



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**DISEÑO DE UN SISTEMA ESTRUCTURAL LIGERO, PREFABRICABLE, MODULABLE Y
DESMONTABLE PARA EL SOPORTE DE UNA VIVIENDA SUSTENTABLE**

Opción de titulación

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Pedro Antonio Álvarez Sánchez

Dirigida por:

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

SINODALES

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dr. Manuel Toledano Ayala
Suplente

Dr. José Luis Reyes Amiza
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre 2017

RESUMEN

Los sistemas constructivos más empleados en México para la construcción de viviendas utilizan materiales convencionales como son muros de mampostería en combinación con losas de concreto reforzado, estos materiales generan una gran cantidad de desperdicios en los procesos de fabricación, construcción y demolición una vez que la estructura cumplió con su periodo de vida útil. Por otro lado, dichos sistemas constructivos presentan tiempos excesivos y bajos índices de calidad en sus diferentes procesos constructivos. Por lo anterior, el presente trabajo de investigación busca implementar un sistema estructural que ayude a reducir la cantidad de desperdicios generados antes, durante y después de los diferentes proceso de construcción enfocados al sector casa habitación y que además permita mejorar los procesos de fabricación y montaje mediante la utilización de procesos de construcción industrializados. El sistema estructural propuesto se basa en la utilización de unidades modulares que permiten una construcción rápida debido al fácil montaje y desmontaje de dichas unidades, la estructura ensamblada con dichas unidades modulares debe comportarse como un sólo sistema estructural capaz de soportar las cargas de diseño a las que va estar expuesta, principalmente, cargas gravitacionales y laterales (viento y sismo). Como parte del desarrollo del trabajo se describe el diseño de un sistema estructural de acero tipo vivienda sustentable de dos plantas compuesta por un conjunto de 14 unidades modulares soportadas por columnas de esquina, se evalúa el comportamiento del sistema estructural compuesto por el conjunto total de unidades mediante modelos analíticos sistematizados de análisis y diseño estructural.

(Palabras clave: unidades modulares, sistema estructural, acero, diseño)

SUMMARY

The most commonly used construction systems in Mexico for housing construction use conventional materials such as masonry walls in combination with reinforced concrete slabs, these materials generate a large amount of waste in the manufacturing, construction and demolition processes once the structure fulfilled its useful life. On the other hand, these construction systems present excessive times and low quality indices in their different construction processes. For the above, the present research work seeks to implement a structural system that helps to reduce the amount of waste generated before, during and after the different construction process focused on the housing construction sector and that also allows to improve the manufacturing and assembly processes through the use of industrialized construction processes. The proposed structural system is based on the use of modular units that allow rapid construction due to the easy assembly and disassembly of such units, the structure assembled with such modular units must behave as a single structural system capable of supporting design loads at which will be exposed mainly gravitational and lateral loads (wind and earthquake). As part of the development of the work describes the design of a structural system of steel type sustainable housing composed of a set of 14 modular units supported by corner columns, the behavior of the structural system composed of the total set of units through systematic analytical models of analysis and structural design.

(Key words: modular units, structural system, steel, design.)

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por siempre ayudarme en todo y haberme permitido realizar un sueño más.

A mi madre, quien es y siempre será mi principal sostén. A ella le dedico este trabajo ya que sin su apoyo y palabras de motivación nada de esto sería posible.

A mi Papá, Hermanas y Hermanos por su apoyo incondicional y por aguantarme en los momentos de frustración y enojo por los que frecuentemente pase.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo financiero recibido, ya que sin él no hubiera logrado concluir mis estudios de posgrado.

A la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DIPFI-UAQ), por su apoyo mediante la convocatoria “Casa Solar Experimental”.

Al Dr. Manuel Toledano Ayala, por su incondicional apoyo durante todo el proceso y por ser un gran ejemplo a seguir.

ÍNDICE

RESUMEN	II
SUMMARY	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Hipótesis	5
1.4. Objetivo general	5
1.5. Objetivos particulares	6
2. ANTECEDENTES	7
3. MARCO TEÓRICO	13
3.1. Estructuras de acero	13
3.2. Relaciones esfuerzo-deformación del acero estructural	14
3.3. Normativa para el diseño de estructuras	16
3.4. Acciones	17
3.5. Criterios de diseño estructural	18
3.6. Confiabilidad estructural	19
3.7. Sistemas estructurales	19
3.8. Consideraciones generales de los miembros cargados axialmente a compresión	20
3.9. Consideraciones generales sobre vigas	22
4. METODOLOGÍA PROPUESTA	23
4.1. Determinación de la topología	23
4.2. Identificación de las acciones de diseño	23
4.2.1. Cargas muertas	23
4.2.2. Cargas vivas	24
4.2.3. Cargas accidentales	25
4.2.3.1. Estimación Presión de Viento	25
4.2.3.2. Estimación de fuerza cortante por sismo	25
4.3. Determinación de las combinaciones de diseño	25
4.4. Criterios de diseño estructural	27
4.4.1. Estado límite de falla	27
4.4.2. Estado límite de servicio	28

4.1. Modelación	30
4.2. Elaboración de Planos Estructurales	30
4.3. Fabricación de la estructura	31
4.4. Montaje de la estructura.....	31
5. EJEMPLO DE APLICACIÓN	32
5.1. Descripción de la propuesta arquitectónica	32
5.2. Estructuración de los módulos	34
5.3. Estimación de las acciones de diseño	35
5.3.1. Cargas muertas en cubierta.	35
5.3.2. Cargas muertas de entrepisos.	36
5.3.3. Estimación de cargas vivas	36
5.3.4. Estimación de la presión del viento.....	37
5.3.4.1. Clasificación de la estructura.....	37
5.3.4.2. Efectos a considerar.....	38
5.3.4.3. Método aplicado	38
5.3.4.4. Determinación de la velocidad básica de diseño.....	38
5.3.4.5. Velocidad regional para un periodo de retorno fijo.....	39
5.3.4.6. Factor de exposición local	40
5.3.4.7. Datos de diseño para el cálculo de las presiones.....	40
5.4. Análisis sísmico	41
5.5. Determinación de las combinaciones de diseño	42
5.6. Análisis y diseño estructural	43
5.7. Elaboración de los planos estructurales	46
5.8. Fabricación de la estructura	47
5.9. Montaje de la estructura.....	50
6. RESULTADOS.....	57
6.1. Revisión del estado límite de resistencia	57
6.2. Revisión de los estados límite de servicio.	58
6.2.1. Desplazamientos verticales	58
6.3. Relación peso/Superficie	59
7. CONCLUSIONES.....	61
8. REFERENCIAS.....	63
APENDICE	66

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2-1.- Unidad modular donde las cargas gravitacionales se transfieren a través de las paredes laterales.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2-2.- Unidad modular donde las cargas gravitacionales se transfieren de las vigas hacia las columnas.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3-1.- Diagrama esfuerzo-deformación de un acero con bajo contenido de carbono. Fuente: (McCormac y Csernak, 2013).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4-1. Diagrama de flujo que muestra el procedimiento para la obtención de las cargas por viento. (CFE, 2008b).</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5-1.- Casa habitación formada por el conjunto de 14 módulos individuales: (a) planta baja; y (b) planta alta.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 5-2.- Sistema de piso típico en módulos individuales.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 5-3.- Corte de la fachada norte de la estructura completa.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 5-4.- Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años. (CFE, 2008a).</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5-5.- Fuerzas sísmicas aplicadas a un edificio. (CFE, 2008a).</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5-6.- Modelo tridimensional de un módulo individual.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5-7.- Modelo tridimensional del sistema estructural propuesto</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5-8.- Condiciones de frontera del sistema estructural propuesto.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5-9.- Fabricación de las diferentes conexiones para unir a los elementos estructurales.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5-10.- Unión de conexiones a elementos estructurales tipo columna.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5-11.- Fabricación de vigas principales y unión de placas de cortante para conectar montenes.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5-12.- Fabricación de montenes.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5-13.- Unión de conexiones a vigas principales para conectar vigas secundarias.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5-14.- Retiro de jardinería en zona donde se construirá la cimentación.</i>	<i>50</i>

