



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA
IN INGEGNERIA STRUTTURALE
Ciclo XXV

**STUDIO DI UN SISTEMA DI RITENUTA STRADALE CON MONTANTI E
NASTRI IN LEGNO**

Tesi di Dottorato di:

Francesca Pilia

Tutor/Relatore

Prof. Ing. Francesco Annunziata
Prof. Ing. Francesca Maltinti
Prof. Ing. Massimo Fragiacomò

Marzo 2013



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA
IN INGEGNERIA STRUTTURALE

Ciclo XXV

STUDIO DI UN SISTEMA DI RITENUTA STRADALE CON MONTANTI E
NASTRI IN LEGNO

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza

ICAR 04

Presentata da:	Francesca Pilia
Coordinatore Dottorato	Prof. Francesco Ragnedda
Tutor/Relatore	Prof. Ing. Francesco Annunziata Prof. Ing. Francesca Maltinti Prof. Ing. Massimo Fragiacomò

Esame finale anno accademico 2011 – 2012

Ad Alessandro e ai miei genitori

Voglio ringraziare tutti coloro che mi sono stati vicini e mi hanno sostenuto in questi tre anni, in particolare i miei Tutori, Prof. Ing. Francesco Annunziata e Prof. Ing. Francesca Maltinti per il prezioso aiuto, i consigli ed il supporto morale nei momenti di sconforto; la Professoressa Barbara De Nicolo per la costante disponibilità e la Dott.ssa Trulli e il Dott. Vivanet che mi hanno incoraggiato durante tutto il percorso.

Indice

Introduzione	pag.1
Capitolo 1 Stato dell'arte	pag.3
Capitolo 2 La Normativa	pag.11
Capitolo 3 Il materiale legno	pag.18
3.1 Cenni sull'anatomia e proprietà meccaniche	pag.18
3.2 I "difetti"	pag.21
3.3 Il biodegradamento	pag.24
3.4 La classificazione	pag.26
Capitolo 4 Il software: Ls-Dyna	pag.29
4.1 Introduzione	pag.29
4.2 Caratteristiche	pag.33
Capitolo 5 Preparazione del modello	pag.40
5.1 Introduzione	pag.40
5.1 Creazione del modello geometrico	pag.47
5.2 Creazione del modello con la mesh	pag.45
5.3 Creazione del modello con Ls-prepost	pag.49

Capitolo 6 Creazione ed analisi dei modelli	pag.61
6.1 Introduzione	pag.61
6.2 Modelli analizzati	pag.66
Conclusioni	pag.91
Appendice A	pag.94
Bibliografia	pag.115

INTRODUZIONE

La sicurezza stradale è un problema attualmente molto sentito: ogni anno solo in Italia vengono registrati mediamente 211000 incidenti con lesioni a esseri umani, nei quali perdono la vita circa 4000 persone e ne rimangono ferite altre 303000. Per ridurre tali numeri si può, ove possibile, lavorare sul miglioramento delle caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico delle strade, cioè mediante quella che viene comunemente chiamata “sicurezza attiva”, ma contemporaneamente, si deve anche contare sull'aiuto di tutti quei sistemi che fanno parte della sicurezza passiva. Fra questi, occupano sicuramente una posizione di rilievo le barriere di sicurezza stradali.

Allo stesso tempo, da circa trent'anni a questa parte, sta crescendo sempre più la coscienza per il rispetto dell'ambiente e contemporaneamente la volontà di valorizzare i beni naturalistici presenti nel territorio.

Nasce dal fondersi di questi due temi lo studio di una barriera stradale costruita interamente in legno, nella quale questo materiale svolge non solo la funzione estetica ma anche quella strutturale. Questa tipologia di barriere non vuole sostituire quelle classiche in calcestruzzo o acciaio con alti livelli di contenimento, ma è indicata per i bordi laterali di quelle strade che sono inserite in contesti paesaggistici particolarmente rilevanti.

Il punto di partenza è stato la progettazione della forma propria della barriera, cioè lo studio architettonico, poiché l'estetica in questo caso non può che essere di primaria importanza, infatti l'utilizzo finale vorrebbe essere presso gli itinerari definiti “turistici”. Inoltre, poiché è necessario assicurare un'accettabile vita utile alla barriera, la durabilità del legno non può essere trascurata, pertanto la scelta del tipo di legno, il pino, e la forma della sezione, circolare, sono stati fortemente condizionati da questo fattore.

Di seguito si è passati al dimensionamento degli elementi. Sono stati verificati diversi modelli che variano fra loro per dimensioni dei montanti e nastri e per il reciproco interasse, in modo da ottenere quella combinazione di elementi che porta alla soluzione ottimale.

Ognuna delle configurazioni ipotizzate è stata modellata e verificata sotto l'urto di un veicolo, in modo da poter fare dei confronti e delle verifiche, utili anche per l'ottimizzazione del modello ideale. Per simulare l'urto del veicolo sulla barriera è stato utilizzato un codice agli elementi finiti, LS-Dyna, che in questo momento è il più utilizzato al mondo per i problemi di

dinamica veloce.

La simulazione mediante software è uno strumento molto potente che ha portato un grosso risparmio economico negli ultimi anni. Esso permette di prevedere la risposta della barriera oggetto di studio, permettendo così di effettuare delle modifiche, senza dover effettuare ogni volta una prova di crash in campo prova su scala reale.

La ricerca risulta inoltre più complessa in quanto, come già specificato prima, il materiale legno è anisotropo e ciò comporta un'ulteriore sforzo durante la modellazione, perché è necessario differenziare le caratteristiche meccaniche secondo le diverse direzioni. Inoltre la resistenza del materiale dipende sia dalla durata dei carichi sia dall'umidità dell'ambiente circostante. Precisamente, essendo un materiale che risente della viscosità, reagisce meglio sotto carichi istantanei ma le sue caratteristiche meccaniche decrescono con l'aumentare del contenuto d'acqua. Dopo un attento studio dello stato dell'arte, dal quale si è desunto che per modellare il legno venivano adottate diverse soluzioni, è stata scelta quella che meglio rappresentava il comportamento del materiale. Infatti essendo rappresentato come un elemento solido è stato adottato come modello costitutivo del materiale quello creato appositamente per il legno, cioè il WOOD.

Sono state fatte diverse prove per testare la barriera esposta agli eventi climatici, proprio a causa della dipendenza intrinseca del materiale dalla temperatura e dall'umidità dell'ambiente esterno. Infatti è stata valutata la severità dell'urto secondo la EN 1317, calcolando l'indice ASI, facendo variare l'umidità e la temperatura, in modo da assicurarsi che la barriera possieda gli stessi requisiti in qualsiasi condizione climatica essa si trovi. Sono stati calcolati inoltre l'indice THIV, la deflessione dinamica e la larghezza operativa.

Capitolo 1. Stato dell'arte

Oggi, in commercio, esistono diverse tipologie di barriere che si differenziano per livello di contenimento, per il supporto sul quale sono poste in opera ed infine per il materiale con il quale sono realizzate.

I livelli di contenimento sono quelli specificati nella EN 1317, della quale si parlerà nel capitolo successivo, mentre il supporto, cioè l'elemento fisico sopra il quale è posizionata la barriera può essere: un cordolo di calcestruzzo, come avviene nei ponti per esempio, ed il sistema di ritenuta è collegato attraverso il sistema piastra-tirafondi, oppure il terreno, nel quale viene infisso il montante per una prefissata lunghezza. Un caso particolare rappresentano le barriere in calcestruzzo, conosciute come "New Jersey", che sono solo poggiate sulla carreggiata.

Esiste infine una notevole differenza dettata dal materiale con il quale viene costruita la barriera, infatti in commercio troviamo :

- 1) barriere in calcestruzzo;
- 2) barriere in acciaio;
- 3) barriere in acciaio corten;
- 4) barriere miste acciaio-clc;
- 5) barriere miste in acciaio-legno.



Fig.1.1 *Barriera in calcestruzzo tipo "New Jersey" [70]*



Fig.1.2 *Barriera in acciaio tipo bordo ponte su cordolo in cls [71]*



Fig.1.3 *Barriera in acciaio tipo bordo laterale infissa nel terreno [73]*



Fig.1.4 *Barriera in acciaio tipo corten [72]*



Fig.1.5 *Barriera mista in acciaio-legno*[74]

Le barriere “miste” in acciaio-legno sono costituite da acciaio, zincato o corten, che viene in parte o totalmente rivestito da uno strato di legno massiccio o lamellare. Queste vengono spesso utilizzate nelle strade italiane che risultano pregevoli dal punto di vista naturalistico in quanto anche nella Circolare Ministeriale 62032 “Uniforme applicazione delle norme in materia di progettazione, omologazione e impiego dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali” del 21/7/2010 [8] ritroviamo la frase *“Per impieghi in luoghi sottoposti a vincoli a tutela di bellezze naturali e paesaggistici il progetto potrà prevedere adattamenti di tipo estetico quali colori, rivestimenti e simili, per l’armonizzazione con i luoghi, anche prevedendo variazioni ai dispositivi disponibili che non ne modifichino la funzionalità”*, che invita all’utilizzo di sistemi che si integrino con il contesto.

In molti Paesi, come Stati Uniti e Norvegia, invece il legno è utilizzato per il montante (fig.1.6), e talvolta anche per il distanziatore, mentre il nastro è sempre in acciaio. Generalmente si utilizza legname appartenente alle specie “Douglas fir”, “Ponderosa Pine” e “Southern yellow Pine”. [51-52]



Fig.1.6 *Barriera con montanti in legno e nastro in acciaio[52]*

Mentre in Olanda è stata recentemente realizzata una barriera interamente in legno con livello di contenimento H2, chiamata “Tulip” , proprio per la sua forma particolare anticonvenzionale che ricorda un tulipano.(fig.1.7)

Lo studio di tale barriera è stato richiesto specificatamente dal Governo olandese perché si auspicava una barriera che potesse reindirizzare sulla strada dopo l’urto sia un piccolo veicolo che un bus ma che al contempo si armonizzasse con il contesto circostante.[50]



Fig.1.7 *Barriera in legno tipo "Tulip"[50]*

Questa ricerca si propone di studiare una barriera interamente in legno. Questo è un materiale da costruzione da sempre utilizzato, che è tornato alla ribalta negli ultimi anni, dopo un lungo periodo in cui è stato un po' in disuso a favore di altri materiali da costruzione come l'acciaio ed il cemento armato[56]. Infatti con l'affermarsi di nuove tecniche di produzione sta costantemente crescendo l'impiego del legno strutturale. Alla base di tale riutilizzo si possono rammentare i vantaggi da tutti conosciuti in edilizia, quali la coibentazione, ma soprattutto la leggerezza e l'elasticità che lo rendono particolarmente idoneo a sopportare le azioni sismiche e quelle dinamiche in genere.



Fig.1.8 Esempio di una casa tipo “block bau”, tipica delle zone alpine italiane.[68]



Fig.1.9 Esempio di un edificio moderno in legno, interamente costruito con pannelli X-Lam.[69]

Una delle caratteristiche meccaniche più note di questo materiale è l'anisotropia, cioè il diverso comportamento nelle tre direzioni principali (longitudinale, radiale, tangenziale), che rende sicuramente più difficile la valutazione della risposta del materiale sotto una forza dinamica, inoltre il comportamento del legno non può prescindere dalla temperatura e dall'umidità dell'ambiente circostante.

Capitolo 2. La Normativa

L'urto di un veicolo su una barriera è un fenomeno molto complesso, infatti vede partecipare diverse interazioni reciproche tra gli elementi costituenti la barriera di sicurezza, cioè nastro, montante, distanziatore e tutti i giunti, e fra la barriera stessa ed il terreno. Inoltre esso può avvenire nei modi più disparati, in quanto dipende dalla velocità, dall'angolo di impatto e dal tipo di veicolo perché è noto che attualmente il parco macchine è piuttosto vario e i veicoli si differenziano fra loro non solo per massa, potenza, cilindrata e, accelerazione ma anche per capacità di deformazione, altezza del baricentro ecc.

In generale la barriera deve dissipare parte dell'energia generata durante l'urto ed allo stesso tempo, reagire bene per diverse entità di forze d'urto in quanto i veicoli che possono entrare in collisione possono avere masse anche di molto differenti. Nello specifico, in caso di urti di forte entità (ovvero nel caso di veicoli caratterizzati o da una massa notevole oppure da elevate velocità), la barriera deve deformarsi in relazione allo spazio a disposizione dietro di essa, far sollevare il nastro in modo da evitare il ribaltamento del veicolo e mantenere la capacità di contenimento. Per urti di lieve entità (veicoli caratterizzati da piccola massa o da bassa velocità) deve sempre rispondere ai requisiti prima menzionati e reindirizzare il veicolo sulla carreggiata secondo un angolo contenuto in modo tale che esso non diventi a sua volta un pericolo per gli altri veicoli che sopraggiungono.

Pertanto è evidente che, per poter verificare e accettare una barriera, non si può che far riferimento a delle prove standard che garantiscano un funzionamento accettabile una volta messe in opera.

A livello nazionale la normativa che regola i sistemi di ritenuta stradale ha approvato dal 1992 diversi provvedimenti dei quali si riporta di seguito un breve elenco:

- D.M. 28/6/2011 “Disposizioni sull'uso e l'installazione dei dispositivi di ritenuta stradale “
- C.M. del 5/10/2010 “Omologazione dei dispositivi di ritenuta stradale nelle costruzioni stradali. Aggiornamento norma comunitarie UNI EN 1317, parti 1,2 e 3 in ambito nazionale”

- Circolare esplicativa del 21/07/2010 “Uniforme applicazione delle norme in materia di progettazione, omologazione e impiego dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali”
- C.M. del 15/11/2007 “Scadenza della validità delle omologazioni delle barriere di sicurezza rilasciate ai sensi delle norme antecedenti il D.M. 21.06.2004
- C.M. del 2/03/2006” Direttive inerenti le procedure ed i documenti necessari per le domande di omologazione dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali ai sensi del D.M. 21 giugno 2004 n. 2367. Integrazioni alla circolare n. 3533 ”
- C.M. del 20/09/2005 “Direttive inerenti le procedure ed i documenti necessari per le domande di omologazione dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali ai sensi del D.M. 21 giugno 2004 n. 2367”
- Aggiornamento del 1/6/2005 “Procedure di omologazione per barriere di sicurezza stradali attivate presso l’ispettorato generale per la circolazione e la sicurezza stradale ai sensi del D.M. 3.06.98 e successivo aggiornamento”.
- Direttiva del 25/8/2004 “Criteri di progettazione, installazione, verifica e manutenzione dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali”.
- D.M. 21/6/2004” Aggiornamento del decreto 18 febbraio 1992, n. 223 e successive modificazioni”
- D.M 2/8/2001 “Proroga dei termini previsti dall'articolo 3 del D.M. 11 giugno 1999, inerente le barriere stradali di sicurezza”
- Circolare 6/4/2000 “Integrazione e aggiornamento della circolare 15 ottobre 1996 di individuazione degli Istituti autorizzati all'esecuzione di prove d'impatto in scala reale su barriere stradali di sicurezza”.
- D.M. 11/6/1999 “Integrazioni e modificazioni al decreto ministeriale 3 giugno 1998, recante: "Aggiornamento delle istruzioni tecniche per la progettazione, l’omologazione e l’impiego delle barriere stradali di sicurezza“
- D.M. 3/6/1998 “Ulteriore aggiornamento delle istruzioni tecniche per la progettazione, l’omologazione e l’impiego delle barriere stradali di sicurezza e delle prescrizioni tecniche per le prove ai fini dell’omologazione.
- D.M. 15/10/1996” Aggiornamento del decreto ministeriale 18 febbraio 1992, n. 223 recante istruzioni tecniche per la progettazione, l'omologazione e l'impiego delle barriere stradali di sicurezza.

- Circolare 9/6/1995” Barriere stradali di sicurezza. Decreto ministeriale 18 febbraio 1992, n. 223.
- D.M 18/2/1992 “Regolamento recante istruzioni tecniche per la progettazione, l'omologazione e l'impiego delle barriere stradali di sicurezza.

Nel D.M. 21/6/2004” Aggiornamento del decreto 18 febbraio 1992, n. 223 e successive modificazioni” sono state recepite le norme europee.

Infatti esiste una norma europea, la EN 1317 “Barriere di sicurezza stradali” [1,2,3,4], che detta le regole affinché la barriera possa rispondere ai requisiti CE .

La norma comunitaria per le barriere di sicurezza si compone di 8 parti:

- EN 1317-1:2010 (UNI EN 1317-1:2010) – Terminologia e criteri generali per i metodi di prova;
- EN 1317-2:2010 (UNI EN 1317-1:2010) – Classi di prestazione, criteri di accettazione delle prove d’urto e metodi di prova per le barriere di sicurezza;
- EN 1317-3:2010 (UNI EN 1317-3:2010) – Classi di prestazione, criteri di accettabilità basati sulla prova d’impatto e metodi di prova per attenuatori d’urto;
- ENV 1317-4:2001 (UNI ENV 1317-4:2003) – Classi di prestazione, criteri di accettazione per la prova d'urto e metodi di prova per terminali e transizioni delle barriere di sicurezza;
- EN 1317-5:2008 (UNI EN 1317-1:2009) – Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento veicoli;
- prEN 1317-6:2006 – Sistemi di ritenuta pedonali – Parapetti pedonali;
- prEN 1317-7:2006 – Classi di prestazione, criteri di accettazione per la prova d'urto e metodi di prova per terminali delle barriere di sicurezza;
- prEN 1317-8:2012 – Sistemi di ritenuta stradali che riducono la severità di impatto della collisione di motociclisti con barriere di sicurezza.

Le metodologie e i criteri di accettazione delle prove di crash per le barriere di sicurezza stradale sono trattate nelle parti 1 e 2 della norma comunitaria.

Innanzitutto la EN 1317 parte 1 determina una terminologia comune nella quale suddivide i sistemi di ritenuta in due tipologie : parapetti pedonali e sistemi di ritenuta per veicoli, ed individua per questi ultimi diverse categorie (fig.2.1).

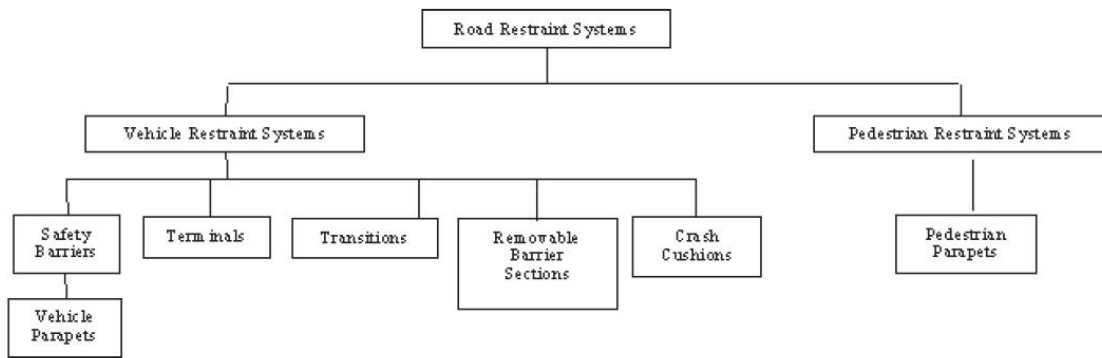


Fig.2.1 *Tabella suddivisione tipologia sistemi di ritenuta secondo la EN 1317-2 [1]*

Di seguito definisce le caratteristiche del sito di prova, le specifiche dei veicoli che devono essere utilizzati per le diverse prove d’urto (fig.2.2), la strumentazione di cui devono essere dotati e le metodologie di analisi dei dati raccolti durante le prove per il calcolo degli indici di severità d’urto ASI (Acceleration Severity Index) e THIV (Theoretical Head Impact Velocity).

MASS								
kg								
Total mass	900 ± 40	1 300 ± 65	1 500 ± 75	10 000 ± 300	13 000 ± 400	16 000 ± 500	30 000 ± 900	38 000 ± 1 100
Test inertial mass ^a	825 ± 40	1 300 ± 65	1 500 ± 75	10 000 ± 300	13 000 ± 400	16 000 ± 500	30 000 ± 900	38 000 ± 1 100
Including maximum ballast ^b	100	160	180	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable
ATD installed	78 ± 4	Not required	Not required	Not required	Not required	Not required	Not required	Not required
DIMENSIONS								
m								
(Limit deviation ± 15 %)								
Wheel track (front and rear)	1,35	1,40	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Wheel radius (unloaded)	Not applicable	Not applicable	Not applicable	0,46	0,52	0,52	0,55	0,55
Wheel base (between extreme axles)	Not applicable	Not applicable	Not applicable	4,60	6,50	5,90	6,70	11,25
CENTRE OF MASS LOCATION^{c,d}								
m								
Longitudinal distance from front axle (CGX) ± 10 %	0,90	1,10	1,24	2,70	3,80	3,10	4,14	6,20
Lateral distance from vehicle centre line (CGY)	± 0,07	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10
Height above ground (CGZ):								
— Vehicle mass (± 10 %)	0,49	0,53	0,53	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable
— Load (+ 15 %, - 5 %)	Not applicable	Not applicable	Not applicable	1,50	1,40	1,60	1,90	1,90
TYPE OF VEHICLE								
	Car	Car	Car	Rigid HGV	Bus	Rigid HGV	Rigid HGV	Articulated HGV
Number of axles ^e	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1/2	2S + 2	1S + 3/4
^a Including load for heavy goods vehicles (HGV). ^b Including measuring and recording equipment. ^c The vehicle's centre of mass shall be determined when the ATD is not in the car. ^d The centre of mass of vehicles with two axles shall be determined in conformity with ISO 10392. ^e S: steering axle.								

Fig.2.2 *Tabella specifiche veicoli di prova secondo la EN 1317-2 [1]*

Nella parte 2 invece sono descritte le caratteristiche delle diverse prove, precisando per ciascuna di esse il tipo di veicolo, la velocità e l'angolo di impatto (fig.2.3).

Test	Impact speed km/h	Impact angle °	Total mass kg	Type of vehicle
TB 11	100	20	900	Car
TB 21	80	8	1 300	Car
TB 22	80	15	1 300	Car
TB 31	80	20	1 500	Car
TB 32	110	20	1 500	Car
TB 41	70	8	10 000	Rigid HGV
TB 42	70	15	10 000	Rigid HGV
TB 51	70	20	13 000	Bus
TB 61	80	20	16 000	Rigid HGV
TB 71	65	20	30 000	Rigid HGV
TB 81	65	20	38 000	Articulated HGV

Fig.2.3 *Tabella della tipologia dei veicoli previsti per le prove secondo la EN 1317-2[2]*

Vengono poi specificate quali prove devono essere effettuate su ciascuna barriera a seconda del proprio livello di contenimento (fig.2.4) , i criteri di accettabilità delle prove in base alla severità d’urto (ASI e THIV) e in base alla deformazione della barriera.

Quest’ultima è caratterizzata da due parametri: la deflessione dinamica e la larghezza operativa. La deflessione dinamica (D_m) è lo spostamento dinamico laterale massimo del lato della barriera rivolto verso il traffico, mentre la larghezza operativa (W_m) è la distanza fra il lato rivolto verso il traffico prima dell’urto e la massima posizione laterale dinamica di una qualsiasi parte della barriera, si riporta in fig.2.5 un esempio delle due grandezze. Infine la norma prescrive che durante l’urto non più di una ruota passi sopra la barriera e che la traiettoria del veicolo dopo l’impatto deve essere contenuta all’interno di un rettangolo ideale chiamato “*exit box*”, che ha dimensioni specifiche per le automobili e tutti gli altri tipi di veicoli utilizzati nelle prove.

Containment levels			Acceptance test
Low angle containment	T1		TB 21
	T2		TB 22
	T3		TB 41 and TB 21
Normal containment	N1		TB 31
	N2		TB 32 and TB 11
Higher containment	H1		TB 42 and TB 11
	L1		TB 42 and TB32 and TB 11
	H2		TB 51 and TB 11
	L2		TB 51 and TB32 and TB 11
	H3		TB 61 and TB 11
	L3		TB 61 and TB32 and TB 11
Very high containment	H4a H4b		TB 71 and TB 11 TB 81 and TB 11
	L4a L4b		TB 71 and TB32 and TB 11 TB 81 and TB32 and TB 11
<p>NOTE 1 Low angle containment levels are intended to be used only for temporary safety barriers. Temporary safety barriers can also be tested for higher levels of containment.</p> <p>NOTE 2 A successfully tested barrier at a given containment level should be considered as having met the containment requirements of any lower level, except that N1 and N2 do not include T3, H-Levels do not include L-Levels and that H1, ..., H4b do not include N2.</p> <p>NOTE 3 Because testing and development for very high containment safety barriers in different countries has taken place using significantly different types of heavy vehicles, both tests TB 71 and TB 81 are included in the standard at present. The two containment levels H4a and H4b should not be regarded as equivalent and no hierarchy is given between them. The same holds for the two containment levels L4a and L4b.</p> <p>NOTE 4 The performance of Containment Classes L is enhanced in respect to the corresponding H classes by the addition of Test TB 32.</p>			

Fig.2.4 Tabella dei livelli di contenimento secondo la EN 1317-2 [2]

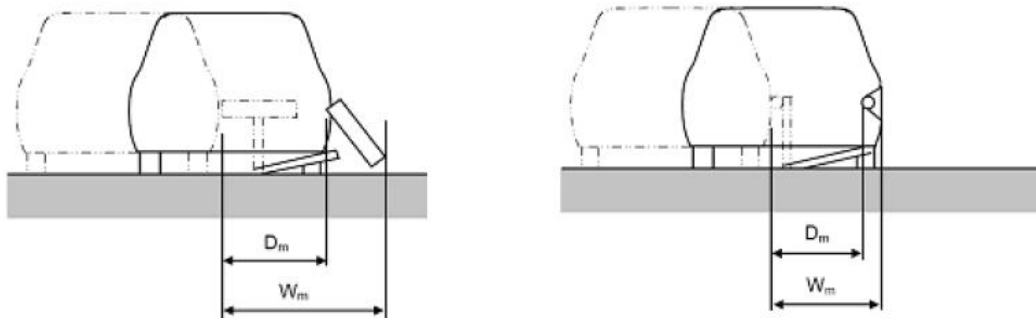


Fig.2.5 Esempio deflessione dinamica e larghezza operativa tratto dalla EN 1317-2 [2]

Capitolo 3. Il materiale legno

3.1 Cenni sull'anatomia e proprietà meccaniche

Il legno è un materiale con una struttura complessa, composta dalla sostanza delle membrane cellulari e dalle cavità cellulari, le cui principali caratteristiche sono l'anisotropia, la porosità e l'omogeneità. Dal punto di vista chimico è costituito principalmente da cellulosa, emicellulosa e lignina, inoltre ogni specie contiene in misura variabile sostanze solubili o insolubili che ne influenzano l'odore, il colore, la lavorabilità e la resistenza alle aggressioni degli agenti dannosi. Le sue fibre sono prevalentemente orientate, per ovvie esigenze naturali, nella direzione parallela all'asse del tronco (Fig. 3.1).

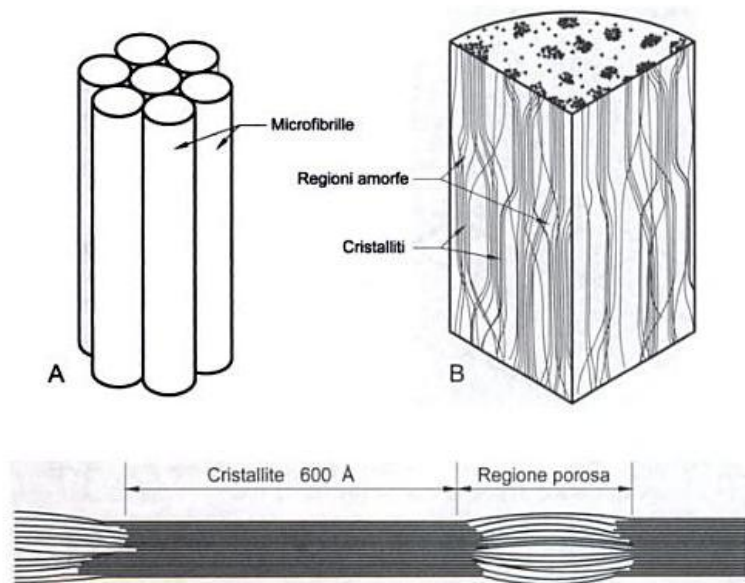


Fig.3.1 Immagine delle fibre del legno[56]

Questo è ciò che determina la grande variabilità del comportamento meccanico e tecnologico del materiale legno, infatti esso possiede caratteristiche anche molto differenti tra la direzione longitudinale, tangenziale e radiale, dove per direzione longitudinale si intende quella parallela al verso di accrescimento del tronco. Solitamente la differenza fra la

direzione tangenziale e radiale non è rilevante, pertanto si parla in generale solo di direzione perpendicolare alle fibre. Questa semplificazione permette di ridurre da nove a sei le costanti elastiche indipendenti del materiale.

Il legame sforzi-deformazioni per trazione e taglio è generalmente lineare e dà origine a rottura fragile, mentre per compressione, sia longitudinale che ortogonale alle fibre, si presenta invece non lineare e duttile.

La risposta meccanica è inoltre influenzata da una serie di fattori tra i quali si annoverano il tipo di essenza legnosa impiegata, la massa volumica, l'eventuale presenza di difetti e soprattutto l'umidità. Si riportano di seguito i grafici del legame sforzi-deformazioni per azione di trazione e compressione, nei quali si possono notare le differenti resistenze al variare dell'umidità.

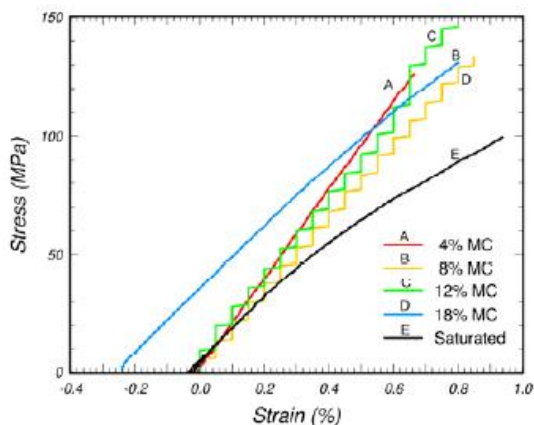


Fig.3.2a Diagramma sforzi-deformazioni per trazione [9]

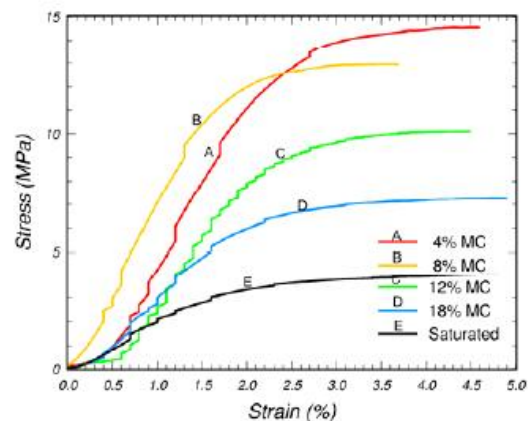


Fig.3.2b Diagramma sforzi deformazioni per compressione [9]

In generale si può affermare che la resistenza a compressione è sicuramente maggiore per le sollecitazioni che agiscono in direzione parallela alle fibre rispetto a quella che si avrebbe per sollecitazioni perpendicolari; mentre la resistenza a trazione diretta parallelamente alla fibra risulta decisamente notevole, considerato il fatto che secondo il rapporto carico di rottura e peso specifico il legno funziona meglio dell'acciaio. La resistenza a flessione è significativa sempre se le fibre sono disposte longitudinalmente; occorre però tenere presente il fatto che il legno è soggetto al fenomeno del fluage che nel tempo produce una

freccia di inflessione anche notevole. La resistenza a taglio è considerevole sempre se la direzione della sollecitazione è ortogonale alle fibre, alquanto bassa se parallela. L'elasticità diminuisce al crescere dell'umidità e varia da legno a legno; la durezza è direttamente proporzionale all'età e al peso specifico ed inversamente proporzionale all'umidità, inoltre il legno è uno di quei materiali che presenta il fenomeno della rottura a "fatica".

Precedentemente si è fatto riferimento all'umidità in quanto una caratteristica tipica di questo materiale è la sua igroscopicità. Il legno reagisce all'umidità dell'ambiente circostante soprattutto quando la sua umidità è inferiore al punto di saturazione delle pareti cellulari, pari ad un tasso di umidità del 30% circa. Per raggiungere l'equilibrio igroscopico con l'ambiente circostante il legno cede o assorbe umidità accompagnato dall'insorgere dei fenomeni di "ritiro" e di "rigonfiamento". Queste variazioni di dimensione si presentano in maniera differente nelle tre dimensioni ed è nella direzione radiale che si manifesta la più marcata variazione dimensionale. La tabella riportata di seguito mostra la correlazione che intercorre fra la temperatura e l'umidità relativa dell'aria e l'umidità del legno.

		Umidità relativa dell'aria in %																			
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Temperatura dell'aria in °C	0	1	3	4	5	6	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	19	22	27	33
	10	1	3	4	5	5	6	7	8	9	10	10	11	12	14	15	17	19	22	26	32
	20	1	3	4	5	5	6	7	8	9	9	10	11	12	13	15	16	18	21	25	31
	30	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13	14	16	18	20	24	30
	40	1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	9	10	11	12	13	15	17	19	23	29
	50	1	2	3	4	5	5	6	7	7	8	9	10	10	11	13	14	16	18	22	28
	60	1	2	3	3	4	5	5	6	7	7	8	9	10	11	12	14	15	17	21	27
	70	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8	9	10	11	13	14	16	20	26
	80	1	1	2	3	3	4	4	5	6	6	7	7	8	9	10	12	13	15	19	25
	90	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	11	12	14	18	24

Fig.3.3 Tabella di correlazione fra temperatura e umidità dell'aria ed umidità del legno

[62]

3.2 I “difetti”

Le proprietà meccaniche possono essere ridotte a cause della presenza dei difetti del legno, essi sono diversi e portano differenti problemi. Un accrescimento differente degli anelli, chiamato cipollatura, dovuto alle diverse condizioni climatiche negli anni può portare ad un distacco parziale o totale tra le due zone; tale difetto ha delle grosse ripercussioni durante il ritiro (fig. 3.4).

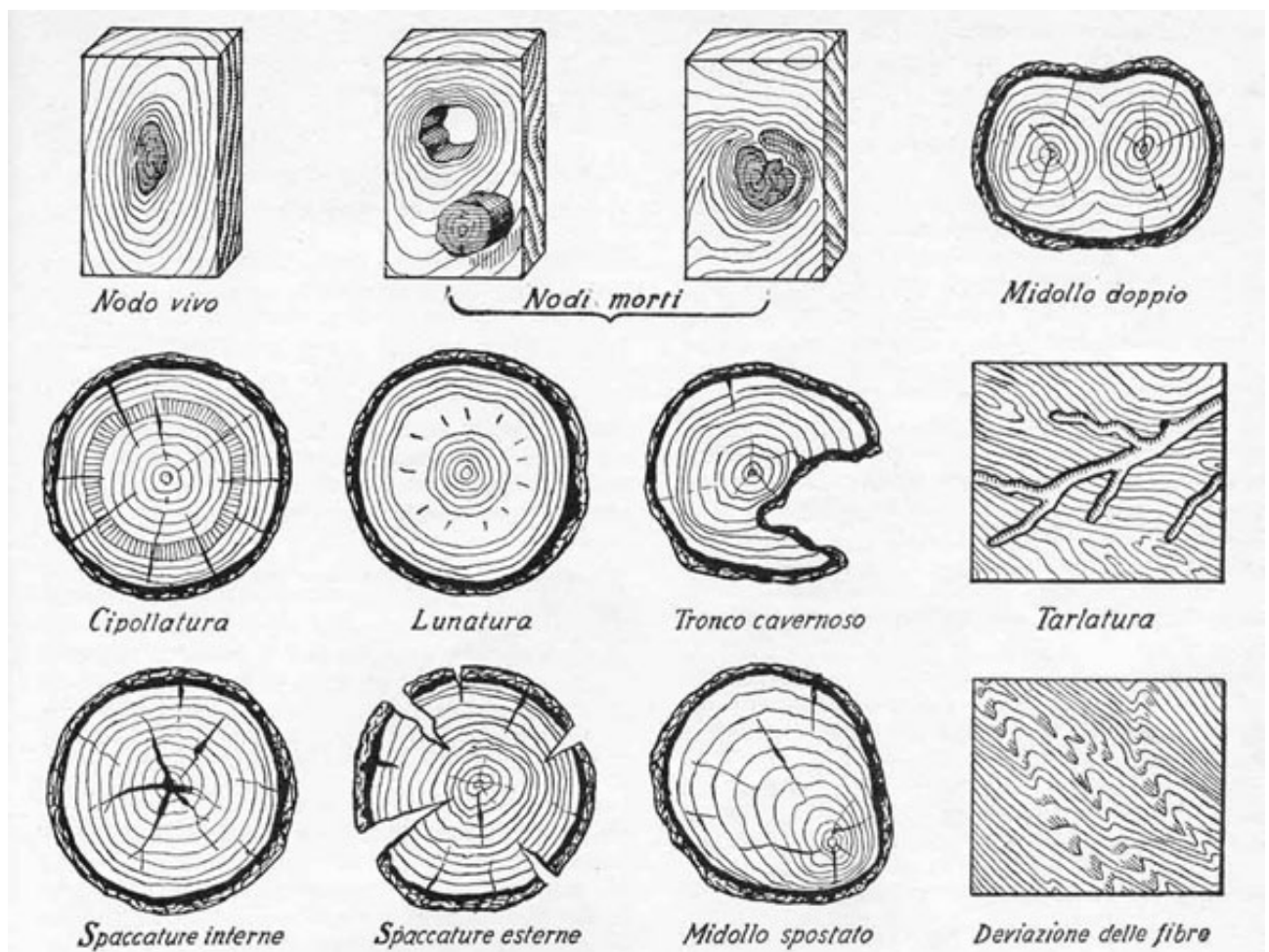


Fig. 3.4 Immagine relativa ai possibili difetti del legno [63]

Un altro elemento che provoca un serio deprezzamento dei tronchi è costituito dalle lesioni che interrompono la continuità dei tessuti, in quanto portano alla riduzione della sezione resistente. Tra le lesioni più comuni si annoverano le fratture da vento, che senza portare alla stroncatura del fusto hanno tuttavia provocato la rottura delle fibre lungo una porzione di

sezione trasversale e le tasche di resina, cioè cavità schiacciate fra due anelli successivi che provocano anch' essi un' interruzione di continuità fra i tessuti.

Un difetto molto frequente nei fusti provenienti da foreste d'alta quota o soggette a forti venti è quello della fibratura elicoidale, cioè le fibre dell'albero non seguono con il loro allineamento una direzione rettilinea e parallela all'asse midollare ma si susseguono secondo un'elica (fig. 3.5) . E' facilmente intuibile quale forte decremento delle caratteristiche di resistenza meccanica derivi da tale difetto in quanto tale deviazione porta a dalle fenditure e fessurazioni del materiale.

