

# **PROBLEMATICHE IN EDIFICI INDUSTRIALI IN ZONE ALTAMENTE SISMICHE**

## **Il caso delle centrali elettriche**

### **PROBLEMS IN INDUSTRIAL BUILDINGS IN HIGH SEISMIC ZONES The case of power plant**

Alberto Villa – [a.villa@dciprogetti.it](mailto:a.villa@dciprogetti.it) - DCRPROGETTI srl  
Riccardo De Col – [r.decol@dciprogetti.it](mailto:r.decol@dciprogetti.it) - DCRPROGETTI srl  
Riccardo Scevaroli – [r.scevaroli@tecnimont.it](mailto:r.scevaroli@tecnimont.it) - TECNIMONT spa

#### **ABSTRACT**

The construction of buildings in power plant in highly seismic zone involves the resolution of important engineering problems. This memory illustrates a building for the desulphurization and the turbine hall analyzed by spectral analysis in accordance with Chilean code and its peculiarities. The most important details for each building are presented.

#### **SOMMARIO**

La costruzione di edifici per centrali elettriche in zone altamente sismiche comporta la risoluzione di importanti problematiche ingegneristiche. Nella presente memoria vengono illustrati un edificio per la desolforazione e l'edificio turbina analizzati mediante analisi spettrale in accordo con la normativa cilena e le sue peculiarità. Inoltre vengono presentati i dettagli costruttivi più significativi per ciascun edificio.

#### **INTRODUZIONE**

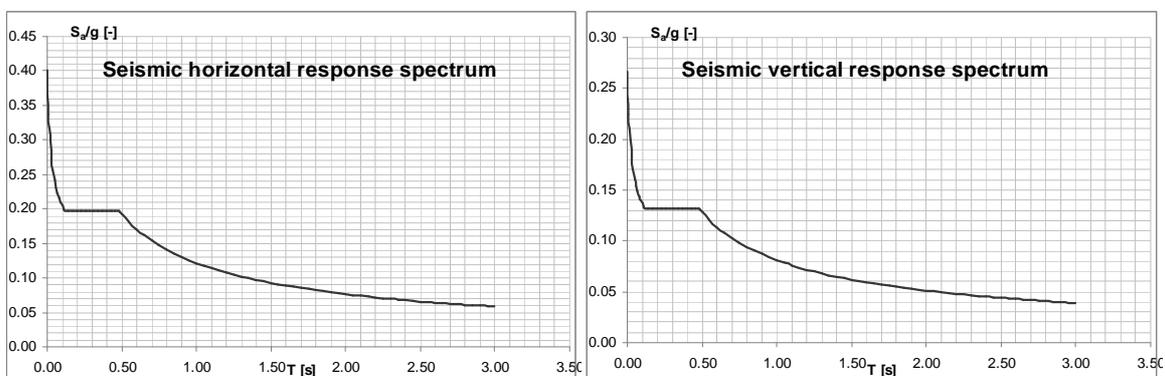
Oggi più che mai la globalizzazione impone agli ingegneri strutturisti di guardare al di là delle normative nazionali verso l'Europa e in generale tutto il mondo. E' proprio al di fuori dei nostri confini nazionali ed in particolar modo nei paesi emergenti (Asia e Sud America) che si sta concentrando il maggior sviluppo impiantistico mondiale. Il forte sviluppo che questi paesi hanno avuto negli anni scorsi e tuttora, seppur rallentato dalla crisi economica mondiale, ha portato alla sempre maggiore richiesta di energia quale motore indispensabile dell'economia. Senza energia non c'è neppure sviluppo economico. Per tali motivi si è avuta una forte proliferazione di centrali elettriche nelle quali l'energia viene prodotta nei più disparati modi: a partire dalle fonti fossili quali carbone e petrolio, o nucleare fino alle fonti cosiddette rinnovabili quali il fotovoltaico e l'eolico. La immense quantità di energia richieste in breve tempo, qualche anno, accompagnate da bassi costi di produzione ed al facile approvvigionamento del combustibile nella maggior parte dei casi hanno comportato la nuova costruzione di centrali a carbone di media potenza 500-600MW. Fortunatamente con lo sviluppo economico e l'integrazione internazionale dei paesi emergenti si è avuta una evoluzione dei criteri di protezione ambientale nei confronti degli agenti inquinanti. Le centrali a carbone di nuova concezione comportano un basso impatto ambientale paragonabile a quelle a gas grazie a complessi impianti di filtrazione e depurazione fumi prima che questi vengano immessi nell'atmosfera. In particolar modo all'uscita dalla caldaia i fumi vengono denitrificati (impianti denox che rimuovono gli ossidi di azoto), filtrati per mezzo di filtri a maniche nei quali vengono trattenute le polveri residui della combustione, e desolforazione

