

## **PROGETTO DI STRUTTURA METALLICA INDUSTRIALE CON PARTICOLARE RIGUARDO ALLO STATO LIMITE DI SERVIZIO DI VIBRAZIONE**

Alberto Villa  
Daniela Zucchetti  
Riccardo De Col  
**DCRPROGETTI srl**  
info@derprogetti.it

### **ABSTRACT**

Le strutture metalliche in campo industriale non di rado sono di sostegno di macchine vibranti rotative o reciproche. Tali macchine producono delle vibrazioni che si diffondono per tutta la struttura sino in fondazione. Le normative nazionali ed internazionali impongono delle limitazioni sulle vibrazioni, sia per il buon funzionamento delle macchine che per la salvaguardia della salute degli operatori. Nel caso in esame la struttura industriale, in parte in cemento armato ed in parte in acciaio, sorregge molte macchine vibranti a varie elevazioni (ventilatori, pompe, letti vibranti, mulini) con frequenze di vibrazione molto differenti tra loro. Solo con l'utilizzo di un modello di calcolo tridimensionale ed applicando storie temporali di carico si è potuto cogliere il comportamento strutturale nei riguardi delle vibrazioni e quindi procedere ad un'accurata progettazione allo stato limite di servizio.

### **1 INTRODUZIONE**

Col passaggio della progettazione per azioni statiche a quelle dinamiche, in molti casi sorgono problemi di dimensionamento e verifica strutturale a causa dell'interazione degli effetti delle forzanti dinamiche che interagiscono con le caratteristiche della struttura, per cui non basta irrobustirla per ridurre le vibrazioni, anzi molte volte, così facendo, le vibrazioni si amplificano per fenomeni di risonanza.

Quasi mai le vibrazioni determinano il collasso strutturale ma limitano o impediscono l'uso della struttura per lo scopo per il quale era stata progettata. Questo sia perché i macchinari hanno dei limiti di vibrazioni ammissibili durante il funzionamento e sia perché gli operatori devono poter lavorare senza fastidi o danni alla salute nelle vicinanze delle macchine vibranti. In letteratura si trovano numerosi articoli che spiegano gli effetti sulla salute delle vibrazioni sia dal punto di vista fisico che psicologico.

Un primo problema può essere la determinazione delle forzanti dinamiche ed i criteri di compatibilità della risposta a causa della mancanza delle conoscenze per fornire i corretti dati delle forzanti dinamiche da parte di molti costruttori dei macchinari.

Dal punto di vista delle forzanti, le macchine vibranti possono essere suddivise in tre grosse famiglie:

- Macchine rotative
- Macchine alternative
- Macchine impulsive

Tutti i motori elettrici sono rotativi, mentre i motori dei generatori diesel sono alternativi. Solitamente le macchine alternative sono più sbilanciate di quelle rotative per cui generano forzanti e vibrazioni maggiori.

Le forzanti dinamiche nelle macchine rotative sono causate da un disassamento tra il centro di rotazione e il baricentro delle masse rotanti; questo sbilanciamento è sia iniziale di costruzione che di funzionamento, causato dall'usura progressiva delle parti rotanti. Solitamente si parla di pochi micron ma viste le elevate velocità di rotazione vengono generate delle forzanti notevoli.

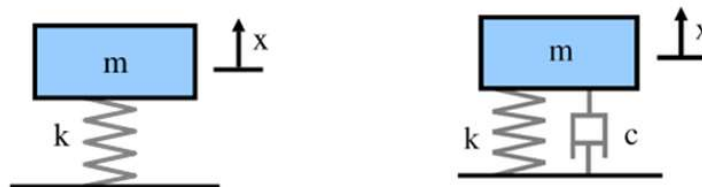
Nel caso di macchine alternative le forze dinamiche sono causate dalle forze di inerzia delle masse in movimento che generano elevate azioni sui supporti e sulle strutture.

Buona norma è posizionare queste macchine direttamente a terra su grosse fondazioni in calcestruzzo in grado di attutire le vibrazioni o su dispositivi antivibranti appositamente dimensionati in base alla frequenza di funzionamento della macchina.

