

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

-Sede di Forlì

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE

IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe: 8771

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN

Crediti nel Settore ING-IND/14

Progetto dell'esperimento per l'ottimizzazione di macchine  
avvolgitrici

CANDIDATO

Ivan Macaluso

RELATORE

Prof. Ing. Cristiano Fragassa

CORRELATORE

Prof. Ing. Giangiacomo Minak

Ing. Massimiliano Vaccari

Anno Accademico 2015/2016







# Sommario

<b>Premessa</b> .....	<b>1</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Il packaging</b> .....	<b>8</b>
1.1 La catena di trasporto.....	8
1.2 Sistemi di ammortizzamento.....	10
1.3 Il pallet.....	10
1.4 Storia del pallet.....	11
<b>2 Norme</b> .....	<b>13</b>
2.1 norme sui test per la verifica della stabilità dei carichi .....	13
UNI EN 12195-1 .....	13
ASTM D 4728-01.....	14
ISO 2247 .....	15
EUOMOS 40509_2012 .....	16
ASTM d4003-98 (2003).....	17
2.2 norme per la caratterizzazione del film.....	19
ASTM D4649 – 03 .....	20
<b>3 Stato dell'arte</b> .....	<b>24</b>
3.1 Rilevazione delle sollecitazioni .....	24
3.2 Metodi e modelli matematici .....	25
3.3 Rilevazione delle sollecitazioni su camion.....	29
3.4 Rilevazione delle sollecitazioni su carrello elevatore .....	39
3.5 Rilevazione delle sollecitazioni sul treno.....	41
3.6 Rilevazioni sollecitazioni su aereo cargo .....	43
3.7 Effetto delle sollecitazioni sui prodotti.....	43
3.8 Test effettuati in laboratorio .....	48
<b>4 Test per verifica stabilità del carico pallettizzato</b> .....	<b>61</b>
4.1 Test su slitta acceleratrice .....	61
4.2 test su tavola vibrante .....	65
4.2 Report aziendali.....	66
<b>5 Progetto dell'esperimento per incrementare la stabilità del carico.</b> .....	<b>70</b>
5.1 Obiettivo del DOE .....	70
5.2 Parametri DOE .....	71
5.3 Linea guida per l'esecuzione delle rilevazioni sui mezzi di trasporto.....	77
5.4 Linea guida per l'esecuzione degli esperimenti in laboratorio.....	82
5.5 Definizione parametri Anova ad 1 fattore.....	85

<b>6 Risultati</b> .....	<b>88</b>
6.1 Fardello strumentato.....	89
6.2 Analisi modale .....	92
<b>7 Conclusioni e sviluppi futuri</b> .....	<b>95</b>
<i>Ringraziamenti</i> .....	<b>99</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>101</b>





## *Premessa*

---

Quanto descritto nel presente elaborato è solo il primo step di un progetto ben più grande ed ambizioso. Qui si vuole descrivere solamente come condurre la parte iniziale del progetto, cioè quello che riguarda la rilevazione sperimentale delle condizioni ambientali registrate sui mezzi di trasporto, e come condurre una analisi statistica per andare ad identificare quali sono i fattori del ciclo di fasciatura sui quali conviene andare a effettuare delle modifiche e su come gestirli.

Nell'ottica di comprendere come impostare i punti sopra descritti, è stata necessaria una attenta analisi dello stato dell'arte, sia per la parte delle rilevazioni sul campo che per la parte degli esperimenti svolti in laboratorio.

## Introduzione

---

Oggigiorno richieste sempre più esigenti da parte del mercato soprattutto di prodotti di consumo da parte di clienti, fornitori, e aziende stesse, hanno portato il settore packaging alla ricerca di soluzioni ottimali per ottemperare ai danneggiamenti dei prodotti durante il trasporto.

Nell'ottica di tale problematica, il trasporto di beni su pallet ha visto negli ultimi anni, non solo una normalizzazione stringente sul classico pallet in legno (EUROPAL, CHEAP per citare i principali), ma anche una ricerca approfondita sui materiali per il packaging. Tali materiali riguardano non solo gli imballi primari, ma anche gli imballaggi secondari e terziari.

Ciò che si vuole ottenere da un prodotto pronto per la consegna, è la capacità di resistere agli eventi esterni che si manifestano durante la sua movimentazione dalla macchina confezionatrice al cliente finale.

La tipologia di percorso che effettua il prodotto deve essere ininfluente, in linea di massima, sulla vita dello stesso, ossia non deve influire negativamente sul bene.

Ecco perché ad oggi numerosi studi sono incentrati sull'analisi delle sollecitazioni trasmesse durante la movimentazione dei prodotti, soprattutto sui prodotti pallettizzati.

La problematica del danneggiamento materiale durante il trasporto è di grande interesse economico, basti pensare alla costificazione dei mancati introiti. Numerosi possono essere i casi in cui questo accade e talvolta, oltre ad essere un mancato ricavo in denaro, può essere oggetto di perdita di clienti.

Per avere una idea dell'impatto monetario basti pensare alle grandi aziende che distribuiscono i loro beni in tutto il mondo, e quindi ai danni economici che possono riflettersi per quest'ultime, talvolta si parla di milioni di dollari su base annua.

Per intervenire in maniera mirata occorre capire le specifiche del cliente che deve inviare il prodotto, quanto è disposto a spendere per assicurare al meglio il proprio bene e in che percentuale è disposto a perdere nel caso di danneggiamento.

Premesso ciò, Aetna Group S.p.A. si propone di elaborare un progetto volto soprattutto ai clienti più esigenti, per venire incontro alla problematica del danneggiamento prodotto. Lo scopo finale è quello di garantire la migliore stabilità del prodotto pallettizzato e avvolto con la minor spesa possibile in termini di quantità di film estensibile.

### Prospettive di mercato

Obiettivo strategico di AETNA GROUP è, grazie a nuove tecnologie, metodologie di gestione della conoscenza e una formula organizzativa che mira alla logica di "Machine-As-A-Service", rilanciare radicalmente la propria proposta commerciale e differenziare ulteriormente la posizione di leader globale passando da produttore "dell'ultima macchina di un sistema di imballaggio a fine linea" a "La prima e più importante macchina della logistica").

Questa strategia commerciale si origina da una approfondita analisi di mercato e delle problematiche distributive nell'area "food&beverage" che è stata svolta nell'ultimo triennio sui mercati UE e USA (in quest'ultimo AETNA GROUP ha recentemente attivato la seconda importante filiale di service) che rappresentano i mercati principali di riferimento di AETNA GROUP.

Questi mercati rappresentano oltre il 70% del mercato globale dei sistemi di fasciatura e stabilizzazione che, per quanto riguarda il settore "food&beverage", anche nell'ultimo decennio hanno visto trend di crescita positivi.

I grandi player della produzione e della distribuzione sollecitano soluzioni migliori e atte a ridurre gli sprechi di prodotto causati da problematiche della catena logistica.

La problematica degli sprechi è ben nota e impatta in misura enorme su aspetti economici e sociali globali.

Il settore food&beverage, che per AETNA GROUP il mercato primario, vede in particolare enormi inefficienze e sprechi di risorse alimentari a causa della sostanziale inadeguatezza dei sistemi di stabilizzazione dei carichi palettizzati.

A tal proposito, il caso di Walmart può essere rappresentativo: a fronte di un fatturato dell'ordine dei 400 miliardi di dollari ed un utile di 13 miliardi, 4.9 miliardi sono le perdite per invenduti, di cui 2.4 per danneggiamenti legati al trasporto. Ne consegue che l'utile potrebbe aumentare di quasi il 20% qualora si migliorassero le modalità di trasporto ed, in particolare, gli imballaggi.

Sulla base di questi elementi di contesto/mercato e di trend la soluzione AETNA GROUP costituirà una risposta NUOVA ai grandi clienti e sarà industrializzata integrando ai risultati del progetto quelli di ulteriori azioni di innovazione in corso relativamente allo sviluppo di nuove procedure di monitoraggio remoto e controllo della disponibilità di impianto.

- La nuova generazione di macchine fasciatrici (in primis macchine ad anello ad alte prestazioni) godranno di funzionalità avanzate, basate sulle informazioni del DB tecnologico, come per es.: "forza di contenimento variabile e multi-livello", "compensazione proattiva della tensione degli angoli del pallet", "posizionamento strategico del film" e quindi lo standard ottimizzato di fasciatura.

Il tutto sarà a valle della strutturazione in AETNA GROUP del "Knowledge Service Team" e del "Data Center" per erogare i servizi ad alto valore di ottimizzazione/certificazione della fasciatura su differenti prodotti e macchine e per la predizione di sostenibilità in funzione della eventuale caratterizzazione della filiera di trasporto.

## Obiettivo

Convinti della necessità di muovere verso una logica del “garantire un servizio” piuttosto che “vendere un impianto”, con questo progetto AETNA GROUP mira a riconfigurare competenze e prodotti in tal senso. In particolare, punta ad offrire ai propri clienti soluzioni di stabilizzazione ottimizzate e procedure certificate (macchina + procedura) tali da massimizzare l'efficienza (riduzione dei costi di imballaggio) e la sostenibilità (drastica riduzione di prodotti danneggiati e invendibili, del consumo di film plastici...) lungo l'intera catena della logistica distributiva.

Il progetto si propone un approccio industriale nuovo “Machine-As-A-Service” con l'obiettivo di trasformare la macchina di consolidamento (imballaggio terziario), oggi componente di fine linea, considerato spesso accessorio nella creazione del valore, il primo e fondamentale anello dell'intero percorso logistico.

Gli obiettivi sono:

- Costituzione di know-how tecnologico e di una procedura di “Certificazione AETNA” che superi protocolli (ISO/ASTM), e garantisca i clienti sulla effettiva stabilizzazione in base ai requisiti logistici (percorsi e relative criticità) e altri parametri significativi (tipo imballaggio primario/secondario, danneggiamento ammesso)
- Piattaforma “AETNA SENSE” Hw/Sw basata su sensoristica da integrare in macchina per l'ottimizzazione della fasciatura del pallet (in close-loop con il DB tecnologico AETNA) secondo una “ricetta di stabilizzazione” in base al tipo di prodotto, di imballo, al percorso logistico atteso.
- Componenti di attuazione e controllo (motori coppia, gruppo prestiro) e di ottimizzazione dinamica delle macchine operatrici, facili da integrare, e tali da garantire altissime prestazioni.
- Interfaccia “technology-based” per una programmazione semplificata, per la fruizione di servizi di ottimizzazione del processo di stabilizzazione e certificazione dello stesso forniti da AETNA GROUP in grado di abilitare una possibile integrazione basata su logiche IoT/Cloud
- Tool di misura indicatori di impatto ambientale per le diverse fasi di vita del prodotto per definire regole di prodotto in ambito di certificazione EPD e assegnare ad impianti ed imballi delle etichette di sostenibilità, sia in termini di “total cost of ownership” che di “carbon footprint”, con cui i concorrenti dovranno confrontarsi.

Tutti questi sviluppi tecnici saranno implementati, testati e validati su una nuova generazione di sistemi di fasciatura a film estensibile ad anello rotante.

## Grado di innovazione

Il progetto vuole costituire la base per un importante salto tecnologico e strategico nell'ambito dei sistemi di stabilizzazione di cui AETNA GROUP è leader globale.

Il progetto permetterà infatti di consolidare la leadership internazionale di AETNA GROUP, riposizionando strategicamente il proponente come "technology enabler" fondamentale della filiera logistica e distributiva di prodotti a diffusione regionale, nazionale e internazionale.

In termini specificatamente tecnologici si evidenzia che il progetto prevede diversi elementi concorrenti di innovazione.

1) Studio e implementazione di un SISTEMA E METODOLOGIA per il test, l'analisi dati e lo sviluppo di procedure ottimizzate di consolidamento al fine di poter e offrire unitamente a nuove macchine altamente performanti le "procedure ottimizzate di impiego" secondo la "Certificazione AETNA".

- Il sistema permetterà di effettuare test di oscillazione e acquisire gli effetti di trasporti così simulati sui prodotti palettizzati, dovrà permettere di riprodurre cicli caratteristici di sollecitazione.

- La metodologia dovrà portare a definire una matrice N-dimensionale di correlazione tra specifiche condizioni logistiche, tipologia di prodotto/imballo primario/secondario, e procedura ottimizzata di consolidamento pallet (p.es. livello di pre-stretch, di sovrapposizione del film, gestione dinamica del pre-stretch e "corner compensation", ecc.)

- Il sistema (macchina e metodologia) permetterà, a regime, di offrire servizi di ottimizzazione (Prodotti/percorsi logistici - ricetta ottimizzata di imballaggio/fasciatura del pallet specifico certificata AETNA GROUP). Close-loop con le macchine fasciatrici "AETNA SENSE – Hi performance" per espansione del know-how incorporato.

2) La implementazione di TECNOLOGIA DI INTERFACCIA E PROGRAMMAZIONE evolute secondo logica "Machine-As-A- Service" finalizzate in primis a:

- Abilitare il cliente a fruire in modo efficace e semplice dei servizi di ottimizzazione del processo di fasciatura/stabilizzazione e certificazione dello stesso forniti da AETNA GROUP, e secondariamente

- Abilitare una possibile integrazione basata su logiche IoT/Cloud al fine di implementare, in futuro, soluzioni di diagnostica evolute

3) Lo studio e l'applicazione di TECNOLOGIE DI ATTUAZIONE AVANZATE (motori coppia) mai impiegate nel settore di riferimento al fine di:

- incrementare le prestazioni (a fronte di una riduzione dei consumi energetici su cicli standard fino al 20%) dei

sistemi di stabilizzazione ad anello - aumento di produttività - oltre 150 pallet/h con bobina singola

- incrementare la disponibilità - abbattimento di interventi di regolazione e verifica post-installazione
- semplificazione dell'architettura di macchina - minore costo di gestione durante l'intero ciclo di vita della macchina

4) Studio e applicazione di una piattaforma hw/sw low-cost "AETNA SENSE" basata su sensoristica da integrare a bordo delle nuove macchine di stabilizzazione in grado di permettere (anche grazie a procedure assistite e guidate dalle nuove HMI) il rilevamento delle caratteristiche del pallet e la continua e dinamica ottimizzazione della fasciatura dei prodotti.

5) Definizione quantitativa e certificazione EPD del livello di sostenibilità su ciclo di vita per le nuove macchine di stabilizzazione. L'innovatività di questo obiettivo risiede nella metodologia con cui esso sarà applicato, ovvero tramite l'integrazione completa dei principi di valutazione di impatto come requisiti alle altre innovazioni tecnologiche di macchina. Si avrà che:

- La selezione degli elementi di monitoraggio da aggiungere alla macchina sarà fatta al fine di poter creare una valutazione di efficacia della lavorazione che ne quantifichi poi gli effetti sulla filiera a valle. (total cost of ownership)
- Le nuove tecnologie di attuazione, saranno concepite per ottimizzare non soltanto il funzionamento intrinseco di macchina ma le sue prestazioni di sostenibilità complessive.

Proponendo soluzioni avanzate per la realizzazione di un imballo efficace e "qualificato", si punta ad ottenere precisi risultati industriali di sviluppo sostenibile, traducibili in termini di processi (di fasciatura) più efficienti e di prodotti (merci) più "sicuri" rispetto all'annoso problema del danneggiamento durante trasporto e stoccaggio.

## **Il gruppo**

Aetna Group S.p.a. nata agli inizi degli anni '80, è leader nel settore packaging specializzato nel settore del fine linea, soprattutto nell'ambito delle macchine per l'avvolgimento e fardellatrici.

Aetna Group produce e commercializza a livello mondiale una ampia gamma di macchine semi – automatiche e automatiche all'avanguardia quali macchine avvolgitrici, fardellatrici industriali, confezionatrici con film termoretraibile e incartonatrici. Con oltre 150'000 macchine vendute ed installate all'anno in tutto il mondo Aetna Group offre una vastissima gamma di soluzioni e servizi nel settore packaging.

Presente a livello internazionale anche grazie a 8 filiali estere presenti in Francia, Regno Unito, Germania, Spagna, USA, Russia, Cina e Brasile.

In particolare Robopac Sistemi, avviò dal 1987 la produzione di sistemi e macchine automatiche per la stabilizzazione di carichi pallettizzati con film estensibile fino a 100 pallet/ora. La peculiarità di tali macchine è l'alto contenuto tecnologico e la flessibilità con la quale vengono costruite per seguire le specifiche del cliente.

Attualmente Aetna Group, è composta da varie aziende, qui di seguito elencate:

### *Robopac Sistemi*

Robopac Sistemi è leader mondiale nella realizzazione di sistemi e macchine automatiche per la stabilizzazione dei carichi pallettizzati, personalizzate secondo le specifiche del cliente. La produzione di avvolgitrici si sviluppa nelle tecnologie delle tavole rotanti, bracci rotanti e anelli rotanti, avvolgitori orizzontali.

### *Dimac*

Dimac è leader nell'offerta di macchine fardellatrici con film termoretraibile e a barra saldante, incartonatrici, vassoiatrici e macchine combinate.

### *Prasmatic*

Azienda specializzata nella progettazione, costruzione ed installazione di macchinari e impianti per il confezionamento e l'imballaggio, sia con il film termoretraibile che con cartone. I macchinari sono destinati a soddisfare le specifiche del cliente.

### *IMSB*

IMSB è specializzata nello sviluppo di progetti personalizzati in base alle esigenze specifiche di ogni cliente, nella produzione di macchine per riempimento e confezionamento, inoltre è leader nella produzione e vendita di macchine per il segmento Home & Care oltre che al chimico e farmaceutico.

### *Toptier*

Toptier produce e commercia pallettizzatori per settore alimentare, beverage e prodotti confezionati. La loro macchine comprendono pallettizzatori, sistemi di alimentazione per pallettizzatori.

# 1 Il packaging

## 1.1 La catena di trasporto

Prima di cominciare la trattazione occorre fare un passo indietro e cercare di capire cosa accade lungo la catena di imballaggio e di trasporto.

Numerose sono state le attività di ricerca nell'ambito packaging, volte a ricercare il modo migliore per diminuire o impedire totalmente i danneggiamenti dovuto al trasporto e stoccaggio dei prodotti.

La problematica principale che accompagna queste campagne sperimentali riguarda l'identificazione delle sollecitazioni trasmesse dai mezzi di movimentazione ai beni maneggiati. I principali mezzi di trasporto utilizzati, distinti tra mezzi per movimentazione interna ed esterna, sono:

- i carrelli elevatori;
- carrelli elevatori automatizzati (AGV);
- transpallet (manuali o motorizzati).



Figura 1.1.0 transpallet



Figura 1.1.1 Carrello elevatore



Figura 1.1.2 AGV

Mentre per il trasporto principale, cioè inteso quello che va dal fornitore al cliente finale si hanno:

- camion;
- treno merci;
- nave cargo;
- aereo cargo.



La caratteristica principale che accomuna tali mezzi è la soggezione ai fattori ambientali, magari diversi per ogni mezzo ma fortemente incidenti per la vita dei materiali trasportati.

Premesso che ogni mezzo di trasporto merci è dotato di apparati di sicurezza per vincolare nel miglior modo possibile il prodotto, quest'ultimo è comunque soggetto a sollecitazioni più o meno ampie. Ecco perché sino ad oggi non si è riusciti a svincolare il danneggiamento del bene dalle sollecitazioni a lui trasmesse.

Ad oggi il sistema di trasporto più utilizzato è senz'altro il camion. Tale mezzo risulta il più economico e veloce rispetto agli altri. Quest'ultima qualità dipende strettamente dalle qualità delle infrastrutture disponibili. Infatti i tipi e le condizioni dei collegamenti stradali incidono pesantemente sui tempi di consegna, basti pensare ai tempi di percorrenza che si possono ottenere se è utilizzata l'autostrada o vie di comunicazione principali rispetto alla rete stradale urbana.

Nell'ambito dei trasporti terrestri e, in particolare su gomma, le caratteristiche della pavimentazione stradale risultano estremamente rilevanti al fine delle sollecitazioni. Innumerevoli sono stati gli esperimenti volti alla caratterizzazione di queste da parte di ricercatori.

Per riassumere brevemente ora e descrivere puntualmente poi, si può dedurre che la rilevazione delle sollecitazioni viene effettuata disponendo un sistema di sensori all'interno del mezzo di trasporto, qui camion, e imporgli un certo tragitto a diverse velocità, magari imponendo vari percorsi stradali. Tipicamente, la rilevazione riguarda l'analisi delle vibrazioni trasmesse dal pianale del rimorchio al prodotto caricato.

Lo scopo finale di tali rilevazioni consiste nel riprodurre tali sollecitazioni in laboratorio, ri-elaborando il segnale acquisito e comprendere come potere intervenire per ottemperare ad eventuali danneggiamenti.

Per molti prodotti, per lenire ai danneggiamenti si fa in modo di dotare il bene di opportuni sistemi di attenuazione degli spostamenti e vibrazioni, oltre che a coperture per impedire il contatto con l'ambiente esterno. Un tipico esempio è la classica scatola di cartone ondulato, dotata al suo interno di sistemi di ammortizzamento (le tipiche sagome di cartone o polistirolo espanso che si trovano dentro la scatola principale).

Nei capitoli successivi verranno descritti sommariamente i principali dispositivi per i prodotti imballati, dai sistemi cushioning alle unità di carico.

## 1.2 Sistemi di ammortizzamento

I sistemi di protezione più utilizzati, come anticipato precedentemente, sono le classiche scatole di cartone, pareti di polistirolo espanso sagomate riportanti magari il negativo del prodotto, *cheap* di polistirolo, sistemi di cushioning per trasporto in container.



Figura 1.2.1 scatola di cartone, polistirolo sagomato, cartone ondulato, cheap, air bag

Tuttavia, il semplice utilizzo di tali sistemi anche dei più variati materiali, o delle ancor più svariate combinazioni, non basta per prevenire il danneggiamento. C'è qualcosa quindi ancora più importante da fare o da capire per raggiungere uno stato ottimale dell'imballo.

## 1.3 Il pallet

I principali sistemi per la movimentazione prodotto o unità di carico, lungo la linea logistica ad oggi a disposizione sono i pallet o palette, da distinguere rispetto ai pallet dedicati per il singolo prodotto (vedi isola di lavoro automatizzate).

Il pallet è una particolare struttura in legno volta a fungere da basamento per il trasporto di materiale, (ve ne sono anche in plastica). Di questo particolare sistema di appoggio ve ne sono di diverse tipologie e diversamente normati, oltre ad ancora una grande vastità di palette non normate ancora circolanti.

Le principali palette esistenti per il mercato europeo sono gli *EUROPALLET* e *CHEAP*. Il più usato oggi è l'Europallet.

Prima di descrivere le caratteristiche dell'europallet facciamo un salto indietro nel tempo per comprendere i motivi che hanno portato ad oggi alla creazione di una normativa ad hoc.

## 1.4 Storia del pallet

Le origini del pallet non sono ben definite nel tempo, alcuni documenti riportano la sua conoscenza già agli inizi del secolo scorso. La sua normalizzazione in quanto a geometria e tipologia, la si deve inizialmente alle ferrovie austriache che intorno agli anni '50 hanno adattato il pallet ai sistemi di trasporto su rotaia. Tale normazione era essenziale per porre fine ai tanti problemi circa lo stoccaggio in magazzino o durante il trasporto. Infatti se ogni azienda adottasse un tipo di pallet diverso da un altro, incorrerebbe in casi problematici poiché non riuscirebbe a riempire correttamente il magazzino, il camion, il vagone ferroviario o non riuscirebbe a maneggiarlo all'interno della propria azienda.

Durante lo scorso secolo, sono state introdotte alcune normative per la regolamentazione del pallet. Tali norme andarono a definire gli standard di sicurezza circa la resistenza meccanica e la sua costruzione.

Nel 1995 l'associazione europea Epal (European Pallet Association) definì lo standard 1200 mm x 800 mm e 1200 mm x 1000 mm.

Oggi i formati più utilizzati sono:

- 1200 mm x 800 mm;
- 1200 mm x 1000 mm;
- 800 mm x 600 mm;

Possono essere dotati di due o quattro vie per la presa da parte della macchina per il suo trasporto, vedi figura 1.3.1 e 1.3.2. È noto come il pallet a due sole vie sia più pesante e quindi più robusto ma meno pratico da "inforcare" dai carrelli elevatori, rispetto al quattro vie.



Figura 1.3.1 pallet a 2 vie



Figura 1.3.2 pallet a 4 vie

caratteristiche			
dimensione	1200 x 1000	1200 x 800	800 x 600
carico	1500 kg	1500 kg	500 kg
Extra-carico	6000 kg	6000 kg	2000 kg
tara	30 kg	25 kg	9.5 kg
norma	UIC- 435-2	UIC- 435-5	

*extra carico*: carico dovuto all'impilamento

Ulteriori informazioni circa la norma su pallet EPAL, sono presenti nella UIC 435.

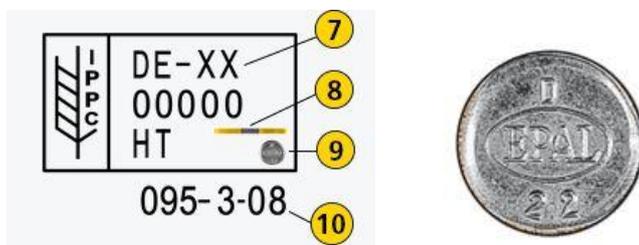
Ogni pallet EPAL presenta ai lati nei tre blocchi come da figura seguente i seguenti marchi:



Figura 1.3.3 timbri europallet

In figura 1.3.3 dal blocchetto di sinistra si nota il marchio EPAL, nel blocco centrale il marchio delle ferrovie europee, nel blocco a destra il marchio del parco pallet europeo.

Il marchio centrale è mostrato meglio di seguito ed è noto con la sigla ISPM15:



Al n.7 viene indicato il paese di produzione del pallet, n.8 bandella che certifica il controllo eseguito da EPAL riportante la scritta EPAL, n.9 chiodo indicante l'effettuata riparazione (vedi figura a dx), n.10 codice manufatto – mese ed anno di produzione.

Gli enti di controllo per i pallet EPAL sono diversi, in Italia fa riferimento *ConLegno*.

## 2 Norme

### 2.1 norme sui test per la verifica della stabilità dei carichi

Dopo una overview sui sistemi di carico e prima di andare ad analizzare le ricerche effettuate nell'ambito delle sollecitazioni cui è sottoposto il carico, occorre elencare le principali norme riguardanti l'argomento. Non andremo ad elencare ed analizzare tutte le norme in gioco, ma ci limiteremo a nominare, e qui riassumere, le norme utili per la verifica della stabilità dei prodotti, soprattutto quelli pallettizzati, che subiscono una certa movimentazione.

Dato che parliamo di mezzi di trasporto si cita la norma:

**UNI EN 12195-1** dicembre 2010, su *"Dispositivi di ancoraggio del carico su veicoli stradali, Sicurezza, Parte 1: Calcolo delle forze di ancoraggio"*.

Tale norma elenca le metodologie per l'assicurazione dei carichi sui mezzi di trasporto, e i metodi di calcolo. La normativa è a noi utile semplicemente per determinare le accelerazioni al quale è sottoposto il pallet caricato, al paragrafo "4 Acceleration coefficients" vengono elencate le accelerazioni espresse in g dovute alle condizioni di trasporto (accelerata e frenata). Si riporta sotto in figura la tabella per il trasporto su gomma, rete ferroviaria e via mare.

Securing in	Acceleration coefficients				
	$c_x$ , longitudinally		$c_y$ , transversely		$c_z$ , vertically down
	forward	rearward	sliding only	tilting	
longitudinal direction	0,8	0,5	—	—	1,0
transverse direction	—	—	0,5	0,5/0,6 <sup>a</sup>	1,0

<sup>a</sup> See 5.1.

Figura 2.1.1 tabella dei coefficienti di accelerazione per trasporto su gomma

Securing in	Acceleration coefficients				
	$c_x$ , longitudinally		$c_y$ , transversely	$c_z$ , minimum vertically down	
	sliding	tilting		sliding	tilting
longitudinal direction	1,0	0,6	—	1,0	1,0
transverse direction	—	—	0,5	0,7	1,0

Figura 2.1.2 tabella dei coefficienti di accelerazione per trasporto su rete ferroviaria

**Table 4 — Acceleration coefficients  $c_x$ ,  $c_y$  and  $c_z$  during sea transport**

Sea area	Securing in	Acceleration coefficients		
		$c_x$ , longitudinally	$c_y$ , transversely	$c_z$ , minimum vertically down
A	longitudinal direction	0,3	—	0,5
	transverse direction	—	0,5	1,0
B	longitudinal direction	0,3	—	0,3
	transverse direction	—	0,7	1,0
C	longitudinal direction	0,4	—	0,2
	transverse direction	—	0,8	1,0

NOTE See IMO/ILO/UNECE, Guidelines for packing of cargo transport units (CTUs).

A Baltic Sea bordered in west by Jylland and in north by a line between Lysekil and Skagen.

B West of Sea area A bordered in north by a line between Kristiansand and Montrose, in west by UK and in south by a line between Brest and Land's End as well as the Mediterranean Sea.

C Unrestricted.

Figura 2.1.3 tabella dei coefficienti di accelerazione per trasporto via mare

Dato che si deve misurare non solo la accelerazione al quale è sottoposto il carico ma anche tutte le altre eventuali sollecitazioni come, ad esempio, le vibrazioni, per riportare tali oscillazioni bisogna dotarsi di dispositivi opportuni, gli accelerometri. Tipicamente l'accelerometro rileva i picchi vibrazionali nel dominio del tempo, quello che si deve fare è riportare tale segnale nel dominio delle frequenze e ri-elaborarlo per ottenere successivamente le accelerazioni. A tal proposito esistono opportune norme, che impongono degli standard queste simulazioni.

*ASTM D 4728-01 “Standard test method for random vibration testing of shipping containers”*

La suddetta norma elenca le procedure per creare una simulazione di tipo vibrazionale da applicare ad un modello di carico. Sostanzialmente fissa uno standard vibrazionale in mancanza di un set di dati sperimentali o una metodologia se si ha in dotazione uno storico rilevato precedentemente. Nel primo caso ci si potrebbe basare su valori di PSD (Power Spectral Density) dati da norma (vedi figura sotto)

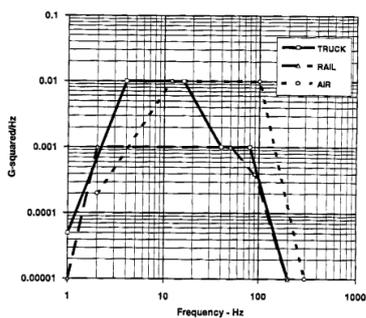


FIG. X1.1 Sample Commercial Transport Vibration Test Profiles

**TABLE X1.1 Fig. X1.1 Profiles (Practice D 4169 Assurance Level II)**

Truck		Rail		Air	
Frequency Hz	Level $g^2/Hz$	Frequency Hz	Level $g^2/Hz$	Frequency Hz	Level $g^2/Hz$
1	0.00005	1	0.00001	2	0.0002
4	0.01	2	0.001	12	0.01
16	0.01	50	0.001	100	0.01
40	0.001	90	0.0004	300	0.00001
80	0.001	200	0.00001		
200	0.00001				
Overall Level, $g$ rms	0.52	0.29		1.05	

FIGURA 2.1.4 PSD per mezzi commerciali

figura 2.1.5 tabella riferita alla fig. 2.1.4

ISO 2247 “Packaging Complete, filled transport packages and unit loads  
Vibration tests at fixed low frequency”

Normativa riguardante l'esecuzione di test di tipo vibrazionale a bassa frequenza fissata. Tale test andrà applicato ai carichi imballati per verificare la loro risposta alle sollecitazioni.

- La vibrazione è di tipo sinusoidale e la frequenza di risonanza deve essere di molto maggiore rispetto alla pulsazione alla quale viene effettuato il test;

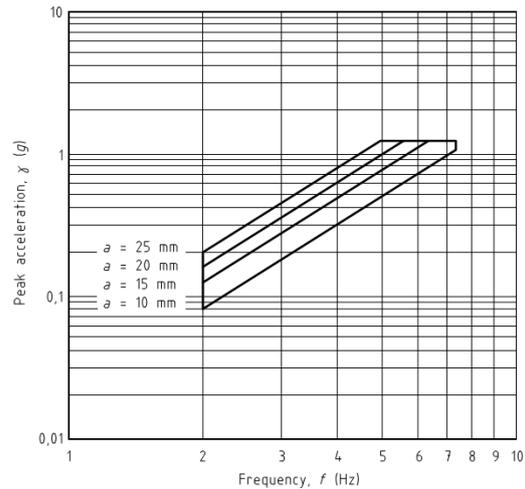
Si dispone e assicura il carico sulla tavola vibrante.

