



PROYECTO DE REPARACIÓN TORRE DE ENFRIAMIENTO DE MADERA ASERRADA. DESAFÍOS ESTRUCTURALES CONSIDERANDO LOS CRITERIOS DE LA NORMA SÍSMICA NCH2369 PARA ESTRUCTURAS INDUSTRIALES EN CHILE

REPAIR PROJECT OF TIMBER COOLING TOWER. STRUCTURAL CHALLENGES CONSIDERING THE CRITERIA OF THE SEISMIC STANDARD NCH2369 FOR INDUSTRIAL STRUCTURES IN CHILE.

Gonzalez, Ignacio
IGR Structural Engineering, Chile

CÓDIGO: A4602302

Resumen

Este trabajo describe los distintos aspectos y desafíos considerados en el diseño sísmico de la torre de enfriamiento de madera aserrada para una planta de fundición en la región de Antofagasta en Chile. El proyecto consideró la inspección, diseño y reparación de la torre existente con madera aserrada nacional e internacional, considerando los criterios de la norma sísmica industrial NCh2369. Para el diseño de los elementos de madera aserrada se utilizó el software C+T, primer software creado en Chile y Latinoamérica capaz de diseñar en base a la norma NCh1198.

Palabras-clave: Torre de enfriamiento de madera, diseño sísmico de estructuras.

Abstract

This paper describes the different aspects and challenges considered in the seismic design of the sawn timber cooling tower for a smelting plant in the Antofagasta region in Chile. The project considered the inspection, design and repair of the existing tower with national and international sawn timber, considering the criteria of the seismic industrial structures standard NCh2369. For the design of the elements of sawn timber, the C + T software was used, the first software created in Chile and Latin America capable of designing based on the NCh1198 standard.

Keywords: Timber cooling tower, Seismic design industrial structures.



1. INTRODUCCIÓN

El proyecto consta de una torre de enfriamiento de madera aserrada que data del año 2002, la que originalmente se construyó con madera aserrada de pino oregon de procedencia de EEUU, douglas fir.

Debido a las condiciones de operación de la torre con altas temperaturas, químicos y humedad, la estructura se fue deteriorando hasta alcanzar niveles críticos para un buen comportamiento estructural.

De acuerdo a las condiciones antes descritas, nuestra oficina tomo el desafío de devolver la capacidad resistente de la estructura cumpliendo con la normativa sísmica para estructuras industriales NCh2369.Of2003 [1] y la norma de diseño para estructuras de madera NCh1198.Of2014 [2].

El diseño de los elementos estructurales de las especies de madera aserrada utilizados durante el proyecto de ingeniería, se realizo con el software de diseño C+T de Eligemadera.

2. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

La estructura de la torre de enfriamiento está formada estructuralmente por un conjunto de marcos arriostrados de madera aserrada en ambas direcciones de análisis. En el nivel superior de la estructura se ubican los equipos mecánicos y de ventilación.

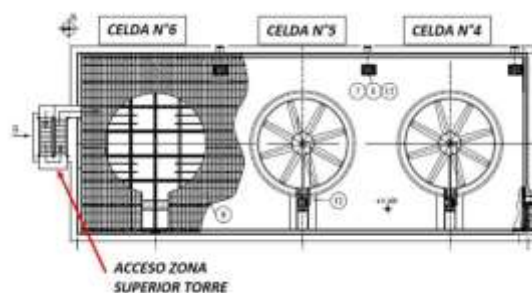


Fig. 1 - Planta de la torre de enfriamiento



Fig. 2 - Torre de enfriamiento

La estructura de la torre debe ser capaz de resistir el peso de los equipos que soporta y a su vez debe mantener el proceso de operación ante eventos sísmicos.

3. DAÑOS ESTRUCTURALES ANTES DE LA REPARACIÓN

Se realizó una visita de inspección donde se tomaron notas del estado actual de la estructura. La información obtenida sirvió como input de información relevante para el desarrollo de la ingeniería, como son, materialidad, dimensiones, ubicación y estado de conservación.