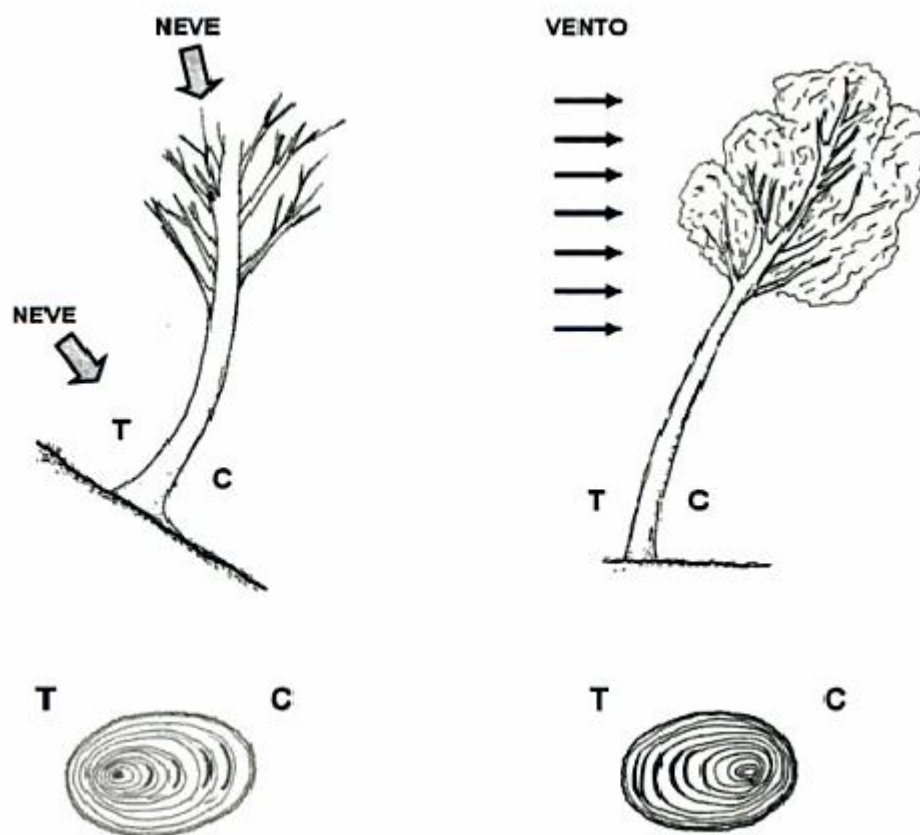


Fig.3. 5 Tronco sottoposto a vento e neve che fanno “deviare” la fibratura e danno origine al cosiddetto legno di “reazione” [56]

In precedenza si è accennato al fatto che il vento persistente porti a delle deformazioni nell'andamento assiale del fusto e nella forma delle sezioni trasversali, un analogo effetto

viene provocato nella parte basale dei fusti arborei radicati sui rapidi pendii dove la neve rimane per mesi. Tale difetto di forma è accompagnato da mutamenti strutturali e di costituzione chimica nelle pareti cellulari per effetto di reazione a stimoli meccanici di lunga durata (fig. 3.5). Di fronte a tali sollecitazioni le conifere e le latifoglie si comportano in modo del tutto opposto in quanto nelle prime il legno di reazione si presenta nella parte del fusto che per effetto della sollecitazione è sottoposta a compressione per cui il legno anomalo prende il nome di legno di compressione. Invece nelle latifoglie il legno di reazione viene formato nella parte del fusto che si trova in trazione pertanto questo prende il nome di legno di trazione.

Infine si annoverano fra i difetti i nodi (fig.3. 6) anche se considerarli come un difetto dell'albero è senz'altro un controsenso in quanto con tale denominazione si indicano le inserzioni dei rami nei fusti e non esistono alberi di conifere o latifoglie senza rami. Comunque quel che è certo è che la presenza dei nodi porta ad uno scadimento del valore del tronco sotto tre diversi punti di vista. Il primo è quello estetico in quanto nelle superfici longitudinali sia delle travi che delle tavole i nodi appaiono di colore diverso dal legno circostante e spesso si presentano in essi delle fessurazioni. Il secondo elemento sfavorevole è dovuto alla durezza del legno dei rami, generalmente più elevata di quella del legno del fusto: ne consegue una maggiore difficoltà delle lavorazioni. Per quanto concerne infine gli impieghi costruttivi del legno, la presenza in esso dei nodi rappresenta infine una menomazione che può pregiudicare seriamente le resistenze meccaniche.



Fig. 3.6 *Immagine rappresentativa di un nodo*[64]

3.3 Il biodegradamento

Il legno, per la sua costituzione chimica, è soggetto sia ad attacchi ambientali in cui si realizzano condizioni atte ad alterare la natura del materiale a detrimento delle proprie funzioni meccaniche (attacchi abiotici), sia ad attacchi distruttivi da parte di organismi viventi che lo utilizzano come nutrimento o abitazione (attacchi biotici). Gli effetti degli attacchi abiotici sul legno, ad eccezione dell'azione del fuoco che sarà considerata in un capitolo apposito, non compromettono di per sé in maniera grave le funzioni strutturali dei manufatti lignei, ma devono essere comunque tenuti in considerazione anche perché possono essere causa di innesco per altri tipi di degrado, non ultimi quelli di tipo biotico. Il legno è generalmente molto resistente agli attacchi chimici, risulta esserlo in particolare nei confronti degli acidi, tuttavia è molto sensibile agli alcali che demoliscono sia la lignina che le emicellulose ed all'azione dei sali di ferro in presenza di umidità che possono favorire la degradazione idrolitica del legno con la comparsa di macchie bluastre. L'azione dei raggi solari, combinata con quella dell'umidità, della temperatura, del vento e della pioggia, dà luogo ad un complesso di fenomeni definiti come invecchiamento per fotolisi.

L'aspetto da considerare con più attenzione è il degrado superficiale, collegabile all'energia raggiante soprattutto alle alte frequenze (UV), che implica la demolizione sia della lignina che della cellulosa. Molti organismi eterotrofi, cioè incapaci di sintetizzare zuccheri, sfruttano le sostanze nutritive prodotte dalle piante verdi. In particolare alcuni di questi organismi, funghi e batteri, demoliscono la cellulosa in zuccheri, altri, insetti, sfruttano tale fenomeno dando luogo a colonizzazioni delle parti lignee delle piante e dei manufatti. In generale è il materiale stesso che offre un certo grado di resistenza nei confronti di tali attacchi. Si può affermare che è opinione comune il fatto che il legno posto in opera in ambiente umido è destinato a marcire, ma tale opinione andrebbe corretta in quanto è vero che l'ambiente umido è favorevole alla degradazione del legno, ma questa avviene a causa dell'azione esercitata da funghi e batteri. La riproduzione dei funghi avviene tramite spore, che avendo piccolissime dimensioni, sono facilmente trasportabili dal vento. La prima fase di sviluppo susseguente alla germinazione delle spore è accompagnata da un cambiamento del colore normale del legno, si parla allora di semplice alterazione cromatica del legno che in alcuni casi può non implicare una diminuzione di resistenza ma costituire un semplice danno estetico. Viceversa spesso detta alterazione indica un attacco assai più

avanzato che proseguirà fino alla vera distruzione che potrà apparire in forme molto diverse: carie bruna, carie bianca, carie a cubetti e carie alveolare. Un materiale ridotto in questo stato non può svolgere alcuna funzione portante e dunque è necessario prevenire l'attacco di questi funghi xilofagi. Poiché non è possibile eliminare le spore fungine dall'aria gli interventi possibili sono due: assicurarsi che nel legno vi sia un'umidità così modesta da non favorire la germinazione delle spore e trattare superficialmente il legno con antisettici capaci di impedire la germinazione, tali prodotti devono poter penetrare nell'interno delle cavità cellulari prossime alle superfici a contatto con l'aria e non devono essere né dilavabili e né chimicamente instabili.

Altri microorganismi parassiti degli alberi sono i batteri che comportano nei fusti che li ospitano deformazioni ipertrofiche con contemporanee alterazioni dei tessuti. L'accertare se un legno è attaccato da batteri è cosa che sfugge all'osservazione oculare diretta e per tale motivo presenta notevoli difficoltà pratiche. Per la prevenzione da ipotetici attacchi si possono dare solo indicazioni di massima come non lasciare i tronchi abbattuti esposti alle intemperie e soprattutto alla neve, provvedere subito alla segatura ed all'essiccazione artificiale, adoperare antisettici di sicura efficacia ed una messa in opera in ambienti non umidi e nei quali non siano da temere le infiltrazioni d'acqua. Gli insetti che attaccano il legno determinandone una distruzione più o meno avanzata sono correntemente chiamati tarli, anzi talvolta si sente parlare proprio del tarlo del legno. Tale denominazione del tutto generica copre, anche solo limitandoci alla sola Italia, parecchie di decine di specie diversissime tra loro per aspetto, dimensioni, modalità di attacco ed altro ancora. Scientificamente si fa anche per gli insetti una distinzione fra saprofiti e parassiti. Per questi ultimi si può affermare che generalmente non peggiorano la situazione del legname una volta posto in opera in quanto non riescono a compiere tutto il loro ciclo biologico a causa della bassa percentuale di umidità dovuta alla stagionatura. Per entrambe le specie è necessario specificare che il primo metodo per evitare le infestazioni è la preclusione da parte degli insetti adulti dell'accesso al legno, in tal modo si impedisce la deposizione delle uova. Infine anche alcuni crostacei e molluschi sono in grado di infliggere pesanti degradazioni al materiale legno, che si trova ovviamente immerso in acqua marina. Pertanto le prestazioni di un elemento strutturale in legno sono fortemente condizionate dalla presenza e dalla posizione di eventuali difetti ed attacchi biotici.

3.4 La classificazione

Per le esigenze delle progettazione strutturale non interessa la classificazione di resistenza del materiale netto quanto dell'elemento strutturale in dimensioni d'uso. Le normative relative alla classificazione indicano le caratteristiche che l'elemento strutturale deve possedere per appartenere ad una determinata "classe di resistenza" e i difetti ammissibili nelle diverse classi. I metodi di classificazione possono essere a vista (EN 518- Legno strutturale. Classificazione. Requisiti per le norme di classificazione a vista secondo la resistenza) o a macchina (EN 519- Legno strutturale. Classificazione. Requisiti per le norme di classificazione con macchina e macchine di classificazione) : lo scopo è l'attribuzione del singolo elemento ad una delle classi di resistenza definite, per quanto riguarda il legno massiccio. Entrambe le metodologie di classificazione, se correttamente adottate, permettono un razionale impiego del legno massiccio con minor ricorso al sovradimensionamento in fase progettuale. Le principali caratteristiche prese in considerazione da una norma di classificazione a vista sono:

- L'ampiezza media degli anelli di accrescimento
- La massa volumica
- La tipologia, posizione, frequenza e dimensione dei difetti

Tale metodo di classificazione richiede personale esperto e qualificato e comporta una sottostima dei segati di legno migliori, comunque è ampiamente consolidato dall'esperienza, da molti riscontri di prove meccaniche ed ha avuto larga diffusione su scala mondiale. Le regole di classificazione sono diverse nei vari paesi, in funzione delle tipologie legnose, delle tradizioni nella lavorazione e delle tecniche costruttive, ma seguono necessariamente gli stessi principi espressi, in sede europea, dalla EN 518. Per il legname strutturale italiano le UNI 11035:2003 (Classi di resistenza per legno massiccio di provenienza italiana) fissano le regole da adottare per effettuare la classificazione a vista. La classificazione a macchina si basa, invece, su criteri oggettivi che prendono in considerazione le reali prestazioni meccaniche dell'elemento. La macchina classificatrice misura quindi, attraverso prove non distruttive statiche o dinamiche, parametri prestazionali attribuendo automaticamente ad ogni pezzo una classe di resistenza normalizzata evidenziata mediante apposita marcatura. Il controllo finale del pezzo si rende necessario per individuare quei

difetti (funghi, insetti, nodi o fessurazioni) di cui la macchina può non aver rilevato l'esistenza sulla prestazione. Si evince che la classificazione a vista può comunque bastare anche da sola ai fini della classificazione strutturale, mentre la classificazione a macchina, seppure basata su misurazioni delle proprietà meccaniche, deve essere comunque integrata da quella visuale. La classificazione a macchina è veloce ed efficiente ma richiede macchinari costosi e personale qualificato.

Tabella 1.11 Classi di resistenza secondo prEN 338:2002, per legno di conifere e di pioppo

Valori caratteristici di resistenza e modulo elastico		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistenze (MPa)													
flessione	$f_{m,d}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,d}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,d}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,d}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,d}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
taglio	$f_{v,d}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Modulo elastico (GPa)													
modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
modulo di taglio medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volumica (kg/m³)													
massa volumica caratteristica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
massa volumica media	ρ_n	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Nota:

- I valori assegnati in tabella per la resistenza a trazione, a compressione, a taglio, il modulo di elasticità caratteristico parallelo alle fibre, il modulo di elasticità medio parallelo alle fibre, ed il modulo di taglio medio, sono stati calcolati utilizzando le relazioni fornite in tabella 1.13
 - La proprietà tabellate sono compatibili con legname in equilibrio igroscopico in un ambiente a 20 °C, e ad una umidità relativa pari al 65%.
 - Legname di classe C45 e C50 può essere, naturalmente, di non facile reperibilità.
- NB: La norma è in corso di revisione, in particolare per i valori da assegnare a $f_{t,90,d}$ e $f_{c,90,d}$

Fig.3.7 Classificazione legno di conifere [56]

Tabella 1.12 Classi di resistenza secondo prEN 338:2002, per legno di latifoglie (escluso pioppo)

Valori caratteristici di resistenza e modulo elastico		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Resistenze (MPa)							
flessione	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
trazione parallela alla fibratura	$f_{t,k}$	18	21	24	30	36	42
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,k}$	23	25	26	29	32	34
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
taglio	$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Modulo elastico (GPa)							
modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	10	10	11	14	17	20
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
modulo di taglio medio	G_{mean}	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Massa volumica (kg/m³)							
massa volumica caratteristica	ρ_k	530	560	590	650	700	900
massa volumica media	ρ_m	640	670	700	780	840	1080

NB: La norma è in corso di revisione, in particolare per i valori da assegnare a $f_{c,90,k}$ e $f_{c,00,k}$

Fig.3.8 Classificazione legno di latifoglie [56]

Capitolo 4. Il software : LS-Dyna

4.1 Introduzione

Le simulazioni numeriche permettono di risolvere problemi complessi, difficilmente risolvibili per via analitica, attraverso un modello matematico che riproduce il problema reale. Insieme all'analisi teorica e alla sperimentazione rappresenta la terza colonna portante delle scienze e dell'ingegneria. Il metodo degli elementi finiti (Finite Element Method) è una procedura numerica per l'analisi di strutture e di continui, che può essere applicato ad una moltitudine di problemi nel campo dell'ingegneria: analisi degli sforzi, conduzione del calore, campi elettromagnetici, flusso dei fluidi e diverse altre aree. Il metodo FE è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche. Tuttavia gli errori sono decrescenti man mano che il numero delle equazioni cresce e sono ottenibili a costi ragionevoli risultati sufficientemente accurati per gli scopi ingegneristici.

Questo metodo nasce intorno al 1930-35 finalizzato alla risoluzione di problemi complessi di analisi elastica e strutturale nel campo dell'ingegneria civile ed aeronautica.

Il concetto base è la discretizzazione, infatti in generale, si modella una struttura come assemblaggio di piccole parti (elementi), ciascuna delle quali è di geometria semplice e pertanto, è molto più facile da studiare rispetto alla struttura reale. In conclusione, si approssima una soluzione complicata con un modello che consiste in soluzioni semplici. Gli elementi sono chiamati "finiti" per distinguerli dagli elementi differenziali utilizzati nei calcoli.

La potenza del metodo risiede principalmente nella sua versatilità. Infatti può, come detto precedentemente, essere applicato a svariati problemi fisici. Il corpo da analizzare può avere forma, carichi e condizioni di vincolo arbitrarie, la mesh può essere fatta con un mix di elementi di diverso tipo (fig.4.1), di diversa forma e di diverse proprietà fisiche. I dati di input preparati dall'utente controllano la scelta del tipo di problema, la geometria, le condizioni al

contorno e la scelta dell'elemento. Inoltre esiste una stretta rassomiglianza fisica tra la struttura reale e il suo modello agli elementi finiti. Il modello non è più una semplice astrazione. Questo risulta particolarmente vero nella meccanica delle strutture.

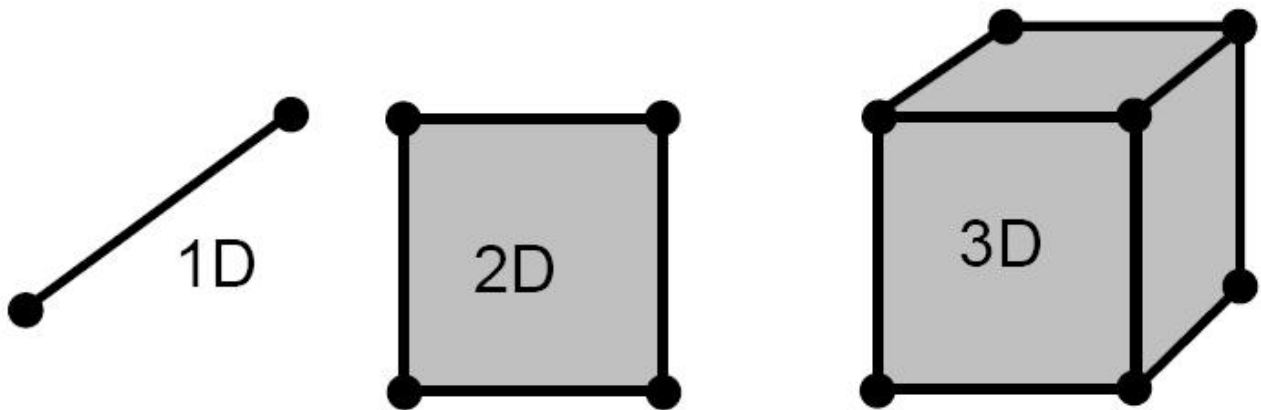


Fig.4.1 Esempio dei diversi elementi utilizzabile per l'analisi agli elementi finiti [65]

In generale esistono diverse metodologie risolutive che possono essere riassunte in:

- 1) Metodo diretto che sfrutta il principio dei lavori virtuali;
- 2) Metodo del minimo dell'energia potenziale totale (metodo di Ritz);
- 3) Metodo dei residui pesati (metodo di Galerkin).

Nel caso delle strutture, si utilizzano i primi due, che vengono di seguito riassunti. Per ciascun elemento si definisce un modello di “spostamento”, cioè si ipotizza che lo spostamento di un qualsiasi punto appartenente all'elemento sia una funzione lineare degli spostamenti dei nodi appartenenti solo allo stesso elemento. Successivamente si creano per ciascun di essi le funzioni delle deformazioni e degli sforzi e per fare ciò è necessario definire la matrice

caratteristica, che nel caso specifico delle strutture prende il nome di matrice di rigidezza. La costruzione di tale matrice dipende dal metodo risolutivo adottato.

Si riporta l'esempio di una barra dritta, priva di peso, di lunghezza L (fig. 4.2), di modulo elastico E , di sezione trasversale A . Si consideri la barra come un elemento finito e si ponga un nodo ad ogni estremo. Se sono consentiti solamente carichi assiali e spostamenti assiali, i gradi di libertà nodali sono gli spostamenti u_i e u_j dei nodi i e j . La matrice di rigidezza dell'elemento si formula con il metodo diretto determinando le forze nodali che devono essere applicate allo scopo di produrre gli spostamenti u_i e u_j .

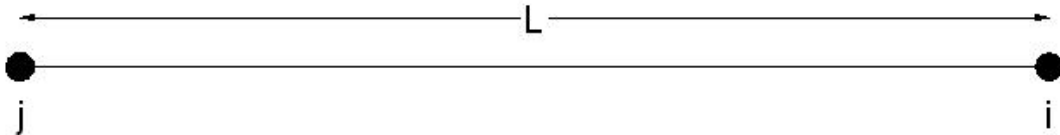


Fig.4.2 Esempio del calcolo della matrice di rigidezza per un'asta di lunghezza L

La convenzione di segno è che sia la forza che lo spostamento sono positivi quando sono diretti verso destra. Di conseguenza quando $u_i > 0$ ma $u_j = 0$, le forze nodali coerenti con l'equilibrio statico e l'ipotesi di materiale elastico lineare sono:

$$F_i = \frac{AE}{L} u_i \quad \text{e} \quad F_j = -\frac{AE}{L} u_i \quad (1)$$

In modo analogo quando $u_i = 0$ ma $u_j > 0$,

$$F_i = -\frac{AE}{L} u_j \quad \text{e} \quad F_j = \frac{AE}{L} u_j \quad (2)$$

Se sia u_i che u_j sono contemporaneamente non nulli allora le forze nodali valgono

$$F_i = (AE/L)(u_i - u_j) \quad (3)$$

$$F_j = (AE/L)(-u_i + u_j) \quad (4)$$

In forma matriciale queste due equazioni risultano

$$\begin{bmatrix} AE/L & -AE/L \\ -AE/L & AE/L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \end{Bmatrix} \quad (5)$$

o in forma compatta

$$[\mathbf{k}]\{\mathbf{d}\} = \{\mathbf{r}\} \quad (6)$$

dove $[\mathbf{k}]$ è la matrice di rigidezza dell'elemento.

Considerando prima $u_i = 1$ e $u_j = 0$, e poi $u_i = 0$ e $u_j = 1$, ciascuna volta calcolando le forze nodali F_i e F_j per mezzo della moltiplicazione matrice per vettore indicata nell'Eq. 5 si arriva alla seguente conclusione: la colonna della matrice $[\mathbf{k}]$ elenca i carichi nodali che devono essere applicati ai nodi, allo scopo di creare lo stato di deformazione associato con il valore unitario del corrispondente grado di libertà dell'elemento, mentre tutti gli altri spostamenti dell'elemento sono nulli.

Con il metodo del minimo dell'energia potenziale totale invece, i passi seguiti per ottenere la matrice di rigidezza sono differenti. La deformazione assiale è pari a

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} = \frac{du}{ds} \quad (7)$$

$$\text{Ma} \quad u = \frac{L-s}{L}u_i + \frac{s}{L}u_j \quad \text{o} \quad u = [\mathbf{N}]\{\mathbf{d}\} \quad (8)$$

Pertanto sostituendo nell'Eq. 5 si ottiene:

$$\varepsilon_x = [\mathbf{B}]\{\mathbf{d}\} \quad \text{dove} \quad [\mathbf{B}] = \frac{d}{ds}[\mathbf{N}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

La matrice $[\mathbf{B}]$ è chiamata matrice deformazione - spostamento.

Dall' integrale dell'energia potenziale:

$$\Pi_p = \int_0^L (\frac{1}{2} E \varepsilon_x^2 - \varepsilon_x E \varepsilon_0 + \varepsilon_x \sigma_0) A dx - \int_0^L u F_x A dx - \{\mathbf{D}\}^T \{\mathbf{P}\} \quad (10)$$

Dove $dx = ds$, si evince che l'energia di deformazione in un elemento vale:

$$U = \int_0^L \frac{1}{2} E \varepsilon_x^2 A ds = \frac{1}{2} \int_0^L \varepsilon_x^T A E \varepsilon_x ds \quad (11)$$

Sostituendo nell'Eq. 11 le espressioni contenute nell' Eq. 9 si ha :

$$U = \frac{1}{2} \{\mathbf{d}\}^T [\mathbf{k}] \{\mathbf{d}\}, \quad \text{dove} \quad [\mathbf{k}] = \int_0^L [\mathbf{B}]^T A E [\mathbf{B}] ds \quad (12)$$

Se AE è costante, la matrice di rigidezza $[k]$ dell'elemento, è la stessa dell' Eq. 5 ricavata con il metodo diretto.

Una volta ricavata la matrice di rigidezza e noti i vincoli, le condizioni iniziali e i vari carichi, è possibile risolvere un sistema di equazioni lineari o non lineari dal quale si estrapolano i risultati nodali, nel caso specifico delle strutture si ottengono gli spostamenti dei nodi di ogni singolo elemento e da questi valori si possono ottenere le altre varie grandezze che possono essere utili.

4.2 Caratteristiche

LS-Dyna è un codice di calcolo, nato nella metà degli anni '70, che risulta particolarmente adatto per simulare ed analizzare fenomeni fisici altamente non lineari derivanti da problemi propri del mondo reale. Tali problemi sono generalmente caratterizzati da grandi deformazioni, contatti a breve durata, come ad esempio i fenomeni di crash. Per la stabilità e la robustezza numerica del solutore, per l'accuratezza dei risultati e per i tempi di calcolo fortemente ridotti è largamente impiegato e riconosciuto a livello mondiale come codice di calcolo di riferimento per le analisi di crash, drop test ed impatto. Ls-Dyna è un codice agli elementi finiti multidisciplinare. Il concetto di base, come detto precedentemente, su cui si fonda l'analisi degli elementi finiti è la discretizzazione, cioè il modello viene suddiviso in parti, in modo da poter studiare il corpo con un numero finito di elementi, ognuno di questi possiede un numero

prefissato di nodi attraverso i quali è legato agli elementi adiacenti. Si assume per i nodi, e di conseguenza anche per gli elementi, la formulazione lagrangiana, cioè si sceglie un sistema di riferimento e si riferiscono sempre tutte le grandezze a quel riferimento. Pertanto se chiamiamo coordinate materiali le coordinate X del riferimento, la posizione assunta nel generico istante t dal punto materiale, cioè le sue coordinate spaziali x , sono date da:

$x = x(X, t)$ dove x è la posizione assunta all'istante t dal punto che nella configurazione di riferimento si trovava in X . In questo modo si ottiene una descrizione storica del moto in quanto, nota la posizione iniziale, si può ricostruire la storia cinetica di ogni punto.

La rappresentazione delle entità del modello avviene attraverso elementi finiti di tipo isoparametrico. In questi sia lo spostamento che le coordinate di un punto generico si calcolano mediante interpolazione con delle funzioni di forma dei valori ottenuti ai nodi.

Le funzioni di forma permettono di calcolare la posizione e lo spostamento del generico punto in un elemento caratterizzato da n nodi, in funzione dei valori assunti in questi ultimi. Tali funzioni, sono in numero pari a quello dei nodi posseduti dall'elemento, si calcolano in un sistema di coordinate naturali, generalmente indicate con ξ, η, ζ che hanno la caratteristica di assumere valori compresi tra -1 e $+1$ (fig.4.3).

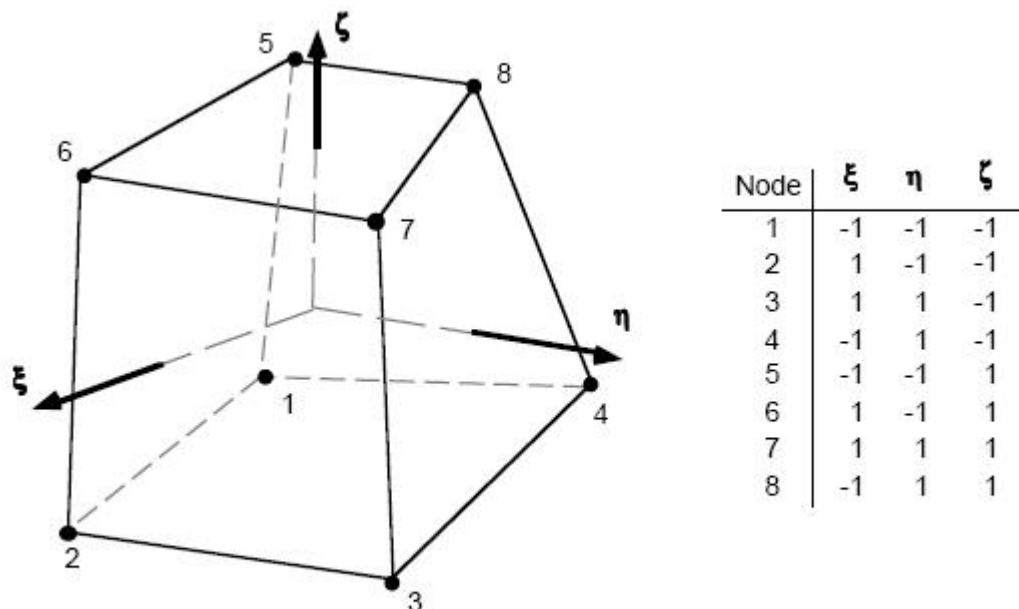


Fig.4.3 *Rappresentazione dell'elemento solido con indicazione della terna di riferimento delle funzioni di forma [11]*

L'espressione delle funzioni di forma dipendono dal tipo di elemento scelto per il modello e dal numero dei suoi nodi. Infatti per gli elementi finiti in coordinate generalizzate lo spostamento in un punto qualsiasi dell'elemento è espresso in funzione delle coordinate locali in una forma polinomiale, le cui incognite, le coordinate generalizzate, sono combinazioni lineari degli spostamenti nodali.

Le equazioni del moto sono sempre espresse attraverso il Principio dei Lavori Virtuali.

La metodologia risolutiva principale del software è fondata sull'integrazione esplicita, anche se è disponibile l'integrazione implicita ma con capacità molto limitate tra cui l'analisi strutturale e di trasferimento di calore. Lo schema di integrazione dei codici di tipo esplicito è generalmente basato sul metodo delle differenze centrali, permette tempi di calcolo molto ridotti rispetto all'integrazione implicita in quanto non effettua l'inversione della matrice di rigidezza ad ogni iterazione di calcolo e non controlla la convergenza, di contro è necessario dare piccoli intervalli di integrazione, inferiori al passo critico, che per definizione è pari al tempo necessario ad un'onda d'urto per attraversare l'elemento più piccolo del modello, è inoltre possibile avere instabilità numerica.

Nell' algoritmo di calcolo "esplicito" l'equazione del moto espressa come di seguito:

$$Ma_j + Cv_j + Kd_j = F_j^{ext} \quad (13)$$

dove:

M = matrice di massa della struttura

C = matrice di smorzamento della struttura

K = matrice di rigidezza della struttura

F_j^{ext} = vettore dei carichi esterni applicati alla struttura

a_j = accelerazioni allo step j-iesimo

v_j = velocità allo step j-iesimo

d_j = spostamenti allo step j-iesimo;

può essere riscritta nel seguente modo:

$$Ma_j = F_j^{ext} + F_j^{int} \quad (14)$$

dove: $Cv_j + Kd_j = F_j^{int}$ (15)

perciò l'accelerazione all'incremento n è pari a:

$$a_j = M^{-1} F_j^{residue} \quad (16)$$

Spesso per maggiore efficienza lo schema adottato utilizza masse concentrate nei nodi, in questo modo la matrice di massa diventa diagonale e le equazioni del sistema risolutivo si disaccoppiano, così da originare tante equazioni scalari quanti sono i gradi di libertà del sistema, tutte indipendenti tra di loro.

Se la matrice di massa è diagonale, è possibile calcolare l'accelerazione per ogni incremento e per ogni grado di libertà tramite un sistema di equazioni indipendenti:

$$a_{ji} = M_i^{-1} F_{ji}^{residue} \quad (17)$$

Le equazioni di equilibrio ai nodi vengono scritte in modo che siano noti sia lo spostamento che la velocità, affinché una volta calcolata l'accelerazione si possa passare allo step di tempo successivo. Le integrazioni si eseguono nello spazio delle coordinate naturali, per via numerica con un metodo alla Gauss.

L'integrazione numerica consiste nella sostituzione della funzione integranda con un polinomio di ordine $n-1$ che interpola la funzione data in un numero n di punti in cui le due coincidono. La funzione viene successivamente integrata in maniera esatta, rimane però l'errore legato all'approssimazione della funzione con il polinomio e al numero e alla posizione dei punti utilizzati.

Essendo i termini della matrice di massa fuori della diagonale molto minori di quelli in diagonale, non si commette un grave errore se si concentrano le masse attribuendo tutta la massa all'elemento diagonale. Questo viene fatto annullando i termini fuori della diagonale, e sommando i contributi degli elementi di una riga al termine diagonale. Viene quindi introdotta la possibilità di risolvere il sistema separatamente per ogni grado di libertà senza dover fattorizzare alcuna matrice.

Questa tipologia di programmi utilizza generalmente un solo punto di integrazione al centro dell'elemento, questo comporta una diminuzione sensibile dei tempi di calcolo, contemporaneamente si crea l'eventualità che nascano i cosiddetti modi di hourglass, cioè i modi ad energia nulla. Lo sviluppo di tali modi deve essere opportunamente controllato per evitare di compromettere i risultati del calcolo. Inoltre, accettando l'integrazione in un solo punto per elemento si approssima lo stato di sforzo come costante e pari al valore medio su tutto l'elemento.

I modi di deformazione che sono legati a sforzi a media nulla nell'elemento, poiché non possiedono nessun elemento di rigidità, possono crescere molto velocemente e propagarsi per tutto il modello. Questi modi sono detti ad energia nulla, perché essendo ortogonali ai modi di deformazione reali, non danno contributo all'energia interna, oppure modi a clessidra per la loro caratteristica forma.

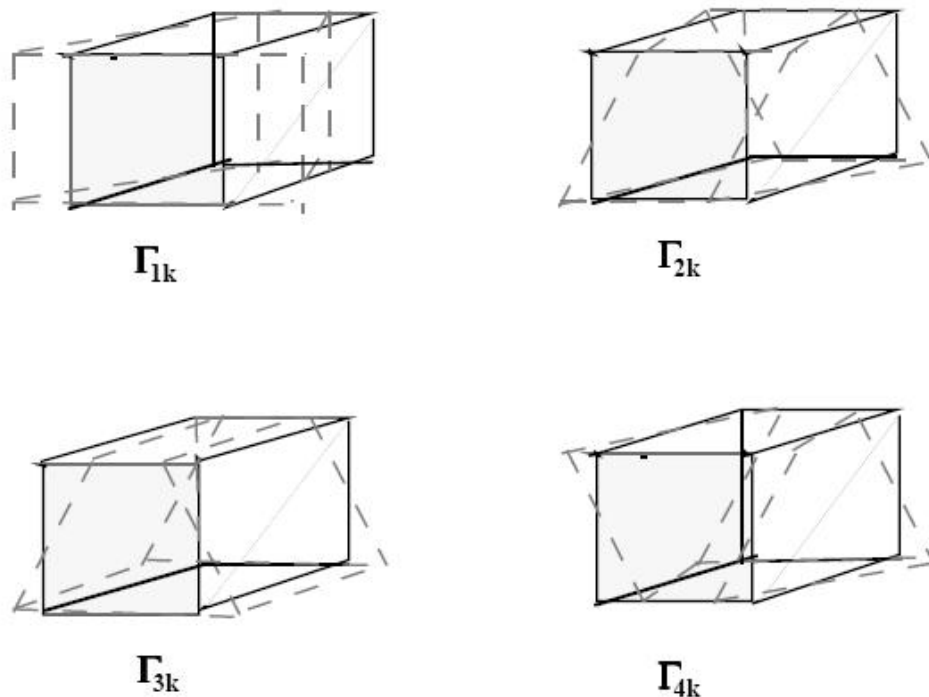


Fig.4.4 Rappresentazione di alcuni modi di hourglass per l'elemento solido [11]

La presenza del fenomeno dell'hourglass, portando ad una deformazione anomala alcuni elementi, ha come conseguenza una minore precisione di calcolo.. Lo sviluppo incontrollato di tali modi può arrivare alla necessità di interrompere la simulazione quando la lunghezza di un

lato di un elemento si annulla. Si può tentare di risolvere il problema infittendo la mesh, abbassando di conseguenza anche lo step di calcolo, e non applicando carichi concentrati nei singoli nodi. Il programma prevede la possibilità di controllare l'hourglass, infatti si applicano quando necessario delle forze fittizie di tipo viscoso che smorzano i modi a clessidra senza condizionare la risoluzione numerica. L'utilizzo delle forze fittizie di tipo viscoso, ha a sua volta delle ripercussioni energetiche, infatti si verificano perdite che fisicamente non hanno significato, in quanto non si riscontrano nella realtà, e permettono che il modello non rispetti il principio di conservazione dell'energia. Durante la risoluzione è opportuno verificare che le perdite energetiche siano contenute entro circa il 10% e se sono superiori sospendere la simulazione.

Poiché l'oggetto di questa ricerca sono le barriere di sicurezza stradali che sono sottoposte a prove di crash, è necessario trattare l'argomento contatti. Infatti durante l'urto due corpi che prima erano separati si ritrovano a contatto e le loro equazioni del moto sono accoppiate, è necessario modellare la tipologia di contatto che essenzialmente dipende dai corpi in esame. Esistono diverse tipologie di algoritmi per i contatti, quello che si utilizza fra corpi solidi in genere è il tipo "penalty".

Il metodo consiste nel mettere delle molle normali all'interfaccia tra nodi penetranti e la superficie di contatto; la quantità di moto è conservata senza la necessità di imporre condizioni di impatto e di rilascio e non è richiesta nessuna implementazione speciale per le interfacce che si intersecano, semplificando notevolmente in questo modo la modellazione. La rigidità dell'interfaccia è scelta per essere approssimativamente dello stesso ordine di grandezza della rigidità dell'elemento normale all'interfaccia, di conseguenza lo step di calcolo non è influenzato dalla presenza delle stesse. Questa tipologia di contatto è stato studiato in modo da far aumentare il meno possibile il fenomeno dell'hourglass, questo è indubbiamente attribuibile alla simmetria del metodo. Tuttavia, se le pressioni di interfaccia diventano grandi, può verificarsi una compenetrazione fra le stesse inaccettabile, occorre allora scalare la rigidità e ridurre lo step di calcolo, aumentando il tempo e il costo della risoluzione.

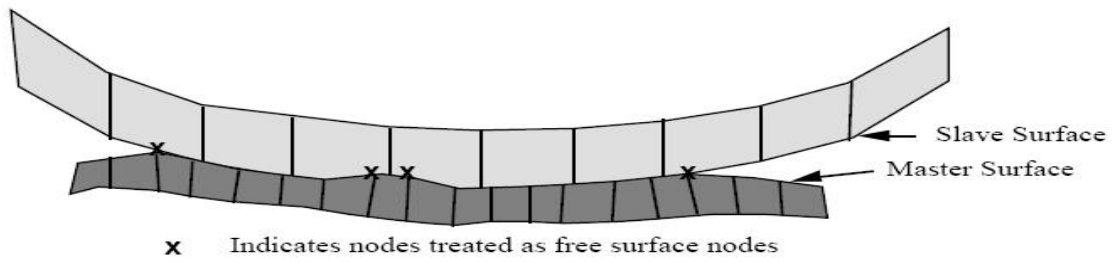


Fig.4.5 *Rappresentazione del contatto fra i nodi fra una “slave” e una “master surface” [11]*

Tutti i file di input di questo software sono file di testo, formati da “card “, cioè da righe che hanno ciascuna otto colonne che a loro volta sono caratterizzate da dieci caratteri. Tali file possono essere scritti direttamente dall’operatore esperto oppure si può utilizzare un’interfaccia grafica, più immediata, che è data da un software preparatore, chiamato preprocessore. Per il software LS-Dyna esiste un proprio preprocessore ma è possibile utilizzarne anche degli altri compatibili. Il discorso è analogo per la lettura dei risultati, infatti in tal caso occorre un post-processore che serve proprio per l’extrapolazione delle varie grandezza di interesse e permette anche la visione del filmato.

Capitolo 5. Preparazione del modello

5.1 Introduzione

Lo scopo della ricerca è studiare una nuova barriera di sicurezza costruita interamente in legno, da bordo laterale, verosimilmente di livello di contenimento normale N2. Questo significa che, per poter essere conforme ai requisiti della norma EN 1317, deve superare due tipologie di prove prescritte dalla stessa, la TB11 e la TB32. La prova denominata TB11 prevede che il test di crash venga effettuato con un veicolo di 900 kg, che impatta sul dispositivo con un angolo di 20° ed alla velocità di 100 km/h; mentre la TB32 prevede l'utilizzo di un veicolo con massa di 1500 kg che urta la barriera ad una velocità di 110 km/h e con angolo di 20°. In entrambi i casi si calcolano gli indici ASI e THIV, anche se la severità d'urto è generalmente maggiore per veicolo di massa minore. Nella tesi, lo studio si è concentrato sulla prova TB11 e sul calcolo dell'indice ASI; successivamente, poiché la ricerca è ancora in corso si prevede di effettuare la prova TB32.

Un nuovo dispositivo di ritenuta, per poter essere immesso nel mercato, deve sempre sostenere le prove di crash in scala reale, e in seguito a queste, si esegue la validazione sperimentale del modello.