per l'abbattimento degli ossidi di zolfo prima dell'espulsione in atmosfera. In generale la dimensione di questi impianti di purificazione dei fumi di combustione è pari a 2/3 della centrale elettrica ed il costo rappresenta una frazione significativa dei costi totali di impianto. Vista l'importanza strategica delle centrali elettriche per lo sviluppo del Paese, particolare attenzione viene posta nelle specifiche progettuali alle condizioni ambientali relative al sito in costruzione. Molto spesso la scelta del sito è fatta con criteri economici e politici. Per tali motivi spesso sono situate in zone caratterizzate da condizioni ambientali particolarmente sfavorevoli. In particolare questa memoria analizzerà la progettazione di un edificio in acciaio all'interno di un impianto di desolfurazione e dell'edificio turbina a servizio della centrale a carbone sita nella città Bocamina (Cile) sviluppata come contratto EPC dalla società Maire Tecnimont.. Il sito è classificato dalla normativa Cilena ad alto rischio sismico e di tsunami che prevede un PGA di 0.4g per un tempo di ritorno di 50 anni, pensato in esercizio. La progettazione strutturale ha comportato sia il rispetto delle peculiari esigenze impiantistiche che della stringente normativa nazionale sismica Cilena che si configura come una delle più avanzate al mondo. D'altro canto si può notare che le varie normative sismiche degli stati localizzati in varie parti al mondo hanno raggiunto una sostanziale uniformità e si differenziano solo per dettagli.

## CARATTERISTICHE SISMICHE

Gli edifici metallici in oggetto sono adibiti l'uno alla turbina e l'altro in ausilio all'impianto di desolfurazione della centrale termoelettrica a carbone Bocamina II in Cile a Porto Coronel. L'area in cui sorge la centrale è una delle zone più altamente sismiche del globo, nell'oceano antistante le coste del Cile è situata la fossa in cui nascono violenti sismi a causa dello scontro tra la placca sudamericana e quella pacifica. Nel passato si sono registrati in queste aree dei sismi catastrofici che hanno raso al suolo molte città. In seguito a tali eventi la normativa cilena ha avuto un rapido sviluppo nel rispetto delle più moderne concezioni antisismiche. In particolare la "ground acceleration" parametro di fondamentale importanza nella progettazione strutturale è normata al valore 0.4g. L'analisi strutturale deve essere necessariamente essere condotta per analisi spettrale o accelerogrammi. La difficoltà a reperire accelerogrammi spettro-compatibili e sismogeneticamente ammissibili e la velocità di calcolo porta nella quasi totalità dei casi a utilizzare per le analisi il metodo spettrale. Oltre allo spettro di risposta orizzontale è obbligatorio applicare alle strutture anche un sisma verticale pari a 2/3 di quello orizzontale.

Trattandosi di strutture metalliche bullonate lo smorzamento è posto, in accordo con la normativa cilena, pari a 3% rispetto al critico.

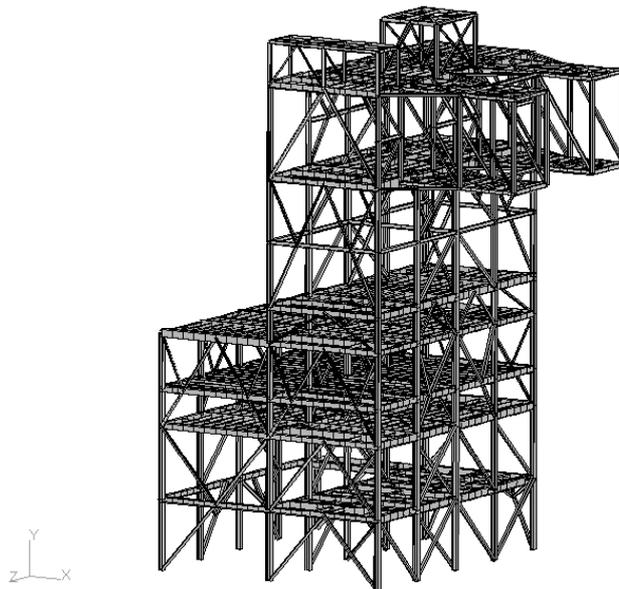


Le combinazioni di carico previste dalla normativa prevedono che l'azione sismica sia amplificata di un fattore 1.1 nel dimensionamento delle strutture metalliche e di 1.4 nel dimensionamento delle fondazioni e degli elementi di collegamento con le fondazioni (tirafondi, piastre di base e chiavi di taglio)

## FGD BUILDING

### Descrizione strutturale

L'edificio, come si evince dall'immagine, ha le caratteristiche di irregolarità sia in pianta che in altezza che nella distribuzione delle masse. Le dimensioni planimetriche sono di 24x20m fino alla quota di 19.5m per poi proseguire fino alla quota di 40.5m con dimensioni pari a 24x10m. Alla quota di 33m sono inoltre presenti degli sbalzi di circa 12m ove sono presenti dei pesanti equipment per permettere il caricamento dei silos gesso posti lateralmente all'edificio.