Esistono due tipologie di test:

- *Metodo A*
  - Si applica una pulsazione fissa in modo da ottenere una accelerazione di 0.5g e 1.0g (non deve verificarsi il sollevamento del pallet);
  - Eseguire il test applicando una vibrazione secondo figura precedente in modo da fornire una accelerazione compresa tra 0.5g e 1.0g.
- *Metodo B*
  - Imprimere una pulsazione alla tavola in modo da ottenere un primo distacco del pallet dalla tavola stessa;
  - Imprimere una vibrazione da 2Hz e innalzarla sino a raggiungere il primo distacco della tavola;

*Nota:* il primo distacco deve essere tale da poter inserire uno strato sottile (1.5mm – 3mm) per una profondità minima di 50mm sino ad 1/3 dell'intera base.

Per scegliere la vibrazione da dare si utilizza il grafico di figura 2.1.6. Nel grafico si entra con l'ampiezza vibrazionale che la nostra macchina di laboratorio è in grado di effettuare, segue che si fissa una accelerazione in *g* e si ricava la frequenza.



$\gamma(g)$  = peak acceleration in terms of acceleration due to gravity  $g$   
 $a$  = peak to peak amplitude, expressed in millimetres  
 $f$  = frequency, expressed in hertz

Figura 2.1.6 picchi di accelerazione

### *EUOMOS 40509\_2012 "Test method for load unit rigidity"*

La presente procedura fa riferimento alle seguenti normative sino ad allora vigenti:

- ISO 2206:1987 - Packaging—Complete Filled Transport Packages, Identification of Parts When Testing;
- ISO 2233:2000 - Packaging - Complete, filled transport packages and unit loads - Conditioning for testing;
- ISO 8318:2000 - Packaging – Complete, filled transport packages and unit loads – sinusoidal vibration tests using a variable frequency.
- EN 12195-1:2010 - Load restraint assemblies on road vehicles – safety – part 1: Calculation of lashing forces.
- EN 12195-2:2000 - Load restraint assemblies on road vehicles – safety – part 2: Web lashing made from man-made fibers.
- EN 12195-3:2001 - Load restraint assemblies on road vehicles – safety – part 3: Lashing chains.
- EN 12195-4:2001 - Load restraint assemblies on road vehicles – safety – part 4: Lashing steel wire ropes.
- EN 12642:2006 - Securing of cargo on road vehicles – Body structure of commercial vehicles – Minimum requirements

### SCOPO DELLA PROVA

Descrivere un metodo per quantificare la rigidità del carico posto ad una accelerazione/ decelerazione in una direzione specifica la quale simula il trasporto terrestre dello stesso, tale standard è valido sino a 2g.

Ne risulta una analisi dello spostamento del carico, della sua elasticità, dovute alle forze di inerzia del prodotto su pallet.

### SPECIFICHE TEST

Il prodotto pallettizzato viene posto sulla tavola scorrevole e sottoposto ad una accelerazione pari a  $K \times g$  (es:  $0.8 \times g$ , dove 0.8 è preso da *UNI EN 12195-1*) in avanti per un tempo di 0.3s seguita da una decelerazione. Il tempo che intercorre fra la fine della fase di accelerazione e la decelerazione deve avvenire all'interno di 0.05s.

- Se  $K > 1$  bisogna porre un supporto di altezza 2.5cm ad una distanza di 1cm in entrambi i lati sulla direzione di spostamento del carico onde evitare lo spostamento del carico;

Per prevenire il ribaltamento del carico pallettizzato, si utilizzano due pareti, fronte e retro del pallet, la distanza della parete posteriore dal pallet deve essere di almeno 6cm. Inoltre deve avere una inclinazione nella parte alta di almeno  $14^\circ$  rispetto al piano verticale, questo per consentire la deformazione elastica del carico.

Vengono misurate tutte le deformazioni. Se il carico non è simmetrico allora il test viene ripetuto ruotando il pallet di  $180^\circ$  rispetto al suo asse verticale.

I risultati del test devono essere confrontati coi limiti imposti descritti di seguito:

- Lo spostamento permanente massimo per carichi con altezza  $\geq 120$ cm deve rientrare entro il 5% dell'altezza. Per carichi  $\leq 120$ cm lo spostamento massimo deve essere di 6cm e, per i primi 20cm di altezza del carico lo spostamento dovrebbe essere al di sotto dei 4cm;
- Lo spostamento elastico lungo la direzione di accelerazione non deve superare il 10% dell'altezza del carico;
- Nel caso di prodotto pallettizzato in multi-strato, occorre che il gap fra i due strati sia inferiore al 2% della altezza del carico in ogni punto fra i due strati.
- Non si devono verificare danneggiamenti del prodotto.

Se tali limiti vengono rispettati, allora il test è superato.

### ASTM d4003-98 (2003) "Standard Test Methods for Programmable Horizontal Impact Test for Shipping Containers and Systems"

Norma volta a standardizzare le prove ad impatto a cui è soggetto il carico (pallet). Tale test va a simulare la presa del pallet carico da parte del carrello elevatore. Esistono due metodi per creare la prova, uno dei quali è stato rivisto a seguito di una tesi del 1993 [15],

dove si affermava che i limiti della allora ASTM D4003 erano fin troppo stringenti. Tale metodo è basato sull'analisi della quantità di moto scambiata tra pallet e muletto e prevede quindi di conoscere la velocità del muletto.

La presente norma prescrive due tipologie di test.

- *Metodo A – test da impatto per vagoni ferroviario*

Per tale metodo bisogna registrare il numero di impatti che il carico dovrà subire, la velocità con il quale avviene il singolo impatto, la durata dell'impatto e l'entità del carico. Tipicamente il numero degli impatti è fra i 2 e i 15, e la velocità cambia da 1.6 a 16 km/h. La durata dell'impatto dipende dalla macchina per effettuare il test, generalmente spazia dai 30 ms ai 300 ms con accelerazioni di 15 g e 1 g rispettivamente.

- *Metodo B – test da impatto per mezzi di smistamento*

I carichi pallettizzati sono soggetti a ricevere urti anche dai mezzi di smistamento all'interno dei magazzini, porti o altri centri di stoccaggio. Tali mezzi possono essere sia i carrelli elevatori, carri ponte ecc. Tale metodologia, prende anche come input, le caratteristiche del carrello elevatore, del carico, della velocità del carrello della durata dell'impatto e altri dati.

Quindi per la determinazione del livello di impatto, ci si riferisce alla seguente formula:

$$G_p \times T = K \left( \frac{1+e}{1+R} \right) V_t \quad (1)$$

$G_p$  = picco di impulso di accelerazione per mezza onda sinusoidale [g];

$T$  = durata impulso;

$e$  = coefficiente di restituzione [0.0 – 1.0]

$K$  = costante [48.7 per velocità in ft/s, o 14.8 per velocità in m/s];

$R$  = rapporto fra il peso del carrello e del carico;

$V_t$  = velocità di impatto del carrello.

I danni riportati dal carico saranno poi vagliati dal cliente, a sua discrezione la prova è superata o non.

## 2.2 norme per la caratterizzazione del film

Oltre alle norme che descrivono i test, ve ne sono ulteriori volte alla caratterizzazione di uno degli elementi più importanti per l'imballaggio, nel nostro caso si tratta delle norme riguardanti il film estensibile. Le caratteristiche complete dei film utilizzati non vengono date dai fornitori ma vengono comunque fornite le proprietà meccaniche della pellicola. In figura sotto viene riportato l'andamento classico di una curva stress-allungamento di un film estensibile.

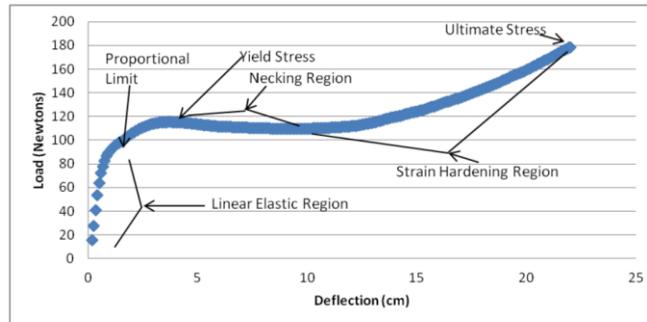


Figure 2 Diagram of critical load/deflection regions and points

Figura 2.3.1 curva forza-allungamento

Si nota come esistano due zone elastiche separate da una parte plastica molto ampia. Tecnicamente chi fa macchine avvolgitrici o chi fascia, deve lavorare all'interno del campo plastico per ottenere una stabilizzazione in forza del film una volta avvolto il prodotto. Se per estremi, dovessi lavorare troppo vicino al campo elastico, vedrei una volta finito di avvolgere, un ritorno elastico del film talmente elevato che il film potrebbe rompersi, o addirittura la forza di contenimento potrebbe essere così elevata da danneggiare il prodotto comprimendolo.

Esistono inoltre ulteriori norme volte alla caratterizzazione meccanica del film che qui però non verranno prese in considerazione.

Prima di descrivere la norma riguardante la caratterizzazione del film estensibile, occorre descrivere brevemente come viene prodotto e il suo comportamento.

Esistono due metodi per la produzione di film per avvolgimento, il più economico e più usato è il metodo *cast* cioè dove il film viene prodotto per colata del materiale di cui è composto e fatto passare attraverso dei rulli per laminarlo e ridurre lo spessore. Con tale metodo le catene molecolari sono orientate nella direzione di svolgimento del film, quindi in tale direzione il materiale presenta delle ottime caratteristiche meccaniche ma presenta scarsa resistenza nella direzione perpendicolare.

Il secondo metodo è il *blown* dove il film viene creato tramite soffiaggio, dove inizialmente si presenta come in bolla e successivamente stirato attraverso dei rulli. Le caratteristiche meccaniche sono molto buone in tutte le direzioni, poiché le catene polimeriche presentano un orientamento di tipo caotico non avendo una direzione preferenziale.

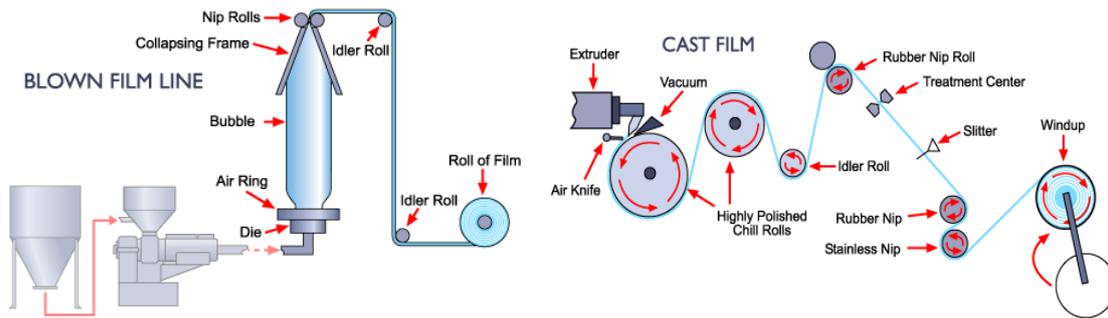


Figura 2.3.2 metodologie per produzione del film

### ASTM D4649 – 03 “Standard Guide for Selection and Use of Stretch Wrap Films”

Vengono trattate le caratteristiche e test da effettuare sul film. Tale normativa non ricopre il caso in cui il prodotto imballato sia esposto all'esterno, vedi magazzini scoperti.

I film vengono classificati come segue:

1. Film per applicazioni manuali o tramite macchine;
2. Metodo di produzione del film;
3. Meccanismo di adesione;
4. Stratificazione film;
5. Colore;
6. Per alimenti o non.

Classificazione in base al materiale:

1. Polietilene;
2. Etilene;
3. Polipropilene;
4. Polivinilcloride;

La scelta del film è effettuata anche in base al grado di riciclabilità e alla carica elettrica che può accumulare.

### *Test per rilevare alcune performance del film*

**TABLE 2 Test Methods Related to Performance**

Procedure	ASTM Test Method
Test Method for Evaluating Abrasion Resistance of Stretch Wrap Material	D 5416
Test Method for Evaluating Load Containment Performance of Stretch Wrap Material by Vibration Testing	D 5415
Test Method for Evaluation of Horizontal Impact Performance of Stretch Wrap Materials	D 5414
Test Method for Evaluation of Mechanical Handling of Unitized Loads Secured with Stretch Wrap Materials	D 5331

### *Dimensioni, massa e variazioni accettabili*

Spessore: variabile,  $\pm 25\%$  in ogni punto, non oltre il 20% dello spessore nominale su una media di 5 punti consecutivi misurati ogni 1 inch (25mm);

Peso: peso lordo della pellicola per avvolgimento manuale al di sotto delle 12 libbre (5.4kg);

Larghezza: 10 maggiorata di 10- 20 inch per applicazione manuale, sino a 80 inch;

Larghezza del rotolo di pellicola è effettuato da un nastro calibrato con tolleranza  $\pm 3\text{mm}$ . Il suo diametro può variare intorno al 5% del valore nominale.

Lunghezza: definita da venditore/cliente.

**TABLE 3 Average Weight/Yield Tolerances for Stretch Wrap Material**

Number of Rolls	Tolerance, %
Any one roll	$\pm 7$
Lots over 25	$\pm 5$

### *Applicazione della forza tramite il film*

Il concetto di contenimento del carico è definito come quello che permette di trasportare e maneggiare il prodotto e conservarlo integro sino al cliente finale. La forza di contenimento è tanto più elevata quanto più il film è stretto intorno al prodotto, in concomitanza col fatto di non danneggiare il prodotto.

Per ottenere un certo sforzo è necessario imprimere al film un certo pre-stretch e/o post-stretch. Il principale è il pre-stretch (o pre-stiro), tale operazione è effettuata tipicamente da due rulli rotanti a velocità angolari diverse ed avviene prima della deposizione del film sul prodotto.

La forza di contenimento viene misurata da opportuni dinamometri che possono essere dotati di un opportuno piattello circolare da inserire al di sotto del film.

I test devono essere condotti sempre alle stesse condizioni ambientali.

## TEST EFFETTUABILI IN CONDIZIONI DIVERSE DA QUELLE STANDARD DI LABORATORIO

Tale metodologia serve per comparare il comportamento di differenti film per diversi cicli di fasciatura.

Geometria dell'unità di carico/pallet: 1220mm altezza x 1020mm di profondità x 1220mm di lunghezza;

Strumenti di misura: ruota di marcatura, bilancia per pesare il film, micrometro, misura a nastro o senza nastro, piatto con dinamometro, estensimetro.

### Procedura

Si tiene conto del numero di avvolgimenti intorno al prodotto, e se si parte da sopra o da sotto. Si tiene conto della velocità di avvolgimento del film e della velocità del pallet se si trova su tavola rotante. La sovrapposizione del film deve essere costante.

### Marking wheel

Marcatura pre avvolgimento, dopo l'avvolgimento sul prodotto la distanza tra i marker cambia, stiro misurato secondo la seguente formula:

$$\text{measured stretch, \%} = \frac{\text{new length} - \text{original length}}{\text{original length}} \times 100 \quad (\text{A1.1})$$

### Tapeless measure

Misura del perimetro del carico prima che sia imballato. Se il carico non è simmetrico misurare la parte con perimetro più grande. Una volta che è stato avvolto, misurare la lunghezza del film svolto.

$$\text{total wrapped length} = \text{wrap perimeter} \times \text{total number of turns of turntable} \quad (\text{A1.4})$$

$$\% \text{ stretch} = \frac{\text{total wrapped length} - \text{total film length}}{\text{total film length}} \times 100 \quad (\text{A1.5})$$

Vengono effettuati alcuni test anche sul tack level del film, tra gli strati.

### Test alla lacerazione

Dopo aver atteso 5 minuti dalla fine dell'imballaggio, eseguire un taglio di 255mm lungo la verticale. Consentire alla lacerazione di propagare per 10 minuti, misurare lo strappo.

Misura della resistenza alla foratura

### Misura del peso

Il film durante lo stiramento cambia la densità, ne segue che una volta avvolto, tagliato e pesato, avrà una massa differente dal film non avvolto.

### Danneggiamenti del film tipici

Rottura del film per troppa forza: si presenta una rottura perpendicolare alla direzione della macchina.

Over stretch: si presenta quando il film è troppo tirato.

Rottura al bordo.

Danneggiamento da pre-stretch: si presenta inizialmente come un foro all'interno del film. Si presenta in fine come un buco a forma di rombo.

*Misura della forza del film*

Utilizzo del piatto: disporre tra il film e il prodotto un piatto circolare con occhiello esterno ed agganciare un dinamometro ad una distanza di 250mm dal vertice superiore e 460mm dal bordo laterale. Incidere il film per 25mm. Misurare sino a che il piattello raggiunge una distanza dal prodotto di 10cm.

## 3 Stato dell'arte

### 3.1 Rilevazione delle sollecitazioni

Come già anticipato in precedenza, la problematica principale alla quale è soggetta il carico, è dovuta alle sollecitazioni trasmesse dai sistemi di movimentazione dello stesso.

Ciò che interessa è quindi cercare di capire come il materiale imballato risponde alle sollecitazioni esterne, e magari replicare tali condizioni ambientali in laboratorio.

Quindi, il primo passo in questa direzione consiste proprio nel conoscere l'ambiente nel quale si muove il nostro carico. Per effettuare questo tipo di rilevazione ci si muove cercando di creare un sistema di rilevazione delle perturbazioni, soprattutto meccaniche. Sostanzialmente si andranno a rilevare le vibrazioni trasmesse al payload dal mezzo.

I mezzi ad oggi disponibili viaggiano su gomma (camion, furgoni..), rete ferroviaria, via mare o via aerea.

I numerosi studi sin qui svolti prediligono il vettore su gomma, dato che è senza dubbio il mezzo più utilizzato per motivi legati alla velocità di consegna, ai costi e quindi alle distanze di percorrenza tra fornitore e cliente finale. In genere si va da consegne a livello locale sino a livello internazionale all'interno dello stesso continente.

Di straordinaria importanza ricopre il tipo di rilevazione che si vuole effettuare. Tipicamente all'interno di un pianale del camion si registrano diverse vibrazioni, il sistema si comporta, tenendo conto delle rigidità intrinseche della struttura, come un corpo dotato di 6 GdL. Le rilevazioni vibrazionali vengono effettuate utilizzando degli accelerometri disposti all'interno del pianale in posizioni opportune.

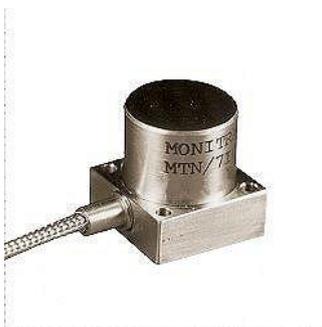


Figura 3.1.1 accelerometro

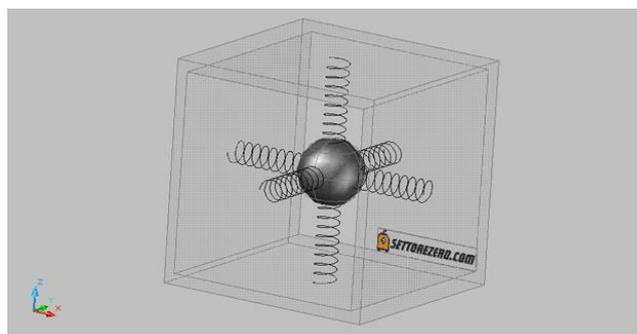


Figura 3.1.2 schema accelerometro triassiale

### 3.2 Metodi e modelli matematici

Prima di andare a descrivere lo stato dell'arte sugli esperimenti effettuati, occorre indicare che la maggior parte degli autori si è avvalso di modelli matematici statistici per cercare le correlazioni fra i vari parametri in gioco e il danneggiamento del carico. Un esempio di parametri o variabili indipendenti che possono influire sulle vibrazioni trasmesse dal camion sono: velocità, tipo di strada, disposizione del carico sul pianale del rimorchio.

Quindi per capire quale sia il parametro più influente, tipicamente gli autori, si sono avvalsi di metodi per progettare ad hoc l'esperimento e scegliere le variabili indipendenti in maniera ottimale. Tale tecnica, prende il nome di DOE (*Design of Experiment*), ossia progettazione dell'esperimento.

Il modello utilizzato è l'ANOVA (*Analysis of Variance*) cioè l'analisi della varianza ad uno o più fattori.

Per spiegare meglio il suo funzionamento, segue un esempio:

**Y** = variabile dipendente

la variabile dipendente è il risultato di una prova, o un indicatore di qualità;

**X** = variabile indipendente

La variabile indipendente è il fattore potenzialmente influente;

bisogna capire quale sia il legame fra X e Y. A tal proposito si svilupperà un legame funzionale del tipo  $Y = f(X, \varepsilon)$ , dove  $\varepsilon$  rappresenta l'effetto di tutti gli altri fattori a parte X, ossia l'incertezza sperimentale.

Se prendiamo come Y le ore di durata di una batteria e X i vari marchi e con  $\varepsilon$  gli altri fattori di cui però non se ne ha una piena consapevolezza e che possono comunque incidere sul risultato ne può risultare una tabella come la seguente:

		Livelli (diversi marchi)			
		1	2	.....	C
1	$Y_{11}$	$Y_{12}$	.....	$Y_{1C}$	
2	$Y_{21}$	$Y_{22}$	.....	$Y_{2C}$	
.	.	.	.....	.	
.	.	.	.....	.	
.	.	.	.....	.	
.	.	.	.....	.	
R	$Y_{R1}$	$Y_{R2}$	.....	$Y_{RC}$	

dove  $i = 1, \dots, R$  indica la ripetizione,  $J = 1, \dots, C$  indica i livelli;

$$Y_{ij} = \mu + \tau_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Dove  $\mu$  indica la media totale vera, ossia su infinite prove;

$\tau_j$  quanto mediamente il risultato del singolo livello si distacchi dalla media totale;

$\varepsilon_{ij}$  indica il rumore associato allo  $i, j$ -esimo valore.

La somma delle deviazioni della media è pari a zero.

Operativamente si effettua una media per ogni singola colonna delle  $R$  ripetizioni, se le medie per colonne differiscono molto, allora possiamo già intuire che il marchio possa avere un effetto sulla vita della batteria.

Il fattore  $\mu$  è stimabile effettuando la media secondo la seguente formula:

$$\tilde{Y}_{..} = \frac{\sum_{j=1}^C \left( \sum_{I=1}^R Y_{ij} \right)}{RC}$$

la stima di  $\tau_j$  invece è la risultante della differenza di  $\tilde{Y}_{.j} - \tilde{Y}_{..}$  ossia è lo scostamento dalla media di ogni livello. Infine  $\varepsilon_{ij}$  lo si ricava dalla differenza degli altri fattori.

Segue che la (1) può essere riscritta come:  $Y_{ij} - \tilde{Y}_{..} = (\tilde{Y}_{.j} - \tilde{Y}_{..}) + (Y_{ij} - \tilde{Y}_{.j})$  (2)

Nella (2) il primo membro indica la variazione totale in  $Y$ , a secondo membro il primo termine indica la variazione in  $Y$  associata ai vari livelli (colonne) cioè a  $X$ , mentre il secondo termine descrive la variazione in  $Y$  associata agli altri fattori (l'errore).

Ora, quadrando i membri e sommando su  $i$  e su  $j$  si ottiene la seguente equazione:

$$\underbrace{\sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2}_{\text{TSS}} = R \cdot \underbrace{\sum_{j=1}^C (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2}_{\text{SSB}_c} + \underbrace{\sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R (Y_{ij} - \bar{Y}_{.j})^2}_{\text{SSW}_c} \quad (3)$$

**TSS**  
Total Sum  
of Squares
**SSB<sub>c</sub>**  
Sum of Squares  
Between  
Columns
**SSW<sub>c</sub>**  
Sum of Squares  
Within  
Columns

TSS: è la varianza totale dovuta al fattore  $X$  e all'incertezza;

SSB<sub>c</sub>: varianza legata all'impatto della variabile  $X$  su  $Y$ ,  $R$  è un coefficiente di amplificazione che serve a dare un maggior peso e quindi significato al valore, cioè se si dispone solo di 2 prove ( $R=2$ ) il valore è meno significativo di 10 prove ( $R=10$ );

SSW<sub>c</sub>: varianza legata agli altri fattori diversi da  $X$ , se SSW<sub>c</sub> quasi coincide con TSS e SSB<sub>c</sub> è quasi nullo, ciò indica che il fattore  $X$  potrebbe avere influenza sulla  $Y$  ma il suo flusso è influenzato dall'incertezza, invece se SSB<sub>c</sub> quasi coincide con TSS allora l'effetto di  $X$  è evidente.

Per l'Anova ad un fattore, si completa innanzitutto una tabella come segue:

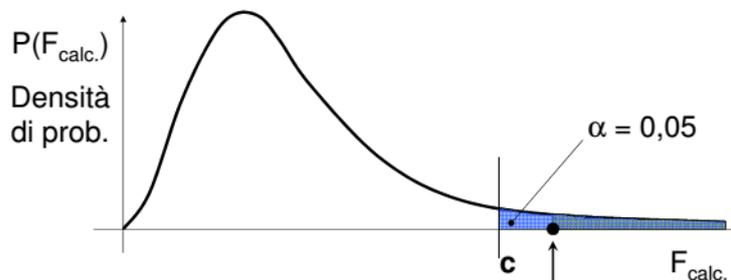
VARIANZA	SSQ	GdL	MSQ
FRA LE COLONNE	$SSB_c$	(C-1)	$MSB_c = \frac{SSB_c}{C-1}$
ENTRO LE COLONNE (ERRORE)	$SSW_c$	C(R-1)	$MSW = \frac{SSW_c}{C(R-1)}$

$SSB_c$  misura la varianza fra le colonne confrontandole (c-1 confronti)

$SSW_c$  misura la varianza fra le righe per ogni colonna (C\*(R-1) confronti)

Compilata la precedente tabella, si effettua un confronto fra  $MSB_c$  e  $MSW$  calcolandone il rapporto come segue  $F_{calc} = \frac{MSB_c}{MSW}$  se il rapporto è  $> 1$  allora è ragionevole ritenere che X abbia un effetto su Y al di là delle incertezze.

Giunti a questo punto, occorre capire se accettare l'ipotesi nulla ( $H_0$ ) con la quale si conferma che la variabile non ha alcun effetto sul risultato e che le differenze osservate sono solo dovute all'incertezza  $\sigma$ , accettare l'ipotesi di significatività ( $H_1$ ) con la quale si conferma che la variabile ha un effetto sul risultato al di là delle incertezze. Per effettuare tale confronto ci si può servire della distribuzione di Fisher, la quale rappresenta la distribuzione di probabilità di  $F_{calc}$ .



Osservando la funzione, si ha che l'area sottesa la coda della curva (parte dx), rappresenta la probabilità di ottenere quanto ottenuto (p-value) partendo dall'ipotesi che X non influisca su Y. Se la probabilità di aver ottenuto tali risultati è bassa, allora si rigetta  $H_0$ , quindi X ha influenza su Y.

La soglia di probabilità tipicamente è  $\alpha = 0.05$ , ossia il 5% di significatività.  $\alpha$  individua il valore limite di  $c$ .

Se  $p\text{-value} < \alpha$  si rifiuta  $H_0$ , altrimenti se  $p\text{-value} > \alpha$  si accetta  $H_0$ . Analogamente se  $F_{calc} \geq c$  si rifiuta  $H_0$ , se  $F_{calc} < c$  si accetta  $H_0$ .

Il p-value è calcolabile anche tramite una funzione di Excel (DISTRIB.F) che prende in ingresso  $F_{calc}$ , i GdL di  $MSB_c$  e  $MSW$ . Il valore della soglia  $c$  è calcolabile sempre una funzione Excel (INV.F) che prende in ingresso il valore  $\alpha$  (5%) e, i GdL di  $MSB_c$  e  $MSW$ .

Oltre ai modelli statistici, gli autori si avvalgono di opportuni grafici per la descrizione delle sollecitazioni di tipo meccanico e, quindi a diversi indici. Qui, verranno descritti sommariamente il significato del *Root Mean Square*, e del *PSD (Power Spectra Density)*.

- RMS (o valore quadratico medio)

nella teoria dei segnali, il valore quadratico medio di una funzione continua, è il valore efficace della funzione  $x(t)$  sul periodo stesso

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (4)$$

Se il segnale fosse di tipo discreto, al posto di un integrale dovremo inserire una sommatoria, mediata sull'indice della sommatoria.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t)^2} \quad (5)$$

- PSD (Funzione di Densità Spettrale)

Innanzitutto si definisce il senso di *autocorrelazione*, come il grado di dipendenza tra i valori assunti da una funzione campionata nel suo dominio in ascissa. In altre parole, il segnale all'istante  $t$  viene confrontato con un altro valore di sé stesso ritardato di un valore  $\tau$ , per comprendere quanti si somigli o quanta *correlazione* ci sia all'avanzare del tempo. Se il segnale varia poco nel tempo  $x(t)$  e  $x(t+\tau)$  saranno simili e quindi l'autocorrelazione avrà segno positivo, mentre se il segnale varia rapidamente i valori dei due istanti temporali sarà molto diverso e quindi l'autocorrelazione sarà prossima allo zero. Di solito l'autocorrelazione viene utilizzata per cercare valori simili all'interno di un segnale e, quindi per identificare un segnale periodico, che è stato coperto da un rumore.

Quindi l'autocorrelazione  $R_{xx}(\tau)$  di una funzione  $x(t)$  indica quanto la funzione sia correlata a sé stessa. La sua formulazione è la seguente:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau) dt \quad (6)$$

La trasformata di Fourier della di  $R_{xx}(\tau)$  è detta densità di potenza spettrale (PSD) o densità di *autospettro* (ASD) e si indica con  $S_{xx}(\omega)$

$$S_{xx}(\omega) = \mathbf{F}\{R_{xx}(\tau)\} \quad (7)$$

La funzione  $S_{xx}(\omega)$ , è legata alla trasformata di Fourier di  $x(t)$  dalla relazione:

$$S_{xx}(\omega) = X^*(\omega)X(\omega) = |X(\omega)|^2 \quad (X(\omega)^* \text{ complesso coniugato di } X(\omega)) \quad (8)$$

La funzione di autospettro, è una funzione reale e contiene informazioni sulle frequenze presenti in  $x(t)$ , ma non sulle fasi. Per diminuire gli errori di misura, l'autospettro viene stimato effettuando la media di più misure. Per quanto riguarda nello specifico le vibrazioni, si preferisce quantificarle con l'utilizzo della PSD cioè dell'autospettro rapportato alla banda di frequenza del filtro, segue che l'unità di misura della PSD è  $[g^2/Hz]$ .

### 3.3 Rilevazione delle sollecitazioni su camion

Prima di andare ad ideare dove e come rilevare le vibrazioni su di un camion occorre definire la scheda tecnica del mezzo di prova. Idealmente si potrebbe procedere classificando il mezzo in base alla tipologia di camion come:

- Numero assi;
- Numero gomme;
- Tipologia di sospensioni del rimorchio e trattrice;
- Carico sopportabile;
- Carico presente sul pianale.

Una volta definito il mezzo, si procede con la definizione del tragitto che il vettore deve compiere. Per una rilevazione sperimentale, si possono identificare vari step di velocità su diverse tratte stradali.

È noto come diverse tipologie di prodotto rispondano diversamente alle sollecitazioni, basti pensare al comportamento che può avere un carico di bottiglie di acqua e di un prodotto di tipo scatola di cartone o di tipo misto.

Quello che importa, oltre alla tipologia di pallet è conoscere la posizione dove ubicare il pallet. La posizione lungo il pianale è di grande importanza, poiché a seconda di dove è collocato si possono registrare oscillazioni diverse. Per spiegare meglio e, in maniera più semplice questo punto, dovremo semplificare estremamente la struttura del pianale e richiamare le basi della meccanica delle costruzioni e delle vibrazioni.

Si può partire dal considerare il pianale del camion come una semplice struttura di tipo trave appoggiata su due vincoli, con una parte a sbalzo come da figura 3.3.1, dove i due carrelli rappresentano gli assali del rimorchio, i parallelogrammi rappresentano il carico (in posizione A o posizione B). È chiaro come le frecce sono diverse, e quindi a seguito di sollecitazioni di tipo vibrazionale, anche le risposte sono differenti.

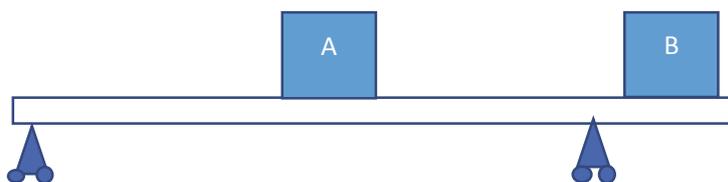


Figura 3.3.1 schema pianale camion e disposizione carico

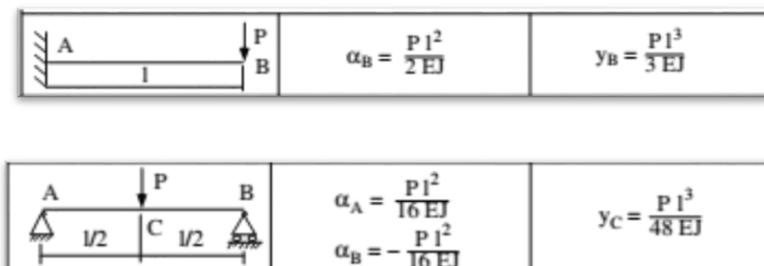


Figura 3.3.2 abbassamenti dovuti al carico P

Soddisfatta la disposizione del carico, si può dare inizio alla rilevazione, disponendo gli accelerometri o sul pianale o, sulla paletta di legno. Quest'ultimo accorgimento non è da sottovalutare, in quanto, se disponiamo i sensori a contatto con il pianale, riveleremo solamente la legge di moto del rimorchio e le frequenze dello stesso. Invece, la disposizione dell'accelerometro nella paletta di legno, permette di rilevare la legge di moto alla quale è sottoposta la base del pallet. In tale senso basta pensare ai sobbalzi del carico dove in particolare in fase di discesa si potrebbero rilevare dei picchi di accelerazione molto forti.