Si riporta nella fig.4.1 la metodologia operativa seguita, dove in azzurro sono evidenziate le fasi portate avanti in questa ricerca.

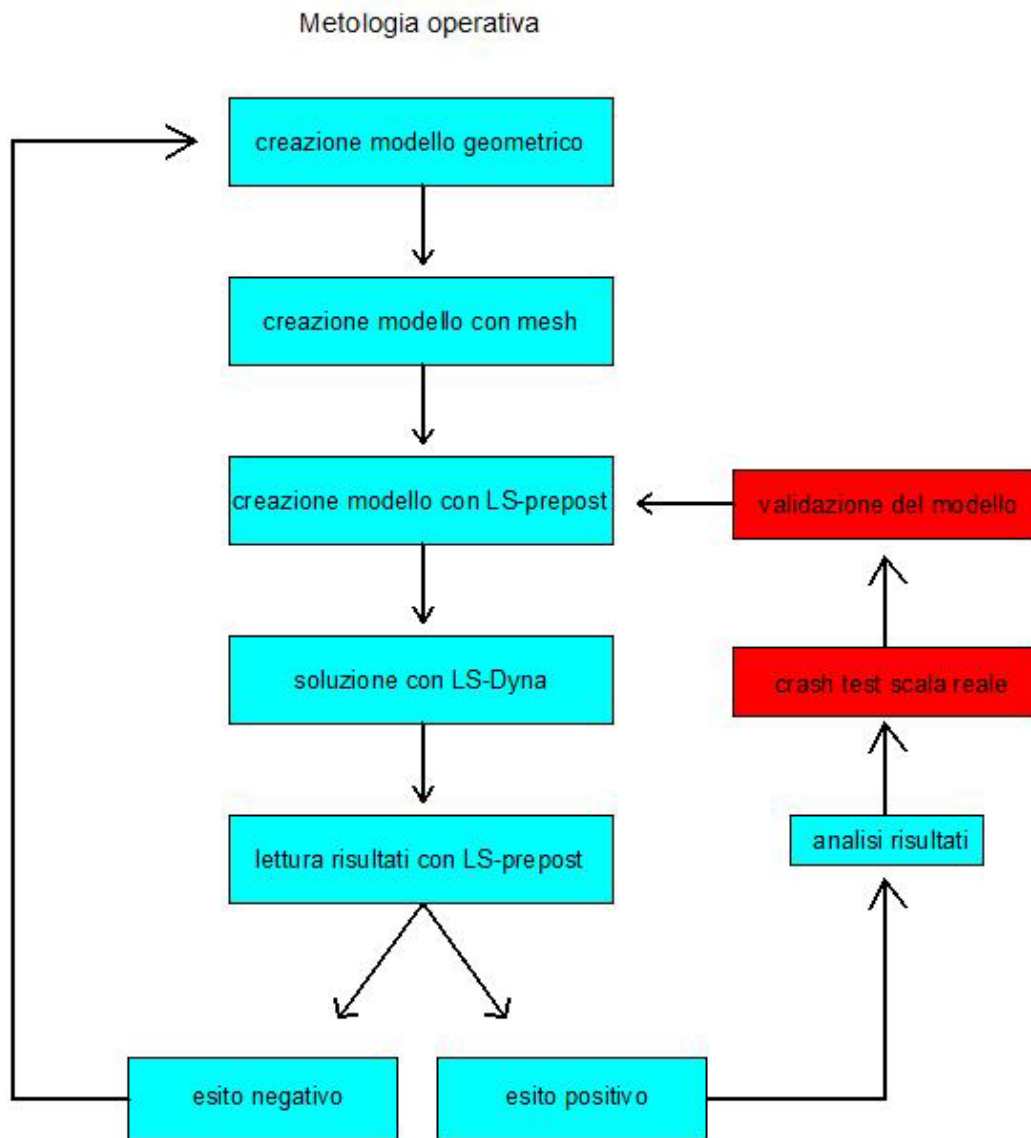


Fig.4.1 Metodologia operativa seguita

Per ogni simulazione effettuata si è reso necessario preparare un modello apposito partendo ogni volta dalla modellazione geometrica della barriera, che ha compreso la creazione di circa 100 metri della stessa. Infatti secondo la EN 1317-2 “la lunghezza della barriera di sicurezza deve essere sufficiente a dimostrare le piene caratteristiche del dispositivo”, ed ancora prescrive che “l’urto deve avvenire ad un terzo della lunghezza”. Pertanto si è ritenuta adeguata la lunghezza di circa 30 metri a monte dell’urto affinché fosse garantito che solo le forze longitudinali fossero trasmesse alla parte terminale, e questa ipotesi ha comportato

un'estensione minima della barriera pari a 90 metri. La modellazione è avvenuta attraverso varie fasi e diversi software che saranno di seguito elencati e spiegati.

5.2 Creazione del modello geometrico

La creazione del modello geometrico ha richiesto uno studio a monte sulla tipologia del legno utilizzabile e sulla sezione che potesse essere più idonea per soddisfare i requisiti richiesti. A tale riguardo è stato innanzitutto valutato l'utilizzo del legno lamellare o del legno massiccio.

Il legno lamellare è costituito da segati sovrapposti di spessore modesto, generalmente mai superiori ai 5 cm, uniti per mezzo di adesivi in grado di garantire resistenza e durabilità. Tale materiale, oltre a permettere forme e lunghezze non raggiungibili con il segato ad uso strutturale, ha un comportamento che si avvicina maggiormente ad un legno "ideale", cioè un legno privo di difetti. Infatti la suddivisione in tavole permette di scartare quelle con presenza di difetti di maggiore entità e quelle contenenti il midollo ed inoltre gli stessi non sono più concentrati, pertanto si ha un materiale con caratteristiche meccaniche più omogenee. Nonostante il legno lamellare presenti questi vantaggi rispetto al legno massiccio, esistono non poche difficoltà per la messa in opera all'aperto, quale è richiesta alle barriere di sicurezza stradali. Il problema maggiore che si può avere nel legno lamellare è la delaminazione, cioè a livello delle superfici di incollaggio si originano stati di coazione che danno luogo a separazioni tra le lamelle contigue. Nel legno posto in opera all'aperto, si verificano a seguito dei cambiamenti climatici delle variazioni dimensionali, che determinano anche se localmente parziali delaminazioni, inoltre si è appurato che gli stessi adesivi strutturali non assicurano nella realtà la durabilità richiesta, nonostante siano classificati di tipo I secondo la norma EN 301- "Adesivi fenolici e amminoplastici per strutture portanti di legno - Classificazione e requisiti prestazionali", quindi in grado di sopportare le esposizioni all'esterno. Pertanto si è preferito puntare sul legno massiccio, prediligendo la forma circolare, perché essendo la forma propria del tronco, risulta essere quella che nel tempo presenta una percentuale minore di fessure. La forma circolare della sezione in questo modo garantisce una maggiore durabilità dovuta al fatto che l'acqua piovana non riesce ad insinuarsi facilmente nelle fessure dovute all'essiccazione del materiale. Per di più la stessa è gradevole dal punto di vista estetico, che non può essere un

fattore trascurabile, in quanto la destinazione principe di tale tipologia di barriere in legno sono le strade con particolare valenza paesaggistica.

Pertanto ogni modello creato ha le sezioni dei montanti e quelle dei nastri circolari. Le differenze tra i vari modelli sono dovute :

- 1) alle disposizione dei reciproci interassi dei montanti e dei nastri;
- 2) alle dimensioni delle sezioni dei nastri e dei montanti.

La creazione puramente geometrica del modello è stata fatta con un software CAD 3D chiamato Solidworks, che permette di ricreare direttamente il modello tridimensionale in ogni sua parte, e successivamente ottenere l'assemblaggio in un unico file rigorosamente con estensione *.iges. La scelta di utilizzare questo programma al posto di altri software CAD, magari più comuni ed utilizzati, è essenzialmente legata all'estensione del file in uscita, infatti Ls-Dyna, come molti altri programmi FEM e non solo, leggono solo questo formato per introdurre la geometria.

La modellazione CAD è avvenuta come in qualsiasi altro software; essenzialmente la difficoltà di questa fase è stata nel progettare, quindi immaginare il comportamento e successivamente nel ricreare fisicamente la barriera. Inoltre la precisione e minuziosità dei particolari, soprattutto nei giunti, hanno reso molto laboriosa e dispendiosa questa parte che ha richiesto una grande quantità di tempo per l'elaborazione.

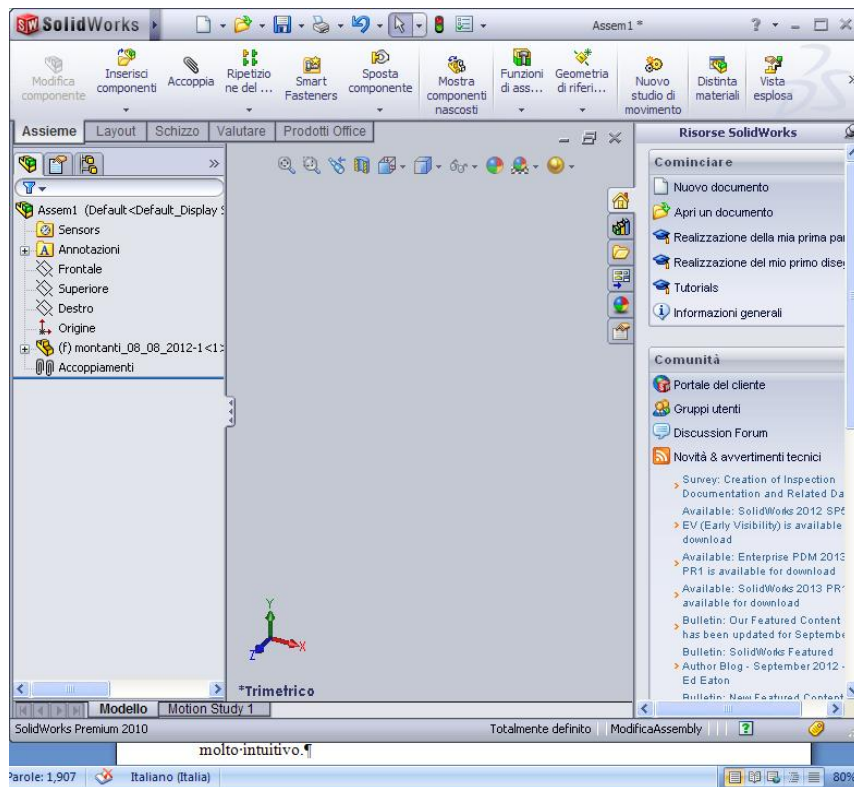


Fig.4.2 Schermata di Solidworks

Sono stati costruiti i montanti ed i nastri separatamente, come “parti” , e successivamente posizionati reciprocamente formando la barriera in un altro file chiamato “insieme”. Ovviamente la costruzione del modello è iniziata con la scelta della tipologia di sezione in esame, partendo dal 2D, successivamente, attraverso la funzione di estrusione si è passati al modello 3D. In seguito sono stati scelti gli interassi, ovvero le distanze fra i montanti e il corretto posizionamento dei nastri. Particolare attenzione ha richiesto la distanza dell’ultimo nastro da terra, in quanto si è riscontrato che una vicinanza eccessiva portava il veicolo a salire sopra di esso, mentre la sua funzione è quella di reindirizzare il veicolo; inoltre la stessa modellazione dei nastri e dei giunti fra gli stessi ha richiesto un’attenta valutazione.

I giunti fra gli elementi di legno si possono suddividere fondamentalmente in due tipologie:

- a) unioni tradizionali realizzate mediante la lavorazione delle superfici di contatto facendo in modo che esse trasmettano esclusivamente sforzi di compressione;
- b) unioni meccaniche di tipo moderno , nelle quali gli sforzi si trasmettono in maniera diretta attraverso però degli elementi metallici. Questi possono essere del tipo a

gambo cilindrico, pertanto chiodi, bulloni, perni, viti oppure di superficie come piastre e anelli dentati.

Appare ovvio che le unioni fra i nastri, ai quali è stata data una larghezza di tre metri, non potevano appartenere alla prima tipologia. Si è scelto innanzitutto di prevedere tali unioni in corrispondenza del montante, ed inoltre di connettere i due elementi con dei bulloni, tentando di ripristinare la continuità strutturale. La schema viene riportato in fig.4.3 per meglio esemplificare la spiegazione:

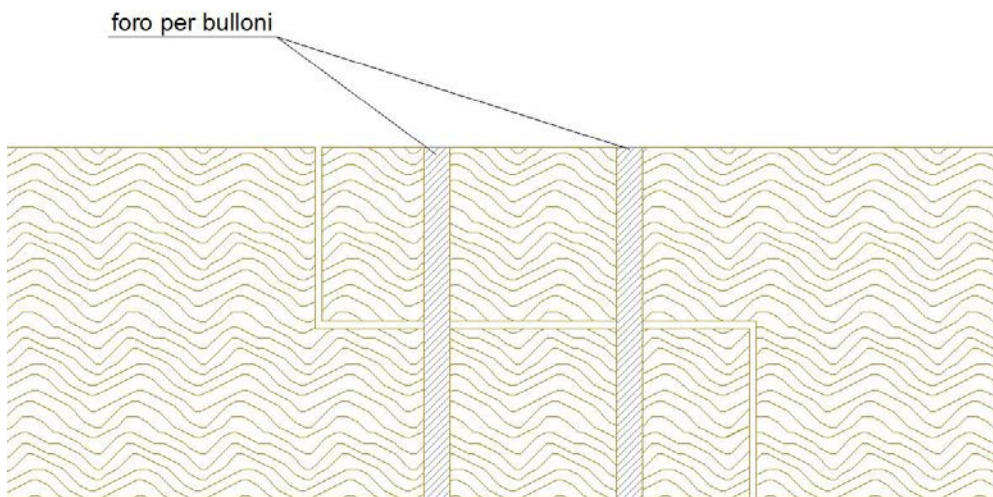


Fig.4.3 Sezione di unione nastro-nastro

Questa è una delle diverse soluzioni possibili, infatti si sarebbe potuta ipotizzare anche un'unione con delle piastre di acciaio interne, ovviamente bullonate all'esterno, oppure un'unione del tipo maschio-femmina. Inoltre occorre ancora precisare che il dimensionamento delle unioni in legno mediante connettori a gambo cilindrico segue la teoria sviluppata da Johansen [55]. Questa, proposta per la prima volta nel 1949 e successivamente perfezionata e validata sperimentalmente da differenti ricercatori (Möller, 1950; Aune, 1966; Larsen, 1977), si basa sull'ipotesi di comportamento rigido-plastico sia per il legno sia per l'acciaio e le equazioni della capacità portante della connessione si basano su semplici considerazioni di equilibrio allo stato limite. I modi di rottura possono essere riassunti sostanzialmente in:

- 1) rifollamento di una delle parti lignee connesse;

- 2) rifollamento di una delle parti in legno e contemporaneamente snervamento del connettore metallico con la formazione di cerniere plastiche (fig.4.4).

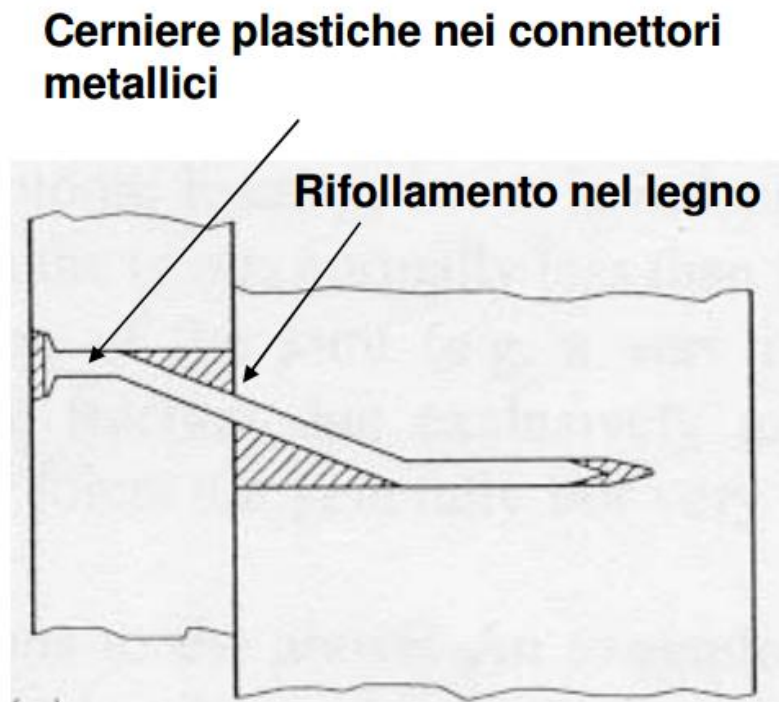


Fig.4.4 Esempio del modo di rottura che comprende il rifollamento del legno e la formazione di cerniere plastiche nell'acciaio [67]

La teoria di Johansen è adottata dalla normativa europea, la EN 1995:2004 “Progettazione delle strutture in legno”, dalla normativa tedesca DIN 1052:2004, nonché dal documento “Nicole” (Norma Italiana Costruzioni in legno) che, pur non essendo vigente, si propone come linea guida per la progettazione delle strutture in legno in Italia.

Nella modellazione sono stati sostituiti i bulloni con gli elementi “spotweld” opportunamente calibrati per la rottura come se fossero elementi in acciaio, si è optato per tale soluzione per avere un modello che richiedesse un tempo inferiore di elaborazione.

5.3 Creazione del modello con la mesh

Una volta ottenuto il modello tridimensionale, con le corrette sezioni, gli interassi predefiniti e il corretto posizionamento dei nastri, è stato necessario apporre delle modifiche per l'analisi agli elementi finiti. Infatti, se si lasciasse il modello così creato, la precisione della risoluzione numerica non sarebbe idonea al problema, pertanto è stata assegnata a ciascuna tipologia di elemento una mesh adeguata. Questo passo per la realizzazione dell'intero modello è stato fatto con un altro software apposito: Hypermesh. Questo è un potente strumento per la modellazione e la preparazione all'analisi FEM, molto utilizzato sebbene in prima battuta non sia molto intuitivo.

I passi seguiti potrebbero risultare banali agli esperti di modellazione, perché necessari per lo sviluppo del modello, ma è importante ripercorrerli per mostrare l'accuratezza del lavoro svolto per ciascun modello di barriera. Innanzitutto è stata importata la geometria del modello in formato *iges, successivamente ad ogni parte, cioè ad ogni montante e così pure ad ogni nastro sono state attribuite le caratteristiche dell'elemento "solido", ognuno come un'unità singola e successivamente si è decisa l'entità della mesh, cioè la suddivisione in elementi, per avere una soluzione accettabile. Il software permette di controllare nel dettaglio la superficie dei solidi degli elementi generati, questo è particolarmente utile per forme notevolmente complesse, in questo caso si potevano avere dei problemi degli spigoli, ma il risultato è stato comunque soddisfacente. Le dimensioni della mesh scelte sono di 6 cm per lato, risultato di un compromesso fra un risultato accettabile e gli oneri computazionali che ne derivano, ed inoltre è simile a quella del veicolo, in modo da avere lo stesso ordine di grandezza. Per ogni modellazione sono stati creati più di 60000 elementi solidi.

Tanto maggiore è l'infittimento, cioè più piccoli sono gli elementi considerati e tanto maggiore sarà la precisione, ma allo stesso tempo aumenterà anche il tempo necessario per il calcolo, quest'ultimo è un problema di fondamentale importanza. Tale suddivisione è stata mantenuta per tutta la barriera in quanto non conoscendo a priori l'evoluzione del crash e si è preferito mantenere la dimensione costante. Non si esclude una successiva ottimizzazione della mesh nei punti di contatto, che ha come scopo studiare con maggior dettaglio l'urto, anche se nelle simulazioni delle barriere oggi utilizzate questo non avviene.

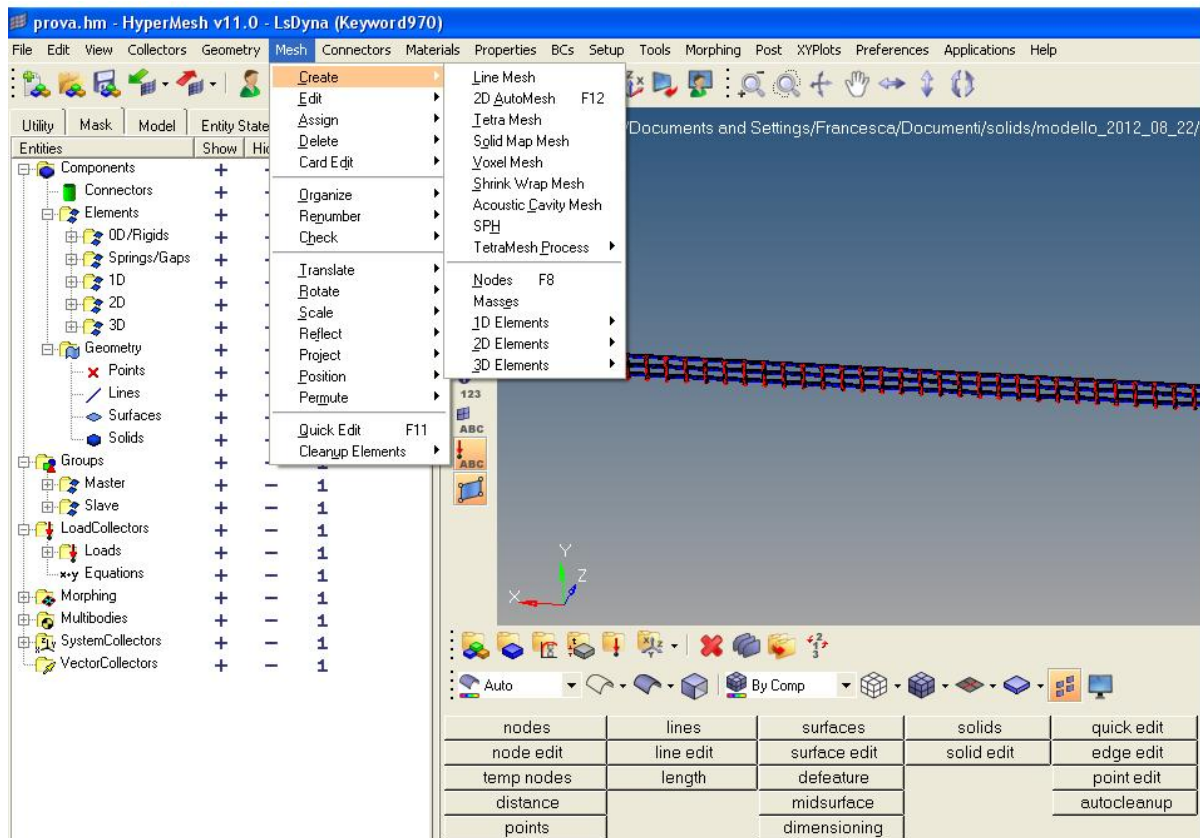


Fig.4.5 schermata Hypermesh

A questo punto per ogni elemento della barriera si è dovuta effettuare l'operazione di suddivisione in elementi ("mesh"); terminata questa operazione, una volta salvato il file, è stata esportata sia la geometria sia la mesh, facendo attenzione alla sua estensione, in quanto il programma è studiato per interfacciarsi con diversi software che lavorano agli elementi finiti, ma ognuno di questi richiede i files con una propria estensione.

Sebbene LS-prepost, così come Ls-Dyna leggano diverse estensioni (*.k, *.dyn, *.key), Hypermesh esporta mesh e geometria solo in formato *.k.

Una volta ottenuto e salvato questo file il modello è stato importato sul preprocessore di LS-Dyna, che, come si può evincere dal nome "LS-prepost", è sia il suo preprocessore e contemporaneamente anche il post processore.

5.4 Creazione del modello con Ls-prepost

Questa è la parte più significativa di tutta la creazione del modello perché solo in questo ultimo passo è stato possibile attribuire tutte le caratteristiche più importanti della barriera e le condizioni al contorno. Innanzitutto è stato importato il modello su Ls-prepost, che come già sottolineato nel paragrafo precedente, è il pre e post processore sviluppato dalla casa produttrice “LSTC”(Livermore Software Technology Corporation) e appositamente studiato e creato per LS-Dyna.

Sul sito della casa produttrice “LSTC”ci sono diverse pagine dedicate ad “Ls-prepost”, nelle quali si possono trovare diversi tutorials e manuali d’ utilizzo. Tale programma, nella versione utilizzata per questa ricerca, ha sette pagine di comandi dedicate al pre o al post processore, che si possono vedere dalla schermata tipo del software riportata di seguito.



Fig.4.6 Schermata Ls-prepost

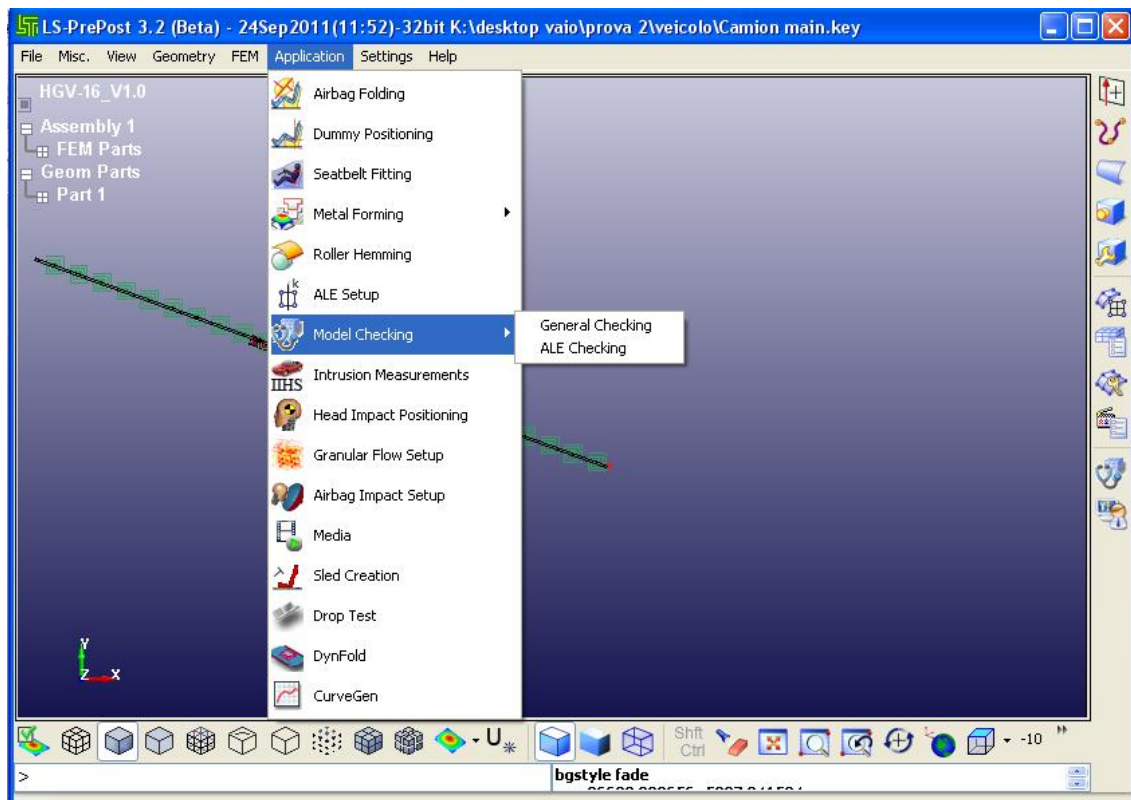


Fig.4.7 Nuova schermata Ls-prepost

Sono scaricabili dal sito diverse versioni, le più recenti al posto delle sette pagine del menù, hanno lasciato il posto ad una schermata a finestre più intuitiva soprattutto per i nuovi utilizzatori, nonostante sia sempre possibile passare alla vecchia versione. Occorre ora prendere in considerazione tutta una serie di fattori che permettono di ricreare le effettive condizioni reali di messa in opera della barriera che dovranno essere opportunamente “tradotte” nel modello virtuale. Per prima cosa si è reso necessario precisare quale sarebbe dovuta essere l’effettiva messa in opera della barriera, in quanto essendo il legno un materiale particolare non è stata prevista l’infissione a terra, bensì il posizionamento su cordolo di calcestruzzo. Questa scelta è stata fatta per ragioni di durabilità, in quanto il legno infisso nel terreno e sottoposto a cicli di asciutto-bagnato ha grosse possibilità di essere attaccato da microorganismi quali muffe, batteri e da insetti. Per questo motivo il vincolo con l’esterno che è stato ipotizzato per i montanti, è un vincolo di incastro. Di conseguenza è stato necessario impedire gli spostamenti e le rotazioni di tutte le estremità inferiori di tutti i montanti, ed immettere tale informazione al modello su Ls-prepost. Questo significa bloccare tutti gli spostamenti e le rotazioni dei nodi alla base del montante. Nella prosecuzione della ricerca è prevista la modellazione del cordolo

in calcestruzzo in modo da studiare le sollecitazioni ad esso trasmesse e verificare la sezione necessaria affinché svolga le funzioni richieste. Inoltre le condizioni al contorno hanno previsto anche l'introduzione della forza di gravità nel modello, perché per quanto possa sembrare una forza ovvia è sempre necessario implementarla affinché siano riprodotte le condizioni reali.

Il modello costitutivo da assegnare al materiale e, come si vedrà a breve, ai singoli elementi costituenti il modello geometrico, è stato un aspetto della ricerca che ha richiesto un'approfondita analisi. Poiché, come sappiamo, il legno è un materiale anisotropo, è stato difficile inquadralo nelle tipologie standard dei materiali di Ls-Dyna. Molti autori lo modellano come materiale elasto-plastico, per esempio J. Reid, Professor of University of Nebraska [60] oppure Malcolm H. Ray Associate Professor of Worcester Polytechnic Institute e Chuck A. Plaxico Associate Research Engineer of Worcester Polytechnic Institute [58], mentre altri preferiscono utilizzare un modello costitutivo elastico con rottura prefissata come Akram Abu-Odeh of Texas Transportation Institute [58], nonostante esista un modello costitutivo apposito chiamato appunto "WOOD". Questo è modello costitutivo elastoplastico, che separa le sollecitazioni scalari in parallele e perpendicolari alle fibre, in quanto per semplicità il materiale viene trattato come trasversalmente isotropo, cioè le proprietà della direzione radiale e tangenziale sono modellate come se fossero una sola. Questo consente di ridurre il numero di costanti elastiche indipendenti a cinque.

Si riporta la tabella delle proprietà del legno scelto, ipotizzato saturo, alla temperatura di 20° e privo di difetti [9]:

massa [kg/m ³]	Resistenza trazione parallela[MPa]	Resistenza trazione perpendicolare [MPa]	Resistenza compressione parallela [MPa]	Resistenza compressione perpendicolare [MPa]	Resistenza taglio [MPa]
550	101	1.86	21.5	4.0	8.9

Modulo elastico parallelo [MPa]	Modulo elastico perpendicolare [MPa]	Modulo di taglio tangenziale [MPa]	Modulo di taglio radiale [MPa]	Modulo di Poisson
11350	247	715	88	0.16

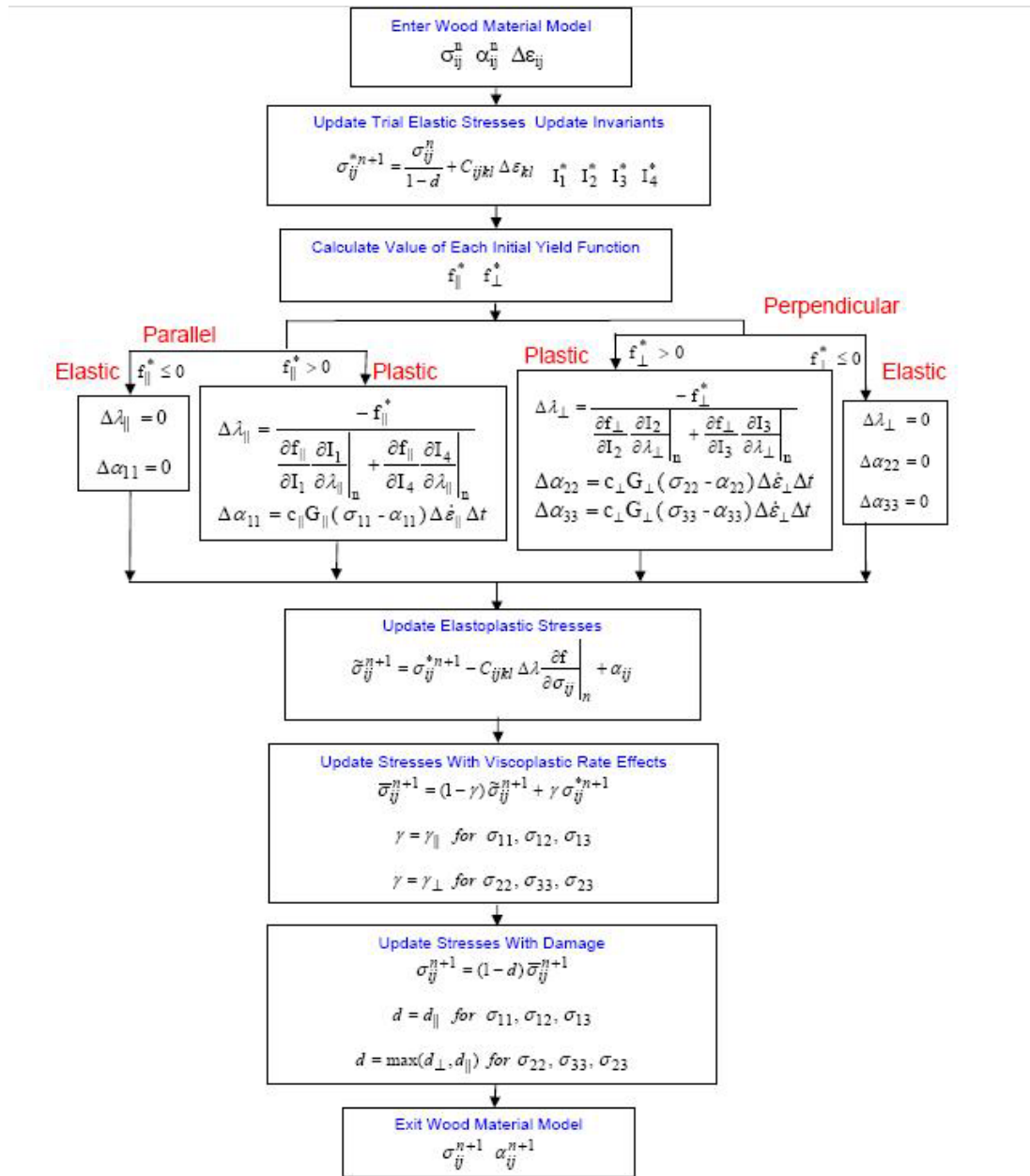


Fig.4.8 Organizzazione del modello costitutivo del materiale[9]

Il materiale arriva a rottura col progressivo aumento delle sollecitazioni di taglio e trazione, mantenendo però sempre la perfetta plasticità per gli sforzi di compressione. Il modello costitutivo del legno scelto tiene conto, come si può vedere nella figura 4.8 delle equazioni costitutive elastiche, della plasticità, della non linearità della curva sforzi deformazioni poco prima di raggiungere lo sforzo massimo ed infine della durata del carico. Ognuna di queste è trattata sia per la direzione parallela e che per la direzione ortogonale alle fibre.

La rottura nella direzione parallela alle fibre avviene considerando due termini:

$$f_{\parallel} = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} + \frac{(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)}{S_{\parallel}^2} - 1 \quad (1)$$

Dove le σ_{ij} sono gli sforzi nelle tre direzioni, X è lo sforzo di trazione o compressione massimo (dipende dal segno) nella direzione parallela alle fibre, mentre S è lo sforzo di taglio massimo sempre nella direzione parallela alle fibre. Si arriva a rottura quando $f_{\parallel} \geq 0$.

Allo stesso modo per la direzione perpendicolare alle fibre si ha:

$$f_{\perp} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y^2} + \frac{(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{S_{\perp}^2} - 1 \quad (2)$$

Dove le σ_{ij} sono gli sforzi nelle tre direzioni, Y è lo sforzo di trazione o compressione massimo nella direzione perpendicolare alle fibre, mentre S è lo sforzo di taglio massimo nella direzione perpendicolare. Anche in questo caso si arriva a rottura quando $f_{\perp} \geq 0$.

Le equazioni (1) e (2) possono essere scritte anche in funzione delle invarianti del tensore degli sforzi:

$$f_{\parallel} = \frac{I_1^2}{X^2} + \frac{I_4}{S_{\parallel}^2} - 1 \quad (3)$$

$$f_{\perp} = \frac{I_2^2}{Y^2} + \frac{I_3}{S_{\perp}^2} - 1 \quad (4)$$

Derivando f_{\parallel} e f_{\perp} rispetto a I_1, I_2, I_3 e I_4 , che sono le invarianti del tensore degli sforzi, si ottengono i parametri di consistenza plastica $\Delta\lambda_{\parallel}$ e $\Delta\lambda_{\perp}$.

A questo punto gli sforzi possono essere indicati in questo modo:

$$\sigma_{ij}^{\wedge n+1} = \sigma_{ij}^{*n+1} - C_{ijkl} \Delta \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \Big|_n \quad (5)$$

Dove σ^* è lo sforzo elastico e C_{ijkl} sono le componenti del tensore di rigidità del materiale.

Occorre introdurre l'incrudimento che per gli sforzi di compressione sia paralleli che ortogonali alle fibre, si aggiunge pertanto un coefficiente α_{ij} che è funzione del modulo di taglio G e degli stessi sforzi. Pertanto avremo:

$$\sigma_{ij}^{-n+1} = \sigma_{ij}^{\wedge n+1} + \alpha_{ij}^{n+1} \quad (6)$$

Infine è necessario tener conto della durata dei carichi, questo si affronta con la teoria della viscosità del materiale:

$$\sigma_{ij} = (1 - \gamma) \sigma_{ij}^{-} + \sigma_{ij}^* \quad (7)$$

Dove γ è una variabile che dipende dal materiale, dalla deformazione e dalla durata del carico.

Le resistenze meccaniche, inoltre, risentono anche della variazione dell'umidità con questa legge:

$$sforzo \max = sforzo(\%U_{rif}) \frac{P(\%U)}{P(\%U_{rif})} \quad (8)$$

P è un parametro dipendente dal modulo di elasticità, dal modulo di Poisson e dalla percentuale di umidità.

Per tener conto dell'effetto della temperatura, si interviene direttamente scalando i moduli di elasticità con dei coefficienti che sono essi stessi funzione della temperatura.

Questo modello costitutivo è stato studiato e verificato sperimentalmente da Y.V. Murray [32]. Inoltre altri autori, C. Goubel, M. Massenzio, S. Ronel [31], hanno utilizzato questo modello trovando una corrispondenza sperimentale.

La maggior parte degli studiosi non sceglie la tipologia appositamente creata per il legno perché è di difficile implementazione e richiede una spesa in quantità di tempo decisamente maggiore. Per il modello utilizzato in questo studio, invece, proprio per una maggiore veridicità del risultato si è scelto di utilizzare la tipologia WOOD per poter implementare il materiale,

nonostante questa decisione abbia comportato tempi di elaborazione pari a circa 350 ore per ciascun modello studiato. Nello specifico, per la barriera è stata ipotizzata come tipologia di legname il pino, per diverse ragioni. Innanzitutto tale legname è molto utilizzato per la realizzazione dei montanti in legno negli Stati Uniti e nei Paesi Scandinavi, in quanto duraturo, resistente e facilmente reperibile; in secondo luogo potrebbe essere uno sviluppo futuro per la realizzazione della barriera mediante il legno locale sardo, dato che proprio il pino che cresce in Sardegna è attualmente oggetto di studio da parte del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura dell'Università degli Studi di Cagliari.