Usualmente tali edifici sono costruiti in cemento armato, tuttavia fine di poter ridurre le masse a causa dell'elevata sismicità della zona e i tempi di realizzazione si è optato per una struttura metallica.

La tipologia strutturale utilizzata è quella dei controventi concentrici a V che permette contemporaneamente una riduzione degli spostamenti orizzontali sia rispetto al sistema a telaio che ai controventi eccentrici e ben si combina con le esigenze impiantistiche. Il fattore di struttura previsto per tale tipologia dalla normativa cilena è 5.

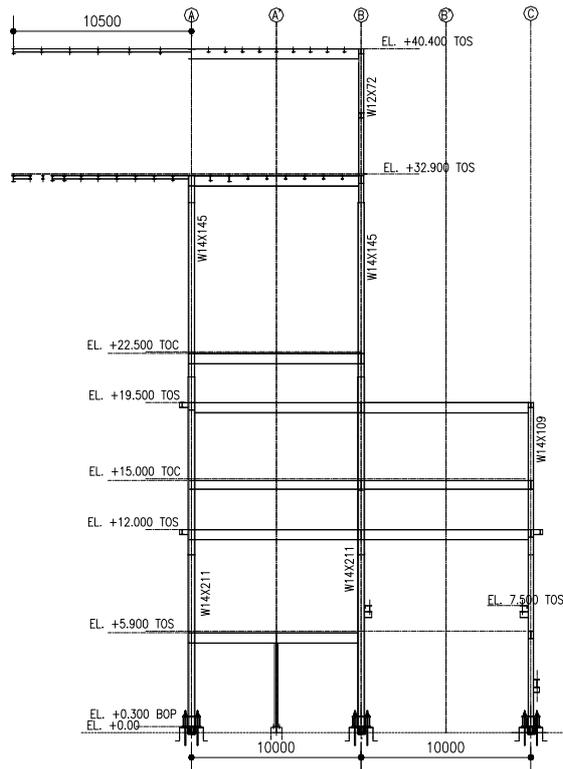


Figura 1- Sezione trasversale

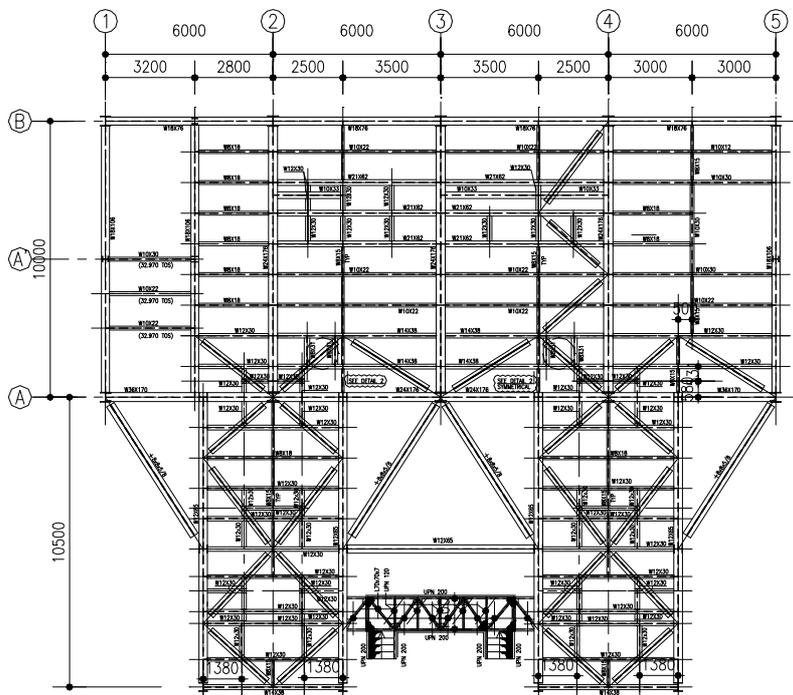


Figura 2- Pianta +33.000

I piani sono di due tipi a seconda delle esigenze impiantistiche: alcuni in lamiera striata e altri in calcestruzzo gettato su lamiera grecata. Le strutture sono state sviluppate parallelamente

alla progettazione impiantistica per cui al fine ridurre il meno possibile le libertà impiantistiche si è optato per un sistema controventante di piano indipendente dalla soletta in calcestruzzo e dalla lamiera. Sono stati a tal fine predisposti in fase di progettazione iniziale dei controventi di piano costituiti da doppi angolari che permettessero la necessaria rigidezza del piano.

Dall'analisi spettrale della struttura fissata su elementi elastici che configurano l'interazione con le strutture di fondazioni, costituite da pali in calcestruzzo armato, emerge che i modi principali di vibrare sia flessionali che torsionali sono nell'ordine di frequenze che vanno da 0.8 a 1.0 Hz.