<i>Figura 5-15.- Nivelación de zona donde se construirá la cimentación.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5-16.- Cimentación terminada al 100% y lista para recibir estructura</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5-17.- Traslado de los elementos que conforman la estructura al sitio donde se realizará el montaje</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5-18.- Montaje de elementos verticales tipo columna</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5-19.- Montaje de sistemas de piso</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5-20.- Montaje de escalera</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5-21.- Montaje de últimos elementos de azotea</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5-22.- Estructurara ensamblada al 100 %.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5-23 (a), (b) y (c).- Avances en la envolvente del edificio.</i>	<i>56</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 4-1. Cargas vivas unitarias (kg/m²).</i>	24
<i>Tabla 4-2. Combinaciones de acciones que deberán suponerse aplicadas simultáneamente.</i>	27
<i>Tabla 4-3. Límites de deflexiones.</i>	29
<i>Tabla 4-4. Distorsiones permisibles de entrepiso.</i>	29
<i>Tabla 5-1. Cargas muertas en cubierta (kg/m²).</i>	36
<i>Tabla 5-2. Cargas muertas de entrepiso (kg/m²).</i>	36
<i>Tabla 5-3. Cargas vivas unitarias (kg/m²).</i>	37
<i>Tabla 5-4. Presiones netas de viento (kg/m²).</i>	41
<i>Tabla 5-5. Combinaciones de acciones para la revisión de los estados límite (de falla y servicio)</i>	43
<i>Tabla 5-6. Listado de planos estructurales del sistema propuesto</i>	46
<i>Tabla 6-2. Límites de deflexiones.</i>	58
<i>Tabla 6-3. Deflexiones en elementos críticos.</i>	59
<i>Tabla 6-4. Peso de la totalidad de elementos que componen el sistema estructural.</i>	59

1. INTRODUCCIÓN

En México como en muchos países de Latinoamérica el sector de la construcción enfocado a la edificación de estructuras del tipo casa habitación ha quedado relegado a sistemas de estructuración simples desde el enfoque de la arquitectura moderna, ya que la geometría de dichos sistemas no permiten la concepción de formas y espacios agradables a los sentidos (Aparicio Torres, 2007)

Por otro lado, existen los sistemas estructurales modulares que se han estado utilizando cada vez más para la construcción de escuelas de mediana altura, departamentos, vivienda social, hoteles y otras construcciones similares donde se requiere de múltiples unidades repetidas (Annan *et al.*, 2009b).

Las principales ventajas que ofrecen los sistemas estructurales modulares son: la economía en la fabricación de múltiples unidades repetidas, la velocidad de instalación in situ, y el mejoramiento del control de calidad y de la precisión en la fabricación. En adición, las construcciones modulares también se pueden desmontar y volver a utilizar, por lo tanto mantener efectivo su valor inicial (Lawson *et al.*, 2012).

El sistema estructural propuesto se basa en la utilización de unidades modulares individuales, las cuales permiten una construcción rápida y económica debido a la velocidad en la etapa de fabricación y al fácil montaje y desmontaje de dichas unidades.

Es importante mencionar que el presente trabajo de investigación atiende la reciente convocatoria titulada “Casa Solar Experimental” lanzada por la Universidad Autónoma de Querétaro con el fin de impulsar la investigación y el desarrollo tecnológico en el área de la sostenibilidad energética.

1.1. Descripción del problema

La sustentabilidad en la construcción se fundamenta en aprovechar al máximo los recursos naturales con la finalidad de minimizar el impacto ambiental a través de:

- La adecuada selección de los materiales de construcción,
- El diseño de viviendas adecuadas a las condiciones climáticas de la zona de construcción,
- La reducción en el consumo de energías, y
- La utilización de fuentes de energía renovables.

En conclusión la construcción de las viviendas en la actualidad no solo debe de considerar los aspectos económicos, sino también, los aspectos relacionados con la conservación del medio ambiente. Lo anterior se logra mediante el uso de técnicas que optimicen el uso de materiales reduciendo al máximo los residuos contaminantes.

Por otro lado, los sistemas constructivos más empleados en México para la construcción de vivienda se basan en el uso de mampostería confinada para muros en combinación con losas de concreto reforzado, los materiales empleados en los sistemas constructivos clásicos son relativamente pesados y generan una gran cantidad de desperdicios tanto en los procesos de fabricación de los materiales como en las demoliciones después de que la estructura cumplió con su periodo de vida útil, por tanto, son sistemas constructivos que no aportan a la conservación del medio ambiente.

La gran demanda de materiales de construcción lleva a la necesidad de extraer y procesar una gran cantidad de materias primas y al tratamiento de una elevada cantidad de residuos de construcción y demolición, con un alto costo energético (Arenas, 2008).

La industria de la construcción a nivel mundial es responsable por el 50 % de los recursos naturales y del 40 % del consumo de energía (Casañas, 2011), los principales factores son:

- Consumo de energía en la fabricación de los materiales de construcción,
- Procesos constructivos,
- Mantenimiento durante la vida útil de la construcción, y
- Demolición de la edificación después de la vida útil.

Dicho lo anterior, el empleo de materiales adecuados, que economicen energía tanto en la etapa de fabricación de materiales y construcción de las edificaciones, así como en su periodo de vida útil, generará impactos positivos relacionados con el consumo de energía (Casañas, 2011).

Ante esta situación, es necesario implementar sistemas constructivos alternativos que permitan la utilización de materiales y procesos de bajo impacto ambiental. Esto puede lograrse mediante el uso de sistemas constructivos modulares, los cuales proporcionan sostenibilidad al proyecto y logran reducir los desechos generados en comparación con los sistemas constructivos tradicionales mediante tecnologías y productos para la construcción industrializada, sin descuidar el cumplimiento de la normatividad, enfatizando en la seguridad estructural y calidad de la vivienda terminada.

1.2. Justificación

Actualmente los sistemas constructivos más empleados en México para viviendas consisten en muros confinados de mampostería en combinación con losas de concreto reforzado, todos estos materiales son desperdicio o en el mejor de los casos se puede reciclar una pequeña parte de ellos después de la vida útil de la estructura (Soto, 2014).

Partiendo de la necesidad de implementar sistemas estructurales que permitan la reducción de los desperdicios y contaminantes generados durante y después de la vida útil de las estructuras, el presente trabajo de investigación se centra en la implementación de un sistema estructural a base de unidades modulares, ligeras, prefabricables y desmontables, usando acero estructural como material principal, ya que las estructuras construidas con acero estructural tiene características naturales que concuerdan con los requisitos de la construcción sustentable. Es un sistema innovador, sustentable y amigable con el medio ambiente gracias a sus beneficios potenciales de reciclaje (Soto, 2014).

