

Diseño estructural del edificio más alto de El Salvador

<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8516>

E. Portillo¹, A. Ferruffino¹, M. Rauda¹, G. Diaz¹, F. Renderos¹

¹Estructuristas Consultores, El Salvador

E-mail: ec@ec.com.sv

Resumen — La Torre Corporativa es un edificio de 33 niveles con una altura total de 139m y una extensión en planta de 81x56m. Los sistemas estructurales utilizados fueron sistemas Duales y de Marcos con Detallado Especial con fundaciones del tipo profundo que consistió en pilas de concreto conectadas entre sí por medio de cabezales y vigas de fundación. En este artículo se presentan los lineamientos seguidos para la elaboración del diseño estructural de la super y sub-estructura, así como los retos a superar debido a las condiciones singulares del proyecto. Debido a la importancia de este desarrollo fue necesario realizar estudios de respuesta de sitio que permitieron poder optimizar la estructura en comparación a los resultados obtenidos por medio de la normativa de diseño por sismo vigente en el país. Así mismo, se implementaron normativas mejor adaptadas al estado del arte del diseño estructural como lo son el ASCE7-10 y ACI318-14.

Palabras Clave – cimentaciones profundas, sismorresistente, sistema dual

Abstract — The Corporate Tower is a 33-story building with a total height of 139m and a floor area of 81x56m. The structural systems used were Dual Frame-wall and Special Moment Frame systems with Seismic Detailing, the foundations were of the deep type consisting of interconnected concrete piles through foundation beams and pile caps. This article outlines the guidelines followed for the superstructure and substructure's structural design, as well as the challenges overcome due to the unique conditions of the project. Given the significance of this endeavor, site response studies were necessary to optimize the structure. Similarly, state of the art standards were implemented in accordance with the latest developments in structural design, such as ASCE7-10 and ACI318-14.

Keywords — deep foundations, dual system, seismic resistant

I. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como objetivo describir los lineamientos y criterios adoptados durante el proceso de conceptualización y diseño de la Torre Corporativa Millennium, que forma parte de la Fase 1 del Complejo Millennium Plaza, ubicado sobre una de las zonas más importantes de la capital, Paseo General Escalón #3700, Colonia Escalón, San Salvador. Dicho proceso de diseño tuvo una duración aproximada de dieciocho meses

Torre Millennium, es una torre corporativa, con un concepto innovador, que se integra de manera armoniosa a su entorno, construida de concreto reforzado que consta de 34

niveles, de los cuales 27 se extienden 117m por encima del nivel de terreno; convirtiéndola en la torre más alta de El Salvador, y situando al país por delante de Guatemala, Belice y Nicaragua en cuanto a los edificios más altos de la región.

II. PROCESO DE DISEÑO ESTRUCTURAL

A. Descripción del proyecto

La Torre Millennium, es un edificio de 33 niveles (incluyendo azotea y helipuerto), distribuidos de la siguiente manera: 6 niveles corresponden a sótanos, 3 niveles de plaza y los 24 superiores a la torre; la altura total de la edificación es de 139 m de los cuales, 117 m son a partir del nivel medio del terreno. La huella total en planta del edificio en los niveles de sótano y plaza es aproximadamente rectangular, con dimensiones de 81 X 56m, reduciéndose en los niveles de torre a dimensiones de 35 X 49 m. Sumando un área total de construcción aproximada, de más de 68,000 m².



Fig. 1. Arquitectura: Vista en 3D del Complejo Millennium Plaza

Edwin Portillo es CEO y Fundador de Estructuristas Consultores. Alexander Ferruffino es Director de Ingeniería de Estructuristas Consultores. Por su parte, Mauricio Rauda, Gilma Díaz y Francisco Renderos son Líderes de Ingeniería de Estructuristas Consultores.

La super estructura del edificio posee un sistema estructural sismo resistente, constituido en la dirección N-S a base de paredes de concreto reforzado combinadas con marcos resistentes a momento también de concreto reforzado, ambos con detallado especial (Sistema D.3 del ASCE7-10). Para la dirección E-W el sistema sismo resistente está constituido a partir de marcos resistentes a momento con detallado especial (Sistema C.5 del ASCE7-10). La

subestructura de la edificación es del tipo profundas, consistente en pilas y cabezales unidos entre sí a través de vigas de fundación. [4]

El análisis y diseño de todos los elementos que conforman el sistema estructural de la edificación se realizó siguiendo los procedimientos y parámetros establecidos en normativas ASCE7-10 y ACI318-14; a través de un modelo matemático de cálculo desarrollado en el software ETABS. [10] [11]

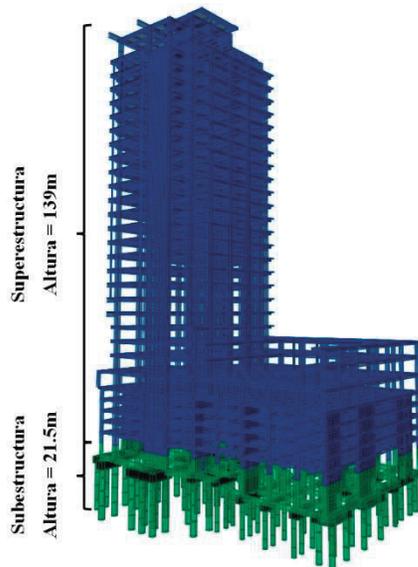


Fig. 2. Vista 3D de modelo de la super estructura y fundación desarrollado en ETABS

B. Estudios de sitio realizados

1. Estudios geotécnicos y geofísicos

A lo largo de todo el proceso de diseño se realizaron 2 campañas Geotécnicas:

La primera campaña se realizó previo a iniciar con el proceso de diseño (año 2015) y consistió en 5 ensayos rotativas cada una con una profundidad de 55m, 2 líneas de refracción sísmica y un ensayo REMI (Microtremor).

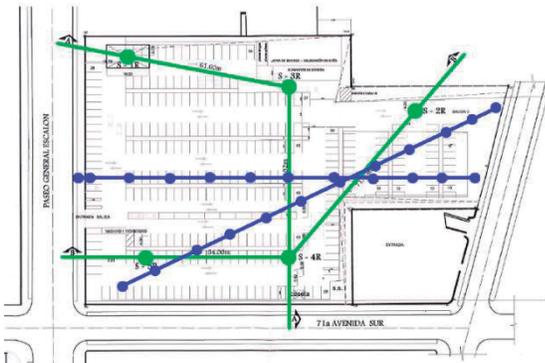


Fig. 3. Esquema de ubicación de los sondeos (color verde) y líneas de refracción (color azul) realizados por otros

La segunda campaña geotécnica se realizó durante la etapa constructiva a nivel de piso proyectado para el sótano 6 (21.5m por debajo del nivel medio de calle) como parte de las pruebas de fondo. La campaña consistió en 2 líneas de refracción sísmica en la cual además se realizaron ensayos MASW y REMI. Adicionalmente, se realizaron 18 sondeos SPT con una profundidad máxima de 8.5m

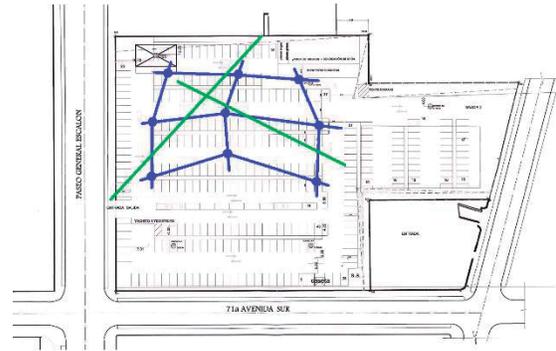


Fig. 4. Esquema de ubicación de los sondeos (color azul) y líneas de refracción (color verde) realizadas por otros y Estructuristas Consultores. S.A de C.V

2. Análisis de respuesta de sitio

Los estudios conocidos como “Análisis de Respuesta de Sitio” son aceptados internacionalmente como un medio alternativo y de mayor precisión, para los fines de valorar la amenaza sísmica en un sitio en particular. Para la evaluación sísmica de la Torre Corporativa Millennium, se realizó un análisis de respuesta de sitio, siguiendo los procedimientos establecidos en ASCE7-16, así como también procedimientos determinísticos estándar.

Como parte del estudio realizado para la Torre Corporativa Millennium, se obtuvieron las gráficas de espectros de respuesta para los diferentes perfiles de Suelo (A, B, C y D) especificados por la normativa ASCE-7, estos espectros se calcularon a partir del análisis de las fuentes sísmogénicas que afectan al sitio de interés, siguiendo procedimientos deterministas estándar.

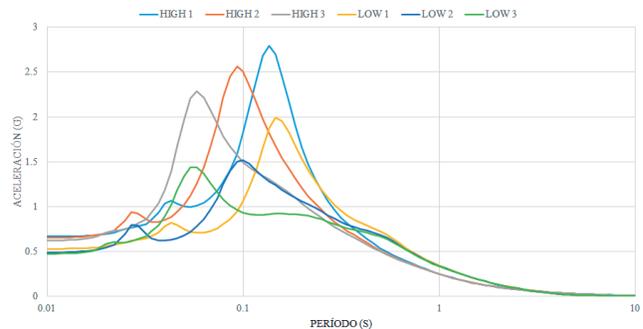


Fig. 5. Espectros de respuesta a nivel de fundación (Análisis de Respuesta de Sitio realizado por otros)

3. Análisis de resultados

Con base en la información obtenida a partir de los estudios de sitio realizados se logró definir: Los parámetros a considerar para realizar el análisis sísmico del edificio, así como también la definición del sistema de cimentación a utilizar.

3.1. Análisis sísmico

Como resultado de la interpretación de los datos obtenidos de los estudios realizados, se concluyó que el espectro de diseño que mejor representaba la amenaza sísmica del sitio es el definido a partir de la metodología ASCE7-10 considerando una clasificación de sitio tipo C, con los valores de aceleración $S_s=2.0g$, $S_1=0.6g$ para periodos cortos y largos respectivamente y los valores de modificación de respuesta $R=7$ para Sistema Dual y $R=8$ Marcos resistente a momentos ambos con detallado especial. En la siguiente fig., para fines comparativos, se realiza el ploteo del espectro de diseño definido (Representado de color verde en el gráfico), junto al espectro resultante de seguir la metodología de la NTDS (Norma Técnica de Diseño Por Sismo de El Salvador) para un perfil de suelo tipo S1 ubicado en zona 1 (Representado de color anaranjado en el gráfico), para ambos espectros se ha considerado $R=1$; adicionalmente, se presentan ploteado los periodos fundamentales del edificio en su condición de resistencia con la finalidad de representar la interacción del edificio con cada uno de los espectros descritos. [2]

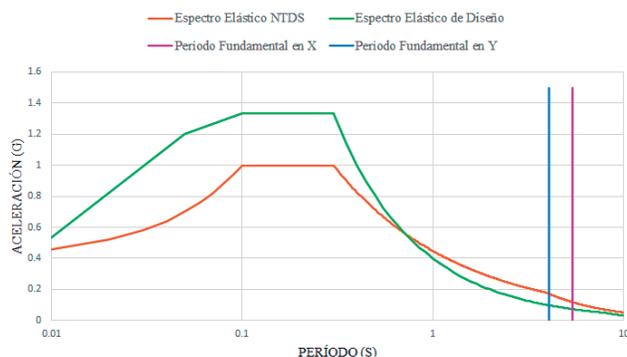


Fig. 6. Espectros de Respuesta Elástica; Definido según ASCE7-10 representado de color verde y Espectro de Respuesta Elástico definido según NTDS representado de color anaranjado y línea punteada

De la fig. 6 podemos advertir que, para el rango de periodos esperados del comportamiento del edificio, el espectro definido por la metodología planteada en la NTDS, aún bajo las condiciones de sitio más favorables (S1), está por encima de la demanda esperada para el edificio determinada a partir del estudio de respuesta de sitio realizado.

3.2 Definición del sistema de fundación

Con la caracterización del suelo existente en el sitio definida a través de los resultados obtenidos de los estudios

realizados, se procedió con la elaboración de modelos matemáticos de análisis, que permitieran representar razonablemente el comportamiento del suelo bajo las diferentes distribuciones de carga proyectadas del edificio, con la finalidad de poder definir el sistema de cimentación apropiado para las condiciones presentes en el suelo, como también para las magnitudes de carga a transmitir.

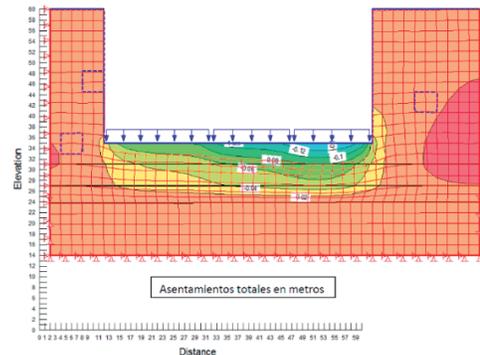


Fig. 7. Modelo de análisis para la evaluación de las deformaciones del suelo bajo la distribución de carga asociado a un sistema de cimentación superficial elaborado en SIGMA/W

La condición de carga evaluada correspondiente a un sistema de cimentación superficial resultó que, para los esfuerzos que transmite el edificio se tendrían asentamientos del orden de 12.0cm lo cual por encima del asentamiento máximo de 2.5cm definido para el proyecto; en vista de lo anterior se definió que la propuesta de cimentación debía ser del tipo profunda consistente en pilas y cabezales unidas entre sí, por medio de vigas de fundación.

C. Normativas aplicadas

A continuación, se lista la normativa utilizada en el diseño de la estructura del Edificio.

- Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE Standard. ASCE/SEI 7-10. [1]
- Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318-14. [3]
- Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10. [4]
- Seismic Provision for Structural Steel Building, ANSI/AISI 341-10. [5]
- International Building Code IBC-2012. [6]
- Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures ACI 350-06 [7]
- Structural Welding Code AWS D1.1. [8]
- ASTM Standards. ASTM International.
- Fintel, M., Glosch, S.K and Iyengar, H., "Column shortening in tall structures". Portland Cement Association, 1987. [9]

D. Estructuración

I. Superestructura

La estructura se puede dividir en dos sub-grupos con base en su tipología de estructuración, la primera consta de un podio que contiene los niveles de Sótano 6 hasta la losa de Nivel 1; el segundo grupo, es la torre con 24 niveles y un nivel de helipuerto.

El podio consta de una combinación de paredes de corte, marcos con detallado especial y rampas ligadas a la estructura que componen el sistema resistente a fuerzas laterales, en este caso las fuerzas laterales comprenden cargas por sismo, viento y retenciones de tierras de hasta 23.0m de altura en los costados norte y oeste del edificio. El podio tiene una extensión en planta de 85mx57m. En la fig. 8 y la fig. 9 se muestran la tipología de la estructura vertical.

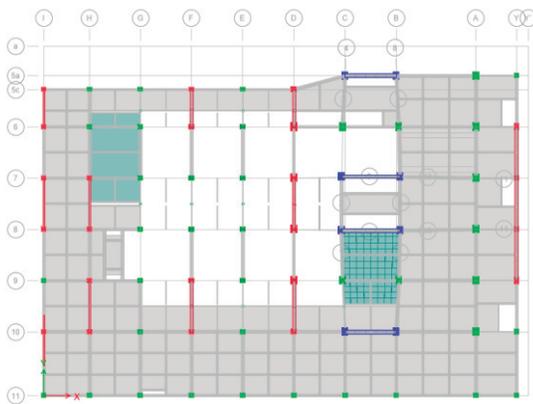


Fig. 8. Estructuración de Podio: en color rojo se muestran las paredes de corte en la dirección Y, en color azul las paredes de corte en la dirección X, en color verde las columnas aisladas. En el hueco central quedan contenidas las rampas

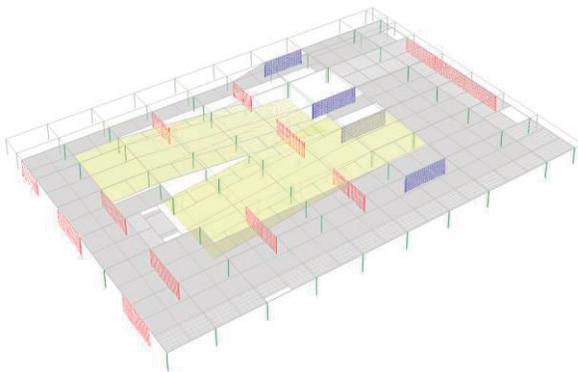


Fig. 9. Estructuración de Podio: en color amarillo se muestran las rampas entre niveles S2 a S3

La torre consta de una combinación de paredes de corte y marcos con detallado especial en la dirección X (lado corto del edificio) y en la dirección Y se utilizan exclusivamente marcos con detallado especial (lado largo), la torre tiene una extensión en planta de 35.8mx54.2m. En la fig. 10 se muestran la tipología de la estructura vertical:

