivi di protezione individuale (DPI) contro le cadute dall’alto che hanno la funzione di salvaguardare le persone non eliminando il rischio di caduta, ma attenuando gli effetti che la stessa provoca sul corpo umano.

In realtà invece che di dispositivi è più corretto parlare di sistemi. Un sistema di arresto caduta è un sistema di protezione individuale dalle cadute che arresta la caduta libera e limita la forza trasmessa al corpo del lavoratore durante l’arresto caduta. Un sistema di protezione individuale dalle cadute è costituito da un insieme di componenti, collegati tra loro, ed include un dispositivo di presa del corpo connesso ad un punto di ancoraggio sicuro attraverso un sistema di collegamento.

I dispositivi di presa del corpo da utilizzare nei sistemi di arresto caduta sono le imbragature per il corpo descritte nella UNI EN 361. La norma specifica i requisiti, i metodi di prova, la marcatura, le informazioni fornite dal fabbricante e l’imballaggio per le imbragature per il corpo destinate ai sistemi di arresto caduta. L’imbragatura per il corpo può incorporare altri tipi di supporto per il corpo quali quelli specificati nella UNI EN 358 (cinture di posizionamento sul lavoro), nella UNI EN 813 (cinture con cosciali) e nella UNI EN 1497 (imbragature di salvataggio).

Il sistema di collegamento è costituito normalmente da un cordino, due connettori e un assorbitore.

L’elemento sul quale si focalizzerà l’attenzione è l’assorbitore di energia: il componente del sistema progettato per dissipare l’energia cinetica sviluppata durante la caduta. Esso è oggetto della norma europea di prodotto UNI EN 355.

Secondo i risultati della ricerca condotta dall’Università di Loughborough e dalla Aston Business School, il peso di 100 kg, previsto nella normativa con cui vengono testati gli assorbitori, è basso e dovrebbe essere portato a 120 kg. Tale risultanza è stata presentata al CEN/TC 160, il Comitato Tecnico che si interessa dei sistemi di arresto caduta e che ha istituito un gruppo di lavoro, il PG2 “Test masses”, incaricandolo di studiare il problema. Le indagini effettuate dal gruppo di lavoro PG2 hanno verificato che non c’è in Europa un’indagine statistica aggiornata, coordinata con i pesi della popolazione. I dubbi sull’applicabilità dell’indagine svolta dall’Università di Loughborough e dalla Aston Business School discendono dal fatto che tra le popolazioni europee esiste una grande variabilità di misure antropometriche. Il gruppo di lavoro ha concluso che è difficile dare dettagliate raccomandazioni al CEN/TC 160 a causa della mancanza di adeguate informazioni e della complessità del problema. È stata chiaramente affermata la necessità che vengano svolte ulteriori indagini e ricerche prima di pronunciarsi definitivamente.

Studi teorici, effettuati dalla XI Unità Funzionale del Dipartimento Tecnologie di Sicurezza dell’INAIL e confermati da analisi parallele effettuate da esperti del Regno Unito, mostrano che un assorbitore di energia dimensionato per una massa di 100 kg non garantisce, a parità di caduta libera e forza frenante, decelerazioni sopportabili dai normali lavoratori dell’industria,

quando viene abbinato ad una massa molto minore di 100 kg, per esempio di 60 kg. Si possono raggiungere infatti decelerazioni di circa 8 o 9 g, lontani dai 6 g massimi generalmente accettati a livello internazionale.

1 Definizioni

Accelerazione – Variazione della velocità rispetto al tempo, espressa in metri al secondo per secondo (m/s^2). L'accelerazione viene espressa anche in unità "g" (1 g equivale ad una volta l'accelerazione di gravità che è pari a $9,81 m/s^2$).

Accelerazione di gravità (g) – Accelerazione naturale a cui è sottoposto un grave durante la caduta libera (nessuna altra forza agente sul corpo se non quella dovuta alla attrazione della terra). L'accelerazione di gravità varia da punto a punto, ma viene internazionalmente fissata (45° di latitudine), ai fini dei calcoli, uguale a $9,81 m/s^2$, pari ad 1 g.

Caduta libera (h_{cl}) – Spazio percorso dal lavoratore sotto l'azione della sola gravità, a partire dal punto di inizio caduta, fino al punto in cui il sistema di arresto caduta prende il carico.

Caduta frenata (h_{cf}) – Spazio percorso dal lavoratore, a partire dal punto in cui il sistema di arresto caduta prende il carico, fino al punto dell'arresto verticale completo, con esclusione delle oscillazioni.

Distanza di arresto o caduta totale (h) – Spazio percorso dal lavoratore a partire dal punto di inizio caduta fino al punto dell'arresto verticale completo, con esclusione delle oscillazioni, dato dalla somma della caduta libera e della caduta frenata.

Tirante d'aria – Spazio libero in sicurezza, a partire dal punto di caduta del lavoratore, necessario a compensare sia la caduta libera che tutti gli allungamenti/deformazioni del sistema di ancoraggio e del sistema di arresto caduta, senza che il lavoratore urti contro ostacoli durante la caduta e che comprende anche eventuali margini di sicurezza.

Numero di g(n) – Fattore che indica il rapporto tra la forza di arresto caduta e la forza peso del lavoratore ovvero anche il rapporto tra lo spazio di caduta libera e lo spazio di caduta frenata.

Fattore di caduta – Rapporto fra la caduta libera e la lunghezza iniziale del sistema di collegamento tra l'imbragatura ed il punto di ancoraggio. Il sistema di collegamento, per esempio, può essere costituito dal solo cordino o dal cordino più l'assorbitore di energia. Il fattore massimo di caduta è 2: in questo caso si ha che la caduta libera è pari a due volte la lunghezza del sistema di collegamento. Il fattore di caduta è di derivazione alpinistica e viene citato a solo titolo informativo.

Forza d'arresto (f_f) – Forza massima espressa in kilonewton (kN), misurata sul punto di ancoraggio o sulla linea di ancoraggio durante la caduta frenata. Essa è esercitata dal sistema di collegamento e dipende principalmente dalle caratteristiche dell'assorbitore di energia.

Cordino – Elemento di collegamento o componente di un sistema di arresto caduta. Un cordino può essere costituito da una corda di fibra sintetica, una fune metallica, una cinghia o una catena. [EN 354]

Assorbitore di energia – Elemento o componente di un sistema di arresto caduta che è progettato per dissipare l'energia cinetica sviluppata durante la caduta dall'alto. [EN 355]

Connettore – Elemento di collegamento o componente di un sistema di arresto caduta dotato di sistema di chiusura automatico e sistema di bloccaggio automatico o manuale. [EN 362]

Imbragatura per il corpo – Supporto per il corpo che ha lo scopo di arrestare la caduta, cioè un componente di un sistema di arresto di caduta. L'imbragatura per il corpo può comprendere cinghie, accessori, fibbie o altri elementi montati opportunamente per sostenere tutto il corpo di una persona e tenerla durante la caduta e dopo l'arresto. [EN 361]

Jolt – Variazione nel tempo della decelerazione durante la caduta frenata.

2 Riferimenti storici

La protezione dei lavoratori contro le cadute dall'alto è stata disciplinata in Italia dal DPR n. 547/55 che indicava gli adempimenti di massima riguardanti le scale, i ponti sospesi, i parapetti, i macchinari e le palificazioni, e imponeva l'obbligo di usare le "cinture di sicurezza" (art. 386) negli interventi che espongono i lavoratori a "pericolo di caduta dall'alto o entro vano o che devono prestare la loro opera all'interno di pozzi, cisterne e simili" (art. 386).

Ulteriori richiami in materia erano presenti nel DPR n. 164/56 sulla prevenzione degli infortuni nelle costruzioni, ove per la prima volta, venivano specificati gli elementi costitutivi del presidio e l'obbligo di ricorrere alle cinture di sicurezza nell'effettuare lavorazioni in posizione sopraelevata o entro cavità (art. 10).

In sede europea, per perseguire gli obiettivi riguardanti la salute e la sicurezza dei lavoratori, furono emanate due direttive, una di prodotto, la 89/686/CEE riguardante la progettazione e la commercializzazione dei dispositivi di protezione individuale, e una sociale, la 89/656/CEE che aveva come obiettivo il loro corretto utilizzo.

Con l'emanazione del Decreto del Ministero del lavoro e della Previdenza Sociale del 22 maggio

1992, n. 466 “Regolamento recante il riconoscimento di efficacia di un sistema individuale per gli addetti al montaggio ed allo smontaggio dei ponteggi metallici, il legislatore insisteva nuovamente sull’obbligo di indossare una cintura di sicurezza di tipo speciale, comprendente sia l’imbragatura sia l’organo di trattenuta provvisto di freno a dissipazione di energia. Di notevole rilevanza appariva, inoltre, il dettaglio delle modalità di condotta delle prove di qualificazione unitamente ai criteri di valutazione dei risultati. Il test richiedeva, per le prove statiche e dinamiche dell’imbragatura, la presenza di un idoneo manichino antropomorfo nonché una speciale attrezzatura provvista di meccanismi di ritegno e di sgancio per l’ancoraggio e la sospensione di una massa rigida di 100 kg.

L’entrata in vigore del DLgs n. 475/92 “Attuazione della direttiva 89/686/CEE del Consiglio del 21 dicembre 1989, in materia di ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative ai dispositivi di protezione individuale”, oltre ad estendere e generalizzare la sostanza della norma espressa fino a quel momento, classificava “i DPI destinati a salvaguardare dalle cadute dall’alto” come dispositivi di terza categoria, e cioè quelli di progettazione complessa destinati a salvaguardare la persona da rischi di morte o di lesioni gravi a carattere permanente.

Un altro passo in avanti fu compiuto con l’avvento del DLgs n. 235/03 che introdusse un ulteriore cambiamento nel settore della cadute dall’alto. Il decreto determinava i requisiti minimi di sicurezza e salute per l’uso delle attrezzature di lavoro per l’esecuzione di lavori temporanei in quota, e ribadiva la priorità alle misure di protezione collettiva rispetto a quelle di tipo individuale. Nella sezione relativa al lavoro su fune fu proposto il concetto di lavoro di breve durata. Il datore di lavoro poteva disporre l’impiego di sistemi di accesso e di posizionamento mediante funi soltanto nelle circostanze in cui, a seguito della valutazione dei rischi, fosse risultato che il lavoro poteva essere effettuato in condizioni di sicurezza e l’impiego di un’altra attrezzatura di lavoro, considerata più sicura, non era giustificato a causa della breve durata di impiego e delle caratteristiche esistenti dei siti che non potevano essere modificati (art. 5 comma 4).

A livello locale fu certamente importante l’emanazione della Legge Regionale n. 64 del 23 dicembre 2003, della Regione Toscana, che per la prima volta in Italia legiferava in materia di DPI anticaduta e di ancoraggi. Rifacendosi alle linee guida dell’ISPESL, allegata alla legge, la Legge Regionale disponeva che tutti gli interventi di nuova costruzione, ristrutturazione ed ampliamenti in edilizia, nonché le semplici manutenzioni in copertura o installazioni di impianti tecnici, telematici, fotovoltaici, dovevano presentare caratteristiche tali da eliminare il rischio di caduta dall’alto attraverso un sistema di ancoraggio permanente e sicuro per i lavoratori che operavano sul tetto. La legge prevedeva che il rispetto dei requisiti di sicurezza doveva essere garantito da un’apposita attestazione del progettista da prodursi a corredo della DIA presentata per dar corso ai lavori. L’attestazione doveva contenere, oltre ad un elaborato planimetrico sul quale venivano individuati i punti di installazione dei dispositivi di ancoraggio, l’indicazione

dell'accesso in copertura e le modalità di transito sulla stessa, le certificazioni relative ai prodotti installati, le dichiarazioni di conformità e corretta installazione, la copia dell'autorizzazione ad installare rilasciata dal produttore dei dispositivi e l'attestazione che gli installatori erano in grado di eseguire lavori secondo quanto specificato all'interno delle linee guida ISPESL relative all'esecuzione di lavori temporanei in quota.

Strumenti analoghi sono stati approvati in varie regioni italiane, l'ultimo è quello della Regione Siciliana del 5 settembre 2012: "Norme sulle misure di prevenzione e protezione dai rischi di caduta dall'alto da predisporre negli edifici per l'esecuzione dei lavori di manutenzione sulle coperture in condizioni di sicurezza".

Un passo fondamentale è stato compiuto con l'avvento del DLgs 81/08 che, nei titoli III e IV, ha disciplinato la materia riguardo l'utilizzo e le caratteristiche che debbono possedere detti sistemi. I DPI (art. 76 Requisiti) devono:

- essere adeguati ai rischi da prevenire, senza comportare di per sé un rischio maggiore;
- essere adeguati alle condizioni esistenti sul luogo di lavoro;
- tenere conto delle esigenze ergonomiche o di salute del lavoratore;
- poter essere adattati all'utilizzatore secondo le sue necessità.

Gli obblighi del datore di lavoro e dei lavoratori sono indicati negli artt. 77 e 78.

L'articolo 77 prevede, al comma 1, che il datore di lavoro, ai fini della scelta dei DPI:

- effettui l'analisi e la valutazione dei rischi che non possono essere evitati con altri mezzi;
- individui le caratteristiche dei DPI necessarie affinché questi siano adeguati ai rischi di cui alla lettera a), tenendo conto delle eventuali ulteriori fonti di rischio rappresentate dagli stessi DPI;
- valuti, sulla base delle informazioni e delle norme d'uso fornite dal fabbricante a corredo dei DPI, le caratteristiche dei DPI disponibili sul mercato e le raffronti con quelle individuate alla lettera b);
- aggiorni la scelta ogniqualvolta intervenga una variazione significativa negli elementi di valutazione.

Il datore di lavoro, sulla base delle indicazioni del decreto di cui all'articolo 79, comma 2, fornisce ai lavoratori DPI conformi ai requisiti previsti dall'articolo 76. Nell'allegato VIII è presente un elenco delle attività e dei settori di attività per le quali può rendersi necessario mettere a disposizione DPI (punto 3.9 Attrezzatura di protezione anticaduta – Imbragature di sicurezza) e delle indicazioni esaurienti per la loro valutazione (punto 4.9 Dispositivi di protezione contro le cadute dall'alto – Rischi da cui proteggere).

Il datore di lavoro assicura la formazione adeguata e organizza lo specifico addestramento obbligatorio circa l'uso corretto e l'utilizzo pratico dei DPI contro le cadute dall'alto in quanto appartenenti alla terza categoria.

I lavoratori si sottopongono al programma di formazione e addestramento organizzato dal datore

di lavoro e utilizzano i DPI messi a loro disposizione conformemente all'informazione, alla formazione e all'addestramento ricevuto (art.78).

I DPI destinati alla protezione dei lavoratori contro le cadute dall'alto sono disciplinati dall'art. 115 (Sistemi di protezione contro le cadute dall'alto) comma 1. "Nei lavori in quota qualora non siano state attuate misure di protezione collettiva come previsto all'articolo 111, comma 1, lettera a), è necessario che i lavoratori utilizzino idonei sistemi di protezione composti da diversi elementi quali:

- assorbitori di energia;
- connettori;
- dispositivo di ancoraggio;
- cordini;
- dispositivi retrattili;
- guide o linee vita flessibili;
- guide o linee vita rigide;
- imbragature.

3 Danni sul corpo umano conseguenti all'arresto caduta

Sui possibili danni derivanti dall'intervento dei sistemi di arresto caduta sono presenti in letteratura pubblicazioni provenienti soprattutto da ricerche e prove a carattere medico della NASA (National Aeronautics and Space Administration) e della AGARD (Advisory Group for Aerospace and Development). Tali ricerche sono state sviluppate principalmente tra gli anni 1950 e 1960, ma non mancano risultati significativi anche negli anni successivi. I lavori provengono dal settore aerospaziale e sottolineano grossi rischi localizzati nell'area delle vertebre cervicali, toraciche e lombari ed identificano danni agli organi interni alle alte decelerazioni lungo la direzione piedi-testa [Eib-959].

Gli studi furono effettuati considerando imbragature avvolgenti l'intero corpo (presa del corpo attraverso spalle e cosce): con l'uso di imbragature tipiche da paracadute, NASA/AGARD indicarono un 5% di probabilità di danno con una accelerazione di 12 g circa.

Alcuni di questi lavori furono successivamente esaminati da un gruppo di lavoro del CEN (European Committee for Standardization) che li utilizzò per fissare in 6 kN la massima forza di arresto per un dispositivo di arresto caduta utilizzato da un lavoratore dell'industria che indossava una imbragatura specifica, tenendo conto dei seguenti fattori:

- differenza nel tipo di imbragature usate, in quanto quelle da paracadutismo lasciano una parte del torso più grande rispetto a quelle per uso industriale;
- minore preparazione fisica alle sollecitazioni da parte dei lavoratori dell'industria;
- larga fascia di età nei lavoratori dell'industria con età media più elevata rispetto a militari e sportivi.

È opportuno sottolineare come la normativa AFNOR avesse adottato una decelerazione massima di 6 g con l'impiego di un cordino lungo 2 metri (che poteva dunque consentire una caduta libera di 4 metri).

