

## sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria - Corso di Laurea in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Specialistica:

**ATTENUAZIONE DELLA RISPOSTA INDOTTA DAL VENTO SU EDIFICI ALTI TRAMITE L'IMPIEGO DI SMORZATORI A MASSA LIQUIDA: UN CASO DI STUDIO**

Autore: Tommaso MASSAI

Relatori: Prof. Ing. Gianni BARTOLI, Prof. Ing. Claudio BORRI, Prof. Ing. Luca FACCHINI, Prof. Ing. Paolo SPINELLI

Anno Accademico: 2009/2010

*Nell'articolo viene presentata una sintesi dei risultati di una ricerca volta ad indagare la possibilità di introdurre smorzatori a massa liquida (TLD, Tuned Liquid Dampers) per attenuare le oscillazioni indotte dal vento in edifici alti. In particolare, è stato analizzato il caso di un edificio alto in corso di costruzione a Milano (la Torre Garibaldi, che ospiterà i nuovi uffici del Comune di Milano): partendo dai valori dei coefficienti di pressione e di forza misurati in galleria del vento, sono state valutate le accelerazioni massime sotto vento previste nell'edificio, valutando l'efficienza di più configurazioni di TLD ottenute variando la frequenza (o le frequenze) degli smorzatori rispetto alle frequenze proprie della struttura.*

Prof. Gianni BARTOLI

*Il presente lavoro propone un possibile iter per il progetto e l'applicazione di smorzatori per liquidi accordati (Tuned Liquid Dampers - TLD), nella riduzione delle vibrazioni indotte dal vento su edifici alti. L'edificio che costituisce il caso di studio è la Torre Garibaldi, che accoglierà i nuovi uffici del Comune di Milano, progettato da Cezar Pelli con fine lavori prevista entro fine 2009. Le analisi nei riguardi del comfort interno sono svolte secondo le CNR DT 207/2008.*

### INTRODUZIONE

Se per l'ingegneria strutturale l'epoca classica è stata segnata dal confronto quasi esclusivo con carichi di natura statica (verticali) e quella moderna/contemporanea punta a risolvere problemi di natura dinamica nell'ottica del *capacity design*, il futuro probabilmente risiede nel controllo della risposta strutturale.

Edifici sempre più alti, materiali ultraleggeri e la ricerca quasi ossessiva del concetto di leggerezza tradotto nell'impressione estetica della moderna architettura strutturale ha reso indispensabile lo sviluppo di dispositivi di controllo di vario tipo atti a prevenire fattori di *discomfort* (nel caso di vibrazioni di piccola ampiezza) o conseguenze peggiori per la struttura stessa.

Per ora l'implementazione di tali dispositivi avviene solitamente in seguito a problemi manifestati dalla struttura, oppure per indagini di tipo scientifico, ma per quanto riguarda la progettazione ex-novo l'utilizzo di dispositivi ausiliari è limitata ad alcuni accorgimenti che riguardano il sisma (isolatori alla base, controventi dissipativi ecc..).

Il presente lavoro si focalizza sulle vibrazioni prodotte dal vento poiché è il tipo di forzante orizzontale che più interessa edifici alti come quello in esame, considerando anche il fatto che l'aggiunta della massa degli smorzatori in vetta alla torre aumenta il periodo proprio della struttura diminuendo l'entità dell'azione sismica agente sulla torre.

### LOCALIZZAZIONE E DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO

Edificio di punta del *masterplan* Porta Nuova-Garibaldi (fig.1), la Torre Garibaldi (fig.2) è stata progettata dallo studio Pelli Clark Pelli di New York. Oltre agli edifici istituzionali ed al Parco "Biblioteca degli Alberi", che svolge la funzione di tessuto connettivo ambientale e culturale con l'ambiente cittadino, la zona accoglie destinazioni d'uso legate ad attività dei settori terziario, residenziale, ricettivo e commerciale.