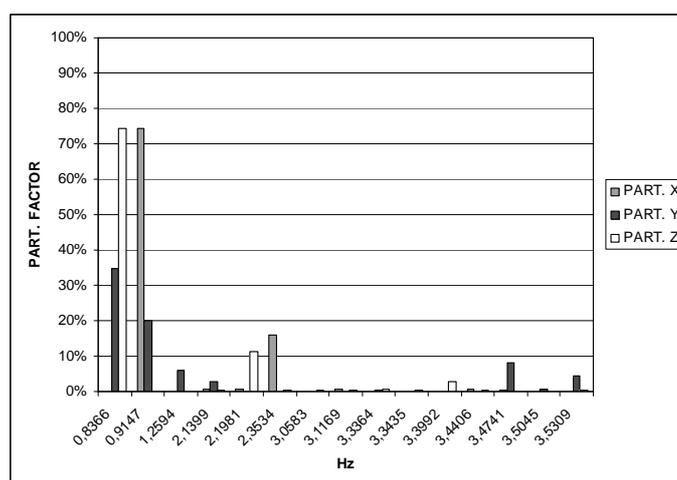


Figura 3-Fattori di partecipazione modale

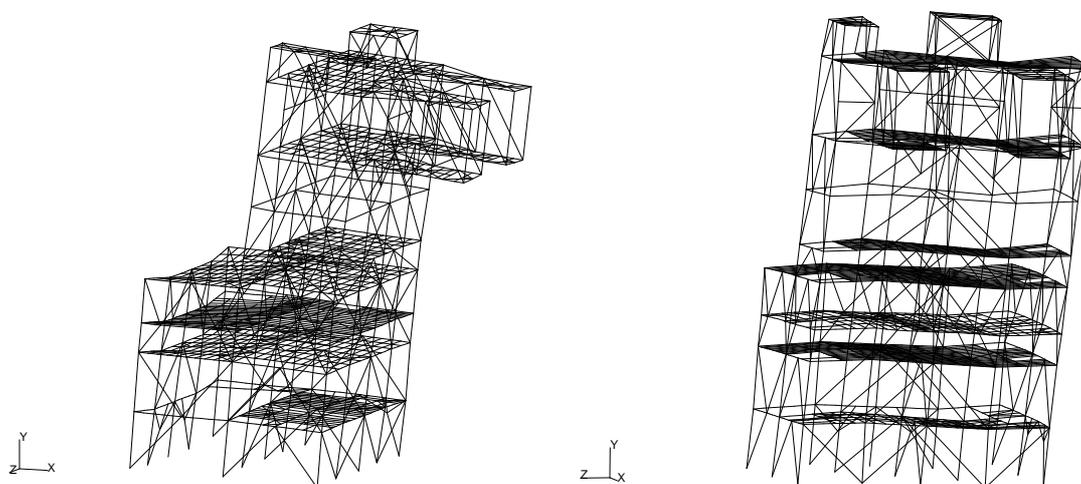


Figura 4-Deformate modali

Al fine di valutare il contributo dei solai in cls e lamiera è stato eseguito un calcolo in parallelo in modo tale da dimensionare il solaio per le azioni che eventualmente la struttura metallica potrebbe trasferirgli in caso di sisma. Le azioni sono abbastanza modeste vista la rigidità dei controventi metallici di piano e la esiguità dello spessore della soletta 10cm che è stata collegata alle travi metalliche principali tramite pioli tipo Nelson da 19mm di diametro. Il tipo di acciaio utilizzato è A36 per tutta la struttura metallica e i bulloni sono del tipo A325.

Nei riguardi degli spostamenti la normativa prevede un limite di  $H/67$  per le azioni orizzontali dovute al sisma e  $H/100$  per quelle dovute al vento, con H pari all'altezza dell'edificio.

In particolare gli spostamenti causati dal sisma sono da calcolarsi partendo dalla deformata statica a cui va sommata la deformata sismica amplificata del fattore di struttura. Lo spostamento sismico deve essere calcolato utilizzando la regola combinazione quadratica completa (CQC) al fine di poter ben cogliere anche i fenomeni di interazione causati da modi con frequenza simile. La normativa cilena vieta l'uso di altre regole di calcolo dei risultati delle analisi quali per esempio la radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS) ammessa sia dalla normativa nazionale che dagli eurocodici. In seguito al calcolo si perviene a spostamento orizzontale in sommità a quota 40m di 30cm.

Particolare attenzione merita il calcolo degli spostamenti di interpiano (interstory drift) che va eseguito a partire dalle singole deformate modali e non come differenza degli spostamenti a valle della CQC i quali potrebbero essere una grossa sottostima del reale spostamento.