El uso del acero estructural se justifica ya que actualidad posee grandes propiedades sustentables y mecánicas en comparación a otros materiales utilizados en la industria de la construcción (concreto, mampostería y madera), ya que por medio de procesos químicos como lo es la fundición del mismo, se puede recuperar prácticamente el 100% de algún perfil estructural e incluso adicionando nuevos componentes se logran nuevas y mejores aleaciones que ofrecen incrementos considerables en las propiedades mecánicas en comparación a la aleación original, incrementando de manera significativa el periodo de servicio de las estructuras referentes al sector casa habitación (Novas, 2010).

El acero estructural como material de construcción ofrece ventajas significativas en comparación a otros materiales, dentro de las cuales podemos mencionar las siguientes:

- La producción de acero estructural cuenta con altos índices de calidad, ofreciendo una amplia variedad de grados y/o resistencias (Soto Rodriguez, 2014).
- El comportamiento dúctil de un sistema estructural es desde luego más fácil de lograr cuando los componentes que lo integran son de acero, en vez de concreto, por ser este un material intrínsecamente dúctil (Martínez-Romero, 1993).
- Su comportamiento mecánico real es el más cercano al comportamiento teórico idealizado y cuenta con propiedades mecánicas bien definidas, permitiendo una

determinación más exacta de una sección transversal capaz de resistir las demandas a las que estará sometida (McCormac & Csernak, 2013).

Empleando perfiles de acero estructural de espesores y dimensiones relativamente pequeños, los cuales en la práctica profesional sólo tienen función de arriostramiento o apuntalamiento preventivo en elementos estructurales principales y aplicando criterios de estructuración de los sistemas estructurales ligeros tipo nave industrial (los cuales basan su estructuración en el uso de marcos dúctiles y marcos contraventeados) se busca implementar un sistema estructural modular que además de permitir la reducción de desperdicios y contaminantes generados antes, durante y después de la vida útil de la estructura, mediante la correcta elección de los materiales de construcción, permita minimizar los costos de mano de obra y los tiempos de construcción mediante un proceso de fabricación industrializado.

Ogden *et al* (2012) mencionan que la construcción modular lleva la mayor parte de la producción fuera de la obra, y, esencialmente, las actividades lentas de sitio son reemplazados por procesos de fabricación más eficientes y más rápidos dentro de taller.

1.3. Hipótesis

Una estructura formada con unidades modulares individuales prefabricadas, aplicada al sector casa habitación media, se comporta como un sólo sistema estructural capaz de soportar las cargas de diseño a las que va estar expuesta, principalmente, cargas gravitacionales y laterales (viento y sismo), garantizando los estados límite de resistencia y servicio establecidos por la normativa AISC-10 LRFD.

1.4. Objetivo general

Desarrollar y fabricar un sistema estructural de acero para soporte de una vivienda sustentable, a base de unidades modulares individuales, ligeras, prefabricadas y desmontables, capaz de soportar las cargas de diseño a las que estará sometido durante su periodo de vida.

1.5. Objetivos particulares

- Diseñar un sistema estructural, a base de unidades modulares individuales, que facilite su montaje y desmontaje utilizando la mínima cantidad de equipo y mano de obra.
- Evaluar el comportamiento tanto de las unidades modulares individuales, así como, el comportamiento del sistema estructural ensamblado en su totalidad, mediante modelos matemáticos sistematizados de análisis y diseño estructural.
- Fomentar procedimientos de construcción y fabricación industrializados mediante el uso del acero estructural en proyectos de casas habitación.
- Implementar un sistema estructural que reduzca las actividades in situ, reemplazándolas por procesos de fabricación más eficientes y rápidos dentro de taller.
- Implementar un sistema estructural que permita la utilización de instalaciones sustentables.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad, la industria de la construcción ha sido dominada con las prácticas convencionales de construcción (muros confinados de mampostería, losas de concreto armado, cimentaciones de mampostería, etc.), prácticas que frecuentemente afectan nuestro entorno, ya que dependen de sistemas de cimentación que causan un gran impacto al suelo en el que están soportados y que en ocasiones son una pérdida desde el punto de vista material una vez que la estructura cumplió con su vida útil dado que no son recuperables (Soto, 2014).

Gómez (2009) menciona que los sistemas de construcción convencionales usados actualmente presentan muchas desventajas entre las cuales se encuentran las siguientes:

- *Tiempo*, forzosamente requieren de etapas consecutivas de ejecución, es decir, los muros no pueden ser construidos si la cimentación no ha sido terminada o la cubierta no podrá ser colocada si la estructura de soporte está incompleta.
- *Falta de mano de obra capacitada*, Los trabajadores de la construcción tradicional aprenden su oficio haciéndolo directamente en la obra, sin ninguna oportunidad de aprenderlo en alguna escuela o taller de capacitación, repercutiendo directamente en el costo final y la calidad del edificio terminado.
- *Falta de control de calidad*, El control de calidad de los materiales tradicionales es prácticamente nulo, a excepción del acero de refuerzo y el concreto los demás materiales que intervienen en la construcción tradicional raramente son sometidos a pruebas que permitan medir sus propiedades mecánicas.

En adición, Lawson (2007) menciona que muchos de los sistemas estructurales convencionales aplicados al sector casa habitación carecen de sustentabilidad, ya que no aprovechan los recursos naturales para minimizar el impacto ambiental a través de:

- La adecuada selección de los materiales de construcción, eligiendo los que requieran de menor energía para su fabricación.
- La reducción en el consumo de energía en servicios, confort y entretenimiento,
- El impulso a la utilización de fuentes de energía renovable, y
- El diseño de viviendas adecuadas a las condiciones climáticas de la zona.

En la actualidad, la construcción de las viviendas debe considerar los aspectos económicos, pero también de conservación del medio ambiente.

La incorporación de la sustentabilidad en el proceso de construcción es esencial para proteger los ecosistemas, mejorar la calidad del aire, reducir los residuos sólidos y conservar los recursos naturales (Musa et al., 2014).

Por otro lado, en la actualidad existen sistemas de construcción industrializada que pueden definirse como métodos industriales de producción de elementos de construcción estandarizados que se manufacturan de manera centralizada, en serie y bajo condiciones de fábrica y que subsiguientemente se transportan al sitio donde serán montados usando un mínimo de operaciones programadas, convirtiéndose en un edificio terminado.

La construcción de casas de acero utilizando sistemas industrializados es una de las nuevas tendencias en la construcción hoy en día. Es un sistema poco usual en países como México, sin embargo, es muy utilizado en países como Estados Unidos y Canadá, en él se puede visualizar la construcción de una casa sin la colocación de ningún ladrillo (Lawson, 2007).

Dentro de los sistemas de construcción industrializada se han implementado sistemas de construcción modular, los cuales, comprenden unidades volumétricas del tamaño de una habitación que normalmente están equipadas totalmente desde la fabricación y solo se instalan en el lugar (Ogden et al., 2012).

Ogden et al (2012) mencionan las tres principales ventajas del uso sistemas de construcción modular:

- La economía en la fabricación de múltiples unidades repetidas,
- La velocidad de la instalación in situ, y
- Mejoramiento de la calidad y la precisión en la fabricación.

En adición, los sistemas constructivos modulares proporcionan varias oportunidades para mejorar la sostenibilidad del proyecto en términos del proceso de construcción y el funcionamiento de la construcción terminada. Los residuos de la construcción se reducen sustancialmente del 10 al 15% en un sitio de construcción tradicional a menos del 5% en un entorno de fábrica, que también tiene mayores oportunidades para el reciclado de residuos (Ogden *et al.*, 2012).