È stato necessario precisare la densità media del legno, infatti il peso del legno dipende dalla tipologia, e generalmente correlato alla classificazione ed alla tipologia. Successivamente è stata scelta la temperatura e la percentuale di contenuto d'acqua dello stesso, infatti le caratteristiche di resistenza variano al variare di questi due parametri, come spiegato nel Capitolo 1. Inoltre, sempre facendo riferimento alla resistenza meccanica degli elementi, si è reso indispensabile implementare il tipo di legno, o meglio la classe in funzione dei difetti, in modo da far diminuire le resistenze a trazione e compressione, che volendo possono essere modificate anche direttamente dall'operatore. Infine è stata definita la direzione della fibratura del materiale, pertanto è stato necessario creare manualmente la terna locale che individuava le direzioni principali del materiale. Considerato il fatto che tale terna è riferita al sistema globale, è stato indispensabile creare tanti tipi di materiale legno quanti sono i versi dei diversi elementi ai quali si doveva assegnare come materiale la tipologia WOOD. A titolo informativo si specifica che questa tipologia di materiale è attribuibile solo agli elementi "solid", pertanto non è possibile l'utilizzo di elementi "shell" o "beam".

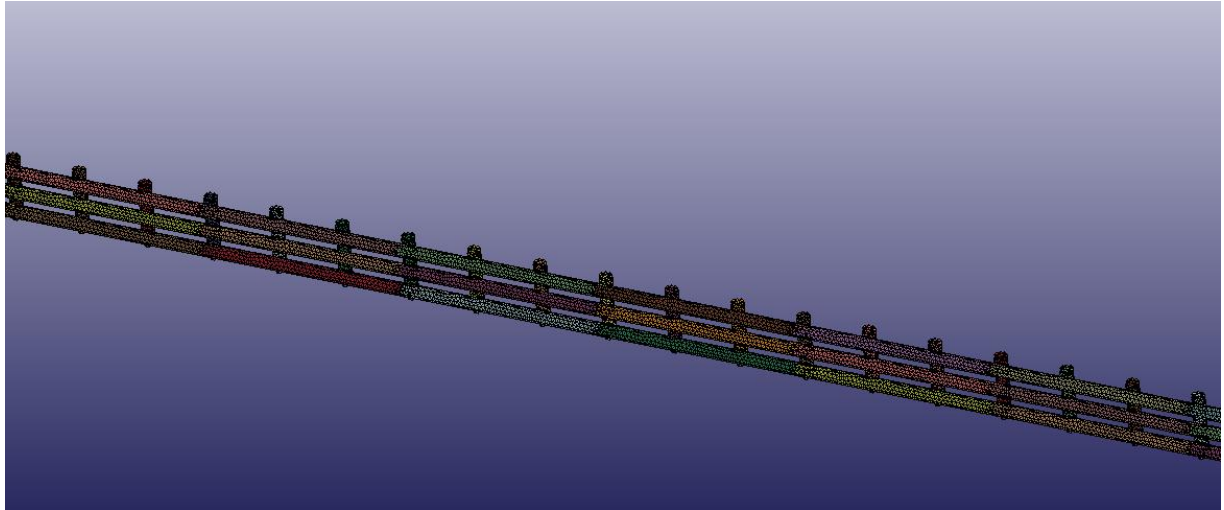


Fig.4.9 Immagine della barriera in legno modellata

Una volta ricreato il modello barriera è stato creato un nuovo sistema che inglobasse anche il veicolo. Quest'ultimo, come prevede la norma EN1317 è un veicolo con massa pari a 900 kg, nella ricerca in esame è il modello in commercio noto come geo-metro. Il veicolo è scaricabile dal sito <http://www.ncac.gwu.edu/> insieme alle altre tipologia di veicoli previsti nelle prove di crash dalla EN 1317, ed è stato creato da un gruppo di ricerca del Politecnico di Milano.

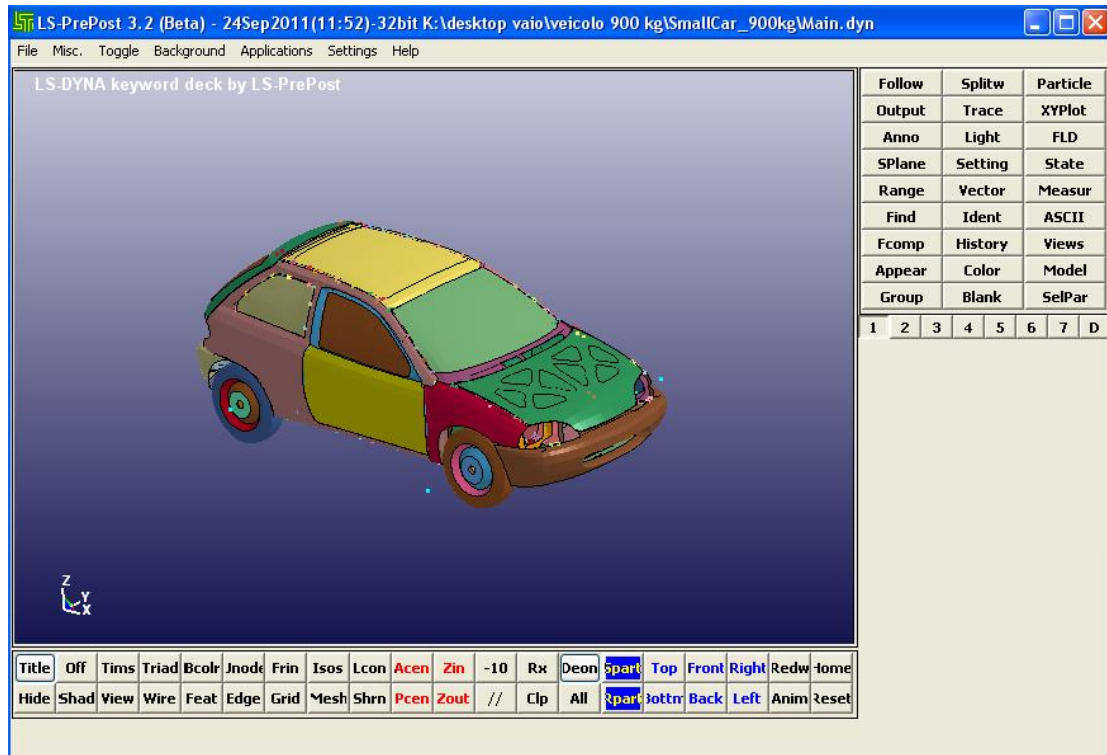


Fig.4.10 Immagine del veicolo da 900 kg

Sono stati uniti due file, cioè quello del modello della barriera e quello del veicolo. Per fare questo si possono seguire diversi passaggi che sono più o meno validi a seconda della grandezza dei due modelli e della loro complessità. Infatti la soluzione più semplice, e che è stata poi adottata, è richiamare il modello barriera all'interno di quello del veicolo attraverso il comando “include”. Questa tecnica, molto utilizzata anche in altri software, consente di lavorare autonomamente sul modello “richiamato” in quanto ogni modifica verrà poi riportata automaticamente sul file globale.

MASS kg ±								
Total mass	900 ±40	1 300 ±65	1 500 ±75	10 000 ±300	13 000 ±400	16 000 ±500	30 000 ±900	38 000 ±1 100
Test inertial mass ^a	825 ±40	1 300 ±65	1 500 ±75	10 000 ±300	13 000 ±400	16 000 ±500	30 000 ±900	38 000 ±1 100
Including maximum ballast ^b	100	160	180	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable
ATD installed	78 ± 4	Not required	Not required	Not required	Not required	Not required	Not required	Not required
DIMENSIONS m (Limit deviation ± 15 %)								
Wheel track (front and rear)	1,35	1,40	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Wheel radius (unloaded)	Not applicable	Not applicable	Not applicable	0,46	0,52	0,52	0,55	0,55
Wheel base (between extreme axles)	Not applicable	Not applicable	Not applicable	4,60	6,50	5,90	6,70	11,25
CENTRE OF MASS LOCATION^c m								
Longitudinal distance from front axle (CGX) ± 10 %	0,90	1,10	1,24	2,70	3,80	3,10	4,14	6,20
Lateral distance from vehicle centre line (CGY)	± 0,07	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10
Height above ground (CGZ):								
— Vehicle mass (± 10 %)	0,49	0,53	0,53	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable
— Load (+ 15 %, - 5 %)	Not applicable	Not applicable	Not applicable	1,50	1,40	1,60	1,90	1,90
TYPE OF VEHICLE								
	Car	Car	Car	Rigid HGV	Bus	Rigid HGV	Rigid HGV	Articulated HGV
Number of axles ^e	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1/2	2S + 2	1S + 3/4
^a Including load for heavy goods vehicles (HGV). ^b Including measuring and recording equipment. ^c The vehicle's centre of mass shall be determined when the ATD is not in the car. ^d The centre of mass of vehicles with two axles shall be determined in conformity with ISO 10392. ^e S: steering axle.								

Fig.4.11 Tabella sulle caratteristiche dei veicoli di prova tratta dalla EN 1317-1

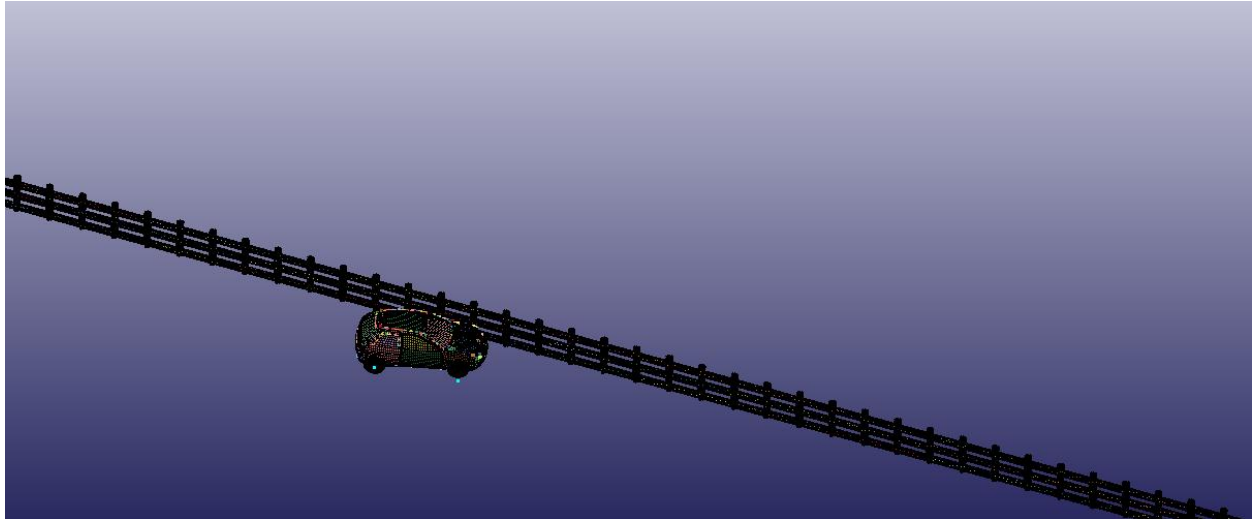


Fig.4.12 Immagine della simulazione dell'urto veicolo-barriera

In questo caso, il comando “*include*” ha permesso di lavorare iterativamente per il corretto posizionamento della barriera rispetto al veicolo. L'unico inconveniente di questa procedura è che è stato necessario rinumerare tutti gli elementi che caratterizzano il modello della barriera, infatti ognuno di essi possiede un proprio ID che lo identifica univocamente, proprio in virtù di questo non è permesso che il veicolo e la barriera possiedano elementi con lo stesso ID, anche se sono due file separati. Una volta posizionati correttamente sia la barriera che il veicolo, si è previsto un impatto con un angolo di 20° e velocità del veicolo pari a 100 Km/h per riprodurre la prova TB11 secondo la EN 1317. È stato poi necessario definire la tipologia di contatto fra la barriera (master) e il veicolo (slave), e i contatti fra le diverse parti della stessa barriera e dello stesso veicolo. Per il contatto fra barriera e veicolo è stato utilizzato un “*contact_automatic_surface_to_surface*” mentre fra gli elementi della stessa barriera è stato scelto un “*contact_automatic_single_surface*”. Sono stati scelti sempre contatti del tipo “*automatic*” in quanto, poichè nelle analisi di crash le deformazioni possono essere anche molto grandi e la previsione di dove e come si svolgerà il contatto può diventare impossibile, con tale tipologia è sempre possibile rilevare la penetrazione in entrambi gli elementi che entrano in contatto. Esistono due tipi di contatto “*automatic*”, il primo è chiamato “*one-way*”, che permette di trasmettere i carichi di compressione dai nodi slave ai segmenti master, mentre le forze tangenziali sono trasmesse quando è attivo il contatto di attrito e si verifica uno scorrimento relativo fra le parti mentre il controllo sulla penetrazione degli elementi avviene solo sui nodi slave. A questa categoria appartiene il “*contact_automatic_single_surface*”. La seconda tipologia detta invece “*two-way*”, è del tutto simile alla precedente, dalla quale si

discosta solamente per il controllo della penetrazione che si effettua anche sui nodi master. Il “contact_automatic_surface_to_surface” è un contatto “two-way”.

Keyword Input Form

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

***CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (3)**

ID: 5 TITLE: CONTATTO veicolo-BARRIERA

MPP1 MPP2

IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMB
0	200		3	2	1.0005		0

UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE
	0	1.0	0

1	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	618	9000001	2	2	0	0	0	0

2	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.1000000	0.1000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020

3	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSE	YSE
	1.0000000	1.0000000	10.0000000	10.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

Thermal T_Friction A AB ABC ABCD

CF FRAD HTC GERIT GMAX CD FACT BC FLG ALGO

TITLE :=Interface descriptor. It is suggested that unique descriptions be used.

Fig.4.13 Scheda del contatto veicolo-barriera

I contatti sono definiti da parametri caratteristici che sono il coefficiente di attrito statico ed il coefficiente di attrito dinamico. Nel contatto tra gli elementi stessi della barriera questi sono stati posti rispettivamente pari a 0,3 e 0,5, mentre nel contatto fra veicolo e barriera ad entrambi è stato fornito un valore pari a 0,1. I coefficienti di attrito si basano su prove sperimentali, pertanto in attesa di una validazione del modello stesso si è scelto di adottare questi valori.

Infine occorre tener conto dell’aderenza fra il pneumatico e la strada, alla quale è stato dato un valore pari a 0,6, che è quello utilizzato per i veicoli.

Nonostante l’urto avvenga in un arco temporale molto breve, è stato assegnato al programma un tempo di calcolo che risultava essere un tempo molto maggiore rispetto alla durata dell’urto, ma questo è stato necessario per verificare l’effettiva traiettoria del veicolo dopo l’urto. Inoltre sempre in questa fase sono stati assegnati i vari controlli fra i quali sono

molto importanti quello dell'energia e dell'hourglass. Questi infatti, si introducono in quanto si può andare incontro ai modi ad energia nulla dei quali si è già accennato nel capitolo 4, che violano il principio di conservazione totale dell'energia. . Infatti la sottointegrazione della matrice di rigidità riduce i tempi di calcolo, ma fa nascere questi modi, detti appunto “*a clessidra*” a causa della forma in cui avviene la deformazione.

Generalmente si accetta che l'energia di hourglass non sia maggiore di un decimo dell'energia totale. I controlli dell'hourglass avvengono introducendo una forza fittizia all'interno del modello, rendendolo pertanto più rigido.

Terminata anche questa fase, si è ritenuto il modello pronto per essere mandato in soluzione. Una particolarità di questo software è che è possibile aprire il file di output durante la risoluzione stessa, questo è stato di grande aiuto perché ha permesso l'interruzione dell'elaborazione qualora il risultato non sia stato soddisfacente.

```

C:\ I=C:\DOCUME~1\FRANCE~1\DOCUME~1\solids\MO14A8~1\COPIAD~4\veicolo.dyn O=C:\DOCUME~1\FRANCE...
internal energy..... 2.38545E+05
stonewall energy..... 0.00000E+00 wall# 1
spring and damper energy..... 2.38545E+05
joint internal energy..... 7.77695E-35
hourglass energy ..... 0.00000E+00
system damping energy..... 0.00000E+00
sliding interface energy..... 0.00000E+00
external work..... 0.00000E+00
eroded kinetic energy..... 0.00000E+00
eroded internal energy..... 0.00000E+00
total energy..... 3.77776E+08
total energy / initial energy.. 1.00000E+00
energy ratio w/o eroded energy.. 1.00000E+00
global x velocity..... 8.80009E+03
global y velocity..... 4.07951E-08
global z velocity..... 2.67163E+01

number of shell elements that
reached the minimum time step.. 0
cpu time per zone cycle..... 0 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 15816 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 7417 nanoseconds

estimated total cpu time = 2967314 sec < 824 hrs 15 mins>
estimated cpu time to complete = 2967313 sec < 824 hrs 15 mins>
estimated total clock time = 1391670 sec < 386 hrs 34 mins>
estimated clock time to complete = 1391670 sec < 386 hrs 34 mins>

added mass = 0.00000E+00
percentage increase = 0.00000E+00

1 t 0.00000E+00 dt 1.18E-06 flush i/o buffers
1 t 0.00000E+00 dt 1.18E-06 write d3plot file

```

Fig.4.14 Schermato del software LS-Dyna durante la risoluzione

Capitolo 6. Creazione ed analisi dei modelli

6.1 Introduzione

La barriera oggetto della ricerca trova collocazione in quelle strade di particolare pregio ambientale, come già evidenziato in precedenza, pertanto si è scelto di ipotizzare una barriera con livello di contenimento normale N2, per la quale la normativa EN 1317, come si evince dalla figura 1, prevede due tipi di prove d'urto.

Containment levels			Acceptance test
Low angle containment	T1		TB 21
	T2		TB 22
	T3		TB 41 and TB 21
Normal containment	N1		TB 31
	N2		TB 32 and TB 11
Higher containment	H1		TB 42 and TB 11
	L1		TB 42 and TB32 and TB 11
	H2		TB 51 and TB 11
	L2		TB 51 and TB32 and TB 11
	H3		TB 61 and TB 11
	L3		TB 61 and TB32 and TB 11
Very high containment	H4a H4b		TB 71 and TB 11 TB 81 and TB 11
	L4a L4b		TB 71 and TB32 and TB 11 TB 81 and TB32 and TB 11
NOTE 1 Low angle containment levels are intended to be used only for temporary safety barriers. Temporary safety barriers can also be tested for higher levels of containment.			
NOTE 2 A successfully tested barrier at a given containment level should be considered as having met the containment requirements of any lower level, except that N1 and N2 do not include T3, H-Levels do not include L-Levels and that H1, ..., H4b do not include N2.			
NOTE 3 Because testing and development for very high containment safety barriers in different countries has taken place using significantly different types of heavy vehicles, both tests TB 71 and TB 81 are included in the standard at present. The two containment levels H4a and H4b should not be regarded as equivalent and no hierarchy is given between them. The same holds for the two containment levels L4a and L4b.			
NOTE 4 The performance of Containment Classes L is enhanced in respect to the corresponding H classes by the addition of Test TB 32.			

Fig.6.1 *Tabella sui livelli di contenimento [2]*

Queste prove sono la TB11 e la TB32, che si differenziano fra loro per tipologia di veicolo e velocità di impatto. Nella figura 2 è riportato lo schema della EN1317, nel quale si descrivono le caratteristiche delle prove. Queste si differenziano sostanzialmente per il tipo di veicolo coinvolto, per la sua velocità e per l'angolo di impatto fra questo e la barriera.

Test	Impact speed km/h	Impact angle °	Total mass kg	Type of vehicle
TB 11	100	20	900	Car
TB 21	80	8	1 300	Car
TB 22	80	15	1 300	Car
TB 31	80	20	1 500	Car
TB 32	110	20	1 500	Car
TB 41	70	8	10 000	Rigid HGV
TB 42	70	15	10 000	Rigid HGV
TB 51	70	20	13 000	Bus
TB 61	80	20	16 000	Rigid HGV
TB 71	65	20	30 000	Rigid HGV
TB 81	65	20	38 000	Articulated HGV

Fig.6.2 *Tabella sulla tipologia di prove [2]*

La prova TB11 richiede l'utilizzo di un veicolo che possiede una massa di circa 900 kg, che impatta sulla barriera con un angolo di 20° alla velocità di 100 km/h. questa prova è generalmente utilizzata per calcolare gli indici di severità d'urto, infatti è richiesta anche per tutte le barriere ad alto contenimento proprio per verificare che sia garantita la sicurezza per i passeggeri in termini di severità d'urto.

La norma comunitaria EN1317 nella parte 2 fornisce i criteri di accettazione delle prove di crash test:

- Nessun elemento della barriera deve penetrare all'interno dell'abitacolo;
- I supporti della barriera si devono comportare come da progetto;

- Tutte le parti con massa maggiore di 2 kg, che si staccano durante l'urto devono essere identificati, locati e registrati; tali barriere non possono essere utilizzate nei luoghi in cui possono esserci persone;
- Durante l'impatto non più di una ruota deve passare sopra il dispositivo;
- Il veicolo non deve ribaltarsi;
- Devono essere annotate sia la deformazione dinamica che la larghezza operativa e classificate secondo la tabella;

classi di livelli di larghezza operativa	Livelli di larghezza operativa [m]
W1	$W \leq 0,6$
W2	$W \leq 0,8$
W3	$W \leq 1,0$
W4	$W \leq 1,3$
W5	$W \leq 1,7$
W6	$W \leq 2,1$
W7	$W \leq 2,5$
W8	$W \leq 3,5$

- Dopo l'urto il veicolo deve lasciare la barriera in modo che le ruote non attraversino una linea (*exit box*) parallela alla barriera stessa prima dell'urto, che sta da questa ad una distanza pari a un coefficiente A più la larghezza del veicolo e più il 16% della lunghezza dello stesso. Questa linea possiede una lunghezza nota B ed inizia nel punto di ultimo contatto fra barriera e veicolo (fig.6.3);
- Deve rispettare i limiti per gli indici di severità d'urto ASI e THIV (fig.6.4).

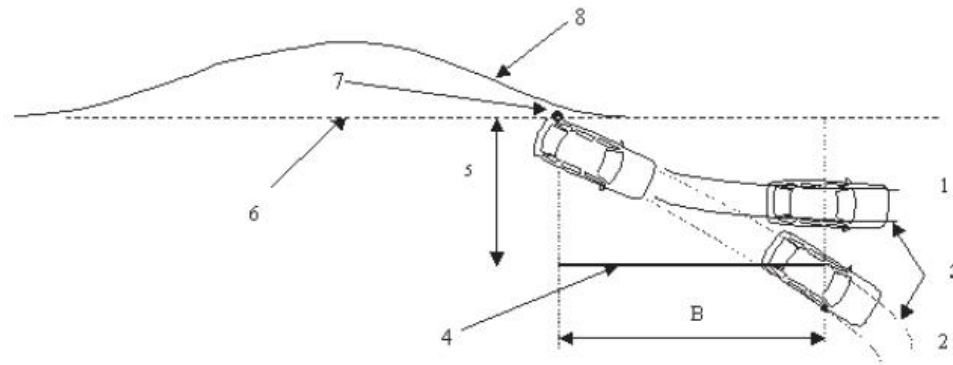


Fig.6.3 Esempio di “exit box” [2]

Contrariamente a quel che si potrebbe pensare i criteri più restrittivi sono quelli legati alla severità d’urto. I parametri imposti dalla norma comunitaria sono:

- ASI (Acceleration Severity Index);
- THIV (Theoretical Head Impact Velocity).

Le barriere devono contenere il veicolo, ma allo stesso tempo devono anche far in modo che la decelerazione indotta sugli occupanti l’abitacolo sia contenuta entro certi limiti. Questo perché alcuni organi come cuore, polmoni e cervello con decelerazioni molto brusche subiscono delle lesioni molto gravi, che possono essere permanenti o addirittura mortali.

L’indice ASI è una funzione del tempo, calcolata con la seguente equazione:

$$ASI(t) = \sqrt{\left[\left(\frac{\overset{-}{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\overset{-}{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\overset{-}{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]}$$

Dove:

$\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ sono i valori limiti delle accelerazioni lungo gli assi del veicolo x,y,z [ms⁻²]

$\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$ sono le accelerazioni di un punto singolo P definito del veicolo [ms^{-2}].

L'indice ASI permette di fornire una misura della severità del moto per una persona seduta in prossimità del punto P, situato all'interno della carrozzeria e vicino al centro di gravità del veicolo, e la sua formulazione è la più semplice relazione che si possa avere tra le tre variabili e il loro valore massimo di riferimento. Le accelerazioni limite sono interpretate come i valori al disotto dei quali il rischio per i passeggeri è molto basso, in genere per coloro che indossano la cintura di sicurezza queste sono pari a :

$$\hat{a}_x = 12 \cdot g, \hat{a}_y = 9 \cdot g, \hat{a}_z = 10 \cdot g$$

Dove $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$ è il valore di riferimento per l'accelerazione

Con tale formulazione si può facilmente notare che l'indice ASI è una quantità adimensionale, ed è inoltre una funzione scalare del tempo e ha solo valori positivi. Tanto più il suo valore supera l'unità, tanto maggiore è il rischio per i passeggeri.

L'indice THIV fornisce la velocità di impatto della testa "teorica", infatti questa (e l'occupante) è considerata un oggetto che si muove liberamente all'interno dell'abitacolo; che, quando il veicolo cambia la propria velocità a seguito dell'urto, continua a muoversi finché non colpisce una superficie all'interno del veicolo.

L'espressione che permette il calcolo dell'indice THIV è la seguente:

$$THIV = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

Dove V_x e V_y sono le componenti della velocità relativa al veicolo della testa teorica.

Per i crash test reali la norma EN 1317 prevede l'utilizzo di una strumentazione minima del veicolo per registrare le accelerazioni lineari e le velocità angolari, composta da tre trasduttori di accelerazione lineare, mutuamente ortogonali, allineati con gli assi del veicolo, e se è possibile, anche un trasduttore di velocità angolare per registrare la velocità di imbardata. Nella modellazione si ricorre ad un accelerometro posizionato sul veicolo, tramite il quale è possibile avere le accelerazioni del veicolo lungo tre assi orientati come quelli del veicolo.

Impact severity level	Index values		
A	ASI \leq 1,0	and	THIV \leq 33 km/h
B	ASI \leq 1,4		
C	ASI \leq 1,9		

Fig.6.4 Tabella sulle classi di severità d'urto [1]

Ovviamente il livello A garantisce una maggiore sicurezza per i passeggeri rispetto sia al livello B che al C.

6.2 Modelli analizzati

In questo capitolo saranno analizzati i vari modelli di barriera sottoposti all'urto di un veicolo leggero a 100 Km/h con un angolo di impatto pari a 20°, come prescritto dalla prova TB11 della En 1317, che si differenziano fra loro per sezione di nastri e montanti e per interassi.

Sono stati creati diversi modelli in modo da verificare quale sezione e quale interasse fossero più adeguati, inoltre poiché anche l'estetica della barriera non può essere trascurata e per motivi di durabilità, la tipologia di sezione ipotizzata è stata quella circolare, sia per i nastri che i montanti.

Per ciascun modello, come specificato nel capitolo precedente è stato richiesto il controllo dell'energia e dell'hourglass. Questi due controlli permettono di verificare l'andamento dell'energia del sistema, energia totale, energia interna, energia cinetica, energia di contatto (*sliding*), energia di smorzamento e energia dei rigidwall. Il solutore fornisce i files "matsum" e "glstat" che permettono l'analisi delle varie energie. In questo studio è stata controllata l'energia di hourglass, in modo che essa non risultasse superiore al 10% dell'energia totale, in quanto è questa è la percentuale massima comunemente accettata, ed inoltre si è verificato che la somma dell'energia cinetica, dell'energia interna e dell'energia di contatto si discostasse non più del 10% dell'energia totale. Nell'appendice A sono riportati i grafici inerenti il controllo dell'energia.

La prima tipologia di barriera ipotizzata e in seguito modellata, possedeva elementi molto sottili, infatti furono acquisite inizialmente le dimensioni delle barriere in acciaio-legno. I nastri erano solo due, ma soprattutto i montanti avevano dimensioni esigue, il diametro della sezione dei montanti che dei nastri era pari a 150 mm e l'interasse fra i montanti pari a 1,2 m.. Dopo aver modellato correttamente il legno, operazione che, come spiegato nel capitolo precedente, ha richiesto gran parte delle risorse, la prima prova di impatto ha mostrato una barriera che si rompeva a seguito dell'urto con il veicolo da 900 kg.

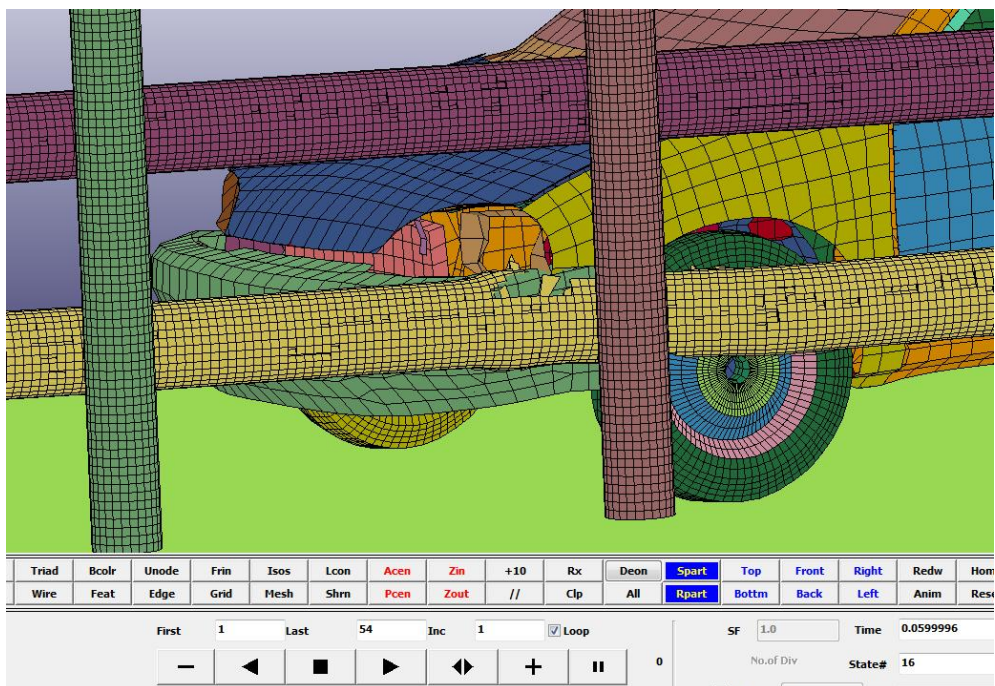


Fig.6.5 Il veicolo durante la prova sfonda la barriera con sezione di nastri e montanti pari a 150 mm ed interasse dei montanti di 1200 mm.

Successivamente si è modellata una barriera con sezioni decisamente più grandi e interassi maggiormente ravvicinati, con l'intenzione, se questa avesse superato le varie prove, di ottimizzare le dimensioni e gli interassi dei componenti in modo da trovare il limite inferiore.

La prima barriera che ha risposto positivamente ai requisiti richiesti possiede dimensioni importanti, sia i nastri che i montanti hanno sezione circolare pari a 250 mm, e l'interasse fra i

montanti è ravvicinato, pari a 1 metro. Nella prima modellazione effettuata la sezione è la seguente:

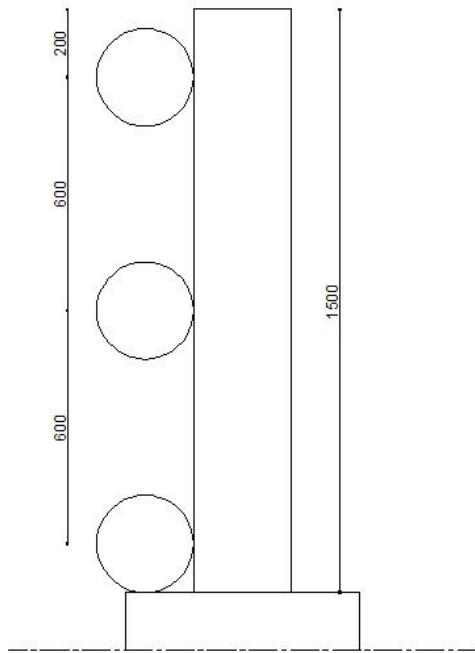


Fig.6.7 La barriera è composta da montanti di altezza pari a 1,5 metri con interasse pari a 1 metro. I nastri, come si può vedere dall'immagine a fianco sono tre, anche essi hanno sezione circolare con diametro pari a 250 mm, ed il loro interasse è pari a 60 cm. Si può notare come il nastro vicino al suolo sia stato posizionato molto in basso.

Una volta rinumerato il modello e posizionato correttamente rispetto al veicolo in movimento, è stato mandato in soluzione. Il primo passo dell'analisi di un crash test è la visione del filmato della simulazione dell'urto, in quanto da questo si possono evincere molte informazioni sul corretto funzionamento del modello e quindi della barriera proposta secondo le prescrizioni della UNI EN 1317 parte 2. Ebbene da questa visione si è appreso che il veicolo durante l'impatto saliva sopra il nastro posizionato molto vicino a terra creando una situazione non accettabile. Infatti il posizionamento del nastro vicino al suolo era stato modellato per avere un elemento che potesse reindirizzare il veicolo verso la carreggiata. Inoltre anche l'altezza del nastro centrale non sembrava adeguata in quanto risultava troppo alta rispetto al paraurti del veicolo. Pertanto si è reso necessario ricreare il modello geometrico sollevando l'ultimo nastro e modificando l'interasse fra i nastri in modo da avere il nastro centrale in una posizione più centrale durante l'urto. Le dimensioni dei montanti e il loro interasse non sono state modificate.

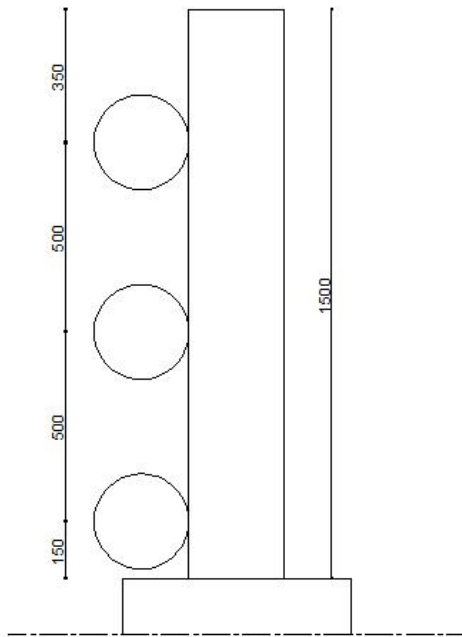


Fig.6.8 Come si può vedere nell'immagine qui a fianco, il montante non è stato modificato. Mentre per quel che concerne i nastri i loro reciproci interassi sono stati modificati, infatti si è passati da 600 mm a 500 mm, inoltre quello inferiore è stato sollevato rispetto al suolo

Questo modello ha dato risultati soddisfacenti. Infatti, la barriera progettata, rispetta quello che è prescritto dalla normativa: non ci sono sue parti che si staccano o penetrano nell'abitacolo, la barriera non si rompe ed inoltre il veicolo viene reindirizzato in carreggiata, senza oltrepassare l'exit box, come si può vedere dalla figura 6.9.

Occorre fare in seguito delle analisi più approfondite, cioè verificare gli indici ASI e THIV, e verificare la deflessione dinamica e la larghezza operativa. Innanzitutto sono state effettuate due prove di crash, una simulando l'impatto del veicolo in prossimità del montante ed il secondo invece nella parte libera della barriera compresa fra due montanti consecutivi.

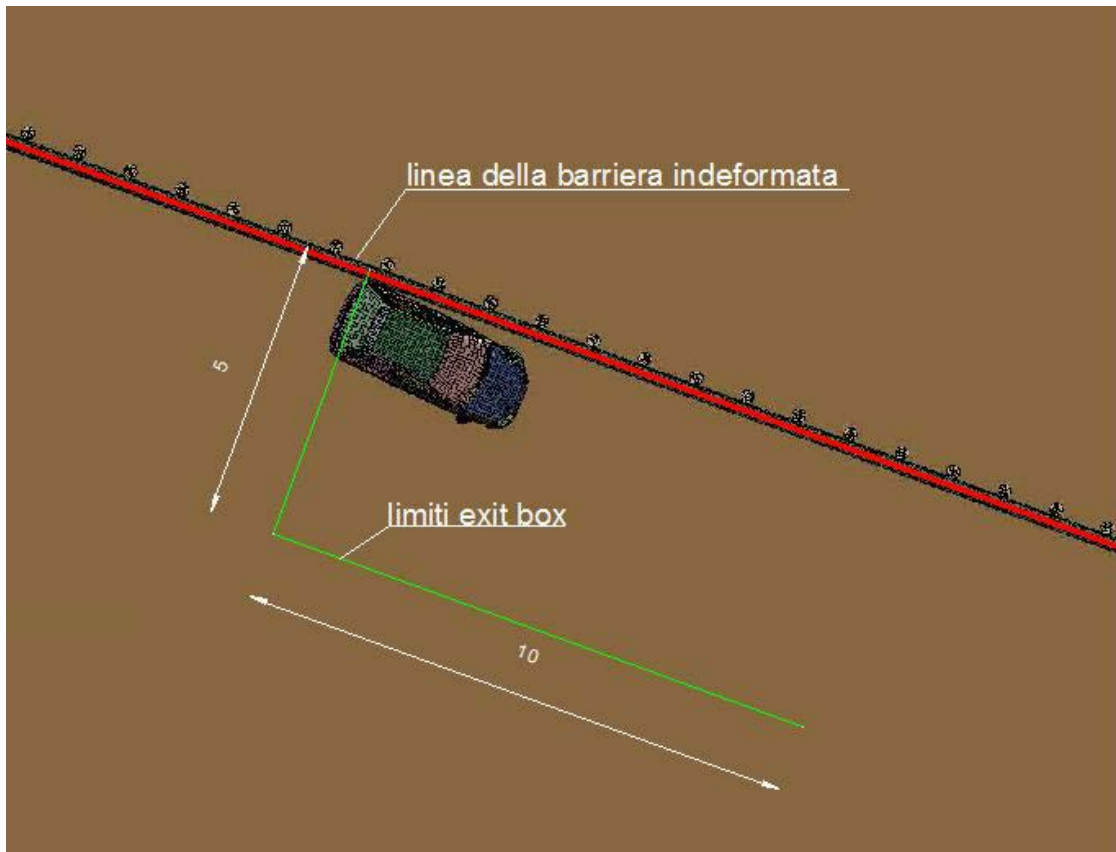


Fig.6.9 Esempio “exit box” per il modello con diametro di nastri e montanti pari a 250 mm

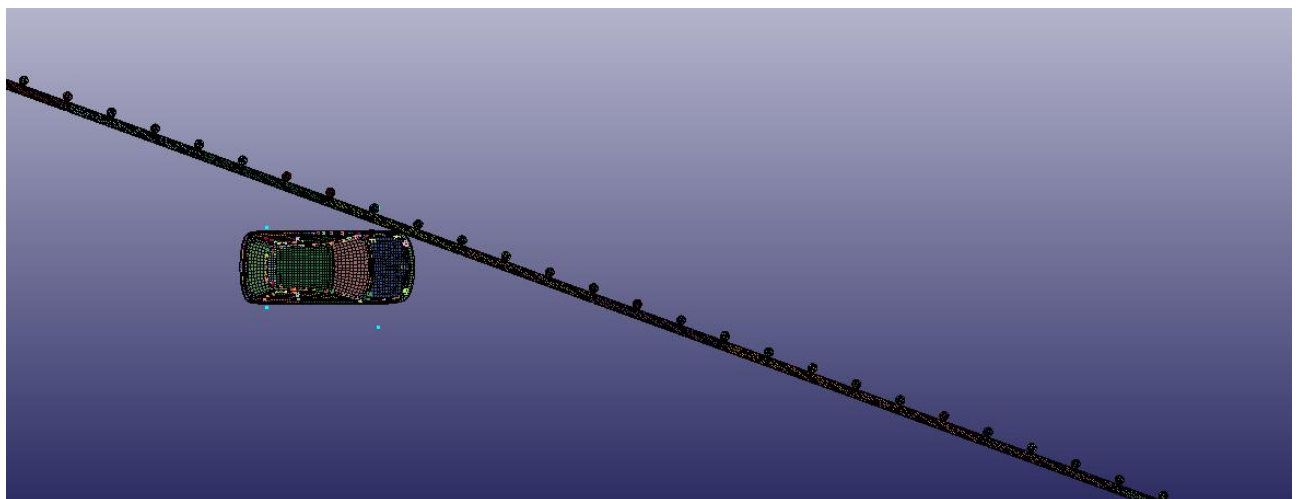


Fig.6.10 Veicolo che impatta sul montante

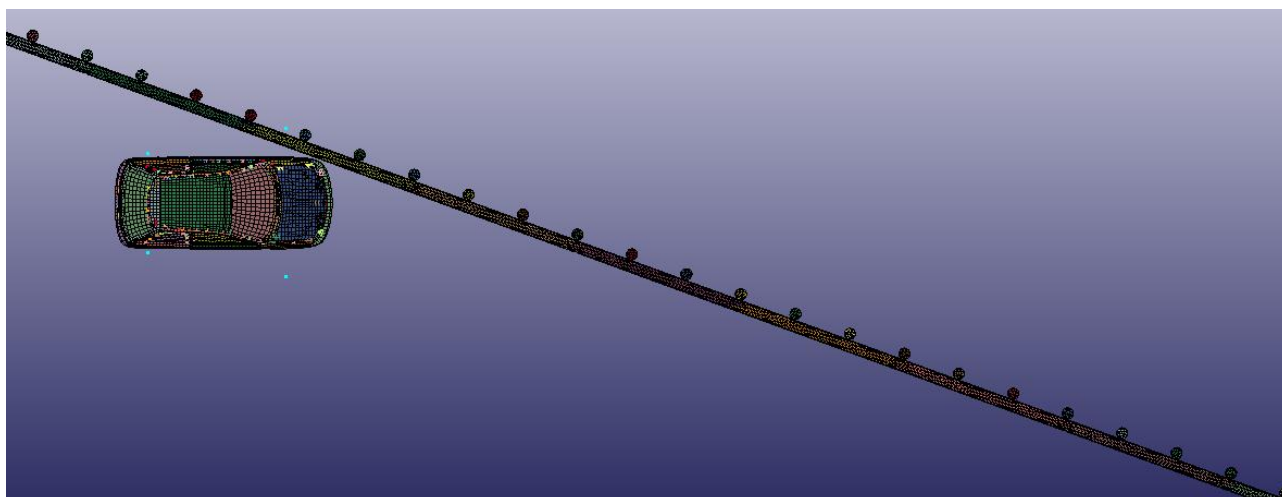


Fig.6.11 *Veicolo che impatta nello spazio libero fra due montanti*

Per ciascuna delle due prove sono state fatte diverse simulazioni poiché come trattato precedentemente, il materiale legno risente delle condizioni climatiche e nello specifico della temperatura, ma soprattutto dell'umidità. Le sue caratteristiche meccaniche infatti, mutano al variare di questi di questi due valori, pertanto per le simulazioni si è partiti dalle condizioni peggiori, cioè umidità del legno pari al 30% e temperatura di 20°C.