Un'imbragatura ben avvolgente il corpo riduce gli effetti delle decelerazioni nell'arresto della caduta. La letteratura scientifica riporta che, per un corpo ben sostenuto da una imbragatura, le vertebre presentano una migliore resistenza in quanto la massa muscolare e i tessuti del corpo forniscono un supporto idoneo ad azioni agenti per brevi periodi di tempo. Inoltre, una colonna vertebrale sollecitata con una forza frenante il più possibile allineata con la verticale [Ric-002,42][Cra-003,20] presenta un minore rischio di danno: infatti, quando l'individuo non è ben imbragato o il corpo forma un elevato angolo con la verticale [Cor-005,9], il rischio di flessione della spina dorsale è maggiore. Il carico dovuto alla rapida frenata deve essere pertanto distribuito, per quanto possibile, sulla massima area del corpo per evitare concentrazioni di forze con il risultato di sottoporlo a sollecitazioni di flessione e taglio. Il carico dovrebbe essere trasmesso per quanto possibile direttamente allo scheletro, preferibilmente via struttura pelvica e non via colonna vertebrale.

Ulteriori rischi sono a carico degli organi interni a causa della loro inerzia durante l'arresto. La spina dorsale è trattenuta dalla massa muscolare, ma il cuore, i polmoni, l'intestino e gli altri organi formano un insieme, contenuto nella gabbia toracica, libero di muoversi come in sospensione e che risulta più influenzato dagli effetti del jolt.

Fisicamente il jolt rappresenta la rapidità con cui l'assorbitore dissipa l'energia di caduta. Una decelerazione molto rapida produce seri danni al corpo. Il corpo umano può tollerare livelli di jolt molto alti per brevissimi periodi di tempo: il jolt crea danni consistenti quando la sua durata e la sua ampiezza crescono.

La Figura 3.1 evidenzia, in coordinate logaritmiche (ascisse e ordinate), le aree di tolleranza delle accelerazioni in funzione della loro durata elaborate da Eiband del 1959 [Eib-959]. Essa mostra le zone relative a volontari con imbragature addome/spalla e valori tollerabili di accelerazione/tempo. Altre zone relative a valori di danno moderato e severo sono basate su animali (maiali e scimpanzè). Le misure sono state effettuate non sul soggetto ma sul sedile della apparecchiatura di caduta.

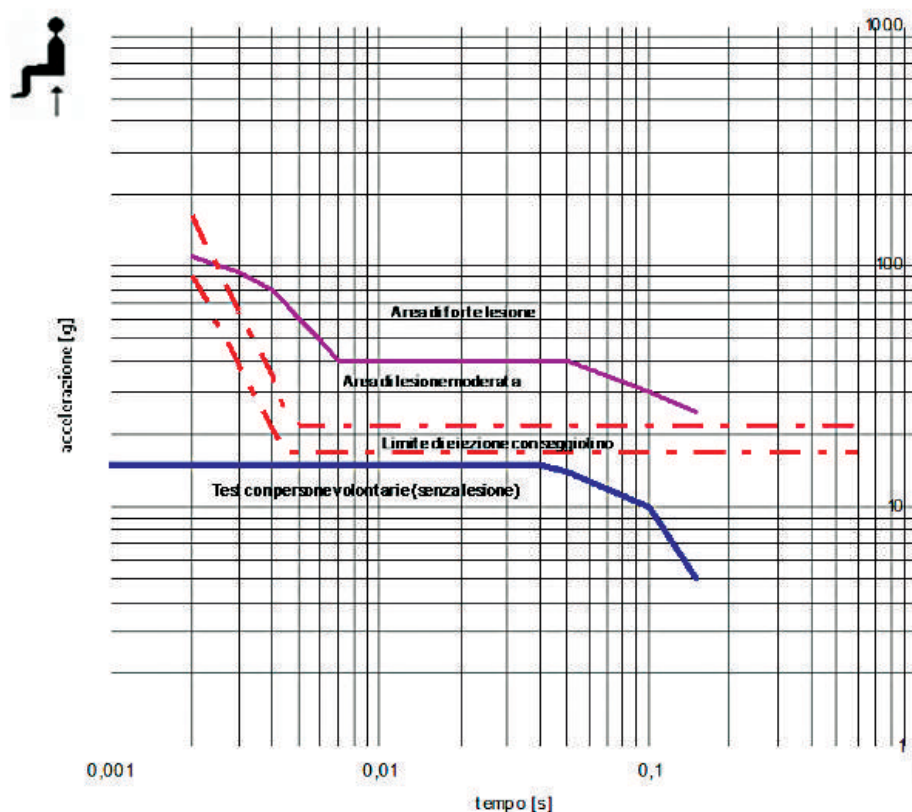


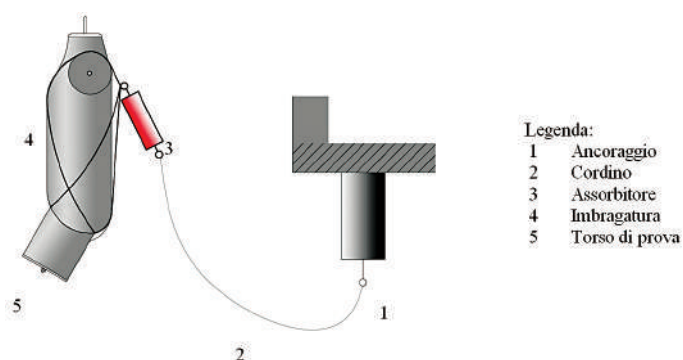
Figura 3.1 – Tolleranza sulla accelerazione nella direzione piedi-testa in funzione del tempo (Eiband). Area di forte lesione, Area di lesione moderata, Limite di eiezione con seggiolino, Test con persone volontarie (senza lesione)

4 Analisi della caduta

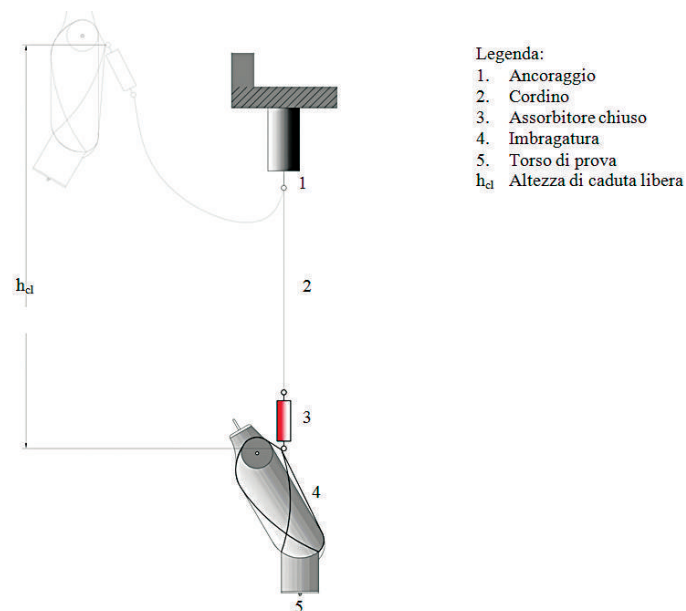
Il corpo umano in caduta può essere schematizzato come un corpo rigido di massa m dotato di imbragatura di sicurezza. Per semplicità di trattazione non vengono considerati i fenomeni dissipativi collegati all'evento [Cor-001][Cor-012].

La caduta può essere suddivisa in quattro fasi denominate fase 1, fase 2, fase 3 e fase 4.

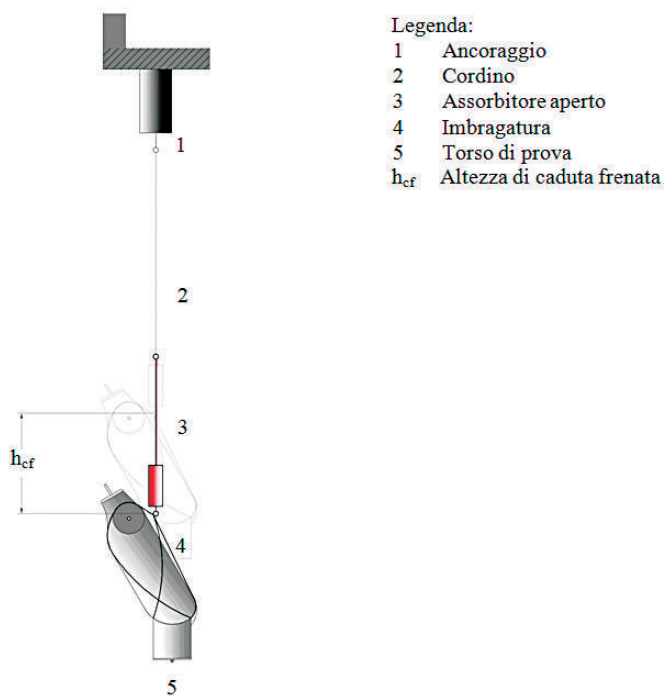
Fase 1: corpo in posizione di riposo in quota.



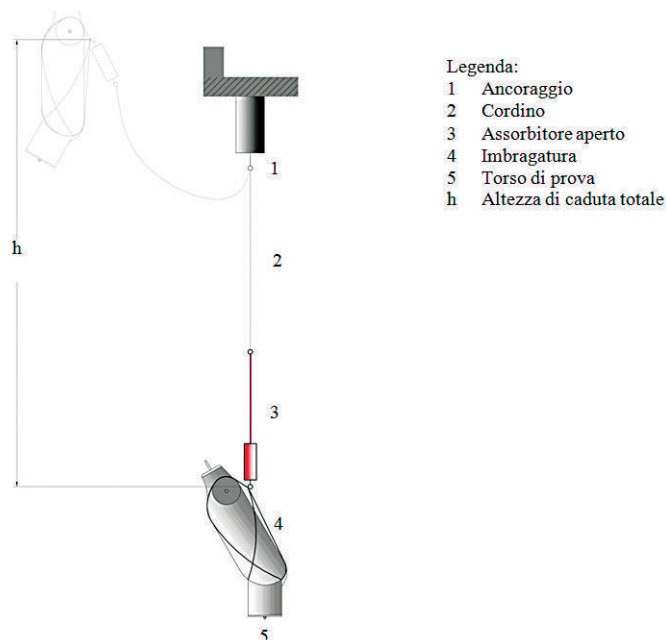
Fase 2: corpo in caduta libera che si muove lungo una traiettoria verticale con moto uniformemente accelerato.



Fase 3: sistema di collegamento che prende il carico del corpo e si tende; corpo in caduta frenata che si muove di moto uniformemente decelerato.



Fase 4: corpo in quiete appeso al cordino.



Simbologia

m	=	massa del corpo [kg massa]
CG	=	posizione del baricentro
g	=	accelerazione di gravità $9,81[m/s^2]$
n	=	numero di g relativi
v	=	velocità del corpo [m/s]
v_0	=	velocità iniziale del corpo [m/s]
v_m	=	velocità massima del corpo raggiunta in caduta libera [m/s]
p	=	forza peso del corpo di massa m [N]
f_f	=	forza frenante agente sul corpo, applicata dal sistema di collegamento [N]
a	=	decelerazione del corpo sotto la forza frenante f_f [m/s ²]
h_{cl}	=	altezza di caduta libera [m]
h_{cf}	=	altezza di caduta frenata [m]
h	=	altezza di caduta totale ($h_{cl} + h_{cf}$) [m]
t_{cl}	=	tempo necessario a raggiungere la velocità v_m [s]
t_{cf}	=	tempo necessario per l'azione dell'effetto frenante [s]
E_{p0}	=	energia potenziale posseduta dal corpo nella posizione di partenza [J]
E_{cm}	=	energia cinetica posseduta dal corpo alla velocità v_m [J]
E_{pm}	=	energia potenziale posseduta dal corpo nell'istante in cui raggiunge la velocità massima v_m in caduta libera [J]

Fase 1 – il corpo sospeso all'ancoraggio è in quiete ($v_0 = 0$), il sistema di collegamento di opportuna lunghezza non è teso; tale posizione costituisce il riferimento per la misura dell'altezza della caduta libera.

Fase 2 – il corpo è in caduta libera, non essendo trattenuto, e si muove lungo una traiettoria verticale con moto uniformemente accelerato con $a = g = 9,81m/s^2$.

Durante questa fase, il corpo è soggetto al solo peso (si trascura la resistenza dell'aria), la distanza percorsa dal corpo durante la caduta libera è data da:

$$h_{cl} = \frac{1}{2}gt_{cl}^2$$

La velocità massima raggiunta dal corpo durante la caduta libera è data da:

$$v_m = gt_{cl}$$

L'energia cinetica alla velocità v_m è data da:

$$E_{cm} = \frac{1}{2}mv_m^2$$

L'energia potenziale corrispondente nella posizione in cui la velocità è v_m è data da:

$$E_{pm} = mgh_{cf}$$

Per il Principio di conservazione dell'Energia meccanica totale, si può scrivere:

$$E_{cm} + E_{pm} = E_{c0} + E_{p0}$$

con $E_{c0} = 0$ e $E_{p0} = mgh$ rispettivamente energia cinetica e energia potenziale all'istante iniziale della caduta.

Da essa si ricava che:

$$v_m = \sqrt{2gh_{cl}}$$

Fase 3 – il sistema di collegamento prende il carico del corpo e si tende; il corpo è in caduta frenata. Si assume che si muova di moto uniformemente decelerato, con decelerazione a costante, e che sia soggetto alla forza peso p e alla forza frenante f_f esercitata dal sistema di collegamento. Il corpo passa dalla velocità massima v_m a velocità nulla $v = 0$. La decelerazione a si può esprimere in funzione della accelerazione di gravità g tramite il fattore n ($a = ng$).

L'equilibrio fra le forze agenti sul corpo può essere espresso tramite la:

$$f = ma$$

che applicata al caso in esame diventa

$$f = -p + f_f = ma = mng$$

La forza frenante f_f può essere espressa, in funzione del numero di g , nella maniera che segue

$$f_f = ma + p = mng + mg = m(n+1)g \quad (1)$$

Da ciò si deduce che:

- la forza d'inerzia ma , che il corpo oppone al rallentamento causato dall'azione del sistema di collegamento, è pari a n volte il peso p ;
- la forza frenante f_f , che il sistema di collegamento applica al corpo e che è la stessa applicata al punto di ancoraggio, è pari a $(n+1)$ volte il peso p .

Dalla (1) si ricava:

$$f_f = mng + p \quad (2)$$

Da cui:

$$n = \frac{f_f - p}{mg} = \frac{f_f}{mg} - 1 \quad (3)$$

L'equilibrio fra le forze agenti sul corpo durante la fase di frenatura può essere espresso tramite la quantità di moto:

$$f = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \frac{v_m - v_0}{t_{cf} - t_0}$$

Se si pone $t_0 = 0$, $v_0 = 0$, e si dividono i membri per mg si ottiene:

$$\frac{f}{mg} = \frac{\sqrt{2gh_{cl}}}{t_{cf}g} = \frac{1}{t_{cf}} \sqrt{\frac{2}{g}h_{cl}}$$

Il valore n diviene dunque:

$$n = \frac{f_f}{mg} - 1 = \frac{f + p}{mg} - 1 = \frac{f}{mg} + \frac{p}{mg} - 1 = \frac{1}{t_{cf}} \sqrt{\frac{2}{g}h_{cl}} \quad (4)$$

La formula (4) esprime la relazione tra numero di g , altezza di caduta libera e tempo di frenata; n è maggiore con h_{cl} elevate e t_{cf} bassi. A parità di altezza di caduta libera, se si impiega un sistema di collegamento più elastico di un altro, il numero di g diminuisce in quanto aumenta il tempo di frenata.

Se si pone $g = 9,81 m/s^2$ la formula (4) diventa:

$$n = \frac{1}{t_{cf}} \sqrt{\frac{2}{g}h_{cl}} = 0,4515 \frac{\sqrt{h_{cl}}}{t_{cf}} \quad (5)$$

Da cui:

$$h_{cl} = \left(\frac{nt_{cf}}{0,4515} \right)^2 \quad (6)$$

La distanza percorsa dal corpo durante la caduta frenata è data da:

$$h_{cf} = \frac{1}{2}at_{cf}^2 \quad (7)$$

La velocità raggiunta dal corpo durante la caduta frenata è data da:

$$v = v_m - at$$

Il tempo di caduta frenata $t = t_{cf}$ è quello per cui la velocità v si annulla. Da ciò deriva:

$$t_{cf} = \frac{v_m}{a} \quad (8)$$

Sostituendo la (8) nella (7) e facendo alcune semplificazioni si ha

$$n = \frac{h_{cl}}{h_{cf}} \quad (9)$$

Quindi il numero n può anche essere espresso come:

$$n = \frac{a}{g}$$

Da cui:

$$\frac{h_{cl}}{h_{cf}} = \frac{a}{g}$$

Il rapporto tra l'altezza di caduta libera e l'altezza di caduta frenata h_{cl}/h_{cf} indica quanto la decelerazione a cui è assoggettato il corpo durante la caduta sia maggiore della accelerazione di gravità g .

Fase 4 – il corpo è in equilibrio dopo l'arresto ed appeso al sistema di collegamento che si è allungato di una lunghezza pari all'altezza di caduta frenata h_{cf} .