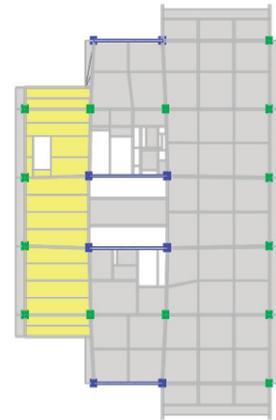


Fig. 10. Estructuración de Torre, en color azul se representan las paredes de corte en la dirección X, mientras que en color verde se muestran las columnas del marco; en color amarillo se muestra el metal-deck utilizado en la zona del Anexo Sur

Las columnas de la torre tienen una dimensión máxima de 1.20mx1.50m con variación en altura hasta 1.00mx1.20m. La resistencia de los concretos empleados para las columnas tiene una variación en altura desde un $f'c$ 630 kg/cm^2 hasta $f'c$ 350 kg/cm^2 . Las columnas del podio tienen una dimensión de 0.9mx1.0m hasta 1.0mx1.0m empleando concretos desde $f'c$ 350 kg/cm^2 hasta $f'c$ 490 kg/cm^2 . En la fig. 11 se muestra la variación de los concreto en altura de la superestructura.

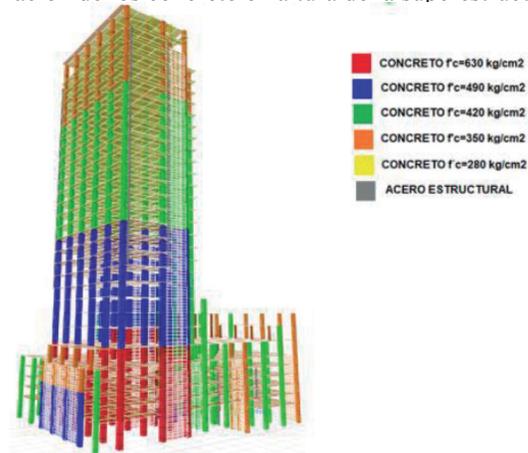


Fig. 11. Variación de las resistencias del concreto en altura para superestructura

Las paredes estructurales de la torre tienen un espesor de 0.70m en la base y se reducen en altura hasta un espesor de 0.30m. Las paredes del podio tienen un espesor de 0.50m, a excepción de la pared sobre el lindero norte con un espesor de 0.70m. La distribución de espesores se muestra en la fig. 12. Los concretos utilizados para las paredes estructurales siguen la misma distribución que para las columnas (ver fig. 11).

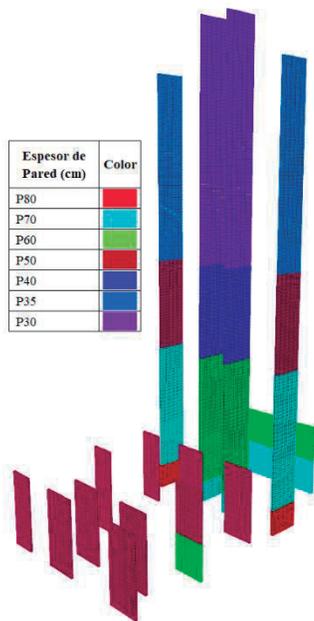


Fig. 12. Variación de espesores de paredes estructurales

2. Subestructura

La fundación está compuesta por una cimentación profunda a base de pilotes y cabezales entrelazados con vigas de fundación. Para el diseño de la fundación se realizó un modelo matemático con las propiedades geométricas de los pilotes y cabezales de acuerdo con los estudios geotécnicos, aplicando los resortes con base a funciones de impedancia que corresponden a los parámetros de rigidez del suelo. Estos resortes fueron aplicados tanto a la punta de los pilotes, fuste y vigas de fundación.

En la fig. 13, se muestra la tipología de los cabezales y pilotes que componen el ensamblaje de la fundación.

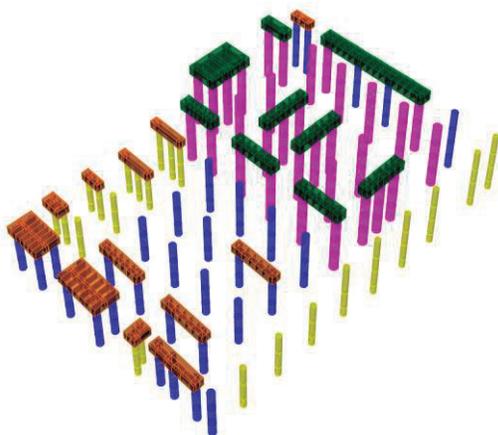


Fig. 13. En color naranja se muestran los cabezales de espesor de 2.0m; en color verde los cabezales de espesor de 2.5m. Las pilas de color amarillo tienen un diámetro de 1.2m, las de color azul de 1.5m y las de color fucsia de 2.0m

Los diámetros de los pilotes se definieron con base en las capacidades geotécnicas y los niveles de compresión requeridos. La capacidad geotécnica a compresión de los pilotes, estableciendo un asentamiento admisible de 20mm, para diámetros de 1.20m, 1.50m y 2.00m es del orden de 2000tonf, 2700tonf y 4000tonf respectivamente. Los pilotes de 2.0m de diámetro tienen una longitud de 18.0m, las pilas de 1.50m tienen una longitud de hasta 15.0m mientras que los pilotes de 1.20m de diámetro tienen una longitud de hasta 16.0m. Todos los pilotes y columnas se conectan mediante vigas de fundación y cabezales con peraltes que varían de 2.0m hasta 2.50m (los mayores peraltes se utilizan bajo la sombra de la torre). La cuantía longitudinal máxima utilizada para las pilas de 2.0m fue de 3.3 %, mientras que la cuantía máxima utilizada para las pilas de 1.20m fue de 2.17 %.

En la fig. 14, se muestra la tipología de las vigas de fundación del sistema de cimentación. Se emplean 4 tipos de vigas de fundación las cuales varían de 1.0mx1.3m hasta 1.5mx1.5m, donde las vigas de mayor peralte se emplean bajo la sombra de la torre.

La resistencia del concreto utilizado para la mayoría de la fundación es de $f'c$ 315 kg/cm² con la excepción de la fundación bajo la sombra de la torre donde se empleó concreto $f'c$ 400 kg/cm².

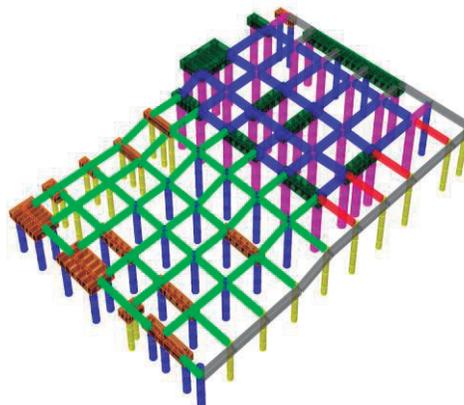


Fig. 14. En gris se muestran las vigas de 1.3mx1.3m, en verde vigas de 1.0x1.30, en azul vigas de 1.5mx1.5m y en rojo vigas de 1.0mx1.40m

3. Retos en la estructuración del edificio

3.1. ¿Por qué se aplicó Sistema Dual en una dirección y en la otra Marco Especial en nivel de torre del edificio?

La estructuración es el resultado de múltiples ensayos de modelos de cálculo que incluyeron requisitos de Arquitectura; entre ellos, que el edificio tuviera las fachadas lo más limpias posibles, flexibilidad del sector de entrepiso del anexo sur (representa el 20 % del área total de entrepiso de los niveles de la torre), respetar circulación de parques en niveles de sótanos, por mencionar los más relevantes; que dieron como resultado que los modos de vibrar del edificio, mostraban un comportamiento sano y eficiente aplicando un

Sistema Dual en la dirección corta en planta del edificio y de Marcos en la dirección larga.

3.2. Efectos de empujes de suelo aplicados de forma asimétrica a nivel de podio del edificio

En niveles de sótanos el edificio se ve sometido a servir de soporte de un porcentaje de las fuerzas de empujes de suelos de alturas considerables (altura promedio= 20m) aplicados en forma asimétrica en planta al edificio (solo en dos lados), estas fuerzas sumadas a las sísmicas generaron magnitudes de desplazamientos laterales y efectos de torsión del edificio que fue necesario aplicar muros estructurales en ambas direcciones del edificio a nivel de podio a diferencia de la torre para poder controlar ambos efectos.

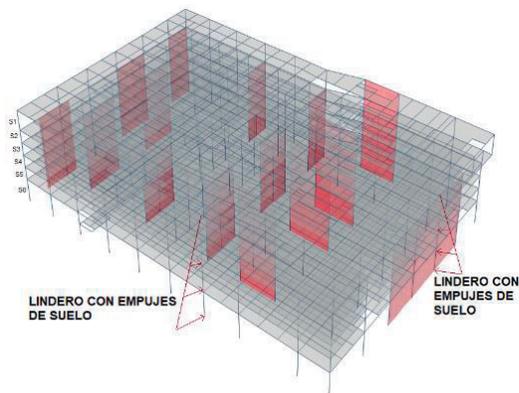


Fig. 15. Linderos con aplicación de empujes de suelo al edificio, en color rojo definición de paredes estructurales en nivel de podio de edificio

3.3 Desplazamiento lateral del edificio por carga gravitacional

La torre del edificio en planta es bastante simétrica geoméricamente, exceptuando que en la dirección corta del edificio que presenta tres claros con dimensiones y proporciones diferentes que generan que la masa del entrepiso esta desplazada hacia un eje lateral, esto genera el efecto que el edificio solo por cargas gravitacionales presente un desplazamiento lateral en esta dirección de magnitud importante que debemos considerar y aporta en la revisión de derivas del edificio.

Tabla 1. Comparativa de magnitudes de derivas elásticas por carga gravitacional en la dirección corta del edificio tanto por cargas gravitacionales y sísmicas para los niveles 22 y 21 del edificio (cm).

3.4. Aplicación de concretos de alta resistencia

Con base en demandas de resistencia del edificio fue necesario la aplicación de concretos con resistencias en el rango de 280kg/cm² hasta 630kg/cm² en todos los diferentes elementos estructurales (columnas, paredes estructurales, vigas, losas y fundaciones) y considerando todos los requisitos de diseño y detallado especial establecidos en el ACI318-14 para la aplicación de concretos de alta resistencia, como: en columnas revisión de límites de carga axial máxima y mínima (compresión y tensión) para calcular capacidad a flexión de estas, cortante plástico y de confinamientos en columnas, como para mencionar algunos requisitos del código evaluados.

3.5. Análisis de acortamiento por flujo plástico y contracción de columnas y muros [9]

Sobre la base de la caracterización geométrica y de materiales presentes en la edificación, se realizó un estudio de acortamiento por flujo plástico y contracción del concreto en columnas y muros. Al evaluar para los puntos más críticos correspondientes a dos columnas pertenecientes a la torre para las cuales se proyecta las deformaciones relativas más críticas, se determinó tal como se esperaba que; los efectos se agudizan en los niveles superiores de la torre en los cuales se tuvieron excedencias del orden del 11 %, las cuales fueron controladas aumentando en 10 mm la cota de colado de la columnas de los ejes A y B que no están conectadas a muros estructurales, en los niveles sobre la losa del N21.

III. CONCLUSIONES

En nuestro país cada vez se desarrollan proyectos que requieren de una mayor preparación y dominio de los conocimientos y herramientas que engloban el arte del diseño estructural. Por lo que las deficiencias presentes en nuestra normativa de diseño generadas por la desactualización de la misma resulta cada vez más evidente y representan un reto en cuanto a la implementación e incorporación de nuevos sistema y técnicas de diseño.

REFERENCIAS

- [1] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10). American Society of Civil Engineers, 2010.
- [2] Ministerio de Obras Públicas de El Salvador. Norma Técnica de Diseño por Sismo de El Salvador. San Salvador: MOP, 1994.
- [3] American Concrete Institute (ACI). ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI, 2014.
- [4] American Institute of Steel Construction (AISC). AISC 360-10: Specification for Structural Steel Buildings. AISC, 2010.
- [5] American Institute of Steel Construction (AISC). AISC 341-10: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. AISC, 2010.
- [6] International Code Council (ICC). International Building Code (IBC) 2012. ICC, 2012.
- [7] American Concrete Institute (ACI). ACI 350-06: Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary. ACI, 2006.
- [8] American Welding Society. Structural Welding Code - Steel, AWS D1.1/D1.1M. AWS, 2010.
- [9] Fintel, M., Gosh, S.K and Iyengar, H., "Column shortening in tall structures". Portland Cement Association, 1987.
- [10] Estructuristas Consultores, "Memoria de cálculo modulo II, Proyecto Millenium Plaza". Estructuristas Consultores S.A. de C.V., 2019.
- [11] Estructuristas Consultores, "Reporte de cálculo de cimentaciones profundas de modulo 2, Proyecto Millenium Plaza". Estructuristas Consultores S.A. de C.V., 2018.