Dopo aver verificato che il modello rispondeva alle condizioni di accettabilità, si è provveduto a far variare i due parametri per verificare che, con l'aumento delle caratteristiche meccaniche, gli di severità d'urto ASI e THIV rimanessero entro i limiti accettabili.

Per ciascun modello sono stati testati i diversi urti mantenendo in un primo momento fissata l'umidità del legno e pari al 30%, e facendo poi variare la temperatura, ogni volta di 5 gradi Celsius. Sono stati risolti i modelli con temperatura paria a 25°C, 20°C, 15°C, 10°C, 5°C, 1°C e -5°C.

Per il modello che impatta proprio sul montante si è ottenuto:

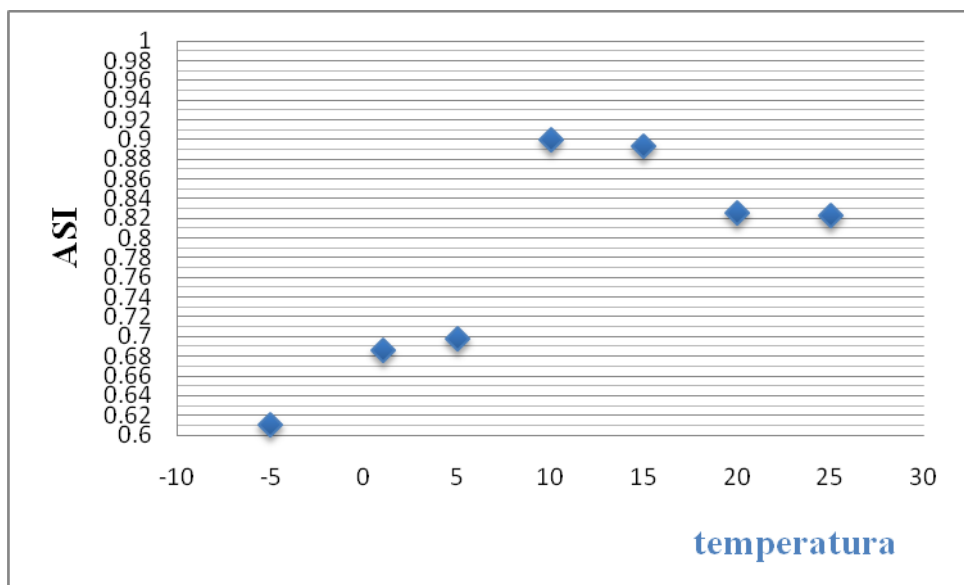


Fig.6.12 *Variazione dell'indice ASI in funzione della temperatura (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

Dalla figura 6.12, si può notare come l'indice ASI aumenti al crescere della temperatura fino a 10 gradi circa, raggiungendo il valore di 0.9 per poi decrescere lentamente. Per tutte le temperature l'indice ASI risulta essere inferiore all'unità, quindi rientra nel più alto livello di severità: il livello A. Mentre per il secondo, nel quale il veicolo impatta sullo spazio libero fra due montanti consecutivi si è arrivati al successivo grafico:

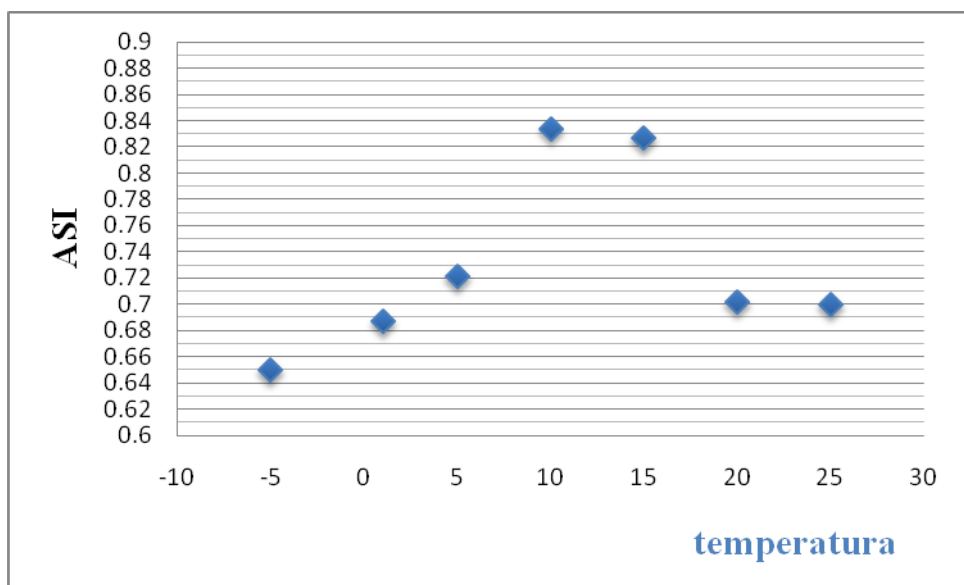


Fig.6.13 *Variazione dell'indice ASI in funzione della temperatura (impatto del veicolo nello spazio libero fra due montanti)*

Si può notare come l'indice ASI abbia una curva simile al caso precedente: aumenta al crescere della temperatura fino a 10 gradi circa raggiungendo il valore di 0,8, per poi decrescere. Anche in questo caso, per tutti i valori di temperatura studiati l'indice ASI risulta essere inferiore all'unità e la barriera quindi rientra nel più alto livello di severità d'urto il livello A che offre maggiori garanzie di sicurezza per gli occupanti un autoveicolo.

Di seguito vengono poi riportati i grafici sempre delle due tipologie di impatto, ma stavolta mantenendo fissata la temperatura, pari a 20°C, facendo variare l'umidità del legno. Si è partiti con l'umidità pari a 30%, che si ha nelle condizioni peggiori, cioè quando l'umidità dell'aria si aggira intorno al 100%. Sono stati risolti i modelli con umidità del materiale pari a 25%, 20% e 15%. Si è imposto come limite inferiore il 15% perché è l'umidità che in genere possiede il legno strutturale essiccato, pronto per la posa in opera.

Il grafico che segue si riferisce all'urto a ridosso del montante:

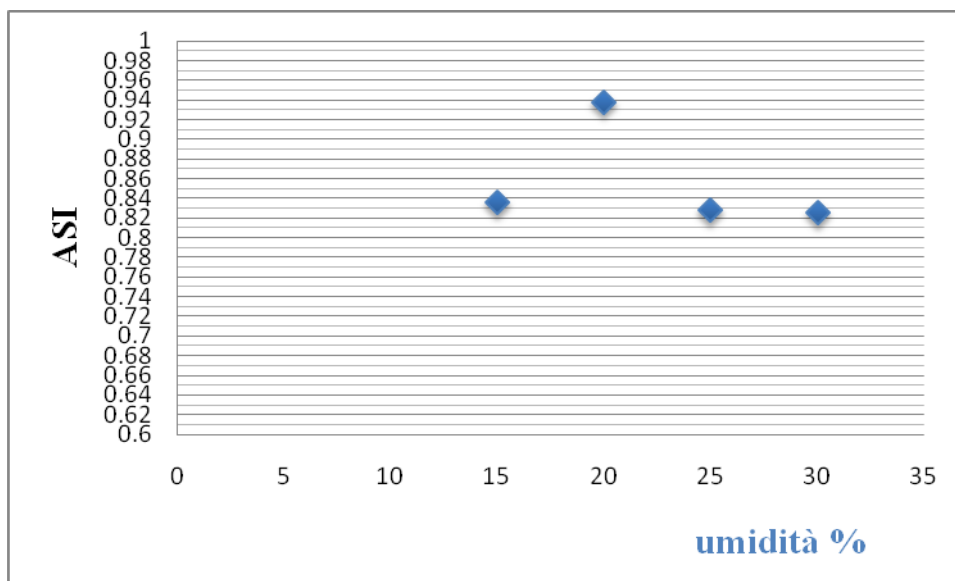


Fig.6.14 *Variazione dell'indice ASI in funzione dell'umidità(impatto del veicolo in prossimità del montante)*

Mentre quello successivo all'urto nello spazio libero fra i due montanti:

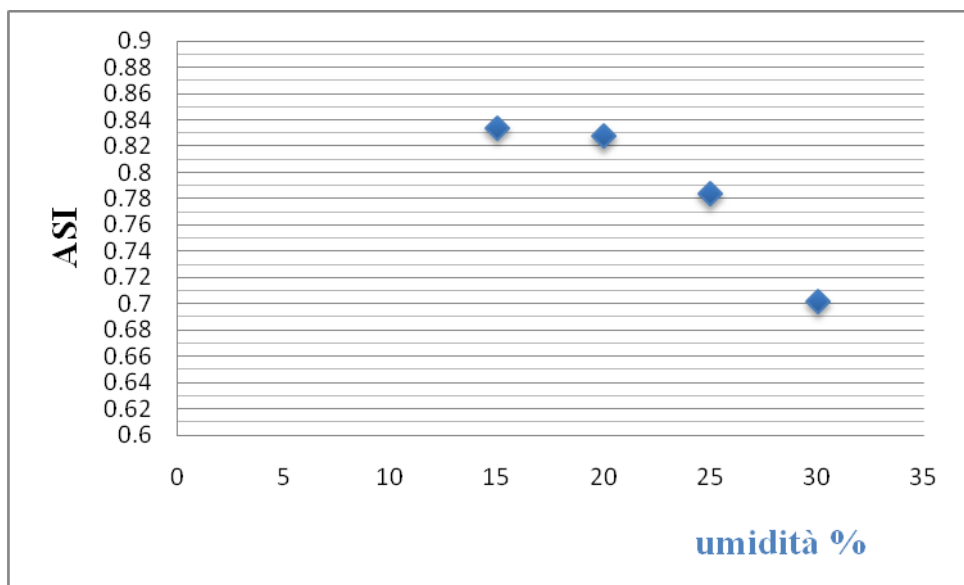


Fig.6.15 *Variazione dell'indice ASI in funzione dell'umidità (impatto del veicolo nello spazio libero fra due montanti)*

Dalla figura 6.14, che rappresenta il caso dell'urto in prossimità del montante, si può notare come all'aumentare dell'umidità l'indice ASI diminuisce registrando un valore anomalo di picco in corrispondenza del 20% di umidità.

Nel caso di urto nello spazio libero fra due montanti (ved. Figura 6.15), l'indice ASI diminuisce all'aumentare dell'umidità secondo una legge parabolica. Questo risultato porta a pensare che all'aumentare dell'umidità la barriera assuma un comportamento meno rigido e perciò l'urto risulta meno gravoso.

Anche in questi ultimi due casi i valori dell'indice ASI risultano essere inferiore all'unità e la barriera quindi rientra nel più alto livello di severità d'urto: il livello A.

Successivamente è stato calcolato l'indice THIV per verificare che il modello studiato rispondesse al requisito richiesto dalla UNI EN 1317-2 che fissa il limite di questo indice a 33 km/h.

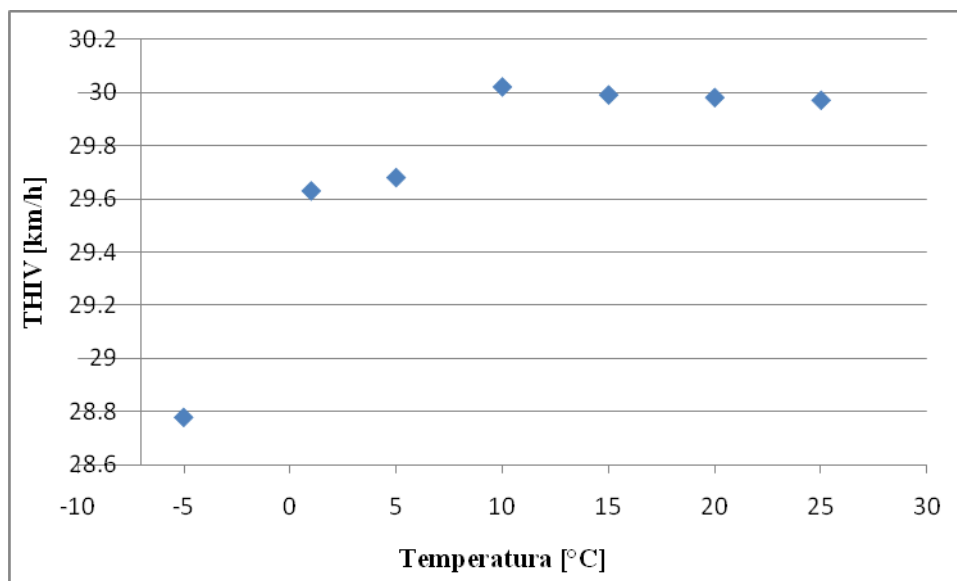


Fig.6.16 *Variazione dell'indice ASI in funzione dell'umidità (impatto del veicolo nello spazio libero fra due montanti)*

Come per l'indice ASI è stato condotto un analogo studio parametrico per analizzare l'influenza della temperatura e dell'umidità sul THIV.

Dalla figura 6.16, si può notare come l'indice THIV aumenti al crescere della temperatura fino a 10 gradi circa, raggiungendo il valore di circa 30 km/h per poi decrescere lentamente. Per tutti i valori di temperatura l'indice THIV risulta essere inferiore al valore limite di 33 km/h imposto dalla Norma.

Nella figura n°6.17 successiva, sono stati rappresentati contestualmente i due indici di severità, ASI e THIV (per lo stesso caso esaminato nella figura 6.16), che sono stati normalizzati con il metodo dell'autoscaling al fine di eliminare le differenze numeriche e le differenze fra le unità di misura dei due indici per poterli raffrontare.

Dal grafico si evince che i valori dei due indici seguono un analogo andamento: all'aumentare della temperatura crescono entrambi fino a 10°C, per poi diminuire

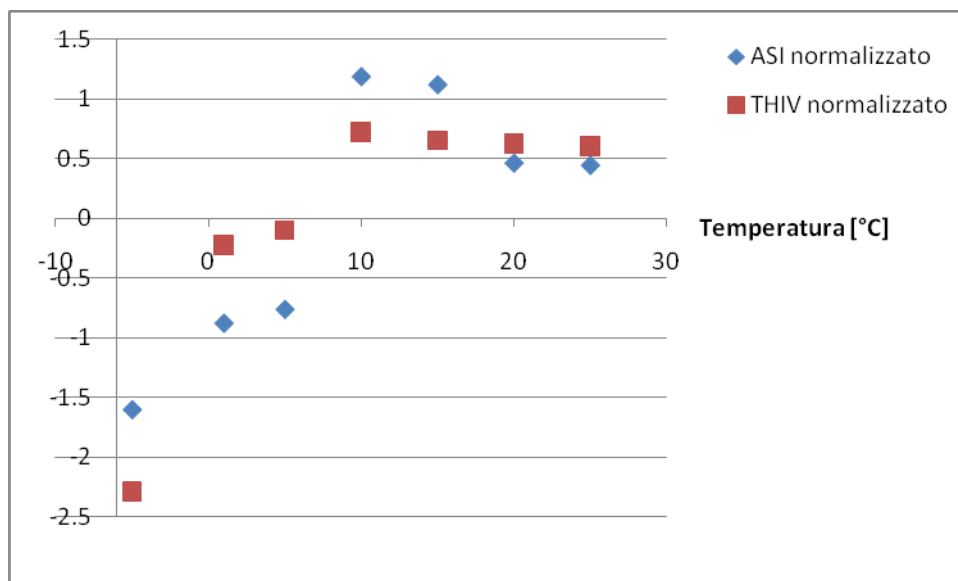


Fig.6.17 *Variazione dell'indice ASI e THIV in funzione della temperatura (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

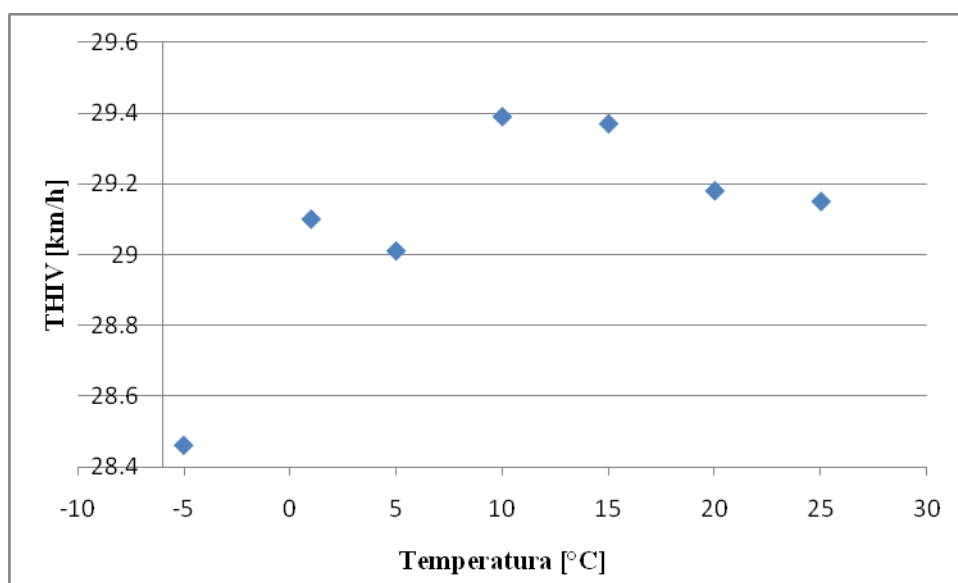


Fig.6.18 *Variazione dell'indice THIV in funzione della temperatura (impatto del veicolo in prossimità dello spazio libero fra due montanti)*

Nella figura 6.18 è rappresentato l'andamento dell'indice THIV in funzione della temperatura nel caso di urto che avviene nello spazio libero fra due montanti. Anche in questo caso si ravvisa un andamento simile al precedente confermato dal grafico riportato in figura n°6.19 che riporta entrambi gli indici normalizzati.

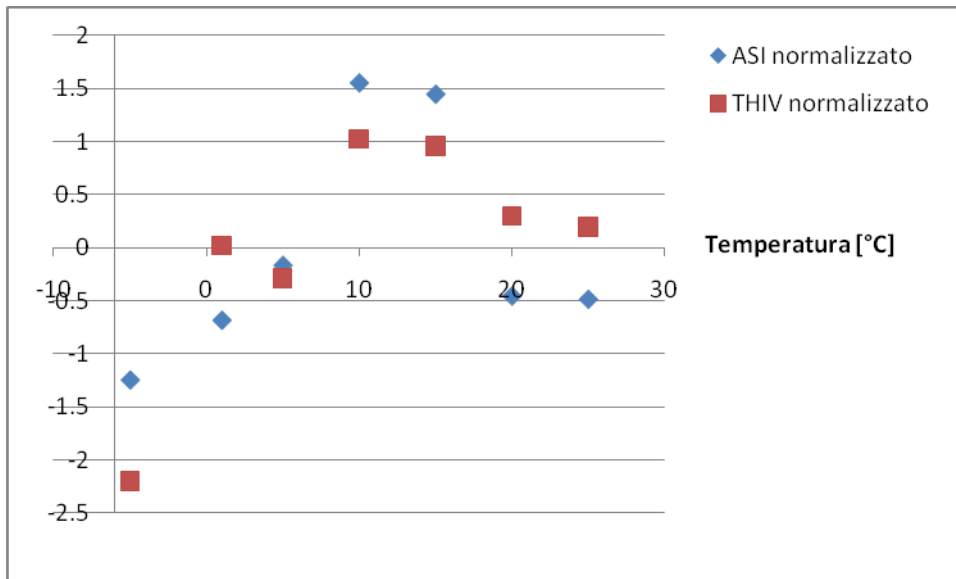


Fig.6.19 *Variazione dell'indice ASI e THIV in funzione della temperatura (impatto del veicolo in prossimità dello spazio libero fra due montanti)*

Si è inoltre esaminata l'influenza dell'umidità del materiale sull'indice THIV considerando gli stessi valori di umidità utilizzati per analizzarne gli effetti sull'indice ASI. Nel caso di urto in prossimità del montante (vedi figura n°6.20) si nota una certa dispersione dei valori, mentre nel caso di urto nello spazio libero fra due montanti (vedi figura n°6.22) i valori del THIV decrescono all'aumentare della temperatura seguendo un andamento parabolico del tutto analogo a quello dell'indice ASI, come si può notare dal grafico riportato in figura n°6.23.

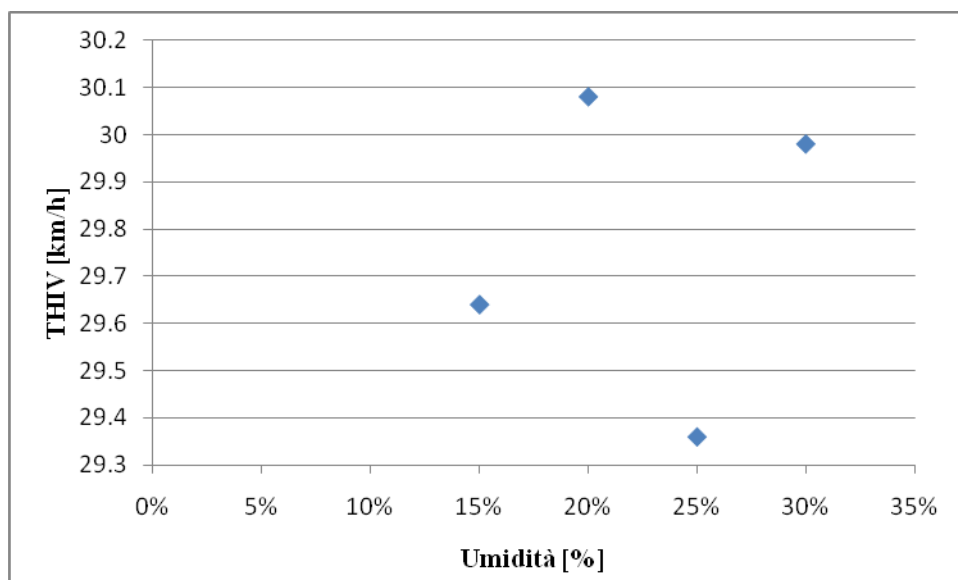


Fig.6.20: *Variazione dell'indice THIV in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

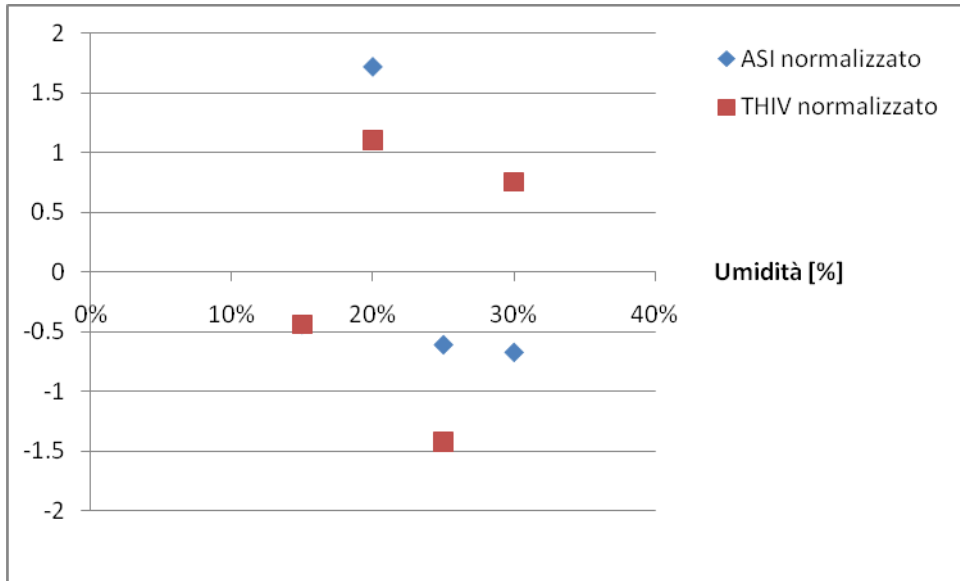


Fig.6.21: *Variazione dell'indice ASI e THIV in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

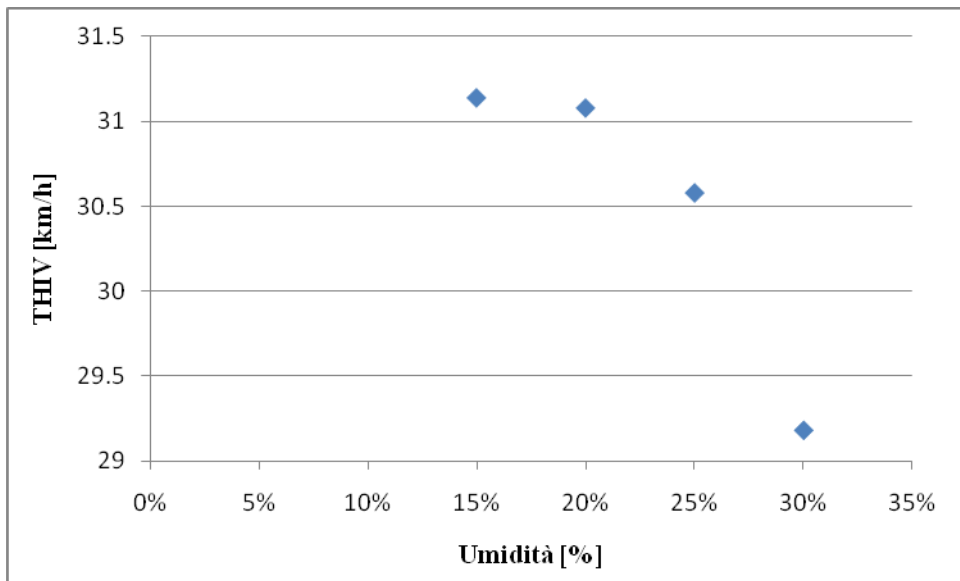


Fig.6.22: *Variazione dell'indice THIV in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità dello spazio libero fra due montanti)*

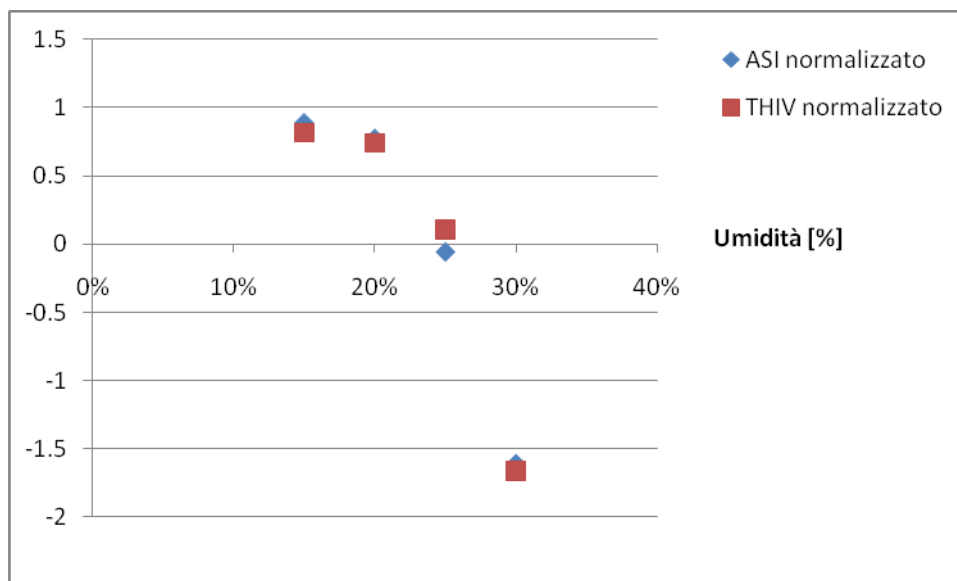


Fig.6.23: *Variazione dell'indice ASI e THIV in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità dello spazio libero fra due montanti)*

A questo punto si è pensato di ottimizzare la sezione per verificare se fosse possibile utilizzare delle sezioni meno consistenti, pertanto si è ipotizzato l'utilizzo sempre di tre nastri con diametro pari a 200 mm e montanti con diametro sempre pari a 200 mm.

La prima modellazione effettuata ha previsto la diminuzione dell'altezza del montante che è stata ridotta da 1,5 m a 1,2 m, in quanto si è potuto appurare dal precedente modello che l'altezza risultava eccessiva e si poteva tentare la sua riduzione. Gli interassi fra i vari elementi sono rimasti simili alla tipologia precedente, infatti viene previsto un montante ogni metro, mentre i nastri hanno interasse pari a 50 cm.

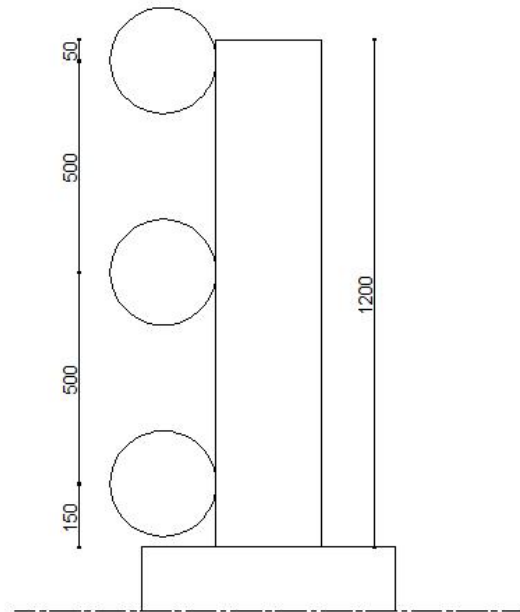


Fig. 6.24 Sezione quotata della barriera dove si possono vedere i reciproci posizionamenti fra i tre nastri e i montanti.

Questo modello è stato scartato perché dalla visione del video dopo la risoluzione si è visto che la ruota del veicolo saliva sopra il montante, come si può vedere dalla figura 6.25 riportata sotto.

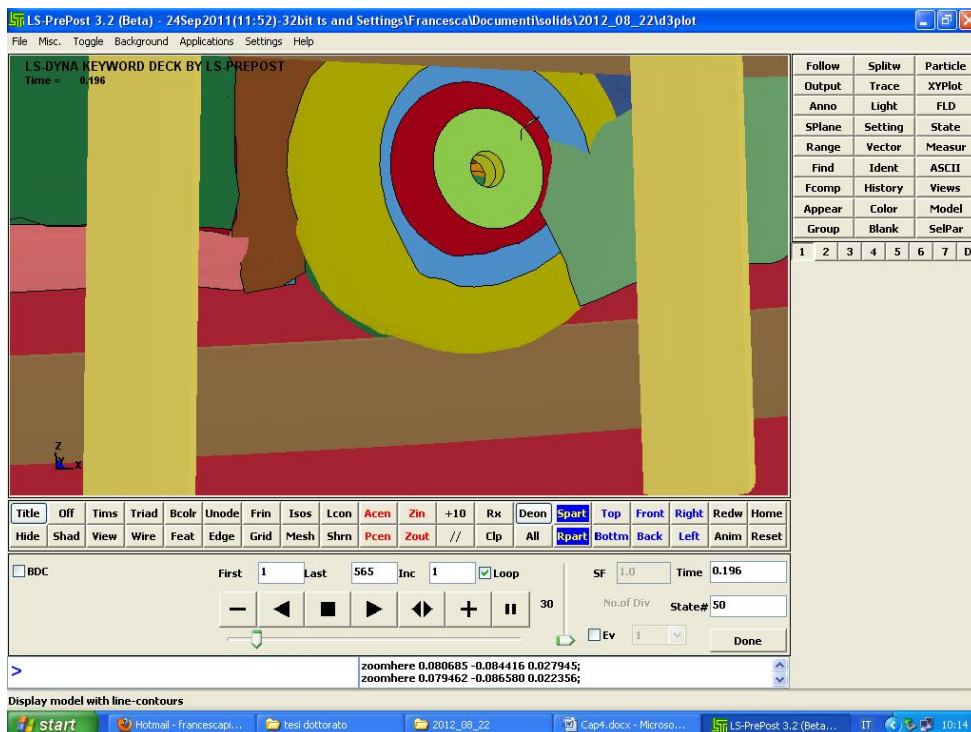


Fig.6.25 La ruota del veicolo passa sopra il montante-barriera con nastri e montanti pari a 200 mm di diametro e montanti con altezza pari a 1200 mm.

Il modello della barriera è stato a questo punto ricreato apportando alcune modifiche: innanzitutto il nastro vicino al terreno è stato sollevato, di conseguenza anche la posizione reciproca tra gli stessi è stata necessariamente modificata, mentre per quel che concerne i montanti altezza ed interasse sono rimasti invariati.

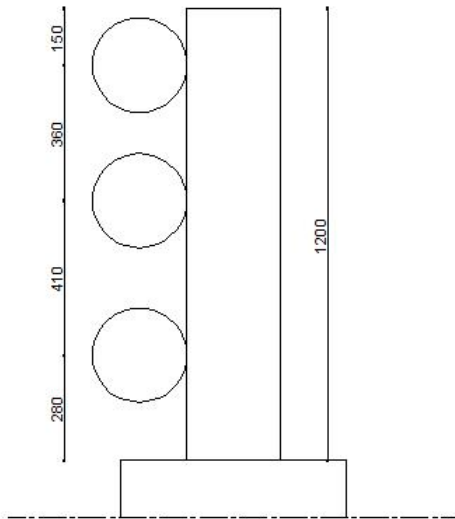


Fig.6.26 Sezione quotata della barriera dalla quale si evince che il montante ha altezza pari a 1,2 metri, mentre il montante più basso si trova a 18 cm dal terreno e gli interassi fra i montanti sono rispettivamente pari a 41 cm e 36 cm.

Anche questo modello di barriera ha dato risultati soddisfacenti, non ci sono parti del dispositivo che si staccano o penetrano nell'abitacolo, la barriera non si rompe ed inoltre il veicolo viene reindirizzato in carreggiata, senza oltrepassare l'exit box (fig.6.27).

Anche per questa barriera sono stati ipotizzati due urti, uno in prossimità del montante e l'altro nello spazio libero fra i due montanti in modo da valutare sia la resistenza della barriera ed il suo comportamento sia per conoscere la severità dell'urto per i passeggeri. Per entrambi sono stati calcolati gli indici di severità, ASI e THIV con le variazioni di temperatura e di umidità del legno come già fatto in precedenza.

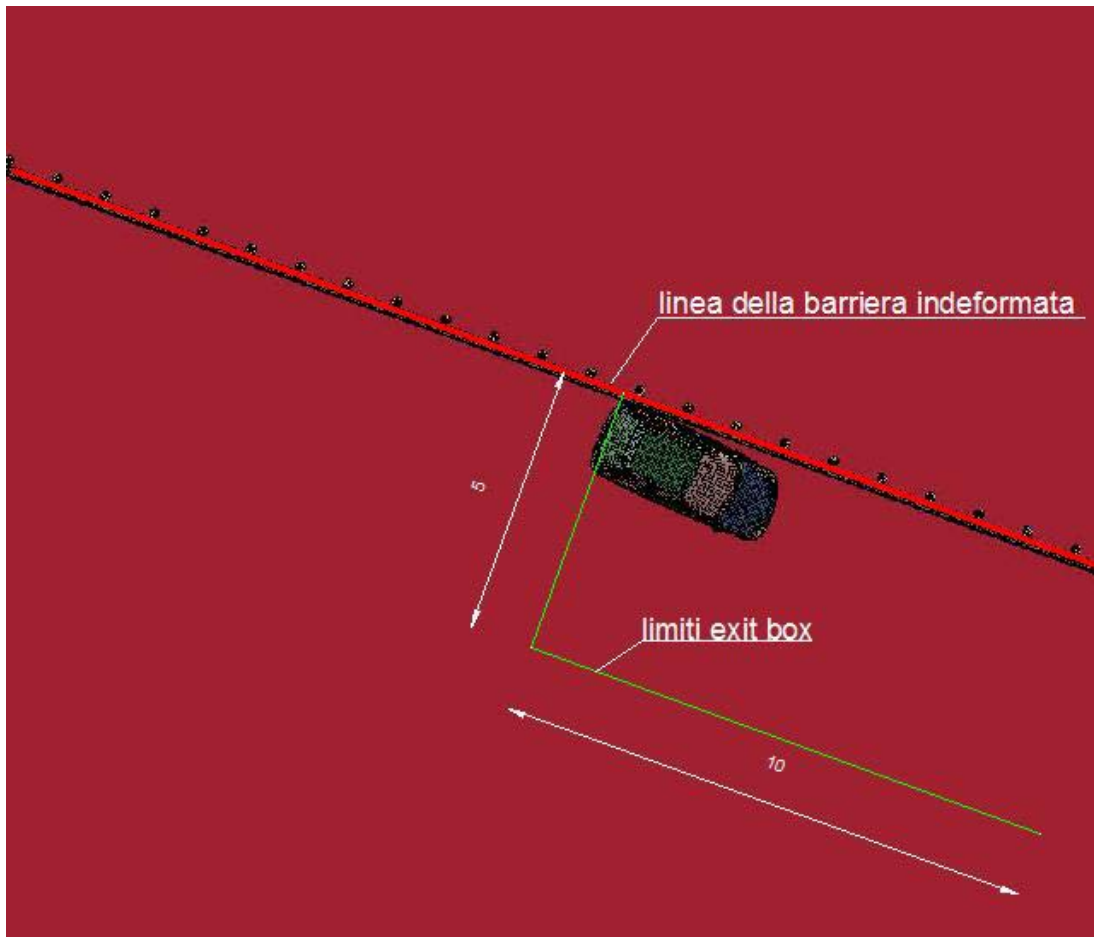


Fig.6.27 Esempio “exit box” per il modello con diametro di nastri e montanti pari a 200 mm

Dalla fig. n°6.28 si può notare come l'indice ASI inizialmente aumenti al crescere della temperatura passando da un valore pari a 0,7 per $T=-5^{\circ}$ ad un valore massimo di 0,79 per $T=5^{\circ}$ per poi decrescere lentamente seguendo un andamento parabolico. Dopo i 15° i valori dell'indice ASI diventano inferiori rispetto a quelli riscontrati per le basse temperature. Dal grafico, inoltre, si evince che per tutti i valori di temperatura, l'indice ASI risulta essere inferiore all'unità e la barriera quindi rientra nel più alto livello di severità d'urto: il livello A.