In letteratura, numerosi autori hanno dato un prezioso contributo in questo senso, fornendo linee guida di massima sulle vibrazioni registrate su camion [1],[2],[3],[4],[5],[6]. Le conclusioni che accomunano un po' tutti riguardano la diversa trasmissibilità delle sollecitazioni. Passando da un rimorchio equipaggiato con sospensioni di tipo ad aria ad uno con sospensioni a balestra, si nota un incremento delle vibrazioni che si tramutano in un aumento delle accelerazioni al quale è sottoposto l'intero carico, vedi figura 3.3.3.

Segue che si nota un aumento delle vibrazioni con l'aumentare della velocità in tratti stradali di tipo urbano, piuttosto che su rete autostradale, dove in quest'ultimo caso, l'aumento della velocità non incide particolarmente sulla vibrazione: la forzante diventa più veloce e il manto stradale è qualitativamente migliore, vedi figura 3.3.4

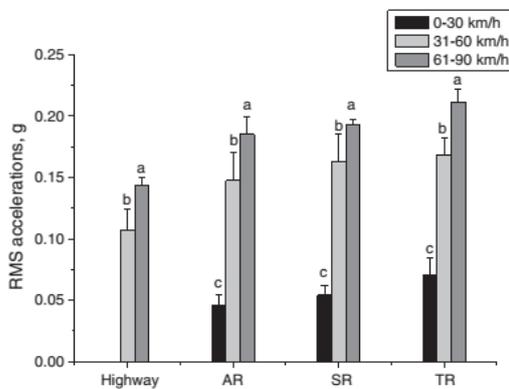


Figura 3.3.3 RMS dell'accelerazione.

(highway: autostrada. AR:strada principale.

SR: strada secondaria. TR: strada terziaria )

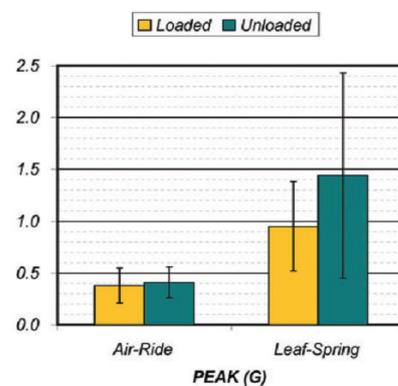


Figura 3.3.4 picchi di "g"

Ulteriori parametri che incidono sulla magnitudo delle vibrazioni è senz'altro l'entità del carico. È noto dalla meccanica delle vibrazioni, che variando la massa dell'elemento posto in sollecitazione, si possa modificare la pulsazione e l'ampiezza dell'oscillazione. Naturalmente anche variando la rigidezza.

Agendo sulla massa si osservano dei risultati interessanti. Infatti Zhou e altri [6], hanno effettuato dei test rilevando le risposte alle oscillazioni su due diversi camion, in diversi tratti stradali e diverse velocità. Il primo camion risultava carico al 60% del limite possibile,

il secondo invece era carico al 150%, quindi con un sovraccarico del 50%. Le RMS delle accelerazioni risultanti sono riportati qui di seguito in figura 3.3.5, mentre in figura 3.3.6 sono riportati i valori di picco di  $g$ .

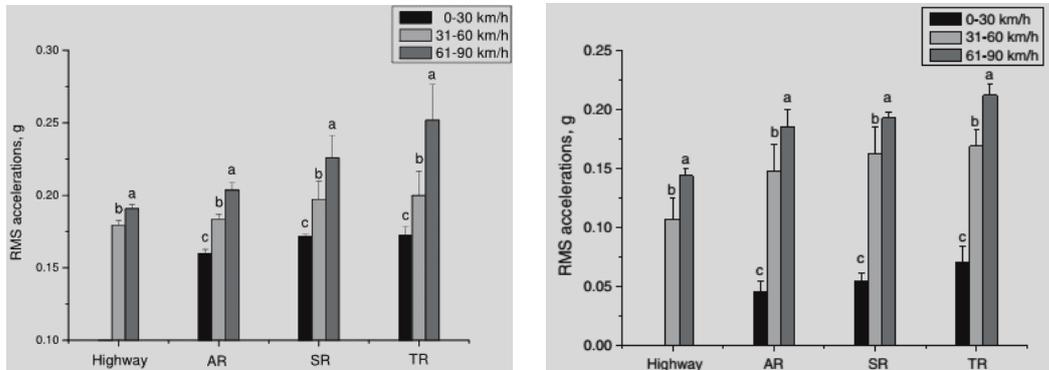


Figura 3.3.5 RMS per camion carico al 60% (sx) e al 150% (dx)

AR: strada principale, SR: strada secondaria, TR: strada terziaria

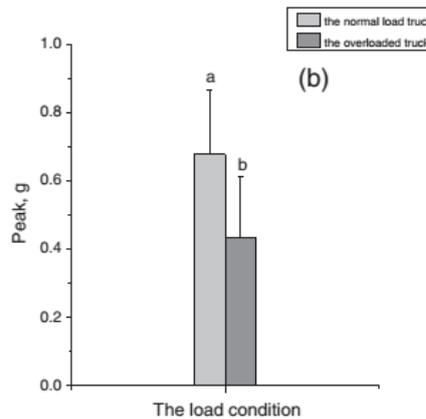


Figura 3.3.6 picchi di  $g$  per camion carico al 60% (sx) e al 150% (dx)

In conclusione emerge come con l'aumentare della velocità, aumenta il valore dell'accelerazione cui era sottoposto il carico e come i picchi di accelerazione sono visibili a 3Hz o 3.5Hz.

Ulteriori lavori sempre per la ricerca di una correlazione tra le accelerazioni cui è sottoposto il carico e le variabili quali payload, velocità, tipo di strada e tipologia di sospensione, sono stati vagliati da altri autori [3], i quali hanno effettuato delle rilevazioni durante diversi percorsi (> 350 km) in Spagna. Emerge come, all'aumentare della velocità le vibrazioni aumentino, e come le differenti tipologie di sospensioni possono avere un effetto considerevole con mostrato in figura 3.3.7

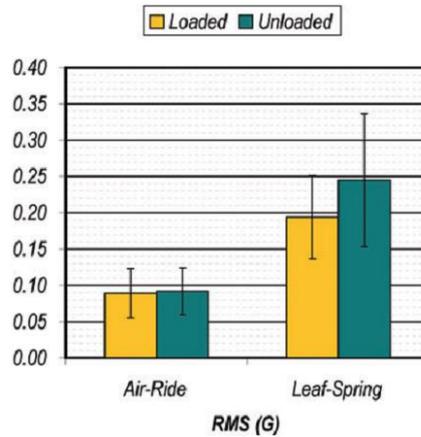


Figura 3.3.7 RMS in G per caso camion carico/scarico e tipologia di sospensione

Lavori analoghi al precedente sono stati effettuati da Singh e altri [4] dove sono state effettuate delle rilevazioni su camion dotati di sospensioni ad aria e a balestra. Emerge come la sospensione ad aria smorzi molto di più le vibrazioni di quella a balestra. Inoltre hanno stipulato delle tabelle caratteristiche per simulare le vibrazioni sia per mezzi dotati di sospensione a balestra che ad aria, basandosi sulle rilevazioni. I livelli di PD (Power Density) sono illustrate in figura 3.3.8, lo spettro mostra i livelli maggiori di PSD rappresentati dal 30% dei dati registrati e i valori più bassi rappresentati dal 70% dei dati rappresentati. In tabella 2 vengono riportati i valori medi registrati per i diversi tragitti percorsi dai camion.

Frequency (Hz)	Power density level (G <sup>2</sup> /Hz)	
	70% Low	30% High
1	0.00242	0.00062
2	0.00446	0.00152
6	0.00013	0.00003
9	0.00483	0.00282
10	0.00081	0.00034
20	0.00039	0.00012
30	0.00013	0.00003
40	0.00027	0.00006
50	0.00158	0.00015
60	0.00019	0.00003
70	0.00034	0.00009
80	0.00159	0.00045
90	0.00117	0.00020
100	0.00028	0.00012
200	0.00006	0.00001

Frequency (Hz)	Power density level (G <sup>2</sup> /Hz)	
	70% Low	30% High
1	0.00048	0.00018
2	0.00319	0.00063
3	0.01820	0.00625
6	0.00014	0.00005
9	0.00202	0.00108
12	0.00028	0.00007
20	0.00195	0.00024
30	0.00482	0.00058
40	0.00057	0.00009
50	0.00430	0.00075
60	0.00296	0.00081
70	0.00161	0.00057
80	0.00153	0.00073
90	0.00177	0.00081
100	0.00432	0.00159
200	0.00026	0.00008

Figura 3.3.8 tabelle PD

Trip	Suspension	Distance (miles)	Spectrum power density (G <sub>rms</sub> )		Temperature (°F)		Relative humidity (%)	
			30% High	70% Low	Min	Max	Min	Max
1	Leaf spring	430	0.32	0.20	53.8	72.4	33.7	57.3
2	Leaf spring	680	0.55	0.37	46.8	64.1	33.5	70.2
3	Air ride	445	0.20	0.10	41.3	63.4	26.1	53.8
4	Air ride	200	0.37	0.17	37.8	57.9	48.2	65.3
5	Air ride	400	0.28	0.13	55.2	72.9	48.3	54.6
6	Air ride	490	0.13	0.07	66.5	69.0	30.5	40.0
7	Air ride	1050	0.11	0.06	39.0	69.9	30.6	72.8
8	Air ride	1135	0.10	0.10	59.0	70.0	30.5	52.9
9	Leaf spring	1245	0.89	0.60	66.8	84.2	45.2	64.4
10	Air ride	1332	0.36	0.23	44.3	66.8	61.1	71.2
11	Leaf spring	625	0.45	0.24	51.1	70.1	60.0	70.0
12	Air ride	680	0.50	0.25	45.6	67.1	43.9	71.6
13	Air ride	625	Bad data	Bad data	35.0	67.1	21.5	41.5
14	Leaf spring	425	0.37	0.21	34.6	67.5	31.6	55.1

Tabella 2

Gli autori, oltre alla rilevazione di fattori ambientali, hanno consigliato dei test per simulare le vibrazioni verticali, basandosi sulla tabella 2 di pagina precedente.

Per la sospensione a balestra o aria:

- Riferirsi alla norma ASTM D4728, per effettuare i test con vibrazione di tipo random;
- effettuare il test per 60min utilizzando il 70% dello spettro basso (aria/balestra);
- continuare per 30min utilizzando il 30% dello spettro alto(aria/balestra).

Sempre in tal senso, Fei e altri [2], analizzarono l'effetto delle vibrazioni al variare della velocità del camion e in particolare si focalizzarono sulle componenti di shock. Si nota come l'incremento della velocità porta ad un incremento delle vibrazioni soprattutto alle velocità considerate basse, il valore maggiore di  $G_{rms}$  è nel range di velocità di 45-59.9 km/h. i risultati sono riportati in figura 3.3.9

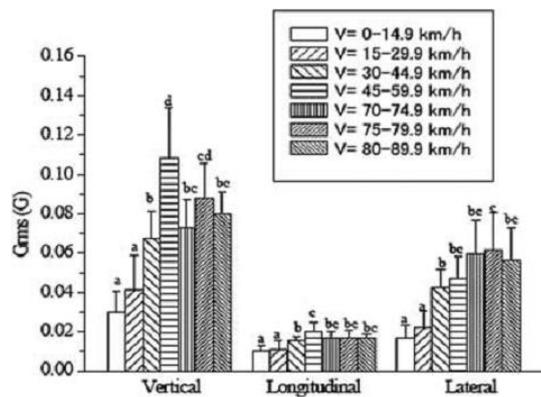


Figura 3.3.9 Grms relativi alla vibrazione e shock

Gli autori, hanno utilizzato la separazione frequenziale per evidenziare come per una analisi accurata, occorre dividere i segnali, si dimostra che la PSD del segnale contenente gli shock, abbia un valore più alto del segnale che include la vibrazione e gli shock, vedi figura 3.3.10.

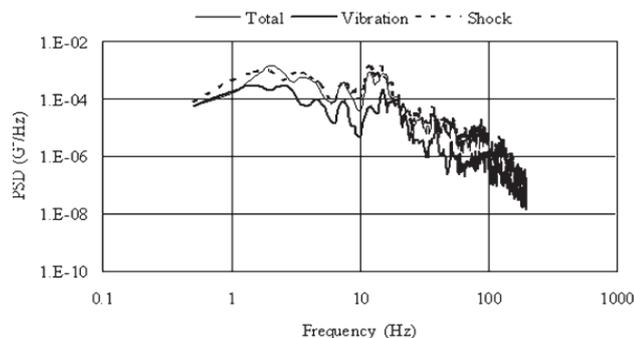


Figura 3.3.10 PSD della componente verticale

Ulteriori rilevazioni sono state effettuate per tragitti nazionali in Brasile [5] Sono stati vagliati i risultati provenienti da diverse tipologie di camion (2 o più assi) e per diverse spedizioni. Con il rilevamento delle vibrazioni e con l'uso della formula della densità di potenza  $PD$  :

$$PD = \frac{1}{BW} \sum_{i=1}^n (RMS(G_i^2)) / n \quad (1)$$

Dove  $G_i$  è l' $i$ -esimo valore dell'accelerazione misurata in  $g$ ,  $BW$  è la banda di frequenza,  $n$  è il numero di campioni. Ne emergono risultati grafici come quelli di figura 3.3.11. La serie di esperimenti si è basata su spedizioni di tipo *in giornata*, per diversi tragitti comprendenti diversi tratti stradali, dall'autostrada allo sterrato, passando per le vie urbane. Utilizzarono due diverse tipologie di camion, autocarri da 4/6 q. per le tratte all'interno della zona metropolitana (50-190 km) e camion a 6 assi per le lunghe tratte (1000-2000 km).

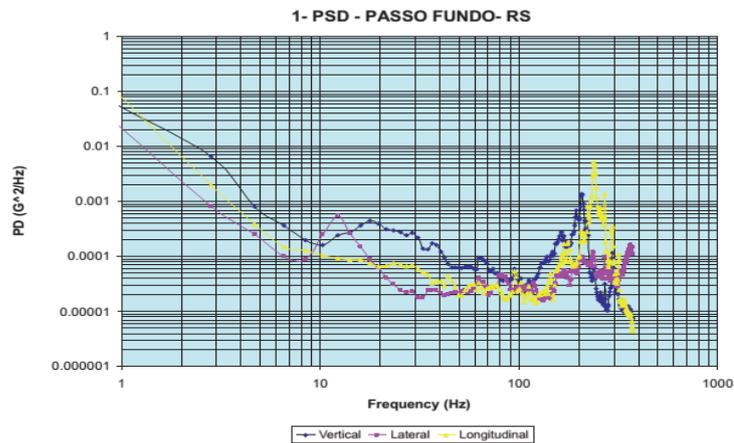


Figura 3.3.11 grafico PSD (6020 kg di carico, 186 km percorsi)

Gli autori, utilizzando diversi valori di PSD dovuti ai vari tragitti e carichi, estrapresero un valore generico di PSD per le strade brasiliane, come riportato in figura 3.2.12, utilizzabile in laboratorio seguendo la ASTM D 4728 [26].

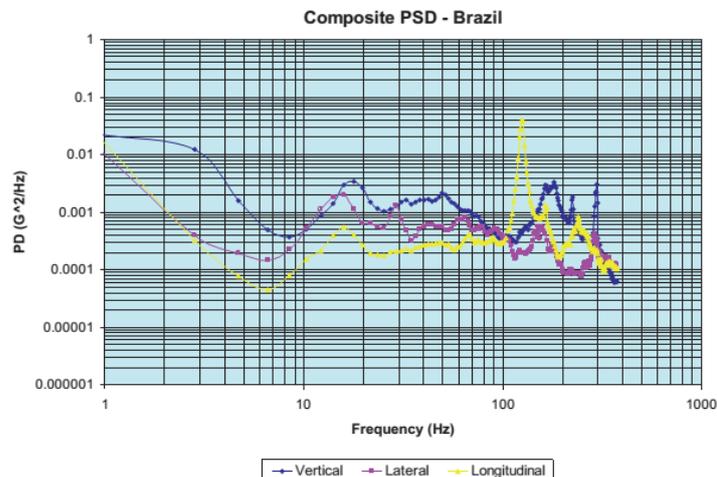


Figura 3.2.12 composizione delle PSD

Allo stesso modo, Soleimini e altri [[7], riportano casi sperimentali simili. In questo caso, non solo vengono rilevate le vibrazioni trasmesse dal pianale del veicolo ma, anche la risposta del carico trasportato, in questo caso, volto a capire il danneggiamento della frutta. I sensori sono stati posti tramite appositi alloggiamenti, all'interno delle casse impilate sul pianale del vettore, come da figura 3.2.13.

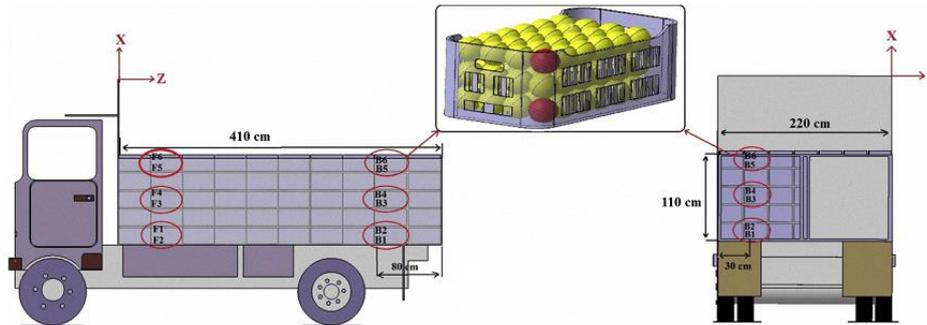


Figura 3.3.13 disposizione sensori (sfere rosse) sul pianale

Ancora una volta, la rilevazione avviene per due diversi veicoli, l'uno dotato di rimorchio con sospensioni a balestra e l'altro equipaggiato con sospensioni ad aria. Emerge che le oscillazioni maggiori sono quelle registrate nella parte posteriore del rimorchio, rispetto a quelle frontali. Inoltre l'effetto dell'altezza del carico non è indifferente alle vibrazioni. Per comprendere al meglio ancora una volta il perché di si osserva un comportamento oscillante della pila di cassette, si può pensare di semplificare con un modello tale pila come mostrato in figura 3.3.14

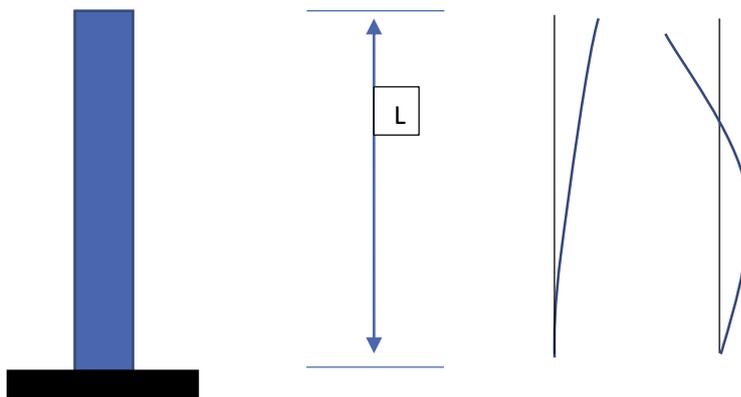


Figura 3.3.14 modello prodotti impilati, deformate del primo e secondo modo di vibrare

Il modello rappresentante una serie di prodotti posti l'uno sull'altro, può essere raffigurato da una semplice trave incastrata, dove alla base è applicata una legge di moto. Il sistema quindi risponde con le varie deformate. Le deformate che interessano di più

sono quelle dei primi modi di vibrare, tipicamente primo, secondo e terzo, i quali sono a frequenza crescente e si riscontrano nelle frequenze più basse. Tali frequenze sono le i principali responsabili degli spostamenti fra gli strati del materiale e quindi del possibile danneggiamento del prodotto.

Nelle figure successive vengono riportati i valori di PSD registrati nel pianale dei due camion e registrati lungo le colonne dei prodotti.

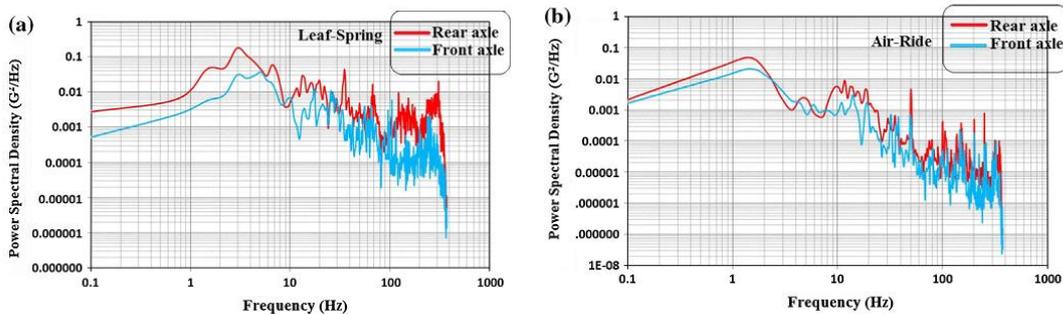


Figura 3.2.15 PSD relativi al pianale con sospensioni a balestra (sx) e ad aria (dx)

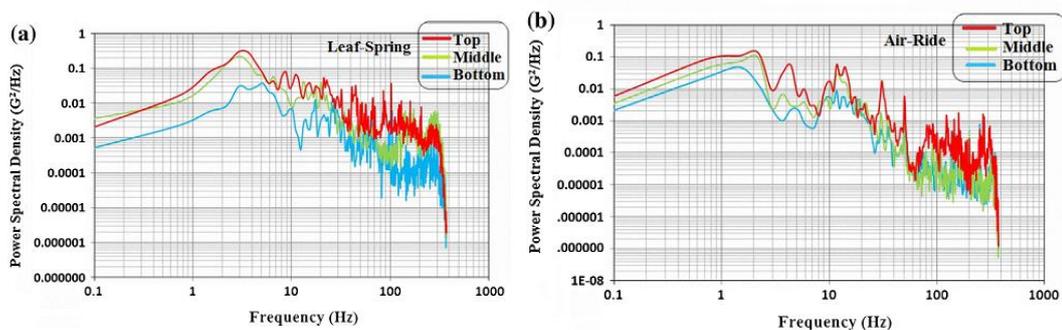


Figura 3.2.16 PSD lungo il prodotto per caso sospensioni balestra (sx) e ad aria (dx)

Emerge chiaramente come per entrambi i camion, la parte peggiore del pianale circa la trasmissione delle vibrazioni, sia la parte posteriore, mentre per quanto riguarda la colonna dei prodotti, si ha che la parte superiore vede maggiori oscillazioni dato che non ha strati superiori che in qualche modo possano fungere da vincolo. Inoltre è soggetta ad escursione massima vedi primo modo di vibrare. Inoltre i valori della PSD per la configurazione peggiore e cioè pianale equipaggiato con sospensioni a balestra e con prodotto posto sulla parte posteriore sono:  $0.056 \text{ G}^2/\text{Hz}$ ,  $0.081 \text{ G}^2/\text{Hz}$ , e  $0.0869 \text{ G}^2/\text{Hz}$  per la parte bassa, media e superiore del carico.

Sempre nell'ottica del danneggiamento del prodotto, si è analizzato il deterioramento della frutta [8]. Per valutare l'effetto delle vibrazioni, si sono valutate le sollecitazioni trasmesse al carico posizionato nella parte anteriore e posteriore del pianale del rimorchio. Si nota ancora che la parte posteriore del pianale trasmette le vibrazioni maggiori, come da figura 3.3.17, si conferma quindi che la posizione del pallet lungo il pianale del rimorchio influenza la trasmissione delle vibrazioni.

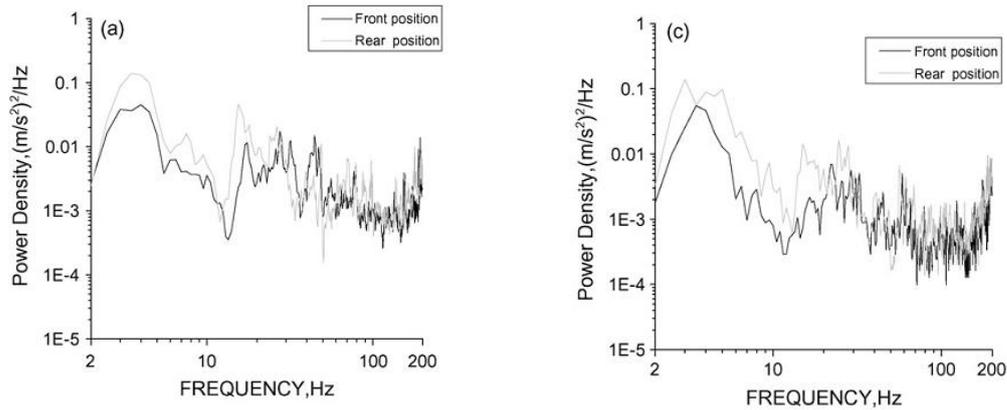


Figura 3.3.17 PSD per autostrada (a) e strada urbana (c)

Tale rilevazione sperimentale, serve non solo a fornire informazioni sul tipo di vibrazioni cui è soggetto il carico, ma a segnalare come sia necessario un opportuno sistema di protezione del prodotto.

Nell'ambito della protezione prodotto e la rilevazione delle vibrazioni, Berardinelli e altri [9], hanno effettuato una rilevazione delle oscillazioni in tre diverse posizioni del pianale del rimorchio del camion, rispettivamente nella parte frontale, intermedia e posteriore. Inoltre hanno equipaggiato il prodotto, in questo caso uova, di micro accelerometri. In questo caso le uova sensorizzate sono disposte nella parte superiore del carico. I risultati riportanti i valori della PSD sono riportate in figura 3.3.18.

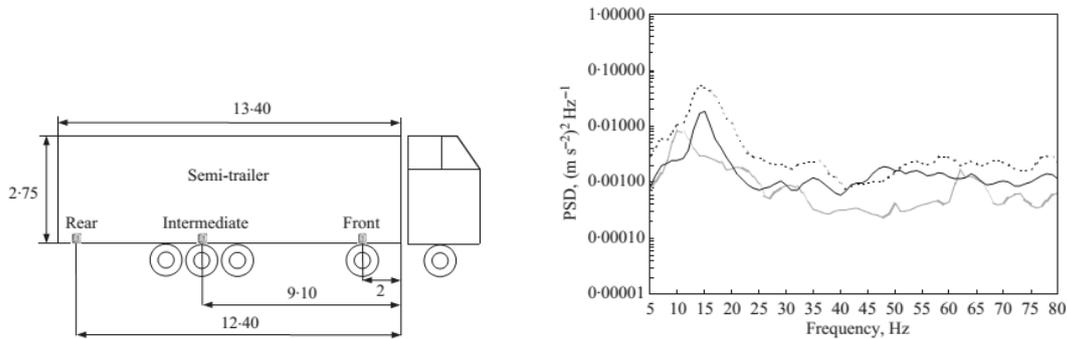


Figura 3.3.18 disposizione sensori sul pianale (sx), PSD (dx) per le disposizioni — front, — intermediate, --- rear

Una volta misurate le vibrazioni, un nuovo campione di uova è stato sottoposto a test su tavola vibrante. Si sono simulate anche le condizioni climatiche ( $T^\circ = 18\text{ C}^\circ$ ). In generale, si è scelta una banda di frequenza compresa tra 5Hz e 20Hz dato che in questa banda di frequenza è stato rilevato il valore maggiore del RMS dell'accelerazione e, inoltre si è simulata la condizione cui è sottoposto il prodotto posizionato nello strato più alto della pila e, posto sul retro del pianale del rimorchio, loco dove si raggiungono valori di RMS dell'accelerazione anche di due volte superiori rispetto a quelle accelerazioni registrate nella parte anteriore del rimorchio.

Nell'ambito del trasporto prodotto, non si può fare a meno di menzionare il caso dei corrieri. Tale categoria, infatti è caratterizzata dal fatto che ogni vettore può trasportare varie tipologie di prodotti. In tal senso, non solo sono state sviluppate negli anni delle procedure per simulare tali condizioni, vedi ISTA 3B [10] la quale propone una serie di test da effettuare sui vari prodotti per caratterizzarli. In tal senso, Singh e altri [11] hanno effettuato una serie di rilevazioni sulle vibrazioni, rilevate a bordo di un rimorchio di un camion. Emerge come gli standard fissati dalla ISTA 3H e ISTA 4AB per , circa i valori di PSD, siano inferiori rispetto a quanto risulta sperimentalmente, vedi figura 3.3.19

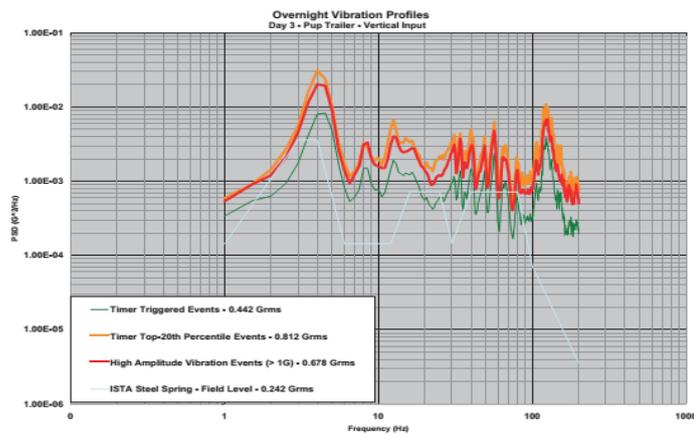


Figura 3.3.19 PSD rilevata su strada urbana e autostrada

Sempre in ambito delle misure ambientali, in [12] si sono valutati gli eventi registrati su diversi mezzi di trasporto: camion, nave, e mezzi per la movimentazione interna (carrelli ecc.). In questo caso la monitoraggio è durata 82 giorni. La spedizione ha avuto come partenza l'Ungheria e come meta il Sud Africa. Come grandezze rappresentanti le condizioni climatiche, sono state misurate le varie temperature, e l'umidità, riscontrate lungo l'itinerario. Per le sollecitazioni meccaniche sono state rilevate sia le vibrazioni che gli shock, quest'ultimi risultano più elevati per la parte dello smistamento. I mezzi per la parte di smistamento in genere sono i carrelli, le gru ecc. Per quanto riguarda le sollecitazioni in figura 3.3.20 sono riportati i valori di  $G_{rms}$  e i valori di  $G$ , si nota appunto come i valori più elevati sono dovuti alla parte handling. Dalla figura si può già stimare una prima classifica sul mezzo che ammortizza meglio le sollecitazioni. Si osserva come il valore di  $G_{rms}$  si innalzi passando dalla nave al camion, sino ai mezzi per lo smistamento.

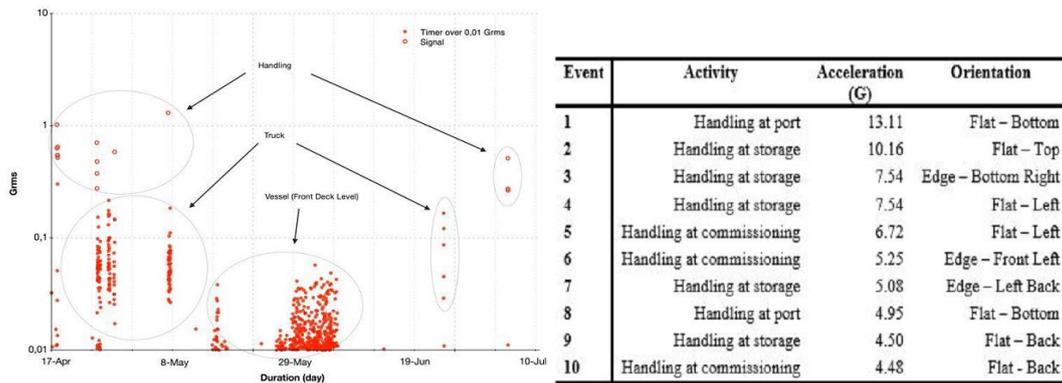


Figura 3.3.20 Grms a sinistra e valori in G per la movimentazione a destra

### 3.4 Rilevazione delle sollecitazioni su carrello elevatore

Durante il percorso, il prodotto è maneggiato anche dai sistemi di mezzi per la movimentazione interna. Il vettore principalmente usato è appunto, il carrello elevatore.