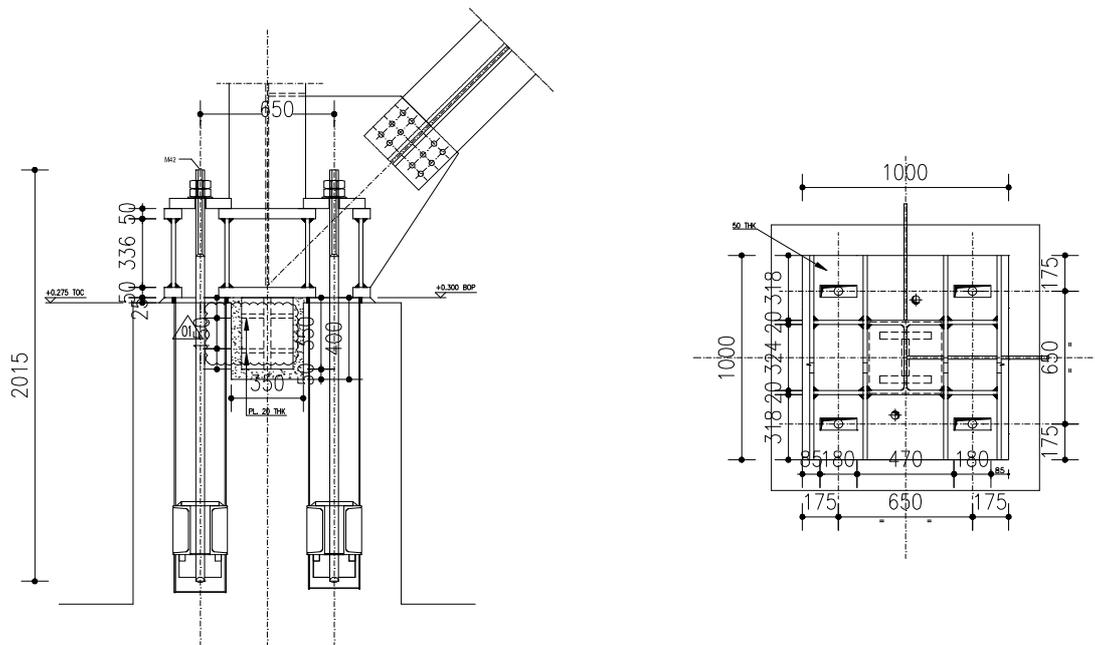
La valutazione dei giunti previsti per gli elementi di collegamento tra l'edificio e l'impianto quali ad esempio cavi elettrici e piping è di fondamentale importanza a causa dei grandi spostamenti differenziali previsti in caso di sisma.

Le azioni globali dell'edificio sono: peso permanente e strutturale 20000kN circa, azione orizzontale causata dal vento 1880kN, azione orizzontale da sisma 2310kN.

Le azioni sismiche derivanti dal calcolo sono state incrementate del 12% per poter rispettare il taglio globale minimo previsto dalla normativa.

### **Dettagli costruttivi**

L'elevato fattore di struttura utilizzato nel calcolo della risposta sismica impone il rispetto, nel calcolo dei dettagli costruttivi di nodo e delle piastre di base e dei tirafondi, delle prescrizioni normative previste. In particolare, la normativa sismica cilena relativa alle strutture metalliche (Nch 2369), prevede che i tirafondi devono essere sfilabili ed ispezionabili al fine di poter permettere un eventuale sostituzione in caso di deformazioni plastiche causate da evento sismico. Il tipo di tirafondi previsto è la tipologia con la testa a martello inseriti in tubi solidarizzati nel getto con CNP a fungere da elementi di contrasto. La piastra di base deve essere tale da poter permettere un controllo visuale del tirafondo per cui deve essere del tipo a scatola aperta con doppia piastra e spazio minimo libero del tirafondo pari a 8 diametri. Le dettagliate prescrizioni previste per le piastre di base e i tirafondi comportano elementi di base di dimensioni molto grandi ed ingombranti rispetto alla colonna spesso si supera una larghezza superiore a 4-5 volte l'ingombro della colonna. Il criterio della gerarchia delle resistenze impone che l'elemento dissipativo, nella fattispecie il tirafondo, durante l'evento sismico possa sviluppare tutta la sua dissipazione per cui gli elementi collegati devono essere calcolati non per le azioni derivanti dall'analisi ma per la capacità resistente dell'elemento dissipativo. Con lo stesso criterio deve essere dimensionato il colpetto di fondazione per poter permettere l'eventuale snervamento della chiave di taglio.



*Figura 5- Piastre di base*

Il massimo taglio alla base delle colonne è pari a 550kN, la massima compressione 4000kN e la trazione pari a 2000kN.

Per tali azioni si sono resi necessari per ciascuna colonna 8 tirafondi diametro 42mm in acciaio tipo A36. la piastra di base di dimensioni 1300x1300mm è di spessore 50mm per una altezza totale di ingombro pari a 700mm. La lunghezza dei tirafondi è 2500mm.