Potencialmente, las construcciones modulares también se pueden desmontar y volver a utilizar, por lo tanto mantener efectivo su valor inicial. La gama de aplicaciones de construcción modular incluye desde hoteles, residencias de alojamiento militar hasta viviendas de interés social. La construcción modular generalmente comprende secciones de acero conformado en frío en forma de unidades en tres dimensiones (3D) que son generalmente acondicionadas antes de la entrega al sitio. Esta forma de construcción se ha utilizado en edificios de cuatro a nueve plantas. La construcción modular más grande del mundo se construyó en Manchester y se compone de aproximadamente 1,400 módulos (Popo-Ola *et al.*, 2008).

La construcción modular utiliza generalmente estructuras de acero ligero, tales como, perfiles de acero conformado en frío, generalmente en forma de C. Las secciones C son típicamente de 75 a 150 mm de peralte y utilizan espesores de acero de 1.2 a 2.4 mm. Para la vivienda de dos o tres pisos, las estructuras de acero ligero son similares en forma a las estructuras de madera, pero se tiene una mejor interconexión entre los componentes (Popo-Ola *et al.*, 2008).

Popo-Ola et al (2008) describe dos formas genéricas de construcción modular en acero, lo que afecta a su ámbito de aplicación y las formas de construcción que se pueden diseñar:

- Módulos de carga, en el que las cargas gravitacionales (muertas y vivas) se transfieren a través de las paredes laterales de los módulos.



Figura 2-1.- Unidad modular donde las cargas gravitacionales se transfieren a través de las paredes laterales.

- Módulos de esquina, en el que las cargas gravitacionales (muertas y vivas) se transfieren a través de vigas hacia los postes esquineros.

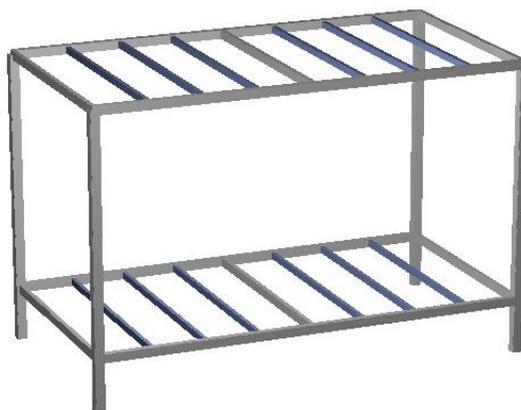


Figura 2-2.- Unidad modular donde las cargas gravitacionales se transfieren de las vigas hacia las columnas.

En el primer caso, la resistencia a la compresión de las paredes es el factor de control. En el segundo caso, la resistencia a la compresión de los postes de la esquina es el factor de control y por esta razón, los perfiles estructurales huecos (HSS) se utilizan a menudo debido a su alta resistencia al pandeo.

Para módulos soportados por columnas de esquina, la estructura modular debe tener resistencia lateral adecuada para proporcionar seguridad ante cargas laterales, tales como cargas de viento o sísmicas. La resistencia lateral de la unidad modular se alcanza frecuentemente mediante la adición de diagonales o muros de cortante, algunos investigadores como Annan *et al* (2009b) y Hong *et al* (2011) han estudiado la resistencia lateral de los sistemas construidos con módulos soportados por columnas de esquina.

Además, las unidades modulares individuales deben estar correctamente conectadas entre sí para transferir las fuerzas y momentos desarrollados por las cargas gravitacionales y laterales, de manera que la estructura final se comporte como una sola estructura. Para esto, es indispensable entender a fondo el comportamiento de las conexiones utilizadas en la construcción modular. Sin embargo, los estudios sobre las conexiones utilizadas para la construcción modular son limitados (Park *et al.*, 2016).

Según una reciente publicación del Structures Congress (2012) existen tres técnicas diferentes para la construcción de viviendas modulares.

Una técnica consiste en la fabricación y montaje del 100% de los módulos de construcción de la vivienda, y la realización de pruebas de la vivienda terminada dentro de un entorno de fábrica. Una vez que se realizaron las pruebas a la vivienda terminada se desmonta el sistema para tener nuevamente módulos de construcción individuales y son enviados al sitio de construcción para ser colocados sobre un sistema de cimentación a base de zapatas aisladas.

Otro método de fabricación consiste en fabricar todas las piezas de construcción estándar y realizar el montaje de las piezas en sitio, similar a la construcción de edificios tradicionales.

La tercera técnica es una mezcla de los dos primeros métodos, utiliza la fabricación de las columnas estándar y la fabricación y montaje de los sistemas de techo dentro de un entorno de taller. Los sistemas de techo terminados son enviados al sitio de construcción y se colocan sobre las columnas que previamente fueron levantadas, proporcionando una construcción estructural de la vivienda completa en dos días. La envolvente del edificio; la construcción mecánica, plomería, electricidad, telecomunicaciones y sistemas de seguridad; y acabados interiores y exteriores se completan en el lugar.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Estructuras de acero

Una estructura es un arreglo tridimensional, constituido por miembros o elementos estructurales de sección prismática o curva, interconectados de tal manera que tienen una función estructural y arquitectónica, y que soportan las cargas verticales y laterales producidas por las acciones permanentes, variables y accidentales (sismo principalmente), así como los efectos combinados de dichas cargas en cualquier dirección.

Así mismo, una estructura puede concebirse como un subsistema; es decir, como un conjunto de componentes que se combinan en forma ordenada para cumplir una función dada.

El proyectista estructural debe tomar en cuenta las siguientes características de las edificaciones: forma, función del edificio, altura, cargas actuantes, ubicación geográfica, condiciones ambientales, instalaciones eléctricas, mecánicas, materiales estructurales, métodos, técnicas y procedimientos de construcción locales, disponibilidad de materiales en la región, mano de obra y fundamentalmente los aspectos económicos y de sustentabilidad del proyecto (Soto, 2014).

En la etapa de concepción o estructuración, un aspecto fundamental es la identificación de la función principal de cada uno de los elementos que componen el sistema estructural; así como la correcta estimación de las acciones a las que estarán sometidas (cargas vivas, muertas, viento, sismo, etc.); ya que el proceso de optimización estructural y/o aprovechamiento de las capacidades estructurales de los elementos que comprenden la súper-estructura está estrechamente relacionados a la elección del sistema de estructuración.

La estructura de acero se construye en dos partes diferentes: en un taller de fabricación especializado que cuenta con equipo automatizado y en campo o sitio de la obra. Cuando los elementos estructurales se ensamblan en su posición definitiva, se dice que la estructura ha sido

montada en sitio, si la estructura se fabrica en un lugar distinto al de su posición definitiva, se dice que ha sido manufacturada en taller (prefabricación).

En una construcción de acero, el sistema estructural está formado por dos estructuras, una vertical y otra horizontal, que se ligan en dos planos perpendiculares. La estructura vertical está constituida por las columnas, los sistemas de contraventeo y los muros de rigidez de concreto reforzado (generalmente el núcleo central del edificio). La estructura horizontal la forman las trabes, vigas secundarias, armaduras, contraventeos horizontales, etc. Ambas estructuras se unen mediante conexiones, que son los puntos medulares de las estructuras metálicas. Los sistemas de piso compuestos acero concreto crean las superficies horizontales donde se realizarán las actividades propias del edificio y los muros no estructurales permiten delimitar los espacios útiles ó áreas rentables del edificio (Soto, 2014).

Otros aspectos fundamentales en el diseño de una estructura de acero que se deben tener en cuenta en la etapa de la concepción o estructuración del edificio, son las vibraciones y los desplazamientos laterales, que deben controlarse a límites tolerables bajo condiciones de servicio.

3.2. Relaciones esfuerzo-deformación del acero estructural

Para entender el comportamiento de toda estructura de acero, se debe estar familiarizado con las propiedades de éste. Los diagramas esfuerzo-deformación presentan información valiosa necesaria para entender cómo se comporta el acero en una situación dada. Si una pieza de acero estructural dúctil se somete a una fuerza de tensión, ésta comenzará a alargarse. Si se incrementa la fuerza de tensión a razón constante, la magnitud del alargamiento aumentará en forma lineal dentro de ciertos límites (McCormac y Csernak, 2013).

El mayor esfuerzo para el que todavía es válida la ley de Hooke o el punto más alto de la porción recta del diagrama esfuerzo-deformación se denomina límite proporcional. El mayor esfuerzo que un material puede resistir sin deformarse permanentemente se llama límite elástico.

El esfuerzo en el que se presenta un incremento brusco en el alargamiento o deformación sin un incremento en el esfuerzo, se denomina esfuerzo de fluencia. Es el primer punto del diagrama esfuerzo-deformación para el cual la tangente a la curva es horizontal. Más allá del esfuerzo de fluencia hay un intervalo en el que ocurre un incremento considerable de la deformación sin incremento del esfuerzo. La deformación que se presenta antes del esfuerzo de fluencia se denomina deformación elástica; la deformación que ocurre después del esfuerzo de fluencia, sin incremento de esfuerzo, se denomina *deformación plástica*. Esta última deformación es generalmente igual en magnitud a 10 o 15 veces la deformación elástica (McCormac y Csernak, 2013).

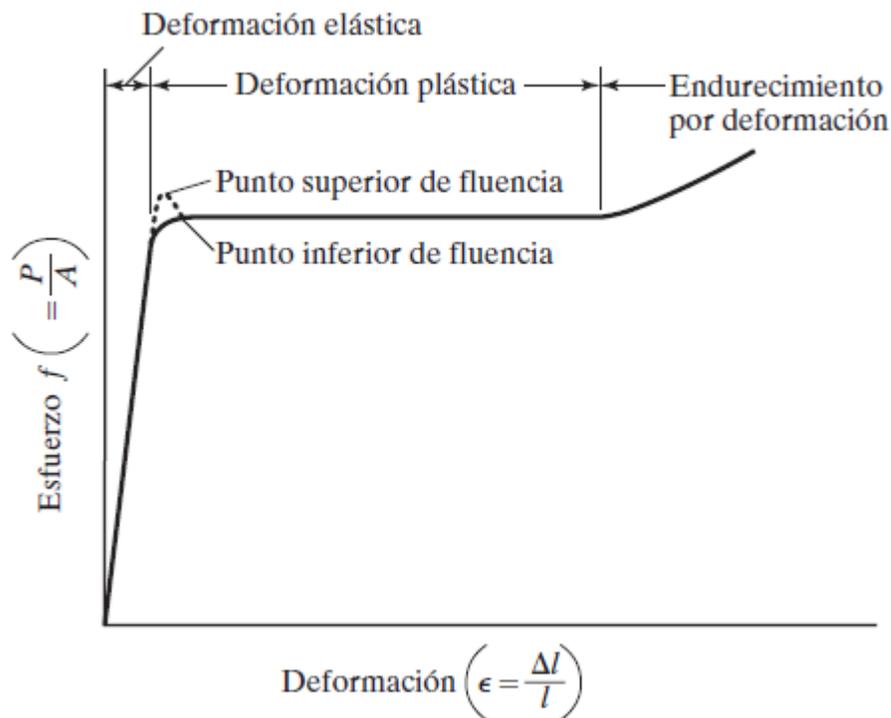


Figura 3-1.- Diagrama esfuerzo-deformación de un acero con bajo contenido de carbono.
Fuente: (McCormac y Csernak, 2013).

Después de la deformación plástica, existe un rango en el cual es necesario un esfuerzo adicional para producir deformación adicional, a esto se le denomina endurecimiento por deformación.

En la Figura 3-1 se muestra un diagrama típico de esfuerzo-deformación de un acero estructural con bajo contenido de carbono. Sólo se presenta aquí la parte inicial de la curva, debido a la gran deformación que ocurre antes de la falla.

La curva esfuerzo-deformación que aparece en la Figura 3-1 es típica de los aceros estructurales dúctiles y se supone que es la misma para miembros a tensión o a compresión. (Los miembros estructurales a compresión deben ser robustos, ya que los miembros a compresión esbeltos sujetos a cargas de compresión tienden a pandearse lateralmente y sus propiedades se ven muy afectadas por los momentos que se generan.)

3.3. Normativa para el diseño de estructuras

El diseño de la mayoría de las estructuras está regido por especificaciones de diseño y normas, estas normas que especifican las cargas de diseño, esfuerzos de diseño, tipos de construcción, calidad de los materiales, y otros factores, tienen por objeto garantizar un comportamiento satisfactorio de las edificaciones, y de esta manera evitar, en el caso de sismos de gran magnitud, daños económicos elevados y especialmente pérdidas de vidas humanas.

En México, actualmente se cuenta con una normatividad completa para el diseño y construcción de estructuras, dentro de las cuales están:

- Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 2004.
- Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo (CFE Sismo, 2008).
- Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento (CFE Viento, 2008).
- Especificaciones del Instituto Mexicano de la Construcción en Acero (IMCA)

- Especificaciones del American Institute of Steel Construction (AISC, 2010).
- Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures (ASCE, 10).

3.4. Acciones

Una vez definido qué tipo de comportamiento se requiere para una estructura, es necesario considerar cuales son los factores que pueden afectarla y llevarla a un estado límite. Generalmente a estos factores se les denomina acciones e incluyen los efectos de deformaciones impuestas y efectos ambientales, entre otros.

Las acciones se representan comúnmente por medio de sistemas de carga o de deformaciones impuestas cuyo efecto sobre la estructura se supone equivalente al de las acciones reales.

La estructura deberá revisarse ante las combinaciones más desfavorables de acciones que puedan presentarse durante su periodo de vida. Las acciones se clasifican de acuerdo con la duración en que actúan con máxima intensidad. Como tales, se les denomina *cargas muertas*, *cargas vivas* y *cargas ambientales*.

Dentro de las diferentes acciones se pueden encontrar las acciones permanentes, que son aquellas que obran en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad puede considerarse constante en el tiempo (cargas muertas y empujes de tierra). Las acciones variables son aquellas que obran sobre la estructura en un lapso considerable pero con una intensidad que varía en forma significativa con el tiempo (carga viva y los efectos de temperatura). Las acciones accidentales pueden tomar valores significativos solo durante periodos muy cortos de tiempo, como son los efectos de sismo (NTC, 2004).

3.5. Criterios de diseño estructural

La especificación AISC proporciona dos métodos aceptables para diseñar miembros de acero estructural y sus conectores. Éstos son el Diseño con factores de carga y resistencia (LRFD: Load and Resistance Factor Design) y el Diseño por esfuerzos permisibles (ASD: Allowable Strength Design). Ambos procedimientos se basan en los principios del diseño de estados límite, el cual proporciona las fronteras de la utilidad estructural.

Con ambos procedimientos LRFD y ASD, los valores esperados de las cargas individuales (carga muerta, carga viva, viento, nieve, etc.), se estiman exactamente de la misma manera que lo que requiere la especificación aplicable. A estas cargas también se les denomina cargas de servicio o de trabajo. Las diversas combinaciones de estas cargas, que posiblemente ocurran al mismo tiempo, se agrupan y los mayores valores obtenidos de esta manera se usan para el análisis y diseño de las estructuras (McCormac y Csernak, 2013).

El término estado límite se usa para describir una condición en la que una estructura o parte de ella deja de cumplir su función prescrita. Existen dos tipos de estados límite: los de resistencia y los de servicio.

De igual forma el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal establece tomar en cuenta en el diseño estructural de cualquier tipo de estructura la revisión de los dos estados límite: el de falla y el de servicio.

Un estado límite de falla es aquel que se refiere al agotamiento de la capacidad resistente de un elemento estructural o de alguna parte de la estructura.

Un estado límite de servicio corresponde a la ocurrencia de daños económicos o a la presencia de condiciones que impiden el desarrollo adecuado de las funciones para las que fue proyectada la construcción (deflexiones, flechas máximas, desplazamientos horizontales y verticales).

Según el criterio del estado límite de falla, las estructuras deben dimensionarse de manera que la resistencia de diseño de toda sección con respecto a cada fuerza o momento interno que actúe en ella (fuerza axial, fuerza cortante, momento flexionante, momento de torsión) o a la combinación de dos o más de ellas, sea al menos igual o mayor que los valores de dichas fuerzas o momentos internos. Las resistencias de diseño deben incluir el factor de resistencia (FR) correspondiente, las fuerzas y momentos internos de diseño se obtienen, en general, multiplicando por el factor de carga (FC) correspondiente (NTC, 2004).

3.6. Confiabilidad estructural

Dadas las incertidumbres que existen en las acciones que pueden afectar una estructura y en las variables que definen su resistencia, cualquiera que sea el método de diseño y los factores de seguridad empleados, habrá siempre una posibilidad finita de que la acción máxima exceda la resistencia. A la probabilidad de que una estructura no sobrepase un estado límite, se le llama confiabilidad de la estructura (Meli, 1976).

El cálculo de la confiabilidad de una estructura requiere la determinación de las distribuciones de la probabilidad de las variables que intervienen y da lugar, aun para casos relativamente sencillos, a desarrollos matemáticos complicados.

3.7. Sistemas estructurales

La elección del sistema estructural, es uno de los factores más importantes en la etapa de la concepción de la estructura y que más afecta el costo de la misma. La elección del arreglo estructural implica a su vez la selección del material de construcción. En esta etapa, el proyectista debe tener en cuenta tanto las características de la mano de obra como del equipo necesario para su construcción.

El estudio de los diferentes tipos de estructuración ha generado numerosos esfuerzos de investigación que permitan la búsqueda de geometrías diversas que den como resultado sistemas de estructuración que no comprometan la seguridad estructural de las diferentes edificaciones

proyectadas, evitando el sobredimensionamiento de las mismas; implementando sistemas estructurales ligeros de fácil construcción que cumplan con los requerimientos de servicio y resistencia estipulados en las reglamentaciones vigentes (Majid Zamani et al., 2012).

Dentro de los principales sistemas estructurales que se conocen se encuentran los siguientes:

- Marcos rígidos.
- Marcos contraventeados concéntricamente.
- Marcos contraventeados excéntricamente.
- Marcos Contraventeados en Y.
- Sistemas de alma abierta.
- Marcos de sección variable.

Independientemente del sistema estructural que se use la estructura final debe cumplir la función para la que ha sido proyectada con un grado razonable de seguridad estructural, de manera que tenga un comportamiento adecuado en las condiciones normales de servicio u operación. Además, debe satisfacer otros requisitos tales como mantener el costo dentro de los límites económicos y satisfacer las especificaciones generales del proyecto.

3.8. Consideraciones generales de los miembros cargados axialmente a compresión

Existen varios tipos de miembros que trabajan a compresión, de los cuales la columna es el más conocido. Las columnas son miembros verticales rectos cuyas longitudes son considerablemente mayores que su ancho.

Según McCormac y Csernak (2013) existen tres modos generales según los cuales las columnas cargadas axialmente pueden fallar. Éstos son: pandeo flexionante, pandeo local y pandeo torsionante. Estos modos de pandeo se definen brevemente como sigue:

1. El *pandeo flexionante* (llamado también pandeo de Euler) es el tipo primario de pandeo. Los miembros están sometidos a flexión cuando se vuelven inestables.

2. El *pandeo local* ocurre cuando alguna parte o partes de la sección transversal de una columna son tan delgadas que se pandean localmente en compresión antes que los otros modos de pandeo puedan ocurrir. La susceptibilidad de una columna al pandeo local se mide por las relaciones ancho a espesor de las partes de su sección transversal.

3. El *pandeo torsionante* flexionante puede ocurrir en columnas que tienen ciertas configuraciones en su sección transversal. Esas columnas fallan por torsión o por una combinación de pandeo torsional y flexionante.

Entre más larga sea una columna para una misma sección transversal, mayor es su tendencia a pandearse y menor será la carga que pueda soportar. La tendencia de un miembro a pandearse se mide por lo general con la relación de esbeltez, la cual se define como la relación entre la longitud del miembro y su radio de giro mínimo. La tendencia al pandeo depende también de los siguientes factores: tipo de conexión en los extremos, excentricidad de la aplicación de la carga, imperfecciones en el material de la columna, torceduras iniciales en la columna y esfuerzos residuales de fabricación.

Las cargas que soporta una columna de un edificio bajan por la sección transversal superior de la columna y a través de sus conexiones con otros miembros directamente a la columna. La situación ideal se tiene cuando las cargas se aplican uniformemente sobre la columna con el centro de gravedad de las cargas, coincidiendo con el centro de gravedad de la columna. Además, es deseable que la columna no tenga defectos, que consista de un material homogéneo y que sea perfectamente recta; todas estas condiciones obviamente son imposibles de satisfacerse.

3.9. Consideraciones generales sobre vigas

Las vigas son miembros que soportan cargas transversales. Se usan generalmente en posición horizontal y quedan sujetas a cargas por gravedad o verticales.

Existen diferentes tipos de vigas entre los cuales cabe mencionar las siguientes: viguetas, dinteles, vigas de fachada, largueros de puente y vigas de piso. Las viguetas son vigas estrechamente separadas para soportar los pisos y techos de edificios; los dinteles se colocan sobre aberturas en muros de mampostería como puertas y ventanas. Las vigas de fachada soportan las paredes exteriores de edificios y también parte de las cargas de los pisos y corredores. Se considera que la capacidad de las vigas de acero para soportar muros de mampostería (junto con la invención de los elevadores) como parte de un marco estructural, permitió la construcción de los rascacielos actuales. Los largueros de puente son las vigas en los pisos de puentes que corren paralelas a la superficie de rodamiento, en tanto que las vigas de piso son las vigas más grandes que en muchos pisos de puentes corren perpendicularmente a la superficie de rodamiento y se usan para transferir las cargas del piso, de los largueros de puente a las traveses o armaduras sustentantes. El término trabe se usa en forma algo ambigua, pero usualmente denota una viga grande a la que se conectan otras de menor tamaño (McCormac y Csernak 2013).

Los perfiles W generalmente resultan las secciones más económicas al usarse como vigas y han reemplazado en esta aplicación casi por completo a las canales y a las secciones S. Los perfiles W tienen un mayor porcentaje de acero concentrado en sus patines que las vigas S, por lo que poseen mayores momentos de inercia y momentos resistentes para un mismo peso. Éstos son relativamente anchos y tienen una rigidez lateral apreciable.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

En este capítulo se muestra la metodología utilizada para el diseño del sistema estructural modular que se desarrolla en el presente trabajo de investigación.

4.1. Determinación de la topología

Elección de cada uno de los elementos que integran el sistema estructural, su distribución dentro del mismo, las condiciones de frontera o de apoyo, así como la importancia o relevancia que tendrá cada uno de ellos.

4.2. Identificación de las acciones de diseño

Esta etapa comprende la identificación de las acciones que pueden obrar sobre la estructura, así como, el establecimiento de las combinaciones de acciones que deberán suponerse aplicadas simultáneamente para garantizar las condiciones de seguridad y servicio estipuladas en la reglamentación vigente; dentro de las principales acciones de diseño se encuentran las cargas muertas, cargas vivas y cargas accidentales.

4.2.1. Cargas muertas.

Son las cargas permanentes de la estructura, incluyen los pesos de todos los elementos constructivos, de los acabados y de todos los elementos que ocupan una posición permanente y cuentan con un peso que no cambie o cambie poco con el tiempo (NTC, 2004).

4.2.2. Cargas vivas.

Cargas variables de la estructura, son aquellas cargas que se producen por el uso y ocupación de las construcciones y que no tienen carácter permanente. Su intensidad varía significativamente con el tiempo (NTC, 2004).

Las cargas vivas que se deberán tomar en cuenta para el análisis y diseño del sistema estructural modular de acuerdo con lo establecido en las (NTC, 2004) son las que a continuación se enlistan.

- *Cargas vivas máximas W_m .* Se emplean para el diseño estructural por fuerzas gravitacionales y para el cálculo de asentamientos inmediatos en los suelos, así como para el diseño de la cimentación de la estructura.
- *Cargas instantáneas W_a .* Se emplean para el diseño sísmico y por viento.
- *Cargas medias W .* Se emplean para el cálculo de asentamientos diferidos y flechas diferidas.

Las cargas vivas utilizadas dentro del presente trabajo de investigación se basaron en las cargas que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4-1. Cargas vivas unitarias (kg/m²).

Destino de piso o cubierta	W	W _a	W _m
a) Habitación (casa–habitación, departamentos, viviendas, dormitorios)	70	90	170
b) Azoteas con pendiente no mayor de 5 %	15	70	100

4.2.3. Cargas accidentales

Cargas que no se deben al funcionamiento normal de la construcción y que pueden alcanzar intensidades significativas solo en pequeños lapsos de tiempo. Dentro de esta clasificación, se encuentran las cargas referentes a los efectos climatológicos o acciones propias del lugar donde se ubique la construcción, tales como: sismo, viento, lluvia, Nieve, etc. (NTC, 2004).

4.2.3.1. Estimación Presión de Viento.

El cálculo de la presión de viento se realizó con base al Manual de Diseño de Obras Civiles “Diseño por Viento” de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008b) para la ciudad de Querétaro, Querétaro. En la Figura 4-1 se presenta un diagrama de flujo con el procedimiento para la obtención de las cargas producidas por la acción del viento.

4.2.3.2. Estimación de fuerza cortante por sismo.

El cálculo de la fuerza cortante producida por el sismo se realizó en base al Manual de Diseño de Obras Civiles “Diseño por Sismo” de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008a).

4.3. Determinación de las combinaciones de diseño

La seguridad de una estructura deberá verificarse para el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad no despreciable de presentarse simultáneamente. En esta etapa se determinan las diferentes combinaciones de acciones que deberán suponerse aplicadas simultáneamente para garantizar las condiciones de seguridad y de servicio. Se toma como referencia el reglamento del (ASCE, 2010) en específico el documento que lleva por título “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, y las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (NTC, 2004). En la Tabla 4-2 se enlistan las diferentes combinaciones de acciones que se utilizaron en el presente trabajo de investigación.

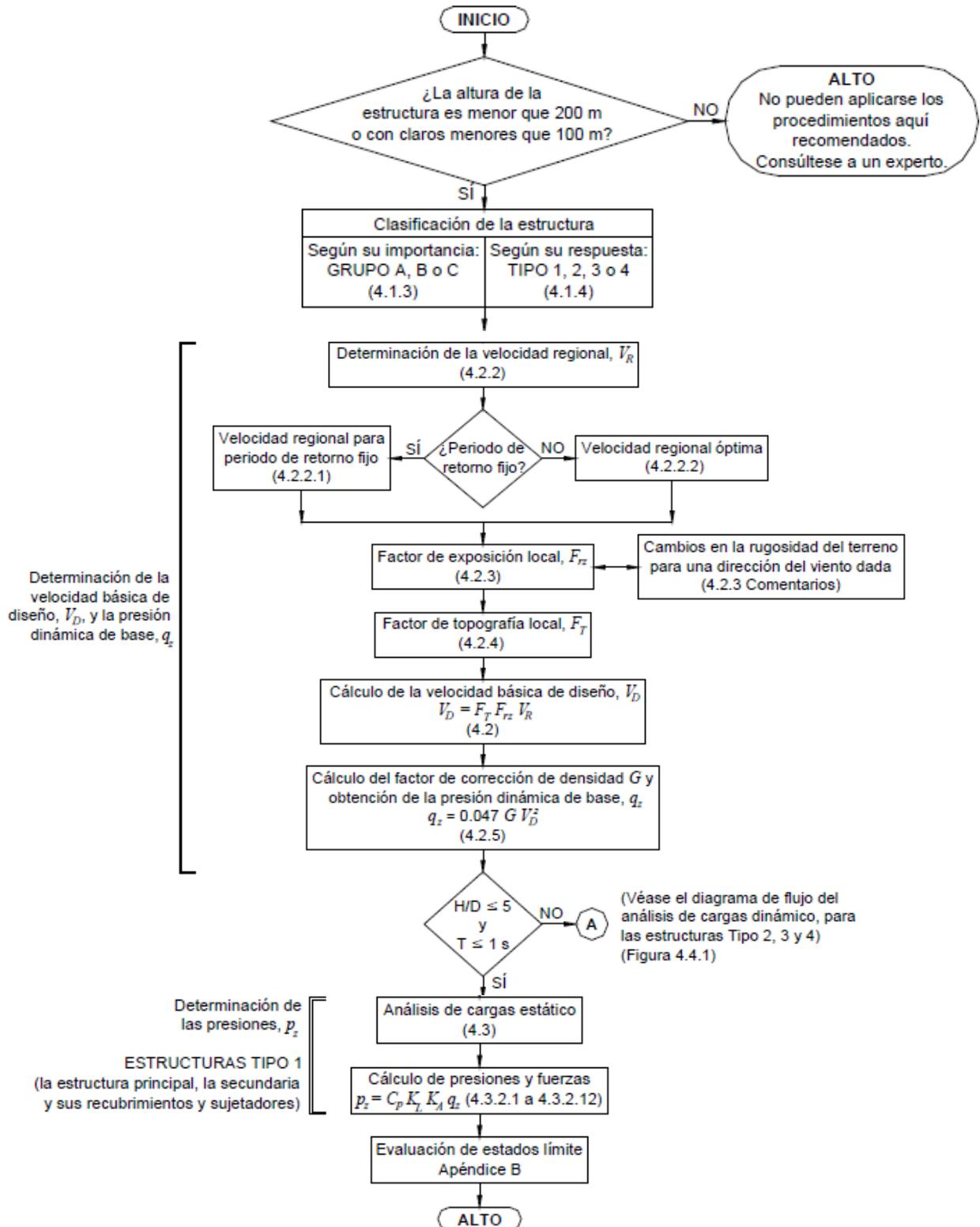


Figura 4-1. Diagrama de flujo que muestra el procedimiento para la obtención de las cargas por viento. (CFE, 2008b).