Fig.1 - Masterplan Porta Nuova - Garibaldi



Fig.2 - Torre Garibaldi, render

La torre è composta principalmente da due parti: il corpo dell'edificio che si sviluppa regolarmente in altezza per quanto riguarda la pianta del piano tipo (32 piani per circa 140 m complessivi) e l'antenna alta 97 m. Si ponga attenzione sul fatto che è prevista l'occupazione di un intero livello della struttura per l'alloggiamento degli smorzatori; il piano individuato è il 30° (fig.3).

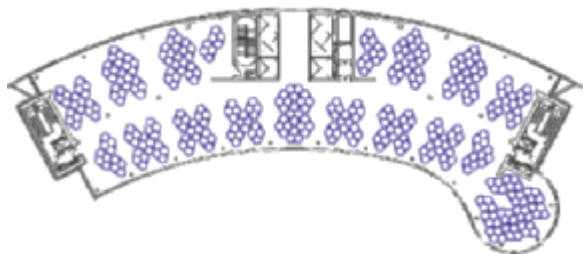


Fig.3 - distribuzione dei TLD sul 30° piano

## SMORZATORI PER LIQUIDI ACCORDATI: SVILUPPO STORICO DI TEORIE E TIPOLOGIE

Gli smorzatori utilizzati sono stati i *Tuned Liquid Dampers* (chiamati TLD per brevità di qui in avanti). I TLD (fig.4) consistono in contenitori, nella fattispecie cilindrici, parzialmente riempiti di un liquido (generalmente acqua), che entra in oscillazione quando l'edificio a cui sono collegati inizia ad oscillare (fig.5).

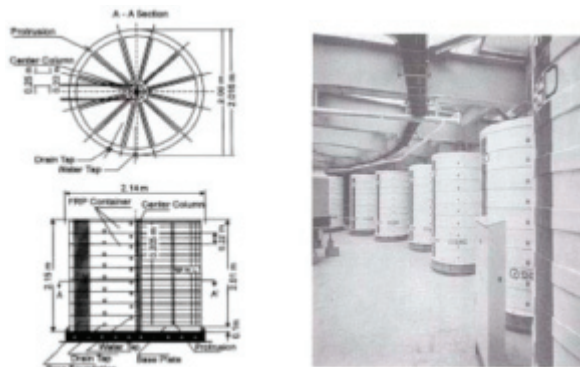


Fig.4 - TLD cilindrici, esempio applicativo

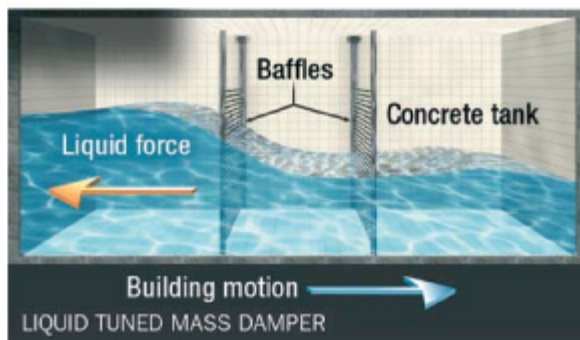


Fig.5 - meccanismo di funzionamento

I TLD sfruttano l'effetto del moto d'onda, che se accordato sulla frequenza dominante di una struttura, ne mitiga la risposta in ampiezza e accelerazione. La scelta sul tipo di smorzatori è però avvenuta a monte di un lavoro che nasce appunto dalle curiosità legate al progetto e all'efficacia degli stessi. Tra le varie tipologie indagate in letteratura sono stati scelti i TLD cilindrici, che hanno il pregio dell'indipendenza dalla direzione di sollecitazione.

Le proprietà smorzanti di TLD anulari (*nutaton dampers*) vengono studiate per la prima volta in campo aerospaziale da Abramson nel 1966<sup>1</sup> come stabilizzatori nei confronti del wobbling, instabilità sulle rotazioni fuori asse da parte dei satelliti. Gli studi proseguono con applicazioni su vascelli marini e piattaforme *off-shore*.