Fig. 3 - degradación en elementos perimetrales



Fig. 4 - Pérdida de sección de arriostramientos



Fig. 5 - Pérdida de sección en vigas de soporte de equipos



Fig. 6 - Corrosión y debilitamiento de uniones



Fig. 7 - Pérdida de sección en columnas perimetrales



Fig. 8 - Daño crítico en columnas, vigas y puntales



4. CRITERIOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

- Propiedades de los materiales

Es importante en todo tipo de proyecto de madera estructural definir claramente las especies con las cuales se trabajarán, en este caso se utilizaron las siguientes:

- Madera aserrada columnas: Pino Oregón, grado estructural N°1 al 30% de contenido de humedad según NCh1198. Impregnación con sales de CCA para riesgo R5.
- Madera aserrada vigas y arriostramientos: Pino radiata, grado estructural C24 al 30% de contenido de humedad según NCh1198. Impregnación con sales de CCA para riesgo R5.

- Cargas de diseño

Cargas permanentes utilizadas para el diseño estructural, corresponden a lo señalado en la NCh1537.Of2009[3] y los criterios de diseño indicados por el cliente para este tipo de estructuras.

- Carga muerta niveles inferiores (vigas 50x160) : 50 kg/m²
- Carga muerta nivel superior (Cargas de equipos y otros) : 50 kg/m²
- Carga de uso de piso nivel superior (zona de equipos[4]) : 200 kg/m²

- Determinación de espectro de diseño.

Tabla 1: Parámetros espectro de diseño NCh2369 Of. 2003

Factor de importancia	I	1,00
Tipo de suelo		IV
Zona sísmica		3
Razón de amortiguamiento	ξ	0,03
Factor de modificación de respuesta	R	3
Coefficiente sísmico máximo	C_{max}	0,34

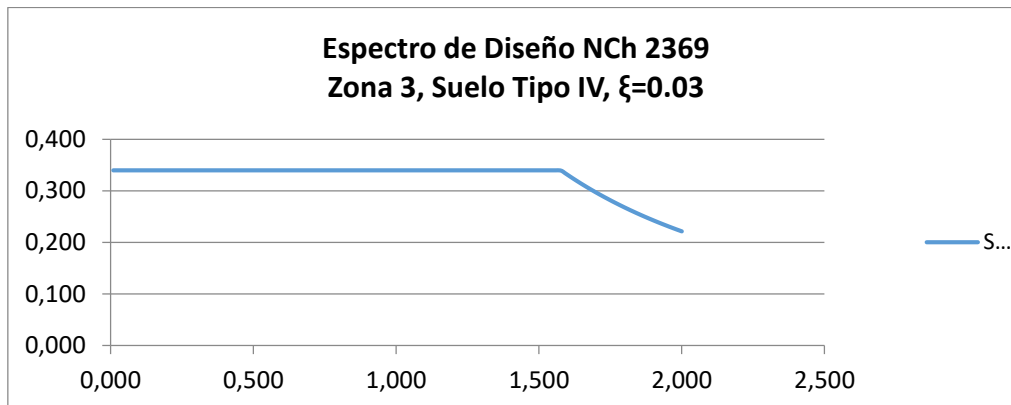


Fig. 9 - Espectro de diseño según NCh2369 de acuerdo con los antecedentes del proyecto