Purtroppo, molte volte, per motivi impiantistici si è obbligati a posizionare le macchine vibranti su struttura in elevazione. Nel caso proposto sulla struttura in parte metallica ed in parte in cemento armato sono applicate numerose macchine vibranti di tipo rotativo ed alternativo con varie frequenze di funzionamento.

## 2 DINAMICA E VIBRAZIONI

Le macchine vibranti producono delle forze periodiche che sollecitano la struttura. La risposta del sistema ad una forzante dinamica ciclica sono degli spostamenti ciclici (vibrazioni) che dopo una fase iniziale transitoria hanno lo stesso periodo della forzante. La soluzione del problema dinamico è composta dalla somma di due contributi: il primo che dipende dalle condizioni iniziali e solitamente decade velocemente e il secondo che, a regime, si conserva nel tempo con la forzante applicata. L'ampiezza delle vibrazioni dipende dall'interazione tra la forzante e la struttura. I fenomeni dinamici qualsivoglia complessi possono essere ricondotti allo studio di un oscillatore semplice composto da una massa e da una molla, e da un eventuale smorzatore.



Come già accennato, a differenza delle forze statiche, gli effetti di quelle dinamiche dipendono dall'interazione tra la frequenza della forzante e la frequenza propria della struttura. Per cui, nel caso in cui la struttura abbia la stessa frequenza della forzante si ricade nel fenomeno della "risonanza", a cui corrispondono spostamenti molto amplificati rispetto alla risposta statica. Se il rapporto tra la frequenza strutturale e quella della forzante è molto alto (forzante quasi statica), la risposta strutturale tenderà ad essere simile a quella della risposta alla semplice forza statica. In-

vece, se la frequenza della forzante è maggiore della frequenza propria, allora gli effetti della forzante sulla struttura saranno molto limitati rispetto al caso statico.

La progettazione, ove possibile, deve fare in modo che le strutture abbiano la frequenza propria distante dalla frequenza delle forzanti, in maniera tale da evitare il fenomeno della risonanza, a cui corrispondono grosse ampiezze di vibrazioni. Solitamente si impone che il rapporto tra la frequenza strutturale e quella della forzante sia maggiore di 1.2 o minore di 0.8. In questa maniera, come evidenziato dal grafico sotto, gli spostamenti saranno limitati al massimo a circa 2.5 volte quelli statici.

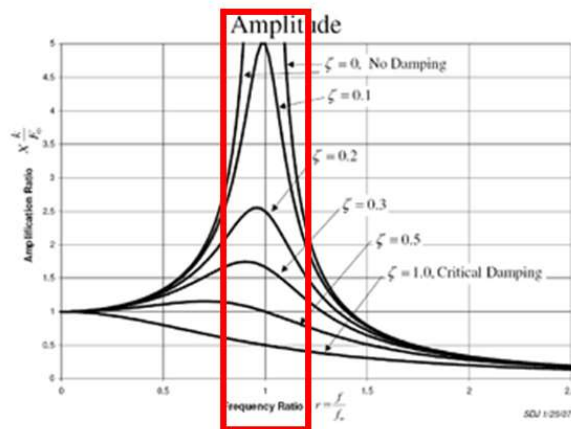


Fig. 1 - Amplificazione risposta dinamica

Il problema della dinamica delle vibrazioni sostanzialmente consiste nel limitare gli effetti delle vibrazioni prodotte dai macchinari sia per la funzionalità dei macchinari che per gli effetti sul corpo umano degli operatori.

Le limitazioni possono essere: sulla ampiezza di vibrazione, sulla velocità o sull'accelerazione. Solitamente sui macchinari vengono imposte limitazioni sulle ampiezze e/o velocità di vibrazione, mentre riguardo agli effetti sull'uomo le restrizioni sono applicate alle accelerazioni.

### 3 NORMA VIBRAZIONI AMMISSIBILI PER I LAVORATORI

Le vibrazioni hanno un effetto dannoso sulla salute umana, specialmente se subite per lunghi periodi. A tal fine, la normativa impone delle limitazioni sulle accelerazioni.

Le accelerazioni sui lavoratori che sono nelle vicinanze delle macchine vibranti sono regolate dal D.L. 9 aprile 2008 n.81 "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro" e sulla base di questo sono state eseguite le verifiche di accettabilità delle vibrazioni trasmesse al corpo umano.