I primi studi per applicazioni su strutture civili vengono formulati a partire dalla fine degli anni '80 su smorzatori anulari, supportati anche da *tests* in galleria del vento, che ne dimostrano l'efficacia nei confronti del *galloping* (instabilità aeroelastica riscontrabile in strutture snelle di sezione non circolare, agente sui gradi di libertà traslazionale e rotazionale). Parallelamente (Shimizu &

<sup>1</sup> Abramson H.N., 1966. *The dynamics behavior of liquids in moving containers*, NASA Rep.SP-106, 1966

Hayama, 1987, e Lepletier & Richlen, 1988) viene sviluppata una teoria non-lineare derivante dalla *shallow water wave theory* (Stroke, 1957); la totalità degli esperimenti rivela da subito un comportamento fortemente non-lineare.

Nel caso in esame è stato messo a punto un modello lineare agli elementi finiti implementato nel calcolatore a partire dalla teoria per serbatoi proposta da Housner.

### MODELLAZIONE DEI TLD

Dopo il terremoto cileno del 1960 fu osservato che alcuni serbatoi rialzati da terra erano crollati, altri no. Ebbe così inizio lo studio dello *sloshing*, ovvero delle oscillazioni della parte più alta del liquido, applicato a questo tipo di strutture, che portò alla schematizzazione del serbatoio tramite due masse in moto relativo. Vale la teoria dello strato limite, alla base anche nelle formulazioni non-lineari. Nel modello di Housner (fig.6), si assume che una porzione di massa (massa impulsiva -  $M_0$ ) rimanga ferma e solidale col fondo, mentre un'altra porzione (massa convettiva -  $M_1$ ) vincolata elasticamente alla parete del serbatoio sia in moto relativo. La teoria fornisce le relazioni per trovare tutte le incognite in gioco una volta fissati i due parametri base cioè il raggio del serbatoio e l'altezza del liquido all'interno. È possibile risalire a massa impulsiva e convettiva, altezze relative al fondo delle due masse, rigidità elastica della molla che vincola la massa convettiva, altezza massima dell'onda. La condizione alla base è che non si abbia rottura d'onda, che si verifica quando l'altezza del liquido in moto supera di due volte l'altezza del liquido in quiete ( $d > 2h$ ).

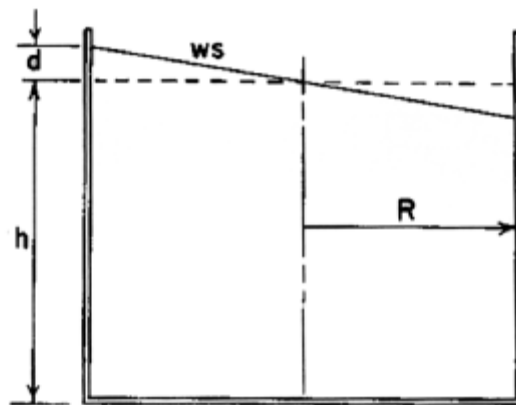


Fig. 1a

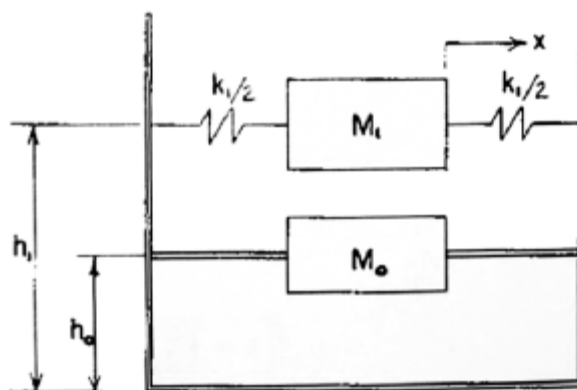


Fig.6 - modello di Housner

### ANALISI DEI SEGNALI DI GALLERIA

Per quanto riguarda la forzante è stato fatto riferimento ai dati acquisiti precedentemente tramite le prove svolte nell'ambito di una Convenzione di Ricerca ed effettuate col CRIACIV (Centro di Ricerca Interuniversitario di Aerodinamica delle Costruzioni ed Ingegneria del Vento), presso la sede dell'Università di Firenze a Prato. Il laboratorio è attrezzato con una galleria del vento a "strato limite" (fig.7), cioè appositamente studiata per riprodurre in scala opportuna gli effetti del vento turbolento nello strato limite atmosferico sulle costruzioni civili e sull'ambiente costruito.