- Antecedentes generales del análisis sísmico

CATEGORÍA DEL EDIFICIO:	C2
ZONA SÍSMICA:	3
TIPO DE SUELO:	IV
RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO:	$\xi = 0.03$
FACTOR DE MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA	R = 3
COEFICIENTE DE IMPORTANCIA:	I = 1.00
ACELERACIÓN EFECTIVA MÁXIMA:	Ao = 0.40 g
	T' = 1.35 (s)
	n = 1.8
PESO DEL EDIFICIO:	P = 134.9883 (T)
PERIODO FUNDAMENTAL DIRECCIÓN X:	T*x = 0.172144 (s)
PORCENTAJE DE MASA ASOCIADA	Mx = 81.6013 (%)
PERIODO FUNDAMENTAL DIRECCIÓN Y:	T*y = 0.183748 (s)
PORCENTAJE DE MASA ASOCIADA	My = 85.3738 (%)
COEFICIENTE SÍSMICO EN DIRECCIÓN X:	Cx = 18.323
COEFICIENTE SÍSMICO EN DIRECCIÓN Y:	Cy = 16.293
COEFICIENTE SÍSMICO MÍNIMO:	Cmin = 0.100
COEFICIENTE SÍSMICO MÁXIMO:	Cmax = 0.340
COEFICIENTE SÍSMICO EN DIRECCIÓN X:	Cx = 0.340
COEFICIENTE SÍSMICO EN DIRECCIÓN Y:	Cy = 0.340
CORTE BASAL EN DIRECCIÓN X:	Qox = 45.896 (T)
CORTE BASAL EN DIRECCIÓN Y:	Qoy = 45.896 (T)

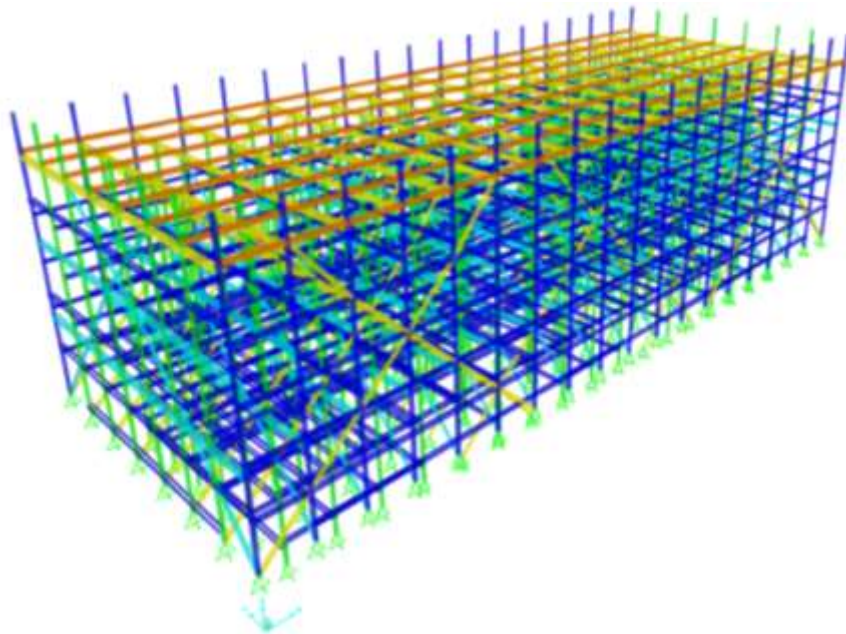


Fig. 10: Modelo estructural tridimensional de la torre

El factor de reducción de la respuesta utilizado en el proyecto, $R=3$, es menor al indicado normativamente por la norma sísmica industrial, $R=4$. Si bien las piezas y las uniones en la parte central de la torre estaban en buen estado de conservación, se adoptó este criterio que es un tanto conservador debido a que no se obtuvieron mayores antecedentes de las uniones en la parte central de la torre.

El proyecto de reparación contempló modificar el perímetro de la estructura, que es dónde se observó el daño crítico (Fig.11 y Fig.12).