Lo snervamento dei controventi è l'altro elemento fondamentale per il rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze e della duttilità. La normativa locale prescrive che la snellezza dei controventi verticali sia limitata a 120 per limitare fenomeni di interazione tra plasticità ed instabilità che impedirebbe la dissipazione di energia prevista dal fattore di struttura. Inoltre il collegamento tra i controventi e le travi deve essere calcolato in modo tale da poter collassate dopo lo snervamento dell'elemento di controvento. Peculiarità della normativa è l'uso dei bulloni solo per attrito per evitare fenomeni locali comportando così dei nodi con 30-50 bulloni. Nel futuro l'uso di controventi ad instabilità impedita potrebbe comportare una riduzione dei nodi a vantaggio dell'economicità dell'opera. Occorre prestare molta attenzione anche al collegamento trave colonna che deve essere dimensionato per la somma delle azioni trasmissibili a snervamento da trave (per quanto riguarda il taglio) e dal controvento. Anche in questo caso si ha a che fare con nodi di dimensioni spropositate tali da essere tenuti subito in conto come ingombro dagli impiantisti in quanto la lamiera di collegamento tra controvento e trave supera il metro di lato.

Gli equipment posti all'interno dell'edificio devono essere collegati alla struttura metallica mediante tirafondi; le chiavi di taglio sono necessarie se l'azione orizzontale supera i 50kN. La normativa prevede delle particolari prescrizioni anche per elementi secondari quali quadri elettrici, piping ed equipment in generale che devono essere dimensionati in modo tale da non collassate in caso di sisma.

Il peso strutturale dei profili è pari a 6000kN, le piastre 1200kN e i bulloni 300kN. Da cui si perviene ad una percentuale di piastre pari al 20% e dei bulloni del 5%.

## EDIFICIO TURBINA

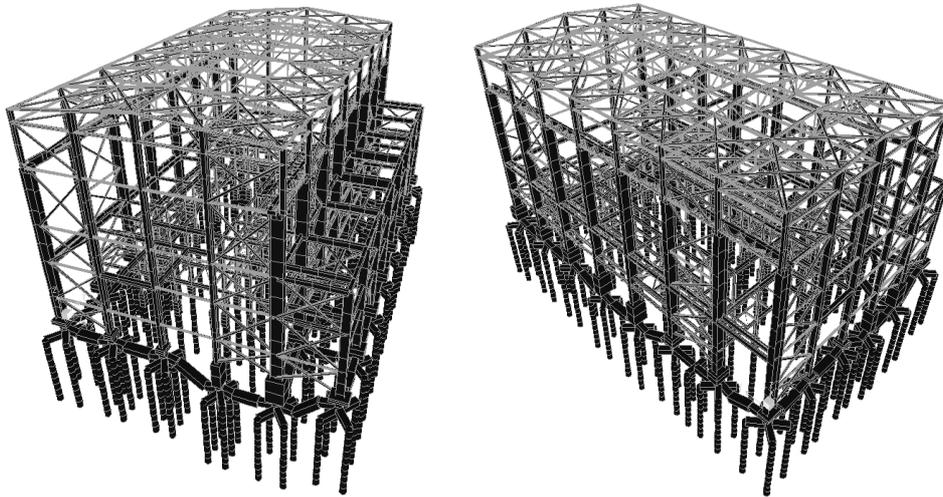
### Descrizione strutturale

Le Turbine Hall sono generalmente edifici in struttura metallica funzionali all'esercizio dei macchinari in essa contenuti, solitamente una o più turbine a vapore (steam turbine generator) e relativi ausiliari (i.e. lube oil tank, pompe estrazione condensato, preriscaldatori, etc), carroponete di manutenzione con portata al gancio 120 ton, pompe alimento caldaia, interruttore di macchina (generator circuit breaker e deareatore, e rappresentano quindi insieme alla caldaia il cuore di una centrale elettrica.

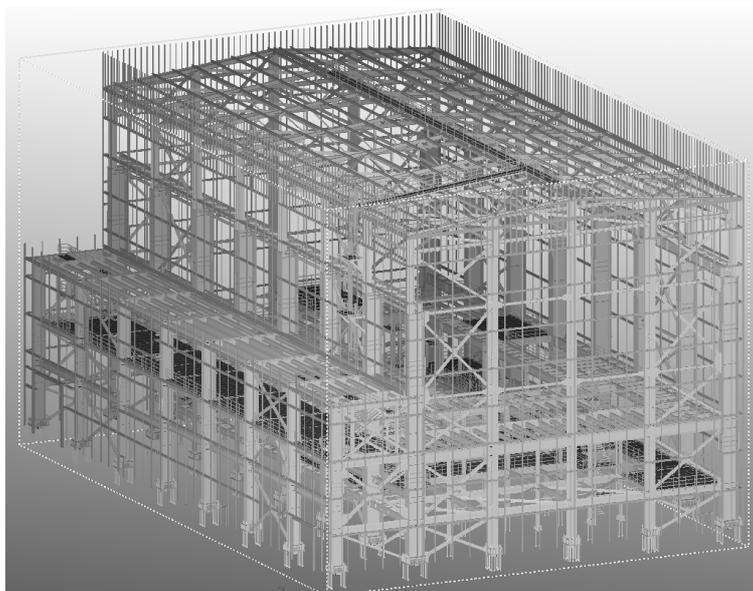
L'edificio in esame ha dimensioni in pianta di 72,2 x 39 m per una altezza complessiva al colmo della copertura di 38 m. Annessa alla struttura principale vi è il basso fabbricato di altezza pari a 18.6m che funge da protezione alle pompe alimento e da supporto al deareatore.