Tale dispositivo di trasporto, è senza dubbio il più utilizzato per spostare i prodotti pallettizzati o, che dispongono di un opportuno supporto atto ad essere vincolato alle forche del carrello. È noto, come esposto in bibliografia che è il mezzo dove si possono riscontrare le sollecitazioni peggiori, dovute essenzialmente ad errori umani. Un primo esempio per rendere l'idea è quando l'operatore si avvicina al carico pallettizzato e, inforcandolo lo urta, oppure durante l'atto di posa, dove, se lo si appoggia su un solo spigolo e, indietreggiando col carrello si fanno scivolare le forche da sotto la paletta di legno, all'istante finale la paletta si distacca dalla punta della forca e impatta con il suolo, provocando un forte shock al carico.

Generalmente, per verificare la stabilità di un carico pallettizzato all'impatto, si può fare uso della norma ASTM D4003-98 [14] (citata al capitolo 2 Norme).

In bibliografia si riscontrano alcuni lavori volti alla caratterizzazione delle sollecitazioni trasmesse dal carrello, come [15] [16][17]. In [15], venne proposta una modifica alla allora norma ASTM D4003, per aggiornarla sulle accelerazioni cui effettuare il test ad impatto. Sostanzialmente, gli autori, equipaggiando il carico pallettizzato e il carrello con opportuni accelerometri, effettuarono numerosi test con carichi di massa diversa, al fine di ottenere, tramite l'equazione della conservazione del moto, un range di accelerazioni che rappresentassero i casi reali. In sostanza, la norma di allora era troppo severa e, non rispecchiava i casi reali, si passò da 40G in 10ms o 10G in 50ms, mentre dalla sperimentazione emerse un valore medio di accelerazione pari a 36G per 4.3ms. Ad oggi la norma prevede l'utilizzo della formula estrapolata dagli autori di [15].

La formula è la seguente:

$$G_p \times T = 31 \left( \frac{1+e}{1+R} \right) V_t \quad (1)$$

$$e = \frac{V_p^1 - V_t^1}{V_t - V_p} \quad (2)$$

$$R = \frac{W_p}{W_t} \quad (3)$$

Dove  $G_p$  è il picco di accelerazione cui è sottoposto il pallet,  $T$  è la durata dell'impatto,  $e$  è il coefficiente di restituzione dove al numeratore vede la differenza fra le velocità del pallet (pedice  $p$ ) e del carrello (pedice  $t$ ), prima e dopo l'impatto (apice 1).  $R$  è il rapporto fra la massa del pallet caricato e del carrello.

Sempre nel settore dell'analisi degli shock trasmessi da carrello elevatore, Blumer e altri [16], hanno cercato di comprendere come si trasmettesse l'onda d'urto fra le parti del carico pallettizzato, sottoposto ai vari test, quali: impatto orizzontale, impatto inclinato, caduta libera. Il provino in questione in questo caso è rappresentato da due diversi carichi (scatole di cartone opportunamente riempite) disposti su palette aventi la stessa geometria. Il primo esemplare è caricato con 5 contenitori, il secondo con 10 contenitori. Ovviamente nel secondo caso i contenitori, sono più più piccole. Dall'esperimento emerge che un numero maggiore di elementi componenti il carico, assorbono maggiormente l'impatto smorzando l'onda d'urto.

In [17], invece è stato studiato il comportamento del film di un prodotto pallettizzato avvolto. Gli autori hanno utilizzato un particolare carrello dotato di pinze anziché di forche. L'esperimento consisteva nell'applicare un test di trasporto prodotto adottando un preciso percorso dotato di asperità dettate dalla ISTA 3B [18]. Il prodotto pallettizzato è dotato di sensori di forza atti a controllare in tempo reale la variazione della forza di contenimento del film dovuta alla trasmissione delle sollecitazioni. Emerge come la forza di contenimento tende a diminuire con il susseguirsi degli urti, vedi figura 3.4.1 dx alla voce *handling*.

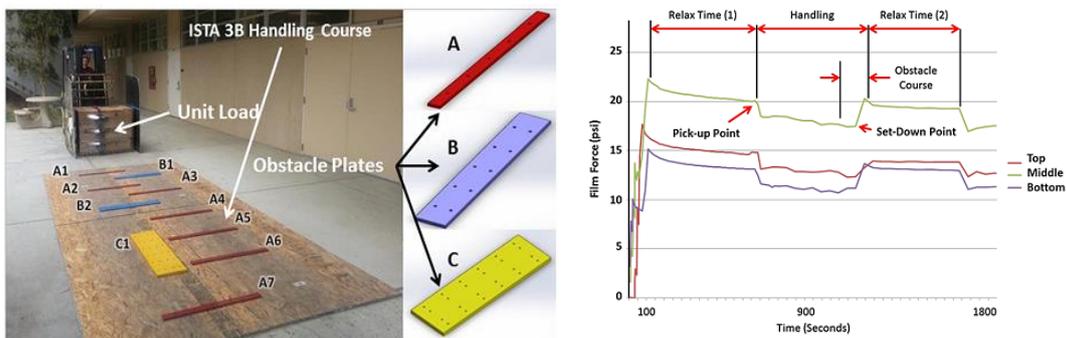


Figura 3.4.1 percorso secondo ISTA 3B e diagramma forza di contenimento in funzione del tempo

### 3.5 Rilevazione delle sollecitazioni sul treno.

Nella catena logistica dei trasporti è compreso anche il treno. Tale vettore gode delle proprietà di non essere soggetto al traffico stradale e quindi sufficientemente rapido e di una possibilità di carico maggiore, dalle 30 ton. al massimo di 55/74 ton. per i vagoni a 4 assi.

Sono stati effettuati alcuni studi volti alla classificazione delle vibrazioni trasmesse dai vagoni ferroviari al carico. In tale senso Singh e altri [19], hanno registrato l'intensità delle vibrazioni, per poi compararle con quelle dettate dalla ISTA 4AB. Emerge come le PSD corrispondenti alle sollecitazioni registrate sono più severe rispetto a quelle dettate da norme o altre procedure. Quindi gli autori propongono una tabella PSD per la rete ferroviaria indiana, da applicare nei test su tavola vibrante, vedi tabella 1. In figura 3.5.1 è riportato il grafico del PSD rilevato sull'asse verticale.

Spectrum No.	Frequency (Hz)	Power density (G <sup>2</sup> /Hz)
1	1	0.0003
2	1.5	0.0005
3	3	0.0005
4	7	0.00006
5	9	0.00008
6	12	0.00008
7	50	0.00001
8	100	0.00001

Tabella 1. PD raccomandata per rete ferroviaria indiana

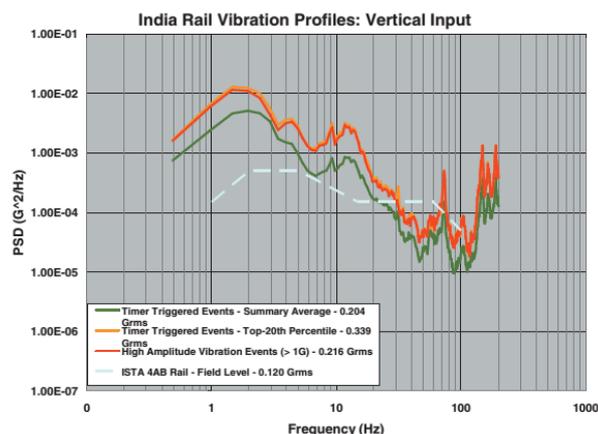


Figura 3.5.1 PSD della componente verticale

Ulteriori studi sono stati condotti da Rouillard e altri [20], per la rete ferroviaria australiana. L'obiettivo di tale ricerca era quello determinare un nuovo approccio per analizzare e simulare le vibrazioni e gli shock. Viene quindi proposto un metodo per separare le frequenze più basse del segnale registrato, dalle vibrazioni ad alta frequenza dovuta alla struttura. Infine per sintetizzare le vibrazioni (essendo non stazionarie), le si scompongono in pacchetti d'onda grazie alla trasformata inversa di Fourier.

Ultimamente si sono analizzati i livelli di vibrazione su rete ferroviaria in Europa Centrale [21]. L'obiettivo degli autori è la classificazione dei livelli di vibrazione e la comparazione con le norme ASTM, con il MIL-Std, UK Defence Standardization, e ISTA. Le tre tratte percorse attraversano Ungheria, Slovacchia, Repubblica Ceca, Austria e Germania. Durante il tragitto emerge come le vibrazioni sull'asse verticale risultano maggiori seguite da quelle laterali e longitudinali, e preponderanti nella banda di frequenza di 1-5 Hz. Inoltre forniscono una tabella con la PD (Power Density) per effettuare i test in laboratorio, vedi tabella 2. In figura 3.5.1 è riportato il grafico PSD delle vibrazioni sull'asse verticale del vagone. In tabella 3 vengono riportati i confronti fra il valore di  $G_{rms}$  raccomandato dagli autori e i profili dettate dalle norme.

Rail	
Frequency (Hz)	PD level $G^2/Hz$
0.5	0.00005
1	0.00009
1.5	0.00060
3	0.00140
4.5	0.00060
7	0.00002
30	0.00002
60	0.00005
200	0.00003

Tabella 2. PD per test in laboratorio

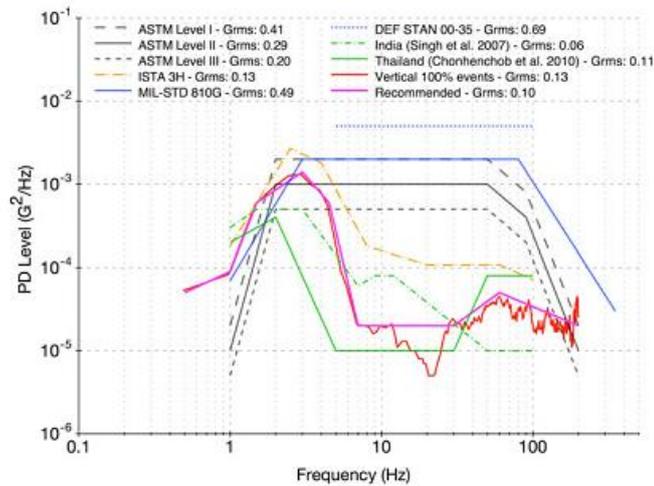


Figura 3.5.2 PSD per vibrazioni sull'asse verticale

	1-10 Hz	10-100 Hz	1-100 Hz
ISTA 3H	0.088	0.040	0.130
ASTM Level II	0.091	0.262	0.277
DEF STAN 00-35	0.158*	0.671	0.689*
MIL-STD 810G	0.121	0.423	0.441
India (SP Sing et al.)	0.043	0.041	0.060
Thailand (Chonchenchob et al.)	0.024	0.070	0.074
Vertical PSD of 100% events	0.062	0.049	0.084
<b>Recommended spectrum</b>	<b>0.059</b>	<b>0.057</b>	<b>0.082</b>

\*The lower limit of DEF STAN 00-35 is 5 Hz.

Tabella 3 confronto livelli di  $G_{rms}$  in differenti finestre di frequenza

### 3.6 Rilevazioni sollecitazioni su aereo cargo

Per la spedizione di merci, numerose compagnie di spedizione si avvalgono anche delle linee aeree per inviare i propri pacchi. Per tali motivi anche il vettore aereo fa parte della catena logistica di distribuzione. Ed ecco perché alcuni ricercatori hanno svolto esperimenti per valutare le sollecitazioni trasmesse al carico durante la spedizione, il tutto sempre volto alla caratterizzazione dei disturbi ambientali per ottimizzare il packaging dei prodotti.

In tal senso Singh e altri [22], analizzano le sollecitazioni ricevute da cinque pacchi di piccole dimensioni in modo da definire le caratteristiche dei test di caduta. Emerge come nonostante le opportune indicazioni sulla scatola, che impongono di maneggiarla con cura, le cadute che avvengono al di sopra dei 70mm sono pari a 15-25 volte per la faccia piana della scatola e in numero inferiore per bordi e spigoli. Vengono scartati le cadute da una altezza inferiore poiché i danneggiamenti sarebbero minimi. In figura 3.6.1 vengono riportate il numero di cadute per i differenti pacchi, il "label" rappresenta la presenza dell'etichetta "fragile", si nota come non sia proprio rispettata.

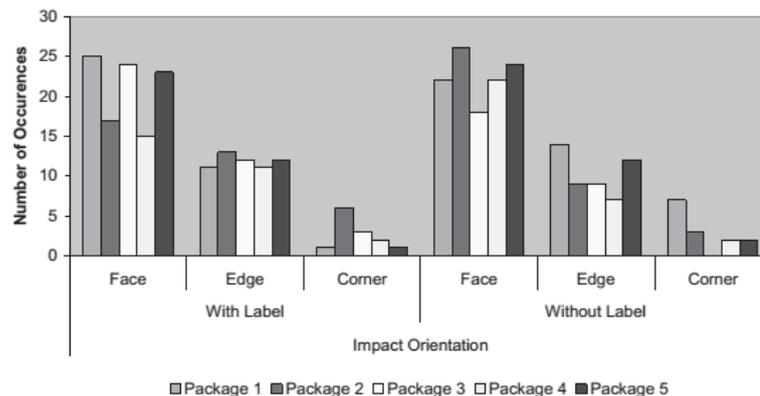


Figura 3.6.1 numero di eventi registrati lungo le parti del pacco

### 3.7 Effetto delle sollecitazioni sui prodotti

Senza perdere d'occhio il danneggiamento prodotto, e quindi cercando di focalizzarsi sui prodotti più sensibili alle sollecitazioni e urti cioè gli alimentari, in particolare la frutta, Jarimpos e altri [13], hanno vagliato la correlazione tra la tipologia di camion, le condizioni stradali, la velocità con il danneggiamento della frutta. I risultati dimostrano come il livello di vibrazione cresce con l'aumentare della velocità anche in base alle condizioni stradali. Tali risultati derivano dalla analisi della varianza. Le tipologie di strade vagliate da [13], sono l'autostrada, le strade urbane e le vie non asfaltate. Per quanto riguarda il danneggiamento della frutta, si osserva come per tutte e tre le tipologie di strade, il prodotto che presenta il maggiore tasso di deterioramento è quello disposto nell'ultimo strato in alto. Questo per i motivi spiegati precedentemente.

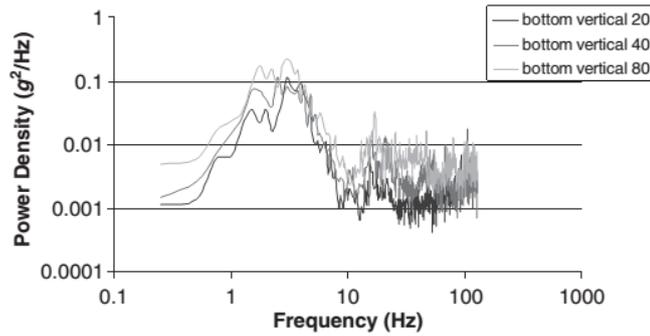


Figura 3.7.1 PSD verticale per 20,40,80 [km/h] su strada urbana

In figura 3.7.1 è dimostrato come aumentino i livelli di vibrazione all'aumentare della velocità. In tabella 1 vengono riportate le PD rilevate su strada urbana al variare della velocità.

**Table 1. Root mean square values of PD values of the truck bed and RPCs containing tangerine fruits carried by the 2- and 6-ton trucks during transit at various control conditions (values of the 6-ton are shown *italics*) ( $g^2/Hz$ )**

		Frequency range								
		0.1–5 Hz			5–20 Hz			20–127.75 Hz		
		Velocity (km/h)								
		20	40	80	20	40	80	20	40	80
Asphalt	TV*	0.0114	0.0118	0.0276	0.0005	0.0015	0.0049	0	0	0.0002
		<i>0.0505</i>	<i>0.055</i>	<i>0.0909</i>	<i>0.0076</i>	<i>0.0112</i>	<i>0.0138</i>	<i>0.0001</i>	<i>0.0002</i>	<i>0.0004</i>
	TH	0.0015	0.0024	0.0054	0.0005	0.0038	0.005	0	0	0
		<i>0.0107</i>	<i>0.007</i>	<i>0.0167</i>	<i>0.0054</i>	<i>0.0045</i>	<i>0.0073</i>	<i>0.001</i>	<i>0.0008</i>	<i>0.0004</i>
	BV	0.0071	0.0107	0.0259	0.0001	0.0005	0.0027	0.0002	0.0002	0.0031
		<i>0.0453</i>	<i>0.0494</i>	<i>0.0833</i>	<i>0.0031</i>	<i>0.0055</i>	<i>0.0096</i>	<i>0.0021</i>	<i>0.0027</i>	<i>0.005</i>
	FV	0.0081	0.0098	0.0444	0.0008	0.0011	0.0233	0.0011	0.0012	0.0202
		<i>0.0452</i>	<i>0.0471</i>	<i>0.0823</i>	<i>0.005</i>	<i>0.009</i>	<i>0.016</i>	<i>0.0075</i>	<i>0.0067</i>	<i>0.0152</i>

Tabella 1. TV Top Vertical acceleration, TH Top Horizontal acceleration, BV Bottom Vertical acceleration, FV Floor Vertical acceleration

Infine, gli stessi autori, raccomandano dei livelli di PSD rappresentanti le vibrazioni caratteristiche per un trasporto su camion in Thailandia, vedi figura 3.7.2.

**Table 5. Recommended composite power density spectrum for truck transport in Thailand**

Frequency (Hz)	Power density ( $g^2/Hz$ )
1	0.020
2	0.400
3	0.400
10	0.010
12	0.020
20	0.020
30	0.010
70	0.010
100	0.006

Figura 3.7.2 PSD per trasporto su camion in Thailandia

Rimanendo nel settore del danneggiamento degli alimenti dovuto alla trasmissione delle sollecitazioni meccaniche da parte del rimorchio, Barchi e altri [23] hanno vagliato le

vibrazioni trasmesse da un camion moderno, dotato di rimorchio equipaggiato con sospensioni ad aria, caricato con prodotti alimentari (nespole), in viaggio dalla Spagna sino all' Italia. Lo spettro delle vibrazioni rilevate, è stato poi riprodotto in laboratorio, su apposita tavola vibrante. Ancora una volta si conferma come le sollecitazioni registrate dipendano fortemente dalla posizione lungo il pianale e, come le stesse oscillazioni siano minori alla base del prodotto pallettizzato rispetto alla parte superiore, soprattutto nel range di frequenza pari a 13-25Hz. In figura 3.7.3 viene riportata la PSD per autostrada spagnola e francese. In figura 3.7.4 viene riportato invece il valore del RMS registrato lungo l'altezza del carico.

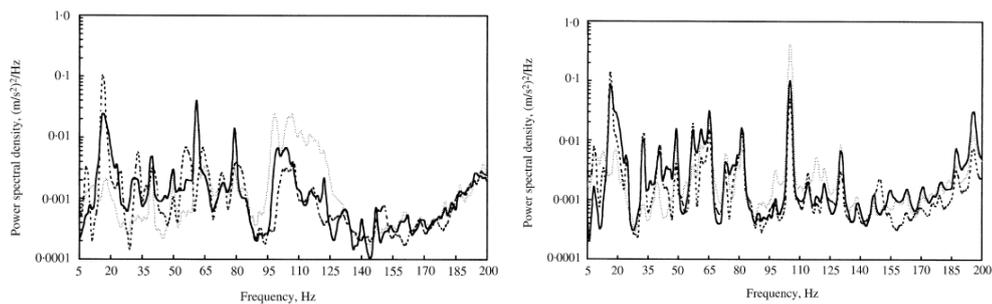


Figura 3.7.3 PSD per trasporto su camion in Francia (sx) e Spagna (dx)

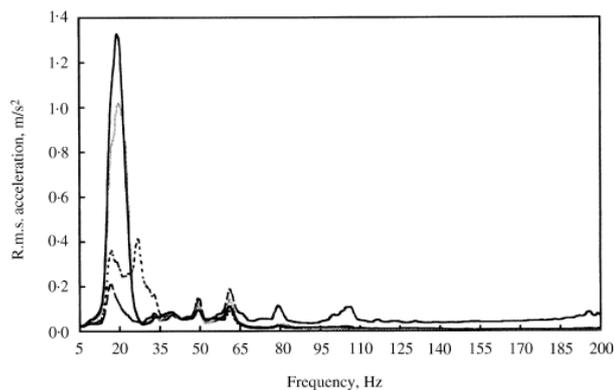


Figura 3.7.4 PSD picchi di accelerazione —TOP, --- bottom, . . . middle

Inoltre in figura 3.7.5, viene raffigurata a sinistra il prodotto sottoposto a test in laboratorio e a destra il valore dell'accelerazione (rms) registrato lungo il tragitto. L'accelerazione cui è sottoposto lo strato superiore è circa 11 volte quello registrato nella parte inferiore. L'accelerazione è amplificata dal asso verso l'alto, con un picco di risonanza a 9Hz.

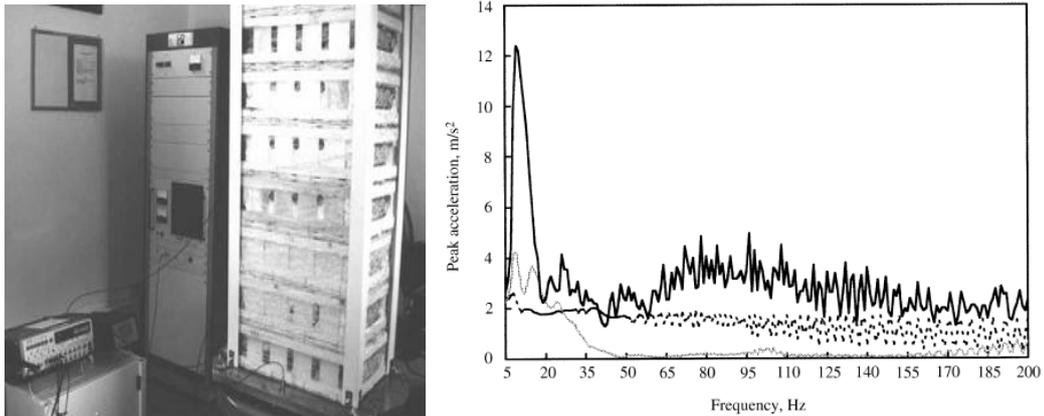


Figura 3.7.5 PSD picchi di accelerazione —TOP, --- bottom, '...' middle

Emerge come l'altezza della colonna dei prodotti sia un fattore rilevante riguardo la stabilità. Il carico infatti ha un comportamento assimilabile ad una trave incastrata con un estremo libero, tale estremo ha quindi la possibilità di oscillare un po' come vuole, non avendo sopra di esso una forza vincolante (a meno di reggette).

Come emerge sin qui, la problematica dei prodotti pallettizzati e quindi della disposizione in verticale dei prodotti, può portare a problemi circa il danneggiamento dei prodotti presenti negli ultimi strati. Tale tematica è affrontata da Rouillard [24], simulando una serie di prodotti impilati, sottoposti a test su tavola vibrante utilizzando la sola componente vibratoria verticale (è quella che risulta essere più grande). Qui gli autori sviluppano un modello previsionale per la risposta dinamica del sistema e lo validano utilizzando un modello fisico. All'interno della simulazione è inoltre presente un modello per la forza di attrito. Il modello è rappresentato da un sistema a più gradi di libertà (6dof), vedi figura 3.7.6.

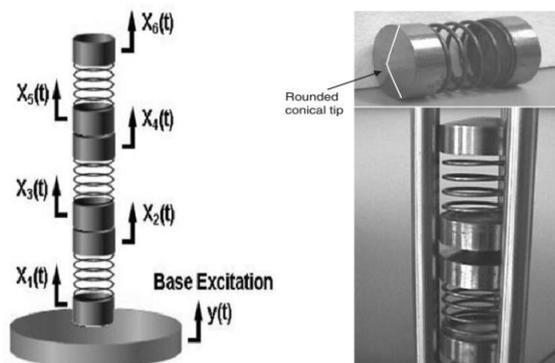


Figura 3.7.6 modello sistema

Il fattore d'attrito risulta fondamentale per ottenere un modello matematico ancora più affidabile, in grado quindi non solo di rilevare le frequenze di risonanza ma anche l'ampiezza di risonanza.

La formula dell'attrito è la seguente:

$$F_f = \mu F_n \text{sign}(x)$$

dove  $F_f$  è la forza di attrito,  $\mu$  è il coefficiente di attrito,  $F_n$  è la forza di contatto normale al piano di scorrimento (acciaio su acciaio),  $sign(x)$  rappresenta il verso dello spostamento.

In figura 3.7.7 è rappresentato un confronto fra modello semplice e modello con attrito.

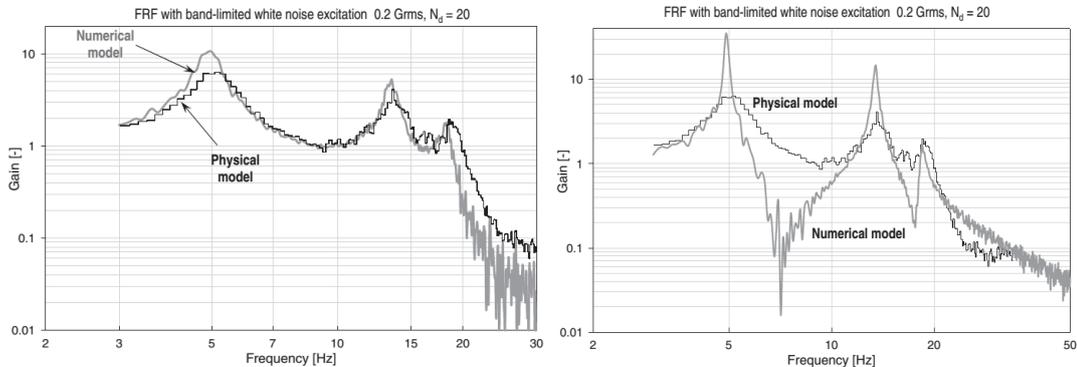


Figura 3.7.7 FRF modello con attrito (sx) e senza attrito (dx)

Ulteriori simulazioni circa i prodotti pallettizzati e quindi che hanno disposizione verticale, sono state effettuate da [25]. Qui viene studiata l'influenza dei vincoli, delle vibrazioni dettate dalla forzante, e della non linearità del contatto fra i tre strati del modello. La struttura che deve simulare il comportamento dei prodotti disposti in verticale, è soggetta ad oscillazioni, su opportuna tavola vibrante, dettate da una forzante di tipo sinusoidale. Lo schema del modello è rappresentato in figura 3.7.8.

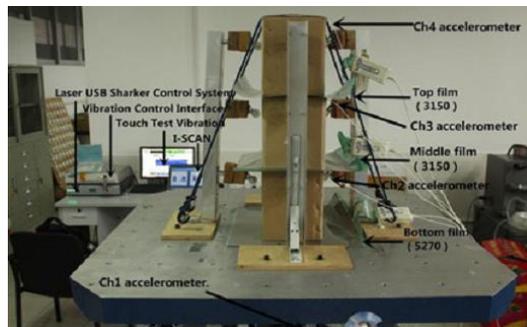


Figura 3.7.8 modello su tavola vibrante, vincolato con funi

Le funi fungono da vincolo, tale parametro è impostato su tre livelli: vincolo con forza nulla, vincolo con forza 78.4N, vincolo con 156.8N. l'effetto dei vincoli è rappresentato in tabella 1.

		First resonance		Second resonance		Third resonance	
		Frequency (Hz)	Acceleration (g, $m/s^2$ )	Frequency (Hz)	Acceleration (g, $m/s^2$ )	Frequency (Hz)	Acceleration (g, $m/s^2$ )
No fixed	Top	10.83	1.51	32.90	1.14	52.70	0.36
	Middle	10.76	0.97	32.92	1.87	59.19	0.99
	Bottom	10.04	0.61	32.44	1.04	59.98	2.26
Fixed with 78.4 N	Top	12.10	2.29	37.50	1.00	55.15	0.30
	Middle	12.10	1.50	38.30	1.49	60.77	0.87
	Bottom	11.94	0.69	37.26	1.06	61.30	2.18
Fixed with 156.8 N	Top	12.80	2.52	41.50	1.14	63.80	0.21
	Middle	12.70	1.75	41.40	1.63	63.8	0.86
	Bottom	12.60	0.79	40.00	1.15	64.25	1.95

Tabella 1 g in funzione del vincolo.

Si nota come per la prima pulsazione di risonanza si ha un incremento del valore dell'accelerazione all'aumentare della forza vincolante. Inoltre si nota anche come all'avvicinarsi ad altre frequenze di risonanza, i vari settori (top, middel, bottom) vedono cambiare l'ampiezza delle oscillazioni.

La forza che viene registrata fra gli strati, non è uniforme, specialmente se si impongono leggi di moto con pulsanti tali da indurre delle oscillazioni del modello sufficientemente ampie, in modo da comportare un distacco fra gli strati.

### 3.8 Test effettuati in laboratorio

Avendo un database di segnali rilevati sperimentalmente, è possibile riprodurre le sollecitazioni in laboratorio tramite l'utilizzo di appositi banchi prova. Tipicamente, vengono utilizzate delle tavole vibranti. Le tavole tipicamente riscontrate in letteratura sono a 6 GdL, per riprodurre in maniera fedele le oscillazioni rilevate sul campo. Tuttavia, essendo noto come le vibrazioni maggiori trasmesse dai mezzi di trasporto sono quelle verticali, molti laboratori di ricerca utilizzano una tavola vibrante la quale trasmette solo la componente verticale. Tale scelta trova fondamento anche per il fatto che le norme descrivono le procedure per tavola vibrante con moto verticale. Quindi per rispettare almeno la norma, si sceglie di utilizzare questo tipo di macchina, anche perché i costi di un piano vibrante ad un solo GdL, sono inferiori rispetto ad uno dotato di 6 GdL. Tuttavia, nel caso sola sollecitazioni verticale, si andrebbe a testare la resistenza del bene a sollecitazioni di compressione più che la resistenza dell'imballo.

Proprio a proposito della macchina a piano vibrante, in [27] viene spiegato il perché si ha la necessità di riprodurre in fase di test, tutte le componenti vibratorie rilevate sui mezzi di trasporto. In particolare vengono misurate le oscillazioni lungo i tre assi e le rotazioni lungo i tre assi, rollio beccheggio e imbardata. La disposizione dei sensori e le formule per ricavare le componenti lungo gli assi cartesiani sono rappresentati in figura 3.8.1.

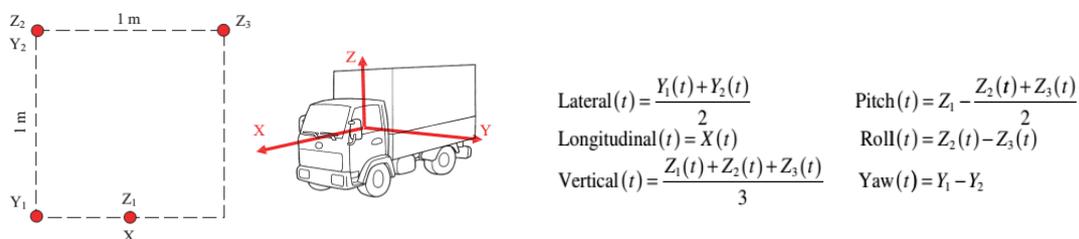


Figura 3.8.1 disposizione sensori nel camion e formule

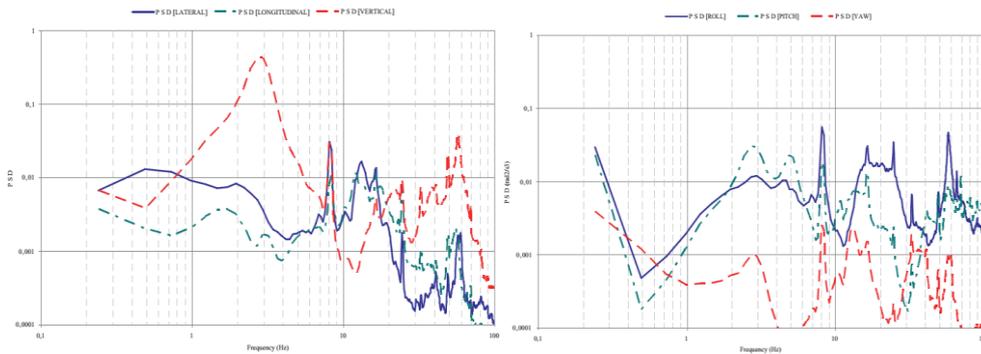


Figura 3.8.2 PSD degli spostamenti lungo gli assi (sx) e rotazioni intorno agli assi (dx)

In figura 3.8.2 invece vengono riportati i livelli della PSD rilevata lungo il tragitto percorso dal camion. Si nota come la componente vibratoria verticale sia predominante alle basse frequenze (< 10Hz) e come nella banda 8-20Hz emerga la componente laterale. Per quanto riguarda la rotazione intorno agli assi, si nota come il beccheggio sia più elevato del rollio nella banda 2-6Hz, ma come il rollio sia presente a livelli maggiori in alta frequenza.

Tali componenti vibrazionali, ancora una volta dipendono strettamente dal manto stradale e dal tipo di camion.