Fig.7 - galleria del vento del CRIACIV

La galleria (fig.8), è realizzata in circuito aperto con un convergente iniziale singolo ed un diffusore finale a T simmetrico disposto su un piano orizzontale.

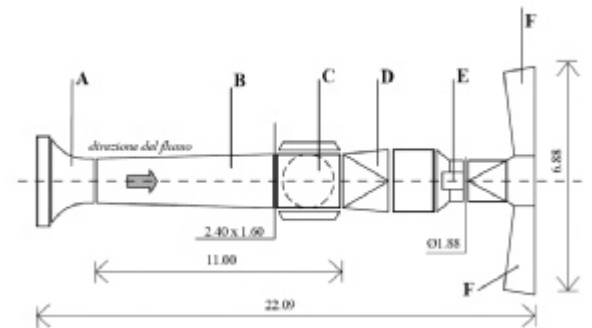


Fig.8 - schema della galleria del vento: A) contrazione iniziale, B) zona di sviluppo dello strato, C) sezione di prova [2,40x1,60 m], D) raccordo sezione, E) motore [160 kW], F) divergente

L'impianto è costituito dalla galleria e da una serie di apparecchiature e strumentazioni per la misurazione di tutte le grandezze fisiche di interesse; tuttavia si è fatto riferimento alle misure di pressione. Queste misure sono svolte su modelli in scala dell'edificio (fig.9) e permettono di risalire ai *coefficienti di pressione* (definiti come il rapporto fra la differenza fra pressione locale e pressione del flusso indisturbato, e pressione dinamica), normalmente forniti dalla normativa, tramite storie temporali degli stessi in tutte le configurazioni desiderate (ovvero le direzioni di incidenza del vento). Il coefficiente di pressione moltiplicato per l'area di influenza e per la pressione di riferimento del vento dà la forza del vento incidente.





Fig.9 - modello in scala per i tests nella galleria del CRIACIV

Data la complessità derivante dal definire sul modello computazionale tutte le prese a cui poi applicare le storie di vento registrate, si sono integrate le pressioni sulle aree di influenza, ottenendo per ogni piano lo sviluppo nel tempo delle tre forzanti (lift, drag e momento), da applicare ad ogni baricentro di piano. Le analisi sono state svolte su un unico angolo di direzione del vento, dato dall'angolo  $0^\circ$  di rotazione della tavola: in questa configurazione si massimizza la superficie laterale investita.

Gli strumenti di galleria consentono acquisizioni di segnali con contenuto in frequenza fino a 125Hz, che in scala reale corrispondono a 0.408Hz, insufficienti ad eccitare un numero di modi sufficiente a caratterizzare in maniera adeguata la risposta dinamica della struttura. Durante la tesi è stato sviluppato un procedimento che permette la estensione e quindi la ricostruzione dello spettro (fig.10). A partire dalla struttura di covarianza del segnale di galleria reso gaussiano, si ricostruisce la covarianza del segnale esteso con interpolazione per mezzo di una *spline* cubica. Il segnale finale è ricostruito con filtro autoregressivo. I segnali risultanti vengono de-gaussianizzati e riportati in scala reale per l'implementazione nel programma di calcolo. A questo punto abbiamo segnali con contenuto in frequenza in scala reale fino a 3.28Hz.