In particolare l'articolo 201-b)-2 ) del suddetto D.L. prevede che, per le vibrazioni trasmesse al corpo, il valore d'azione giornaliero, normalizzato ad un periodo di riferimento di 8 ore, sia limitato a  $0.5 \text{ m/s}^2$ .

Al fine di poter calcolare il valore di accelerazione da confrontare nell'analisi della struttura si procede nel seguente modo:

- Esecuzione di un'analisi dinamica con storia temporale di carico: si applicano alla struttura delle forzanti dinamiche variabili nel tempo con funzione sinusoidale in modo da simulare gli effetti vibranti delle macchine.
  - Lettura delle accelerazioni massime nelle tre direzioni ( $a_x$ ,  $a_y$  e  $a_z$ ) in punti significativi della struttura, in particolare nei punti di applicazione delle forzanti dinamiche usate per l'analisi di vibrazione.
  - Valutazione del livello di esposizione alle vibrazioni, che ai sensi dell'allegato XXXV del D.L. n.81 si basa sul calcolo dell'esposizione giornaliera  $A(8)$  espressa come accelerazione continua equivalente su 8 ore, calcolato come il più alto dei valori quadratici medi delle accelerazioni ponderate in frequenza determinati sui tre assi ortogonali ( $1.4a_{wx}$ ,  $1.4a_{wy}$ ,  $1a_{wz}$ ) conformemente alla norma ISO 2631-1 §6.1.
- Considerando a favore di sicurezza un peso pari a 1 (cfr. Tabella 3 ISO 2631-1) e un andamento sinusoidale nel tempo della funzione accelerazione  $a_w(t)$  quindi si può calcolare:

$$A(8) = a_{wmax} (T_e/8)(0.5)$$

dove:

$T_e$  durata complessiva giornaliera di esposizione alle vibrazioni

$$a_{wmax} = \text{MAX} (1.4a_{wx}; 1.4a_{wy}; 1a_{wz})$$

- Confronto del valore  $A(8)$  con il limite imposto di  $0.5 \text{ m/s}^2$ .

#### 4 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA E DELLE ANALISI

La struttura in esame è composta da una parte in cemento armato e da una parte in struttura metallica. La struttura in c.a. ha dimensioni in pianta  $10\text{m} \times 15\text{m}$  per un'altezza di  $18.15\text{m}$  sulla cui sommità è appoggiata una struttura in acciaio di dimensioni in pianta  $10\text{m} \times 9\text{m}$  e altezza  $5\text{m}$ , avente schema statico a telaio in direzione trasversale e controventata in direzione longitudinale. I quattro livelli della struttura in cemento armato sono formati da solette piene di spessore  $20\text{cm}$ .

La struttura metallica collegata alla struttura in cemento armato ha dimensioni globali in pianta  $11.5\text{m} \times 25.8\text{m}$  per un'altezza massima di  $9.7\text{m}$  ed è composta da un solaio in calcestruzzo su lamiera grecata e da tre in grigliato. Sia in direzione longitudinale che in direzione trasversale la struttura è controventata mediante controventi concentrici a V. Le colonne sono incernierate alla base in direzione longitudinale e incastrate in direzione trasversale.

La struttura metallica è stata svincolata in direzione longitudinale dalla struttura in c.a. mediante la realizzazione di giunzioni scorrevoli alle quote  $4.6\text{m}$  e  $9.7\text{m}$ .

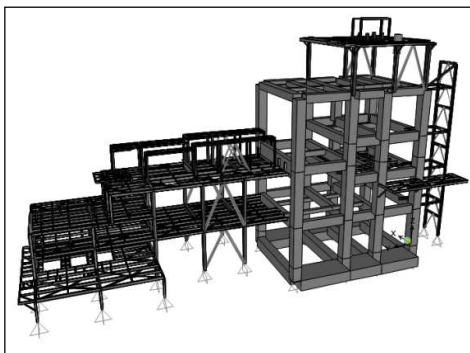


Fig. 2 - Geometria strutturale

La struttura è soggetta ai seguenti carichi:

- carichi statici: pesi propri strutturali, pesi permanenti degli impianti e dei macchinari (in condizioni di montaggio, operative e test), azioni accidentali, forze statiche equivalenti derivanti dai macchinari
- carichi dinamici: forzanti sinusoidali generate dalle macchine vibranti poste sui vari piani della struttura in cemento armato ed in acciaio.
- azioni termiche
- azione sismica: corrispondente alla zona 3, in accordo alla classificazione OPCM 3274-2003.