Dalla (3) e dalla (9) il numero n può essere espresso come:

$$n = \frac{f_f}{mg} - 1 = \frac{h_{cl}}{h_{cf}} \quad (10)$$

Tale espressione mette in relazione l'altezza di caduta libera h_{cl} , l'altezza di caduta frenata h_{cf} e la forza frenante f_f con la massa del corpo m .

La Tabella 4.1 mostra il numero $n(g)$ e l'altezza di caduta frenata in funzione dell'altezza di caduta e della forza di arresto caratteristica dell'assorbitore per differenti masse di prova. Essa evidenzia che l'efficacia dell'assorbitore è sempre minore man mano che la massa del corpo diminuisce. Per uno stesso decremento della massa si ha sempre un maggiore incremento della decelerazione ed un conseguente aumento dell'altezza di caduta frenata massima che, in base a quanto prescritto dalla UNI EN 355, deve essere al massimo 1,75 m.

Inoltre, per una stessa altezza di caduta libera h_{cl} , a parità di massa, un assorbitore che esplica una forza frenante minore fornisce una decelerazione più bassa (con una altezza di frenata h_{cf} maggiore) rispetto ad un assorbitore che esplica una forza frenante maggiore.

Per rendere più evidenti questi concetti sono stati realizzati alcuni grafici.

Essi mostrano la variazione del numero $n(g)$ (vedasi fig.4.2), dell'altezza di caduta frenata h_{cf} , (vedasi figg.4.3-4.6), del tempo di caduta frenata t_{cf} (vedasi figg.4.7-4.10), al variare della forza frenante f_f esercitata dal sistema di collegamento che dipende principalmente dalle caratteristiche

dell'assorbitore di energia. È stato inoltre rappresentato il grafico dell'altezza di caduta frenata h_{cf} in funzione del tempo di caduta frenata t_{cf} parametrizzata con la decelerazione espressa in g (vedasi fig.3.14).

I grafici sono stati realizzati in funzione dell'altezza di caduta libera (posta a 4, 3, 2 e 1 m) e per differenti masse di prova (60, 80, 100 e 120 kg).

Lo scopo dei grafici e delle tabelle è di evidenziare immediatamente le situazioni per le quali si realizzano sollecitazioni sul corpo del lavoratore che possono risultare critiche (in genere con numero n superiore a 5) o altezze di caduta frenata troppo elevate per le quali non è sempre disponibile un adeguato tirante d'aria.

Tabella 4.1 – Numero $n(g)$, altezza di caduta frenata, tempo di caduta frenata e altezza di caduta totale in funzione della forza frenante per differenti masse di prova con altezza di caduta libera pari a 4 metri

		massa [kg]	$n(g)$	altezza di caduta frenata [m]	tempo di caduta frenata [s]	altezza di caduta totale [m]
		m	$n = \frac{f_f}{mg} - 1$	$h_{cf} = \frac{h_{cl}}{n}$	$t_{cf} = \frac{0,4515}{n} \sqrt{h_{cl}}$	$h_{ct} = h_{cl} + h_{cf}$
altezza di caduta libera $h_{cl} = 4m$	$f_f = 2kN$	60	2,40	1,67	0,38	5,67
		80	1,55	2,58	0,58	6,58
		100	1,04	3,85	0,87	7,85
		120	0,70	5,72	1,29	9,72
	$f_f = 3kN$	60	4,10	0,98	0,22	4,98
		80	2,82	1,42	0,32	5,42
		100	2,06	1,94	0,44	5,94
		120	1,55	2,58	0,58	6,58
	$f_f = 4kN$	60	5,80	0,69	0,16	4,69
		80	4,10	0,98	0,22	4,98
		100	3,08	1,30	0,29	5,30
		120	2,40	1,67	0,38	5,67
	$f_f = 5kN$	60	7,49	0,53	0,12	4,53
		80	5,37	0,74	0,17	4,74
		100	4,10	0,98	0,22	4,98
		120	3,25	1,23	0,28	5,23
	$f_f = 6kN$	60	9,19	0,44	0,10	4,44
		80	6,65	0,60	0,14	4,60
		100	5,12	0,78	0,18	4,78
		120	4,10	0,98	0,22	4,98
	$f_f = 7kN$	60	10,89	0,37	0,08	4,37
		80	7,92	0,51	0,11	4,51
		100	6,14	0,65	0,15	4,65
		120	4,95	0,81	0,18	4,81

Tabella 4.2 – Numero $n(g)$, altezza di caduta frenata, tempo di caduta frenata e altezza di caduta totale in funzione della forza frenante per differenti masse di prova con altezza di caduta libera pari a 3 metri

	massa [kg]	$n(g)$	altezza di	tempo di	altezza di	
			caduta frenata	caduta frenata	caduta totale	
			[m]	[s]	[m]	
	m	$n = \frac{f_f}{mg} - 1$	$h_{cf} = \frac{h_{cl}}{n}$	$t_{cf} = \frac{0,4515}{n} \sqrt{h_{cl}}$	$h_{ct} = h_{cl} + h_{cf}$	
altezza di caduta libera $h_{cl} = 3m$	forza	60	2,40	1,25	0,33	4,25
	frenante	80	1,55	1,94	0,51	4,94
	$f_f = 2kN$	100	1,04	2,89	0,75	5,89
		120	0,70	4,29	1,12	7,29
	forza	60	4,10	0,73	0,19	3,73
	frenante	80	2,82	1,06	0,28	4,06
	$f_f = 3kN$	100	2,06	1,46	0,38	4,46
		120	1,55	1,94	0,51	4,94
	forza	60	5,80	0,52	0,13	3,52
	frenante	80	4,10	0,73	0,19	3,73
	$f_f = 4kN$	100	3,08	0,97	0,25	3,97
		120	2,40	1,25	0,33	4,25
	forza	60	7,49	0,40	0,10	3,40
	frenante	80	5,37	0,56	0,15	3,56
	$f_f = 5kN$	100	4,10	0,73	0,19	3,73
		120	3,25	0,92	0,24	3,92
	forza	60	9,19	0,33	0,09	3,33
	frenante	80	6,65	0,45	0,12	3,45
	$f_f = 6kN$	100	5,12	0,59	0,15	3,59
		120	4,10	0,73	0,19	3,73
	forza	60	10,89	0,28	0,07	3,28
	frenante	80	7,92	0,38	0,10	3,38
	$f_f = 7kN$	100	6,14	0,49	0,13	3,49
		120	4,95	0,61	0,16	3,61

Tabella 4.3 – Numero $n(g)$, altezza di caduta frenata, tempo di caduta frenata e altezza di caduta totale in funzione della forza frenante per differenti masse di prova con altezza di caduta libera pari a 2 metri

	massa [kg]	$n(g)$	altezza di	tempo di	altezza di
			caduta frenata	caduta frenata	caduta totale
			[m]	[s]	[m]
	m	$n = \frac{f_f}{mg} - 1$	$h_{cf} = \frac{h_{cl}}{n}$	$t_{cf} = \frac{0,4515}{n} \sqrt{h_{cl}}$	$h_{ct} = h_{cl} + h_{cf}$
altezza di caduta libera $h_{cl} = 2m$	forza	60	2,40	0,83	2,27
	frenante	80	1,55	1,29	3,29
	$f_f = 2kN$	100	1,04	1,93	3,93
		120	0,70	2,86	4,86
	forza	60	4,10	0,49	2,49
	frenante	80	2,82	0,71	2,71
	$f_f = 3kN$	100	2,06	0,97	2,97
		120	1,55	1,29	3,29
	forza	60	5,80	0,35	2,35
	frenante	80	4,10	0,49	2,49
	$f_f = 4kN$	100	3,08	0,65	2,65
		120	2,40	0,83	2,83
	forza	60	7,49	0,27	2,27
	frenante	80	5,37	0,37	2,37
	$f_f = 5kN$	100	4,10	0,49	2,49
		120	3,25	0,62	2,62
	forza	60	9,19	0,22	2,22
	frenante	80	6,65	0,30	2,30
	$f_f = 6kN$	100	5,12	0,39	2,39
		120	4,10	0,49	2,49
	forza	60	10,89	0,18	2,18
	frenante	80	7,92	0,25	2,25
	$f_f = 7kN$	100	6,14	0,33	2,33
		120	4,95	0,40	2,40

Tabella 4.4 – Numero $n(g)$, altezza di caduta frenata, tempo di caduta frenata e altezza di caduta totale in funzione della forza frenante per differenti masse di prova con altezza di caduta libera pari a 1 metro

	massa [kg]	$n(g)$	altezza di	tempo di	altezza di	
			caduta frenata	caduta frenata	caduta totale	
			[m]	[s]	[m]	
	m	$n = \frac{f_f}{mg} - 1$	$h_{cf} = \frac{h_{cl}}{n}$	$t_{cf} = \frac{0,4515}{n} \sqrt{h_{cl}}$	$h_{ct} = h_{cl} + h_{cf}$	
altezza di caduta libera $h_{cl} = 1m$	forza	60	2,40	0,42	0,19	1,42
	frenante	80	1,55	0,65	0,29	1,65
	$f_f = 2kN$	100	1,04	0,96	0,43	1,96
		120	0,70	1,43	0,65	1,43
	forza	60	4,10	0,24	0,11	1,24
	frenante	80	2,82	0,35	0,16	1,35
	$f_f = 3kN$	100	2,06	0,49	0,22	1,49
		120	1,55	0,65	0,29	1,65
	forza	60	5,80	0,17	0,08	1,17
	frenante	80	4,10	0,24	0,11	1,24
	$f_f = 4kN$	100	3,08	0,32	0,15	1,32
		120	2,4	0,42	0,19	1,42
	forza	60	7,49	0,13	0,06	1,13
	frenante	80	5,37	0,19	0,08	1,19
	$f_f = 5kN$	100	4,10	0,24	0,11	1,24
		120	3,25	0,31	0,14	1,31
	forza	60	9,19	0,11	0,05	1,11
	frenante	80	6,65	0,15	0,07	1,15
	$f_f = 6kN$	100	5,12	0,20	0,09	1,20
		120	4,1	0,24	0,11	1,24
	forza	60	10,89	0,09	0,04	1,09
	frenante	80	7,92	0,13	0,06	1,13
	$f_f = 7kN$	100	6,14	0,16	0,07	1,16
		120	4,95	0,20	0,09	1,20

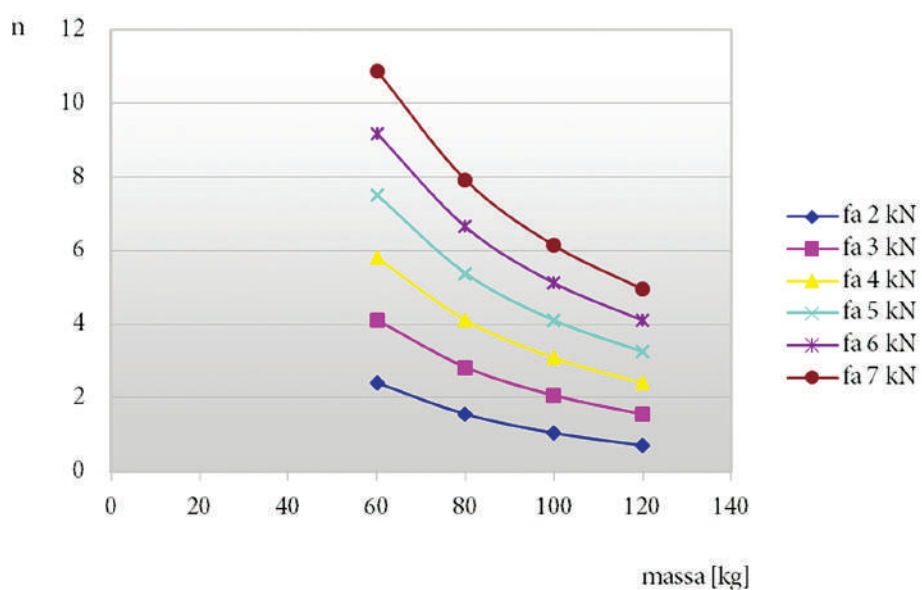


Figura 4.2 – Numero $n(g)$ in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f in funzione della massa

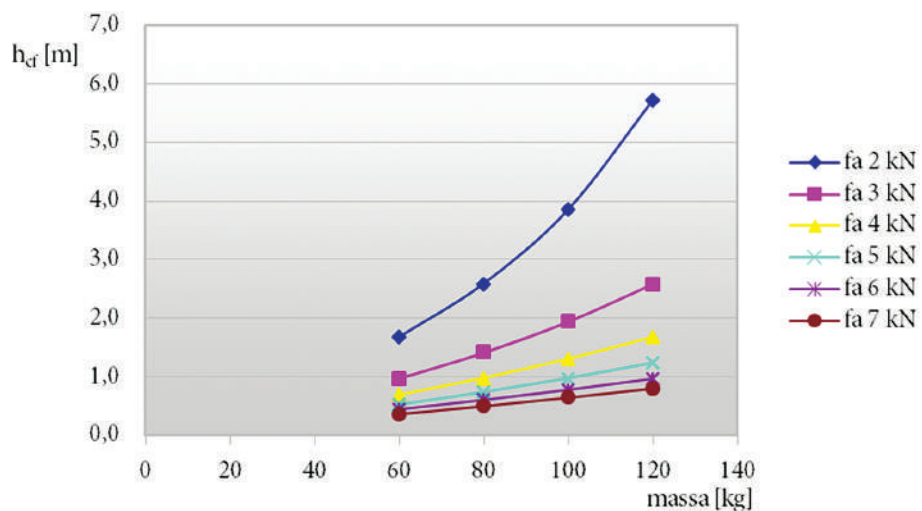


Figura 4.3 – Altezza di caduta frenata h_{cf} in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f e altezza di caduta libera h_{cl} 4 metri

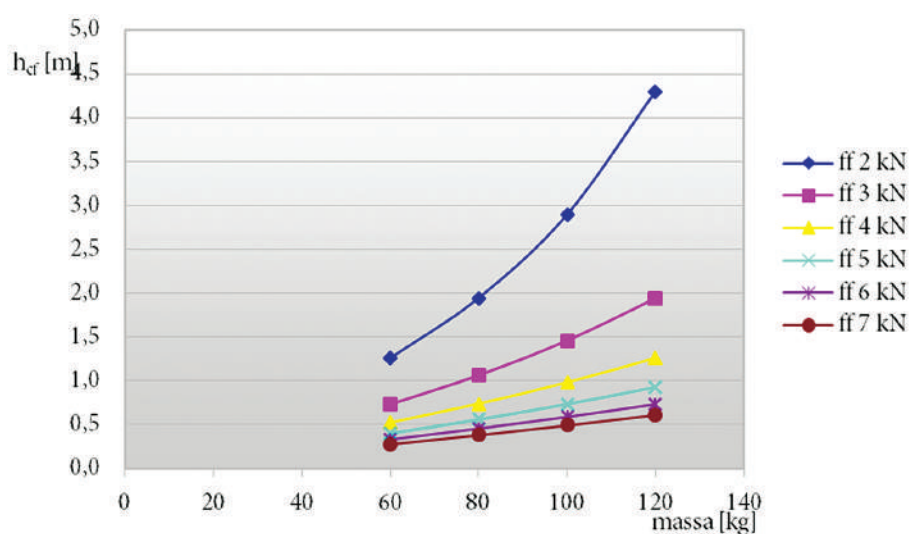


Figura 4.4 – Altezza di caduta frenata h_{cf} in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f e altezza di caduta libera h_{cl} 3 metri

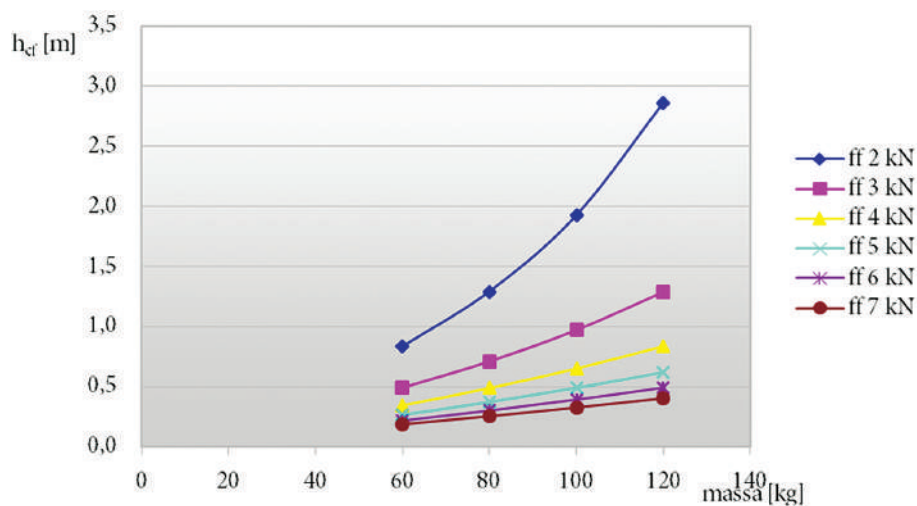


Figura 4.5 – Altezza di caduta frenata h_{cf} in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f e altezza di caduta libera h_{cl} 2 metri