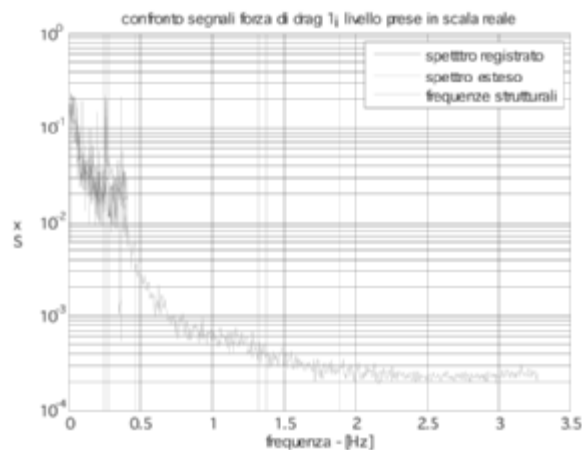


Fig.10 - estensione dello spettro

## ANALISI DINAMICA E RISULTATI

Il modello computazionale (fig.11) è stato elaborato in SAP2000 e consiste, oltre alla modellazione della torre, nella modellazione di un TLD, che funziona come uno smorzatore a masse accordate (TMD), tramite la massa convettiva totale applicata sopra alla massa impulsiva (che viene sommata a quella di piano), e collegata elasticamente in orizzontale secondo la costante elastica totale data da tutti gli smorzatori. Anche l'inerzia rotazionale totale è applicata al baricentro di piano.

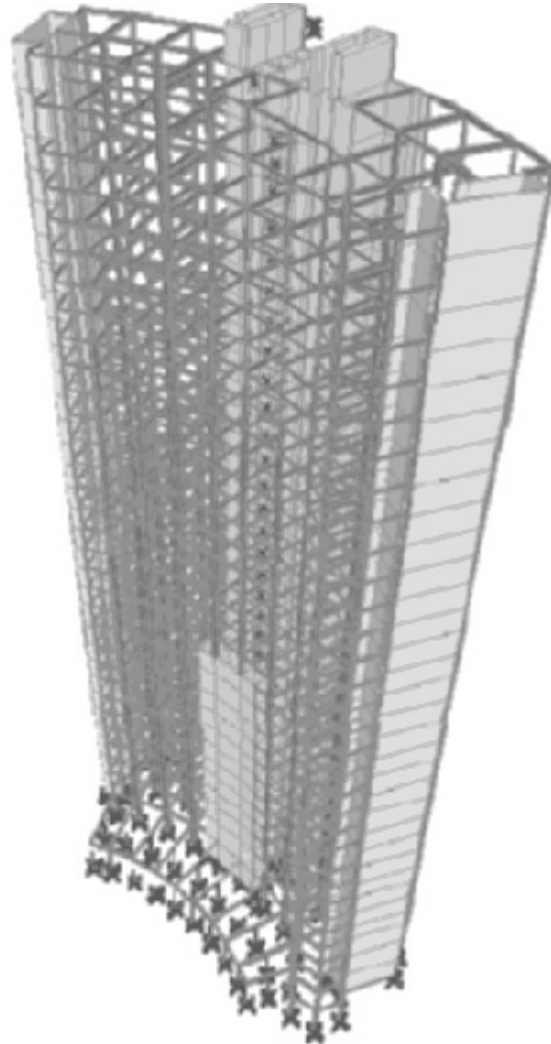


Fig.11 - modello computazionale

Sono stati analizzati cinque modelli tesi all'ottimizzazione del sistema di smorzamento per quello che concerne il fattore di massa ( $\mu$ ):

- 1 - il modello con solo la struttura denominato: MOD1
- 2 - struttura+TLD con  $\mu = 1\%$ : MOD2
- 3 - struttura+TLD con  $\mu = 1.5\%$ : MOD2.a
- 4 - struttura+TLD con  $\mu = 2\%$ : MOD2.b
- 5 - struttura+TLD con  $\mu = 1\%$  con *detuning*: MOD3

Nei primi 4 modelli si è provveduto ad accordare, cioè a rendere uguali, la frequenza del dispositivo con quella della struttura, pur variandone il fattore di massa, ossia la percentuale di massa in movimento del dispositivo rispetto alla massa partecipante di primo modo della struttura. Nel quinto modello è stato operato un *detuning*, che consiste nell'estensione della banda di efficienza dello smorzatore in termini di frequenza; il procedimento consiste nell'accordare, nel nostro caso, l'80% di massa liquida partecipante sulla frequenza propria del sistema, il 10% su una frequenza diminuita del 5% ed un 10% su una frequenza aumentata del 5%.