Sempre su tavola vibrante a 6 gradi di libertà, in [28] si sono analizzati i modi di vibrare di un prodotto pallettizzato partendo dall'analisi modale del singolo prodotto. Ogni grado di libertà è stato eccitato separatamente, per separare facilmente i modi di vibrare, la legge di moto in questo caso era di tipo random. Per registrare la risposta sono stati disposti accelerometri sia sul piano vibrante a ridosso del prodotto che nel prodotto stesso. Sono stati analizzati i modi di vibrare del prodotto ed in particolare si è misurato il comportamento del prodotto pallettizzato con l'applicazione di reggette. Si nota come l'ausilio di reggette contenitive porti ad incrementare la frequenza delle pulsazioni naturali, vedi tabella 2.

Effect of strapping		
Mode	Frequency base	Frequency strapped
Y-Bending	7.6 Hz	10.1 Hz
X-Bending	8.4 Hz	10.8 Hz
Z-Compression	9.6 Hz	-
Z-Torsion	39.5 Hz	39.4 Hz
Y-Bending 2°	39.6 Hz	53.8 Hz
X-Bending 2°	45.4 Hz	55.9 Hz

Tabella 2 effetto dell'elemento contenitivo sulle frequenze naturale

In figura 3.8.3 vengono riportati i risultati dei primi quattro modi di vibrare del prodotto impilato (solo 5 casse) esente da reggetta.

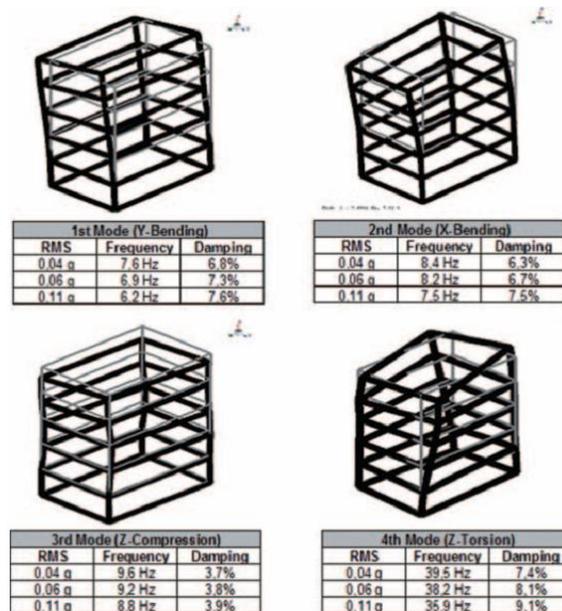


Figura 3.8.3 modi di vibrare

Si può concludere che la risposta del sistema dipende dal tipo di prodotto e dalla sua rigidità. La rigidità oltre che essere una caratteristica intrinseca del bene, dipende anche dal tipo di imballo, si nota come la semplice reggetta influisce sulle frequenze proprie. Quindi il materiale contenitivo ha un peso significativo sulla stabilità del prodotto pallettizzato.

Lo studio della rigidità del carico e quindi della sua risposta alle sollecitazioni esterne, sono stati oggetto di numerosi studi, volti a caratterizzare modelli matematici per prevedere il tipo di risposta del prodotto pallettizzato e quindi creare un packaging ottimale per contenere al meglio il prodotto.

Tale ricerca ha trovato il suo significato nella ricerca della risposta dinamica del sistema vettore-prodotto, non sempre facile da identificare e modellare, visto che il sistema è molto complesso.

In tal senso Wang e altri [29], hanno modellato inizialmente il sistema comprensivo del camion, del prodotto e dei sistemi di fissaggio come un semplice modello composto da due macro componenti connessi tra loro ciascuno di essi rappresentato da un sistema a due gradi di libertà. L'equazione che governa il sistema è la seguente:

$$[M_S]\{\ddot{X}_S\} + [C_S]\{\dot{X}_S\} + [K_S]\{X_S\} = \{F_S\} \quad (9)$$

Chiaramente verrà sviluppata per entrambi i sistemi e per l'interazione fra i due micro sistemi.

Ne risulta una formulazione della FRF (Funzione di Risposta in Frequenza), quindi per andare ad analizzare la risposta del sistema dato un certo input, si sono inseriti dei valori di prova per andare a validare il modello matematico quindi è stato effettuato un confronto con dei dati noti. Si nota come il modello approssimi bene i risultati ottenuti. A

questo punto è stato creato un modello reale basato sul sistema matematico, vedi figura 3.8.4.

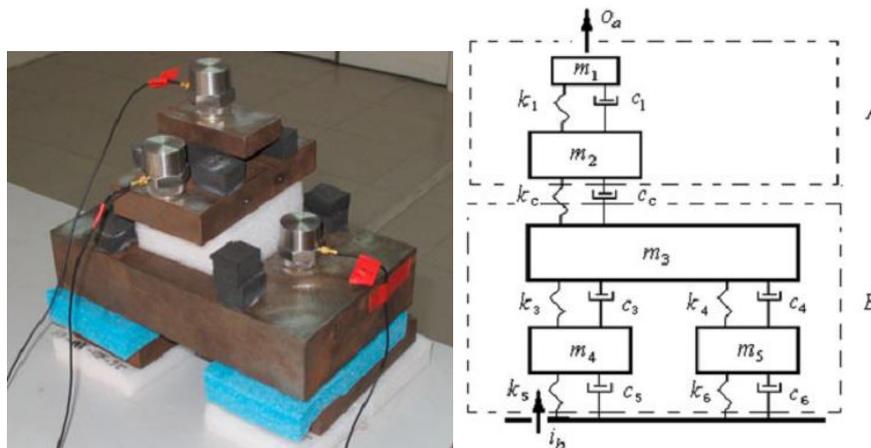


Figura 3.8.4 prototipo modello (sx) e modello matematico (dx)

L'eccitazione del sistema meccanico è stata fornita da un semplice martelletto strumentato e, gli accelerometri andarono ad eseguire la rilevazione della risposta. Ne risulta che il modello matematico riesce ad approssimare bene anche il modello reale, vedi figura 3.8.5.

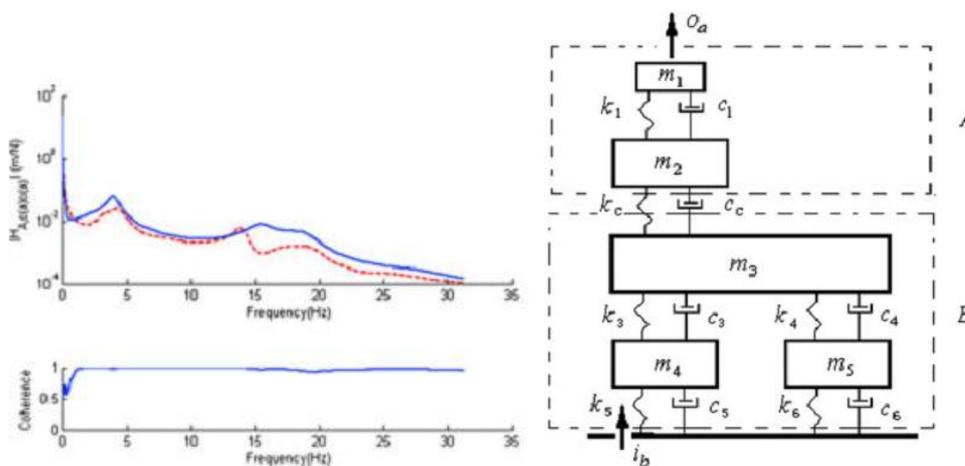
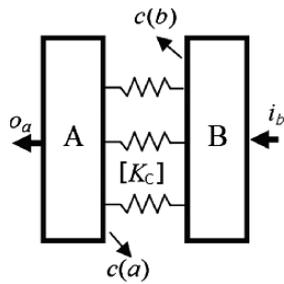


Figura 3.8.6 FRF del sistema A (risposta di ca dovuto alla forzante ca)

Emerge quindi come tale modellazione sia valida per la simulazione dell'interazione che avviene fra il mezzo di trasporto, e il carico trasportato. In questo caso si sono analizzati anche gli effetti dello smorzamento e, della rigidità del sistema.

Gli stessi autori del precedente, ancora una volta hanno sviluppato il modello matematico basato sulla FRF nell'ottica di poter modellare il sistema mezzo di trasporto – carico, e poter prevedere la risposta dinamica del sistema [30].

Il modello matematico ancora una volta si è basato su un macro sistema a due gradi di libertà come mostrato in figura 3.8.7.



$$\{X_A\} = [H_A]\{F_A\} \quad \text{risposta del sottosistema A}$$

$$\{X_B\} = [H_B]\{F_B\} \quad \text{risposta del sottosistema B}$$

$$\{X_S\} = [H_S]\{F_S\} \quad \text{risposta del sistema accoppiato S}$$

Figura 3.8.7 sistema a 2 Gdl

Le matrici  $H_x$  sono le FRF del sistema relativo. Il macrosistema A rappresenta il carico, mentre il macrosistema B rappresenta il veicolo. A sua volta i macrosistemi sono stati scomposti in sistemi a 2 GdL, e quindi è stato creato un modello reale per la effettuare la validazione del modello matematico. In figura 3.8.8 è rappresentato lo schema della struttura del modello fisico e il modello fisico stesso.

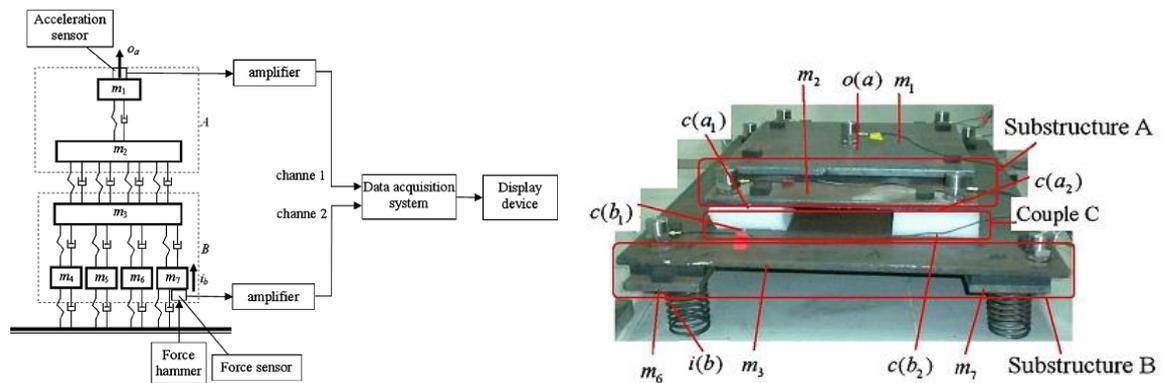


Figura 3.8.8 schema modello fisico (sx) e modello reale (dx)

In questo caso, l'accoppiamento tra il sistema A e il sistema B, è simulato da uno strato di poliesteri espanso. Emerge come il modello matematico riesca ad approssimare i risultati provenienti dal modello fisico. In figura 3.8.9 sono rappresentate alcune delle FRF del sistema. Le discrepanze fra i valori previsti e quelli misurati possono essere dovuti ad errori numerici dovuti in particolare all'inversione delle matrici durante il calcolo, ad errori dovuti ad una eccitazione asimmetrica del sistema, la quale può generare un leggero moto di rotazione del sistema.

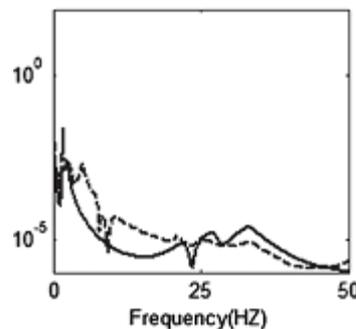


Figura 3.8.9 FRF del sistema A relative alle coordinate del sistema accoppiato

Per andare a testare il modello matematico basato sulle FRF, gli autori di [31], hanno creato un modello fisico quanto più vicino possibile al caso reale.

In questo caso si è andata a vagliare la risposta data da un sistema fisico rappresentato da un mezzo di tipo pick-up e come carico un semplice frigorifero, vedi figura 3.8.10.

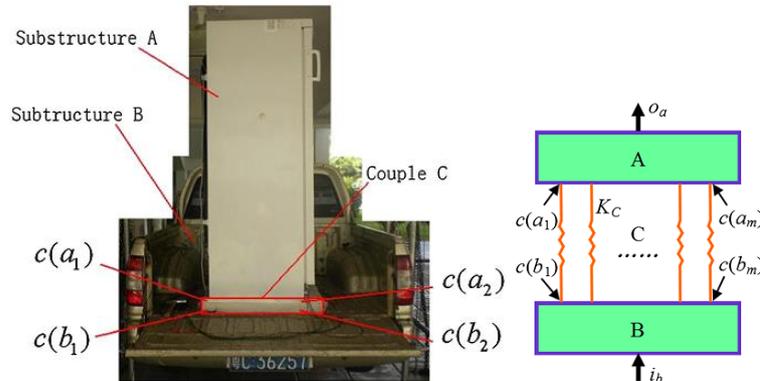


Figura 3.8.10 sistema reale e schema

Inoltre è stato utilizzato un sistema di bracci dotati di molle per poter sollevare il retro treno del furgone ed eccitarlo, vedi figura 3.8.11.

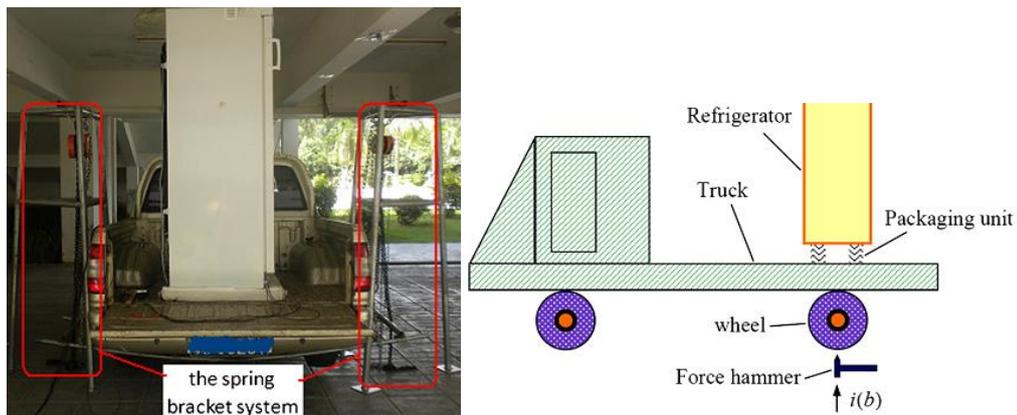


Figura 3.8.11 sistema a bracci e schema modello fisico

Si nota come ancora una volta, il modello matematico approssimi bene il sistema reale. Per quantificare la differenza fra il dato previsto e quello misurato, viene chiamata in causa la *funzione coerenza*, la quale si basa su degli stimatori della FRF, tali stimatori sono due e agiscono sugli effetti del disturbo all'uscita del sistema e all'ingresso. Quindi per giudicare l'attendibilità della misura viene utilizzata la funzione coerenza la quale in sostanza, indica quanto la risposta è coerente con l'eccitazione. Il valore di questa funzione è compresa tra 0 e 1 estremi compresi. Se il valore è minore uguale a 0.75 allora il risultato è poco attendibile. Possono quindi essere presenti non linearità oppure sono presenti altre eccitazioni che non vengono misurate. In questo caso, l'errore può essere dovuto ad errori numerici nati dalla manipolazione delle matrici.

In figura 3.8.12, viene riportato il risultato della FRF di parte de sistema con la rispettiva funzione coerenza.

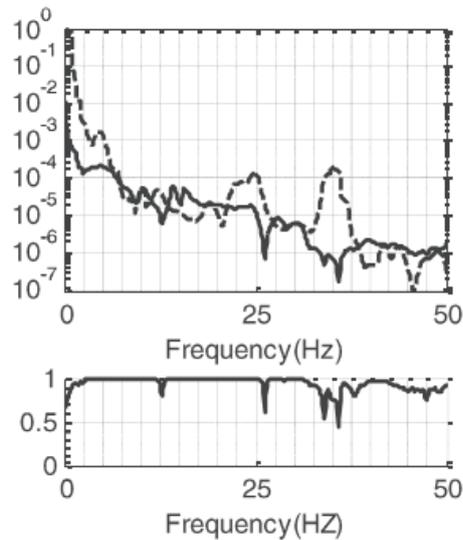


Figura 3.8.12 FRF del sottosistema A (sopra) e funzione coerenza (sotto), --- previsto, — misurato

Ad oggi non sono stati effettuati grandi studi sul comportamento del film per diversi cicli di fasciatura. Ossia non si è andati ad indagare l'effetto del particolare ciclo di fasciatura sul contenimento del carico.

In tale senso, un recente studio svolto da Singh e altri [33], ha portato in evidenza l'effetto del contenimento del carico da parte del film estensibile su di un prodotto pallettizzato. In particolare, viene descritto come al variare del prestiro del film, vari la forza di contenimento.

Naturalmente, la forza di contenimento e quindi, la capacità di non permetter al carico di danneggiarsi o far sì di non avere degli spostamenti delle parti del carico che possono compromettere la sicurezza dello stesso, dipende anche dal tipo di carico pallettizzato, vedi figura 3.8.13.

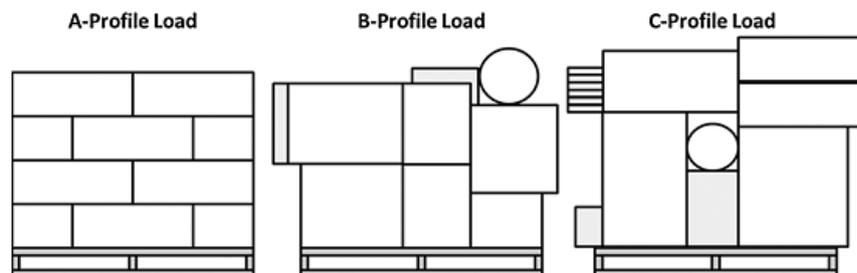


Figura 3.8.13 profili di carico pallettizzato

Per valutare quindi la relazione tra il livello di prestiro del film e, la forza di contenimento e il contenimento del carico, sono state effettuate delle prove secondo la procedura ISTA 3E [34]. Il tipo di carico in questione è un pallet con configurazione di tipo profilo A, con elementi cartonati sul quale sono state disposte delle celle di carico per la misura della

forza di contenimento secondo la norma ASTM D4649 – 03 [35] vedi figura 3.8.14. In particolare, il kit per la misura della forza di contenimento del film è reso disponibile dalla stessa azienda che ha promosso l'esperimento, *Highlight Industries*.

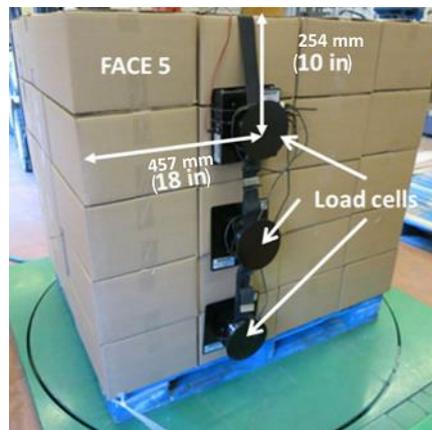


Figura 3.8.14 disposizione celle di carico

La serie di test secondo ISTA 3B, è rappresentata in tabella 3

Sequence no.	Test category	Test type	Test level
1	Atmospheric conditioning	Temperature and humidity	Ambient
2	Shock	Incline impact (Conbur)	106 cm/s
3	Shock	Rotational edge drop	8 in.
4	Compression	Machine apply and release	Calculated test force $\times$ 1.4
5	Vibration	Random	Overall Grms level of 0.54
6	Shock	Rotational edge drop	203 mm

Grms, root-mean-square acceleration.

Tabella 3. Test ISTA 3B

Il ciclo di fasciatura è di tipo basso verso l'alto, con più giri nella parte bassa e alta.

Per quanto riguarda l'analisi statistica, gli autori si sono basati sull'analisi statistica basata su ANOVA ad un fattore. In particolare, l'anova è servita per comprendere:

- effetto del pre-stiro sulla forza di contenimento iniziale del film;

Y = forza di contenimento;

X = livello di prestiro;

p-value :  $<0.05$  rigetto dell'ipotesi nulla  $H_0$ .

$H_0$  : la forza di contenimento non è correlata al livello di prestiro

$H_1$  : la forza di contenimento è correlata al livello di prestiro

- effetto del prestiro sulla forza di contenimento durante la movimentazione

Y = variazione forza di contenimento;

X = livello di prestiro;

p-value :  $<0.05$  rigetto dell'ipotesi nulla  $H_0$ .

$H_0$  : la forza di contenimento durante la movimentazione non è correlata al livello di prestiro

$H_1$  : la forza di contenimento durante la movimentazione è correlata al livello di prestiro

- quantificazione della forza di contenimento con il metodo del piattello

Y = forza di contenimento registrata dal piattello;

X = livello di prestiro;

p-value :  $<0.05$  rigetto dell'ipotesi nulla  $H_0$ .

$H_0$  : la forza di contenimento misurata dal piattello non è correlata al livello di prestiro

$H_1$  : la forza di contenimento misurata dal piattello è correlata al livello di prestiro

**Nota:** questo metodo non è utilizzabile dopo l'avvolgimento o durante il trasporto poiché è un metodo di tipo distruttivo.

- Relazione fra livello di prestiro, dispersione del carico e perimetro

Y = dispersione del carico;

X = livello di prestiro;

p-value :  $<0.05$  rigetto dell'ipotesi nulla  $H_0$ .

$H_0$  : la dispersione del carico non è correlata al livello di prestiro

$H_1$  : la dispersione del carico è correlata al livello di prestiro

I risultati di questo lavoro sono esposti di seguito.

### *Effetto del prestiro sulla forza di contenimento iniziale del film*

La forza di contenimento iniziale è la forza che il film esercita sul prodotto dopo essere stato avvolto su di esso e prima dell'esecuzione dei test. In figura 3.8.15 è riportato l'andamento della forza iniziale lungo l'altezza del carico

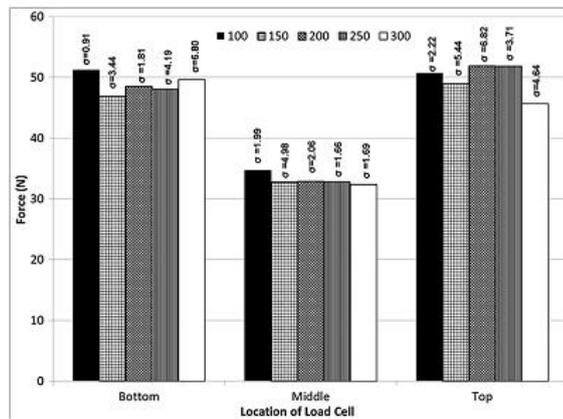


Figura 3.8.15 forza di contenimento iniziale

L'ipotesi di partenza si basa sul fatto che aumentando il livello di prestiro, aumenti anche la forza di contenimento. Invece i riscontri sperimentali mostrano il contrario, ossia non si osserva un incremento. Si specifica che la forza di contenimento è minore al centro del carico dato che il ciclo di fasciatura prevede un solo giro di film intorno al prodotto in quel punto.

### *Effetto del prestiro sulla forza di contenimento durante la movimentazione*

Durante la movimentazione, il carico è soggetto a varie sollecitazioni, in particolare durante gli spostamenti all'interno delle zone di smistamento (vedi magazzini). Il mezzo più utilizzato, in questo caso è il carrello elevatore. Per simulare le condizioni di trasporto, sono stati eseguiti vari test, secondo la tabella 3. Le celle di carico sono state impostate per registrare in continuo. Un esempio dell'andamento della forza, registrata durante la prova è riportato in figura 3.8.16. In tabella 4 invece è riportato l'andamento della variazione percentuale della forza di contenimento lungo l'altezza del pallet e al variare del livello di prestiro.

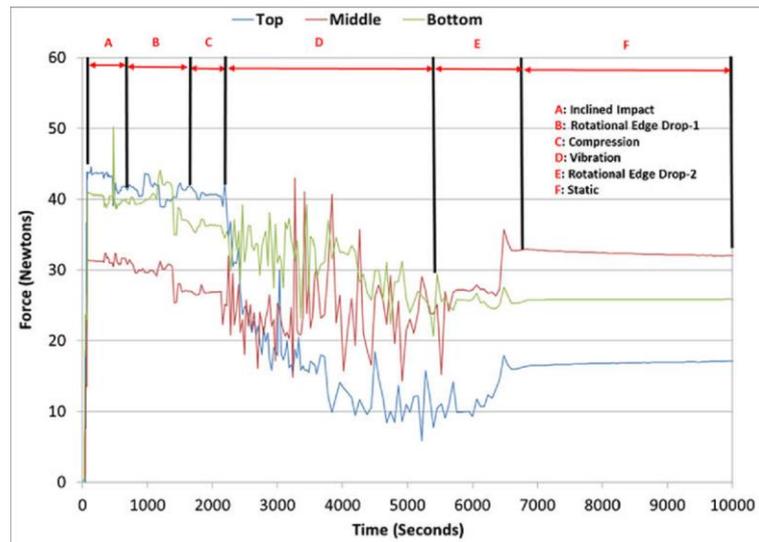


Figura 3.8.16 variazione forza di contenimento durante il test

Sequence	Test type		Top	Middle	Bottom
1	Incline impact	100	-8.1 ± 0.6	-0.6 ± 2.5	-3.0 ± 1.9
		150	-2.7 ± 1.8	-5.9 ± 2.4	-5.9 ± 7.8
		200	-9.1 ± 4.4	-8.3 ± 0.7	-5.9 ± 4.8
		250	-6.3 ± 6.1	-8.1 ± 4.5	-6.8 ± 1.9
		300	-6.9 ± 2.5	-6.3 ± 1.8	-3.0 ± 4.0
2	Rotational edge drop	100	3.7 ± 5.7	-11.9 ± 3.1	-8.9 ± 4.1
		150	-1.3 ± 3.7	-9.2 ± 6.6	-7.4 ± 9.3
		200	3.0 ± 1.9	-4.9 ± 6.8	-10.9 ± 2.4
3	Compression	250	4.6 ± 8.8	-4.6 ± 2.2	-8.0 ± 6.1
		300	-3.1 ± 2.0	-12.6 ± 6.0	-12.2 ± 2.7
		100	-4.4 ± 1.9	0.8 ± 0.5	0.6 ± 0.7
4	Vibration	150	-3.3 ± 0.2	-0.5 ± 0.9	-2.0 ± 0.3
		200	-7.0 ± 2.4	-1.9 ± 1.7	-1.5 ± 0.8
		250	-4.4 ± 3.7	-0.3 ± 1.0	-0.3 ± 2.8
5	Rotational edge drop	300	-2.0 ± 2.0	-0.5 ± 1.5	-1.8 ± 1.0
		100	-63.1 ± 8.1	-2.8 ± 8.2	-15.0 ± 7.1
		150	-46.4 ± 24	0.6 ± 38	-15.9 ± 1.3
6	1 h static	200	-75.8 ± 13	-24.5 ± 36	-6.7 ± 1.6
		250	-58.5 ± 20	-32.1 ± 19	-20.7 ± 12.1
		300	-60.3 ± 33.9	-14.7 ± 13.7	-16.8 ± 11.1
7	1 h static	100	25.9 ± 10.2	0.3 ± 4.1	-3.4 ± 5.4
		150	13.8 ± 0.3	0.0 ± 17.2	-8.2 ± 0.1
		200	124 ± 135	38.5 ± 56	-0.4 ± 5.1
8	1 h static	250	35.0 ± 7.4	22.2 ± 13	10.2 ± 9.7
		300	57.4 ± 40	25.3 ± 11	8.3 ± 10.5
		100	1.9 ± 3.1	-1.3 ± 0.5	-0.8 ± 0.8
9	1 h static	150	2.2 ± 0.4	-1.9 ± 1.8	0.8 ± 0.7
		200	4.4 ± 1.5	-1.9 ± 0.9	-1.0 ± 2.1
		250	2.4 ± 1.4	-4.8 ± 1.0	-3.0 ± 0.2
300	4.0 ± 3.8	-3.5 ± 1.1	-1.8 ± 3.4		

Tabella 4 variazione percentuale della forza di contenimento al variare del livello di prestiro

L'ipotesi iniziale era che il film esercitasse una forza di contenimento minore al susseguirsi delle prove. L'obiettivo è di determinare il livello di prestiro ottimale al fine di ottenere la variazione minima della forza di contenimento.

Si osserva come generalmente, la forza diminuisca lungo gli strati, tuttavia si osserva un incremento per la parte media e alta del carico alla sequenza 5 dove si simula la caduta del carico dovuta al rilascio del bancale da parte del carrello elevatore, vedi figura 3.8.17.

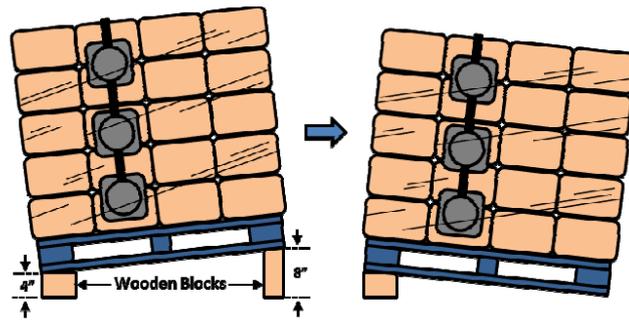


Figura 3.8.17 simulazione rilascio carico da parte del carrello

L'incremento della forza è dovuto all'effetto del tiro che esercita il carico durante la caduta.

Infine, l'analisi statistica mostra che pur notando un certo trend nella variazione della forza di contenimento, tale variazione non è attribuibile al diverso prestiro del film.

#### Quantificazione della forza di contenimento con il metodo del piattello

Per registrare la forza di contenimento finale, è stato utilizzato il metodo del piattello. L'ipotesi di partenza era che applicando un più alto livello di prestiro del film, alla fine dei test si sarebbe dovuto registrare un valore di forza di contenimento più alta. I risultati mostrano che non è definibile un trend, vedi figura 3.8.18.

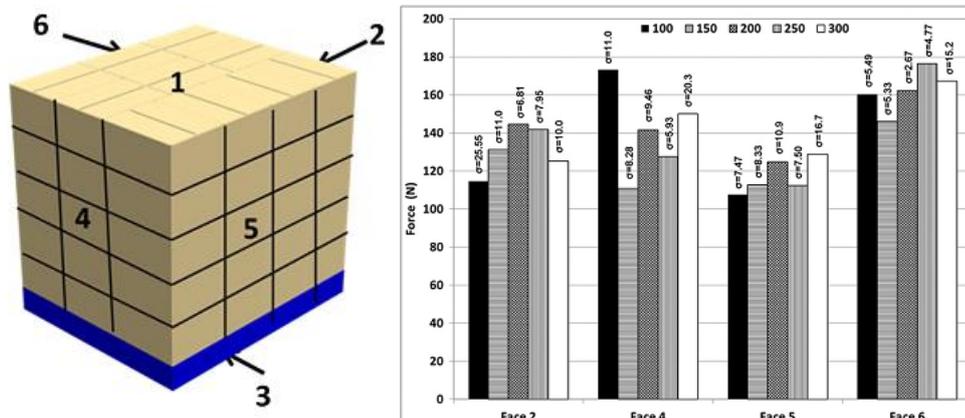


Figura 3.8.18 forza di contenimento lungo le facce

*Relazione fra livello di prestiro, dispersione del carico e perimetro*

La dispersione del carico è stata misurata con due metodi differenti, rilevando gli scostamenti massimi sui livelli del carico o misurando il perimetro. In particolare verranno esposti i valori riguardanti gli scostamenti, vedi figura 3.8.19.

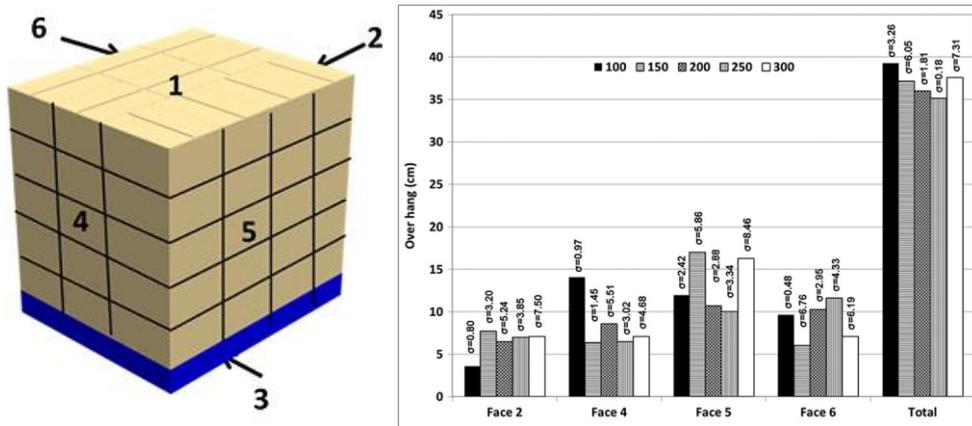


Figura 3.8.19 disallineamento carico sulle facce al variare del prestiro

In conclusione emerge come sia possibile prestirare al massimo possibile il film nell'ottica di un risparmio sullo stesso senza andare a sacrificare la forza di contenimento e il contenimento del prodotto.