Sono state eseguite le seguenti verifiche:

- Stati Limite Ultimi (SLU): resistenza degli elementi strutturali e connessioni
- Stati limite di Esercizio (SLE):
  - limitazione sugli spostamenti statici e sismici
  - limitazione degli effetti delle vibrazioni riguardo le ampiezze, velocità e accelerazioni.

Le forzanti dinamiche sono applicate in corrispondenza dell'asse di rotazione delle macchine ed in particolare sono così distribuite:

- 3 ventilatori ad elev. 4.9 m con forzanti sinusoidali pari a circa 1 kN e frequenza di 23 Hz
- 4 ventilatori ad elev. 6.9 m con forzanti sinusoidali pari a circa 1 kN e frequenza di 3.3-5.5-7 Hz
- 1 letto vibrante ad elev.9.7 m con forzanti sinusoidali pari a circa 17 kN e frequenza di 5.8-6.2-6.9 Hz
- 1 letto vibrante ad elev.10.3 m con forzanti sinusoidali pari a circa 7 kN e frequenza di 8.2Hz
- 1 motore ad elev.13.1 5m con forzanti sinusoidali pari a circa 2 kN e frequenza di 1.3-5.5-25Hz
- 1 motore ad elev.18.15 m con forzanti sinusoidali pari a circa 2 kN e frequenza di 1.1-2.5-5.9-12 Hz
- 1 vaglio ad elev.23.15 m con forzanti sinusoidali pari a circa 2 kN e frequenza di 16Hz

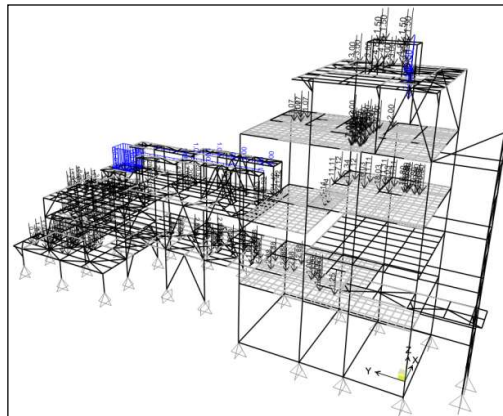


Fig. 3 - Forzanti dinamiche

Le azioni dinamiche indotte dalle macchine vibranti sono state tenute in conto nell'analisi statica mediante la definizione di un carico statico equivalente verticale calcolato in rapporto al peso globale  $P$  della macchina considerata, e in particolare pari a:

- $2 P$  per  $P \leq 10 \text{ kN}$
- $1.5 P$  per  $P > 10 \text{ kN}$

I carichi dinamici generati dai macchinari di tipo rotativo e reciproco sono distribuiti su numerose frequenze tra cui molte nella zona delle frequenze proprie strutturali. Per ciascuna macchina sono stati definiti dei casi di carico, contenenti le relative forzanti, che poi sono stati associati a delle funzioni sinusoidali variabili nel tempo con la frequenza propria della macchina corrispondente.

L'analisi è condotta su un modello spaziale che rispecchia la distribuzione delle masse e delle rigidità, per determinare il comportamento strutturale nei confronti degli stati limite considerati. L'azione sismica viene valutata attraverso un'analisi lineare dinamica (paragrafo 7.3.3.1 delle N.T. DM 14/01/2008) con spettro di risposta. Tenendo conto della geometria e della distribuzione delle masse è stato utilizzato un fattore di risposta strutturale unitario, per cui è stata eseguita una progettazione con criteri non sismici.

Le azioni interne, forze e momenti, sono ricavati attraverso l'analisi elastica lineare.

Le verifiche strutturali sono condotte in accordo al DM 14 gennaio 2008 "Norme tecniche per le costruzioni" e agli Eurocodici 2 e 3.

Per le verifiche sismiche è stato considerato sia lo spettro di risposta per lo stato limite di operatività (SLO) che per la salvaguardia della vita (SLV).