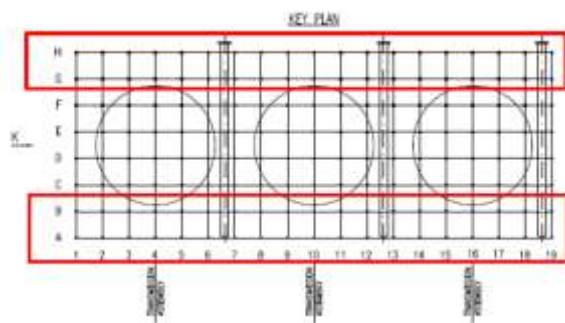


Fig. 11 - Ejes longitudinales a reemplazar

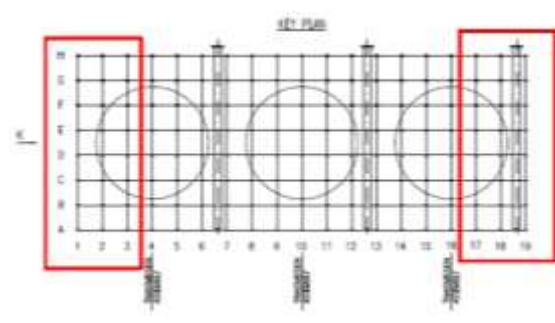


Fig. 12 - Ejes transversales a reemplazar

- Uniones

Un punto clave para el correcto desempeño de la estructura ante solicitaciones sísmicas, son las uniones. Las uniones de las estructuras de madera deben cumplir con los requisitos normativos de acuerdo a NCh1198.Of2014. Además, deben tener un comportamiento dúctil y una resistencia de falla inferior a los elementos de madera conectados.



5. RESULTADOS FINALES DEL PROYECTO

- Diseño estructural

Para el diseño de elementos estructurales con las especies de madera utilizadas en el proyecto (Pino Oregón de EEUU y Pino Radiata nacional), fueron diseñados con el software C+T, software de creación nacional y el primero en su tipo en Latinoamérica. Con la utilización del software se obtuvieron las verificaciones de los elementos y uniones de manera rápida y sencilla, lo cual facilitó el trabajo de ingeniería en los tiempos de ejecución del proyecto.