La struttura principale è formata da 8 telai metallici a passo 10 m controventati longitudinalmente da due ordini di controventi per ogni lato e trasversalmente sulle testate.

Internamente il fabbricato è suddiviso in due impalcati di cui uno grigliato a quota 5m ed uno a quota 12 in lamiera grecata non collaborante e cls armato, definito "piano di governo".



*Figura 6-Modello FEM tridimensionale*



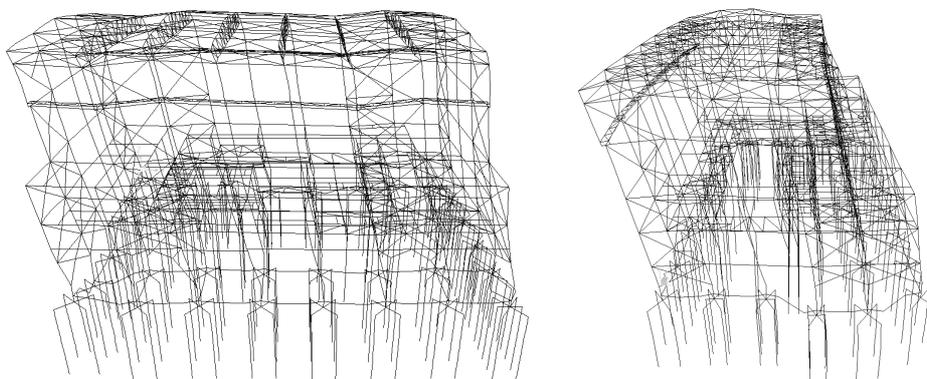
*Figura 7- Modellazione peer sviluppo shop dwg*

Poiché l'edificio è caratterizzato da irregolarità in pianta ed elevazione e da netti cambiamenti di rigidezza e carico per i due impalcati, l'analisi della stessa è stata condotta con il metodo dinamico multimodale a spettro di risposta.

Come per l'edificio FGD anche per il Turbine Hall l'analisi multimodale è stata spinta sino al raggiungimento del 95% delle masse coinvolte ed i risultati sono stati combinati, a valle di un Sturm Check, con il metodo CQC al fine di evidenziare correttamente gli effetti di modi aventi periodi molto ravvicinati fra loro.

E' quindi emerso dall'analisi che i modi caratterizzanti il comportamento globale della struttura sono compresi fra 0,79 e 0,81 sec e rappresentano le deformate modali longitudinali e trasversali con massa partecipante rispettivamente del 75% e del 79%.

I restanti 132 modi esplorati sono combinazione dei due principali ed hanno masse partecipanti inferiori al 5% (anche se come cut-off delle frequenze si è deciso di escludere quelle con massa partecipante inferiore all'1%).



*Figura 8-Deformate modali*

Il dimensionamento dell'impalcato in lamiera grecata e cls è stato sviluppato mediante un modello analogo a quello utilizzato per il dimensionamento globale al solo fine di valutare la corretta distribuzione delle azioni orizzontali. Dato l'elevata incidenza dei carichi accidentali (12 kN/mq) si è optato per una lamiera grecata di altezza pari a 7,5cm ed uno spessore finito di 17.5 cm.

Una peculiarità del codice cileno rispetto ai codici comunemente utilizzati in ambito europeo riguarda la combinazione delle azioni/spostamenti sismici per i quali viene richiesto che nella maggior parte delle casistiche all'azione sismica orizzontale prevalente venga sommato il 30% di quella nella direzione ortogonale ed il 100% di quella verticale.

Gli spostamenti ottenuti dall'analisi strutturale e con la combinazione delle azioni di cui sopra, sono stati moltiplicati del fattore di riduzione delle azioni R, che per questa tipologia di struttura metallica è pari a 5, e sommati alla deformata dovuta alle azioni statiche per verificare sia lo spostamento globale massimo che gli spostamenti differenziali di interpiano.

Differentemente da quanto previsto dai principali codici normativi europei, la verifica degli spostamenti differenziali non viene effettuata sommando gli spostamenti a valle della CQC poiché in tal caso potrebbero verificarsi delle sottostime delle reali condizioni di upper-bound.