Lo stato limite di operatività (SLO) è uno stato limite di esercizio che ha lo scopo di verificare che l'azione sismica di progetto non produca, agli elementi costruttivi senza funzione strutturale, danni tali da rendere la struttura non operativa. Per costruzioni civili e industriali tale condizione si ritiene soddisfatta limitando opportunamente gli spostamenti di interpiano ottenuti dall'analisi (NT2008 – par. 7.3.7.2).

Lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) è uno stato limite ultimo che ha lo scopo di verificare che, nonostante l'azione sismica di progetto produca danni ai componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali, la costruzione conservi una parte di resistenza e rigidità per le azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.

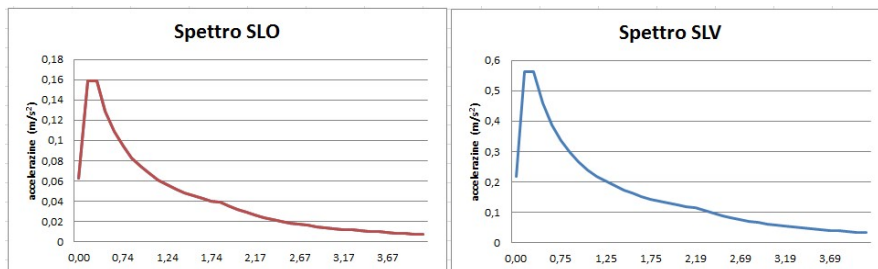


Fig. 4 - Spettri di risposta

Per valutare l'entità delle vibrazioni indotte sulla struttura dalle macchine vibranti presenti su di essa e assicurarsi il rispetto delle limitazioni previste dalla normativa riguardante la sicurezza sul lavoro, sono state condotte delle analisi dinamiche di tipo time-history per ciascuna macchina e poi combinate opportunamente tra loro. In tali analisi le forzanti dinamiche indotte dalla macchina vibrante sono state applicate alla struttura con legge variabile nel tempo secondo una funzione

sinusoidale caratterizzata dalla frequenza della macchina stessa. Sono state poi esaminate anche le interazioni di ciascuna macchina con le altre macchine e con le frequenze proprie della struttura. La scelta di considerare il fattore di struttura unitario è stata anche dettata dal fatto di non dover sottostare alle limitazioni imposte della gerarchia delle resistenze di avere colonne sovraresistenti rispetto alle travi, che mal si combina con le esigenze di poter calibrare le rigidezze delle travi in funzione dei carichi dinamici trasmessi dai macchinari.

## 5 RISULTATI DELLE ANALISI

La progettazione si è dovuta muovere all'interno dei vincoli imposti sia da criteri di limitazione delle vibrazioni che dalla necessaria portanza statica nei confronti del sisma e dei carichi statici. Tali criteri hanno comportato una lunga fase di affinamento della progettazione a causa della particolare onerosità dell'estrazione dei risultati e della verifica della compatibilità degli stessi con le limitazioni normative e di progetto.

Dati riassuntivi della struttura:

- La massa sismica totale è 2073t
- Taglio alla base sismico in direzione trasversale (SLV): 8035kN
- Taglio alla base sismico in direzione longitudinale (SLV): 11601kN
- Somma delle forzanti dinamiche dei macchinari: 35kN

Di seguito si riportano i principali risultati.

### Modi di vibrare

I periodi strutturali principali sono:

- direzione trasversale (x): modo 5 cui corrisponde un fattore di partecipazione pari al 68 % della massa totale e un periodo pari a  $T = 0.63$  s.
- direzione longitudinale (y): modo 7 cui corrisponde un fattore di partecipazione pari all' 65 % della massa totale e un periodo pari a  $T = 0.45$  s.