## 4 Test per verifica stabilità del carico pallettizzato

Numerosi sono gli enti e le aziende produttrici di macchine per fine linea che effettuano verifiche di stabilità dei carichi pallettizzati. Per quanto riguarda le aziende, l'esecuzione di test per validare la stabilità dei carichi pallettizzati, offre un valore aggiunto alle loro macchine per il confezionamento. Infatti i clienti più esigenti, vogliono garantire che i loro prodotti arrivino al consumatore finale senza i danneggiamenti dovuti alla movimentazione.

In questo campo, Aetna Group S.p.a., offre la possibilità di effettuare test di stabilità per carichi pallettizzati, grazie all'esistenza del loro laboratorio TECHLAB™.

Il TECHLAB™ è un laboratorio di ricerca ed ottimizzazione del ciclo di stabilizzazione dei carichi pallettizzati. La tecnologia dell'avvolgimento deve assicurare la stabilizzazione del prodotto riducendo al minimo l'uso del film avvolgente utilizzato a tale scopo, questo si traduce in un doppio vantaggio, cioè il risparmio di materiale di consumo e un minor impatto ambientale. Queste sono le esigenze del mercato, alle quali risponde il TECHLAB™, creato dalla divisione Robopac Sistemi nel proprio stabilimento di Villa Verucchio (RN).

In questo campo, Robopac Sistemi, è l'unico produttore di macchine per avvolgimento con film estensibile con certificazione europea. A tal proposito fa riferimento alle procedure Eumos [32].

Nel laboratorio TECHLAB™, si effettuano test di stabilità con macchina a piano vibrante e con slitta acceleratrice, per riprodurre le sollecitazioni ambientali, in particolare le sollecitazioni meccaniche a cui è sottoposto il carico pallettizzato durante la sua movimentazione.

### 4.1 Test su slitta acceleratrice



Figura 4.1.1 slitta acceleratrice

## Slitta acceleratrice

### Introduzione

Macchina laboratorio per la verifica dell'efficacia della stabilizzazione dei carichi pallettizzati, costituita da un basamento fisso e da un piano traslante, sul quale posizionare il pallet, la cui legge di moto è configurabile in accelerazione.

La macchina è realizzata ai fini di soddisfare lo standard EUMOS 40509\_2012 (secondo il primo metodo di prova descritto nello stesso).

### 1. Descrizione della macchina

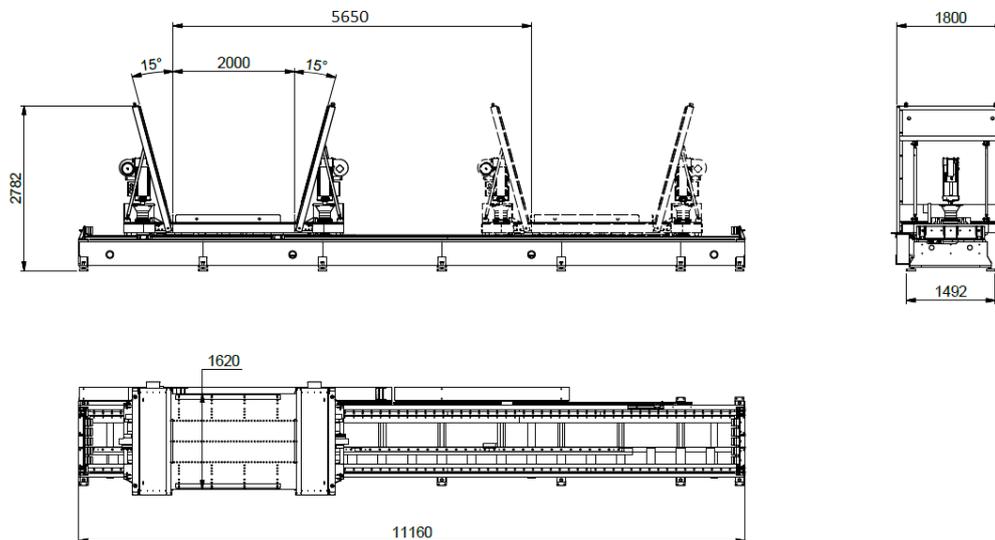


Figura 4.1.2 ingombro slitta acceleratrice

Il basamento portante della macchina è una struttura a pianta rettangolare in carpenteria saldata, tale da formare un corpo rigido in grado di sopportare le sollecitazioni inerziali indotte dal moto del piano traslante; sollecitazioni dinamiche il cui valore assoluto cresce all'aumentare delle accelerazioni imposte alla parte mobile ed al peso dell'unità di carico sottoposta a test. Il basamento è dotato di una serie di piedi che ne consentono il livellamento.

Anche la parte mobile è una struttura in carpenteria saldata, sulla quale sono montati due servomotori asincroni lenze (MQA26T22RS0B0) con riduttori epicicloidali Vogel MP32.M1 ( $i=1/3,5$ ). L'entità e la variabilità dei carichi movimentati impongono l'utilizzo di un sistema di trasmissione del moto quanto più rigido possibile, così da garantire l'inseguimento delle traiettorie imposte ai motori, e permettere la ripetibilità dei test. Tale rigidità è affidata all'accoppiamento pignone-cremagliera: il primo è fissato sull'albero di uscita dei riduttori; la cremagliera è imbullonata al basamento, al quale

sono imbullonate anche due guide lineari a ricircolo di sfere sulle quali scorre il piano mobile.

La zona della parte mobile dove viene appoggiato il carico è delimitata anteriormente e posteriormente da due pannelli, i quali da specifica hanno inclinazione di 15° (regolabile).

Sul piano mobile possono essere montati a piacimento e nella posizione desiderata quattro angolari, per bloccare il pallet o limitarne lo spostamento.

Il perimetro della macchina è delimitato da barriere materiali, tranne che nella zona di carico e scarico del pallet, che è messa in sicurezza da un laser scanner.

La corsa utile massima del carrello è di 6,65 m.

Per gli arresti di emergenza, anche qualora venga interrotta accidentalmente l'alimentazione, si utilizzano 6 freni meccanici negativi a ganasce, che esercitano l'azione frenante su una barra in acciaio solidale al basamento.

## 2. Parametri e dati acquisiti

La curva di accelerazione che governa il moto della slitta è di tipo trapezoidale modificato, ed è composta dalle seguenti fasi:

- Rampa di accelerazione: configurabile in durata. L'accelerazione viene portata linearmente da 0 al valore massimo.
- Tratto ad accelerazione costante: configurabile in durata e valore assoluto.
- Rampa di decelerazione: configurabile in durata. L'accelerazione viene portata al valore minimo (decelerazione) passando dallo 0.
- Tratto a decelerazione costante: configurabile in valore assoluto.

Il software di controllo verifica che la combinazione di parametri impostati dall'operatore non comporti il superamento dei limiti di corsa e di velocità massima del carrello, ed eventualmente lo obbliga a modificarli.

L'operatore può decidere di volta in volta se utilizzare camme di accelerazione standard, già presenti nella memoria della macchina, o se configurarne una nuova. Il report con i parametri della prova può essere salvato ed esportato.

## 3. Prestazioni

Le performance ottenibili dalla slitta sono le seguenti:

- Accelerazione massima ( $m/s^2$ ) =  $k \cdot g$  con  $g = 9,81 m/s^2$  e  $k = 0.8$
- Durata massima dell'accelerazione: 0.5 s
- Durata della rampa di accelerazione: 0.05 s
- Portata massima (con le prestazioni indicate): 1500 kg

La procedura del test da effettuare su tavola acceleratrice, fa riferimento alla EUOMOS 40509 – 2012 descritta al paragrafo 2.1.

Tipicamente, i clienti chiedono una verifica della stabilità dei loro prodotti avvolti e quindi una prova con ciclo di fasciatura Robopac.

Alla fine di ogni test, si valutano gli spostamenti degli strati, soprattutto quello massimo, dato che proprio quest'ultimo incide sul superamento o meno della prova.

In figura 4.1.3 è raffigurata una prova su slitta acceleratrice con accelerazione di 0.5G per 0.3s.



Figura 4.1.3 test su slitta acceleratrice

Ciò che si attende da questa prova è la capacità del carico di resistere a tutte quelle manovre brusche che comportano una forte oscillazione del carico. Il comportamento perfetto del carico è caratterizzato da un comportamento di tipo corpo rigido. L'intero carico deve quindi comportarsi come una unica colonna. Si può permettere durante la prova, che la paletta di legno si alzi leggermente da un lato. Il tilt è permesso a meno che il carico non tocchi la parete inclinata di 14°, in questo caso la prova sarebbe fallita. Idealmente non si dovrebbe registrare alcun spostamento.

I cicli di fasciatura Robopac, sono creati ad hoc per ogni tipo di prodotto. In particolare, grazie all'utilizzo della tecnologia E-cube, della quale sono dotate parte delle macchine per l'avvolgimento del film, è possibile distribuire la pellicola in maniera ottimale lungo l'altezza del carico.

La tecnologia E-cube, in particolare, permette di fornire il film con prestiro variabile per ogni livello e quindi garantire la migliore economia di materiale per tutti i carichi e per tutti i film, assicurando il più alto livello di contenimento ottenibile per i vari film ed un risparmio della pellicola dal 30% al 55% rispetto ai cicli di fasciatura convenzionale. Il film avendo un ritorno elastico, esercita sul carico una forza di contenimento, e quindi avendo la possibilità di avere un prestiro variabile si ha la possibilità di avere una forza di contenimento variabile lungo il carico pallettizzato. Inoltre è possibile compensare il tiro del film lungo gli angoli del carico per evitare che durante il ritorno elastico il film si stiri così tanto da danneggiarsi agli angoli.

## 4.2 test su tavola vibrante

I test su tavola vibrante, vogliono simulare le condizioni di vibrazione cui è sottoposto il pallet durante il suo trasporto. In particolare si andranno a simulare quelle vibrazioni che riescono ad imprimere una accelerazione considerevole al carico pallettizzato (0.2g – 1g).

La macchina a tavola vibrante di cui è dotato il TECHLAB™, è rappresentata in figura 4.2.1



Figura 4.2.1 macchina a tavola vibrante

Il basamento portante della macchina è una struttura a pianta quadrata in carpenteria saldata tale da formare un corpo rigido in grado di sopportare le sollecitazioni inerziali indotte dal moto del piano vibrante.

Il pianale della macchina è attuato da un sistema a camme, le quali roteando imprimono alla tavola un moto sia in direzione verticale che longitudinale.

### Caratteristiche tecniche

- Struttura in acciaio saldato inforcabile dal basso;
- Pianale di carico in legno duro (massello)
- Dimensioni piattaforma vibrante 1600 x 1600 mm
- Ampiezza oscillazione fissa 25,4 mm (dato dal sistema a camme)
- Frequenza delle vibrazioni da 2 Hz a 4,8 Hz variabile in continuo da quadro comandi
- Capacità di carico massima= 1.200 Kg (o 1.500 Kg con motorizzazione potenziata)
- Cinematismo di comando: meccanico ad eccentrico.
- Accelerazione massima (nella componente verticale) da 0,1 g a 1 g variabile in continuo da quadro comandi
- Traiettoria della piattaforma: circolare.
- Componente verticale del moto (oscillatorio armonico)
- Potenza installata: 6 Cv (o 8 Cv per carico massimo di 1.500 Kg)

- Quadro elettrico a mensola separato dal corpo macchina
- Tensione di alimentazione standard 230-400 V, trifase con neutro e terra
- Protezione antiribaltamento del carico su 3 lati.
- Dati visibili a quadro:
  - Tempo ciclo;
  - Frequenza di lavoro
  - Numero di cicli eseguiti
  - Tempo per completamento prova

Le norme sulle quali si basa tale test sono la ASTM D5415-95 e la ISO 2247 descritte al paragrafo 2.1.

In questo caso la procedura del test è la seguente:

1. posizionamento del carico pallettizzato e avvolto sulla tavola vibrante;
2. scelta dell'accelerazione da imprimere al carico e quindi della frequenza, tipicamente  $0.2g$  pari a  $1.97m/s^2$  quindi ad una frequenza pari a 2Hz;
3. inizio test con frequenza fissata per un minimo di 2 min sino ad un massimo di 10 min;
4. arresto tavola e valutazione di eventuali danneggiamenti;
5. incrementare la frequenza di 0.5Hz ed eseguire il test per 10min, ad ogni fine step valutare i danneggiamenti;
6. ripetere il punto 4.

Tipicamente la soglia massima di frequenza applicata è di 3Hz, poiché per frequenze maggiori si ha un "saltellamento" della paletta, e la prova si concentrerebbe di più sulla resistenza meccanica del prodotto che della fasciatura.

Quello che si osserva a fine prova sono ancora una volta, gli spostamenti degli strati.

## 4.2 Report aziendali

I risultati delle prove svolte in laboratorio riportano le caratteristiche del prodotto pallettizzato, la tipologia di prova alla quale è stato sottoposto il pallet, gli spostamenti delle parti del carico registrati alla fine di ogni singola prova, il tiro esercitato dal film sul prodotto e i parametri di fasciatura. Nelle figure successive verranno esposti dei tipo di dati rilevati.

- PARAMETRI PALLET

Formato	Formato paletta	N° strati	Formato fardello	N° fardelli per piano	N° bottiglie totale	Altezza totale [mm]	Peso prodotto [kg]
2.0 L	1200x800	4	6x2	16	384	1478	768

- *Formato*: formato del prodotto, in questo caso acqua da 2.0L;
- *Formato paletta*: è il formato della paletta, in questo caso Europallet 1200x800mm;
- *N° strati*: numero degli strati o piani su cui è disposto il prodotto;
- *Formato fardello*: disposizione delle bottiglie all'interno del fardello;
- *N° fardelli per piano*: è il numero dei fardelli per piano;
- *N° bottiglie totale*: è il numero totale delle bottiglie caricate sulla paletta;
- *Altezza totale*: altezza del carico in mm, ad esclusione dell'altezza della paletta di legno;
- *Peso prodotto*: peso totale del carico in kg.

- Parametri fasciatura

Pallet testato	fasciatura	Film spessore [um]	Altezza fascia	N° spire	Prestiro [%]
Pallet1	Robopac	23	500	20	280

- *Pallet testato*: nome del pallet testato, possono essere più di uno con differenti caratteristiche e quindi vengono catalogati come *pallet1*, *pallet2..*;
- *Fasciatura*: indica chi ha eseguito la fasciatura;
- *Film spessore*: indica lo spessore in  $\mu\text{m}$  del film utilizzato per la fasciatura;
- *Altezza fascia*: indica la dimensione della bobina utilizzata, dopo il prestiro del film tale dimensione sarà ridotta di circa 50-70mm;
- *N° spire*: quantità di spire di film avvolto intorno al carico;
- *Prestiro [%]*: prestiro medio del film.

Interfalda peso [g]	Ciclo di fasciatura	Peso film di fasciatura [g]	% risparmio film
352	A-B-M	310	35

- *Interfalda peso [g]*: indica il peso in grammi delle interfalde di cartone utilizzate per separare gli strati di prodotto;

- *Ciclo di fasciatura*: indica qualitativamente come è stato disposto il film, ad esempio A-B-M indica che il film è stato disposto partendo dall'alto (A), verso il basso (B) con ritorno verso l'alto ma finendo all'altezza media (M) del carico;
- *Peso film di fasciatura [g]*: indica il peso in grammi del film utilizzato per avvolgere il film;
- *% risparmio film*: confronto tra il peso del film utilizzato dal cliente per avvolgere il prodotto e quello utilizzato da Robopac, corrisponde alla formula

$$\circ \%film = - \frac{(peso\ film_{Robopac} - peso\ film_{cliente})}{peso\ film_{cliente}} * 100$$

- TEST

Viene utilizzata sia la tavola vibrante sia quella acceleratrice

Slitta acceleratrice				Tavola vibrante		
Tipo test	Prova superata	Prova non superata	Spostamento massimo [%]	Tipo test	Test superato	Test non superato
0.5G x 0.3s	x		65mm [4%]	2.5Hz x 10min	X	
0.8G x 0.3s		x	150mm [8%]	3.5Hz x 10min		x

- *tipo test*: indica che tipo di test è stato effettuato sulla macchina ad esempio, per la slitta acceleratrice è stato effettuato una accelerazione di 0.5G e di 0.8G per una durata di 0.3 secondi, mentre per la tavola vibrante sono stati effettuati dei test dando alla tavola una pulsazione da 2.5Hz e da 3.5Hz per 10 minuti;
- *spostamento massimo*: spostamento massimo subito dal prodotto dopo il test;

- TIRO FILM

TIRO FILM [kg]					
LATO 1200 mm			LATO 800 mm		
ALTO	MEDIO	BASSO	ALTO	MEDIO	BASSO
28	25	34	23	26	38

- *LATO 1200mm*: misura del tiro effettuata sul lato lungo del carico;
- *Lato 800mm*: misura del tiro effettuata sul lato corto del carico;
- *Alto, Medio, Basso*: zona lungo l'altezza del carico dove viene rilevato il tiro espresso in kg.

- PARAMETRI DI FASCIATURA

Numero avvolgimenti nelle tra zone del carico			Avvolgimento con stringifascia	
alto	medio	basso	Tipo 1b-a	Tipo 4 centrale
5.5	7.5	9		X

Prestiro lungo il carico			Perimetro		
alto	medio	basso	Alto	medio	Basso
310	310	260	4200	4200	4600

Nella prima tabella:

- *Numero di avvolgimenti nelle tre zone del carico:* è il numero di spire che si trovano nelle tre zone lungo l'altezza del carico;
- *Avvolgimenti con stringifascia:* numero di avvolgimenti che presentano una corda parziale dovuta ad un restringimento trasversale della fascia, sono di due tipi differenti, il tipo 1 b-a prevede la corda parziale da un solo lato della fascia, mentre il tipo 4 centrale produce un restringimento da entrambi i lati della fascia.

Nella seconda tabella:

- *prestiro lungo il carico:* prestiro medio lungo l'altezza del carico;
- *perimetro:* perimetro di film medio fornito dal carrello di prestiro lungo l'altezza del pallet.

## 5 Progetto dell'esperimento per incrementare la stabilità del carico.

---

### 5.1 Obiettivo del DOE

L'obiettivo che ci si prefigge, è quello di andare ad ottimizzare i cicli di fasciatura dei carichi pallettizzati, per ovviare ai danneggiamenti che subirebbe altrimenti il prodotto lungo il suo percorso di movimentazione. In particolare, quello che Aetna Group S.p.a. vuole ottenere è la certificazione della stabilità del prodotto per il singolo trasporto.

In altre parole, si vuole certificare il ciclo di fasciatura per la singola tipologia di prodotto, e per il particolare tragitto che il bancale deve percorrere. Nel tragitto che deve percorrere il bancale è importante stabilire anche quali sono i mezzi per la movimentazione.

Il risultato finale è appunto il ciclo di fasciatura che la macchina avvolgitrice deve eseguire. Tale ciclo è frutto dell'analisi sperimentale effettuata in campo e in laboratorio.

Alla fine dell'iter sperimentale se ne uscirà con delle formule matematiche empiriche che saranno alla base del programma di fasciatura.

Chiaramente, prima di fornire i risultati occorre capire come condurre queste rilevazioni e gli esperimenti in laboratorio.

Lo stato dell'arte esposto nei capitoli precedenti serve da base per questo lavoro. Infatti occorre capire ed interpretare i risultati ottenuti dai vari ricercatori, per delineare in linea di massima come condurre gli esperimenti.

I macro esperimenti che si andranno a condurre riguarderanno la rilevazione dei fattori ambientali, quindi la loro elaborazione e l'esecuzione delle prove in TECHLAB™.

Per l'esecuzione delle prove si possono prendere in considerazione le procedure dettate dalle varie norme (ASTM, ISTA...), oppure cercare di riprodurre i casi reali. La scelta dipende sostanzialmente da due fattori che entrano in gioco, cioè il costo e il tempo per la realizzazione delle prove. Naturalmente, l'esecuzione dei test secondo norma, offrono sì una fonte di dati certi e sicuri, sia dal punto di vista sperimentale che legale, ma spesso non ricoprono le vere condizioni registrabili sul campo. Quindi dal punto di vista qualitativo la cosa migliore da fare è registrare le condizioni ambientali e riprodurle in laboratorio.

Prima di andare a specificare cosa fare, occorre catalogare i fattori incisivi.

## 5.2 Parametri DOE

I parametri sui quali si deve andare ad agire per ottenere dei test ottimali sono descritti di seguito.

PARAMETRI	COSA COMPORTANO
<b>Tipo di camion</b>	# assi, sospensioni a balestra o aria, quest'ultime sono migliori per smorzare
<b>Tipo di strada</b>	Autostrada, extra-urbano, urbano, strada piastrellata, (centro storico), sterrato
<b>Range di velocità</b>	Dipendente dal tipo strada, inserire anche frenate brusche e accelerazioni improvvise
<b>Km percorsi</b>	Più sono meglio è per dare più valenza alla prova
<b>Tipo di ancoraggio</b>	Il pallet verrà vincolato ed alcuni movimenti potrebbero essere impediti
<b>Posizione pallet lungo il pianale</b>	La condizione più critica è sul retro del rimorchio rispetto a quella davanti
<b>Peso pallet</b>	Effetto sullo smorzamento delle vibrazioni
<b>Peso totale del carico sul pianale</b>	Effetto sullo smorzamento delle vibrazioni
<b>Altezza pallet</b>	Numero strati. Inoltre l'ultimo strato in alto ha dei valori di PSD molto maggiori rispetto a quelli inferiori
<b>Posizione sensore</b>	1 solo sensore sul pianale o, 1 solo sensore nella paletta di legno, o 2 sensori di cui uno su paletta e 1 sulla sommità del carico

<b>Tipo prodotto</b>	sua densità e risposta ad una oscillazione
<b>Tipo interfalda</b>	"spezza" le colonne dei prodotti
<b># di prodotti per strato</b>	Più sono meglio "spezzano" l'onda d'urto
<b>Tipo di interfalda</b>	Funge da ammortizzatore fra uno strato e l'altro se il suo spessore è rilevante
<b>film</b>	Esercita una forza di contenimento che però può tendere a diminuire se le oscillazioni sono rilevanti

## PARAMETRI

- Tipo di camion

La tipologia di camion utilizzato, sul quale si andranno ad effettuare delle rilevazioni è di estrema importanza. Le sue caratteristiche meccaniche e strutturali hanno una forte incidenza sulle vibrazioni trasmesse al carico presente sul pianale. Inoltre visti i differenti tragitti che può percorrere bisogna scegliere opportunamente il vettore, ad esempio non si può pensare di fare circolare su percorso urbano un autotreno per i divieti imposti dal codice della strada.

Tecnicamente, si deve annotare sul report il tipo di vettore che può essere:

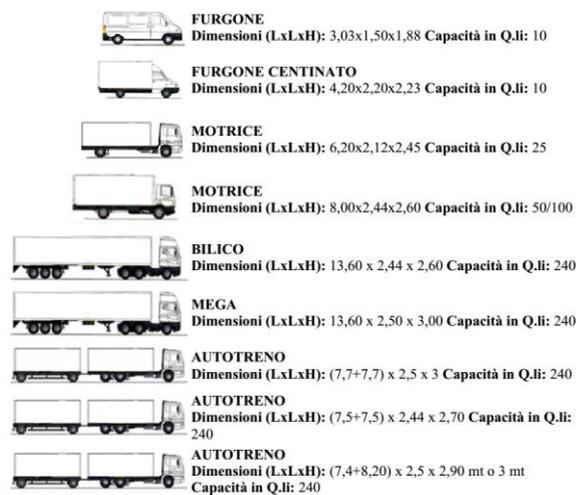


Figura 5.2.1 tipologia camion

Le caratteristiche principali che differenziano i vari mezzi di trasporto sopra elencati, sono la portata, il numero di assi, la tipologia di sospensioni del rimorchio e della trattrice.

Il numero di assi innanzitutto identificano sì il mezzo, ma anche la tipologia di appoggio del pianale.

Seguono le caratteristiche delle sospensioni del vettore. Si dimostra come le sospensioni di tipo ad aria siano migliori rispetto a quelle a balestra, sotto l'aspetto dello smorzamento delle vibrazioni. In figura 5.2.2 è riportato un esempio.

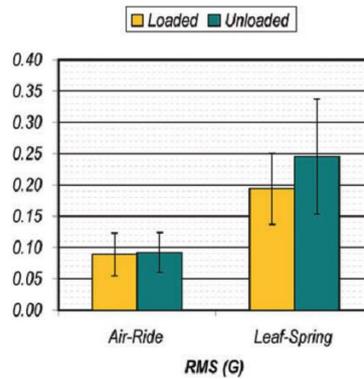


Figura 5.2.2. RMS dell'accelerazione

Per la scelta del camion, bisogna identificare il tipo di tragitto che deve effettuare il prodotto e quindi scegliere il mezzo più adatto. Si suggerisce comunque di scegliere mezzi con rimorchi equipaggiati con sospensioni ad aria. O se si ha a disposizione un rimorchio con sospensioni a balestra, tentare di caricarlo il più possibile.

- TIPO DI STRADA

Le sollecitazioni trasmesse dal camion al prodotto trasportato sono dovute essenzialmente al tipo di pavimentazione stradale. Le strade infatti presentano buche, tratti sconnessi, frammentazione del manto. Le strade urbane soprattutto presentano le condizioni peggiori, il motivo è legato innanzitutto all'intensità del traffico e alla tecnologia e alla cura con la quale sono costruite e mantenute, basta pensare alla differenza fra un manto autostradale con uno urbano.

Si nota una crescita del livello di vibrazioni passando dall'autostrada, alla strada extra-urbana, alla strada urbana, sino allo sterrato. In figura 5.2.3 è riportato un esempio.

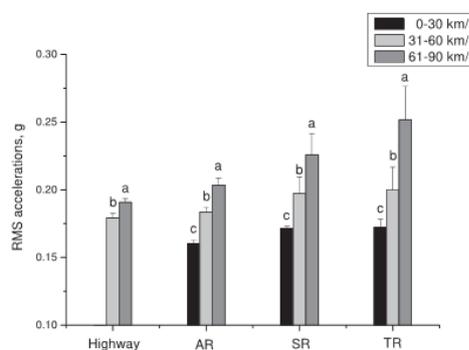


Figura 5.2.3. RMS dell'accelerazione per diversi tratti stradali. Highway: autostrada, AR: arteria principale, SR: strada secondaria, TR: strada terziaria

Per quanto riguarda il tipo di strada si suggerisce di scegliere quelle con un manto stradale il più curato possibile e se il tragitto prevede tratti urbani o strade terziarie, cercare di limitare la velocità.

- RANGE DI VELOCITA'

I range di velocità servono per capire come variano le vibrazioni trasmesse. È noto come l'attraversamento delle asperità a velocità elevata, comporti una trasmissione di energia dovuta all'urto maggiore di quella trasmessa in condizione di velocità minore. Ancora una volta si può fare riferimento alla figura 5.2.2. Inoltre per quanto riguarda la velocità occorre tenere in conto di brusche accelerazioni/decelerazioni.

Si consiglia di rispettare i limiti imposti o mantenersi a di sotto, e cercare di ottimizzare i tempi di consegna tenendo conto di questo fattore.

- Km percorsi

È chiaro come tragitti a lunga percorrenza permettano di avere un database di informazioni relativo alle condizioni ambientali, maggiore rispetto a tragitti corti (questo per le rilevazioni). Inoltre, un numero maggiore di km porta senz'altro ad avere una maggior ripetizione di eventi shock.

- Tipo di ancoraggio

I prodotti che devono essere trasportati, per motivi di sicurezza, devono essere vincolati al sistema di trasporto. In particolare, sui camion, il prodotto pallettizzato può essere fissato al pianale. La presenza di vincoli può incidere sull'effetto delle vibrazioni, dove all'aumentare della forza verticale del vincolo sul modello porta ad avere un effetto sulle accelerazioni.

- Posizione del pallet lungo il pianale.

È di grande importanza capire dove posizionare il prodotto pallettizzato lungo il pianale del camion. Infatti a seconda del tipo di rimorchio cioè della sua geometria, e il numero di assali sui quali poggia, si possono osservare diversi comportamenti circa la trasmissione delle vibrazioni. In qualsiasi rimorchio si osservano vibrazioni maggiori nella parte posteriore rispetto alla parte anteriore, come confermato in figura 5.2.4. La parte superiore non è sempre quella peggiore, vedi trasporto tipo LTL.

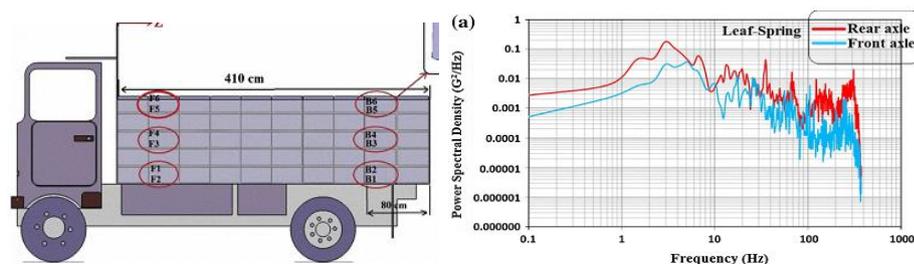


Figura 5.2.4. Disposizione accelerometri (fronte e retro) e PSD registrata

- Peso pallet e peso sul pianale del camion.

L'effetto della massa del pallet e della quantità di materiale caricato sul pianale incide fortemente sulla trasmissione delle vibrazioni. Dalla meccanica delle vibrazioni è noto come sia possibile cambiare le pulsazioni di risonanza agendo sulla massa oltre che sulla rigidità. In particolare, un aumento del peso del carico, comporta una diminuzione delle accelerazioni cui è sottoposto il carico stesso, soprattutto se le sospensioni sono di tipo a balestra. In figura 5.2.5 sono riportati alcuni esempi.

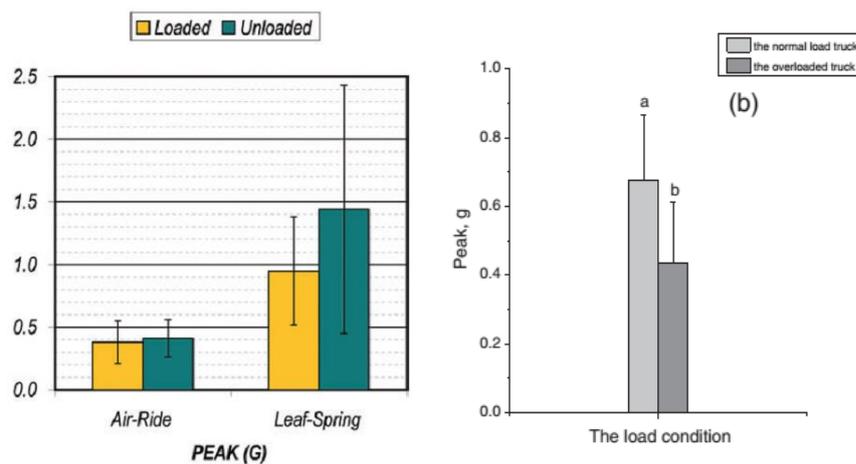


Figura 5.2.5. Effetto del carico sul picco di accelerazione

- Altezza pallet

L'altezza del pallet, al di là che più strati comportano la presenza di più prodotti e quindi maggior peso, influisce più che altro sul danneggiamento del prodotto. Infatti si registra che la posizione dove si registrano sollecitazioni maggiori, è quella corrispondente all'ultimo strato in alto. Il motivo è legato a due fattori, il primo risiede nel fatto che non c'è nessun elemento al di sopra dell'ultimo strato che lo vincoli (a meno di reggette o altro), il secondo è che il comportamento del prodotto pallettizzato è simile a quello di una colonna cui alla base è applicata una legge di moto e, quindi il comportamento è simile a quello di una trave incastrata. Le sollecitazioni vengono registrate da opportuni accelerometri posizionati alla base del carico, nella parte intermedia e nella parte superiore. In figura 5.2.6 è mostrata la rilevazione effettuata lungo il carico.

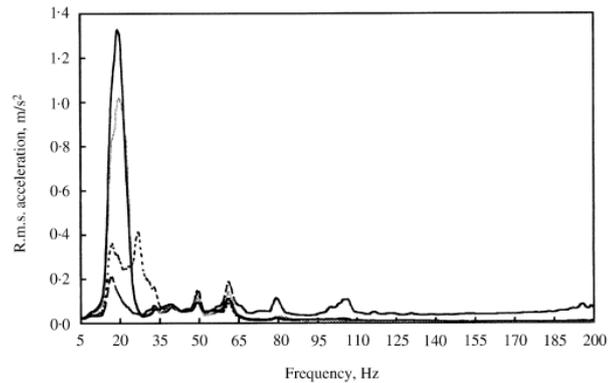


Figura 5.2.6. RMS dell'accelerazione, — top, .... Intermedio, --- base

Bisognerebbe cercare di non creare pallet troppo alti.