La figura n°6.29 mostra un andamento lineare della variazione dell'indice ASI in relazione alla temperatura nel caso di urto in prossimità dello spazio libero fra due montanti. In questo caso, all'aumentare della temperatura l'indice ASI diminuisce, portandosi da un valore pari a 0,711 per $T=-5^{\circ}$ ad un valore pari a 0,61 per $T=25^{\circ}$: questo dato potrebbe portare alla conclusione che all'aumentare della temperatura il legno diventa meno rigido e dunque l'urto meno severo. Come nei casi precedenti, per tutti i valori di temperatura studiati l'indice ASI risulta essere inferiore all'unità e la barriera quindi rientra nel più alto livello di severità d'urto: il livello A.

La figura 6.30 mostra l'andamento dell'indice ASI in funzione dell'umidità e l'impatto del veicolo è previsto in corrispondenza del montante. Come nel caso della sezione di nastri e paletti pari a 250 mm si riscontra una riduzione dei valori dell'indice ASI all'aumentare dell'umidità, risultato confermato anche nel caso dell'urto del veicolo in prossimità dello spazio libero fra due montanti (vedi figura n°6.31)

In generale, dunque, si sono riscontrati valori maggiori nell'indice ASI nel caso dell'urto contro il montante, a parità di valori di umidità e temperatura sia nel caso di sezione di montanti e nastri pari a 250 mm che nel caso di sezione pari a 200 mm. Questo risultato, peraltro intuibile, porta alla conclusione che l'urto contro il montante risulta più severo.

Ancora, in tutti i casi esaminati, si è rilevato che ad un aumento dell'umidità corrisponde una riduzione dei valori dell'indice ASI. Evidentemente all'aumentare dell'umidità la barriera assume un comportamento meno rigido e perciò l'urto risulta meno gravoso per gli occupanti di un autoveicolo.

Per quel che concerne l'analisi sull'influenza della temperatura sull'indice ASI, si riscontra un andamento parabolico della legge di variazione.

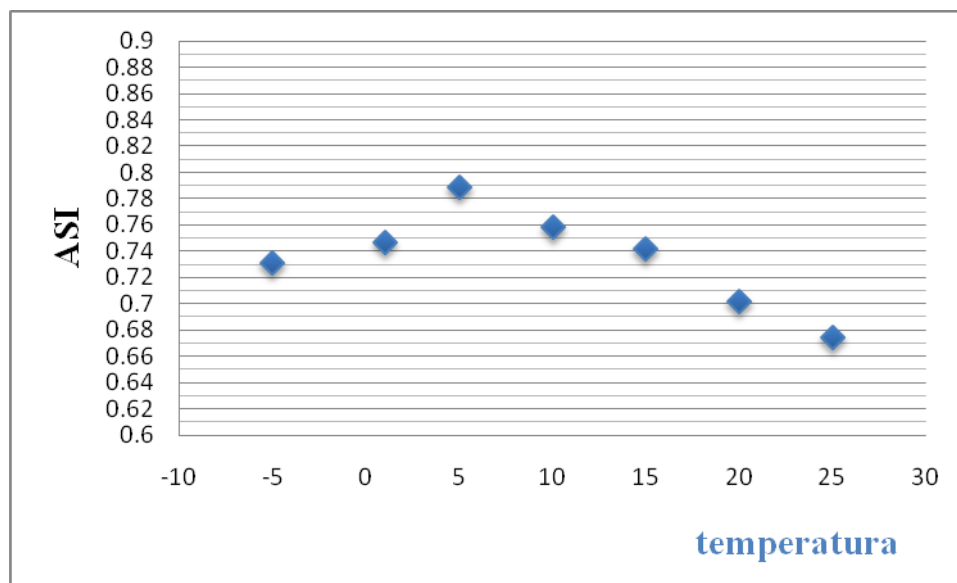


Fig.6.28 *Variazione dell'indice ASI in funzione della temperatura (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

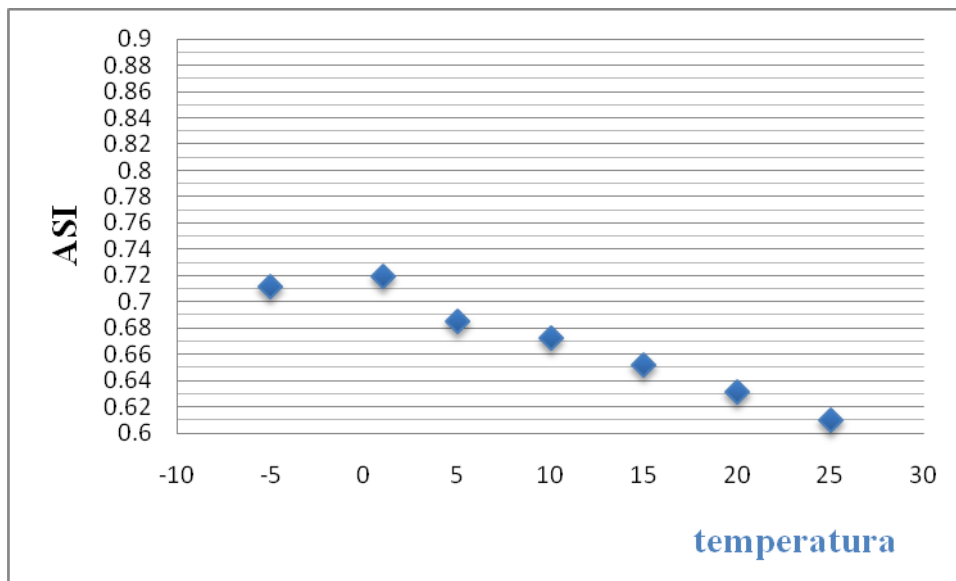


Fig.6.29 *Variazione dell'indice ASI in funzione della temperatura (impatto del veicolo nello spazio libero fra due montanti)*

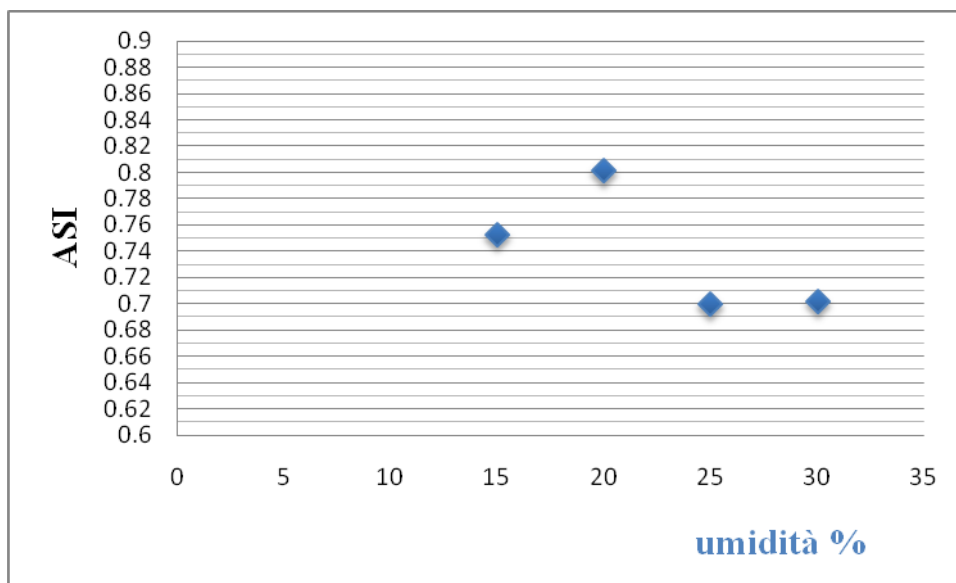


Fig.6.30 *Variazione dell'indice ASI in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

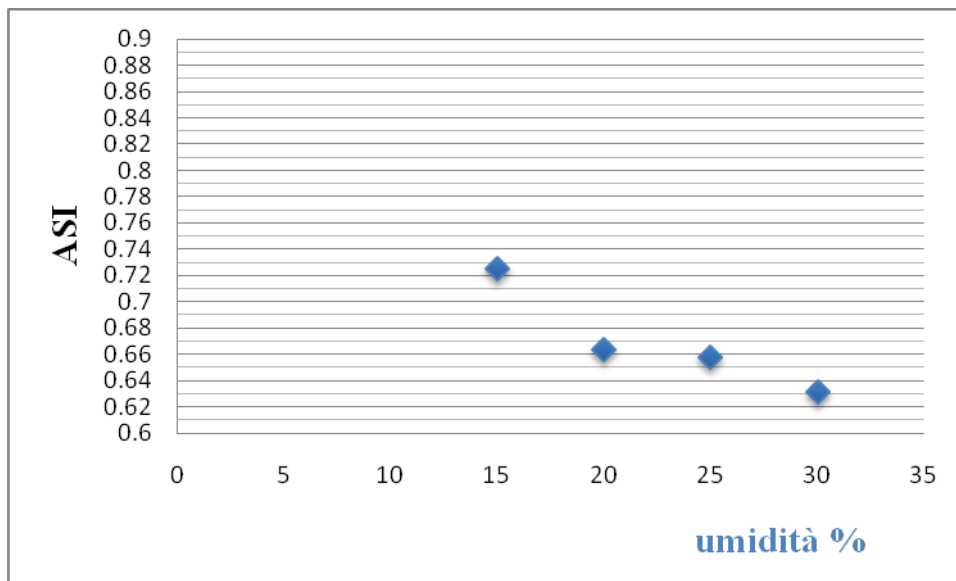


Fig.6.31 *Variazione dell'indice ASI in funzione dell'umidità (impatto del veicolo nello spazio libero fra due montanti)*

Anche per questo modello è stato calcolato l'indice THIV ed è stata studiata la sua variazione in funzione di temperatura e umidità.

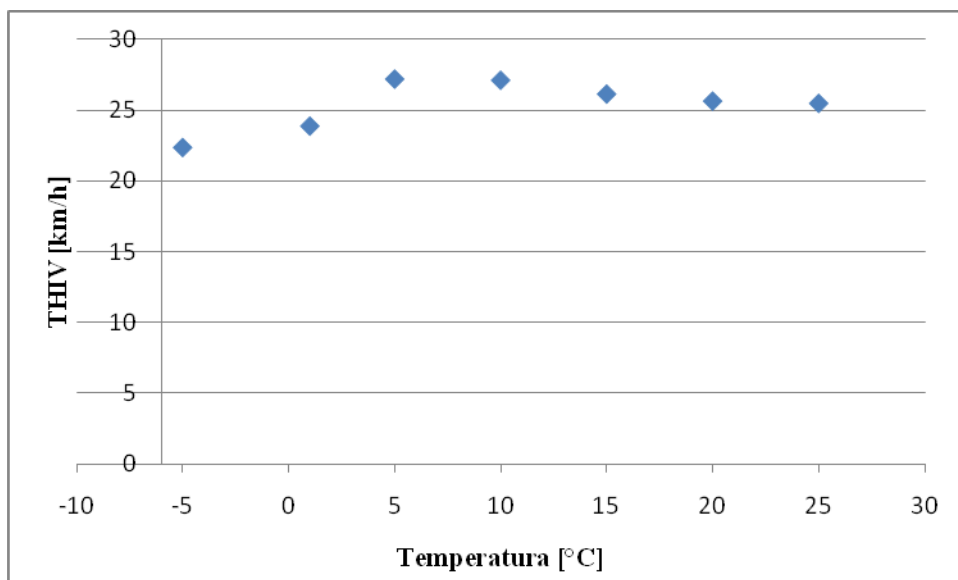


Fig.6.32 *Variazione dell'indice THIV in funzione della temperatura (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

Dalla figura n°6.32 si può notare come l'indice THIV inizialmente aumenti al crescere della temperatura passando da un valore di circa 22 km/h per $T=-5^{\circ}$ ad un valore massimo di circa 27 km/h per $T=5^{\circ}$ per poi decrescere lentamente seguendo una linea di tendenza parabolica. Tale andamento è analogo a quello riscontrato per l'indice ASI (vedi figura n°6.33).

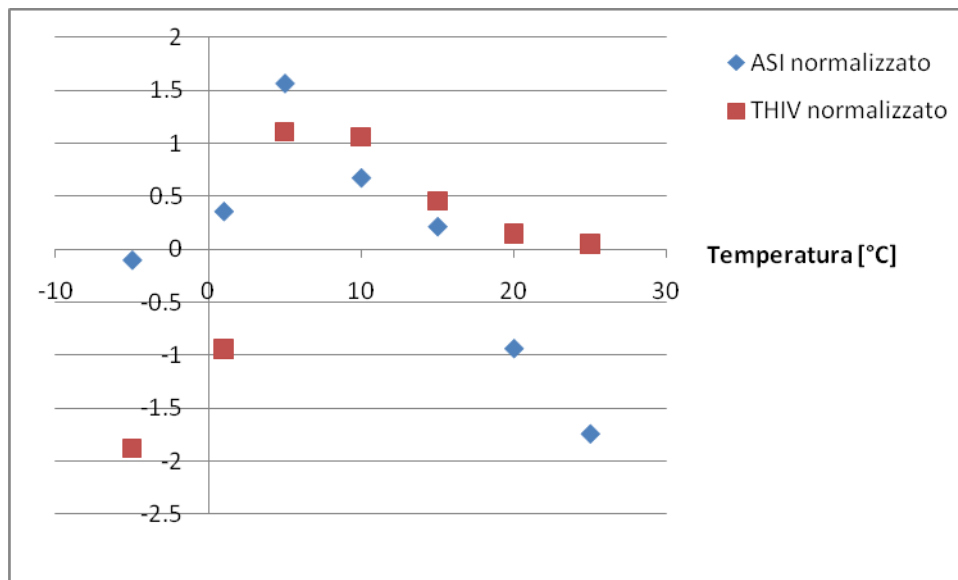


Fig.6.33 *Variazione dell'indice ASI e THIV in funzione della temperatura (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

Nel caso di urto nello spazio libero fra due montanti (vedi figura n°6.34) si riscontra una diminuzione lineare dei valori dell'indice THIV all'aumentare della temperatura.

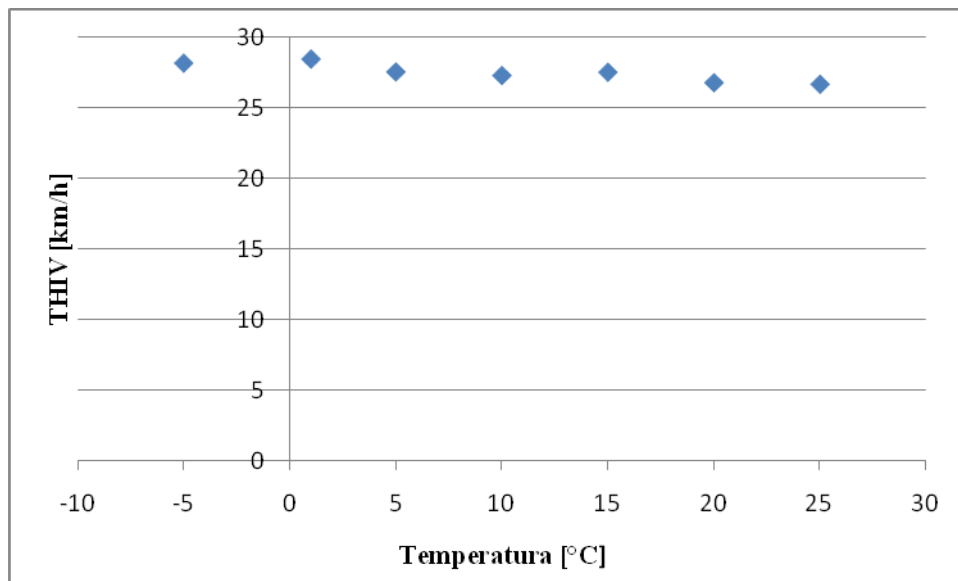


Fig.6.34 *Variazione dell'indice THIV in funzione della temperatura (impatto del veicolo nello spazio libero fra due montanti)*

La figura n°6.35 riporta l'andamento, in funzione della temperatura, degli indici ASI e THIV normalizzati. Da questo grafico si evince che i due indici seguono un andamento analogo.

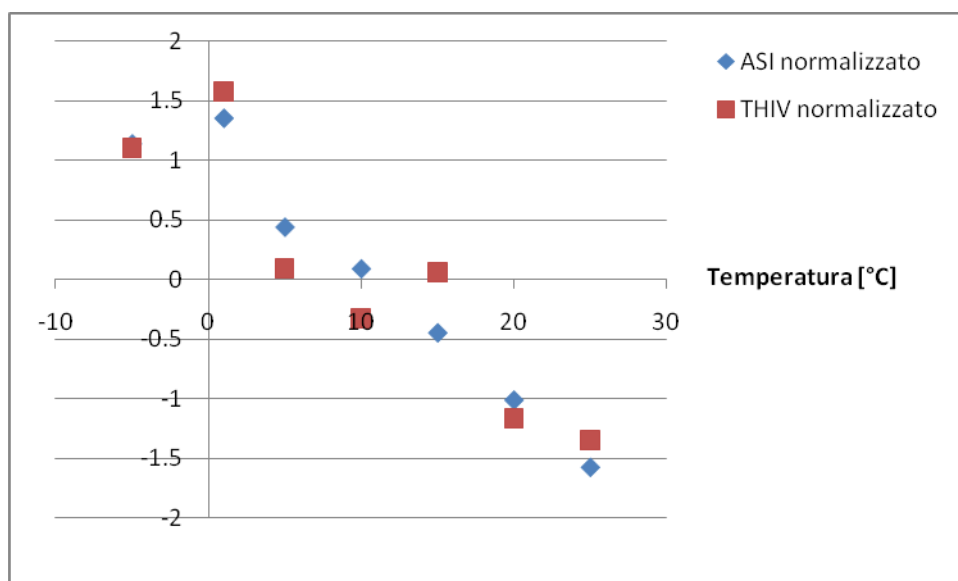


Fig.6.35 *Variazione dell'indice THIV in funzione della temperatura (impatto del veicolo nello spazio libero fra due montanti)*

All'aumentare dell'umidità i valori dell'indice THIV diminuiscono seguendo una legge lineare, come si evince dal grafico riportato in figura n°6.35 che riporta la variazione dell'indice THIV in funzione dell'umidità nel caso di urto contro il montante. Un risultato del tutto analogo si

riscontra nel caso di urto in corrispondenza dello spazio libero fra montanti (vedi figura n°6.38). Le figure n°6.37 e 6.39 rappresentano la variazione, in funzione dell'umidità, degli indici ASI e THIV normalizzati, la prima figura rappresenta l'urto contro il montante la seconda l'urto in prossimità dello spazio fra i due montanti. Dai due grafici si può dedurre che i due indici variano in funzione dell'umidità secondo leggi diverse.

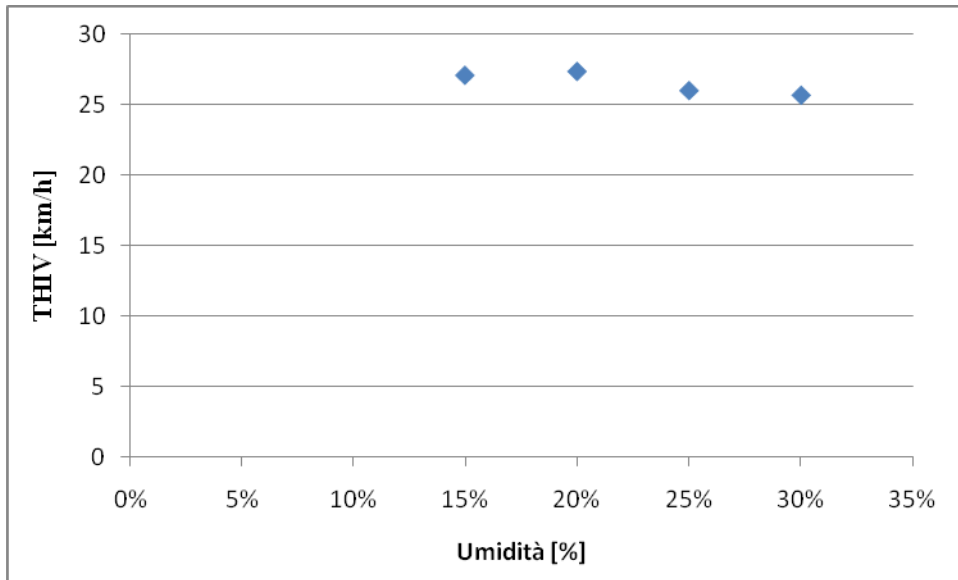


Fig.6.36 *Variazione dell'indice THIV in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

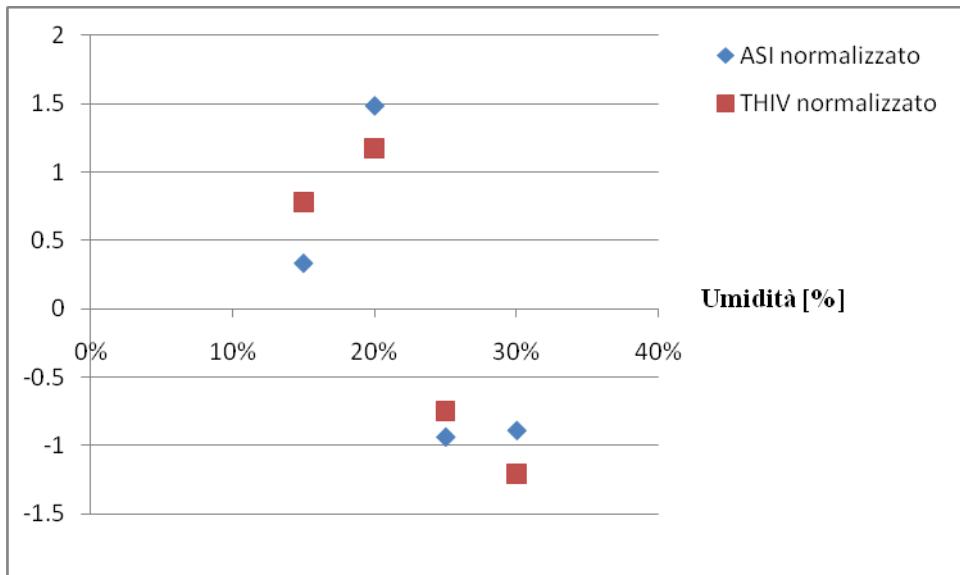


Fig.6.37 *Variazione dell'indice ASI e THIV in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità del montante)*

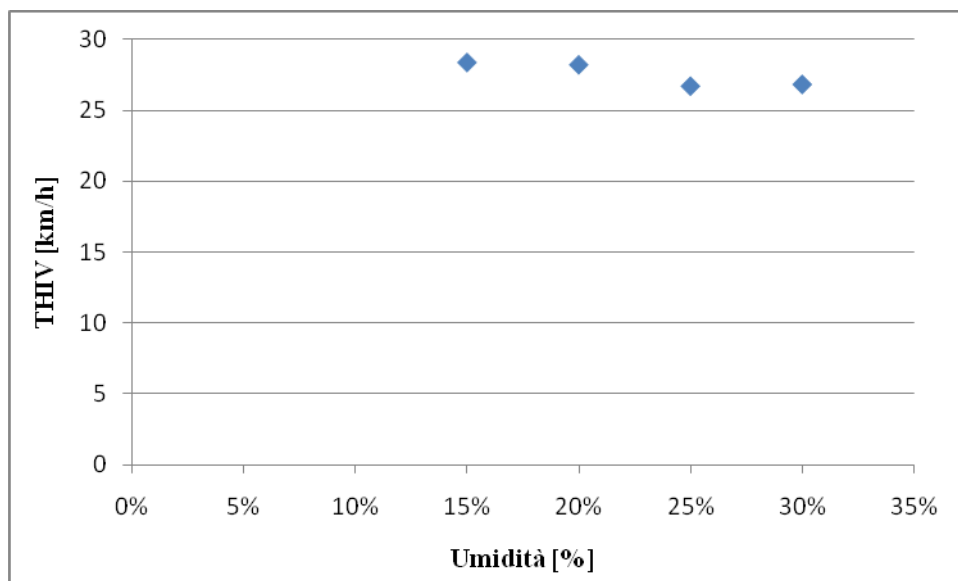


Fig. 6.38 *Variazione dell'indice THIV in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità dello spazio libero fra montanti).*

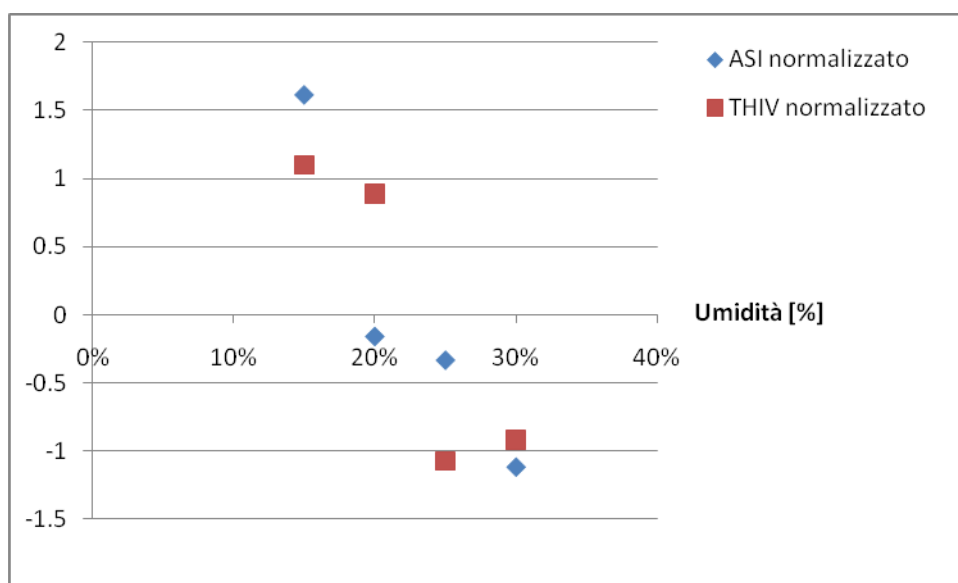


Fig.6.39 *Variazione dell'indice ASI e THIV in funzione dell'umidità (impatto del veicolo in prossimità dello spazio libero fra montanti)*

Stante questa analisi dell'indice THIV si è rilevato che in tutte le condizioni esaminate l'indice rimane al di sotto del limite imposto dalla UNI EN 1317-2, vale a dire pari a 33 km/h.

Ancora, si è rilevato che ad un aumento dell'umidità corrisponde una riduzione dei valori dell'indice THIV come riscontrato anche per l'indice ASI. Questo risultato tende a confermare

l'ipotesi secondo la quale all'aumentare dell'umidità la barriera assume un comportamento meno rigido e perciò l'urto risulta meno gravoso per gli occupanti di un autoveicolo.

Infine, dall'analisi della variazione degli indici ASI E THIV normalizzati è emerso che i due indici di severità seguono una legge di variazione parabolica per quanto concerne la temperatura, mentre seguono andamenti diversi in funzione dell'umidità.

Infine per la barriera con diametri e montanti pari a 200 mm è stata calcolata la deflessione dinamica, che risulta essere pari a 75 cm per l'urto sul montante, mentre 80 cm per l'impatto fra lo spazio libero. In entrambi i casi, la larghezza operativa della barriera rientra nel livello W4.

Conclusioni

Le barriere di sicurezza stradali appartengono ai dispositivi di arredo stradale preposti all'ottenimento della sicurezza passiva. Esse hanno il compito di contenere il veicolo che per qualsiasi motivo tende ad uscire fuori strada; pertanto durante l'urto non devono rompersi, non devono essere scavalcate e non devono imprimere ai passeggeri decelerazioni elevate. Nelle strade di particolare pregio ambientale non deve venire meno la sicurezza, ma allo stesso tempo è auspicabile che la sicurezza venga assicurata da dispositivi che si armonizzino nel contesto. Da qui nasce l'idea di una barriera stradale costruita totalmente in legno, da utilizzarsi in particolari itinerari come barriera da bordo laterale.

La ricerca effettuata in questa tesi si è occupata di barriere di sicurezza stradale realizzate interamente in legno. Dopo un'attenta ricerca bibliografica sull'argomento, che ha permesso di apprendere l'attuale stato dell'arte, sono state ipotizzate diverse tipologie di barriere. Per le sezioni degli elementi è stata scelta la forma circolare sia per motivi estetici, in questo caso non secondari, sia per ragioni di durabilità. Infatti si è deciso di utilizzare il legno massiccio al posto del lamellare, che avrebbe potuto avere problemi di delaminazione dovuti all'esposizione. Nello specifico è stata selezionata la forma circolare, propria del tronco, per le sezioni dei montanti e dei nastri che risulta manifestare nel tempo meno fessure dovute al ritiro.

I diversi modelli di barriera sono stati ricreati attraverso la simulazione FE e sottoposti ad una prova di crash del tipo TB11 secondo la EN1317; fra questi ne sono stati successivamente identificati due che soddisfacevano i requisiti richiesti dalla norma comunitaria UNI EN 1317 parte 2:

- Nessun elemento della barriera deve penetrare all'interno dell'abitacolo;
- I supporti della barriera si devono comportare come da progetto;
- Tutte le parti con massa maggiore di 2 kg, che si staccano durante l'urto devono essere identificati, locati e registrati; tali barriere non possono essere utilizzate nei luoghi in cui possono esserci persone;
- Durante l'impatto non più di una ruota deve passare sopra il dispositivo;
- Il veicolo non deve ribaltarsi;
- Devono essere annotate sia la deformazione dinamica che la larghezza operativa e classificate secondo la tabella fornita nella norma;

- Dopo l'urto il veicolo deve lasciare la barriera in modo che le ruote non attraversino una linea (*exit box*) parallela alla barriera stessa prima dell'urto, che sta da questa ad una distanza pari a un coefficiente A più la larghezza del veicolo e più il 16% della lunghezza dello stesso. Questa linea possiede una lunghezza nota B ed inizia nel punto di ultimo contatto fra barriera e veicolo.
- Deve rispettare i limiti per gli indici di severità d'urto ASI e THIV

Entrambi i modelli prescelti sono stati sottoposti ad ulteriori prove. Innanzitutto sono stati ipotizzati diversi punti in cui far avvenire l'urto, in modo da identificare quale situazione risultasse più gravosa, ed in seguito sono state fatte variare sia l'umidità che la temperatura del legno per valutare l'indice ASI e l'indice THIV. Infatti il materiale è fortemente dipendente dalle condizioni climatiche ed è opportuno tenerne conto per quel che concerne la resistenza e la durabilità. In questo caso specifico era necessario appurare che il materiale non aumentasse la resistenza e di conseguenza anche la rigidità al punto da modificare il comportamento della barriera ed avere un urto troppo severo.

Il risultato della ricerca propone una barriera realizzata interamente in legno realizzata da montanti di diametro 200 mm e tre nastri dello stesso diametro, collocati a 280mm da terra il primo, a 410 mm il secondo dal primo e a 150 mm il secondo dal terzo, che possiede un livello di contenimento normale, verosimilmente del tipo N2. Dalle verifiche effettuate nelle diverse simulazioni si è potuto constatare che questa reindirizza il veicolo nella carreggiata, non si rompe durante l'urto, tantomeno elementi di essa penetrano nell'abitacolo. Inoltre la barriera proposta ha un ottimo comportamento nei confronti dei passeggeri in quanto la severità dell'urto calcolata mediante l'indice ASI è sempre rimasta sotto l'unità anche nel caso dell'urto contro il montante, identificato come condizione d'urto più severa.

È stato calcolato l'indice THIV richiesto dalla normativa e anch'esso è stato più che soddisfacente, infatti il suo valore è sempre inferiore ai 33 km/h, limite imposto dalla norma.

Le analisi parametriche sugli indici di severità hanno portato alla conclusione che ad un incremento di umidità corrisponde una diminuzione sia dell'ASI che del THIV: evidentemente all'aumentare dell'umidità la barriera assume un comportamento meno rigido e perciò l'urto risulta meno gravoso per gli occupanti di un autoveicolo. Mentre si è riscontrato che al variare della temperatura i due indici seguono entrambi una legge parabolica. Inoltre è stata calcolata la larghezza operativa che risulta entro i limiti del livello W4. Ovviamente lo studio non è terminato, per assimilare il dispositivo di ritenuta alla tipologia N2 è ancora necessario simulare

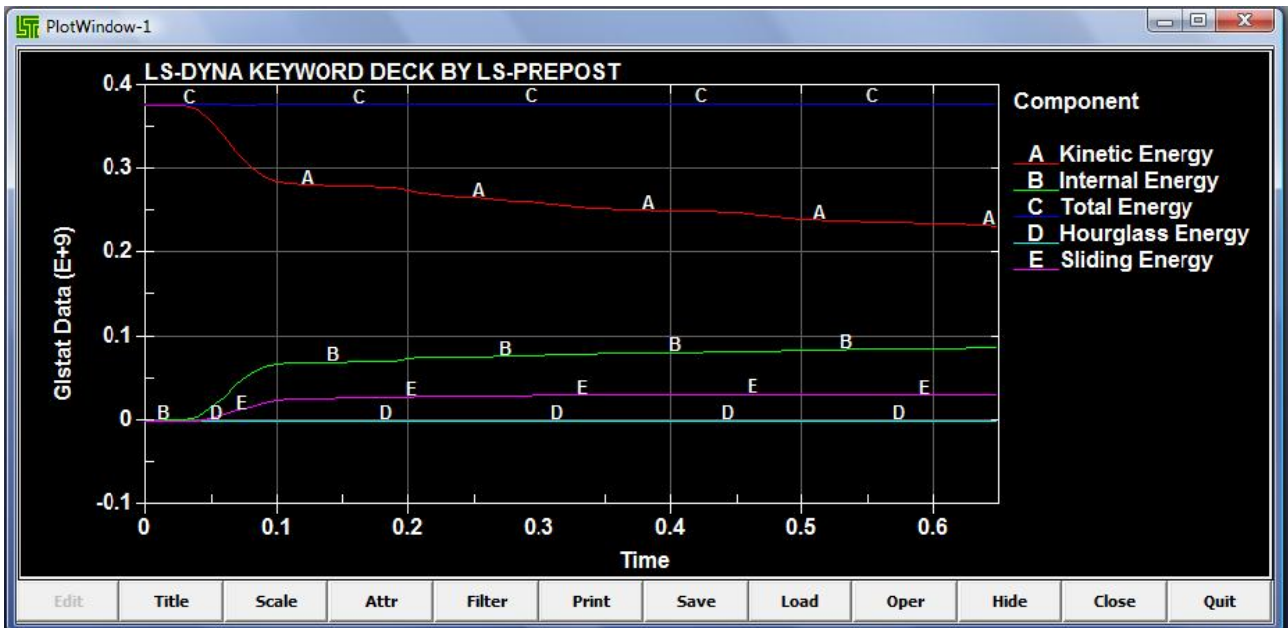
la prova TB32 con il veicolo da 1500 kg; che impatta con un angolo di 20° ad una velocità di 110 km/h.

Lo sviluppo futuro della ricerca dovrà inoltre anche tener conto del fatto che una barriera di sicurezza stradale deve essere adatta a tutti gli utenti della strada, e pertanto, anche agli utenti su due ruote.

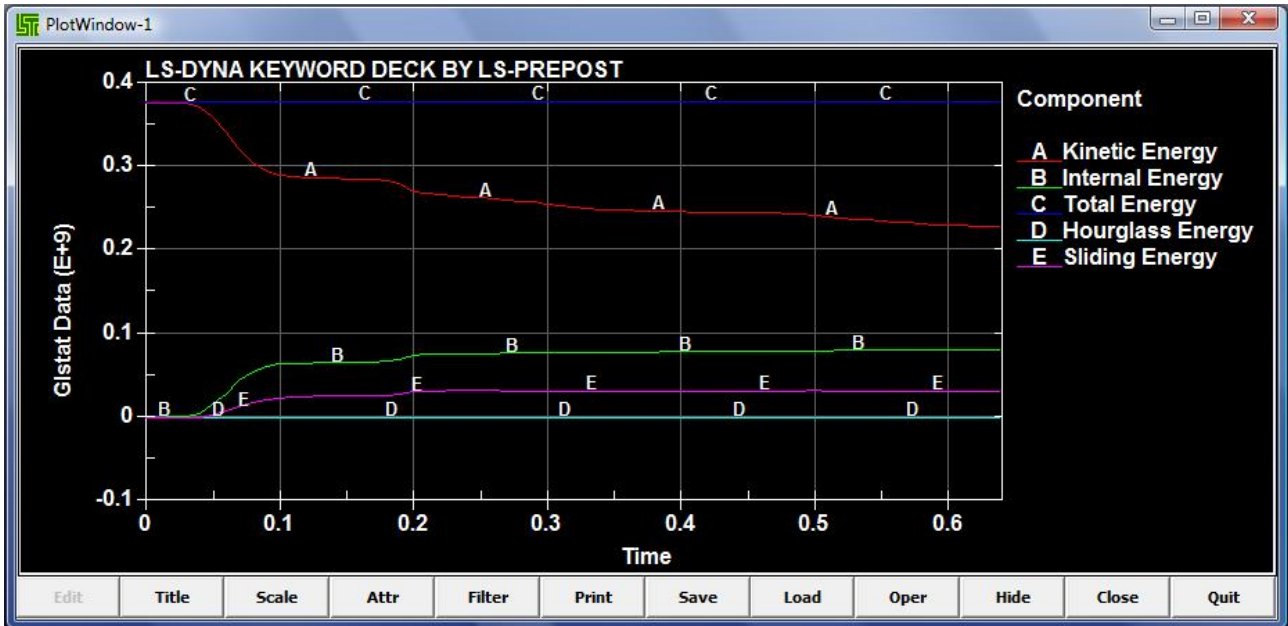
Lo studio delle barriere chiamate “salva motociclisti” consiste nel prevedere un nastro nella parte inferiore che protegga l’eventuale urto contro i montanti ed allo stesso tempo non diventi una lama affilata, come spesso accade con il nastro in acciaio, che può produrre conseguenze estremamente disastrose su un essere umano che impatta contro di essa .

Questo studio sulle barriere di sicurezza stradale in legno è ancora in itinere dal momento che è il tema di un assegno di ricerca finanziato dalla Regione Autonoma della Sardegna, in partenariato con un’azienda locale, la “Teknolegno”, che si occupa di costruzione di strutture in legno ed è leader nel settore nell’Isola.