Per effettuare la verifica sono pertanto stati elaborate manualmente le differenze di spostamento di interpiano per ogni modo considerato ed è stata effettuata la CQC a valle di tutti gli interstory drift modali. Il massimo interstory drift è 1.03% rispetto a 1.5% ammissibile. Con il medesimo procedimento si è ottenuto il tagliante di base (12664 kN in direzione longitudinale e 12825 kN in direzione trasversale) per verificare il tagliante minimo di normativa che corrisponde al 10% del peso sismico considerato (74581 kN).

## Dettagli costruttivi

Particolare cautela ed attenzione è stata utilizzata per il dimensionamento dei dettagli costruttivi poiché l'elevato fattore di struttura scelto, impone il rigido rispetto della "gerarchia delle resistenze".

Per i nodi di base sono stati previsti tirafondi removibili a testa martello (hammer head) con una lunghezza di projecting di almeno 8 diametri in modo da privilegiare il comportamento duttile a flessione dello stesso in caso di grosse azioni dinamiche reversibili e la possibilità di sostituzione in caso di danneggiamento. In caso contrario la normativa cilena avrebbe obbligato ad un dimensionamento degli stessi considerando lo spettro di risposta elastico, pertanto con le azioni derivanti dall'analisi effettuata moltiplicate per il coefficiente di struttura penalizzando notevolmente sia il dimensionamento dei tirafondi che dei dettagli ad esso connessi. In linea con la filosofia di *capacity design* i dettagli di contrasto, le piastre di base, selle di connessione e armature dei baggioli sono stati dimensionati in relazione alla capacità attesa, che sistema di ancoraggio può raggiungere.

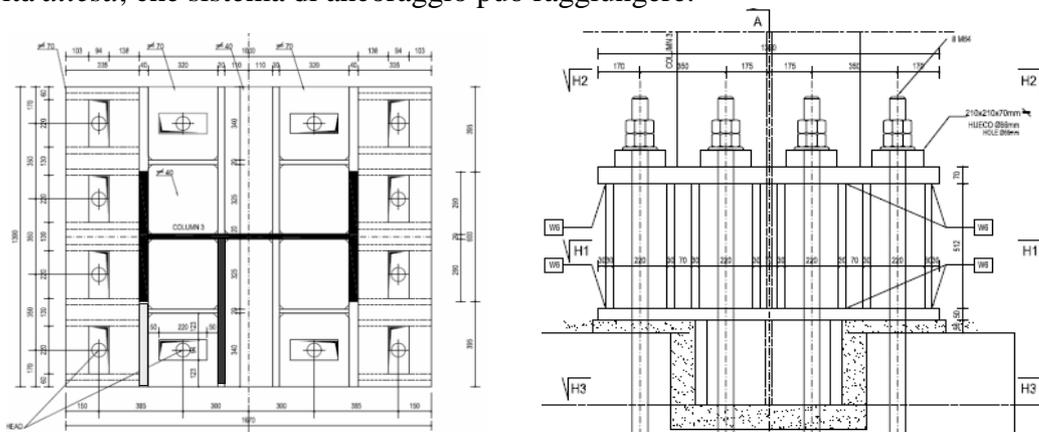


Figura 9-Dettagli piastra di base

In funzione della grossa entità dei carichi agenti sono stati previsti 8 – 12 tirafondi M64 con acciaio di qualità SAE 1020, questi ultimi disposti in corrispondenza dei fronti controventati.

Tutti gli elementi facenti parte del sistema di trasmissione degli sforzi sismici (colonne, controventi e travi con tasso di sfruttamento dovuto alla sola azione sismica maggiore del 30%) sono oggetto di un attento dimensionamento. I controventi sono infatti dimensionati per un tasso di snellezza pari a 120 e per un tasso di sfruttamento dell'80% della capacità del controvento stesso, mentre il dettaglio di connessione è pensato per trasmettere l'intera capacità del controvento stesso. Le stesse riprese in elevazione delle colonne sono concepite per poter trasmettere il 125% della capacità della membratura. In linea con le richieste delle AISC seismic provision (e anche dell'Eurocodice 3) tutte le connessioni sopportanti azioni cicliche o dinamiche di grossa entità, come l'azione sismica, sono di tipo ad attrito (slip critical type A), portando quindi ad un numero considerevolmente superiore di bulloni rispetto alle normali connessioni bearing type utilizzate in ambito italiano.

Tutti gli equipment interni sono stati fissati per mezzo di tirafondi (cast-in oppure chimici) agli impalcati e dotati di chiave di taglio se il taglio di base è superiore ai 50 kN così come imposto dalla normativa cilena.

## Bibliografia

- Nch 433.Of96 – Norma Chilena - Diseno sismico de edificios

- Nch 2369.Of2003 – Norma Chilena - Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales
- ACI318 – Building code requirement for structural concrete and commentary
- AISC 341 – Seismic provision for structural steel buildings
- AISC – Manual of steel construction – Load and Resistance Factor Design 3<sup>rd</sup> Ed.
- Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance