

LECCIONES EN LA CONCEPTUALIZACION ESTRUCTURAL DE TORRE MILLENNIUM DE EL SALVADOR

Edwin Portillo; Gilma Diaz; Mauricio Rauda; Edwin Ventura

Estructuristas Consultores (El Salvador), edwin_portillo@ec.com.sv

Palabras clave: Diseño sismorresistente, Edificios Altos, Estructuración.

RESUMEN

La Torre Corporativa Millennium, es desde su construcción hasta la fecha el edificio más alto de El Salvador, se encuentra ubicado a los pies del Volcán de San Salvador, en la zona de mayor actividad sísmica del país y una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica en la región. Torre Millennium es un edificio con estructura de marcos y paredes de corte de concreto armado de 33 niveles con 139m de altura. El diseño de un edificio alto centra sus primeros esfuerzos en lograr eficientemente el control de desplazamientos laterales. En este artículo se presentan las lecciones obtenidas en la conceptualización estructural. Una de estas lecciones nos muestra que la introducción de un sistema dual, con más paredes de corte, y su consecuente alta rigidez lateral, no necesariamente resulta más efectivo que el disminuir la rigidez y usar marcos especiales (sin paredes de corte) para el control de los desplazamientos en los pisos altos.

ABSTRACT

Since its completion, the Millennium Corporate Tower has been the tallest building in El Salvador, located at the foot of the San Salvador Volcano in one of the country's most seismically active and hazard-prone areas of the region.

The building is a 33-story, 139-meter-tall reinforced concrete structure utilizing a combination of frames and shear walls. In the design of high-rise structures, the control of lateral displacements is a primary objective from the earliest stages. This study presents insights from the structural conceptualization process, highlighting that increased lateral stiffness through a dual system with additional shear walls does not necessarily yield improved performance. In contrast, systems with lower stiffness, based on special moment-resisting frames without shear walls, may achieve more efficient control of upper-level displacements.

1. INTRODUCCION

El presente documento describe la metodología y el procedimiento empleado para la estructuración sismorresistente, así como el resultado del diseño de los componentes estructurales claves para mantener la integridad estructural del edificio Torre Millennium, aun en el caso de terremotos extremos. Se hace una breve referencia a las normativas de la práctica de diseño sísmico, estudios de sitio y criterios usados para la definición de cargas sísmicas usuales en la ciudad de San Salvador, ubicada en una zona típica centroamericana, que recibe la influencia de sistemas de fallas corticales, actividad volcánica y la interacción de frontera de placas tectónicas.

Dado que el diseño de edificios altos está controlado principalmente por su comportamiento ante cargas laterales, el primer gran reto que se plantea consiste en la óptima definición del sistema estructural para el control de las derivas laterales. En este contexto, el proceso de diseño en edificios altos sigue etapas secuenciales, dentro de las cuales, cada una de ellas debe ir fijando un nivel de detalle progresivamente mayor sobre la solución que se ha planteado a nivel conceptual en las etapas iniciales del diseño estructural.

Como sucede en los diseños de ingeniería, la gran batalla “se gana o se pierde” en las primeras grandes decisiones conceptuales. Entendiéndose que un diseño exitoso requiere de un diseño conceptual exitoso. La importancia de cuidar la etapa de diseño conceptual es decisiva. Muchos casos de fallas en ingeniería nos descubren esta verdad con amargura luego de notar que conceptos fundamentales no fueron debidamente considerados, o fueron simplemente pasados por alto en la etapa de conceptualización. El Rol activo del Ingeniero Estructural es imprescindible en la etapa de conceptualización del edificio, lastimosamente en muchos proyectos, ese rol lo asume únicamente el diseñador funcional o el responsable comercial, quedando relegada la función estructural a las etapas de justificación del diseño funcional.

Para fines de este artículo, se pueden identificar 4 etapas durante el diseño: siendo la Etapa 1 la que corresponde al gran plan maestro y modelo del negocio; en la cual los usos, las preferencias y restricciones funcionales globales son discutidas y plasmadas en un anteproyecto arquitectónico. La Etapa 2, es precisamente la que consideramos en este trabajo y corresponde a etapa donde se realizan estudios de sitio, se tiene a mano la ubicación exacta del edificio y se requiere una solución sana y eficiente para la estructura. La Etapa 3, corresponde al desarrollo de la ingeniería de detalle de todas las disciplinas, incluyendo la realización de estudios complementarios especializados, que consolidan la propuesta global y conducen al detalle constructivo a nivel local en los diferentes sistemas y disciplinas. La Etapa 4, no menos importante, es la conclusión del proceso de gabinete mediante la generación de la documentación para licitación y construcción, incluyendo la delicada tarea de detallados especiales, modelos geométricos finales (BIM), planos constructivos, listas de despieces, presupuesto o cantidades de obra y especificaciones técnicas. El presente artículo se centra en describir aspectos claves relacionados con las Etapa 2 y algunos aspectos claves para la consecución de un diseño seguro que se desarrollan en la Etapa 3.

2. ASPECTOS GENERALES

2.1 Descripción Funcional del Edificio

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 son para uso de oficinas corporativas; la altura total de la edificación es de 139 m. La huella total en planta del edificio en los niveles de sótano y plaza es aproximadamente rectangular, con dimensiones de 81x 56m, reduciéndose en los niveles de torre a dimensiones de 35 x 49 m. Sumando un área total de construcción aproximada de 68,000 m².



Figura 1. Vistas de edificio, Torre Millennium

2.2 Normativas Bases de diseño

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]
- Reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones de la República de El Salvador. Normas Técnicas para Diseño por Sismo. 1997 [2]
- 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.
- International Building Code IBC-2012. [5]
- Diseño Estructural del Edificio más Alto de El Salvador, XI Congreso de Ingeniería y Arquitectura, UCA 2023.

2.3 Estudios de sitio

2.3.1 Estudios geotécnicos y geofísicos

Con la finalidad de obtener la caracterización del suelo se realizaron 5 ensayos rotativos de hasta 55m de profundidad (aproximadamente 30m por debajo del nivel de cimentación), pruebas de fondo de penetración estándar y líneas de Geofísica de refracción sísmica, Remi y MASW.

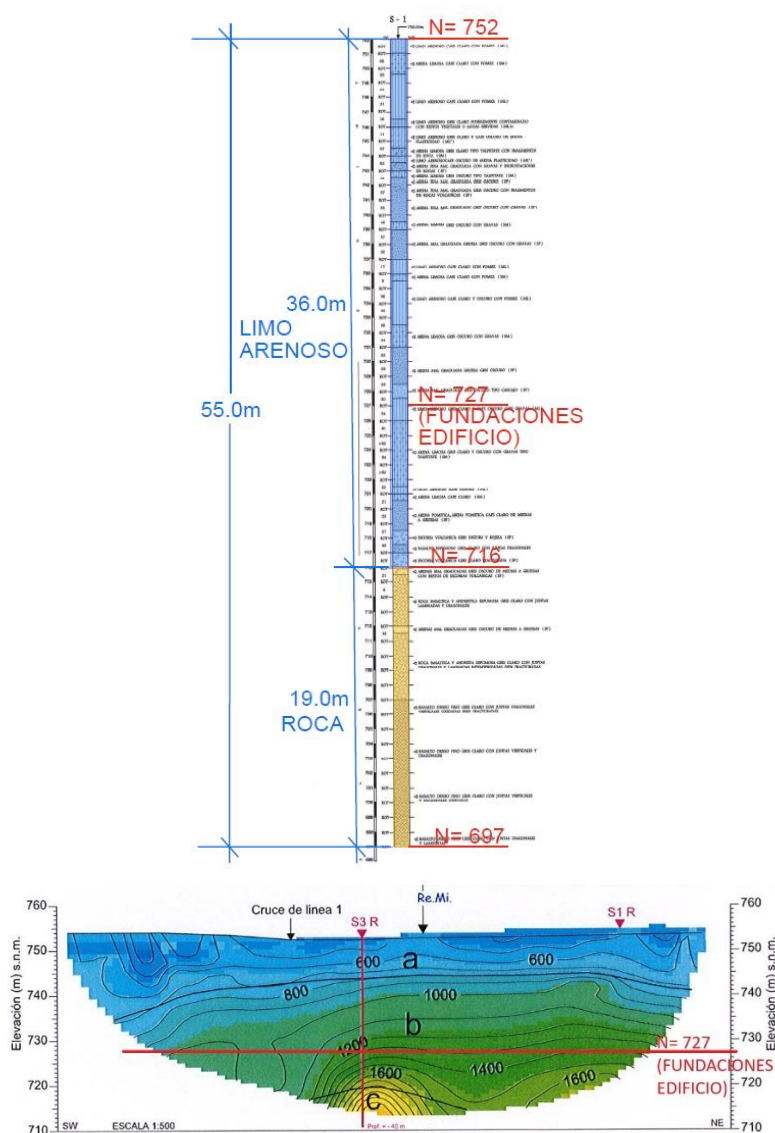


Figura 2. Resultados de ensayos. Arriba: Barra estratigráfica de sondeo rotativo. Abajo: perfil de refracción sísmica.

De estas campañas geotécnicas se obtuvo como conclusión que el tipo de fundación del edificio era de cimentaciones profundas, con capacidades geotécnicas nominales para pilotes de diámetros de 0.80, 1.20, 1.50 y 2.00m empotrados en la roca entre 1 y 2 diámetros y tomando en cuenta asentamientos entre 15 y 25mm. Las capacidades geotécnicas nominales para pilotes de $\Phi=0.80\text{m}$ son entre 900 y 1460 ton, para pilotes de $\Phi=1.20\text{m}$ son entre 1520 y 2390 ton, para pilotes de $\Phi=1.50\text{m}$ son entre 2060 y 3180 ton, para pilotes de $\Phi=2.00\text{m}$ son entre 3100 y 4660 ton, como se presenta en la siguiente tabla

	DIAMETRO	LONGITUD	RESISTENCIA	ASENTAMIENTO (mm)	Resistencia nominal	Resistencia Nominal	Resistencia Nominal	Resistencia Nominal	Resistencia factorizada	Resistencia factorizada
	(m)	(m)	TOTAL Ton		(Ton) para s= 15mm	(Ton) para s= 20 mm	(Ton) para s= 25mm	(Ton) para s= 4% de diametro	para carga sísmica con $\varphi=1.00$ (LRFD) (Ton)	para carga gravitacional con $\varphi=0.55$ (LRFD) (Ton)
BASALTO ESPUMOSO	0.8	1.2	3406	71	900	1125	1360	1660	1660	913
	0.8	1.6	3626	71	980	1210	1460	1775	1775	976
	1.2	1.8	7706	107	1520	1860	2210	3730	3730	2052
	1.2	2.4	8220	108	1660	2015	2390	3990	3990	2195
	1.5	2.25	12089	135	2060	2480	2930	5830	5830	3207
	1.5	3	12916	136	2270	2710	3180	6240	6240	3432
	2	3	21633	181	3100	3670	4260	10360	10360	5698
	2	4	23169	182	3400	4030	4660	11085	11085	6097
BASALTO DENSO	1.5	1	36757	228	3970	4750	5570	10900	10900	5995
	2	1	61786	301	5430	6410	7460	18220	18220	10021

2.3.2 Análisis de Respuesta de Sitio

Para la evaluación sísmica de la Torre Corporativa Millennium, se realizó un análisis de respuesta de sitio, siguiendo los procedimientos establecidos en ASCE7-10, 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 sismogénicas que afectan al sitio de interés, siguiendo procedimientos deterministas estándar.

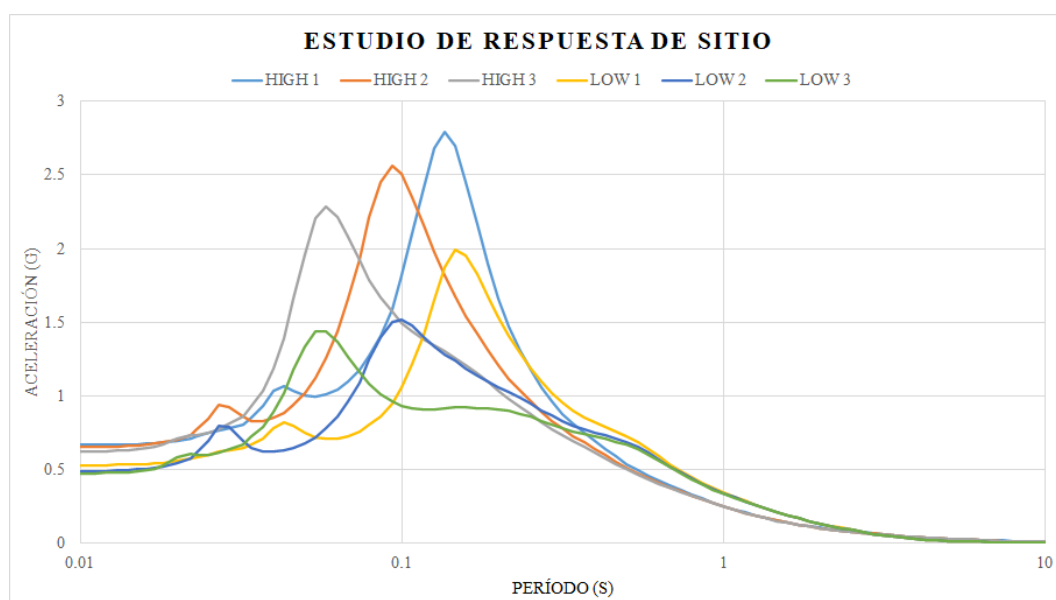


Figura 4. Espectros de respuesta a nivel de fundación (Análisis de Respuesta de Sitio realizado por otros)

Con 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 figura, 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. [1]

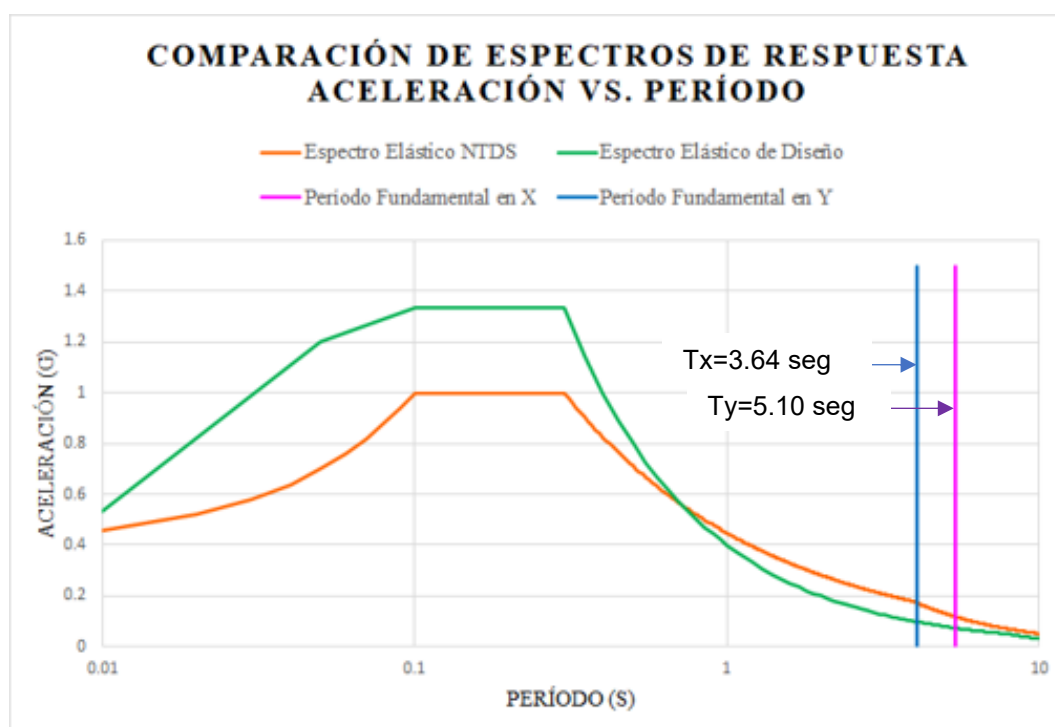


Figura 5. Espectros de Respuesta Elástico; Definido según ASCE7-10 representado de color verde y Espectro de Respuesta Elástico definido según NTDS representado de color anaranjado y línea punteada.

De la figura 5 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. CONCEPTUALIZACION ESTRUCTURAL

El procedimiento de diseño estructural se puede definir en los siguientes pasos:

- I. **Definición Arquitectónica**
- II. **Conceptualización del sistema estructural**
- III. **Ingeniería de detalle**
- IV. **Documentación**

A continuación, profundizamos en la conceptualización estructural de la torre Millennium Plaza. Partiendo del anteproyecto de arquitectura se desarrolló el modelo estructural base, incluyendo la asignación de secciones preliminares, cargas y propiedades de materiales y de agrietamiento en los elementos, conforme a la normativa vigente de El Salvador. Sobre este modelo se ejecutaron de manera secuencial dos tipos de análisis cada uno con sus modelos correspondientes:

- Análisis bajo condiciones de servicio, para el control de desplazamientos

Organiza:

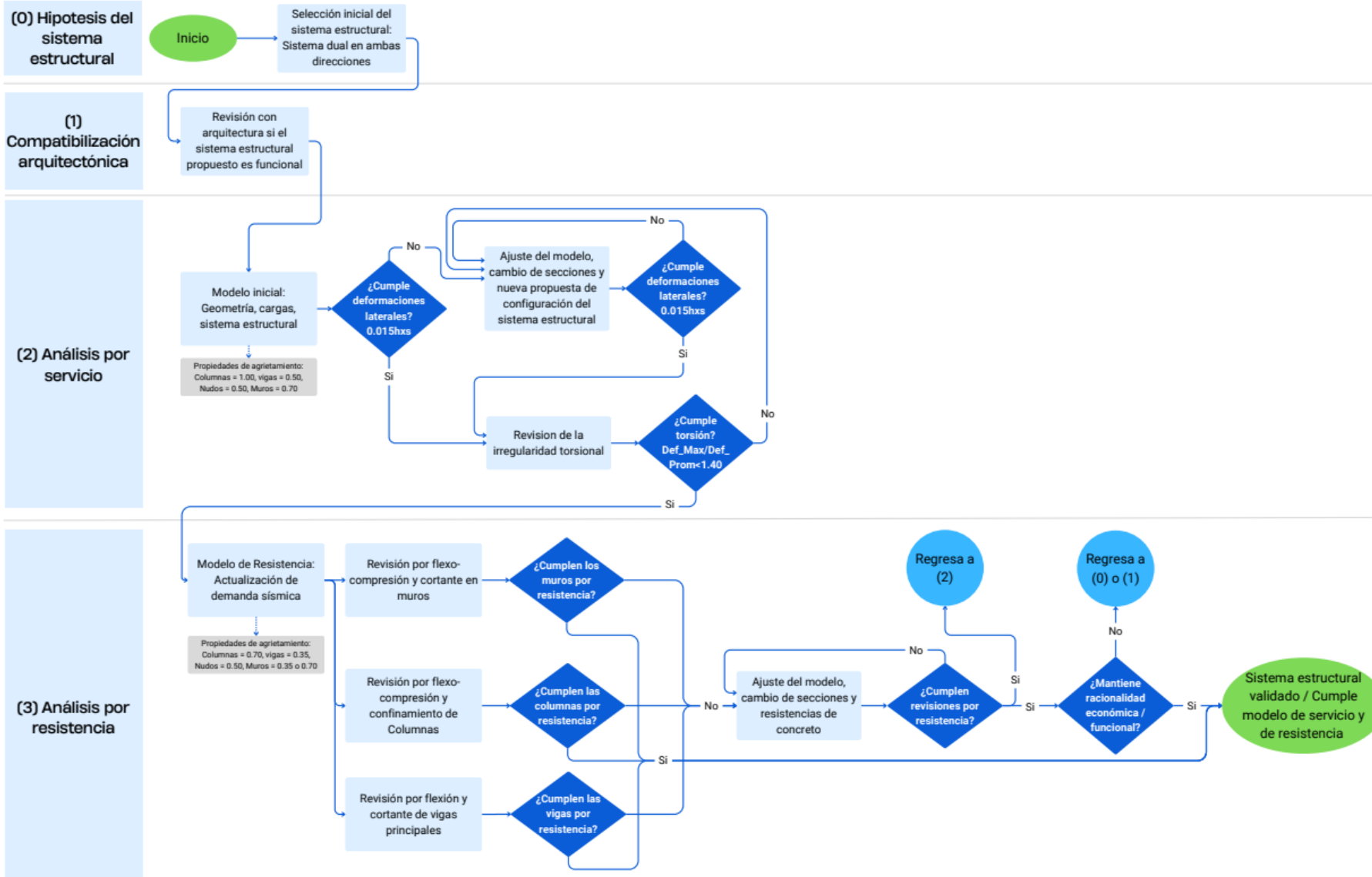
laterales y

- Análisis por resistencia, mediante la cual una vez alcanzada una solución satisfactoria de servicio permitía la validación de dimensiones/secciones y materiales propuestos para los elementos estructurales.

El equipo de diseño partía que la solución se centraría en un sistema de paredes de corte combinado con marcos especiales (sistema dual) aplicado para ambas direcciones. Con el fin de evaluar distintas configuraciones de estructuración se iniciaron las pruebas buscando determinar la disposición óptima en planta de los elementos verticales. Los criterios observados en esta etapa se resumen al cumplimiento de derivas y aspectos torsionales; adicionalmente otras restricciones arquitectónicas funcionales condicionaban la ubicación y dimensión en planta de los elementos sismorresistentes (circulaciones vehiculares, disponibilidad de estacionamientos, restricciones en fachadas, etc).

Para la conceptualización estructural de la torre Millenium se adoptó según el siguiente flujograma:

ETAPA 2: CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL



Organiza:

Las iteraciones realizadas fueron las siguientes:

1. Iteración 1 – Modelo base: estructuración con paredes de corte únicamente en el núcleo del edificio y distribución de columnas para formar marcos en el resto de la torre, inicialmente arquitectura proyectaba 25 niveles para el edificio.

Configuración propuesta	Derivas X, Y, valores admisibles (cm)				
	NIVEL	Desp. amplificado Dir. X (cm)	Desp. amplificado Dir. Y (cm)	Desp. admisible (cm)	H de entrepiso (m)
	AZOTEA	8.64	2.74	6.8	4.5
	NIVEL 19	8.85	3.06	6.8	4.5
	NIVEL 18	9.00	3.43	6.8	4.5
	NIVEL 17	9.14	3.85	6.8	4.5
	NIVEL 16	9.27	4.28	6.8	4.5
	NIVEL 15	9.35	4.65	6.8	4.5
	NIVEL 14	9.42	5.02	6.8	4.5
	NIVEL 13	9.45	5.37	6.8	4.5
	NIVEL 12	9.43	5.69	6.8	4.5
	NIVEL 11	9.35	5.99	6.8	4.5
	NIVEL 10	9.21	6.25	6.8	4.5
	NIVEL 9	8.99	6.46	6.8	4.5
	NIVEL 8	8.66	6.56	6.8	4.5
	NIVEL 7	8.29	6.64	6.8	4.5
	NIVEL 6	7.85	6.66	6.8	4.5
	NIVEL 5	7.24	6.59	6.8	4.5
	NIVEL 4	6.50	6.32	6.8	4.5
	NIVEL 3	5.86	6.02	6.8	4.5
	NIVEL 2	5.17	5.61	6.8	4.5
	NIVEL 1	5.21	5.91	8.3	5.5
	PB	2.81	3.10	6.8	4.5
	S1	0.53	0.47	5.3	3.5
	S2	0.28	0.23	5.3	3.5
	S3	0.09	0.09	5.3	3.5

2. Iteración 2 – Incorporación de muros en esquinas: se agregaron dos paredes en forma de "L" en dos esquinas del edificio, con el fin de evaluar su efecto en el comportamiento global de la estructura.

Configuración propuesta

The diagram illustrates the proposed structural configuration of a building. It features a grid of columns labeled A, B, C, and D from right to left, and beams labeled 1 through 11 from bottom to top. The layout shows a central core with various rooms and corridors. Red lines highlight the placement of new L-shaped walls at the corners of the building. A coordinate system is indicated at the bottom left, with a green arrow pointing up for the Y-axis and a red arrow pointing right for the X-axis.

Derivas X, Y, valores admisibles (cm)

NIVEL	Desp. amplificado Dir. X (cm)	Desp. amplificado Dir. Y (cm)	Desp. admisible (cm)	H de entrepiso (m)
AZOTEA	6.37	2.71	6.8	4.5
NIVEL 19	6.50	2.92	6.8	4.5
NIVEL 18	6.59	3.17	6.8	4.5
NIVEL 17	6.68	3.46	6.8	4.5
NIVEL 16	6.77	3.74	6.8	4.5
NIVEL 15	6.84	4.01	6.8	4.5
NIVEL 14	6.89	4.29	6.8	4.5
NIVEL 13	6.91	4.54	6.8	4.5
NIVEL 12	6.89	4.78	6.8	4.5
NIVEL 11	6.82	4.95	6.8	4.5
NIVEL 10	6.71	5.11	6.8	4.5
NIVEL 9	6.56	5.24	6.8	4.5
NIVEL 8	6.35	5.33	6.8	4.5
NIVEL 7	6.08	5.37	6.8	4.5
NIVEL 6	5.74	5.34	6.8	4.5
NIVEL 5	5.30	5.22	6.8	4.5
NIVEL 4	4.78	4.95	6.8	4.5
NIVEL 3	4.25	4.64	6.8	4.5
NIVEL 2	3.69	4.25	6.8	4.5
NIVEL 1	3.66	4.41	8.3	5.5
PB	2.05	2.42	6.8	4.5
S1	0.43	0.50	5.3	3.5
S2	0.23	0.26	5.3	3.5
S3	0.07	0.10	5.3	3.5

3. Iteración 3 – Reubicación a lado corto: se retiraron las paredes en "L" y se incorporaron dos paredes adicionales en la dirección corta del edificio, configuración que, si bien permitía observar tendencias favorables en el comportamiento estructural, comprometía la circulación vehicular en los sótanos.

Configuración propuesta

Diagrama de planta del edificio que muestra la configuración propuesta de las paredes. El edificio está dividido en una zona central y una zona lateral. Las paredes se representan por líneas grises. Las zonas de reubicación de paredes están resaltadas en rojo. Se indican ejes de coordenadas (A, B, C, D) y niveles (11, 10, 9, 8, 7, 6, 5c, 5a). Se muestran flechas verdes para la dirección Y y roja para la dirección X.

Derivas X, Y, valores admisibles (cm)

NIVEL	Desp. amplificado Dir. X (cm)	Desp. amplificado Dir. Y (cm)	Desp. admisible (cm)	H de entrepiso (m)
AZOTEA	6.04	2.44	6.8	4.5
NIVEL 19	6.18	2.77	6.8	4.5
NIVEL 18	6.28	3.17	6.8	4.5
NIVEL 17	6.38	3.60	6.8	4.5
NIVEL 16	6.46	4.02	6.8	4.5
NIVEL 15	6.52	4.41	6.8	4.5
NIVEL 14	6.56	4.80	6.8	4.5
NIVEL 13	6.58	5.17	6.8	4.5
NIVEL 12	6.57	5.51	6.8	4.5
NIVEL 11	6.49	5.78	6.8	4.5
NIVEL 10	6.38	6.03	6.8	4.5
NIVEL 9	6.23	6.25	6.8	4.5
NIVEL 8	6.02	6.42	6.8	4.5
NIVEL 7	5.76	6.54	6.8	4.5
NIVEL 6	5.43	6.58	6.8	4.5
NIVEL 5	5.01	6.50	6.8	4.5
NIVEL 4	4.49	6.29	6.8	4.5
NIVEL 3	3.95	6.00	6.8	4.5
NIVEL 2	3.36	5.61	6.8	4.5
NIVEL 1	3.40	6.12	8.3	5.5
PB	2.26	3.99	6.8	4.5
S1	2.20	0.61	5.3	3.5
S2	0.24	0.48	5.3	3.5
S3	0.07	0.40	5.3	3.5

4. Iteración 4 – Paredes paralelas al núcleo: se reubicaron dichas paredes en posición paralela al núcleo, alternativa que Arquitectura validó como la más adecuada, priorizando la conservación de la circulación vehicular sobre la pérdida de algunos espacios de estacionamiento.

Configuración propuesta	Derivas X, Y, valores admisibles (cm)																																																																																																																													
	<table><tr><th>NIVEL</th><th>Desp. amplificado Dir. X (cm)</th><th>Desp. amplificado Dir. Y (cm)</th><th>Desp. admisible (cm)</th><th>H de entrepiso (m)</th></tr><tr><td>AZOTEA</td><td>4.6</td><td>2.5</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 19</td><td>4.6</td><td>2.8</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 18</td><td>4.7</td><td>3.2</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 17</td><td>4.8</td><td>3.7</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 16</td><td>4.8</td><td>4.0</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 15</td><td>4.8</td><td>4.3</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 14</td><td>4.9</td><td>4.7</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 13</td><td>4.9</td><td>5.1</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 12</td><td>4.8</td><td>5.4</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 11</td><td>4.8</td><td>5.6</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 10</td><td>4.7</td><td>5.9</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 9</td><td>4.5</td><td>6.1</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 8</td><td>4.4</td><td>6.3</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 7</td><td>4.2</td><td>6.4</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 6</td><td>3.9</td><td>6.3</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 5</td><td>3.6</td><td>6.2</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 4</td><td>3.2</td><td>5.8</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 3</td><td>2.8</td><td>5.3</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 2</td><td>2.4</td><td>4.7</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>NIVEL 1</td><td>2.4</td><td>4.9</td><td>8.3</td><td>5.5</td></tr><tr><td>PB</td><td>1.6</td><td>3.1</td><td>6.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>S1</td><td>0.4</td><td>0.4</td><td>5.3</td><td>3.5</td></tr><tr><td>S2</td><td>0.3</td><td>0.2</td><td>5.3</td><td>3.5</td></tr><tr><td>S3</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>5.3</td><td>3.5</td></tr></table>	NIVEL	Desp. amplificado Dir. X (cm)	Desp. amplificado Dir. Y (cm)	Desp. admisible (cm)	H de entrepiso (m)	AZOTEA	4.6	2.5	6.8	4.5	NIVEL 19	4.6	2.8	6.8	4.5	NIVEL 18	4.7	3.2	6.8	4.5	NIVEL 17	4.8	3.7	6.8	4.5	NIVEL 16	4.8	4.0	6.8	4.5	NIVEL 15	4.8	4.3	6.8	4.5	NIVEL 14	4.9	4.7	6.8	4.5	NIVEL 13	4.9	5.1	6.8	4.5	NIVEL 12	4.8	5.4	6.8	4.5	NIVEL 11	4.8	5.6	6.8	4.5	NIVEL 10	4.7	5.9	6.8	4.5	NIVEL 9	4.5	6.1	6.8	4.5	NIVEL 8	4.4	6.3	6.8	4.5	NIVEL 7	4.2	6.4	6.8	4.5	NIVEL 6	3.9	6.3	6.8	4.5	NIVEL 5	3.6	6.2	6.8	4.5	NIVEL 4	3.2	5.8	6.8	4.5	NIVEL 3	2.8	5.3	6.8	4.5	NIVEL 2	2.4	4.7	6.8	4.5	NIVEL 1	2.4	4.9	8.3	5.5	PB	1.6	3.1	6.8	4.5	S1	0.4	0.4	5.3	3.5	S2	0.3	0.2	5.3	3.5	S3	0.1	0.2	5.3	3.5
NIVEL	Desp. amplificado Dir. X (cm)	Desp. amplificado Dir. Y (cm)	Desp. admisible (cm)	H de entrepiso (m)																																																																																																																										
AZOTEA	4.6	2.5	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 19	4.6	2.8	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 18	4.7	3.2	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 17	4.8	3.7	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 16	4.8	4.0	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 15	4.8	4.3	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 14	4.9	4.7	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 13	4.9	5.1	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 12	4.8	5.4	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 11	4.8	5.6	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 10	4.7	5.9	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 9	4.5	6.1	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 8	4.4	6.3	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 7	4.2	6.4	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 6	3.9	6.3	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 5	3.6	6.2	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 4	3.2	5.8	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 3	2.8	5.3	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 2	2.4	4.7	6.8	4.5																																																																																																																										
NIVEL 1	2.4	4.9	8.3	5.5																																																																																																																										
PB	1.6	3.1	6.8	4.5																																																																																																																										
S1	0.4	0.4	5.3	3.5																																																																																																																										
S2	0.3	0.2	5.3	3.5																																																																																																																										
S3	0.1	0.2	5.3	3.5																																																																																																																										

Habiendo controlado los desplazamientos laterales para el edificio en ambas direcciones en la alternativa 4, se procedió a revisar la resistencia de los elementos estructurales que forman el sistema sismoresistente del edificio como: muros, columnas y vigas.

Para esta etapa de diseño se modificó el modelo de análisis asignándole a las secciones de concreto reforzado sus propiedades agrietadas y reduciendo la zona de los nudos. Los valores usados fueron:

- Rigidez de nudos = $0.75 \times$ ancho de columna
- Secciones agrietadas, estas se obtuvieron de multiplicar las secciones gruesas de los elementos de concreto por los siguientes factores:

Elemento	Inercia Mayor	Inercia Menor	Rigidez Torcional
Viga con losa ambos lados	0.70	1.00	0.20
Viga con losa un solo lado	0.50	1.00	0.20
Viga sin losa o de confinamiento de muro	0.35	1.00	0.20
Columna	0.70	0.70	1.00
Pared	0.35	0.10	1.00

Al revisar los elementos por demandas de resistencia todos cumplían satisfactoriamente exceptuando las vigas de acople ubicadas en el núcleo del edificio que no se lograba hacer cumplir demandas de cortante.

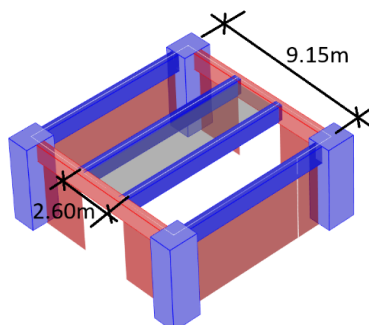


Figura 6. Vista de núcleo de paredes estructurales formado en el edificio donde muestra longitud de viga de acople.

Al tratar de hacer cumplir estas vigas se realizaron bastantes iteraciones con incrementos de dimensiones de estas, obteniéndose el siguiente comportamiento de cortante mostrado en la siguiente tabla:

Revisión de cortante en vigas de acople

Corrida	Dimension Viga(cm)	Cortante Actuante (Ton)	Cortante resistente (Ton)	Estatus	Relacion
1	V40x90	156	127	FALLA	1.23
2	V60x100	251	190	FALLA	1.32
3	V80x120	377	254	FALLA	1.48

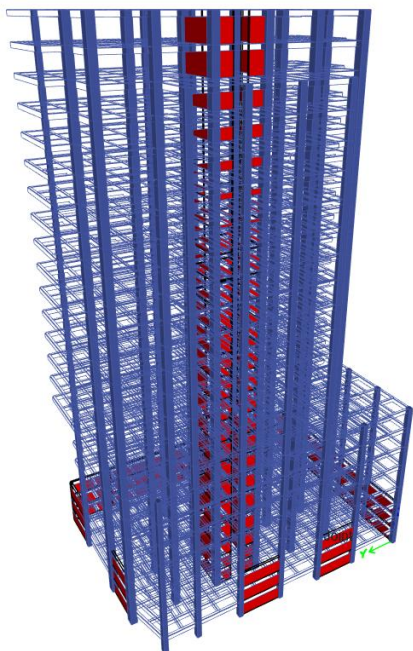
Como puede observarse en el cuadro anterior, aunque se le proporcione mayor dimensión a la viga esta continúa fallando por cortante ya que el incremento de demandas por cortante es proporcionalmente superior al incremento de sus dimensiones.

5. Iteración 5 – Se quitaron los tramos cortos de paredes del núcleo en dirección “Y” debido a cortantes excesivos en estos tramos y en la viga de acople, en esta etapa de diseño arquitectura ya había definido 31 niveles para la torre, es decir, 6 niveles más a los proyectados al inicio del proceso de prediseño.

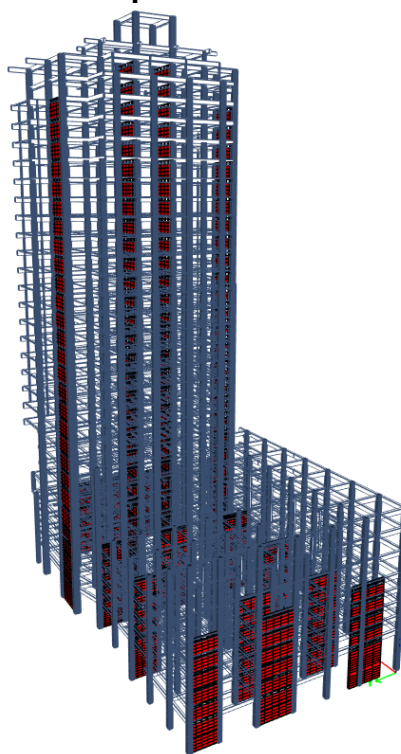
Configuración propuesta	Derivas X, Y, valores admisibles (cm)				
	NIVEL	Desp. amplificado Dir. X (cm)	Desp. amplificado Dir. Y (cm)	Desp. admisible (cm)	H de entrepiso (m)
	AZOTEA	4.2	1.7	6.8	4.5
	N24	4.3	1.9	6.8	4.5
	N23	4.1	2.1	6.8	4.5
	N22	4.1	2.3	6.8	4.5
	N21	4.1	2.5	6.8	4.5
	N20	4.1	2.7	6.8	4.5
	N19	4.1	3.0	6.8	4.5
	N18	4.0	3.2	6.8	4.5
	N17	4.0	3.4	6.8	4.5
	N16	4.0	3.6	6.8	4.5
	N15	4.0	3.9	6.8	4.5
	N14	3.9	4.1	6.8	4.5
	N13	3.8	4.2	6.8	4.5
	N12	3.8	4.4	6.8	4.5
	N11	3.7	4.5	6.8	4.5
	N10	3.6	4.7	6.8	4.5
	N9	3.5	4.7	6.8	4.5
	N8	3.3	4.8	6.8	4.5
	N7	3.2	4.7	6.8	4.5
	N6	3.0	4.6	6.8	4.5
	N5	2.8	4.2	6.8	4.5
	N4	2.6	3.7	6.8	4.5
	N3	2.3	3.2	6.8	4.5
	N2	2.5	3.1	8.3	5.5
	N1	1.9	1.8	8.1	5.4
	S1	1.0	0.4	5.3	3.5
	S2	0.9	0.3	5.3	3.5
	S3	0.8	0.3	5.3	3.5
	S4	0.6	0.3	5.3	3.5
	S5	0.6	0.2	5.3	3.5

A continuación, se presenta el modelo 3D inicial comparado con el modelo final

Modelo inicial con 25 niveles



**Modelo final con 31 niveles y el podio
parte del cuerpo estructural**



Hallazgo y lección central: “menos puede ser más”

No siempre colocar más muros estructurales es lo más útil para el desempeño sísmico del edificio. A partir de cierto punto, añadir rigidez deja de traducirse en mejor comportamiento, y puede introducir nuevos problemas.

4.0 DISEÑO E INGENIERIA DE DETALLE DEL EDIFICIO

4.1 Revisión de los nudos

Como parte de las revisiones especiales que el Capítulo 18 del ACI318-14, está la revisión de la resistencia del nudo, lo que básicamente se busca con este requisito es básicamente proveer al nudo de la resistencia adecuada bajo las condiciones de plastificación de las vigas que llegan a conectarse a él.

Para la revisión de este requisito se siguió la metodología planteada en el Capítulo 18.8.4 del ACI318-14, esta revisión se realizó para cada nudo perteneciente a la estructura resistente a fuerzas laterales del edificio

A continuación, se presenta el cálculo paso a paso de la revisión de un nudo del nivel 1 del edificio.

Organiza:

		CLIENTE: SIMCO	PÁGINA:	
		PROYECTO: MILLENIUM PLAZA MOD 2	DISEÑO: GZ	
		FECHA:	REVISÓ: FR	

Revisión de la capacidad a Cortante en los Nudos según el ACI 318-2014

Units: MKS

DATOS GENERALES

VIGA A

Claro libre Lb= 925 cm

Ancho b= 60 cm

Peralte h= 80 cm

Peralte efectivo d= 72 cm

Dist. VigaA-borde col xA= 45 cm

concreto f'c= 350 kg/cm2

acero fy= 4200 kg/cm2

Cortante gravitacional Vg= 0 kg

Acero superior AsAs= 0.00 cm2

Acero inferior AsAi= 0.00 cm2

VIGA B

Claro libre Lb= 1238 cm

Ancho b= 50 cm

Peralte h= 100 cm

Peralte efectivo d= 90 cm

Dist. VigaB-borde col xB= 50 cm

concreto f'c= 350 kg/cm2

acero fy= 4200 kg/cm2

Cortante gravitacional Vg= 65.75 kg

Acero superior AsBs= 73.78 cm2

Acero inferior AsBi= 44.27 cm2

VIGA C

Claro libre Lb= 742 cm

Ancho b= 50 cm

Peralte h= 110 cm

Peralte efectivo d= 99 cm

Dist. VigaC-borde col xC= 35 cm

concreto f'c= 350 kg/cm2

acero fy= 4200 kg/cm2

Cortante gravitacional Vg= 44.52 kg

Acero superior AsCs= 56.68 cm2

Acero inferior AsCi= 31.18 cm2

VIGA D

Claro libre Lb= 812 cm

Ancho b= 60 cm

Peralte h= 110 cm

Peralte efectivo d= 99 cm

Dist. VigaD-borde col xD= 30 cm

concreto f'c= 350 kg/cm2

acero fy= 4200 kg/cm2

Cortante gravitacional Vg= 43.62 kg

Acero superior AsDs= 56.68 cm2

Acero inferior AsDi= 31.18 cm2

3D

COLUMNA

Altura libre Lb= 430 cm

Lado AB AB= 150 cm

Lado CD CD= 120 cm

concreto f'c= 630 kg/cm2

tipo de columna: esquina

CÁLCULO DE CORTANTES EN EL NUDO

18.8.8.2.1 ACI 318-14

VIGA A

Zona a compresión S aAs= 0 cm

Zona a compresión I aAI= 0 cm

Momento Max Prob As MprAs= 0 kg-cm

Momento Max Prob Bs MprAi= 0 kg-cm

Tensión TA= 0.00 kg

Compresión CA= 0.00 kg

VIGA B

Zona a compresión S aBs= 26.04 cm

Zona a compresión I aBI= 15.62470588 cm

Momento Max Prob As MprBs= 29817818.1 kg-cm

Momento Max Prob Bs MprBi= 19101847.46 kg-cm

Tensión TB= 387345.00 kg

Compresión CB= 232417.50 kg

VIGA C

Zona a compresión S aCs= 20.00470588 cm

Zona a compresión I aCI= 11.00470588 cm

Momento Max Prob As MprCs= 26483029.84 kg-cm

Momento Max Prob Bs MprCi= 15305097.34 kg-cm

Tensión TC= 297570.00 kg

Compresión CC= 163695.00 kg

VIGA D

Zona a compresión S aDs= 16.67058824 cm

Zona a compresión I aDI= 9.170588235 cm

Momento Max Prob As MprDs= 26979096.53 kg-cm

Momento Max Prob Bs MprDi= 15455215.28 kg-cm

Tensión TD= 297570.00 kg

Compresión CD= 163695.00 kg

CORTANTES PLÁSTICOS EN LA VIGA

MprAs+MprAi= 0 kg-cm

MprCs+MprCi= 41788127.17 kg-cm

Cortante Sísmico A VSA= 0.00 kg

Cortante Sísmico C VSC= 56318.23 kg

Cortante Plástico A VPA= 0.00 kg

Cortante Plástico A VPC= 56362.75 kg

MprBs+MprBi= 48919665.56 kg-cm

MprDs+MprDi= 42434311.81 kg-cm

Cortante Sísmico B VSB= 39515.08 kg

Cortante Sísmico D VSD= 52259.00 kg

Cortante Plástico B VPB= 39580.83 kg

Cortante Plástico D VPD= 52302.62 kg

CORTANTES EN EL NUDO

MprAs+MprBi= 19101847.46 kg-cm

MprCs+MprDi= 41938245.11 kg-cm

VcolA= 49945.81 kg

VcolC= 116484.07 kg

Cortante nudo-AB VjhAB= 182471.69 kg

Cortante nudo-CD VjhCD= 344780.93 kg

MprAi+MprBs= 29817818.1 kg-cm

MprCi+MprDs= 42284193.86 kg-cm

VcolB= 74866.67 kg

VcolD= 117288.60 kg

Cortante nudo-BA VjhBA= 312478.33 kg

Cortante nudo-DC VjhDC= 343976.40 kg

CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A CORTE DEL NUDO

$\phi V_n \geq V_{jn}$

$\phi = 0.85$

$V_n = \gamma \sqrt{f'_c} b_j h_c$

$\gamma = 3.20$

18.8.4.1 ACI 318-14

Ancho efec del nudo

bjAB= 150 cm

bjAC= 120 cm

18.8.4.3 ACI 318-14

Resistencia dir A-B

$\phi V_n AB=$

1228886.25 kg

Resistencia dir C-D

$\phi V_n CD=$

1228886.25 kg

Relación Demanda/Capacidad dir A-B=

0.254

Relación Demanda/Capacidad dir C-D=

0.281

OK!

OK!

$1/3 \leq (h + h_j) \leq (h + 2x)$

4.2 Dimensiones y resistencias de concreto del diseño

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/cm² hasta $f'c$ 350 kg/cm². Las columnas del podio tienen una dimensión de 0.9mx1.0m hasta 1.0mx1.0m empleando concretos desde $f'c$ 350 kg/cm² hasta $f'c$ 490 kg/cm². En la Fig. 7 se muestra la variación de los concreto en altura de la superestructura.

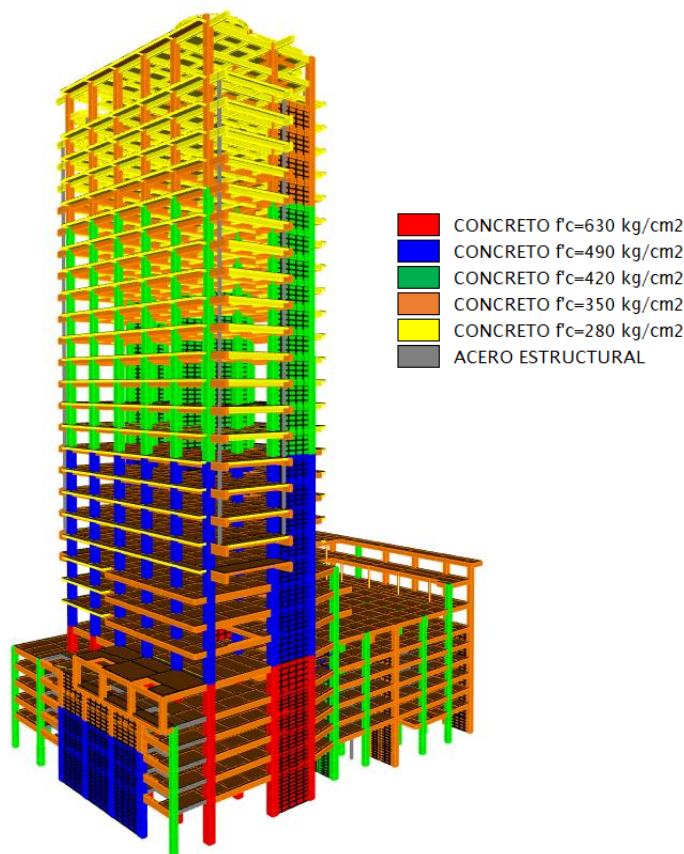


Figura 7. Variación de las resistencias del concreto en altura para superestructura.

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. 8 Los concretos utilizados para las paredes estructurales siguen la misma distribución que para las columnas (ver Fig. 7).

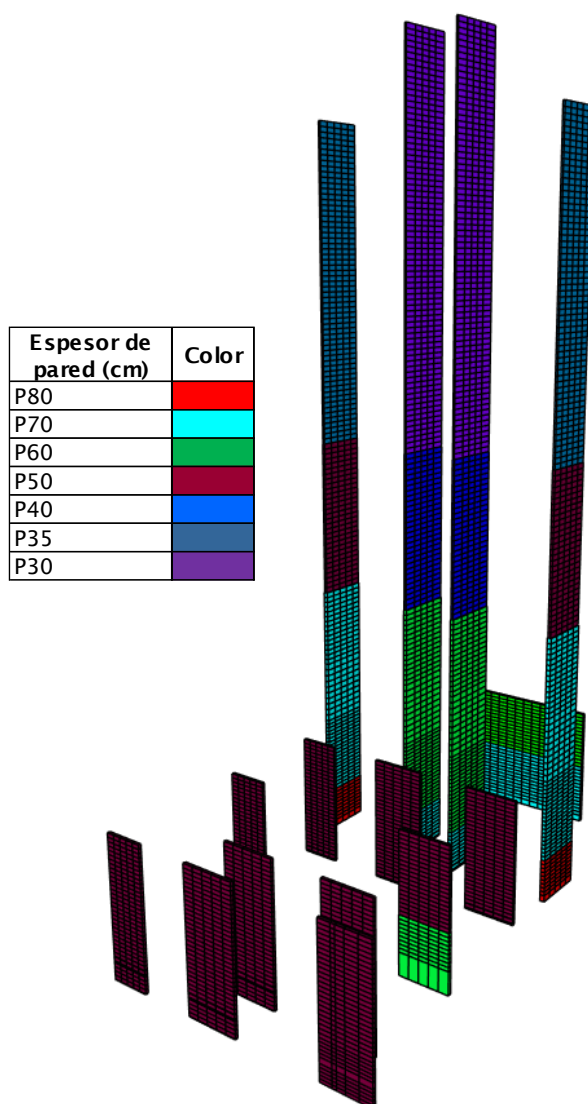


Figura 8. Variación de espesores de paredes estructurales.

4.3 Diseño de fundación

4.3.1 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.

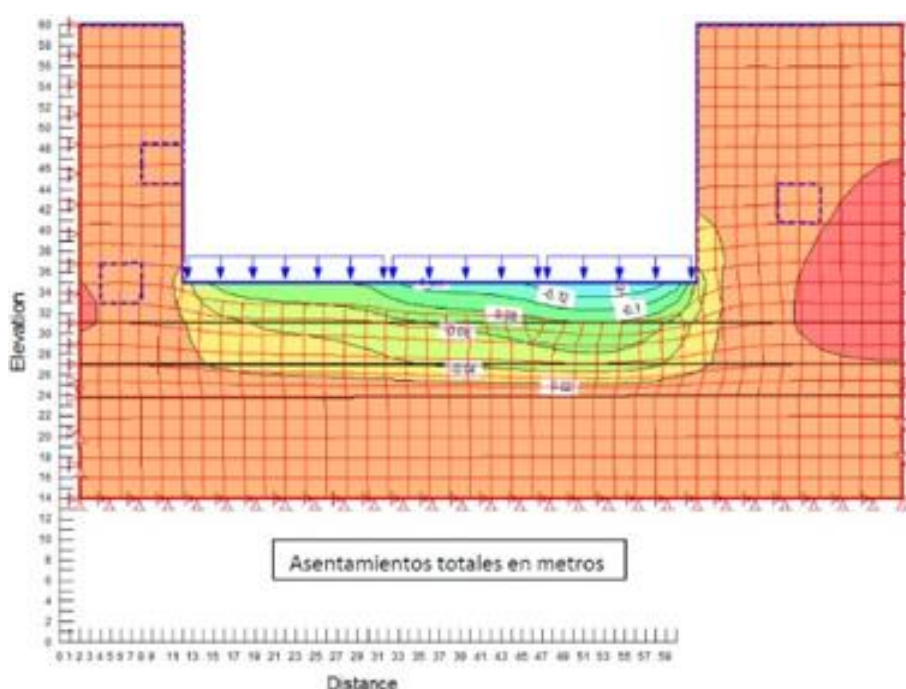


Figura 9. Modelo de análisis para la evaluación de las deformaciones del suelo bajo la distribución de carga asociado a un sistema de cimentación superficial elaborado en SIGMA/W.

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.

4.3.1 Dimensiones de los elementos de fundación

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 en 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. 10, se muestra la tipología de los cabezales y pilotes que componen el ensamblaje de la fundación.

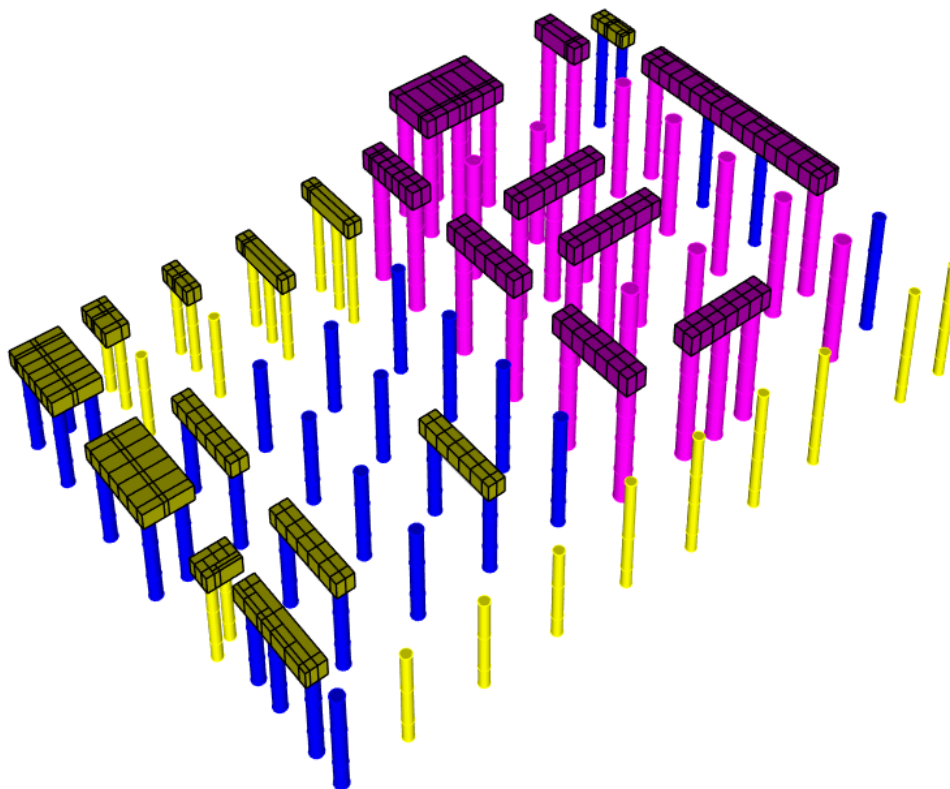


Figura 10. En color amarillo se muestran los cabezales de espesor de 2.0m; en color magenta los cabezales de espesor de 2.5m. Las pilas de color amarillo tienen un diámetro de 1.2m, las de color azul de 1.5m y las de color fucsia de 2.0m.

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. 13, 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.

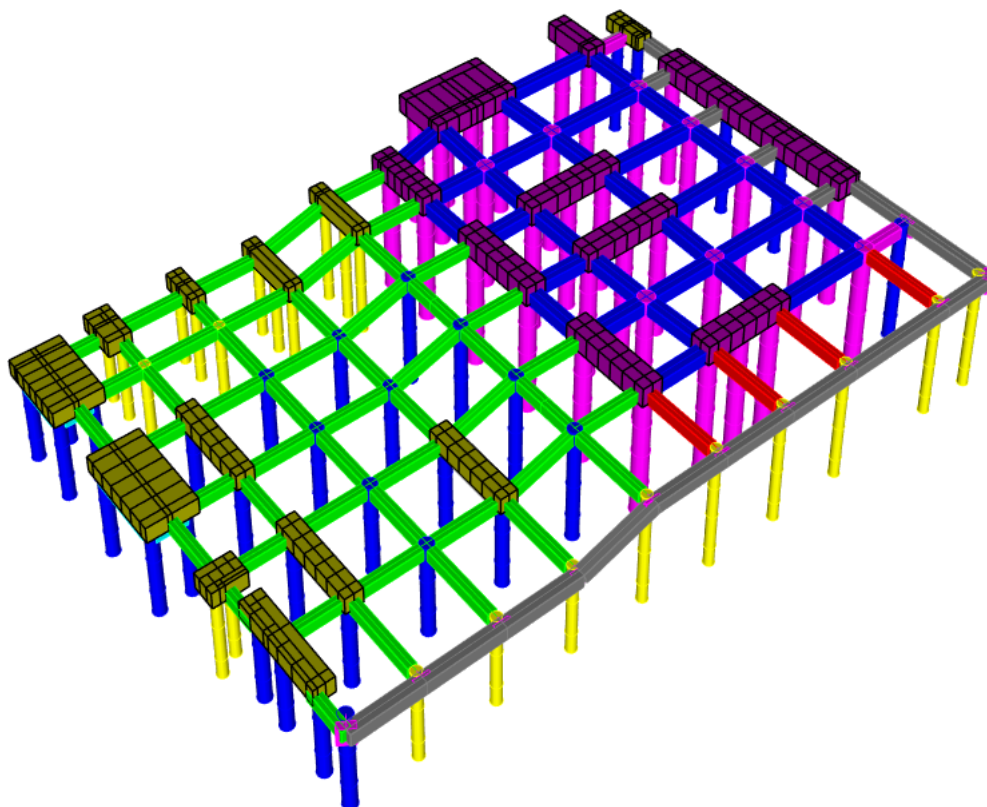


Figura 11. En gris se muestran las vigas de 1.3mx1.3m, en verde vigas de 1.0x1.30, en azul vigas de 1.5mx1.5m y en rojo vigas de 1.0mx1.40m.

4. CONCLUSIONES

- Para edificios no regulares en planta las hipótesis de estructuración no son siempre favorables, esto se muestra como lección aprendida en el proceso de conceptualización estructural del edificio Millennium en donde la introducción de un sistema dual, con más paredes de corte, y consecuentemente alta rigidez lateral, no necesariamente resulta más efectivo que el disminuir la rigidez y usar marcos especiales para el control de desplazamientos y solución de elementos por resistencia del edificio.
- Cuando se logra una adecuada conceptualización estructural en un edificio, esta presenta la bondad de ser válida, aunque posteriormente se den pequeñas variaciones en la arquitectura de inicio trabajada como incrementar la cantidad de niveles del edificio, estos cambios afectan los resultados finales del diseño del edificio como cambio de dimensiones y materiales de elementos estructurales, pero se mantiene la conceptualización estructural del edificio.
- La elaboración y aplicación de los estudios de sitio para edificios altos favorecen la racionalización de la inversión de algunos elementos estructurales del sistema sismorresistente del edificio, ya que racionalizan la demanda sísmica permitiendo diseñar muros, columnas, vigas y fundaciones con dimensiones óptimas y con menor densidad de armado, cumpliendo estrictamente con normativas, pero sin gastos redundantes.

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] Estructuristas Consultores, "Memoria de cálculo modulo II, Proyecto Millenium Plaza". Estructuristas Consultores S.A. de C.V., 2019.
- [7] Estructuristas Consultores, "Reporte de cálculo de cimentaciones profundas de modulo 2, Proyecto Millenium Plaza". Estructuristas Consultores S.A. de C.V., 2018.