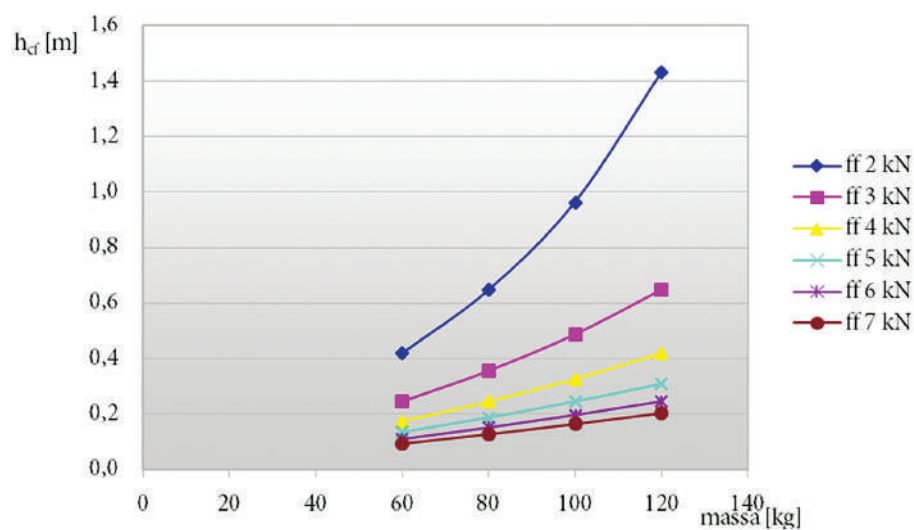


Figura 4.6 – Altezza di caduta frenata h_{cf} in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f e altezza di caduta libera h_{cl} 1 metro

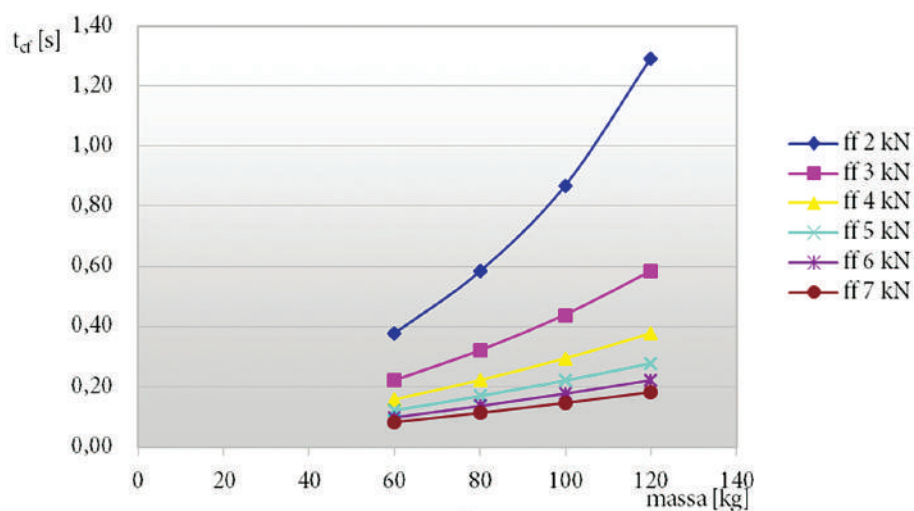


Figura 4.7 – Tempo di caduta frenata t_{cf} in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f e altezza di caduta libera h_{cl} 4 metri

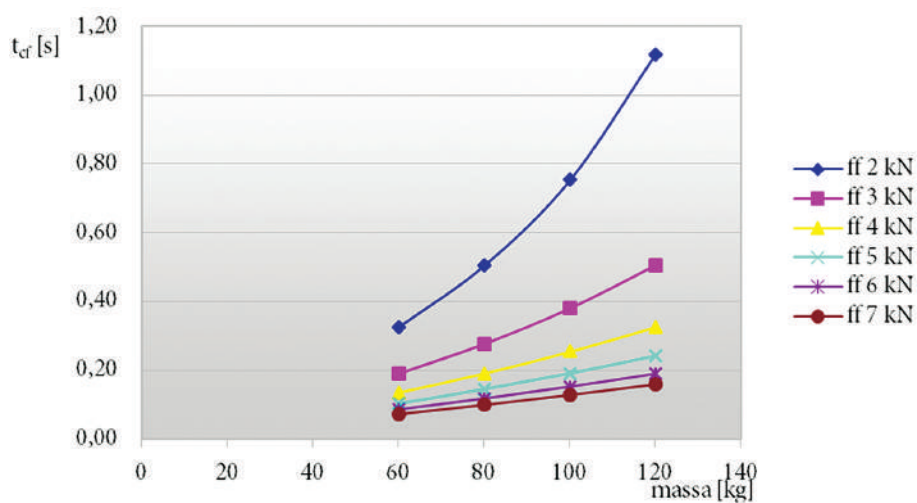


Figura 4.8 – Tempo di caduta frenata t_{cf} in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f e altezza di caduta libera h_{cl} 3 metri

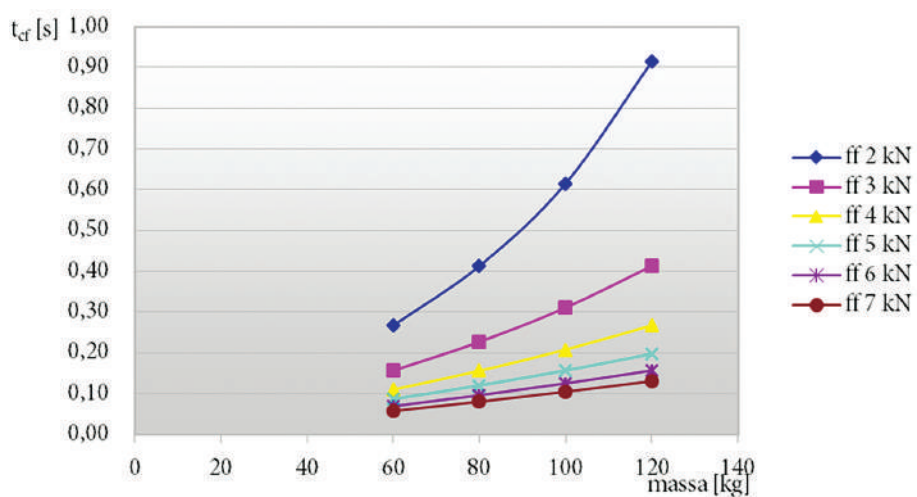


Figura 4.9 – Tempo di caduta frenata t_{cf} in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f e altezza di caduta libera h_{cl} 2 metri

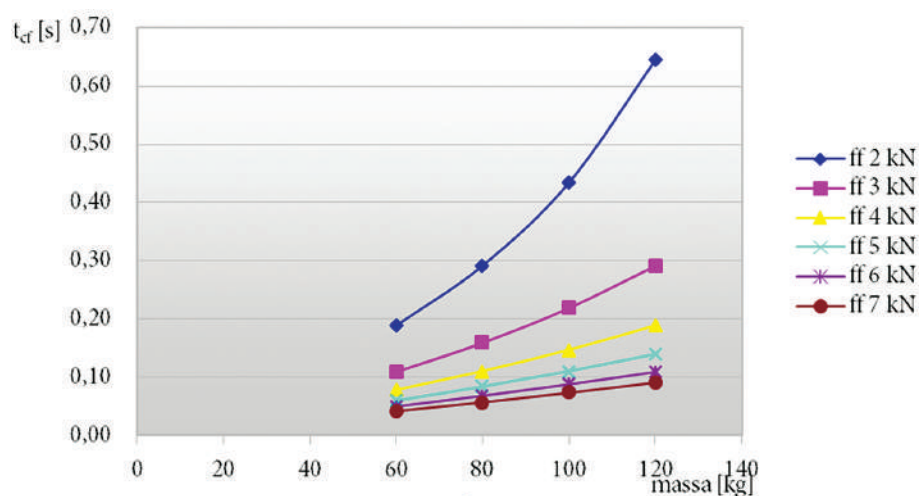


Figura 4.10 – Tempo di caduta frenata t_{cf} in funzione della massa parametrizzata con la forza frenante f_f e altezza di caduta libera h_{cl} 1 metro

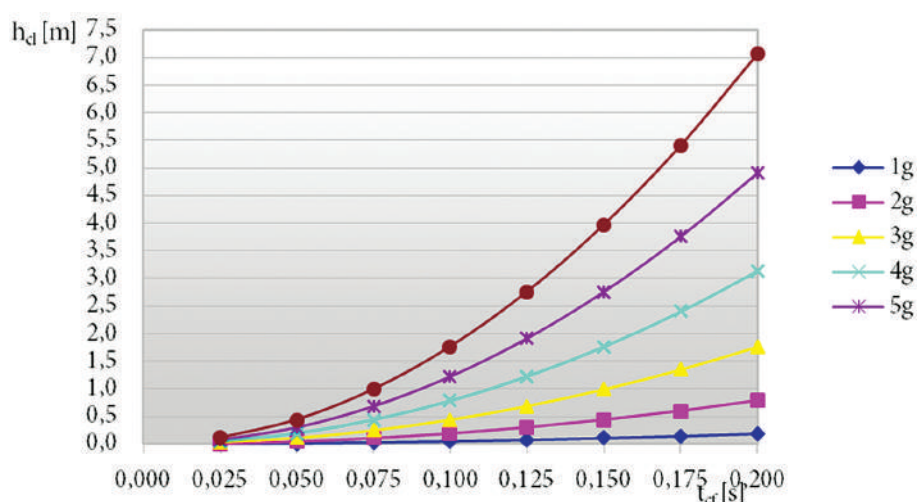


Figura 4.11 – Altezza di caduta frenata h_{cf} in funzione del tempo di caduta frenata t_{cf} parametrizzata con la decelerazione espressa in g

5 Caratteristiche del sistema di collegamento

Il sistema di collegamento in esame è costituito da un cordino, da un assorbitore di energia e da quattro connettori. Il sistema di collegamento è dunque composto da una parte flessibile (cordino più assorbitore) e da una parte rigida (connettori).

Il sistema di collegamento deve essere in grado di trasferire al corpo umano, durante la caduta, delle sollecitazioni compatibili con la resistenza dello stesso. Ciò si ottiene applicando all'imbragatura un cordino ed un assorbitore di energia.

La UNI EN 355: 2003 al punto 4.4 individua il requisito dinamico che l'assorbitore deve soddisfare. Esso è relativo alla forza frenante f_f che non deve essere maggiore di 6kN in corrispondenza di una distanza di arresto h inferiore a $(2L_t + 1,75 \text{ m})$. Per L_t si intende la

lunghezza del cordino più l'assorbitore.

La prova sperimentale per la determinazione della forza frenante f_f , deve essere effettuata come indicato al punto 5.3.4.1 della UNI EN 364: 1992 utilizzando una massa di acciaio rigida o un torso di prova di 100 kg.

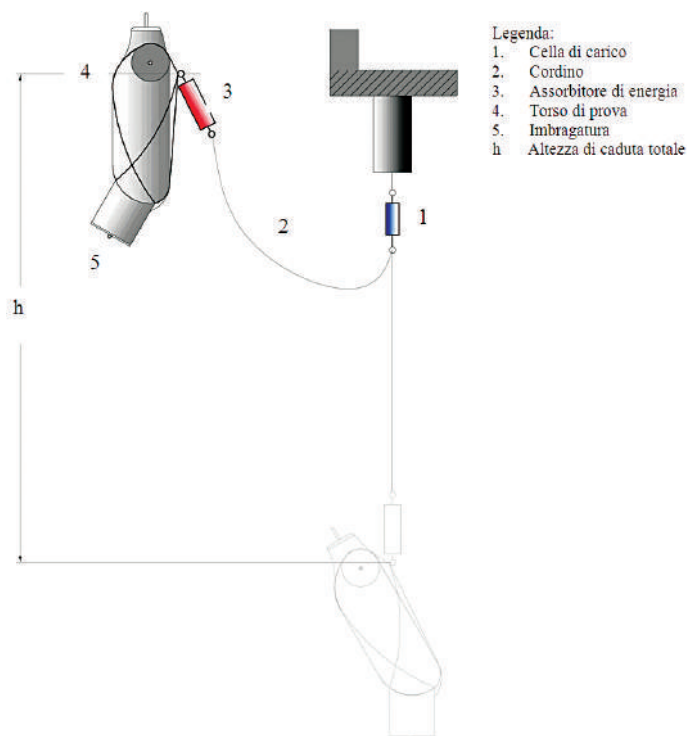


Figura 5.12 – Caratteristiche del sistema

La norma UNI EN 355 fissa dunque dei limiti per i fattori che intervengono nel descrivere la dinamica dell'arresto caduta utilizzando una massa di 100 kg: la forza frenante f_f e l'altezza di caduta totale h , data dalla somma dell'altezza di caduta libera h_{cl} e dell'altezza di caduta frenata h_{cf} . Gli obiettivi della sperimentazione sono dunque di verificare quanto affermato nel capitolo 4 "Analisi della caduta" e cioè che, utilizzando lo stesso assorbitore al variare della massa di prova, cambia:

- il numero $n(g)$;
- la forza frenante f_f ;
- l'altezza di caduta frenata h_{cf} ;
- il tempo di caduta frenata t_{cf} .

6 Test di caduta con torso di prova

6.1 Descrizione delle attrezzature e delle apparecchiature di prova

Le attrezzature e le apparecchiature di prova utilizzate per la esecuzione dei test sono le seguenti:

- un torso di prova strumentato, del peso complessivo di 60/80 kg;
- un torso di prova strumentato, del peso complessivo di 100/120 kg;
- un sistema di acquisizione, registrazione e analisi dei dati;
- una struttura metallica rigida.

I due torsi di prova sono stati realizzati in conformità a quanto previsto nella UNI EN 364 ad eccezione della massa, in quanto la stessa norma prevede solo quella di 100 kg. I torsi sono in legno e con il baricentro CG posto a 200 mm dalla parte inferiore. Il soddisfacimento di tale requisito è stato ottenuto tramite il posizionamento di idonee masse di piombo nelle zone opportune (collo, braccia, gambe). Nell'elemento da 100/120 kg è stata posizionata una massa aggiuntiva avente il baricentro coincidente con quello del torso. Per verificare la correttezza della realizzazione è stato effettuato il bilanciamento dei due torsi.

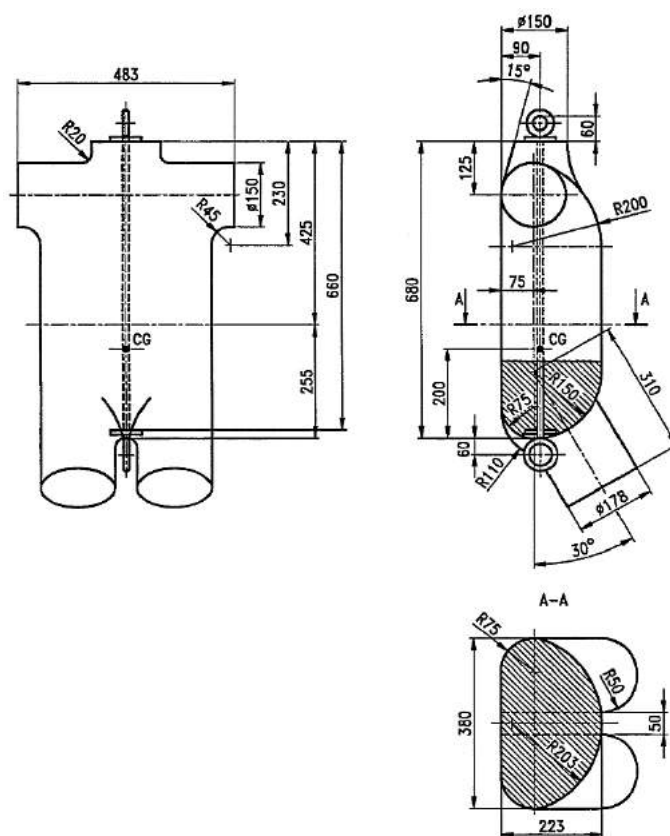


Figura 6.1.1 – Torso di prova (dimensioni tratte dalla UNI EN 364)

Per l'esecuzione dei test con il torso sono stati utilizzati:

- un accelerometro triassiale Measurement Specialities modello 4630 montato sul tronco con range ± 20 g;
- una cella di carico Futek modello LC500 da 9 kN applicata in corrispondenza del punto di ancoraggio;
- una cella di carico Futek modello LC500 da 9 kN applicata in corrispondenza dell'attacco dorsale dell'imbragatura.

Il torso contiene all'interno un sistema di registrazione CompactRio della National Instrument montato su chassis a 4 canali e alimentato con batteria al piombo da 12,5 V 4,5 Ah, a cui sono collegati i trasduttori - accelerometro e celle di carico - sopra elencati. Il sistema ha frequenza di campionamento pari a 50 kS ed è fornito di software di analisi dati installato su pc.