- Posizione del sensore

La posizione del sensore dipende da cosa si vuole rilevare. Può servire per rilevare semplicemente la legge di moto cui è sottoposto il carico pallettizzato, oppure per rilevare le oscillazioni lungo l'altezza del carico. Diversi autori montano gli accelerometri o sul pianale del rimorchio o sulla paletta di legno. Generalmente se si vuole replicare il segnale in laboratorio, si effettua una registrazione delle sollecitazioni posizionando il sensore accelerometrico sul pianale del camion per ottenere lo spettro della vibrazione dato dalla fonte e non filtrata da intermediari, quali il pallet.

- Tipo di prodotto

La tipologia del prodotto pallettizzato influisce significativamente sull'effetto che hanno le sollecitazioni sul danneggiamento e sulla stabilità del bene, questo anche perché ogni prodotto ha delle sue frequenze naturali. Essenzialmente se prendiamo a riferimento carichi pallettizzati di tipo beverage, si nota come la casistica peggiore sia rappresentata dal prodotto di tipo acqua minerale naturale. Si osserva come all'aumentare delle vibrazioni si possano presentare schiacciamenti degli strati inferiori, soprattutto nel primo strato.

- Numero di prodotti/fardelli per strato

Il numero di prodotti per strato ha sicuramente una sua importanza. Così come la sua disposizione in piana.

Se parliamo ad esempio di prodotti cartonati si può notare come un maggior numero di scatole di cartone possa smorzare meglio gli urti (soprattutto quelli provenienti dal carrello) rispetto al caso in cui si abbiano meno scatole di cartone, a parità di area superficiale della paletta ricoperta.

Generalmente la disposizione dei prodotti sul pallet è opera del cliente. Se possibile si potrebbe ridisporli in modo tale da evitare l'effetto colonna.

- Tipo di interfalda

Le interfalde generalmente utilizzate per i prodotti pallettizzati servono sia per proteggere gli strati inferiori da quelli superiori ed evitare così danneggiamenti, sia per “spezzare le colonne” che si creano dall'impilamento dei prodotti. L'operazione di spezzare la colonna è importante poiché si tende a smorzare la continuità fra i livelli del carico (vedi pila di fardelli d'acqua) e quindi evitare l'effetto “torre inclinata” durante le brusche accelerazioni e/o decelerazioni.

- Film

Elemento contenitivo essenziale per la stragrande maggioranza dei prodotti pallettizzati. Il film una volta avvolto, crea una forza di contenimento, che può variare leggermente durante il tempo. Quest'ultimo aspetto è dovuto anche alle sollecitazioni ricevute durante la movimentazione. Inoltre la forza del film può essere diversa lungo il carico, questo dipende molto dalla ricetta di fasciatura, in particolare del prestiro e del numero di avvolgimenti, l'effetto di quest'ultimo fattore è ben visibile nella figura 5.2.7

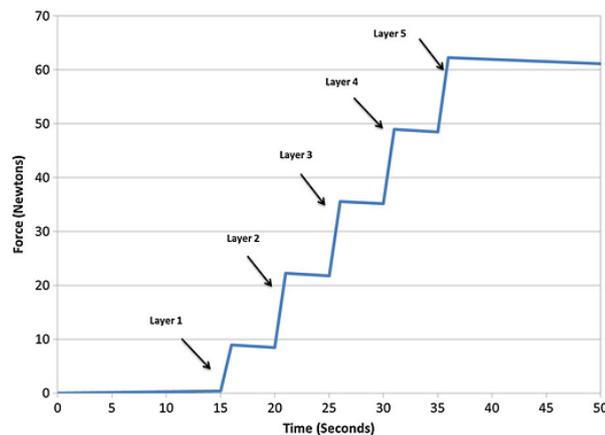


Figura 5.2.7 effetto della sovrapposizione del film

### 5.3 Linea guida per l'esecuzione delle rilevazioni sui mezzi di trasporto

Dato che Aetna Group S.p.a. intende effettuare delle prove su pallet che certifichino la stabilità del prodotto avvolto, è opportuno in questa fase preliminare comprendere il livello delle sollecitazioni meccaniche al quale è sottoposto il pallet durante la movimentazione.

Ecco perché è necessario definire con precisione, il tragitto di prova sul quale fare viaggiare il pallet e quali fattori ambientali rilevare. Sostanzialmente ciò che è utile è la caratterizzazione delle sollecitazioni di tipo vibrazionale cui è sottoposto il bancale. La tipologia di mezzi da utilizzare sono il camion e il carrello elevatore.

Il segnale che si dovrà analizzare dovrà contenere il maggior numero di informazioni possibili. Quindi, è consigliabile scegliere un vettore camion in grado di poter circolare su tutti i tratti stradali, dall'autostrada al circuito urbano.

È quindi necessario un autocarro (< 10 q) equipaggiato con sospensioni ad aria, si è visto come sperimentalmente siano le migliori circa la trasmissione delle sollecitazioni del pianale sul prodotto, tale camion deve percorrere più tratti possibili:

- Autostrada;
- Strada extraurbana;
- Strada urbana.

Per ogni tratta sarebbe opportuno effettuare almeno 50 km, tale lunghezza di percorso è paragonabile ad un viaggio effettuato in giornata.

È già noto come i livelli di vibrazioni aumentino con la velocità ma è anche vero che le condizioni stradali migliori si osservano in autostrada, seguita dalla strada extraurbana successivamente dalla rete urbana.

Per quanto riguarda le sollecitazioni di tipo vibrazionale si utilizzeranno dei micro sensori solidali alla paletta di legno che rilevano le accelerazioni lungo i tre assi cartesiani e le rotazioni intorno a tali assi, il tutto per avere il comportamento completo su tutti e 6 i GdL del pallet.

Dato che le condizioni reali di trasporto su camion potrebbero non presentare eventi critici, è consigliabile riprodurli comunque. Ecco perché è necessario simulare, in area priva di traffico (parcheggio o piazzale isolato) le situazioni critiche come la brusca frenata per rilevare l'accelerazione massima cui è sottoposto il pallet lungo la direzione longitudinale e le virate improvvise per rilevare le accelerazioni massime cui è sottoposto il pallet lungo la direzione laterale.

Per quanto riguarda la disposizione del pallet è bene porlo sul pianale in modo tale da rilevare la condizione peggiore possibile. Si specifica che la condizione peggiore possibile per la sollecitazione del carico pallettizzato, è la sua disposizione nella parte posteriore del rimorchio. A tal proposito si sottolinea che è senz'altro la condizione peggiore per le vibrazioni verticali [7].

È bene costruire un circuito che disponga di opportuni birilli (o altro ostacolo) equidistanti ed allineati disposti lungo la direzione di avanzamento del camion, a seguito occorre tracciare delle linee di stop per simulare la frenata brusca. Inoltre occorre creare una serie di dossi per simulare una serie di sobbalzi cui è sottoposto il camion e, quindi il pianale.

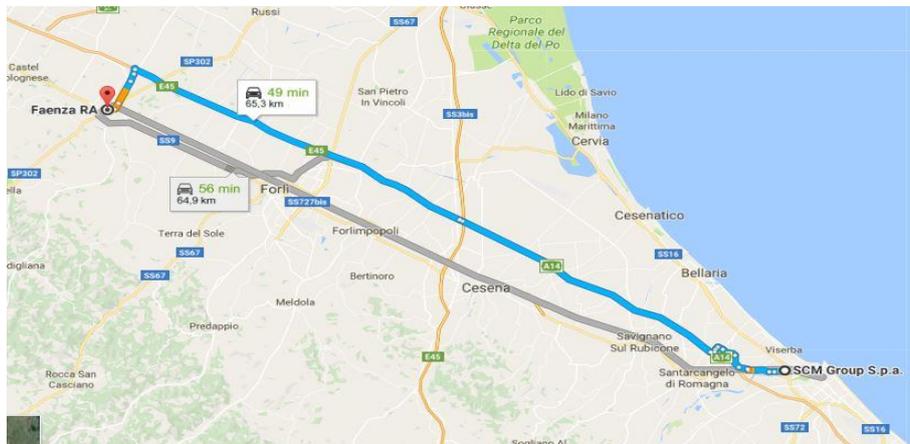
Per quanto riguarda il tragitto che dovrà percorrere il mezzo, essendo un viaggio da effettuare in giornata, ci si può avvalere della tratta descritta di seguito.

- Tratta autostradale (65 km)

Partenza: SCM Group S.p.a. via Emilia,77;

Arrivo: Faenza

- Da SCM Group S.p.a. via Emilia,77, proseguire verso il casello Rimini Nord-Bellaria-Santarcangelo;
- Prendere autostrada A14 direzione Bologna;
- Uscire a Faenza;
- Proseguire per via Granarolo, sino a Faenza.

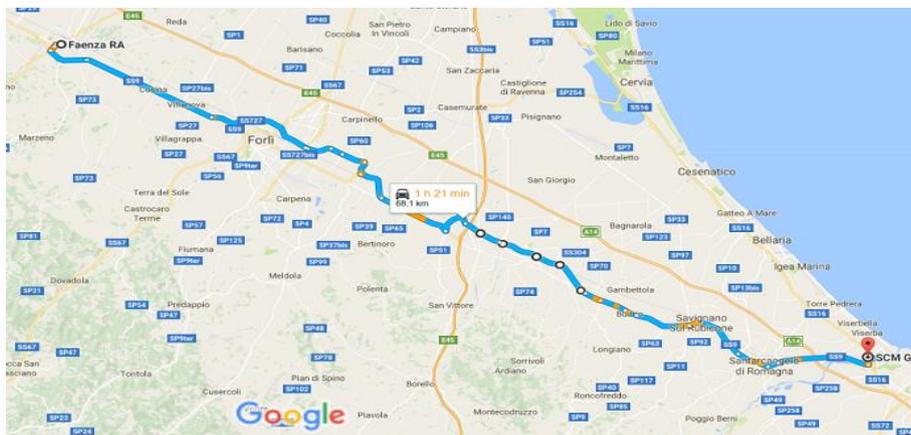


- Tratta extra-urbana (68 km)

Partenza: Faenza;

Arrivo: SCM Group S.p.a. via Emilia,77;

- Proseguire direzione Forlì seguendo la via Emilia;
- Proseguire direzione Rimini seguendo la via Emilia;
- Giungere a SCM Group S.p.a. via Emilia,77;

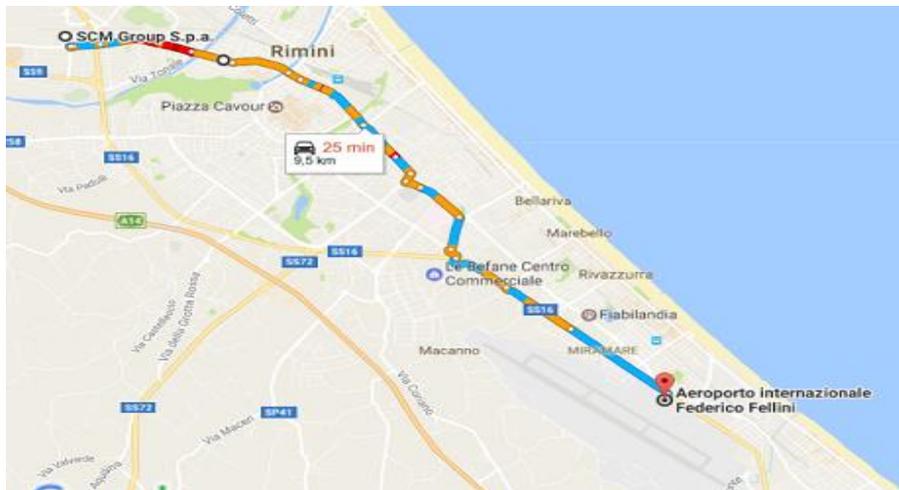


- Tratta urbana (20 km)

Partenza: SCM Group S.p.a. via Emilia,77;

arrivo: SCM Group S.p.a. via Emilia,77;

- Proseguire sulla via Emilia, direzione via XXIII settembre;
- Proseguire in via Giacomo Matteotti;
- Proseguire in via Roma;
- Proseguire in via Ugo Bassi;
- Proseguire in via Annibale Fada;
- Proseguire in via Flaminia;
- Alla rotonda nei pressi dell'aeroporto Fellini ripercorrere il percorso al contrario.



Per tutte le tratte percorrere il tragitto alla velocità massima consentita dal CdS.

La velocità deve essere massima poiché, come da bibliografia [2] [6], le vibrazioni aumentano con la velocità.

Una volta effettuata la rilevazione sul mezzo di trasporto camion, occorre rilevare le sollecitazioni trasmesse da un ulteriore mezzo di trasporto avente un ruolo fondamentale nella catena logistica, ossia il carrello elevatore.

Per tale mezzo occorre simulare il maggior numero di eventi critici possibili, per effettuare tale prove ci si può avvalere delle procedure ISTA 3B [18] e riproporre il tracciato come da figura 5.3.1

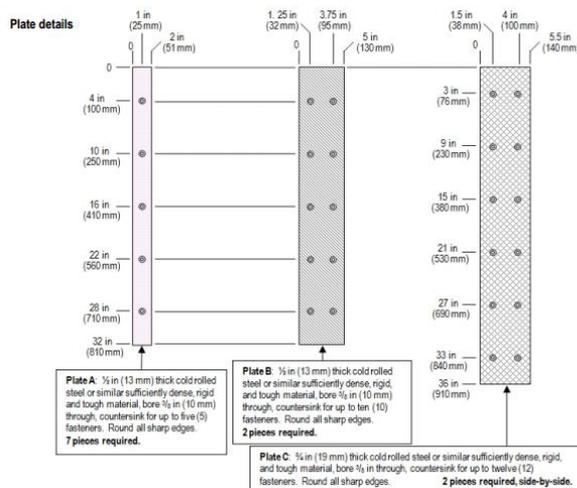
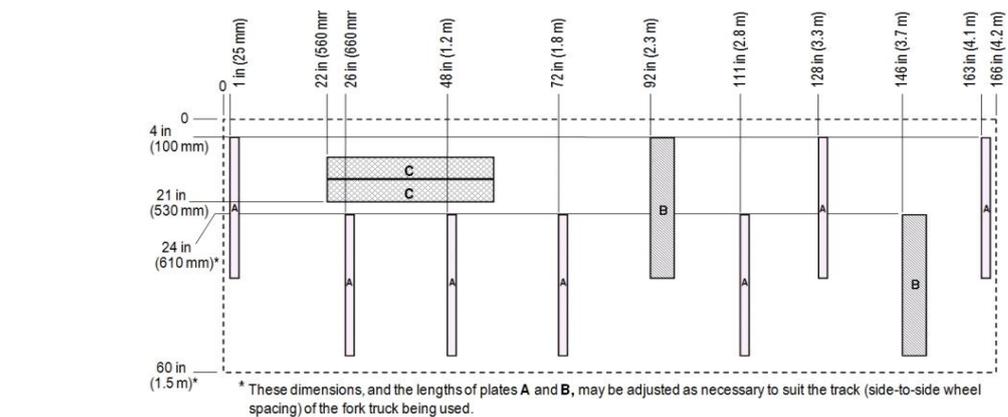


Figura 5.3.1 percorso per carrello elevatore (sopra) e dettaglio piastre e disposizione (sotto)

Un ulteriore metodo che si può applicare per effettuare un percorso ad ostacoli per il carrello elevatore è dettato dalla ASTM D6055-2013 [36], la quale fornisce una indicazione del tipo di percorso da far seguire al carrello, il quale prevede una fase di accelerazione, una fase a velocità costante con presenza di ostacoli e una fase di decelerazione, come esposto in figura 5.3.2.

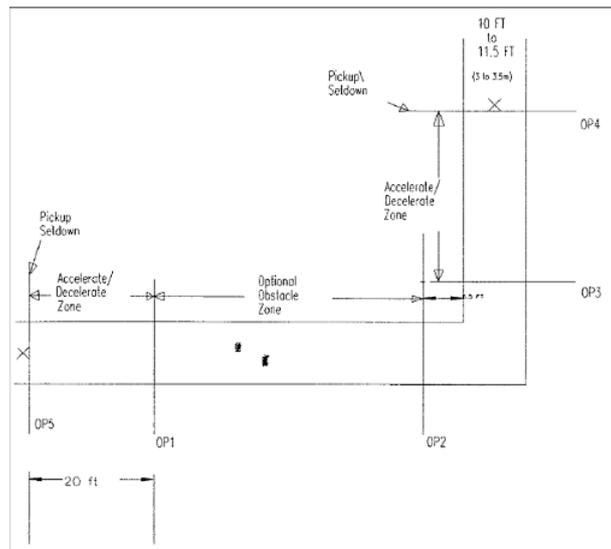


Figura 5.3.2 percorso suggerito da ASTM D6055 - 2013

## 5.4 Linea guida per l'esecuzione degli esperimenti in laboratorio.

Prima di analizzare la risposta del pallet con i dati rilevati sperimentalmente, occorre scansionare i dati già a disposizione sul pallet caratteristico. I dati aziendali riportati purtroppo non sono completamente esaustivi, poiché nel TECHLAB™ le prove venivano eseguite su commissione da cliente, che il più delle volte non era interessato ad un report completo, ma bastava che il pallet superasse le prove.

Ecco perché è necessaria una campagna sperimentale volta a quantificare i comportamenti del carico pallettizzato e, del film estensibile.

Come emerge dai report aziendali, i cicli di fasciatura, grazie alle tecnologie di cui sono dotate le macchine avvolgitrici, sono dei più svariati. Si può effettivamente gestire non solo il numero di avvolgimenti di film lungo l'altezza del pallet e quindi anche la conseguente gestione della forza di contenimento, ma anche la percentuale di prestiro durante l'avvolgimento.

Quindi per occorre mettere un po' di ordine prima di iniziare i test, bisogna stabilire dei modelli di ciclo di fasciatura da utilizzare.

### **APPLICAZIONE DEL FILM SUL CARICO**

- Bobina  
Altezza bobina 500 mm, spessore 23  $\mu\text{m}$ .
- Livello di prestiro

Mantenere il livello di prestiro fisso nelle tre diverse zone del carico (alto, medio, basso) durante l'avvolgimento con a scelta i seguenti valori: 260%, 280%, 300%, 330%, 375%. Mantenere, se necessario, un livello di prestiro basso tra il primo strato e la paletta di legno per consentire una maggiore elasticità del film a contatto con la paletta poiché è la zona più critica dato che il film è maggiormente soggetto a rottura poiché è la zona ove avviene lo sforzo maggiore. Tale criticità non è data tanto dal contatto della fascia con il legno e quindi con gli spigoli della paletta, ma dal fatto che durante una oscillazione del carico, il prodotto esercita una grande forza sul film, la quale se ha una entità tale da portare la tensione del film nella zona strettamente elastica della sua curva caratteristica, il film potrebbe rompersi, compromettendo quindi l'intera stabilità del carico.

- **Ciclo di fasciatura**

L'avvolgimento del film deve essere il più semplice possibile quindi si può iniziare con un ciclo dal basso verso l'alto del carico, oppure dal basso verso l'alto con una concentrazione di giri a metà altezza del pallet.

- **Presenza della corda**

Per corda si intende un parziale restringimento della fascia di film che viene avvolto. Tale corda si applica negli strati inferiori in particolare nelle bande che avvolgono il primo strato con la paletta. Tale elemento va applicato in quanto garantisce una migliore tenuta del film sulla paletta. Il suo effetto contenitivo è notevole ed è ben visibile durante la prova su slitta acceleratrice, in particolare agisce sul contenimento rispetto allo slittamento del primo strato di materiale a contatto con il bancale.

### **TIPO CARICO**

Il tipo di prodotto preso in considerazione per questi test è il fardello 3x2 di acqua naturale di formato 1.0 L, 1.5 L o, 2.0L, disposto su 4 strati, caricato su paletta Epal 1200 mm x 800 mm.

La disposizione dei fardelli può risultare di tipo colonnare (tutti i fardelli disposti nello stesso verso) che è la più critica, oppure a schemi incrociati dove gli strati si mostrano fra loro specchiati di 180°, od ulteriore schema atto a ridurre le dimensioni delle colonne di materiale lungo gli strati.

In particolare, lo schema colonnare risulta essere quello più critico, poiché osservando la vista in pianta del carico, lungo gli strati, si osserva come il prodotto si presenti come una unica colonna o per ulteriori schemi, si possono avere colonne di prodotto più piccole. Queste colonne durante la movimentazione sono maggiormente soggette ad inclinarsi.

Questo effetto può essere tuttavia mitigato dalla presenza di interfalde di cartone ondulato fra gli strati. L'interfalda oltre che a proteggere i prodotti dai danneggiamenti

dovuti allo sfregamento, serve per "spezzare" la continuità fra gli strati e mitigare l'effetto colonna.

Le tipologie di interfalde sono molte, si passa dai semplici fogli di cartone ondulato mono-onda, a quelli a doppia onda con altezza d'onda diversa sino alle interfalde con strato grippante.

In questo caso verrà presa in considerazione l'interfalda semplice mono onda.

### **DEFINIZIONE PROVE**

Definito il prodotto e il tipo di ciclo di fasciatura, occorre effettuare una serie di prove volte a caratterizzare e quantificare il contenimento del carico. A tal proposito, non basta più creare un ciclo di fasciatura per superare la prova, bisogna creare una serie di prove di fatica del film. Utilizzando i mezzi attualmente a disposizione del laboratorio, cioè la slitta acceleratrice e la tavola vibrante con le quali si possono riprodurre solo le sollecitazioni di tipo meccanico, tralasciando momentaneamente quelle atmosferiche.

Dato che la rilevazione sperimentale fornirà un certo database di vibrazioni, si possono andare a conteggiare i picchi di accelerazione nelle tre direzioni, che poi andranno riprodotti.

Di estrema importanza è la cadenza temporale con la quale gli eventi si presentano.

Infatti, il film estensibile varia la sua forza di contenimento di continuo nel tempo. Ecco perché sarebbe necessario mantenere la distanza temporale tra un evento e l'altro.

È noto come per simulare ottimamente le sollecitazioni meccaniche sia necessario un esapode a 6 GdL poiché non solo riesce a riprodurre le oscillazioni lungo i tre piani e i tre assi cartesiani ma anche per una sua modulazione in continuo.

Le macchine di cui è dotato il TECHLAB™ pur non essendo pensate per simulare le oscillazioni in tutti i GdL, riuscirebbero a riprodurre le accelerazioni cui è sottoposto il carico nelle due direzioni dove si registrano le oscillazioni, cioè quelle verticali e longitudinali, ma in modalità discreta cioè non con variazioni delle oscillazioni in continuo.

Ad esempio, la slitta acceleratrice riesce a raggiungere accelerazioni di  $k \times g$  con  $k$  massimo di 0.8, con risoluzione di  $k$  di 0.05. Tale macchina sarebbe l'ideale per riprodurre i picchi di accelerazione longitudinale e laterale ai quali è sottoposto il bancale.

La macchina a piano vibrante riuscirebbe a gestire ciclicamente varie frequenze con step temporali di almeno un minuto, questo vuol dire che è possibile creare un ciclo di oscillazioni a varie frequenze che la macchina eseguirebbe in continuo ma che non sarebbe possibile creare accelerazioni con durata inferiore al minuto e questo potrebbe essere un problema per riprodurre il picco di accelerazione. In questo caso sarebbe possibile riprodurre il valore dell'accelerazione del picco per almeno 1 min e quindi sarebbe già una condizione più critica.

## ESECUZIONE PROVE BASATE SU DATABASE

Per eseguire i cicli di prova, occorre creare per ogni singolo pallet che andrà testato una sua copia. La copia servirà esclusivamente per registrare il tiro del film dopo l'esecuzione della fasciatura. Tale copia è necessaria poiché per eseguire la verifica del tiro si utilizza il metodo del piattello che, essendo un test di tipo distruttivo andrebbe ad incidere negativamente sulla resistenza del film. La misura dovrà essere effettuata sia sul lato lungo che sul lato corto, nel livello basso, medio ed alto del carico secondo ASTM D4949 – 03 [35].

Il segnale proveniente dalla rilevazione sperimentale conterrà un numero elevato di informazioni circa le accelerazioni e senz'altro sarà un susseguirsi di vibrazioni verticali e orizzontali (momentaneamente si escludono le altre per motivi legati alla riproducibilità in laboratorio). Per motivi di tempo e praticità potrebbe risultare dispendioso spostare il pallet dalla tavola vibrante all'acceleratrice e di nuovo alla vibrante o viceversa per sottoporre il carico alla sequenza perfetta registrata in campo. Quindi ogni test può cominciare dalla riproduzione delle oscillazioni su tavola vibrante, tenendo conto dei limiti della macchina circa i tempi ciclo per singola frequenza.

Successivamente il pallet andrà disposto sulla slitta acceleratrice per simulare i picchi di accelerazione longitudinale. Potrà essere necessario effettuare la prova di accelerazione disponendo il bancale con il lato lungo e corto lungo la direzione di avanzamento della slitta.

Alla fine del test bisognerà effettuare la rilevazione del tiro del film nel lato lungo e lato corto nel livello basso, medio ed alto del carico, la rilevazione degli spostamenti del carico, e quindi la pesatura del film utilizzato.

## 5.5 Definizione parametri Anova ad 1 fattore

I risultati da registrare nelle singole prove devono essere dati quantificabili come numeri. Tali dati saranno appunto gli spostamenti che il carico subirà e quindi lo spostamento massimo e, lungo l'altezza del carico stesso, indicativamente nella parte bassa, media e alta. Inoltre andranno registrate la forza di contenimento e il peso della fasciatura.

Idealmente, per comprendere il peso che ogni singolo fattore ha sugli spostamenti bisogna variare tale parametro tenendo ad un livello costante gli altri fattori come da [33].

Si può quindi procedere con una Anova ad un fattore, ed indagare sull'effetto del prestiro come segue:

- Prestiro – spostamento massimo;

I livelli di prestiro più utilizzati da Robopac sono: 260%, 280%, 300%, 330%. Quindi, consigliando di mantenere un prestiro basso nella parte inferiore e, quindi nella parte

tra primo strato e la paletta pari a 260%. Discretizzando le combinazioni e variando il prestiro nella zona media e alta del bancale, si può ottenere la seguente tabella:

	b:260, m:280, a:280	b:260, m:280, a:300	b:260, m:300, a:330	b:260, m:300, a:330
Spostament massimo	..	..	..	..
	..	..	..	..
	..	..	..	..
	..	..	..	..
	..	..	..	..

Essendo la forza di contenimento del film dovuta non solo al prestiro, ma anche al tiro con la quale viene disposta la pellicola intorno al prodotto, anche tale fattore va preso in considerazione come parametro. Il tiro viene calcolato come un rapporto tra la lunghezza del film fornito ed il perimetro totale del carico pallettizzato.

Quindi analogamente l'Anova ad un fattore, può essere eseguita trovando la correlazione tra:

- tiro – spostamento massimo;

l'effetto del tiro è quantificabile in questo senso: dato il perimetro del bancale cioè  $2 \times 1200 + 2 \times 800 = 4000\text{mm}$ , la macchina fornisce un perimetro di film maggiore, per evitare, durante il ritorno elastico del film, che esso comprima il prodotto talmente tanto da danneggiarlo e/o per evitare la rottura del film stesso. Quindi seguendo tale logica, si applica un perimetro di film più o meno maggiore del perimetro del bancale.

	b:4400, m:440, a:4000	b:4400, m:4550 , a:4000	b:4400, m:4400 , a:4450	b:4400, m:4400, a:4000	b:4400, m:4400 , a:4300	b:400, m:4550, a:4300
Spostament massimo [[mm]	..	..	..	..		
	..	..	..	..		
	..	..	..	..		
	..	..	..	..		
	..	..	..	..		

È noto come un maggior numero di avvolgimenti di film intorno al prodotto possa incrementare notevolmente la stabilità del carico. Quello che si vuole ottenere è il massimo contenimento con la minima spesa di film avvolto, ossia anche con il minor numero di avvolgimenti intorno al carico.

Quindi occorrerà distribuire in maniera ottimale il numero di avvolgimenti solo dove serve. A tal proposito bisognerà comprendere l'effetto degli avvolgimenti sulla stabilità.

Per semplificare, si può pensare di suddividere il carico in tre settori: alto, medio, basso, e contare il numero di avvolgimenti su ciascun settore. L'Anova basata sul numero di avvolgimenti deve dare in uscita la correlazione tra:

- numero di giri – spostamento (nelle tre zone prima indicate).

	16	20	24
Spostamento massimo [mm]	..	..	..
	..	..	..
	..	..	..
	..	..	..
	..	..	..

L'Anova, fornisce come output la correlazione tra i fattori ma non una vera e propria ricetta di fasciatura ottimale. Tuttavia è in grado di fornire informazioni importanti su quale fattore sia più incisivo sulla stabilità del prodotto.

Per effettuare una Anova, occorre avere a disposizione un numero considerevole di pallet testati. Almeno 5 per ogni livello del fattore su cui si indaga.

Durante la simulazione occorre rilevare la forza di contenimento, sia dopo avere effettuato la fasciatura, che alla fine delle prove. La misura della forza di contenimento si può effettuare con il classico metodo del piattello, ma tale metodo essendo una prova distruttiva, una volta applicato al carico pallettizzato e avvolto, incide negativamente sulla resistenza del film dato che presenta danneggiamenti. Quindi o si utilizzano per ogni singola prova due bancali con lo stesso ciclo di fasciatura, dove sul primo si effettua una semplice rilevazione del tiro del film e sul secondo si vanno ad eseguire le prove, oppure si cerca un ulteriore metodo per la rilevazione della forza di contenimento. A tal proposito, nel capitolo 6.1 è esposto un esempio. Se riusciamo a rilevare dinamicamente la forza di contenimento, risulterebbe possibile e in maniera più comoda, inserire nell'Anova, la correlazione fra i tre fattori, cioè prestiro, tiro, e numero di avvolgimenti, e la forza di contenimento.

Infine, per ogni Anova, tenendo conto delle opportune ripetizioni e con l'utilizzo della misura dinamica della forza, potrebbero occorrere un numero considerevole di fardelli da utilizzare, dato che potrebbero danneggiarsi.

## 6 Risultati

---

Dall'analisi delle prove svolte da Robopac Sistemi, emerge come il laboratorio non sia ancora pronto per effettuare delle prove di caratterizzazione della fasciatura che rispecchino le vere condizioni ambientali.

Ciò che effettivamente manca, è la creazione di prove di fatica del film avvolto sui carichi pallettizzati, perché caratterizzare il ciclo di fasciatura basandosi su di una semplice prova dettata da una normativa non consente di avere una idea precisa del comportamento effettivo del pallet durante la sua "vita".

Prendendo come esempio le semplici accelerazioni cui è sottoposto il pallet, può risultare scontato che una accelerazione da 0.5G abbia un effetto negativo sul film che avvolge il carico, ancor di più se tale accelerazione si ripete più di una volta. Ma tali accelerazioni essendo elevate e quindi dovute a brusche decelerazioni/accelerazioni sono decisamente in numero inferiore, se non assenti, rispetto ad accelerazioni di entità inferiore.

Dato che anche le accelerazioni di entità inferiore possono nel lungo periodo danneggiare il film, occorrerebbe riprodurle in laboratorio.

Oltre alle sollecitazioni meccaniche cui è sottoposto il carico pallettizzato e avvolto, occorre considerare e quindi riprodurre, le condizioni climatiche.

La grandezza che maggiormente influisce sulla resistenza del film è la condizione termica. Infatti il film avvolgente, essendo di materiale plastico, cambia il suo comportamento al cambiare del livello di temperatura. Ciò che si osserva all'aumentare della temperatura è un rilassamento del film e quindi della sua forza di contenimento, mentre al suo diminuire si osserva un irrigidimento del film che diventa quindi più fragile.

Occorre simulare contemporaneamente l'effetto della temperatura e delle sollecitazioni meccaniche.

Ecco perché con un'unica tavola vibrante, disposta all'interno di una camera climatica, si riuscirebbe ad ottenere una simulazione molto più vicina alla realtà.

Per quanto riguarda invece la rilevazione delle condizioni ambientali (meccaniche e climatiche), occorre registrarle direttamente dalla base in contatto con il pallet e riprodurle per ogni famiglia di prodotto. Questo perché ogni prodotto ha una sua risposta propria, dipendente dalla sua massa e densità.

Essendo il film un componente "vivo" del sistema di imballaggio, è utile monitorare il suo comportamento con appositi sistemi. A tal proposito, nel capitolo 6.1 viene esposta una possibile soluzione.

## 6.1 Fardello strumentato

Ciò che si deve rilevare durante le prove non sono solo gli spostamenti del prodotto pallettizzato e i danneggiamenti del film, ma anche la forza di contenimento. La forza di contenimento cambia continuamente durante il ciclo di sollecitazioni del carico, e quindi è utile la sua rilevazione durante l'arco della prova.

A tal proposito serve equipaggiare il carico con opportuni sensori atti a rilevare la forza di contenimento esercitata dall'avvolgimento.

Nel caso del pallet caratteristico citato nel capitolo precedente caricato con fardelli d'acqua, l'azienda dispone già di un fardello strumentato. Tale fardello è un elemento in materiale polimerico dotato al suo interno di 12 celle di carico atte a misurare la forza di trazione/compressione verticale della bottiglia dovuto al film termoretraibile che avvolge il singolo fardello, vedi figura 6.0.1.



Figura 6.0.1 fardello strumentato

L'idea è quella di utilizzare tale dispositivo per rilevare la forza di contenimento del film e quindi misurare la forza che agisce sul lato del fardello.

Occorre stabilire successivamente con precisione la disposizione del fardello strumentato lungo l'altezza del carico pallettizzato. A tal proposito, lo strumento deve essere collocato dove può essere sempre in contatto con il film e quindi si consiglia di disporlo lungo l'angolo del carico, vedi figura 6.0.2



Figura 6.0.2 angolo del prodotto palletizzato

Nella disposizione angolare, il fardello sarà soggetto ad una risultante di forze, che è la somma della forza agente nel lato da 800mm e di quella agente nel lato da 1200mm del bancale, da figura 6.0.3, è facile comprendere come è la forza risultante stessa che garantisce in maniera più sicura rispetto alle altre forze laterali, un contatto maggiore e continuo con il film.

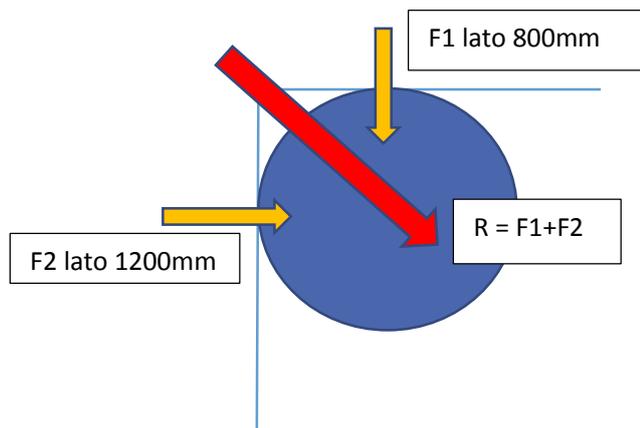


Figura 6.0.3 forze agenti sulla bottiglia nell'angolo del bancale

Per rilevare la forza di contenimento e quindi la forza risultante, occorre disporre la cella di carico lungo l'asse d'azione della forza. Nel caso si voglia rilevare separatamente l'effetto delle forze F1, F2 occorrono due celle di carico disposte lungo le direzioni di azione delle forze.

Per quanto riguarda la cella di carico, è possibile ri-utilizzare una delle celle, presenti nel fardello, le cui caratteristiche sono descritte di seguito.

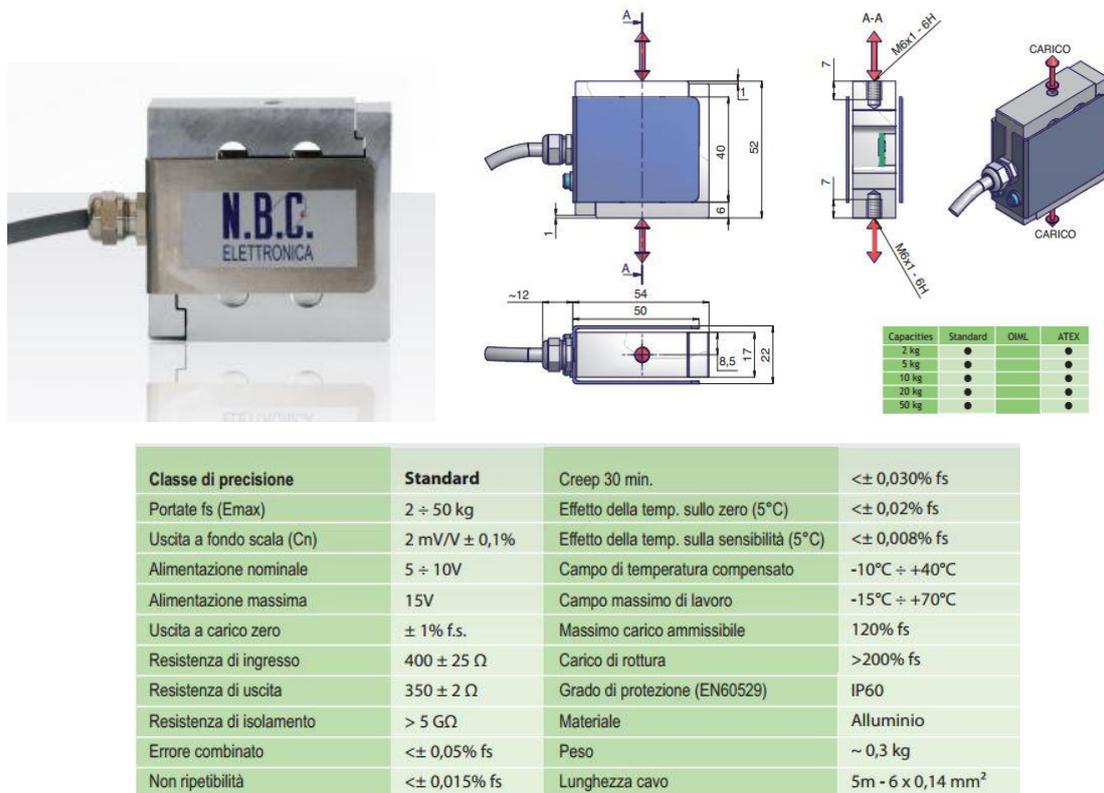


Figura 6.0.4 caratteristiche cella di carico

Lo schema di un possibile nuovo fardello è rappresentato in figura 6.0.5

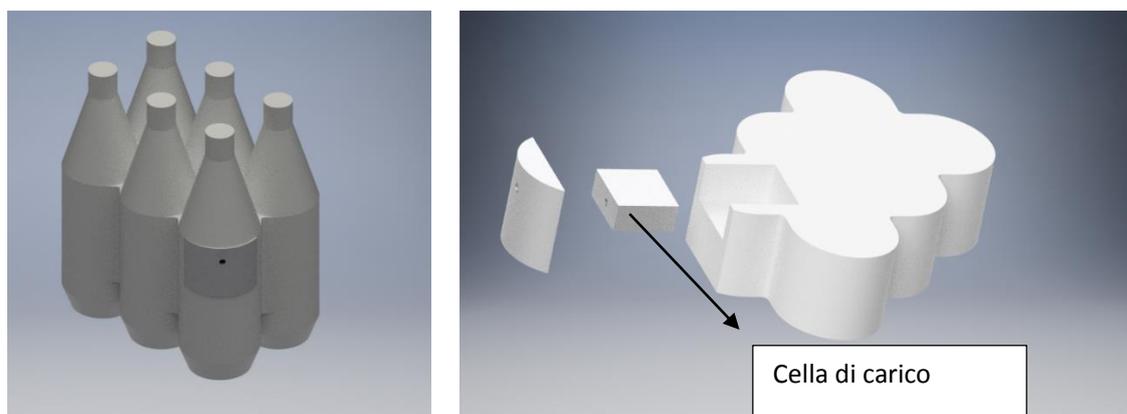


Figura 6.0.5 modello fardello strumentato

Tale fardello deve essere disposto in modo tale che l'angolo contenente la cella deve essere a contatto con il film. Sarebbe ideale disporre più di un fardello strumentato lungo l'altezza del carico, per rilevare la forza di contenimento nelle diverse zone del carico, cioè la zona alta, media e bassa del carico, dato che il film può essere avvolto in modo tale da creare forze di contenimento differenti lungo l'altezza del carico.

Inoltre, con l'utilizzo di un'unica cella di carico si otterrà una diminuzione di peso del fardello di circa 3kg (0.3 kg per ogni cella) e quindi il peso complessivo del fardello andrà dagli attuali 14,5 kg a circa 11kg, valore prossimo ad un vero fardello d'acqua 3x2 da 1,5L o 2.0L che pesano rispettivamente 9 kg, e 12 kg.

## 6.2 Analisi modale

Dato che le prove svolte in laboratorio possono essere onerose e lunghe, si potrebbero effettuare delle analisi numeriche volte a simulare il comportamento dei prodotti pallettizzati. Tale metodo consentirebbe di ottenere ottimi risultati in breve tempo e con costi contenuti.

A tal proposito, in bibliografia, l'analisi modale è stata utilizzata per vagliare i modi di vibrare dei prodotti impilati [28], come esposto nel capitolo 3.8.

Si potrebbero quindi effettuare analisi di tipo:

- Strutturale: utilizzando metodi agli elementi finiti per vagliare gli sforzi del carico pallettizzato;
- Modale: per trovare le frequenze proprie del sistema in analisi, e per ricavare la risposta del carico al variare delle oscillazioni meccaniche cui è sottoposto.

Tale procedura è attuabile tramite il software Ansys, software dedicato alle simulazioni di sviluppo prodotto multi fisiche, che spaziano dall'analisi strutturale sino alle analisi modali, CFD, e analisi magnetostatiche.

In tal caso viene qui esposto un semplice modello agli elementi finiti, con il quale si vogliono simulare i comportamenti del prodotto pallettizzato di tipo acqua disposto su quattro strati.

Semplificando il prodotto come segue da figura 6.2.1

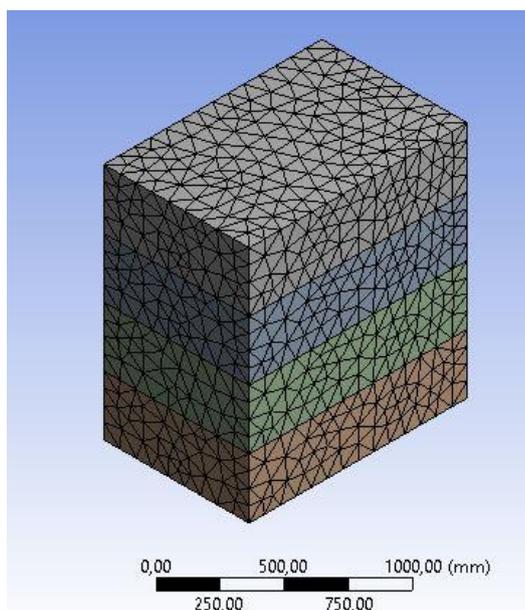


Figura 6.2.1 modello prodotto

Tenendo conto della densità media del singolo strato di circa  $915 \text{ kg/m}^3$ , proponendo quindi in questo caso un materiale di tipo polietilene, visto che è il prodotto più vicino al caso reale.

Con l'analisi FEM si possono ricavare i comportamenti del prodotto a seguito del tiro dovuto al film, infatti impostando delle pressioni ed una accelerazione alla base di  $0.5g$ , è possibile ricavare la deformata del prodotto, e le tensioni su prodotto, vedi figura 6.2.2

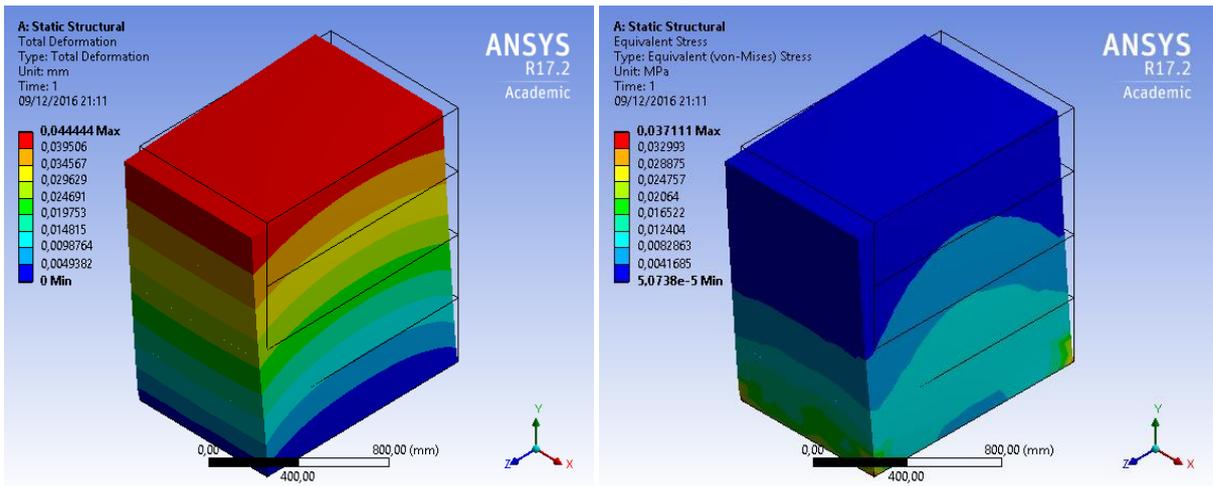


Figura 6.2.2 deformata totale prodotto

Inoltre, è possibile, ricavare i modi di vibrare e le frequenze proprie del sistema come da figura 6.2.3, dove è rappresentato il terzo modo di vibrare.

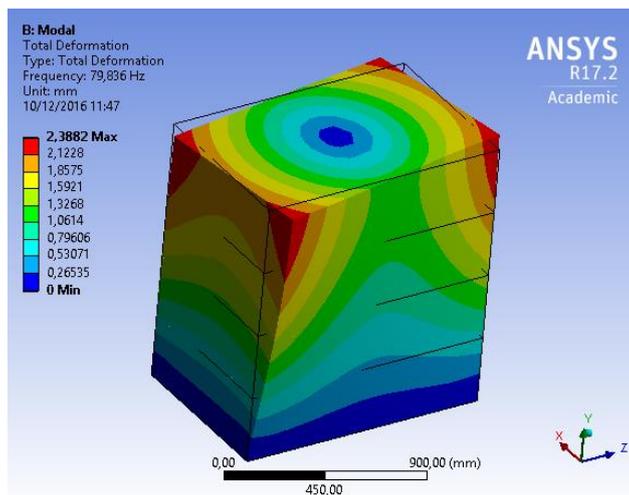


Figura 6.2.3 modo di vibrare: 3

Inoltre, è possibile simulare il comportamento del prodotto soggetto alle vibrazioni applicate alla base. Infatti utilizzando il modulo *Random Vibration* è possibile riprodurre

le PSD delle vibrazioni registrate sul mezzo di trasporto e ottenere i comportamenti del prodotto, vedi figura 6.2.4.

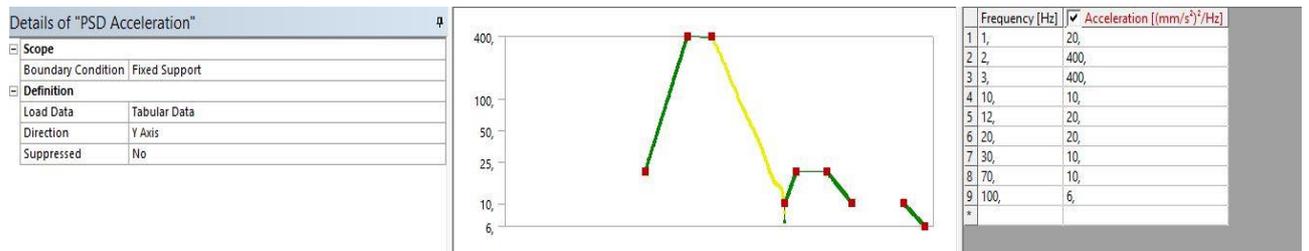
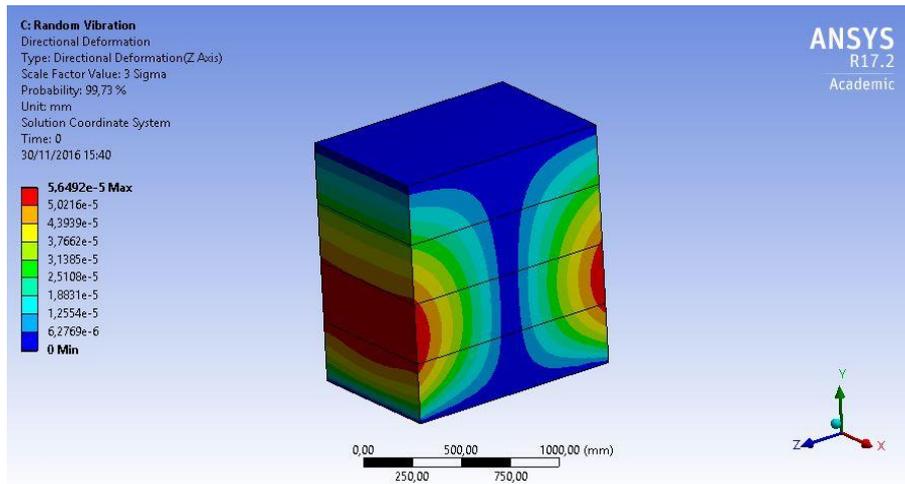


Figura 6.2.4 risposta alle vibrazioni (sopra) e PSD (sotto)

## 7 Conclusioni e sviluppi futuri

---

Nel presente elaborato sono state analizzate le varie procedure per la rilevazione delle condizioni ambientali, da quelle di tipo climatico alle sollecitazioni vibrazionali.

In particolare ci si è focalizzati sui mezzi di trasporto più comunemente utilizzati lungo la catena logistica, cioè il camion e il carrello elevatore.

Per quanto riguarda la categoria dei mezzi di trasporto, i diversi autori hanno vagliato ed analizzato le vibrazioni trasmesse dai mezzi ai prodotti pallettizzati. Si sono rilevate ed identificate le condizioni peggiori per il singolo bancale caricato, dovute alla posizione del prodotto lungo il pianale del rimorchio del camion, alla velocità del mezzo, e del tipo di sospensioni.

Si è notata una grande attenzione ai mezzi per la movimentazione interna dei prodotti pallettizzati, in particolare, si è notato come i mezzi per questo tipo di movimentazione riescano a trasmettere urti considerevoli al pallet, dovuti ad errori umani.

Inoltre, dall'analisi dei report, delle procedure di test in TECHLAB™, e dalla tipologia di macchine presenti in laboratorio, si è notato come si possano migliorare le procedure di test ed adattarle per cercare di riprodurre le condizioni ambientali in maniera quanto più possibile vicine al caso reale. Emerge come sia necessaria in questo senso una tavola vibrante a 6 GdL o esapode e una opportuna camera climatica per riprodurre i diversi valori di temperatura.

Per indagare sul fattore *contenimento del carico* si è suggerita un'analisi statistica di tipo anova ad un fattore per andare a studiare, come i fattori prestiro, tiro e numero di avvolgimenti siano in correlazione con lo spostamento massimo e la forza di contenimento.

Per la rilevazione della forza di contenimento si è suggerito di ri-adattare, un fardello strumentato per rilevare la forza di contenimento che il film esercita sul carico, in maniera dinamica, senza effettuare la prova del piattello la quale è una prova di tipo distruttivo.

L'esecuzione delle prove per effettuare l'analisi della varianza tra i fattori concorrenti od ulteriori prove per ricercare l'optimum della fasciatura, può risultare onerosa. Quindi si può suggerire un'analisi agli elementi finiti per ricercare i modi di vibrare del prodotto caricato su bancale e quantificare gli spostamenti dei prodotti, quest'ultima soluzione può risultare quanto meno più veloce e dai risultati assolutamente accettabili.

Quanto esposto sin ora rappresenta solo un punto di partenza per il progetto MAAS, l'obiettivo finale sarà certificare le fasciature prodotte dalle macchine avvolgitrici di Aetna Group, e quindi la creazione di programmi di fasciatura ad hoc per ogni singolo cliente e per ogni singola tratta che dovrà percorrere il carico. Tale obiettivo se raggiunto fornirà un nuovo standard per le macchine di fine linea, in particolare per le macchine

avvolgitrici, trasformandole da ultima macchina del *fine linea* a prima e più importante macchina dell'intera catena logistica.





## Ringraziamenti

---

Eccoci qui, in una rigida giornata di dicembre alla luce di un abat-jour, termina la stesura della mia tesi.

Prima di sbrodolarvi quelli che sono i pensieri e ricordi che ora, affollano la mia mente, volevo rivolgere i miei ringraziamenti alle persone che mi hanno accompagnato in questo percorso di tesi.

Il primo ringraziamento va al Prof. Cristiano Fragassa, per avermi dato preziosi consigli e per avermi pazientemente seguito nel lavoro in azienda.

Ringrazio inoltre il Prof. Giangiacomo Minak, per il supporto datomi.

Ulteriori ringraziamenti vanno a coloro che collaborano al progetto *MAAS* e che mi stanno dando la possibilità di partecipare ad un progetto di ricerca e sviluppo. In particolare il mio ringraziamento va al personale di Robopac Sistemi, quindi in particolare all' Ing. Vaccari e all' Ing. Cerè, inoltre il mio grazie va al personale tecnico che mi ha seguito e saputo consigliare e quindi ad Andrea Renzini e Samuele Fabbri che con pazienza e dedizione mi hanno ascoltato.

Un grazie davvero speciale per avermi dato sostegno in questi anni di studio intenso, va alla mia mamma e al mio papà che con amore e orgoglio mi hanno sempre saputo ascoltare ed ascoltare ed ascoltare ancora, alle volte quasi sino allo sfinimento, sapendomi dare quei consigli di cui un figlio ha bisogno e che sono stati necessari al fine di formare la persona che oggi sono.

Sempre ai miei genitori dico grazie, grazie per avermi fatto capire che anche nelle difficoltà, si deve e si riesce sempre a trovare una soluzione. Grazie per avermi insegnato ad affrontare la vita con coraggio e determinazione, grazie per avermi insegnato a guadagnarmi il pane e a non avere paura del futuro.

Il mio pensiero, anche in questi giorni va a te Fabrizio, a te fratello mio, che da lassù mi segui e che da lassù riesci a darmi sempre ogni giorno un sorriso, oggi dico anche a te grazie, so che sei contento per me.

Ringrazio la mia ragazza Elisa, colei che tenendomi la mano mi accompagna, e che ha visto quanto orrendo possa essere un allievo ingegnere dedito al suo studio, al suo studio matto e disperato a pochi giorni da un esame. Ancora oggi non si capacita di come si possa arrivare a studiare dodici ore di fila con solo la pausa pranzo, il segreto, cara mia, è sfogliare di tanto in tanto le pagine a caso. A parte scherzi Eli, ti voglio ringraziare per l'affetto e la dolcezza che ogni giorno mi dai, senza te tutto questo avrebbe un po' meno senso.

Non posso fare a meno di citare un ringraziamento alla famiglia della mia ragazza, che mi hanno sempre accolto con affetto e con i quali mi sento sempre a casa.

E come poter non citare qui i miei compagni della magistrale! Un grazie va a noi tutti, a noi che in questi pochi ma intensi anni siamo stati una piccola, grande, immensa famiglia. Vi ringrazio e vi abbraccio affettuosamente, a cominciare dalla Silvia con la quale i pomeriggi di studio si trasformavano in piacevoli pomeriggi di chiacchiere, grazie anche per avermi indotto ad installare WhatsApp per il quale ero restio al suo utilizzo, per avermi compatito e preso in giro quando parlavo della mia poca vita sociale, paragonabile quasi a quella di una piantina ornamentale.

Ringrazio Stefano per le giornate passate insieme a studiare e a chiederci cosa avevamo fatto di male per star sui libri anche la domenica pomeriggio, per la sua innata simpatia, per le serate, per la sua voglia di scherzare ogni mezzo secondo, grazie anche alle sue imitazioni di parte del corpo docente, memorabili.

Ringrazio anche i consigli, la simpatia e l'importante presenza di Giovannone, ricordo ancora una scena meravigliosa svoltasi nella biblioteca universitaria di Rimini, ma è meglio non citare, basta sapere che ancora oggi, io e Ste ridiamo.

E ancora, ringrazio Giova che cambia macchina solo perché le gomme della sua auto stanno per finire ed è inoltre, in riserva. E ancora Ballani e Chino con i quali, oltre Ste e Giova, ho affrontato il mega progetto e con i quali i pomeriggi in facoltà non sarebbero stati così produttivi/divertenti, i due Filippo o i due Filippini che sono andati a far compagnia ai prof del corso di meccanica avanzata, e quindi Pietro, Ivo, Luca.

Un ultimo e particolare ringraziamento va a Lorenzo Stolfi, insieme abbiamo iniziato questo percorso universitario, e spalleggiandoci, siamo riusciti a venirne fuori quasi sani di mente.

Ogni giorno con voi è stato fantastico, siamo riusciti ad affrontare il nostro percorso con grande allegria, distraendoci, e non poco, dalle difficoltà dello studio. Ricordo con piacere le nostre mangiate (che dovrebbero avvenire più spesso...), la grigliatona di carnazza, fatta a casa dei nonni della Silvia, che a momenti incendiavamo (vedi Livera...) e tutti gli altri eventi che hanno reso il nostro percorso più leggero e sopportabile.

E a proposito di grigliatona, doveroso è ringraziare Fiumo per le sempre "sobrie" serate a base di costine e bracioline e, quindi il buon Faustone e i due Andrea.

Per mio "timore", devo un omaggio a Mario, che con il suo humor nero ha reso indimenticabili le mie giornate.

Ultimo ma non ultimo ringraziamento, va al personale e ai docenti dell'Università di Bologna, polo di Forlì, che con grande passione e dedizione ci hanno insegnato quelle che sono le basi della meccanica, con uno sguardo sempre rivolto all'innovazione. A voi dico grazie poiché avete non solo accresciuto il mio bagaglio culturale, ma avete infuso in me la voglia di creare, di fare meglio, al fine di ottenere risultati migliori.

Ah sì, un grazie va anche a me.

## Bibliografia

---

- [1] Fei, L., Yutaka, I., Takeo, S., Takaaki, S.: *Analysis of Shock and Vibration in Truck Transport in Japan*. Packaging Technology and Science, Vol. 21, No. 8, pp. 479-489, 2008.
- [2] Fei, L., Yutaka, I., Takeo, S., Hiroaki, K., Takaaki, S.: *Effect of vehicle speed on shock and vibration levels in truck transport*. Packaging Technology and Science, Vol. 23, No. 2, pp. 101-109, 2010.
- [3] Manuel, G. R. M. Singh, S. P., Ballester, V.A.: *Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport in Spain as a Function of Payload, Suspension and Speed*. Packaging Technology and Science, Vol. 21, No. 8, pp. 439-451, 2008.
- [4] Singh, J., Singh, S.P., Joneson, E.: *Measurement and Analysis of US Truck Vibration for Leaf Spring and Air Ride Suspensions, and Development of Tests to Simulate these Conditions*. Packaging Technology and Science, Vol. 23, No. 6, pp. 309-323, 2006.
- [5] Rissi, G. O., Singh, S.P., Burgess, G., Singh, J.: *Measurement and Analysis of Truck Transport Environment in Brazil*, *Packaging Technology and Science*, Vol. 21, No. 4, pp. 231-246, 2008.
- [6] Zhou, R., Yan, L., Li, B., Xie, J.: *Measurement of Truck Transport Vibration Levels in China as a Function of Road Conditions, Truck Speed and Load Level*. *Packaging Technology and Science*, Vol. 28, No. 11, pp. 949-957, 2015.
- [7] Soleimani, B., and Ahmadi, E.: *Measurement and analysis of truck vibration levels as a function of packages locations in truck bed and suspension*, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 109, pp. 141-147, 2014.
- [8] Zhou, R., Su, S., Yan, L., and Li, Y.: *Effect of transport vibration levels on mechanical damage and physiological responses of Huanghua pears (Pyrus pyrifolia Nakai, cv. Huanghua)*, *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 46, No. 1, pp. 20-28, 2007.
- [9] Berardinelli, A., Donati, V., Giunchi, A., Guanieri, A., and Ragni, L.: *Effects of Transport Vibrations on Quality Indices of Shell Eggs*, *Biosystems Engineering*, Vol. 86, No. 4, pp. 495-502, 2003.
- [10] ISTA 3B.: *Packaged-Products for Less-Than-Truckload (LTL) Shipment. Ista 3 Series General Simulation Performance Test Procedure*, pp. 1-11, 2012.
- [11] Singh, S. P., Joneson, E., Singh, J., and Grewal, G.: *Dynamic analysis of less-than-truckload shipments and test method to simulate this environment*. *Packaging Technology and Science*, Vol. 21, No. 8, pp. 453-466, 2007.
- [12] Borozc, P., Singh, P., and Singh, J.: *Evaluation of Distribution Environment in LTL Shipment between Central Europe and South Africa*, *Journal of Applied Packaging Research*, Vol. 7, No. 2, art. 3, 2015.
- [13] Jarimpos, B., Singh, S. P., and Saengnil, W.: *Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged tangerines during transit*. *Packaging Technology and Science*, Vol. 18, No. 4 pp. 179-188, 2005.
- [14] ASTM D4003 – 98 2015. *Standard Test Methods for Programmable Horizontal Impact Test for Shipping Containers and Systems*, American Society of Testing and Materials 2015.

- [15] Rodriguez, H., Singh, S. P., and Burgess, G.: Study of lateral shock and pallet jack operation for the handling of palletized loads. *Packaging Technology and Science*, Vol. 7, No.4, pp. 205-211, 1994.
- [16] Blumer, T., and Guadagnini, D.: Shock transmissibility of a palletized load caused by forklift truck handling, *Industrial Technology, California Polytechnic State of University*, 2011.
- [17] Singh, H., Blumer, T., Roy, S., and Saha, K.: Carton clamp test methodologies and the effect on load containment and retention, *Packaging Technology and Science*, Vol. 28, No.1, pp. 15-30, 2015.
- [18] ISTA 3B.: Packaged-Products for Less-Than-Truckload (LTL) Shipment. *Ista 3 Series General Simulation Performance Test Procedure*, pp. 1-11, 2012.
- [19] Singh, S. P., Sandhu, A. P. S., Singh J., and Joneson, E.: Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India. *Packaging Technology and Science*, Vol. 28, No.6, pp. 381-392, 2007.
- [20] Rouillard, V., and Richmond, R.: A Novel Approach to Analysing and Simulating Railcar Shock and Vibrations, *Packaging Technology and Science*, Vol. 20, No., pp. 17-26, 2007.
- [21] Borozc, P., and Singh, P.: Measurement and analysis of vibration levels in rail transport in central Europe, *Packaging Technology and Science*, DOI: 10.1002/pts.2225, 2016.
- [22] Singh. S. P., Burgess, G., and Singh, J.: Measurement and analysis of the second-day air small and light-weight package shipping environment within federal express, *Packaging Technology and Science*, Vol. 17, No. 3, pp. 119-127, 2004.
- [23] Barchi, G. L., Berardinelli, A., Guarnieri, A., Ragni, L., and Totaro Fila, C.: Damage to Loquats by Vibration-simulating Intra-state Transport, *Biosystems Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 305-312, 2002.
- [24] Rouillard, V., Sek, M. A., and Crawford, S.: The dynamic behavior of stacked shipping units during transport. part 1: Model validation, *Packaging Technology and Science*, Vol. 17, No. 5, pp. 237-247, 2004.
- [25] Wang Z. W., and Fang, K.: Dynamic Performance of Stacked Packaging Units, *Packaging Technology and Science*, Vol. 29, No. 10, pp. 491-511, 2016.
- [26] ASTM D4728 -06, Standard test method for random vibration testing of shipping containers, *American Society of Testing and Materials* 2012.
- [27] Bernard, C., Laspalas, A., Gonzalez, D., Nunez, J. L., and Buil, F.: Transport vibration laboratory simulation: On the necessity of multiaxis testing, *Packaging Technology and Science*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-14, 2011.
- [28] Bernard, C., Laspalas, A., Gonzalez, D., Liarte, E., and Jimenez, M. A.: Dynamic study of stacked units by operational modal analysis, *Packaging Technology and Science*, Vol. 23, No. 3, pp. 121-133, 2010.
- [29] Wang, Z. W., Wang, J., Zhang, Y. B., Hu, C. Y., and Zhu, Y.: Application of the inverse substructure method in the investigation of dynamic characteristics of product transport system, *Packaging Technology and Science*, Vol. 25, No. 6, pp. 351-362, 2012.
- [30] Zhang, Y. B., and Wang, Z. W.: Investigation of frequency response function of product-transport system based on multi-coordinate coupled inverse substructure method, *Packaging Technology and Science*, Vol. 27, No. 5, pp. 364-365, 2014.

- [31] Wang Z. W., and Zhang, Y. B.: Dynamic characteristic analysis of refrigerator-truck transport system by using inverse substructure method, *Packaging Technology and Science*, Vol. 27, No. 11, pp. 883-900, 2014.
- [32] EUMOS 40509: Test method for load unit rigidity, 2012.
- [33] Singh, J., Cernokus, E., Saha, K., and Roy, S.: The effect of stretch wrap pre-stretch on unitized load containment, *Packaging Technology and Science*, Vol. 27, No. 12, pp. 944-961, 2014.
- [34] ISTA 3E.: Unitized Loads of Same Product. *Ista 3 Series General Simulation Performance Test Procedure*, pp. 1-13, 2014.
- [35] ASTM D4649 - 03, Standard Guide for Selection and Use of Stretch Wrap Films, *American Society of Testing and Materials* 2009.
- [36] ATSM "D 6055-2014 Standard Test Methods for Mechanical Handling of Unitized Loads and Large Shipping Cases and Crates" American Society for Testing and Materials (2014)