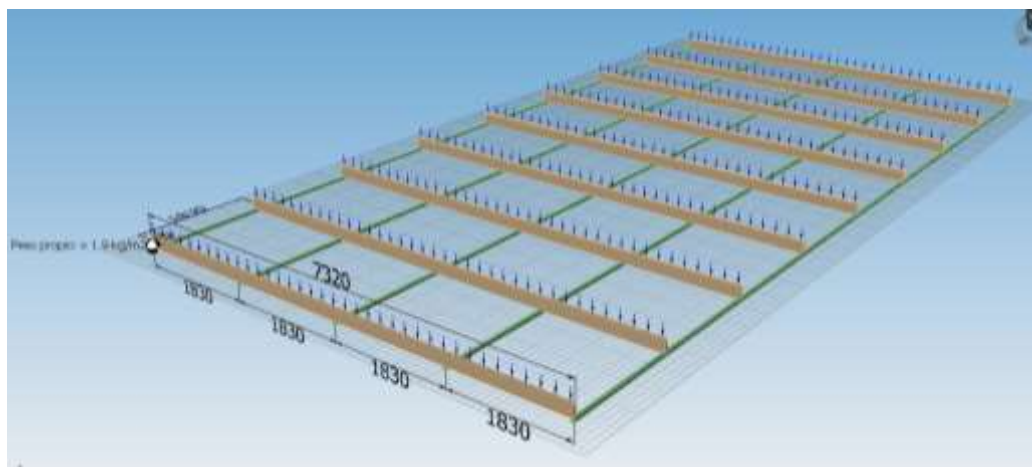


Fig. 13 - Interfaz diseño de vigas

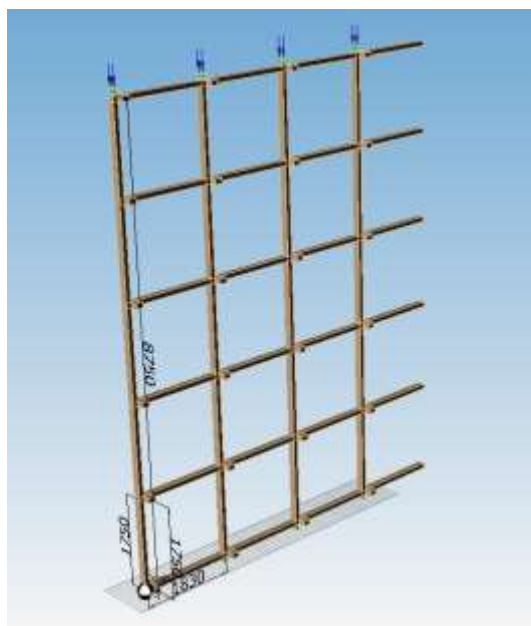


Fig. 14 - Interfaz diseño de columnas

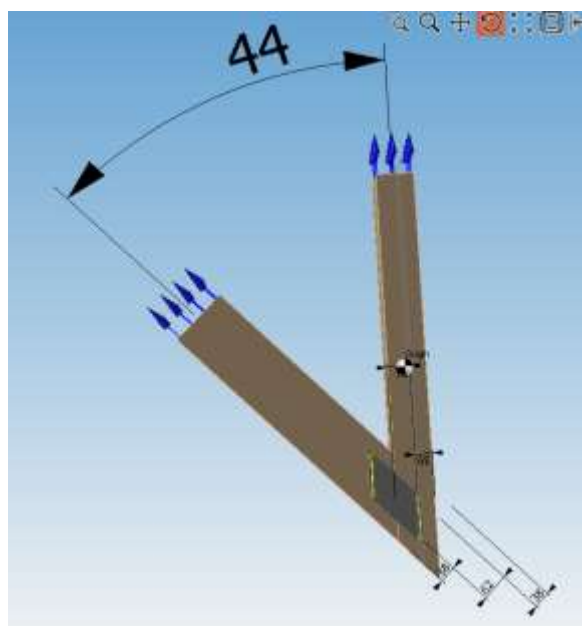


Fig. 15 - Interfaz diseño de uniones



- Desafíos en la ejecución del proyecto

Otro de los desafíos para lograr la correcta reparación de la torre de enfriamiento, fue ejecutar todos los refuerzos y cambios de piezas en el tiempo estipulado por el cliente. En este caso se contaron con 3 semanas de trabajo para la ejecución de las obras, tiempo en el cual se realizó una parada de planta general.

Como los tiempos fueron críticos para la ejecución de la obra, se optó por prefabricar la estructura de madera para lograr dar con los tiempos indicados. Para este propósito fue necesario adoptar una nueva herramienta de ingeniería, por lo que se utilizó el programa Cadwork, que es un referente en Europa para el desarrollo de soluciones 3D CAD/CAM. Con esta herramienta se logró dar continuidad a las fases del proyecto, desde el diseño hasta la producción en obra.