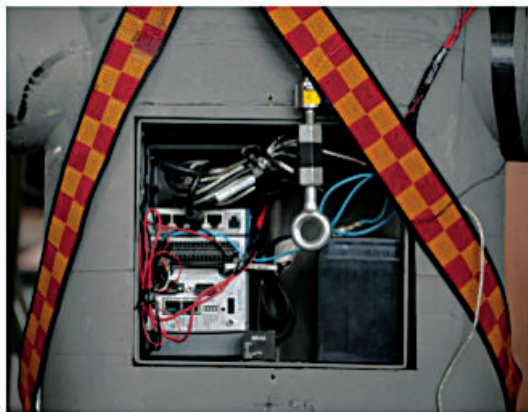


Figura 6.1.2 – Sistema di registrazione

L'attrezzatura di prova, oltre ai torsi, comprende:

- una struttura metallica rigida, realizzata in carpenteria metallica costituita da travi e pilastri HE, che consente l'ancoraggio e la sospensione del torso, di altezza e dimensioni laterali tali da permettere allo stesso in caduta libera di non impattare contro il suolo o la struttura metallica stessa;
- un dispositivo di sollevamento e di sgancio rapido del torso di tipo elettromagnetico che consente a questo di iniziare la caduta libera senza apprezzabile velocità iniziale.



Figura 6.1.3 – Attrezzatura di prova



Figura 6.1.4 – Attrezzatura di prova - particolare del punto di ancoraggio fisso



Figura 6.1.5 – Attrezzatura di prova - particolare del punto di ancoraggio fisso



Figura 6.1.6 – Attrezzatura di prova - particolare del sistema di sollevamento e sgancio di tipo elettromagnetico



Figura 6.1.7 – Attrezzatura di prova - particolare del sistema di sollevamento e sgancio di tipo elettromagnetico

6.2 Componenti dei sistemi di arresto caduta utilizzati

Si riporta di seguito una sintetica descrizione dei componenti utilizzati per la esecuzione dei test.

Connettore – Dispositivo apribile utilizzato per connettere componenti che permettono al lavoratore di assemblare un sistema in modo da collegarlo direttamente o indirettamente ad un ancoraggio.



Figura 6.2.1 – Connettore

Cordino – Elemento di collegamento o componente di un sistema di arresto caduta. Un cordino può essere costituito da una corda di fibra sintetica, una fune metallica, una cinghia o una catena.

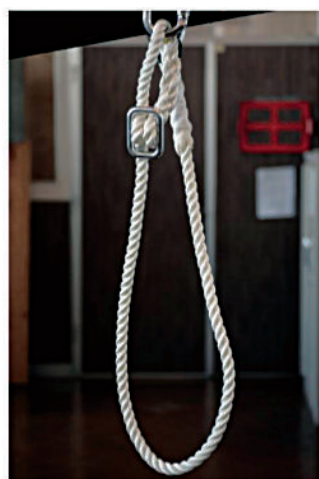


Figura 6.2.2 – Cordino

Assorbitore di energia – Elemento o componente di un sistema di arresto caduta progettato per disperdere l'energia cinetica sviluppatasi nel corso di una caduta dall'alto.



Figura 6.2.3 – Assorbitore di energia

Imbragatura per il corpo – Supporto per il corpo principalmente ai fini dell'arresto caduta, cioè un componente di un sistema di arresto caduta. L'imbragatura per il corpo può comprendere cinghie, accessori, fibbie o altri elementi, disposti e assemblati opportunamente per sostenere tutto il corpo di una persona e tenerla durante una caduta e dopo l'arresto della caduta.



Figura 6.2.4 – Imbragatura per il corpo

6.3 Descrizione del test

6.3.1 Convenzioni

Le convenzioni utilizzate per descrivere le accelerazioni sono mostrate nella figura ed evidenziate nella tabella che seguono:

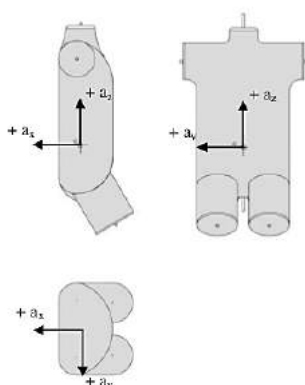


Figura 6.3.1-1 – Convenzione utilizzata per descrivere le accelerazioni (convenzione centro del corpo)

Tabella 6.3.1 – Descrizione accelerazioni (convenzione centro del corpo)

convenzione (centro del corpo)	direzione accelerazione
$+a_x$	da davanti
$-a_x$	da dietro
$+a_z$	da sotto
$-a_z$	da sopra
$+a_y$	da sinistra
$-a_y$	da destra

6.3.2 Test di caduta

Il test consiste nella caduta del torso di prova collegato al punto di ancoraggio fisso mediante il sistema di arresto caduta.

Al torso vengono applicati l'imbragatura, il cordino, l'assorbitore, i connettori, l'accelerometro ed una cella di carico, successivamente viene assicurato alla imbragatura il dispositivo di sollevamento e sgancio di tipo elettromagnetico tramite il quale viene sollevato.

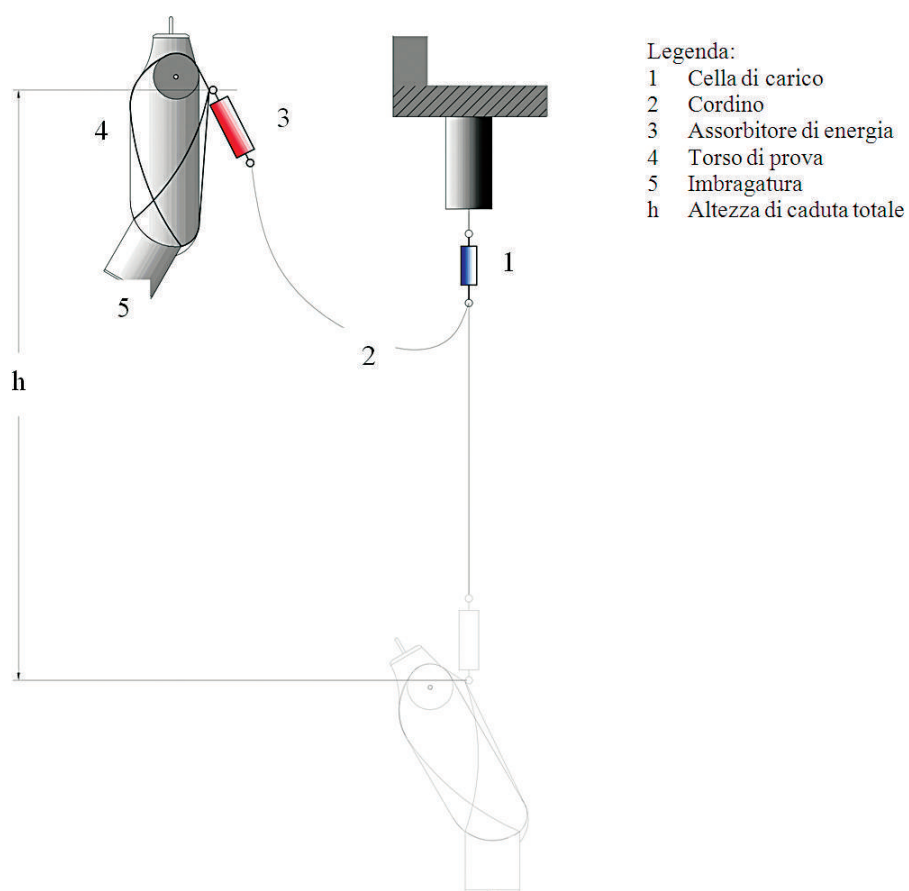


Figura 6.3.2-1 – Test di caduta

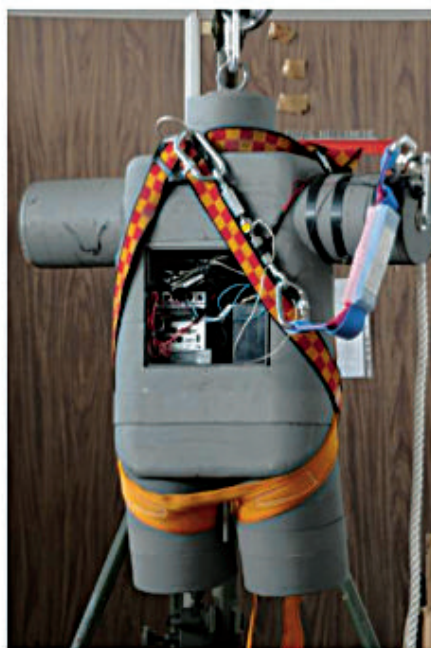


Figura 6.3.2-2 – Vista posteriore del torso di prova



Figura 6.3.2-3 – Vista anteriore del torso di prova

Il sistema di arresto caduta viene collegato all'altra cella di carico, posizionata in corrispondenza del punto di ancoraggio fisso. Successivamente si procede effettuando lo sgancio utilizzando il sistema precedentemente descritto.

Dopo ogni caduta, con il torso sospeso e fermo nella posizione finale di equilibrio, viene misurata l'altezza del punto di attacco dell'imbragatura al sistema di collegamento.

Il sistema di acquisizione è stato configurato per attivarsi automaticamente con lo sgancio del torso ed effettuare la registrazione delle grandezze in gioco – forze ed accelerazioni – per tutta la durata del fenomeno.

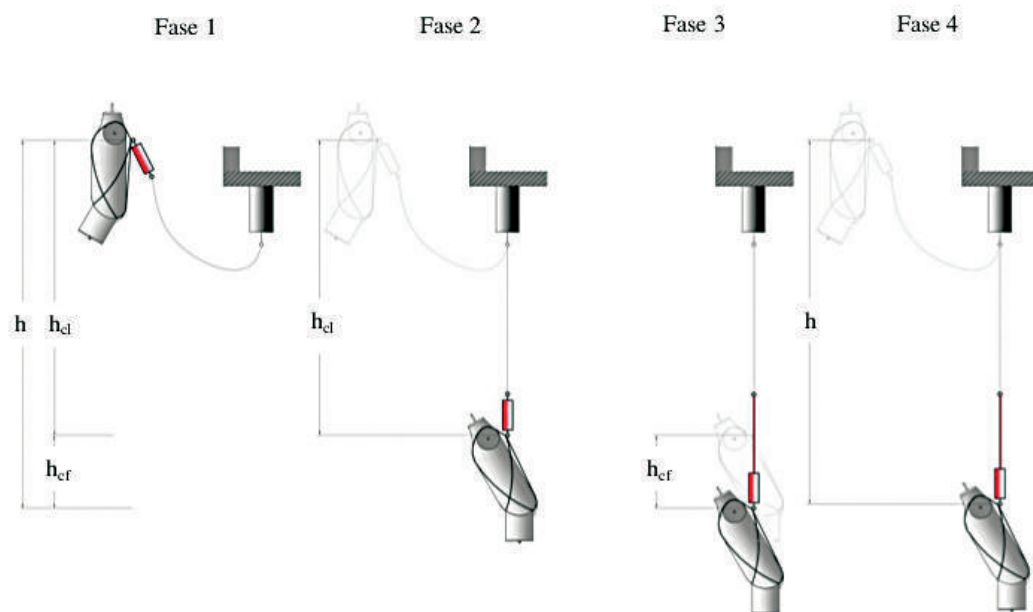


Figura 6.3.2-4 – Fasi di prova



Figura 6.3.2-5 – Posizione iniziale (Fase 1)

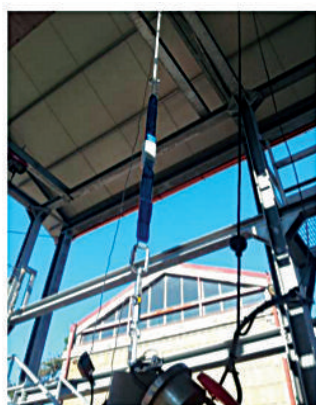


Figura 6.3.2-6 – Posizione finale (Fase 4 - si noti l'assorbitore svolto)

7 Risultati delle prove

7.1 Generalità

Le prove sono state eseguite impiegando solamente le masse da 60 e 80 kg, in una fase successiva della sperimentazione verranno utilizzate le altre due (100 e 120 kg). Sono stati inoltre utilizzati tre tipi di assorbitore denominati A, B, e C.

Per ogni assorbitore sono state eseguite n. 4 cadute con h_{cl} variabile da 1 a 4 m.

I risultati più importanti relativi alle prove effettuate sono riepilogati nelle tabelle 7.1.1, 7.1.2, 7.1.3 e 7.1.4. Essi sono relativi al numero $n(g)$ lungo l'asse z , la direzione significativa per la quale è stato effettuato lo studio.

Tabella 7.1.1 – Forza frenante, numero $n(g)$, altezza di caduta frenata e tempo di caduta frenata per masse di prova di 60 ed 80 kg con altezza di caduta libera pari a 4 metri

	forza frenante f_f [kN]	prova	massa [kg]	$n(g)$ $n=a/g$	altezza di caduta frenata h_{cf} [m]	tempo di caduta frenata t_{cf} [s]
altezza di caduta libera $h_{cl} = 4m$	4,633	tipo A	60	5,85	0,61	0,14
	4,128	tipo B	60	5,33	0,65	0,12
	4,38	tipo C	60	5,69	0,63	0,15
	5,413	tipo A	80	4,61	0,81	0,18
	4,246	tipo B	80	4,38	0,86	0,13
	4,577	tipo C	80	4,32	0,86	0,18

Tabella 7.1.2 – Forza frenante, numero $n(g)$, altezza di caduta frenata e tempo di caduta frenata per masse di prova di 60 ed 80 kg con altezza di caduta libera pari a 3 metri

	forza frenante f_f [kN]	prova	massa [kg]	$n(g) \ n=a/g$	altezza di caduta frenata h_{cf} [m]	tempo di caduta frenata t_{cf} [s]
altezza di caduta libera $h_{cl} = 3m$	4,933	tipo A	60	6,14	0,47	0,20
	3,801	tipo B	60	5,03	0,52	0,13
	4,583	tipo C	60	6,00	0,49	0,20
	6,372	tipo A	80	5,00	0,58	0,23
	3,971	tipo B	80	4,09	0,63	0,13
	4,414	tipo C	80	3,92	0,68	0,26

Tabella 7.1.3 – Forza frenante, numero $n(g)$, altezza di caduta frenata e tempo di caduta frenata per masse di prova di 60 ed 80 kg con altezza di caduta libera pari a 2 metri

	forza frenante f_f [kN]	prova	massa [kg]	$n(g) \ n=a/g$	altezza di caduta frenata h_{cf} [m]	tempo di caduta frenata t_{cf} [s]
altezza di caduta libera $h_{cl} = 2m$		tipo A	60		0,27	
	4,062	tipo B	60	5,30	0,44	0,18
	4,124	tipo C	60	5,42	0,27	0,20
	6,116	tipo A	80	4,04	0,33	0,18
	3,791	tipo B	80	3,67	0,46	0,15
	5,54	tipo C	80	5,56	0,35	0,24

Tabella 7.1.4 – Forza frenante, numero $n(g)$, altezza di caduta frenata e tempo di caduta frenata per masse di prova di 60 ed 80 kg con altezza di caduta libera pari a 1 metro

	forza frenante f_f [kN]	prova	massa [kg]	$n(g) \ n=a/g$	altezza di caduta frenata h_{cf} [m]	tempo di caduta frenata t_{cf} [s]
altezza di caduta libera $h_{cl} = 1m$	5,612	tipo A	60	4,29	0,10	0,23
	3,786	tipo B	60	5,03	0,14	0,21
	4,536	tipo C	60	3,97	0,12	0,18
	5,612	tipo A	80	4,22	0,13	0,11
	3,786	tipo B	80	3,12	0,19	0,19
	4,536	tipo C	80	3,66	0,14	0,26

Sono stati inoltre elaborati dei grafici che mostrano gli allungamenti del sistema di collegamento in funzione delle altezze di caduta libera h_{cl} . Essi sono di seguito riportati.