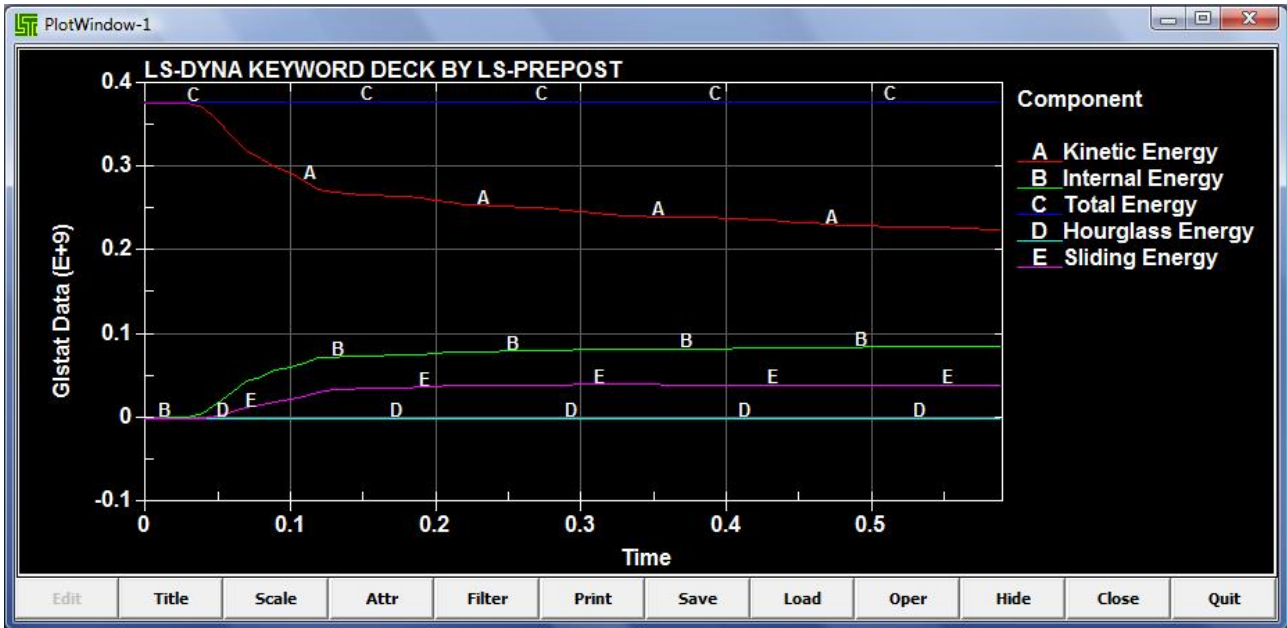
Appendice A



Energia modello con montanti e nastri $\Phi 250$ impatto sul montante $T=25$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\Phi 250$ impatto sul montante $T=20$ e $U=30\%$



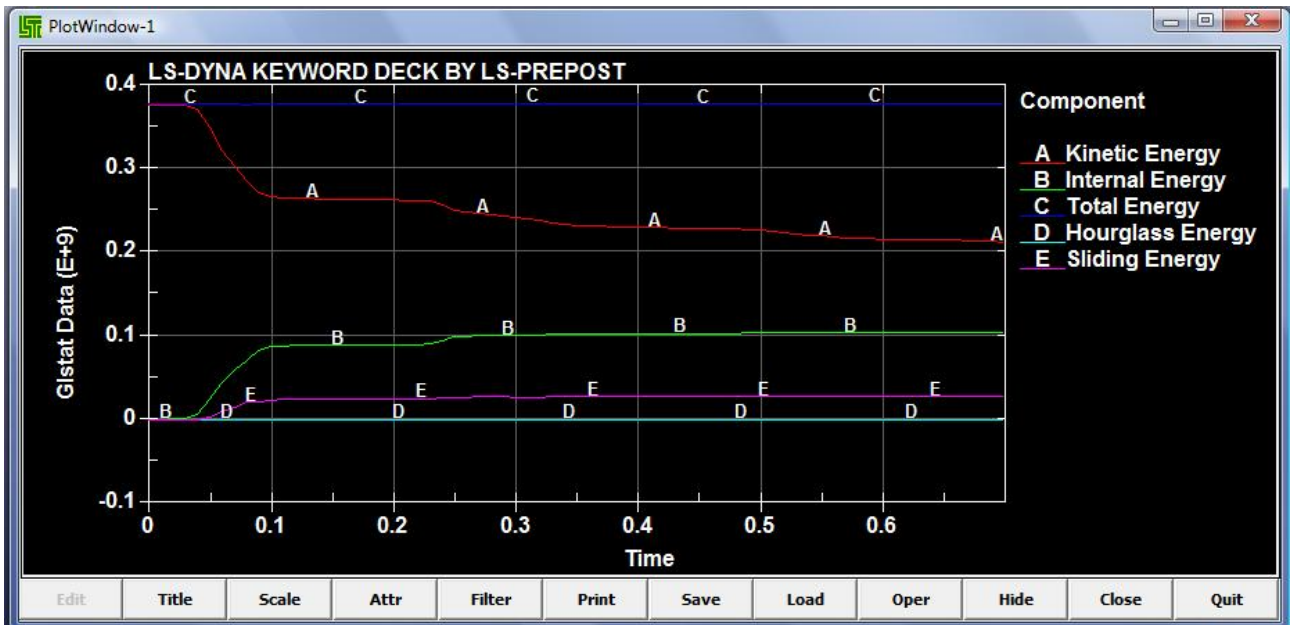
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sul montante $T=15$ e $U=30\%$



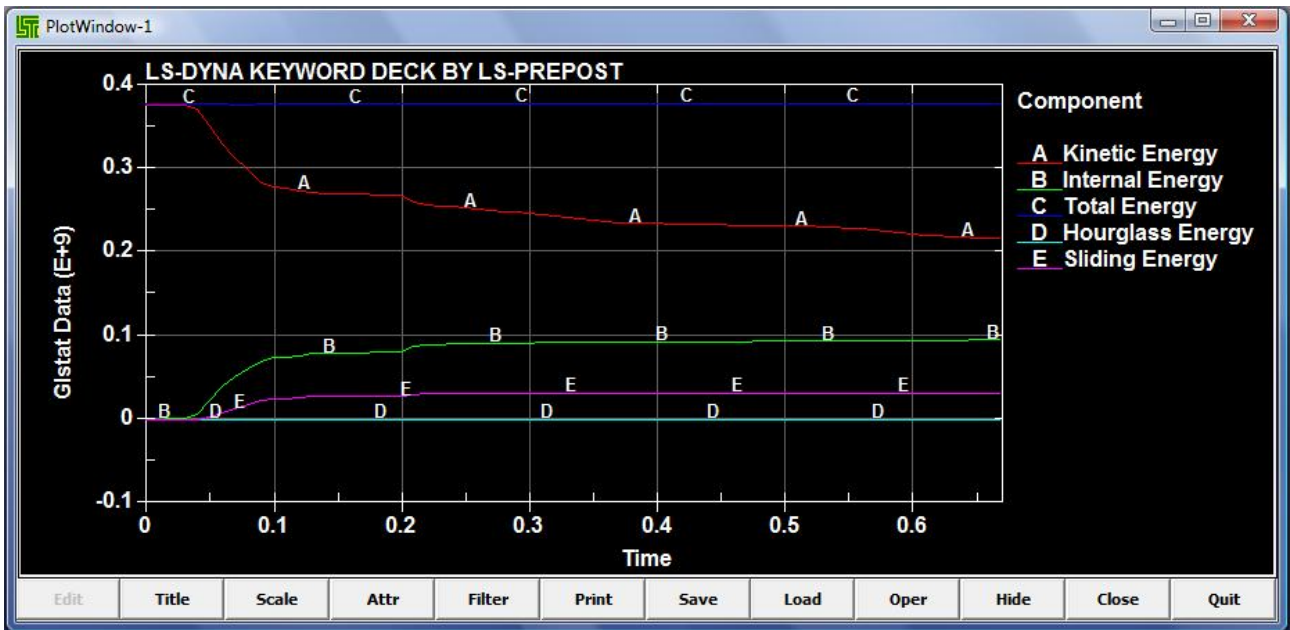
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sul montante $T=10$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sul montante $T=5$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sul montante $T=1$ e $U=30\%$



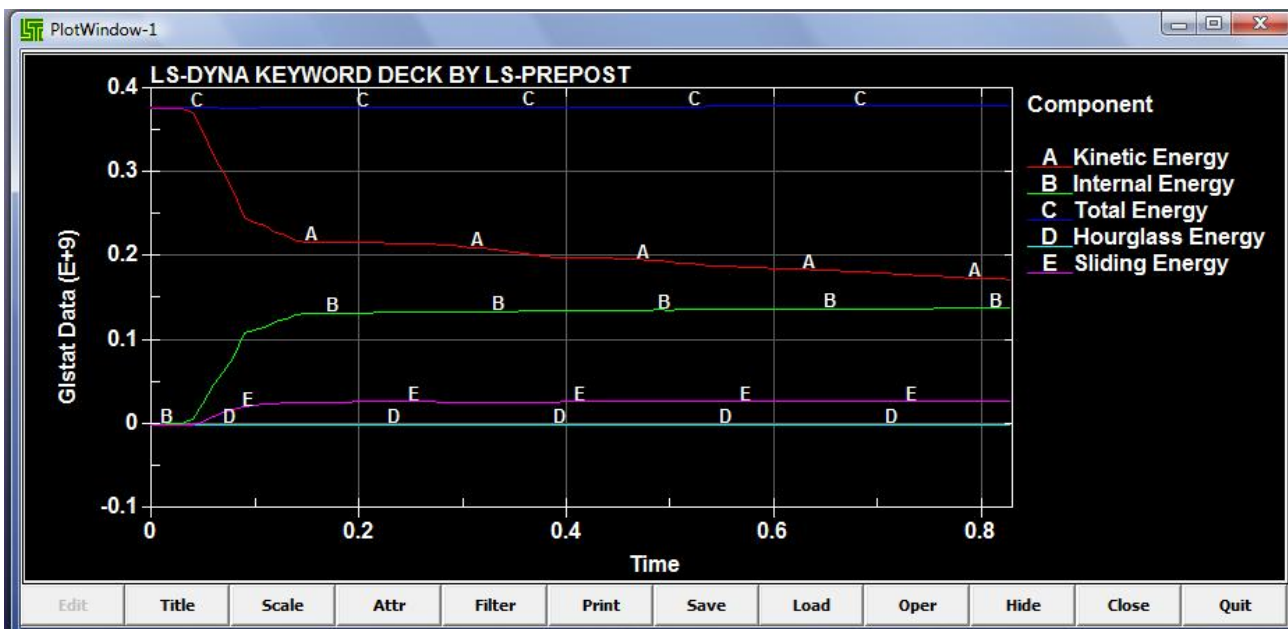
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sul montante $T=-5$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sul montante $T=20$ e $U=25\%$



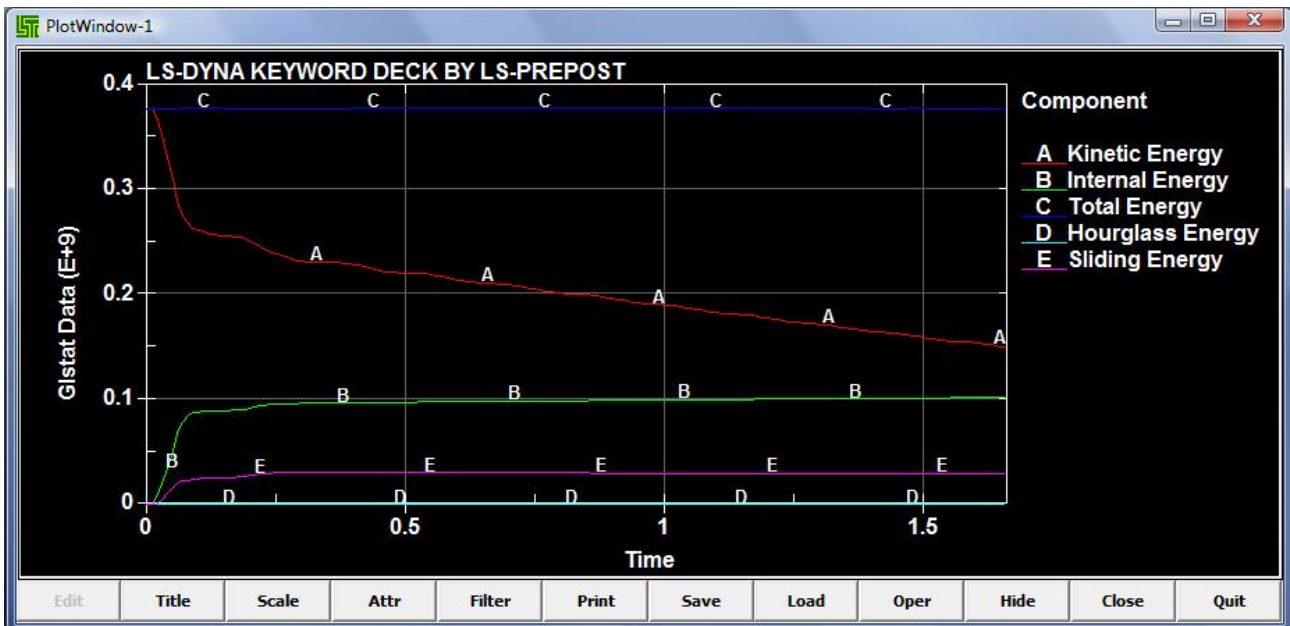
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sul montante $T=20$ e $U=20\%$



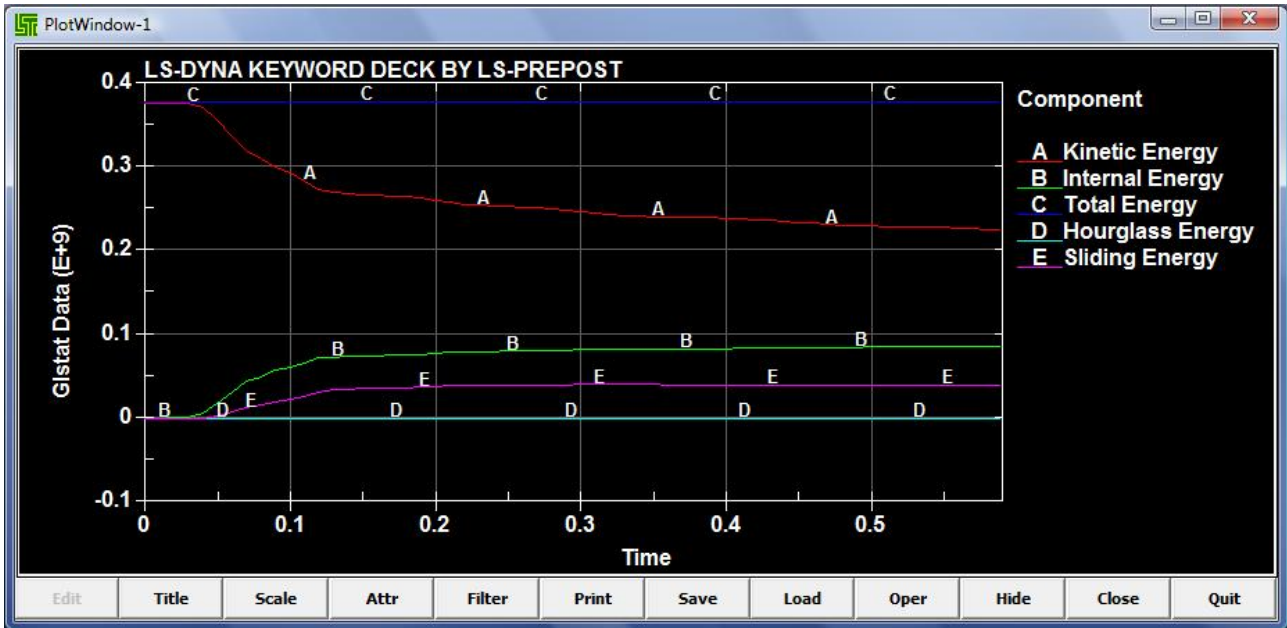
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sul montante $T=20$ e $U=15\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=25$ e $U=30\%$



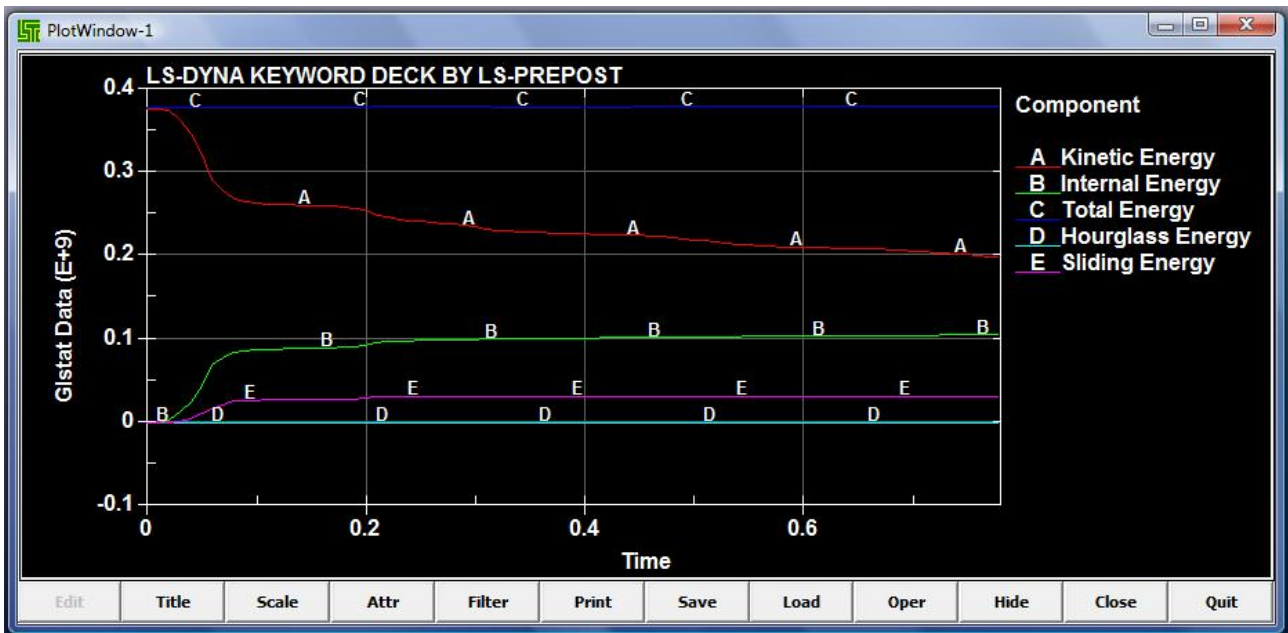
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=20$ e $U=30\%$



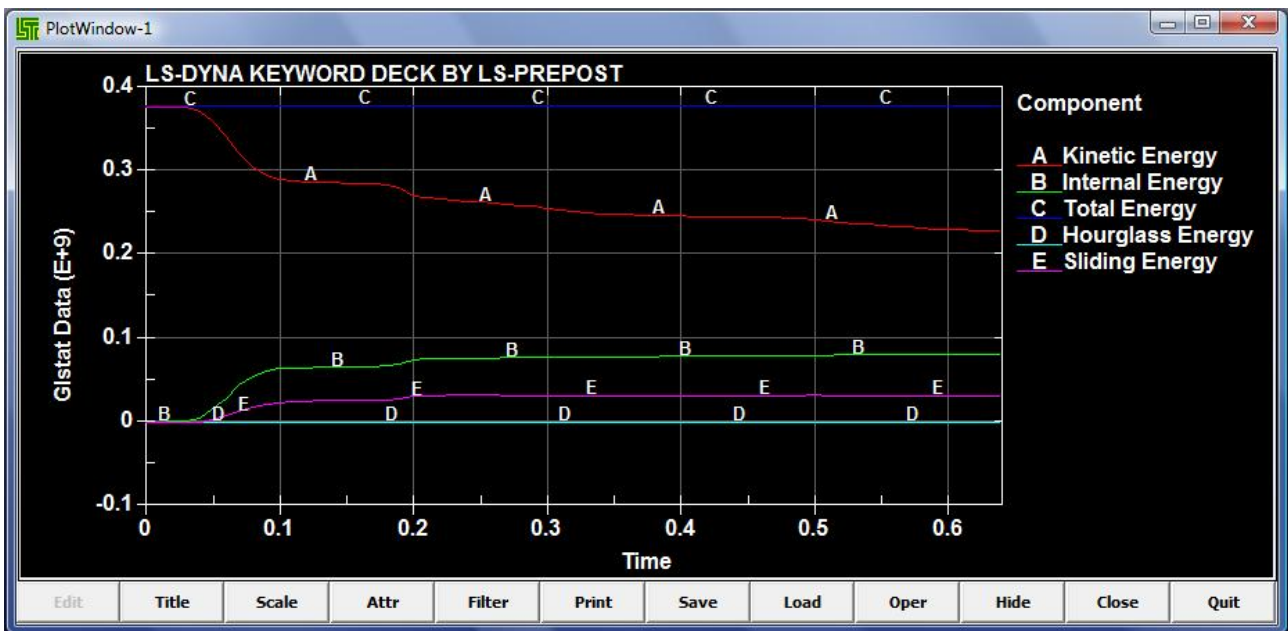
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=15$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=10$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=5$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=1$ e $U=30\%$



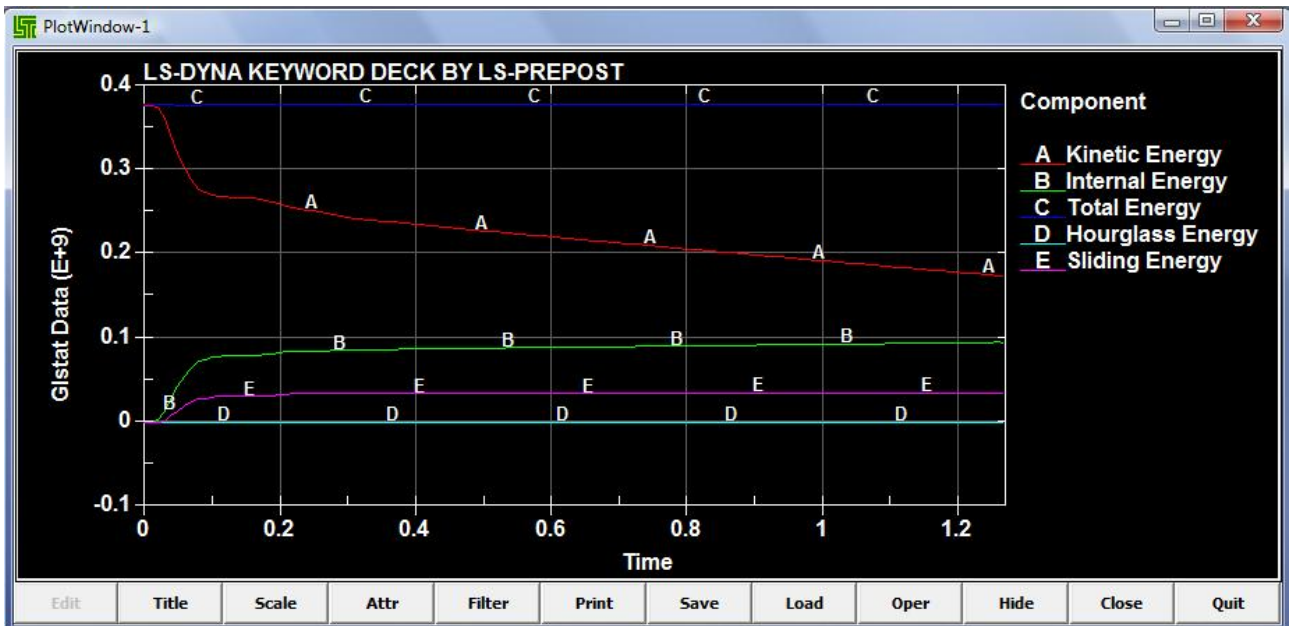
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=-5$ e $U=30\%$



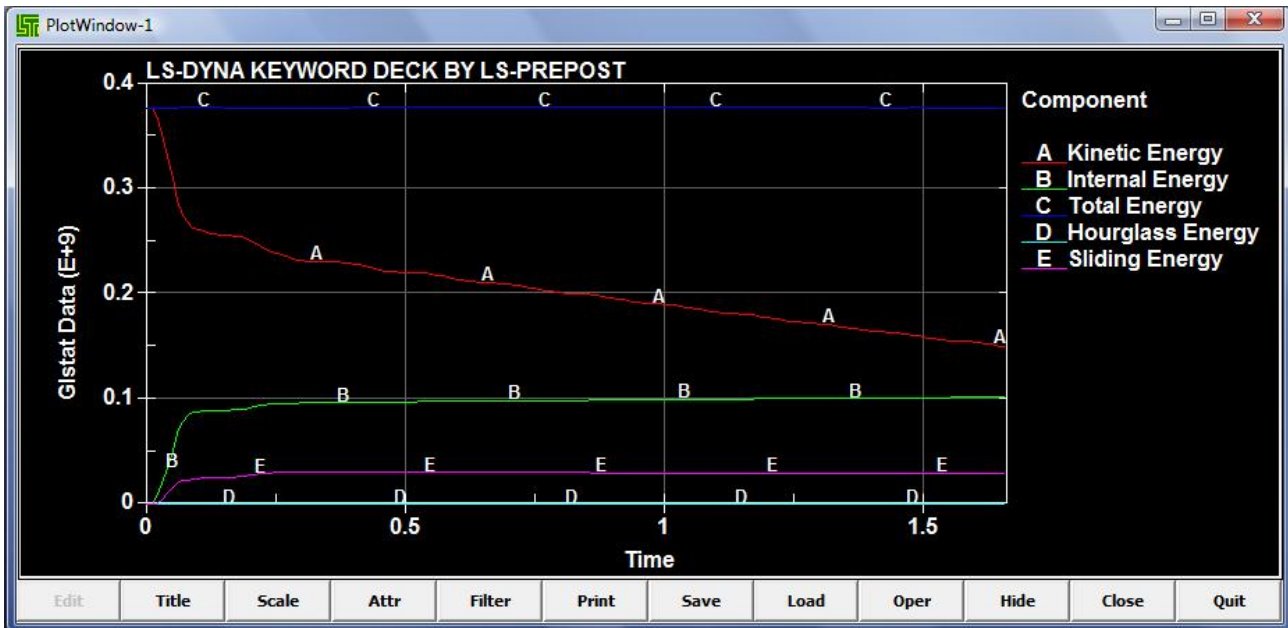
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=20$ e $U=25\%$



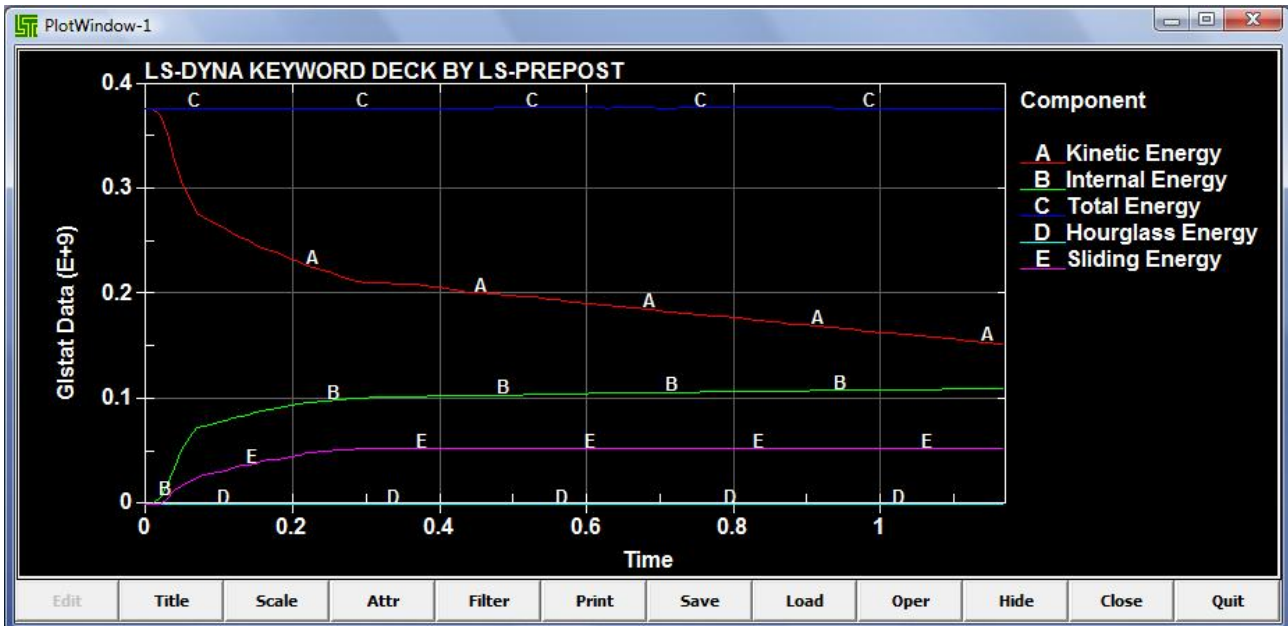
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=20$ e $U=20\%$



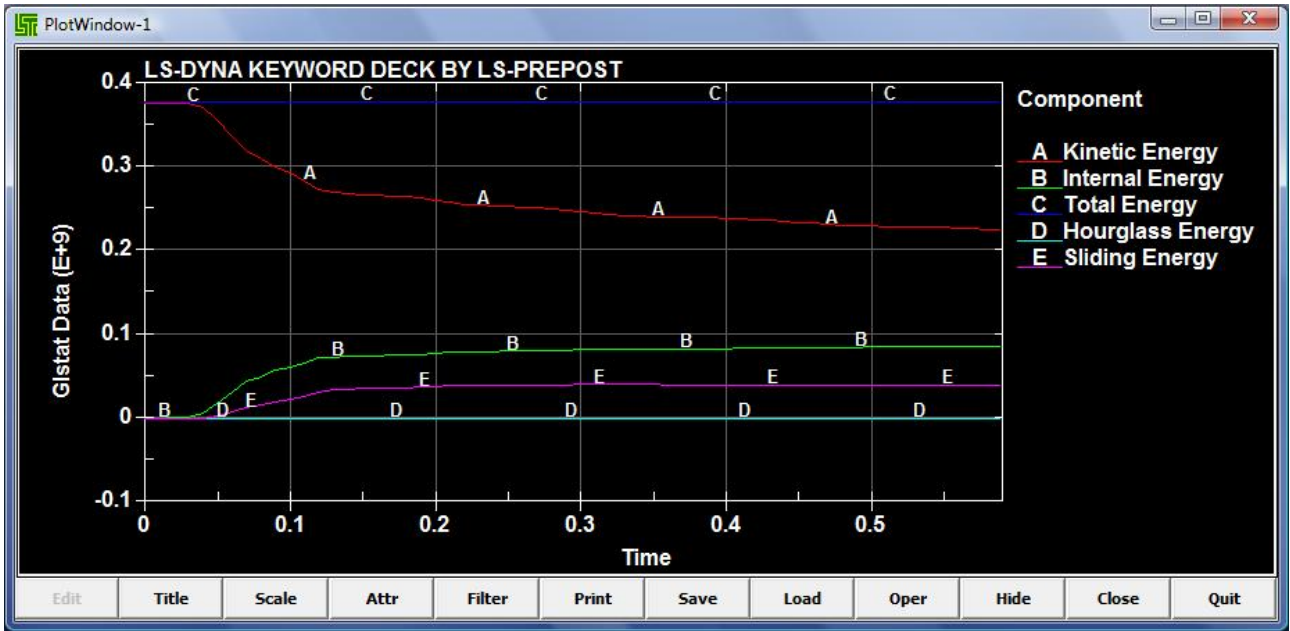
Energia modello con montanti e nastri $\phi 250$ impatto sullo spazio libero $T=20$ e $U=15\%$



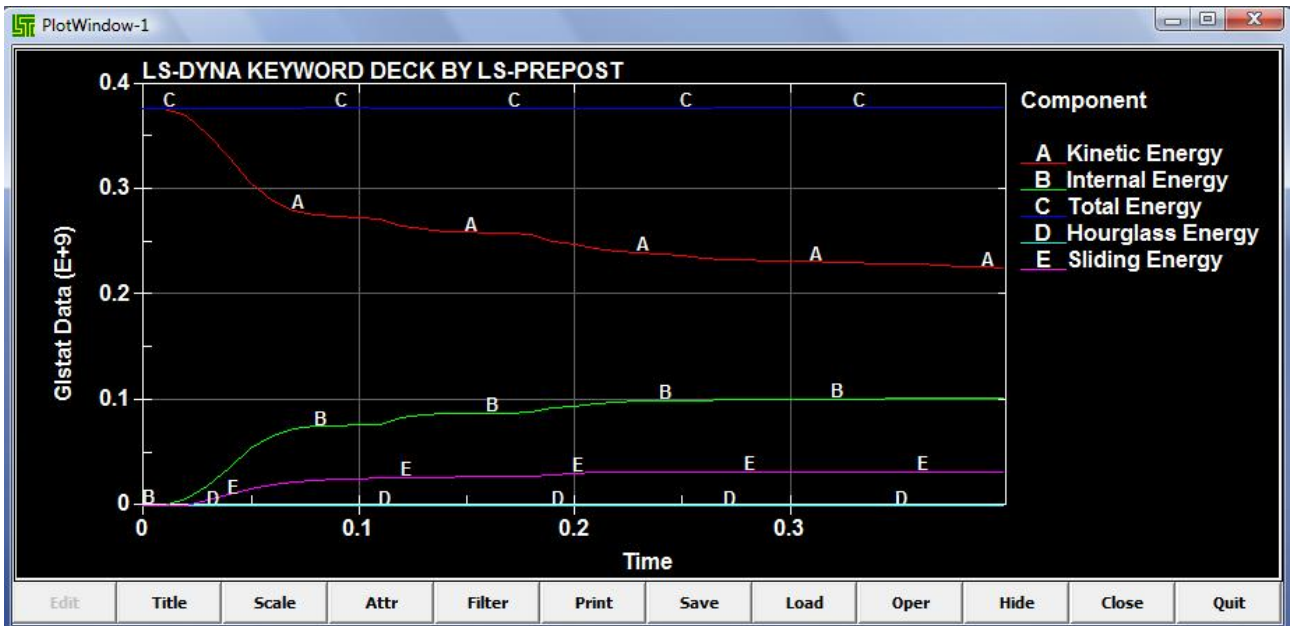
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sul montante $T=25$ e $U=30\%$



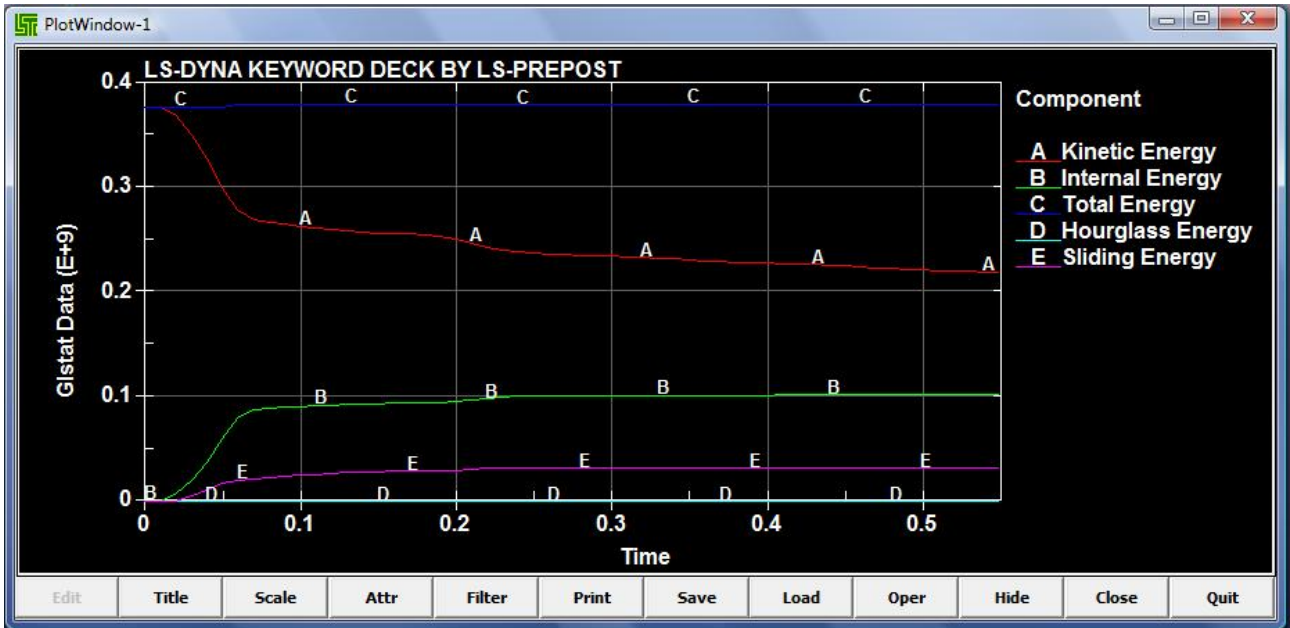
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sul montante $T=20$ e $U=30\%$



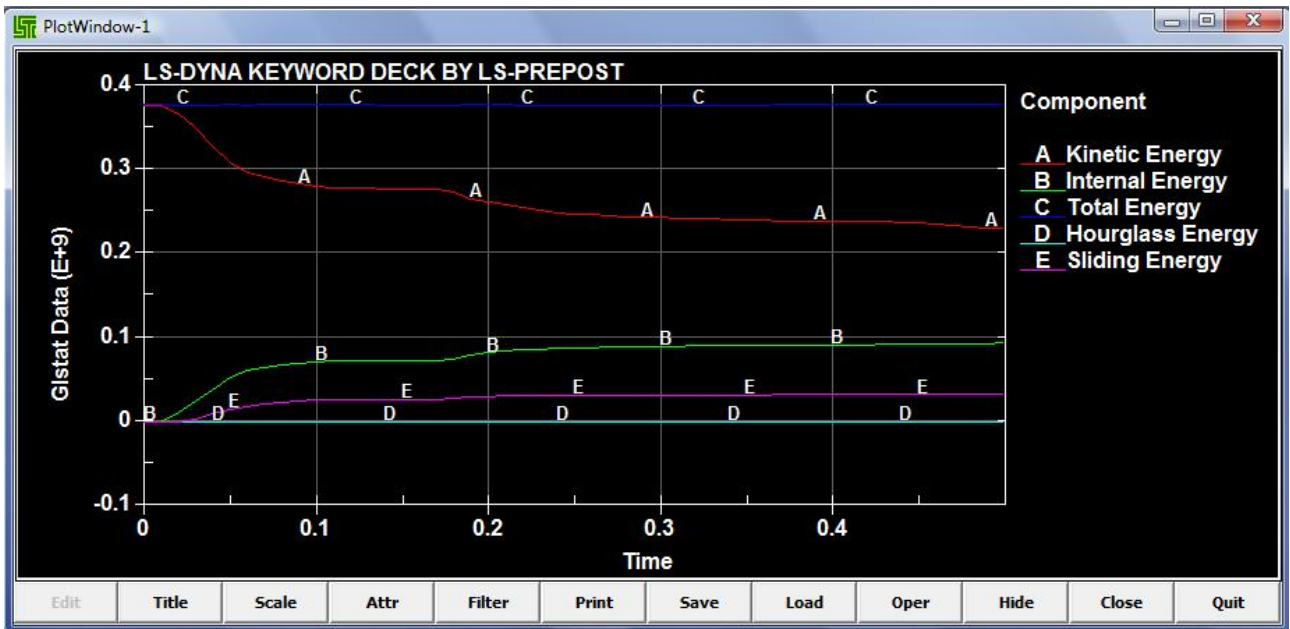
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sul montante $T=15$ e $U=30\%$