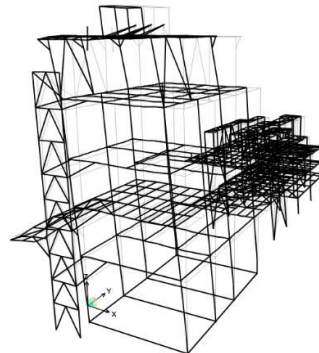


Fig. 5 - Modo 5

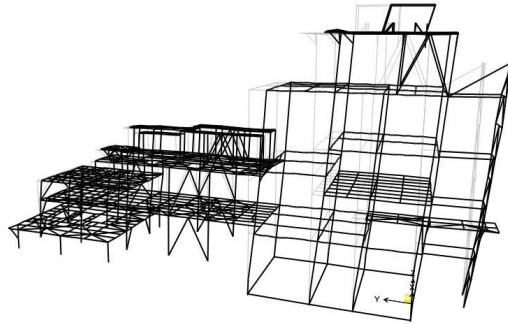


Fig. 6 - Modo 7

**Spostamenti orizzontali e verticali (statici e sismici)**

- Sono stati verificati tutti gli spostamenti orizzontali massimi ed ai vari interpiani con la limitazione  $dr < h/200$
- Spostamenti verticali sono stati limitati a un  $L/250$

In figura è rappresentata la configurazione deformata per la combinazione sismica, per la quale si verifica il massimo spostamento orizzontale a quota 23.15m:

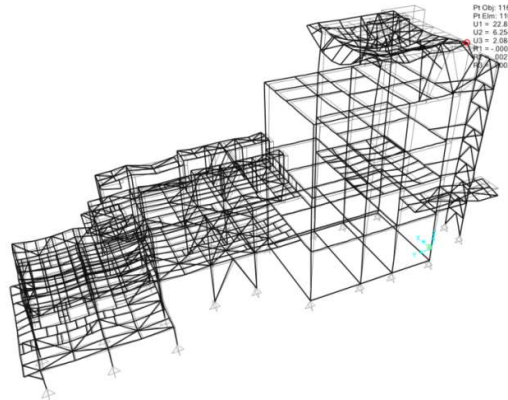


Fig. 7 - Deformata sismica

Massimo spostamento orizzontale in sommità  $22.9\text{mm} < 115\text{mm}$ .

Massimo spostamento orizzontale di interpiano  $8.7\text{mm} < 5000/200 = 25\text{mm}$

**Ampiezza di vibrazioni e accelerazioni**

Sia la variabilità delle frequenze delle forzanti dei macchinari applicati alla struttura che la complessità strutturale non hanno permesso una progettazione che tenesse sempre in conto il buon criterio della lontananza della frequenza della forzante da quelle proprie della struttura, per cui in alcuni casi, con piccole forzanti siamo vicini alla frequenza di risonanza. Comunque, tutte le am-



pezze di vibrazione sono state verificate compatibili con le specifiche di ciascun macchinario ed inoltre le accelerazioni sono minori di quelle permesse dalla normativa di sicurezza dei lavoratori. Generalmente le massime accelerazioni si verificano in corrispondenza dei macchinari, anche se in alcuni casi le accelerazioni massime per una specifica forzante si misurano in altri punti della struttura, proprio a causa del fenomeno di interazione tra la frequenza strutturale e la forzante. In particolare, le massime accelerazioni sono generalmente inferiori a  $0.25\text{m/sec}^2$ , tranne in alcuni punti il cui valore raggiunge lo  $0.4\text{m/sec}^2$ , ampiezze comunque inferiori al valore lo  $0.5\text{m/sec}^2$  e quindi ammissibili per la sicurezza dei lavoratori.

Riguardo alle limitazioni di funzionalità dei macchinari: le ampiezze di vibrazioni sono 30-50micron per i macchinari su cemento armato e 400micron per macchinari su struttura metallica. Tali ampiezze sono compatibili con le limitazioni imposte dai fornitori.

## **6 CONCLUSIONI**

La progettazione della struttura esaminata si è dovuta muovere all'interno dei numerosi vincoli imposti sia da criteri di limitazione delle vibrazioni che dalla necessaria portanza statica nei confronti del sisma e dei carichi statici. Tali vincoli hanno richiesto una ricerca della soluzione per numerosi affinamenti successivi in quanto soluzioni valide per le azioni sismiche e statiche non sono accettabili per la verifica delle vibrazioni a causa di fenomeni di risonanza.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Norme Tecniche per le Costruzioni, DM 14/01/2008
- [2] D.L. 9 aprile 2008 n.81 "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro"

## **PAROLE CHIAVE**

Vibrazioni, Time-history, Risonanza