L'analisi nel dominio del tempo ha previsto l'implementazione di tre storie temporali per ogni livello del modello (32 piani più la copertura), per un totale di 99 storie di forzanti. I risultati sono riferiti ad accelerazioni e spostamenti massimi in valore assoluto, per ogni storia temporale di risposta; per le accelerazioni si è fatto riferimento ai valori limite di normativa<sup>2</sup>. È stato fatto così riferimento a soglie percentuali di utenti che percepiscono l'accelerazione, ed a valori limite di picco in direzione longitudinale (risposta *across-wind*) e trasversale (risposta *along-wind*), per l'analisi di *comfort* interno (tab.1).

50%	90%	> 90%	> $a_{max}$
0.042	0.0790	> 0.079	> 0.12

Tab.1 - soglie di percezione per percentuali di utenti e valore di picco secondo la normativa in  $m/s^2$

Vengono qui proposti alcuni estratti significativi dei risultati; esaminando la distribuzione delle accelerazioni massime del piano più sollecitato (fig.12), è possibile osservare come nel modello senza smorzamento (MOD1) in una porzione venga superata la soglia di picco prevista da normativa. Proponiamo la visualizzazione dei risultati, relativi alla pilastrata più sollecitata, dei vari modelli su una sezione tipo della torre (fig.13).

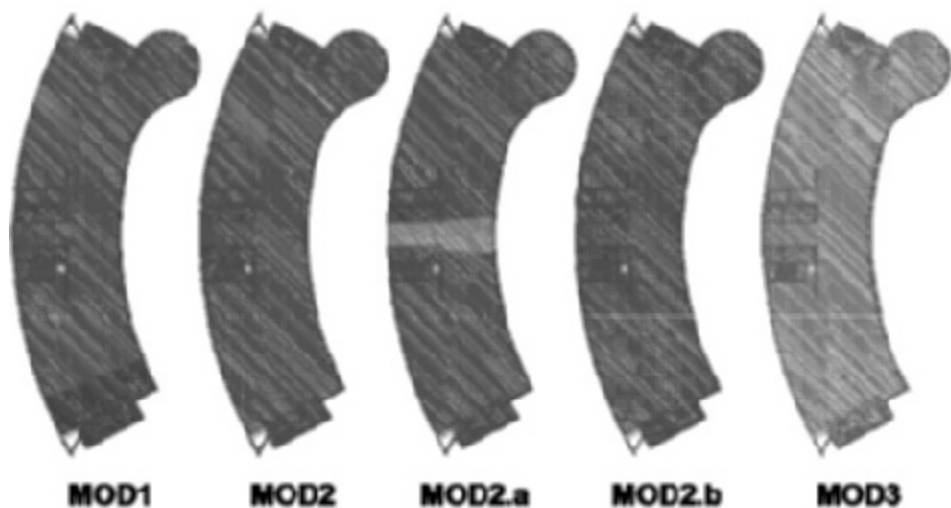


Fig.12 - distribuzione delle accelerazioni massime al 32° piano della torre (in viola la porzione che supera il valore di picco)

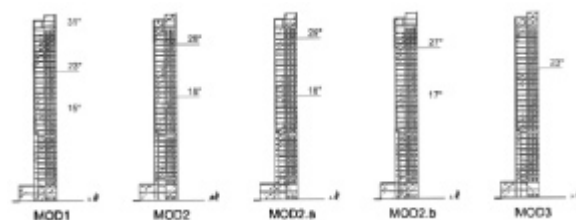


Fig.13 - evoluzione delle soglie di accelerazioni percepite su una sezione tipo relative alla pilastrata più sollecitata

Il modello più efficiente è risultato quello con *detuning* (MOD3) per cui si registrano abbattimenti, in termini di accelerazioni, rispetto al MOD1, fino a circa il 47% (tab.2).

	acc.max. - [ $m/s^2$ ]	abbattimento %
MOD1	0.1246	riferimento
MOD2	0.0938	-24.72
MOD2.a	0.0892	-28.41
MOD2.b	0.0985	-20.99
MOD3	0.0658	-47.19

Tab.2 - accelerazioni massime all'ultimo piano nella pilastrata più sollecitata ed abbattimenti percentuali nei modelli smorzati rispetto al modello non smorzato (MOD1)

Risultati analoghi anche nel confronto degli spostamenti dove proponiamo il confronto fra MOD2, rappresentativo dei modelli senza *detuning*, e MOD3, entrambi rispetto al modello non smorzato (MOD1): se si confrontano le risposte *along-wind* (fig.14), direzione corrispondente alla frequenza principale della struttura, su cui sono accordati gli smorzatori del MOD2, ed *across-wind*, è evidente non solo che il comportamento di MOD3 è paragonabile in entrambe le direzioni di risposta, ma che nella direzione *across-wind* (fig.15), il MOD2 è in larga parte della storia temporale peggiorativo.

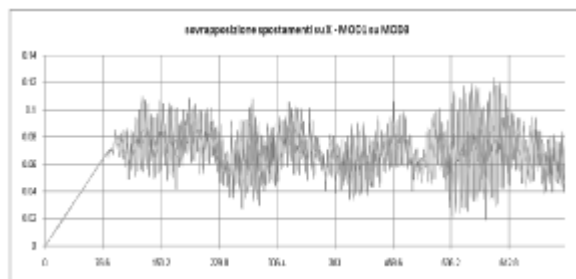
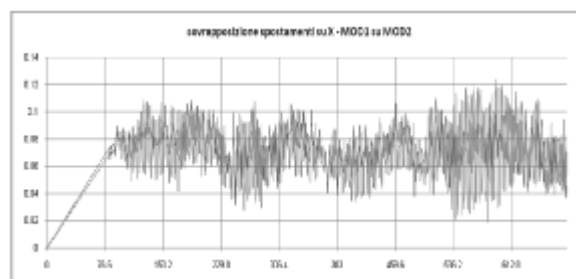


Fig.14 - confronto in termini di spostamento delle time histories di risposta in direzione *along-wind*, di MOD2 (linea rossa) e MOD3 (linea verde) rispetto a MOD1 (linea azzurra)

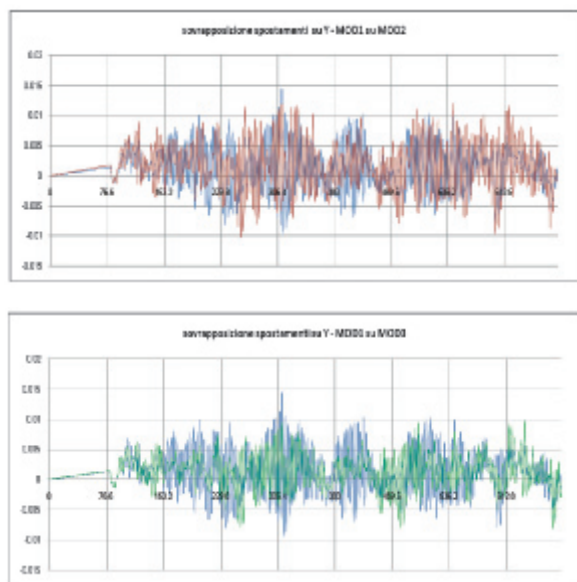


Fig.15 - confronto in termini di spostamento delle time histories di risposta in direzione across-wind, di MOD2 (linea rossa) e MOD3 (linea verde) rispetto a MOD1 (linea azzurra)

Si ha un immediato riscontro di queste considerazioni nelle curve di risposta in frequenza (fig.16).

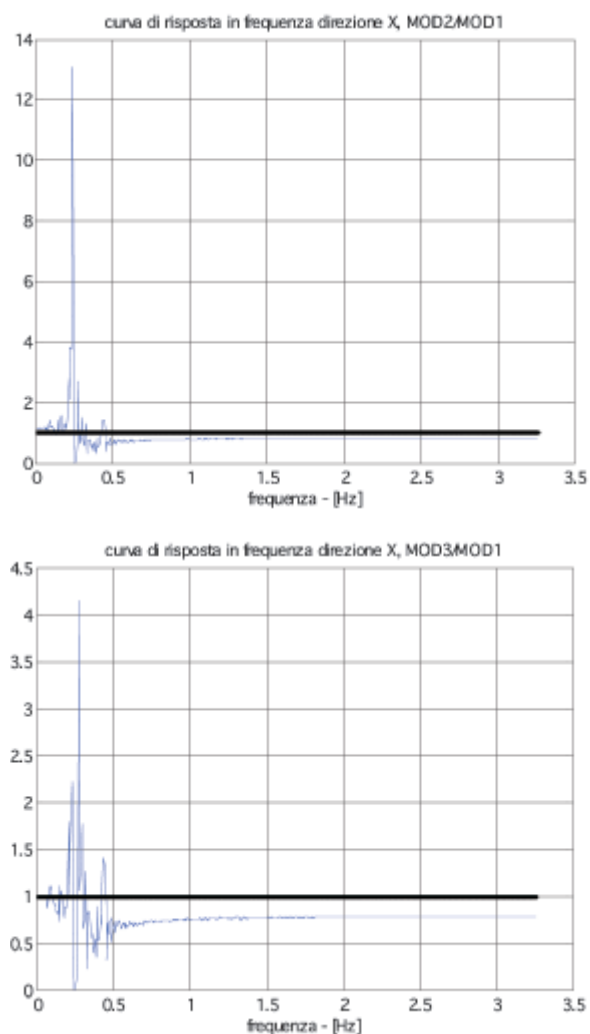


Fig.16 - confronto delle curve di risposta in frequenza in direzione along-wind, di MOD2 e MOD3

Anch'esse elaborate per MOD2 e MOD3 nei confronti di MOD1, dove emerge una banda molto ristretta di frequenze su cui abbiamo efficienza di MOD2, mentre per MOD3 tale banda si allarga di molto e la curva assume valori prossimi allo zero (ricordiamo che, essendo le curve espressione del rapporto fra spettro della risposta smorzata e spettro di quella non smorzata, abbiamo peggioramento della risposta sopra il valore 1, evidenziato con una linea nera nei grafici, e miglioramento tanto maggiore per valori quanto più prossimi allo zero) per un numero abbastanza elevato di frequenze. Inoltre le curve per MOD3 relative alle risposte in direzione *along* ed *across-wind* sono, come detto in precedenza, del tutto comparabili.

Tutto ciò dipende dalla accordatura su un' unica frequenza di MOD2 che, data la vicinanza delle prime due frequenze proprie della struttura (0.25 e 0.27Hz), funziona male già sul secondo modo, essendo questo tipo di dispositivi di smorzamento molto sensibili all'accordatura. Al contrario nel modello con *detuning*, si ha una certa quantità di massa liquida accordata anche su frequenze prossime a quella principale; quest'ultimo fatto si palesa se si osserva che le prime due frequenze proprie sono all'interno del picco di efficienza della curva di risposta in frequenza di MOD3 in direzione across-wind (fig.17).

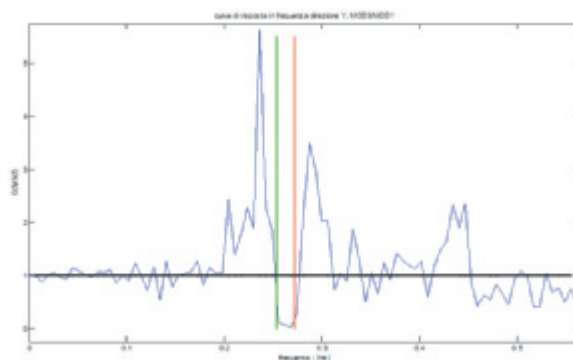


Fig.17 - curva di risposta in frequenza per MOD3 e localizzazione della prima (linea rossa) e della seconda (linea verde) frequenza propria della struttura dentro al picco di efficienza dello smorzatore

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

È lecito concludere che l'applicazione dei TLD potrebbe diventare tranquillamente di più vasto utilizzo se si pensa che all'alta efficienza si abbino costi di installazione e manutenzione molto bassi, e la possibilità di stoccaggio di un ingente quantitativo di acqua utilizzabile al bisogno, nelle pratiche antincendio.

Inoltre modelli che tenessero in conto la rottura d'onda consentirebbero l'impiego di questo tipo di smorzatori anche per ampiezze di oscillazioni più grandi, ad esempio quelle provocate dall'azione sismica, unito all'incremento di efficienza già evidenziato in alcuni lavori presenti nella letteratura specifica.