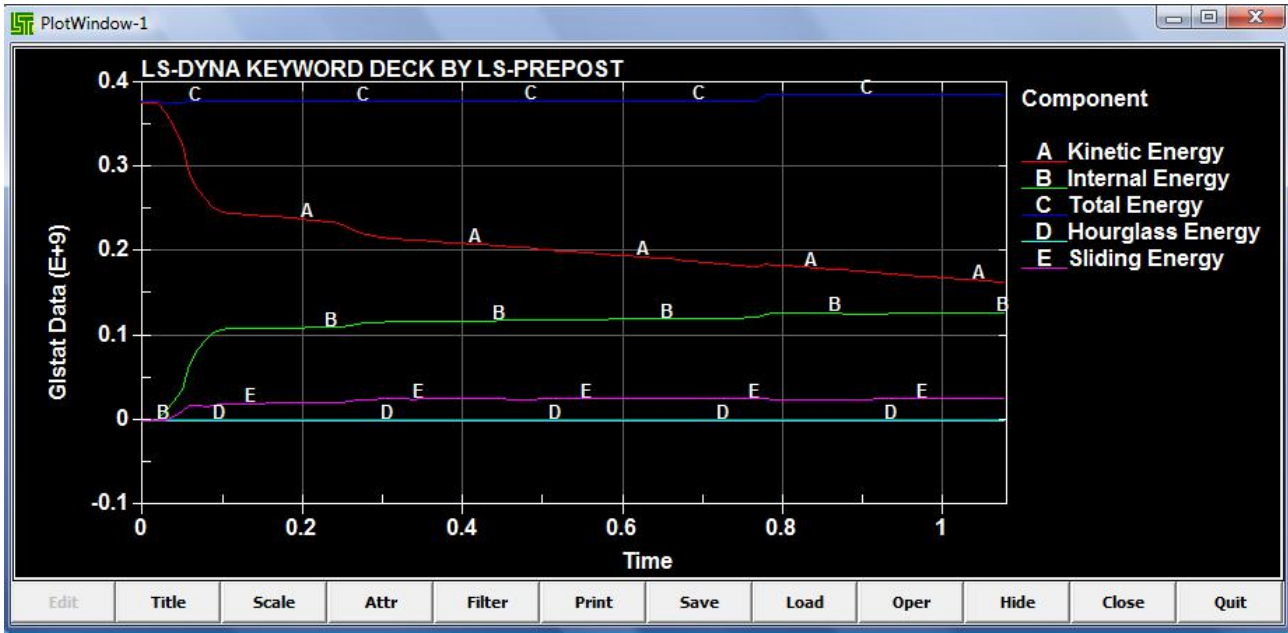
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sul montante $T=10$ e $U=30\%$



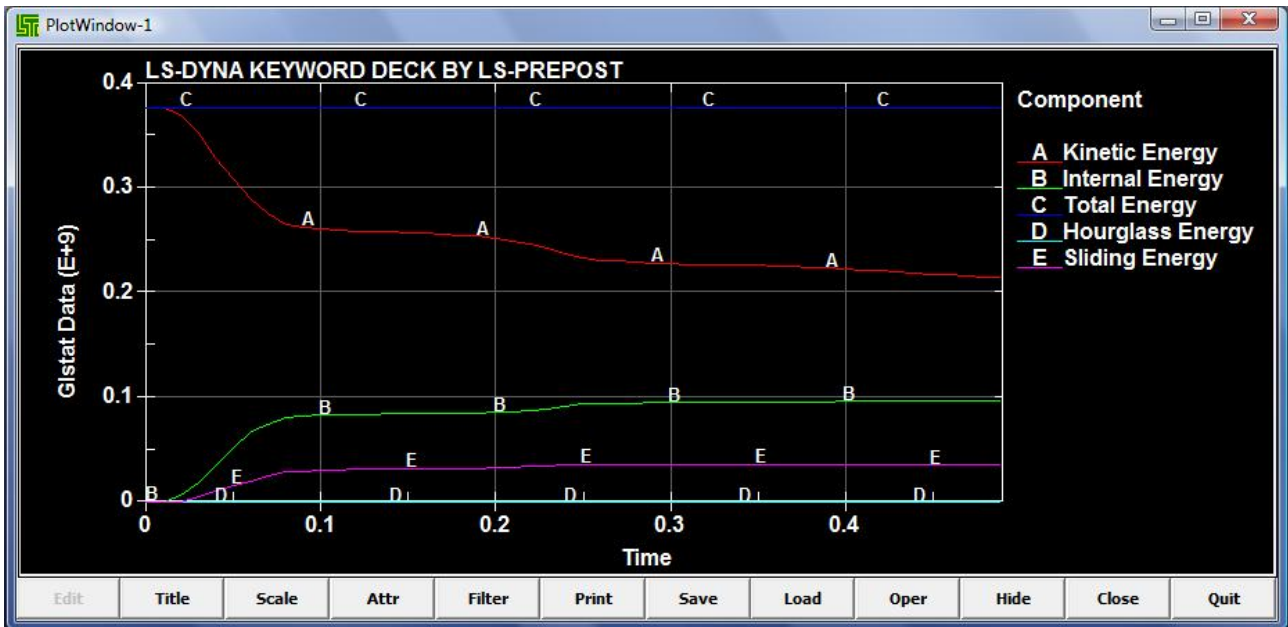
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sul montante $T=5$ e $U=30\%$



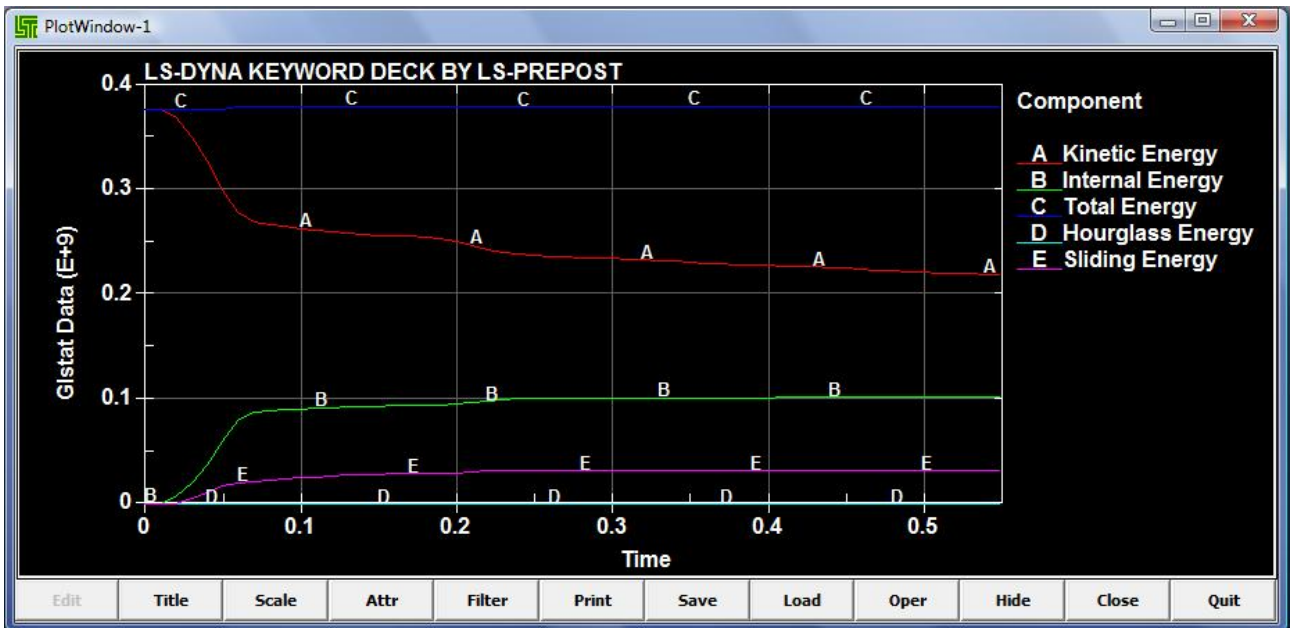
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sul montante $T=1$ e $U=30\%$



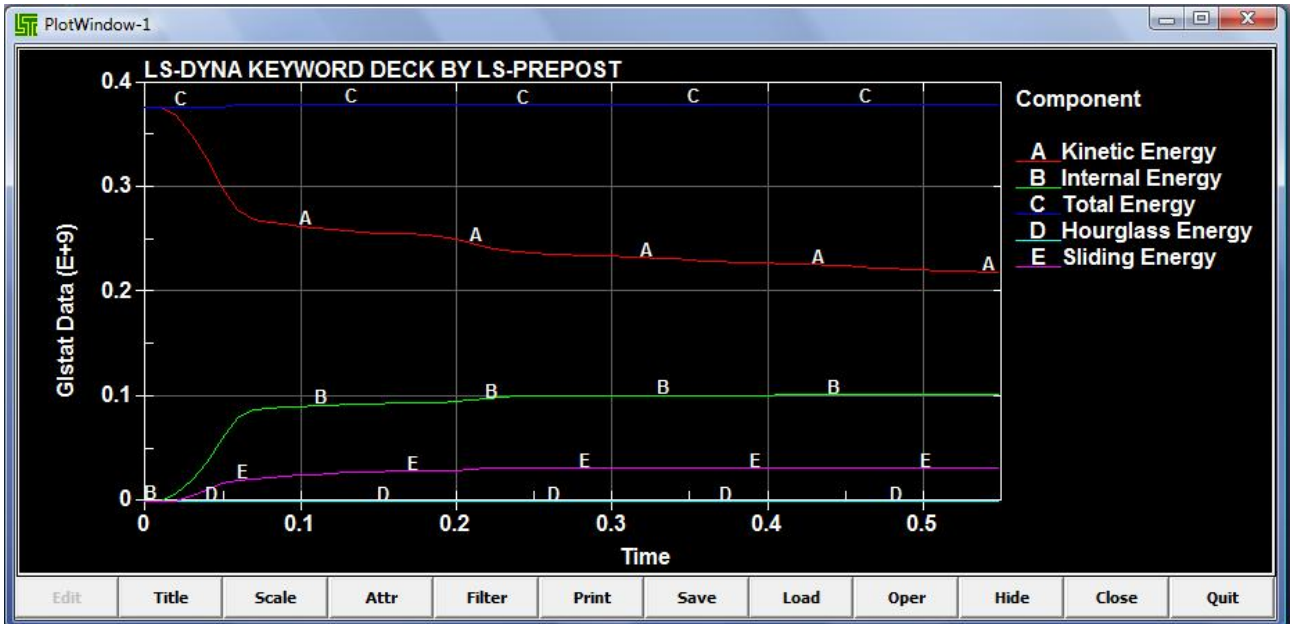
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sul montante $T=-5$ e $U=30\%$



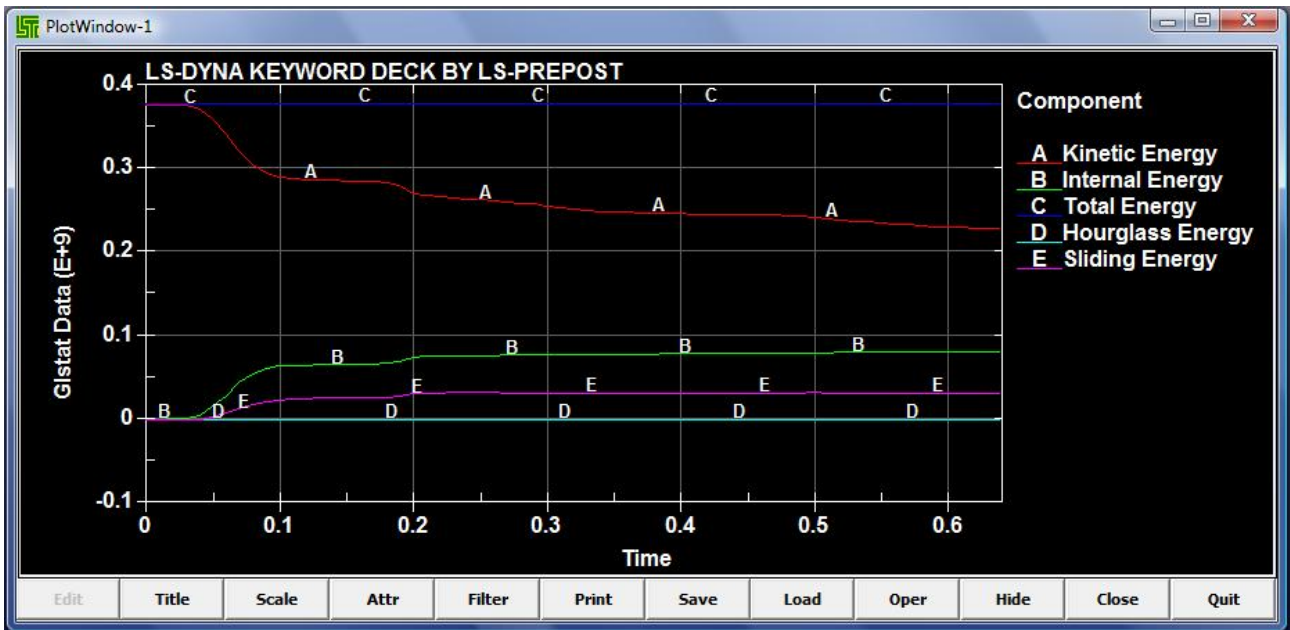
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sul montante $T=20$ e $U=25\%$



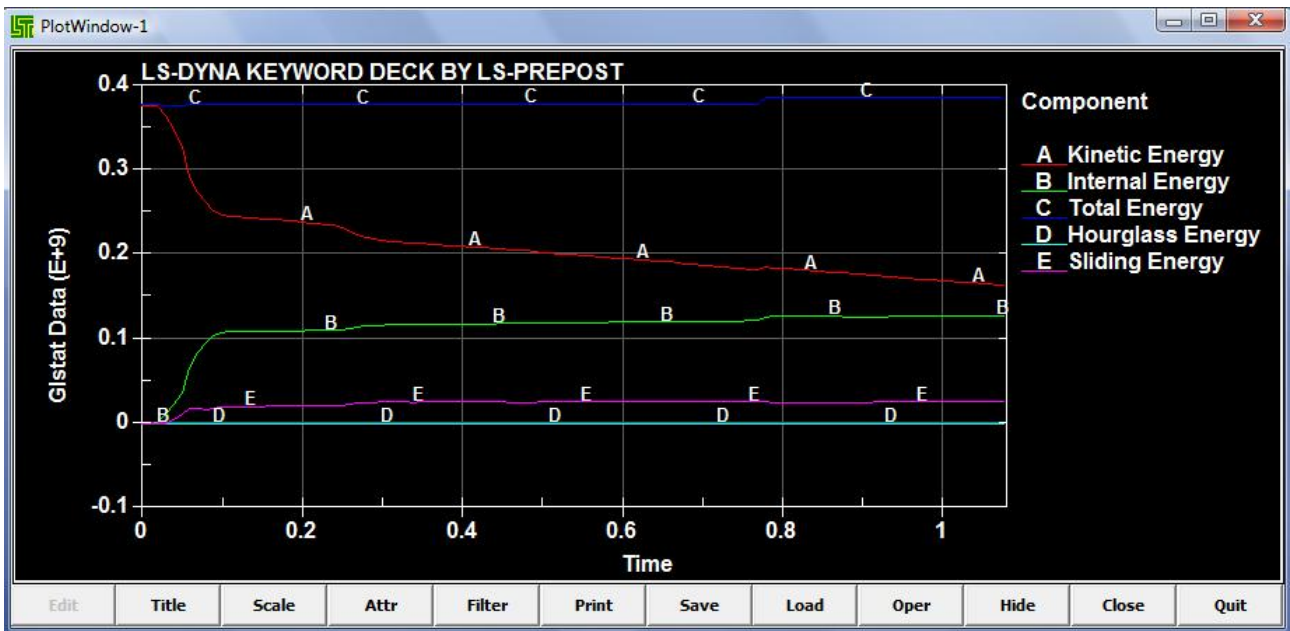
Energia modello con montanti e nastri $\Phi 200$ impatto sul montante $T=20$ e $U=20\%$



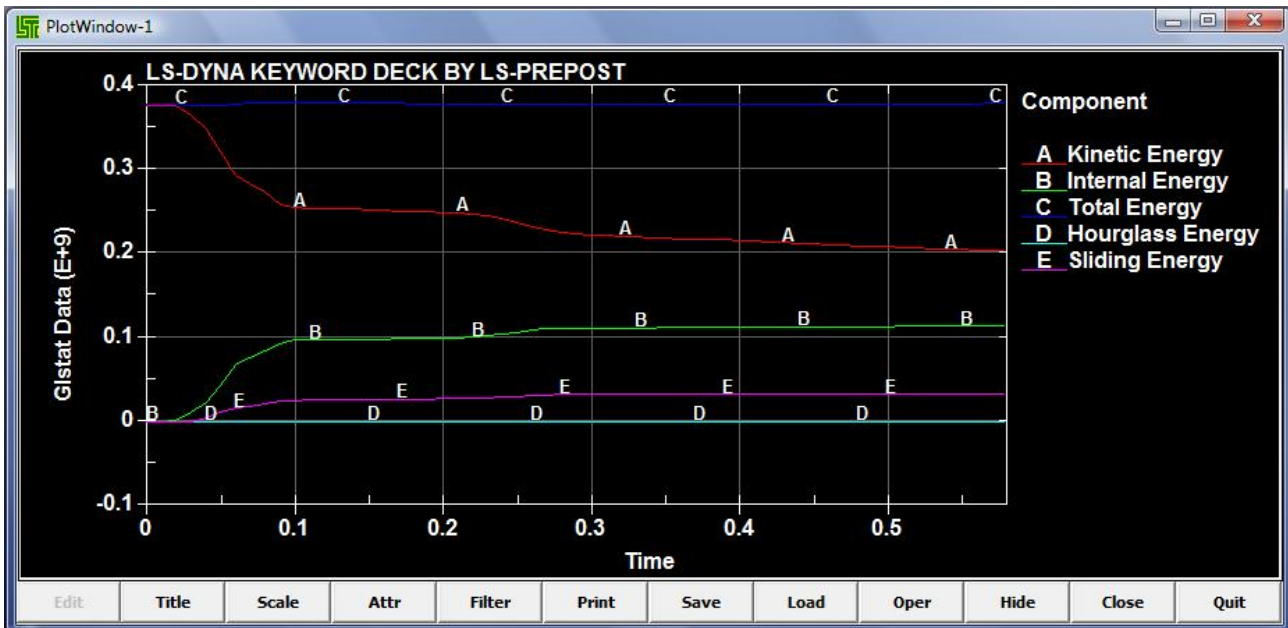
Energia modello con montanti e nastri $\Phi 200$ impatto sul montante $T=20$ e $U=15\%$



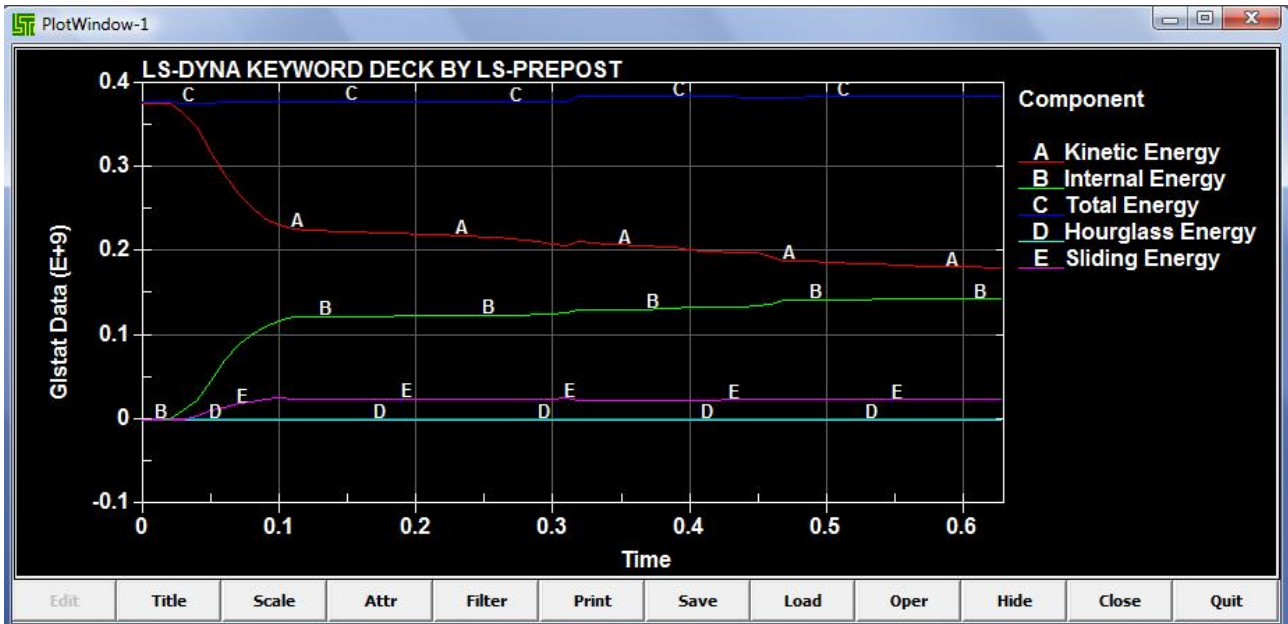
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=25$ e $U=30\%$



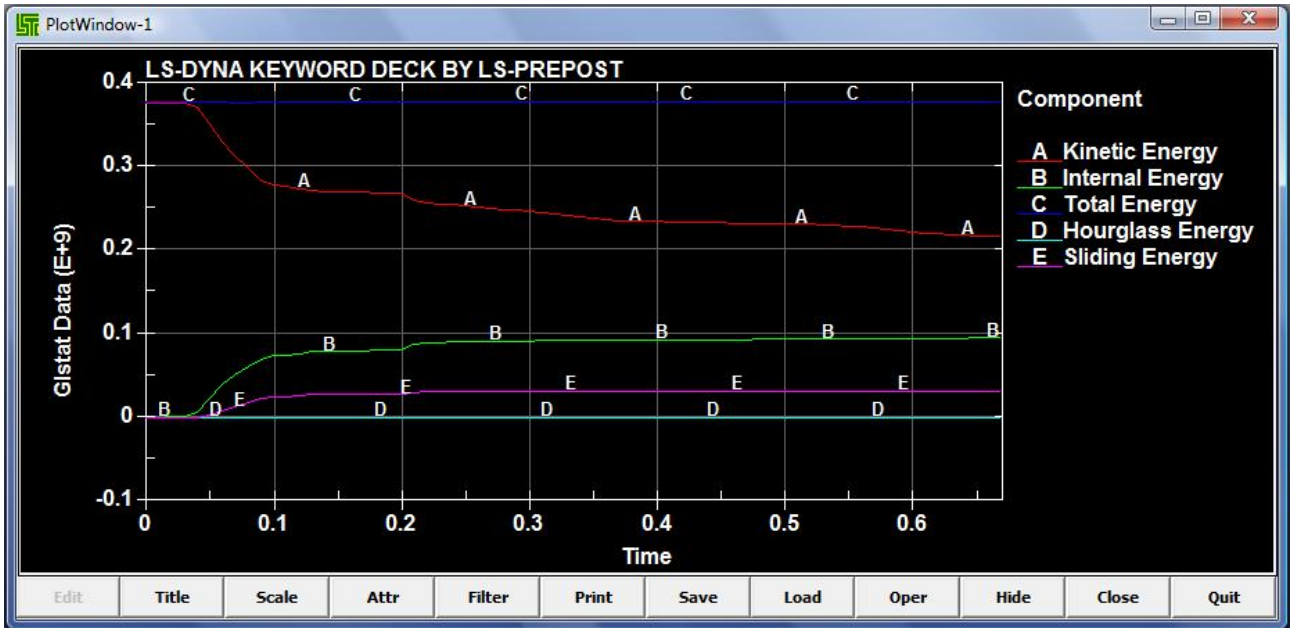
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=20$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=15$ e $U=30\%$



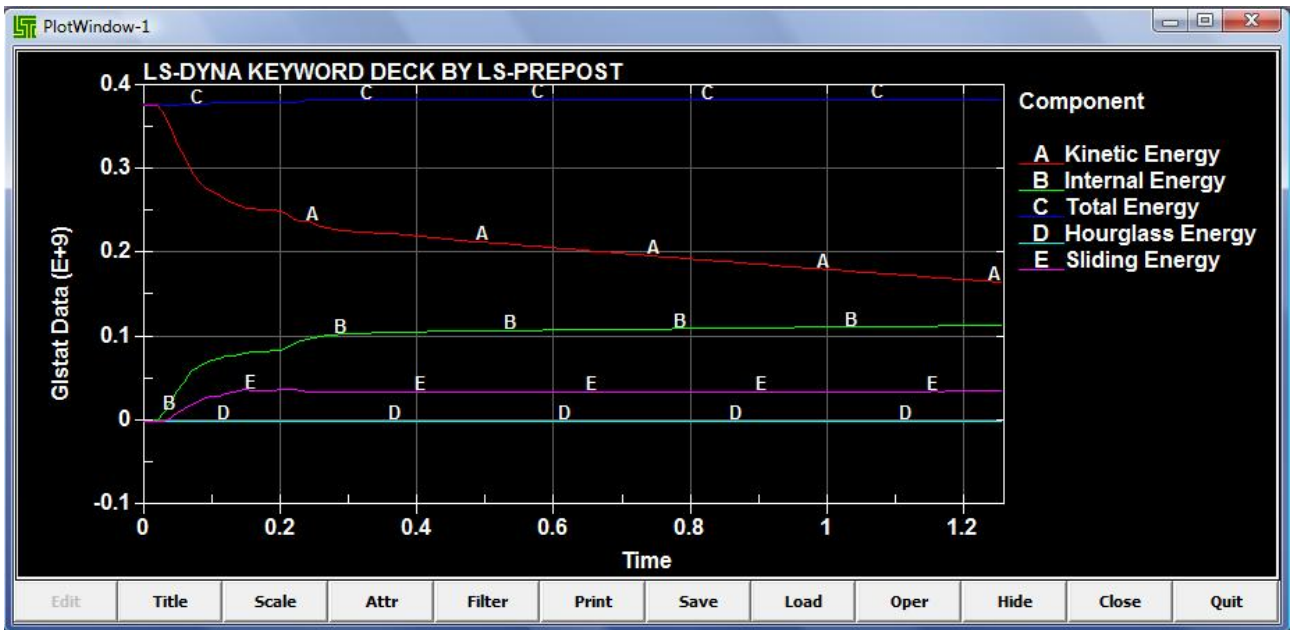
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=10$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=5$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=1$ e $U=30\%$



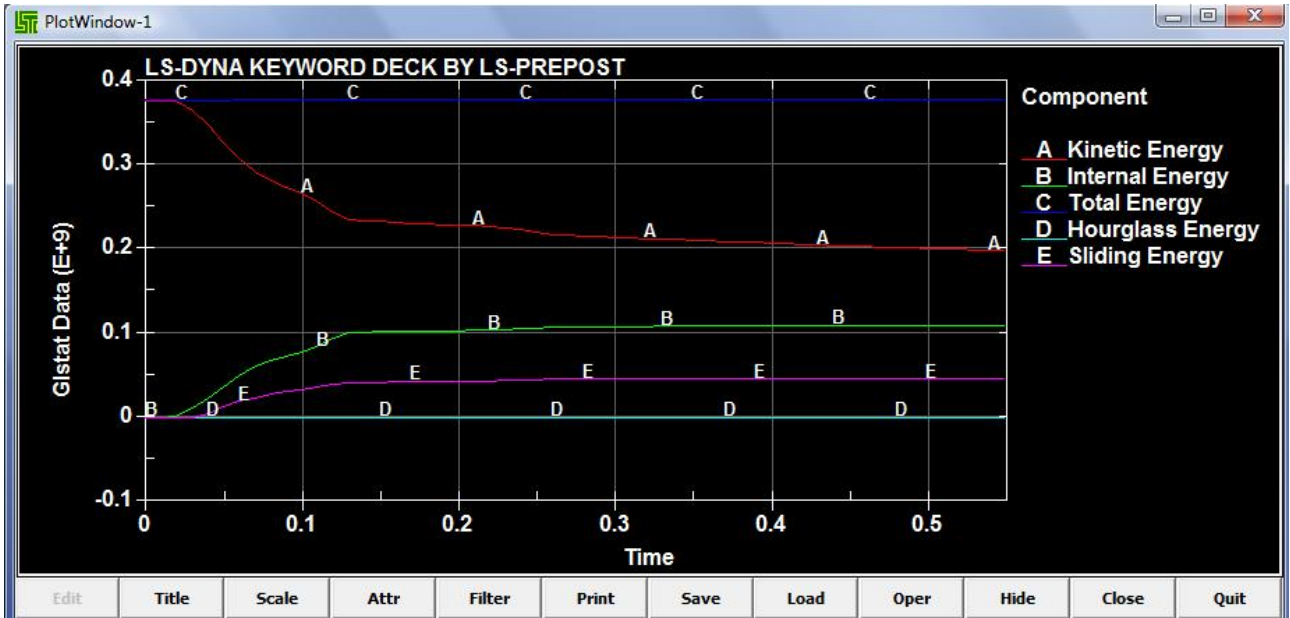
Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=-5$ e $U=30\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=20$ e $U=25\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=20$ e $U=20\%$



Energia modello con montanti e nastri $\phi 200$ impatto sullo spazio libero $T=20$ e $U=15\%$

Bibliografia

- [1] UNI EN 1317-1, Barriere di sicurezza stradali. Parte 1 : terminologia e criteri generali per i metodi di prova (agosto 2010);
- [2] UNI EN 1317-2 Barriere di sicurezza stradali – Parte 2 : Classi di prestazione, criteri di accettazione delle prove d'urto e metodi di prova per le barriere di sicurezza inclusi i parapetti veicolari (agosto 2010);
- [3] UNI EN 1317-3 Barriere di sicurezza stradali Parte 3 :classi di prestazione, criteri di accettazione basati sulla prova d'urto,e metodi di prova per terminali, transizioni delle barriere di sicurezza (maggio 2003);
- [4] UNI EN 1317-4 Sistemi di ritenuta stradali Linee guida per la meccanica computazionale di prove d'urto sul sistema di ritenuta del veicolo. Parte 4 : procedure di validazione;(2003)
- [5] UNI EN 1317-5 Sistemi di ritenuta stradali. Parte 5 : requisiti di prodotto e valutazione di conformità per i sistemi di trattenimento veicoli(maggio 2012).
- [6] UNI CEN 1317-6 Sistemi di ritenuta stradali. Parte 6 : sistemi di ritenuta dei pedoni-Parapetti pedonali.(maggio 2012)
- [7] UNI CEN 1317-8 Sistemi di ritenuta stradali. Parte 8 : sistemi di ritenuta stradali motociclisti in grado di ridurre la severità dell'urto del motociclista in caso di collisione con le barriere di sicurezza.(maggio 2012)
- [8] Circolare Ministeriale 62032 “Uniforme applicazione delle norme in materia di progettazione, omologazione e impiego dei dispositivi di ritenuta nelle costruzioni stradali” del 21/7/2010
- [9] Y.D. MURRAY, Manual for LS-DYNA Wood Material Model 143, Report No. FHWAHRT-04-097, Federal Highway Administration. August 2007
- [10] LS-DYNA “Keyword user’s manual”Version 970 April 2003
- [11] LS-Dyna “Theoretical manual”May 2008
- [12] A.Marchionna-P.Perco “L’urto più probabile” Le Strade 4 2009;
- [13]G.Camomilla, E.Cesolini, M.de Marco “Nuove barriere ANAS”Le Strade 7/8 2009.
- [14] David E. Kretschmann “Crash System Development and Testing of Round Guardrail Posts” Research in progress
- [15]S.Leonardi, G.Pappalardo “Analisi critica delle caratteristiche prestazionali delle barriere di sicurezza ” Quaderno n°110. Luglio 2000
- [16] S.Leonardi, G.Pappalardo “Modelli di simulazione a supporto della tecnologia delle barriere stradali” Input 2001 Informatica e Pianificazione Urbana e Territoriale, Democrazia e Tecnologie.

- [17] M.Cali, G.La Rosa “Analisi numerico-sperimentale del comportamento dinamico di una barriera stradale” XXX Convegno nazionale AIAS-Alghero (SS), 12-15 settembre 2001.
- [18] “Cable median Barriers” FHWA-HRT-06-058 HRTC-01/01-06(1M)E 2006
- [19] D.Vangi “Ricostruzione dinamica degli incidenti” ed Firenze University Press 2008
- [20] F. Annunziata - M. Coni - F. Maltinti - F. Pinna - S. Portas “Progettazione stradale integrata.” Zanichelli editore S.p.a. - Bologna, prima edizione-giugno 2004. ISBN 88-08-07469-2
- [21] G. Bonin, G. Cantisani, G. Loprencipe “Analysis of Laboratory Data from Crash Test on Road Safety Barriers” III Congresso internazionale SIVV Bari (Italy), September 22-24, 2005
- [22] Bonin G., Cantisani G., Loprencipe G., Analisi teorico-sperimentale delle prove di crash, Le Strade. vol. n. 1391 - 10/2003, pp. 134-142 ISSN: 0373-2916
- [23] Masaki Maeno, Yoshiyuki Suzuki, Sumito Saito “Moment Resistance of Traditional Wooden Structure by Dynamic and Static Tests” World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2004.
- [24] B. Jansson “Impact Loading of Timber Beams” M.Sc. (Civ.Eng.), Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1987.
- [25] A. Bernasconi “Durabilità delle costruzioni in legno” I Corsi Promo_legno
- [26] J. W. Klam, D. L. Ivey “Low-profile barrier with tl-3 modification” The 89th Annual Meeting Transportation Research Board Washington, D.C. January 2010
- [27] Carolyn E. Hampton, Douglas J. Gabauer, Hampton C. Gabler “Limits of Acceptable Rail and Post Deflection in Crash-Damaged Strong-Post W-Beam Guardrail” The 89th Annual Meeting Transportation Research Board Washington, D.C. 2009
- [28] National Cooperative Highway Research Program “Guidelines for Guardrail Implementation”. 2009
- [29] J. Buchar, J. Voldrich “Numerical simulation of the wood response to the high velocity loading” 4th European LS-Dyna Conference 2003
- [30] Alberto Stevanato, Luigi Cicinnati “Analisi a crash di una barriera stradale di sicurezza con la tecnica degli elementi finiti” EnginSoft User’ Meeting 2007 .
- [31] C. Goubel, M. Massenzio, S. Ronel “Wood-steel structure for vehicle restraint systems” 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg - May 2011.
- [32] Y.D. Murray “Development of a Wood material model for Roadside Safety Application” 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg - May 2011.
- [33] Ronald K. Faller, Dean L. Sicking, Robert W. Bielenberg, John R. Rohde, Karla A. Polivka, John D. Reid “Performance of Steel-Post, W-Beam Guardrail Systems” Transportation Research Board (TRB) 86th Annual Meeting January 21-25, 2007 Washington.

- [34] Jordan Jarrett,C.J. Riley,David Sawahata,Paul Heyliger “Flexible Highway Barriers”MPC-08-198 May 2009
- [35] R. Gutkowski,A. Shigidi,M. Peterson “Dynamic Impact Load Tests of a Bridge Guardrail System”MPC-7-188 September 2007
- [36] Misty L. Butler,Richard M. Gutkowski, “Impact Performance Testing of Roadway Safety and Security Barriers” MPC-05-172
- [37] Dr. Paul Heyliger, John Kienholz, Charlie McLean,Fernando Ramirez “Highly Flexible Crash Barriers” MPC-04-162 October 2005
- [38] Robert Widmann, René Steiger “Impact loaded structural timber elements made from Swiss grown Norway spruce” MEETING FORTY TWO DUEBENDORF SWITZERLAND AUGUST 2009
- [39] M.Piazza “Problemi di durabilità di strutture in legno”CISM Udine May 2005
- [40] A. Ranta-Maunus ,Urho Saarelainen, Hannu Boren “Strenght of small diameter round timber” CIB W18 Savonlinna 2012
- [41] Kjell Arne MALO “Impact Behaviour of Roadside Round Wooden Posts” 8th World Conference on Timber Engineering June 2009
- [42] T.F.M. Morgado J. Rodrigues J.S. Machado A.M.P.G. Dias H. Cruz “Bending and compression strength of Portuguese Maritime pine small-diameter poles” Forest Products Journal;Apr2009, Vol. 59 Issue 4, p23
- [43] Gina Cerda, Ronald W.Wolfe “Bending strength of Chilean radiate pine poles” Forest products journal. Vol. 53, no. 4 (2003): Pages 61-65
- [44] ir. P.A. de Vries “Strength Class determination of Cloeziana Round Wood Poles” Cost Action E53 Conference 22nd – 23rd October 2009 in Lisbon, Portugal
- [45] M. Borovinsˇek *, M. Vesenjok, M. Ulbin, Z. Ren “Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers” Engineering Failure Analysis 14 (2007) 1711–1718
- [46] Carolyn E. Hampton, Douglas J. Gabauer, Hampton C. Gabler “Limits of Acceptable Rail and Post Deflection in Crash-Damaged Strong-Post W-Beam Guardrail” TRB 2010 Annual Meeting
- [47] Valeria Antonelli, Jan-Willem G. van de Kuilen, Ingrid de Pauw “THE DEVELOPMENT OF A TIMBER GUARDRAIL FOR HIGHWAYS” WCTE, 7th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2002, August 12-15, 2002, Shah Alam, Malaysia.
- [48] Mariska Pronk, Jan-Willem G. van de Kuilen, Valeria Antonelli “AN ADVANCED NON-LINEAR MATERIAL MODEL FOR TIMBER” 7th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2002, Vol. 1, pp.156-164, August 12-15, 2002, Shah Alam, Malaysia.

- [49] Nicoletta Bocchio, Paola Ronca, Jan-Willem Van De Kuilen “Impact loading tests on timber beams” IABSE Conference: Innovative Wooden Structures and Bridges, 29-31 august 2001, Lahti, Finland.
- [50] Valeria Antonelli, Jan-Willem G. van de Kuilen “THE DEVELOPMENT OF A TIMBER GUARDRAIL FOR HIGHWAYS” 7th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2002, August 12-15, 2002, Shah Alam, Malaysia.
- [51] Ronald K. Faller, John D. Reid, David E. Kretschmann, Jason A. Hascall, and Dean L. Sicking “Midwest Guardrail System with Round Timber Posts” WTCE 11th World Conference Timber Engineering 2010
- [52] Kjell Arne Malo “Impact Behaviour of Roadside Round Wooden Posts” WCTE 2004 8th World Conference on Timber Engineering
- [53] Circolare Ministeriale n°62032 del 21/7/2012
- [54] Decreto Ministeriale 28/6/2011
- [55] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha “Concepts and Applications of Finite Element Analysis”, 4th edition, John Wiley and Sons publishers, 2002.
- [56] M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena “Strutture in legno” Hoepli 2005
- [57] G. Giordano “Tecnica delle costruzioni in legno” Hoepli 1995
- [58] <http://www.ncac.gwu.edu/>
- [59] <http://www.lstc.com/lstp/>
- [60] <http://www.dynasupport.com/>
- [61] <http://www.mountain-plains.org/>
- [62] <http://www.studio-legno.it/>
- [63] <http://www.magellano.org/>
- [64] <http://bookmarks.mikis.it/desktop-wallpaper-nodo-legno.html>
- [65] http://www.dim.unipd.it/fatigueteam/FatigueTeam/appunti_sintetici.pdf
- [66] <http://www.dpgi.unina.it/giudice/Corsi/appunti2006/cap4.pdf>
- [67] http://www.dream.tn.it/pdf/Piazza-Condino-11_sett_2010.pdf
- [68] <http://www.urbanwoods.org/wp-content/uploads/2012/02/case-in-legno2.jpg>
- [69] <http://www.promolegno.com/>

[70] <http://www.rondospaudo.com/>

[71] <http://www.terremarsicane.it>

[72] <http://www.autobrennero.it>

[73] <http://www.agenfax.it>

[74] <http://www.bianchinimontaggiadali.com/>