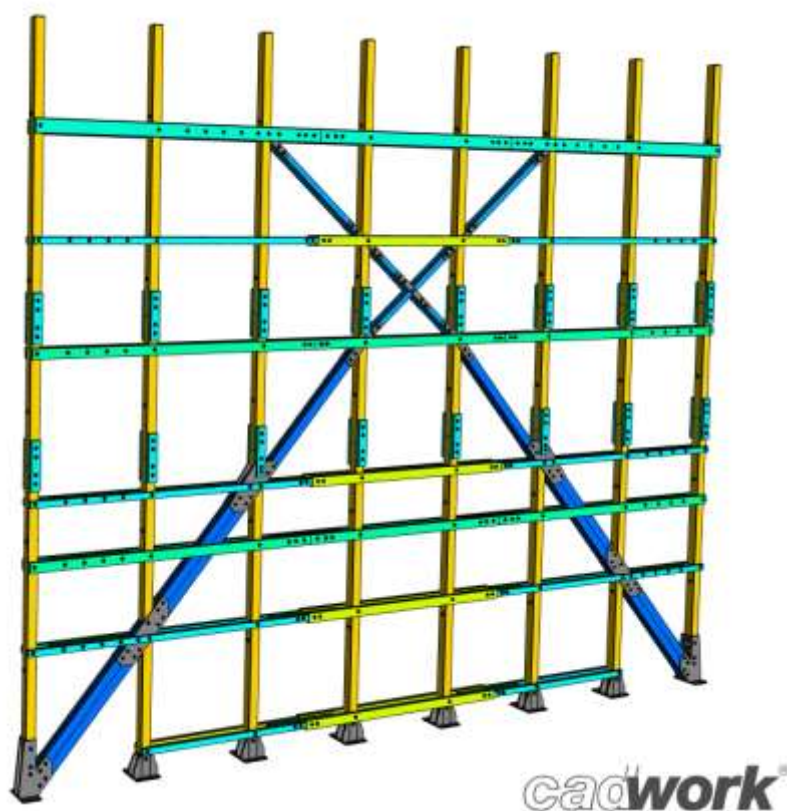


Fig. 16 - Vista 3D eje transversal en Cadwork

Como se muestra en la figura (Fig.16), se pueden obtener detalladamente todas las piezas de madera, placas de acero, pernos y conectores que se requieren en cada eje de la estructura de manera precisa, lo cual impactó de forma positiva en los tiempos de ejecución del proyecto.



Fig. 17 - Restitución columnas perimetrales



Fig. 18 - Restitución arriostramientos



Fig. 19 - Reparación de uniones en arriostramientos



Fig. 20 - Reparación de placas base

Finalmente, la ejecución de los trabajos durante el tiempo que duró la parada de planta se efectuó de acuerdo a las indicaciones del proyecto de ingeniería.



6. CONCLUSIONES

- La estructura de la torre presentaba daños que limitaban su capacidad resistente ante eventos sísmicos. En general y de acuerdo a la inspección realizada, la estructura presentaba daños estructurales graves que ponían en peligro su capacidad resistente ante tales eventos.
- El proyecto de ingeniería para la torre de enfriamiento tuvo que adaptar el requerimiento del funcionamiento general a las exigencias normativas vigentes. En ese contexto, se utilizaron herramientas de ingeniería aptas para lograr el propósito antes mencionado, que en este caso fueron para el diseño de los elementos estructurales el software C+T. Y para la prefabricación de las piezas de madera, placas de acero, pernos y conectores se utilizó el software Cadwork.
- El diseño sísmico de la torre de enfriamiento se realizó considerando un factor de modificación de la respuesta $R=3$, debido a que parte de la estructura central existente no se reparó. Si bien la inspección visual de las piezas de madera y uniones realizadas en esa parte de la torre estaba en buen estado de conservación, se adoptó un criterio conservador por no contar con mayor información. Por lo tanto, se reforzó el perímetro de acuerdo a las exigencias de diseño.
- Se pudo lograr el objetivo inicial de devolver la capacidad resistente de la torre de enfriamiento y cumplir con las exigencias normativas de acuerdo a NCh2369 y NCh1198 utilizando herramientas de diseño y fabricación de última generación.

AGRADECIMENTOS

- Empresa Eligemadera por su apoyo en la inspección y el software C+T.
- Empresa Tecnica Hansa por su apoyo en construcción del proyecto.
- Harry Celedón por su apoyo en la inspección técnica durante la construcción.
- Markus Alexander Ziegler por su apoyo con el software Cadwork y los planos de fabricación.

REFERENCIAS

- INN Chile. NCh2369.Of2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
- INN Chile. NCh1198.Of2014 Madera - Construcciones en madera - Cálculo.
- INN Chile. NCh1537.Of2009 Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso
- SPX Cooling technologies, Inc. Cooling towers fundamentals. Jhon C. Hensley, editor.