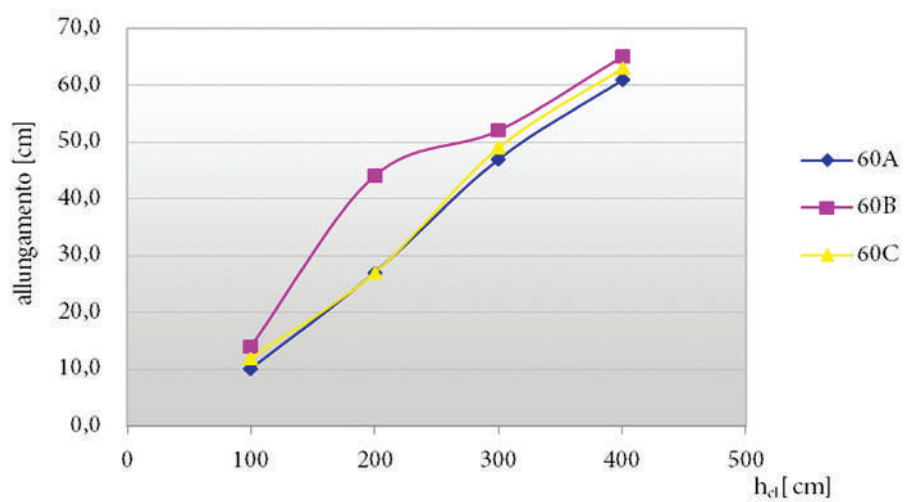


Figura 7.1.1 – Allungamenti del sistema di collegamento in funzione dell'altezza di caduta per la massa di 60 kg

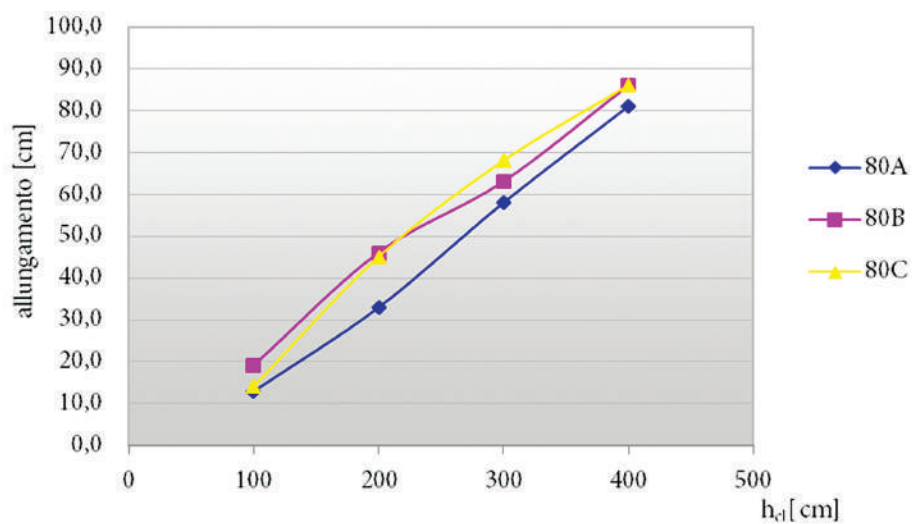


Figura 7.1.2 – Allungamenti del sistema di collegamento in funzione dell'altezza di caduta per la massa di 80 kg

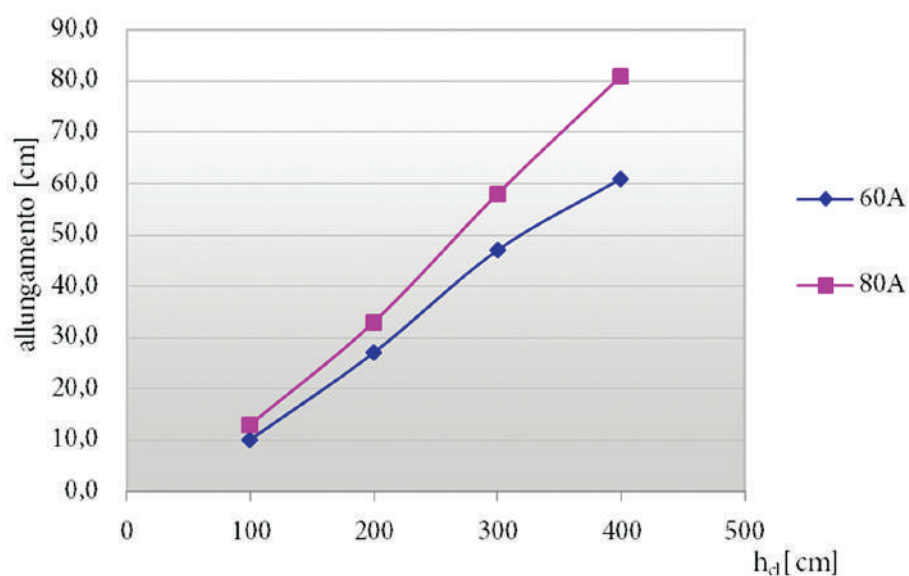


Figura 7.1.3 – Allungamenti del sistema di collegamento in funzione dell'altezza di caduta per il tipo A

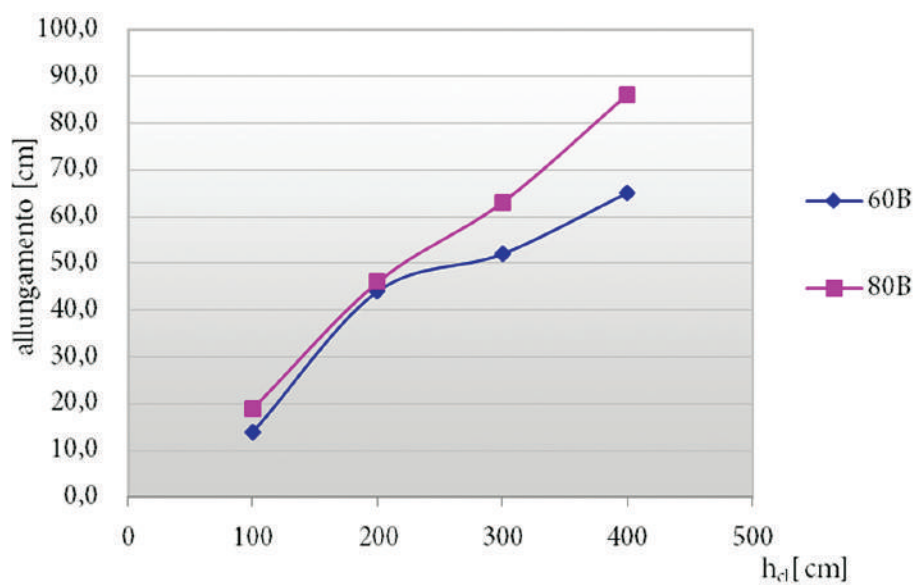


Figura 7.1.4 – Allungamenti del sistema di collegamento in funzione dell'altezza di caduta per il tipo B

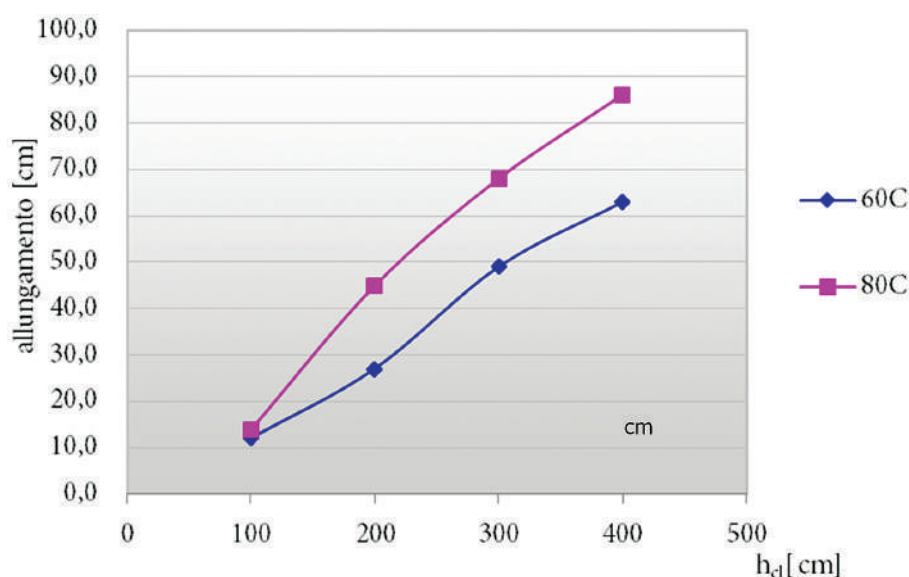


Figura 7.1.5 – Allungamenti del sistema di collegamento in funzione dell'altezza di caduta per il tipo C

7.2 Grafici relativi ad accelerazione e forze

I grafici di seguito riportati, realizzati tramite il sistema di registrazione ed analisi precedentemente descritto, riguardano l'accelerazione lungo gli assi x , y e z del torso e le forze misurate in corrispondenza dell'ancoraggio e dell'attacco dorsale dell'imbragatura.

In particolare, i grafici delle accelerazioni, sono stati ottenuti applicando un filtro passa basso delle frequenze in post analisi pari a 10 Hz.

Di seguito sono riportati i grafici di ogni prova che evidenziano la curva $n(g)$ - tempo relativa al torso lungo l'asse x , l'asse y e l'asse z . Il quarto grafico di ogni test è relativo alla curva forza frenante f_f - tempo.

Per semplicità di trattazione, rispetto alla campagna totale, vengono proposti i test effettuati con massa pari a 60 kg equipaggiata con l'assorbitore del tipo B alle varie altezze di caduta denominati 60/4 B, 60/3 B, 60/2 B e 60/1 B.

A tutti i grafici sono state affiancate delle tabelle esplicative per evidenziare i punti più significativi analizzati che sono: P_0 l'istante in cui ha inizio il fenomeno, P_1 l'istante in cui $g = 0$, P_2 l'istante in cui si ha la decelerazione massima e forza frenante massima, P_3 l'istante in cui g è nuovamente 0 e P_4 l'istante in cui l'evento termina.

L'andamento dell'accelerazione (figura 7.2-1 grafico verde) può essere così rappresentato:

- 1 – Il corpo sospeso all'ancoraggio è in quiete ($v_0 = 0$) ed il sistema di collegamento di opportuna lunghezza non è teso (tratto antecedente P_0).

- 2 – Il corpo è in caduta libera lungo una traiettoria verticale con moto accelerato ed a [m/s^2] che passa da 9,81 a 0 (tratto P_0 P_1).
- 3 – Il sistema di collegamento prende il carico del corpo e si tende; il corpo è in caduta frenata. Esso si muove di moto decelerato con a [m/s^2] che passa da 0 (P_1) ad a_{max} (P_2) per poi tornare nuovamente a 0 (P_3). Successivamente a P_3 e prima di P_4 il corpo oscilla attorno alla posizione di equilibrio a causa dell'inerzia del sistema di collegamento.
- 4 – Il corpo è in equilibrio dopo l'arresto ed appeso al sistema di collegamento (P_4) con accelerazione [m/s^2] uguale a 9,81.

L'andamento della forza frenante (figura 7.2-1 grafico rosso) può essere così rappresentato:

- 1 – Il corpo sospeso all'ancoraggio è in quiete ($v_0 = 0$) ed il sistema di collegamento di opportuna lunghezza non è teso (tratto antecedente P_0).
- 2 – Il corpo è in caduta libera e si muove lungo una traiettoria verticale con moto accelerato, la forza frenata f_f è pari a 0 [kN] (tratto P_0 P_1).
- 3 – Il sistema di collegamento prende il carico del corpo e si tende; il corpo è in caduta frenata. Esso si muove di moto decelerato con f_f [kN] che passa da 0 (P_1) ad f_{fmax} (P_2) per poi tornare nuovamente a 0 (P_3). Successivamente a P_3 il corpo oscilla attorno alla posizione di equilibrio a causa dell'inerzia del sistema di collegamento.
- 4 – Il corpo è in equilibrio dopo l'arresto ed appeso al sistema di collegamento (P_4) con f_f uguale ad mg [kN].

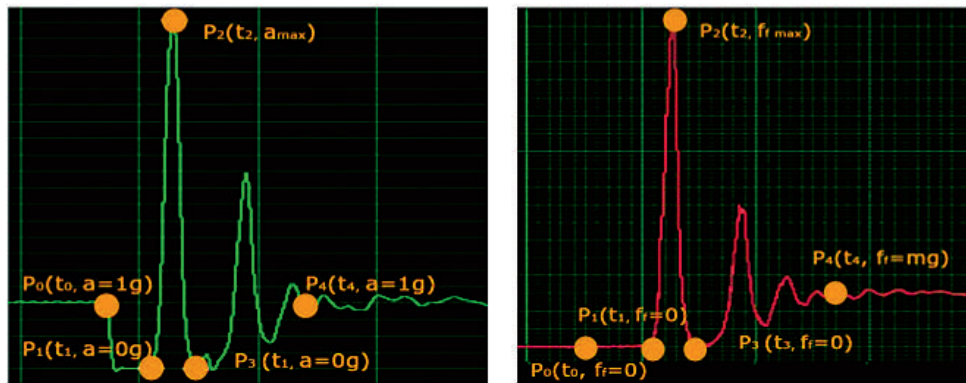


Figura 7.2.6 – Indicazione dei punti significativi del fenomeno

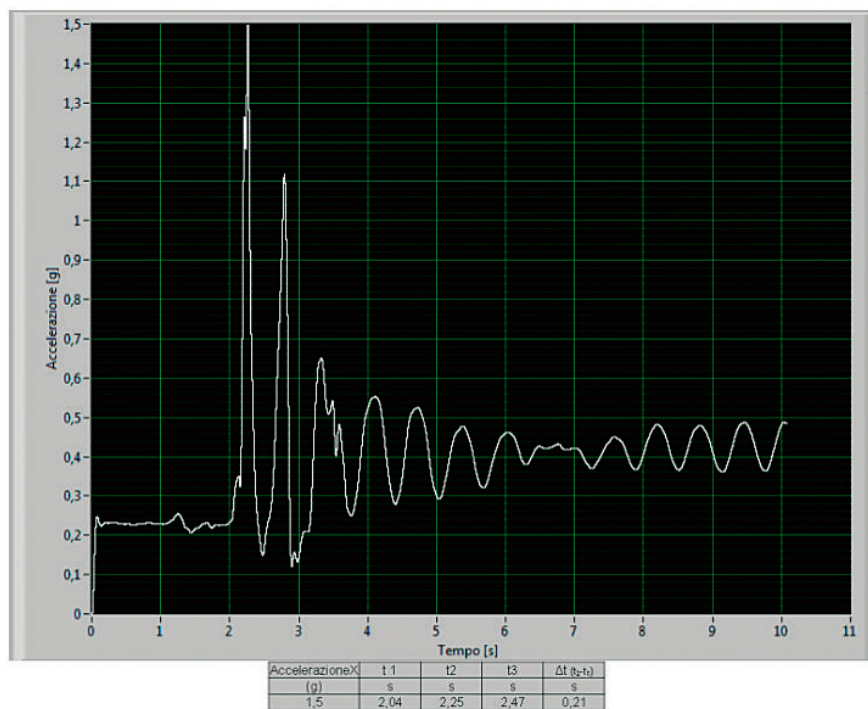


Figura 7.2.7 – Prova 60/1 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse x rispetto al tempo [s]

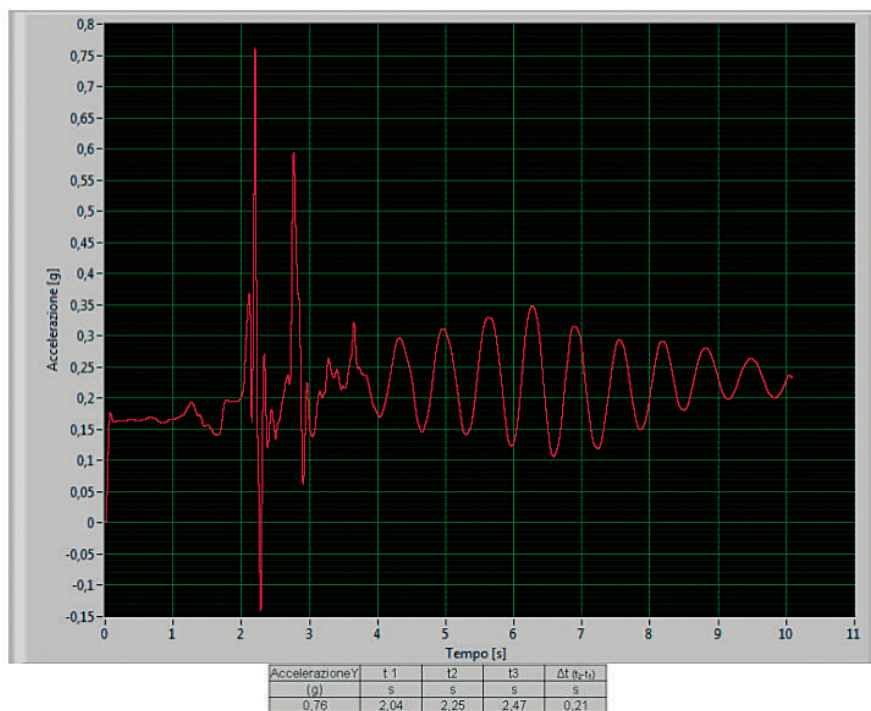


Figura 7.2.8 – Prova 60/1 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse y rispetto al tempo [s]

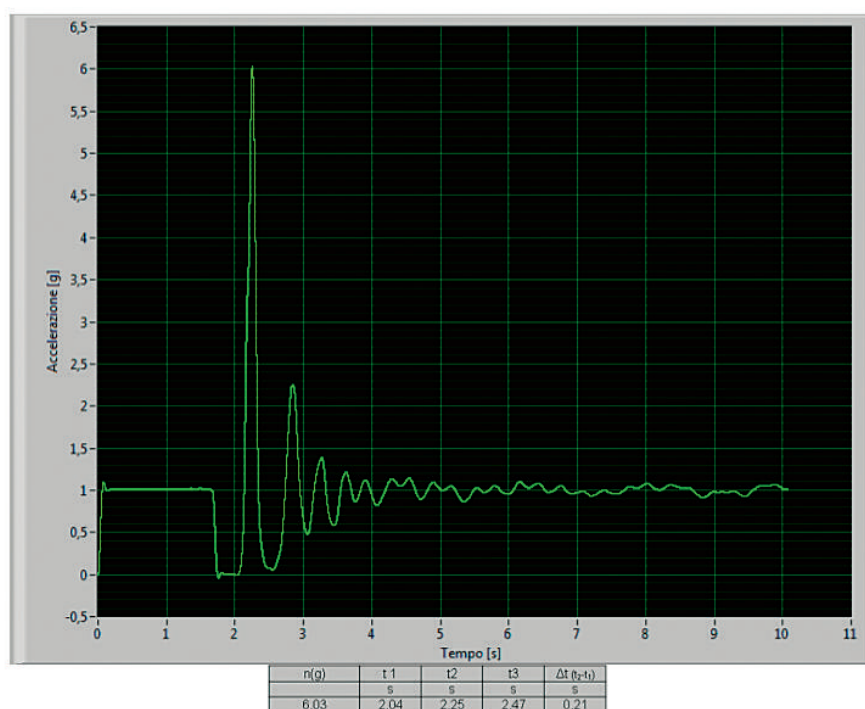


Figura 7.2.9 – Prova 60/1 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse z rispetto al tempo [s]

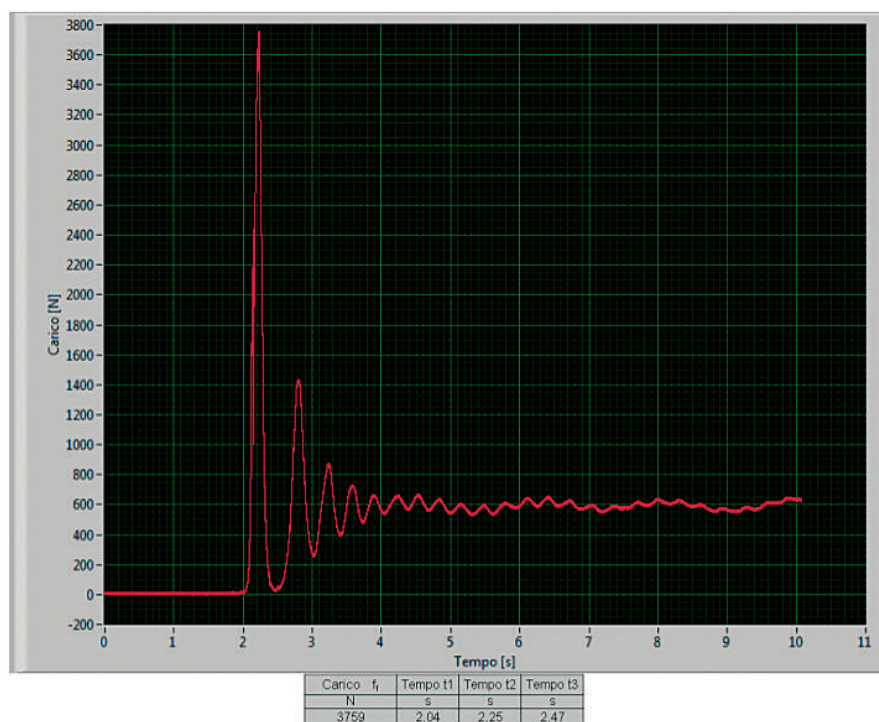


Figura 7.2.10 – Prova 60/1 B andamento della forza frenante (N) rispetto al tempo [s]

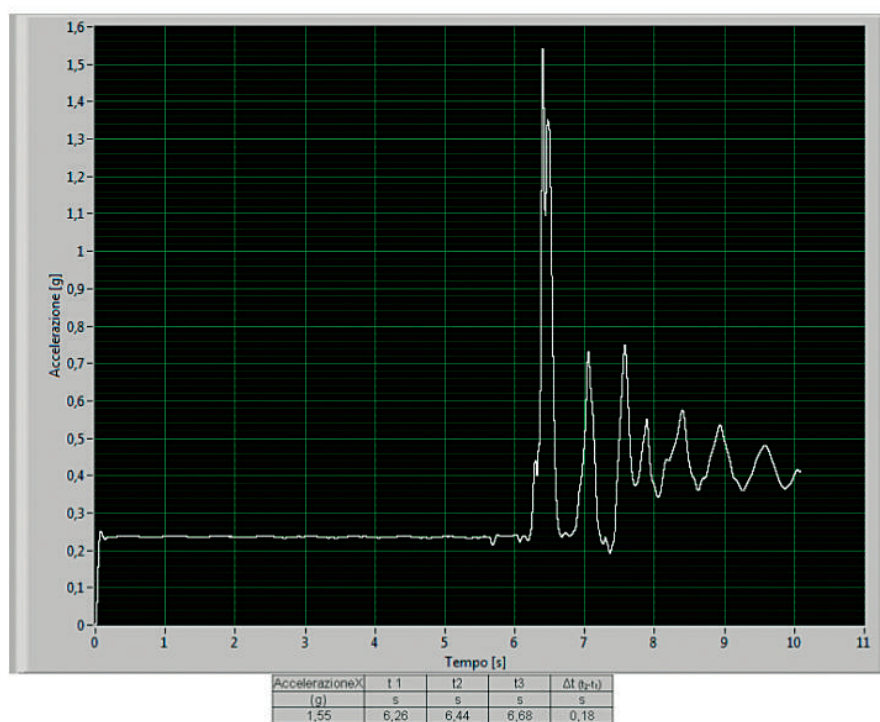


Figura 7.2.11 – Prova 60/2 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse x rispetto al tempo [s]

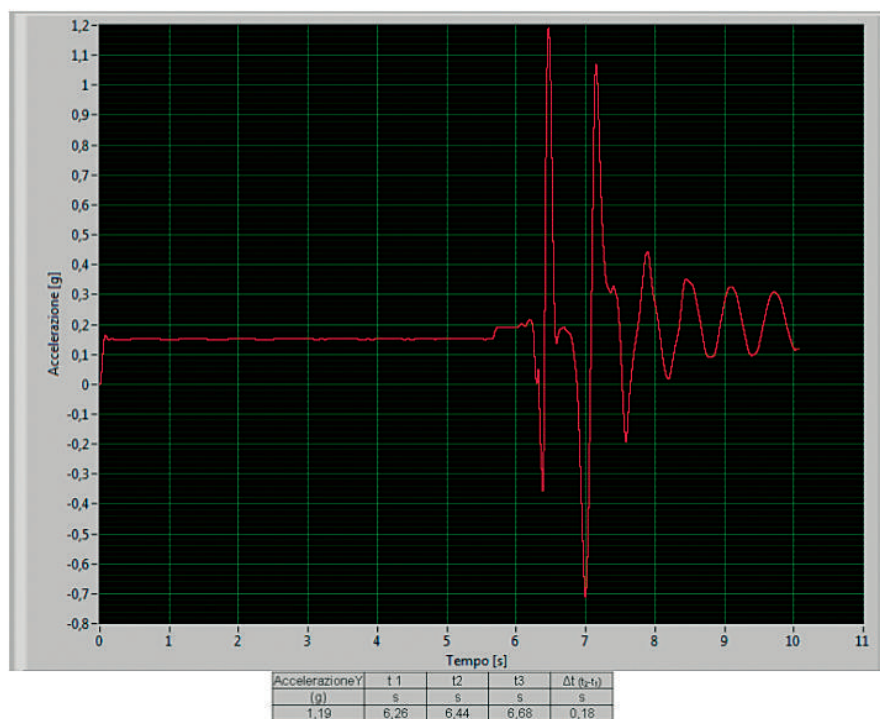


Figura 7.2.12 – Prova 60/2 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse y rispetto al tempo [s]

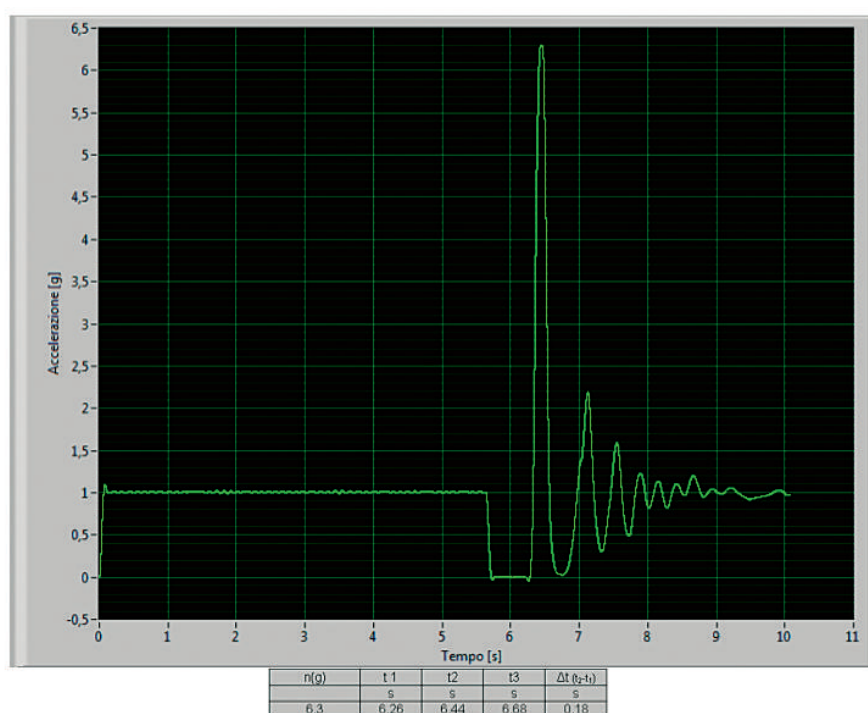


Figura 7.2.13 – Prova 60/2 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse z rispetto al tempo [s]

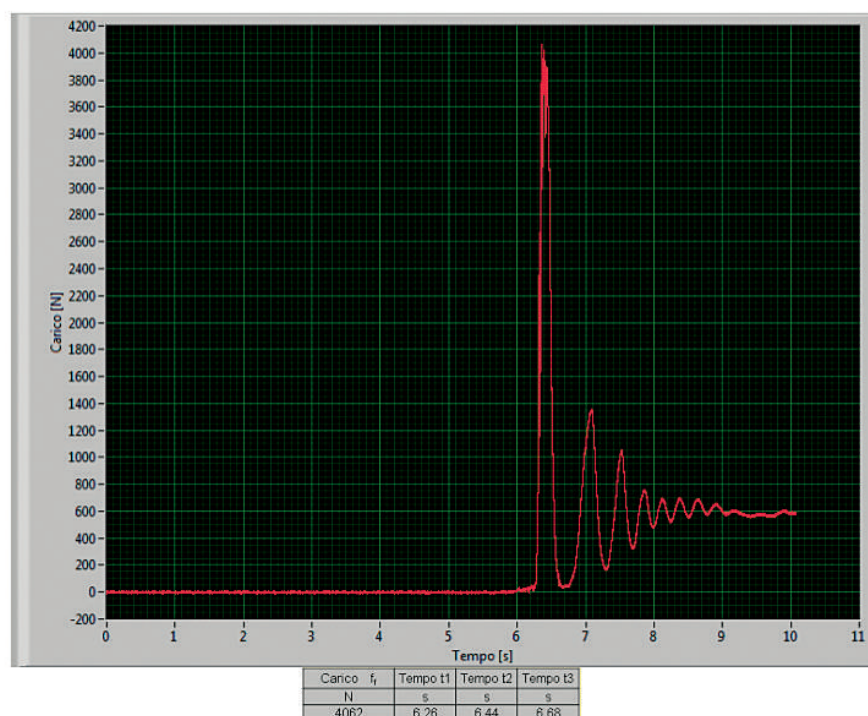


Figura 7.2.14 – Prova 60/2 B andamento della forza frenante (N) rispetto al tempo [s]

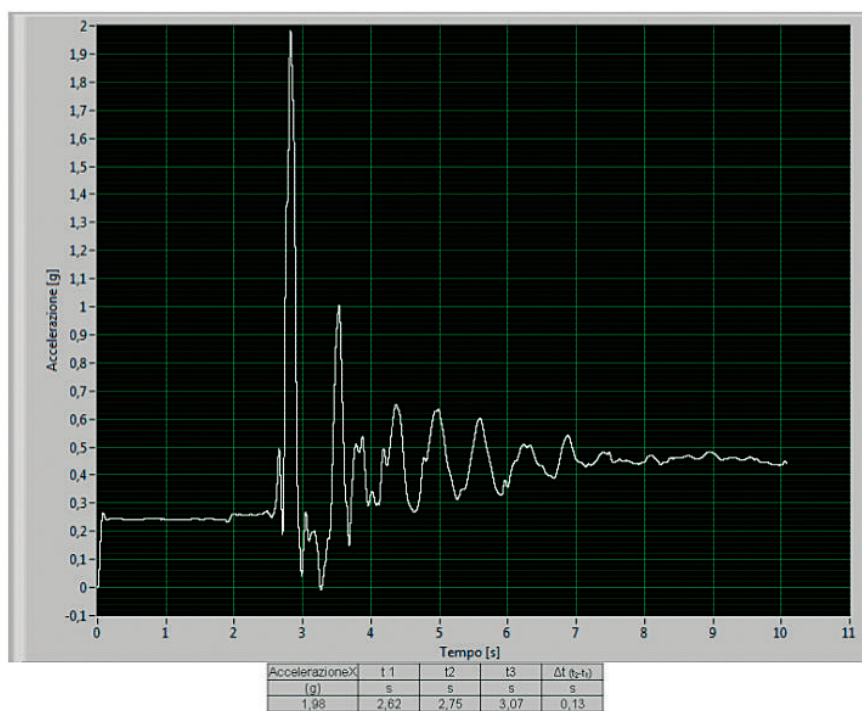


Figura 7.2.15 – Prova 60/3 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse x rispetto al tempo [s]

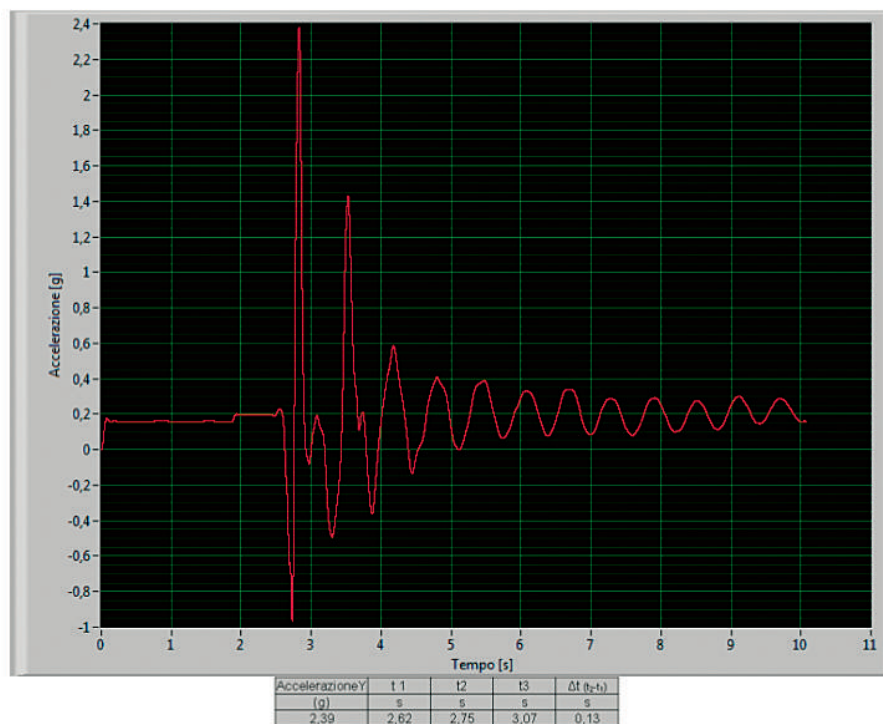


Figura 7.2.16 – Prova 60/3 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse y rispetto al tempo [s]

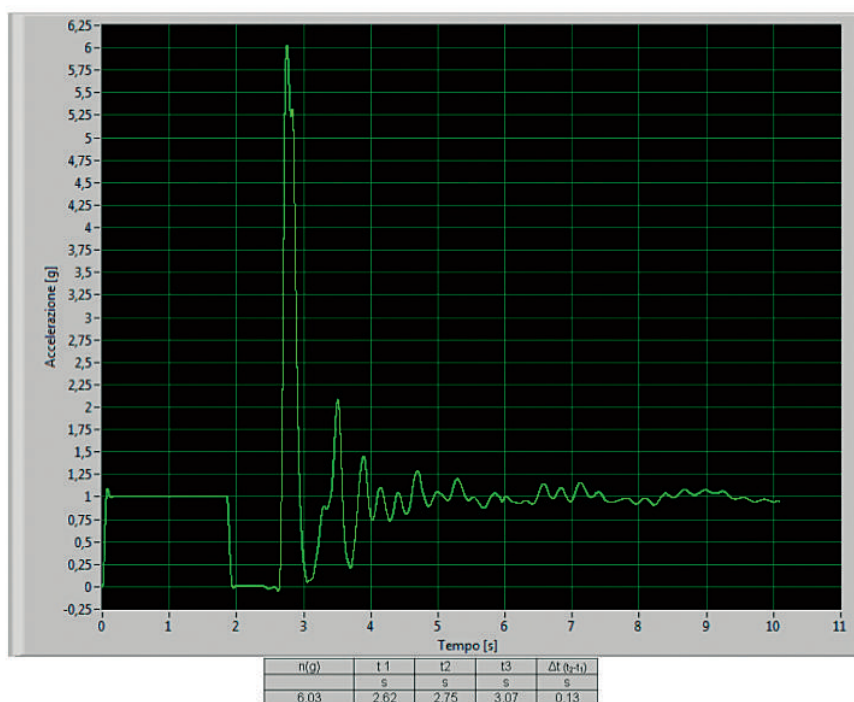


Figura 7.2.17 – Prova 60/3 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse z rispetto al tempo [s]

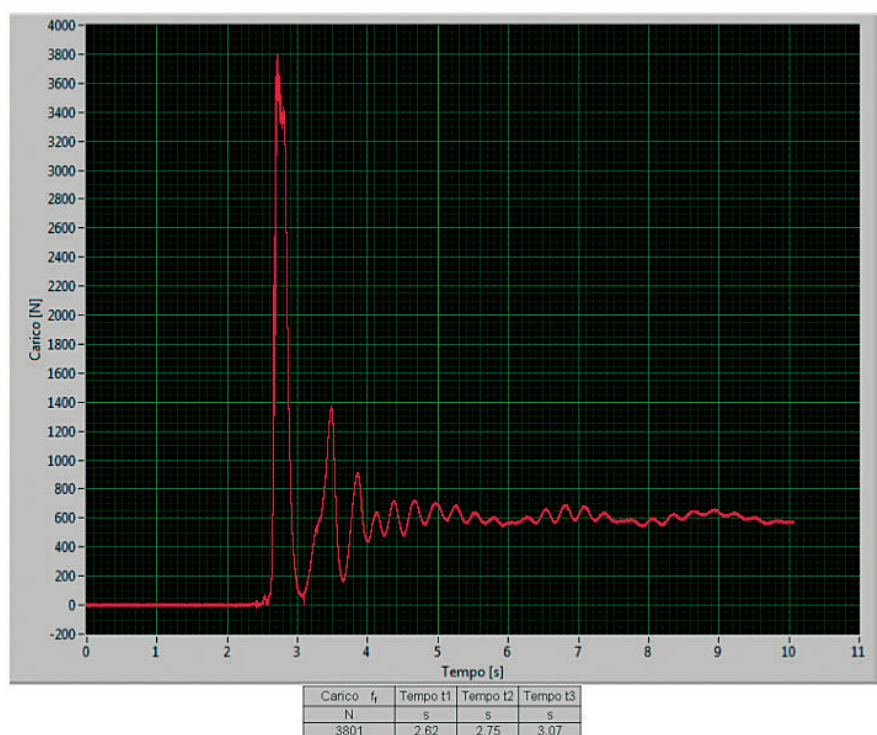


Figura 7.2.18 – Prova 60/3 B andamento della forza frenante (N) rispetto al tempo [s]

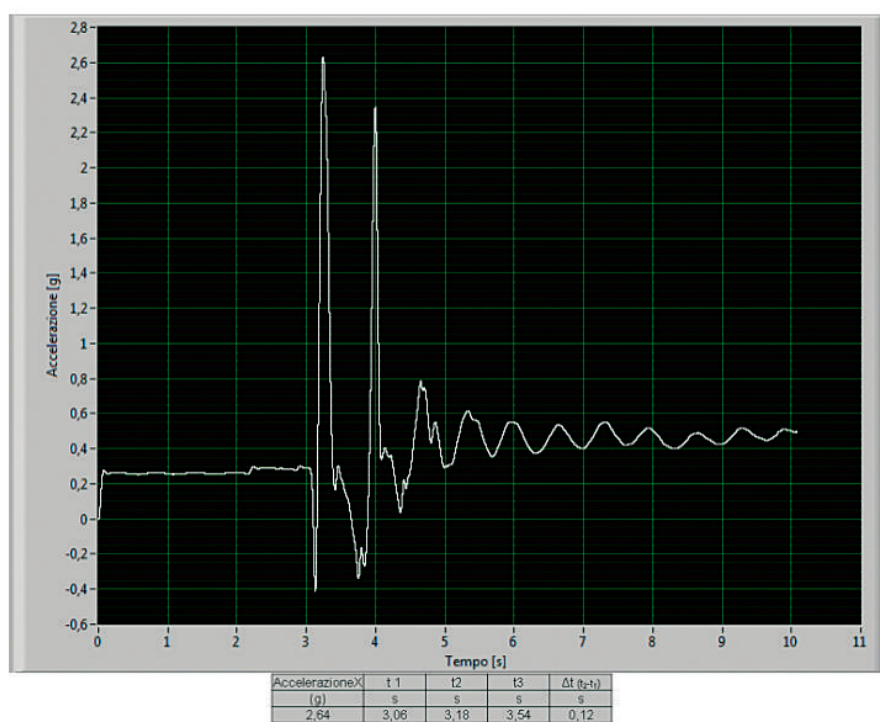


Figura 7.2.19 – Prova 60/4 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse x rispetto al tempo [s]

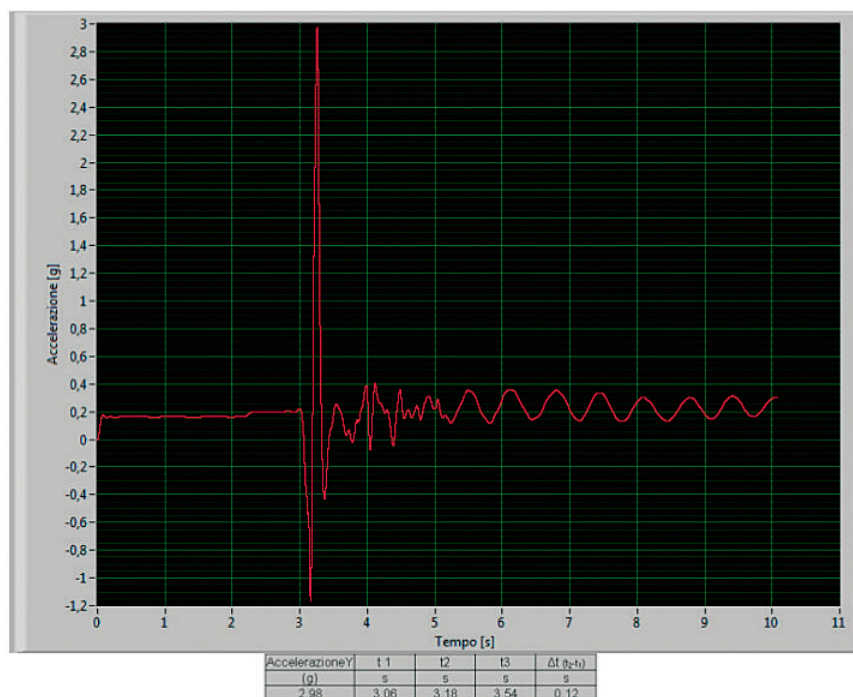


Figura 7.2.20 – Prova 60/4 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse y rispetto al tempo [s]

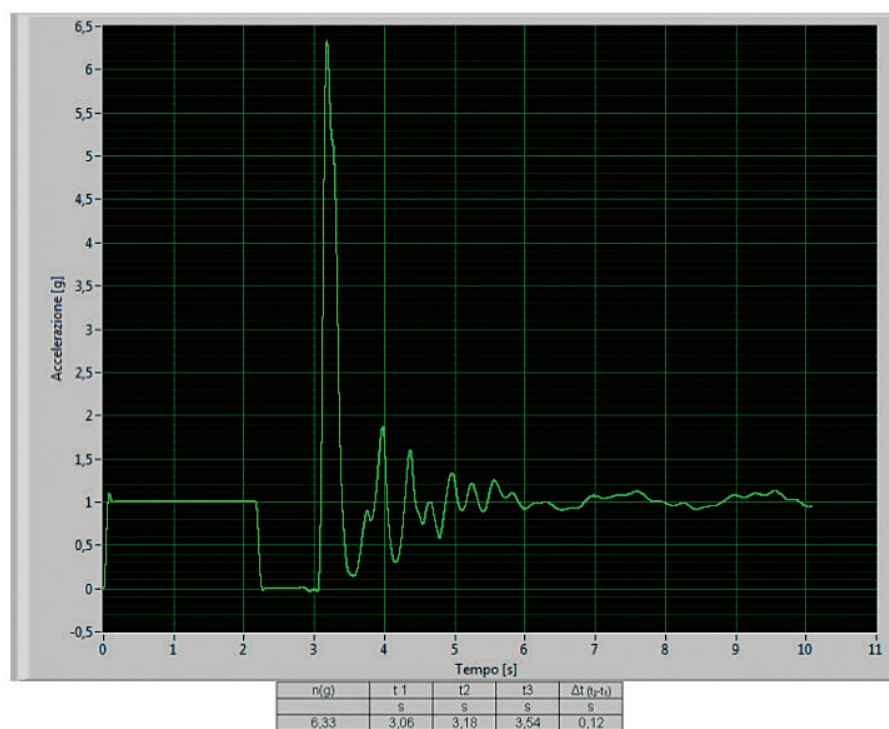


Figura 7.2.21 – Prova 60/4 B andamento del numero $n(g)$ lungo l'asse z rispetto al tempo [s]

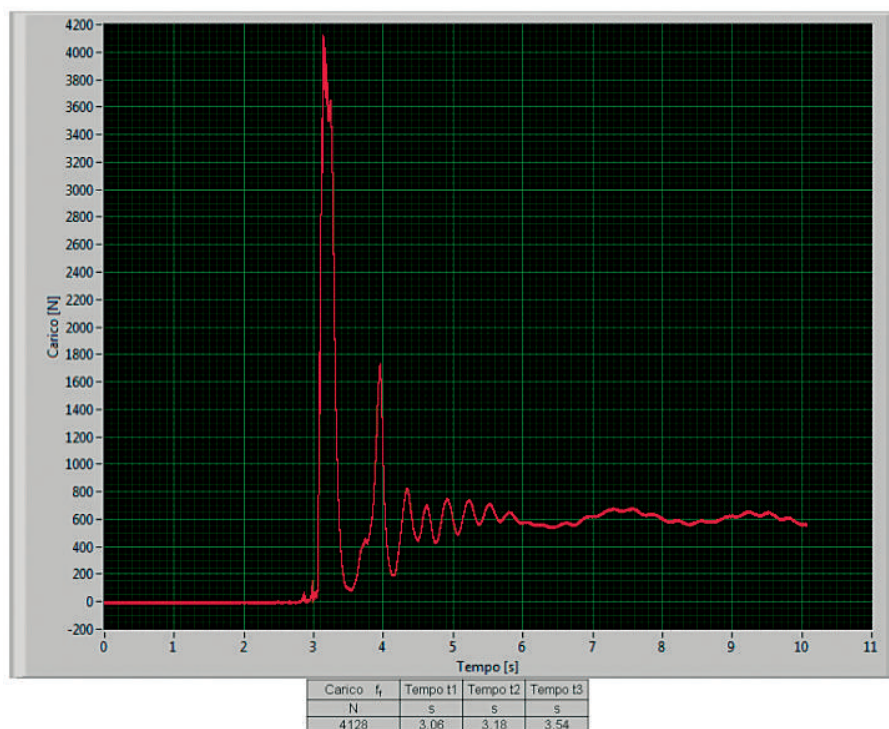


Figura 7.2.22 – Prova 60/4 B andamento della forza frenante (N) rispetto al tempo [s]

8 Conclusioni

Il confronto tra i dati sperimentali, emersi dai test effettuati, mostra una sostanziale corrispondenza con quelli teorici evidenziati nel capitolo 4 per altezze di caduta pari a 4 e 3 metri, una buona correlazione per quelli con altezze di caduta pari a 2 metri mentre, per le prove eseguite con altezza di caduta di 1 metro, i fenomeni dissipativi legati all'adattamento dell'imbragatura sul torso di prova, il comportamento del sistema di collegamento e la brevissima durata del fenomeno non permettono di evidenziare tale correlazione.

I dati presenti sulle tabelle 7.1-1, 7.1-2, 7.1-3 e 7.1-4, relativi all'accelerazione lungo l'asse z, confermano l'analisi teorica che prevede, per le masse di 60 e 80 kg, un valore del numero $n(g)$ superiore al valore tollerabile pari a 5.

Da ciò discende che, utilizzando i normali assorbitori disponibili sul mercato, un lavoratore di peso compreso tra 60 e 80 kg, in caso di caduta, subisce delle sollecitazioni superiori a quelle normalmente accettate ed è sottoposto a ridotte cadute frenate.

I dati relativi all'accelerazione lungo l'asse x e y sono in linea con quelli indicati in letteratura tecnica ed inferiori a quelli sopportabili dal corpo umano.

La forza misurata all'attacco dell'imbragatura è sempre inferiore a 6 kN.

Riferimenti bibliografici

[Eib-959] A. M. Eiband, *Human Tolerance to Rapidly Applied Acceleration: a Summary of the Literature*, Nasa Memorandum, 5-19-59E.

[Cor-001] L. Cortis, *Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto: analisi della dinamica di un corpo di prova in fase di arresto*, Ispesl, 2001.

[Ric-002] D. Riches, *Analysis and Evaluation of Different Types of Test Surrogate Employed in the Dynamic Performance Testing of Fall-Arrest Equipment*, Hse Report, n. 02/2002.

[Cra-003] D. Crawford, *Survivable Impact Forces on Human Body Constrained by Full Body Harness*, Hse Report, n. 09/2003.

[Hai-005] V. Haines, E. Elton, M. Hussey, *Revision of body size criteria in standards - Protecting people who work at height*, Hse Report, n. 342/2005.

[Cor-005] L. Cortis, E. Gori, C. Ratti, L. Rossi, C. Vitale, *Studio degli effetti dinamici indotti sul corpo umano dall'intervento dei sistemi di arresto caduta*, Ispesl, 2005.

[Goh-010] Y. M. Goh, P. E.D. Love, *Adequacy of personal fall arrest energy absorbers in relation to heavy workers*, Safety Science, 48/2010.

[Cor-012] L. Cortis, F. M. Fabiani, C. Ratti, L. Rossi, D. G. Svampa, C. Vitale, *Analisi e valutazione del comportamento dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta con differenti masse di prova*, Report della ricerca, *La problematica del test masses relativa ai dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto*, Inail, 2012.

Legislazione

DLgs 4 dicembre 1992, n. 475 e s.m.i.

Attuazione della direttiva 89/686/CEE del Consiglio del 21 Dicembre 1989, in materia di ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative ai Dispositivi di protezione individuale.

DLgs 9 aprile 2008 , n. 81 e s.m.i.

Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.

Norme tecniche

UNI EN 341: 1993 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Dispositivi di discesa.

UNI EN 341/A1: 1998 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Dispositivi di discesa.

UNI EN 353/1: 2003 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Dispositivi anticaduta di tipo guidato comprendenti una linea di ancoraggio rigida.

UNI EN 353/2: 2003 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Dispositivi anticaduta di tipo guidato comprendenti una linea di ancoraggio flessibile.

UNI EN 354: 2003 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Cordini.

UNI EN 355: 2003 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Assorbitori di energia.

UNI EN 358: 2001 - Dispositivi di protezione individuale per il posizionamento sul lavoro e la prevenzione delle cadute dall'alto – Sistemi di posizionamento sul lavoro.

UNI EN 360: 2003 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Dispositivi anticaduta di tipo retrattile.

UNI EN 361: 2003 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Imbragature per il corpo.

UNI EN 362: 2005 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Connettori.

UNI EN 363: 2008 - Dispositivi individuali per la protezione contro le cadute - Sistemi individuali per la protezione contro le cadute.

UNI EN 364: 1993 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Metodi di prova.

UNI EN 365: 2005 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Requisiti generali per le istruzioni per l'uso, la manutenzione, l'ispezione periodica, la riparazione, la marcatura e l'imballaggio.

UNI EN 795: 2002 - Protezione contro le cadute dall'alto – Dispositivi di ancoraggio. Requisiti e prove.

UNI EN 813: 2008 - Dispositivi individuali per la protezione contro le cadute – Cinture con cosciali.

UNI EN 1496: 2007 - Dispositivi individuali per la protezione contro le cadute – Dispositivi di sollevamento per salvataggio.

UNI EN 1497: 2008 - Dispositivi individuali per la protezione contro le cadute - Imbragature di salvataggio.

UNI EN 1498: 2007 - Dispositivi individuali per la protezione contro le cadute - Cinghie di salvataggio.

UNI EN 1868: 2000 - Dispositivi di protezione individuale contro le cadute dall'alto – Lista dei termini equivalenti.

UNI EN 1891: 2001 - Dispositivi di protezione individuale per la prevenzione delle cadute dall'alto – Corde con guaina a basso coefficiente di allungamento.

UNI EN 12841: 2007 - Dispositivi individuali per la protezione contro le cadute - Sistemi di accesso con fune - Dispositivi di regolazione della fune.

I Quaderni di ricerca

1 - *Infortuni sul lavoro. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail*,
G. Ciriello, M. De Felice, R. Mosca, M. Veltroni, Roma, Inail, maggio 2013