Tabla 4-2. Combinaciones de acciones que deberán suponerse aplicadas simultáneamente

Condición	Descripción	Tipo
D1	1.4CM	Diseño
D2	1.2CM+1.6CV	Diseño
D3	1.2CM+0.8VX	Diseño
D4	1.2CM+0.8VZ	Diseño
D5	1.2CM+1.6VX	Diseño
D6	1.2CM+1.6VZ	Diseño
D7	1.2CM+CVI+1.6VX	Diseño
D8	1.2CM+CVI+1.6VZ	Diseño
D9	1.2CM+SX+0.3SZ	Diseño
D10	1.2CM+0.3SX+SZ	Diseño
D11	1.2CM+CVI+SX+0.3SZ	Diseño
D12	1.2CM+CVI+0.3SX+SZ	Diseño
D13	0.9CM+1.6VX	Diseño
D14	0.9CM+1.6VZ	Diseño
D15	0.9CM+SX+0.3SZ	Diseño
D16	0.9CM+0.3SX+SZ	Diseño
D17	1.4CM+1.4CV	Diseño
D18	CM+CV	Resistencia

CM = Carga muerta, CV = Carga viva, VX = Viento en dirección X, VZ = Viento en dirección Z, CVI= Carga viva instantánea, SX = Sismo en dirección X, SZ = Sismo en dirección Z.

4.4. Criterios de diseño estructural

4.4.1. Estado límite de falla

Esta etapa comprende el cálculo de la resistencia (fuerzas internas, o combinación de fuerzas internas, correspondientes a las capacidades máximas de una sección. Se entiende como fuerzas internas las fuerzas axiales y cortantes y los momentos de flexión y torsión que actúan en las secciones) de los elementos que conforman el sistema estructural modular.

Para el cálculo de la resistencia de los diferentes elementos que conforman el sistema estructural se utilizan las normativas siguientes.

- El cálculo de la resistencia de los elementos rolados en caliente que conforman la súper-estructura se realiza siguiendo lo establecido en la normativa del “American Institute of Steel Construction” (AISC-10 LRFD) utilizando el criterio de diseño por factores de carga y resistencia.
- Para calcular la resistencia de los elementos formados en frío se utiliza la normativa del “American Iron and Steel Institute” (AISI-01 LRFD) de igual forma utilizando el criterio de diseño por factores de carga y resistencia.
- Por último, el cálculo de la resistencia de los elementos que conforman la sub-estructura se realiza empleando la normativa del “American Concrete Institute” (ACI-318-11), ya que estos elementos son de concreto reforzado.

4.4.2. Estado límite de servicio.

Esta etapa comprende la revisión de condiciones (desplazamientos verticales y horizontales) que puedan impedir el desarrollo adecuado de las funciones para las que se haya proyectado el sistema estructural.

Para la revisión de las deflexiones máximas permisibles de los elementos se utiliza como referencia la normativa del (IBC, 2009). En la tabla 4-3 se presentan las deflexiones máximas permisibles para las cargas de servicio.

Para la revisión de los desplazamientos laterales permisibles, se toma en cuenta lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (NTC, 2004). La tabla 4-4 muestra los valores máximos permisibles para los desplazamientos laterales.

Tabla 4-3. Límites de deflexiones

Miembros	Condiciones de Carga	
	CV	CM+CV
Para miembros de entrepiso	L/360	L/240
Para miembros de techo que soportan plafón de yeso	L/360	L/240
Para miembros de techo que soportan plafones que no son de yeso	L/240	L/180
Para miembros de techo que no soportan plafones	L/180	L/120

CM = Carga muerta, CV = Carga viva. (IBC, 2009)

Tabla 4-4. Distorsiones permisibles de entrepiso

Sistema Estructural	Distorsión
Marcos dúctiles de concreto reforzado (Q= 3 ó 4)	0.03
Marcos dúctiles de acero (Q= 3 ó 4)	0.03
Marcos de acero o concreto con ductilidad limitada (Q= 1 ó 2)	0.015
Losas planas sin muros o contravientos	0.015
Marcos de acero con contravientos excéntricos	0.02
Marcos de acero o concreto con contravientos concéntricos	0.015
Muros combinados con marcos dúctiles de concreto (Q= 3)	0.015
Muros combinados con marcos de concreto con ductilidad limitada (Q= 1 ó 2)	0.01
Muros diafragma	0.006
Muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas con refuerzo horizontal o malla	0.005
Muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas; mampostería de piezas huecas confinada y reforzada horizontalmente; o mampostería de piezas huecas confinada y reforzada con malla	0.004
Muros de carga de mampostería de piezas huecas con refuerzo interior	0.002
Muros de carga de mampostería que no cumplan las especificaciones para mampostería confinada ni para mampostería reforzada interiormente	0.0015

4.1. Modelación

Etapa dentro de la cual se construye un modelo analítico representativo de la estructura, el cual, permita representar tanto las propiedades geométricas como las mecánicas de cada uno de los elementos que comprenden la estructura así como las acciones y combinaciones de acciones a las que estará sujeto el sistema estructural completo. La etapa de análisis y diseño (utilizando los criterios de diseño estructural mencionados anteriormente) se realiza mediante la utilización del software sistematizado RAM Elements v13.00.22.

4.2. Elaboración de Planos Estructurales.

Etapa en la cual se documentan los resultados obtenidos del análisis y diseño del sistema estructural; se realizarán planos estructurales que permitan la correcta fabricación de la estructura dentro de taller y su posterior montaje en el sitio destinado para la estructura, así como la elaboración de una memoria de cálculo donde se especifiquen todas y cada una de las consideraciones que se tomaron en cuenta en el diseño de la estructura.

Los planos estructurales que se elaborarán para poder realizar la correcta fabricación e instalación de la estructura desarrollada, son los que a continuación se enlistan:

- Especificaciones generales,
- Planta de cimentación,
- Detalles de cimentación,
- Desplante de columnas,
- Plantas de entresijos y azoteas,
- Cortes de fachadas, y
- Detalles de conexiones.

4.3. Fabricación de la estructura

En esta etapa se realiza la fabricación total de cada uno de los elementos que conforman la estructura, así como los elementos que permitan la conexión entre los elementos estructurales. El análisis y diseño de los elementos que permiten la conexión del sistema estructural modular se desarrollaron en la tesis “Diseño de conexiones para una estructura de acero tipo vivienda sustentable, prefabricable, modular y desmontable” (García, 2017). Durante el desarrollo de esta etapa se permitirá conocer las ventajas y desventajas asociadas a la fabricación del sistema modular propuesto.

4.4. Montaje de la estructura

Etapa en la cual se realiza el montaje de la estructura completa, lo anterior para poder conocer ventajas y desventajas asociadas al sistema estructural desarrollado. Es importante mencionar que el montaje se realiza con la ayuda de estudiantes de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Querétaro, específicamente alumnos que cursan el octavo semestre y que realizan prácticas para su laboratorio de la materia de Diseño Estructural que imparte el Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras.

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

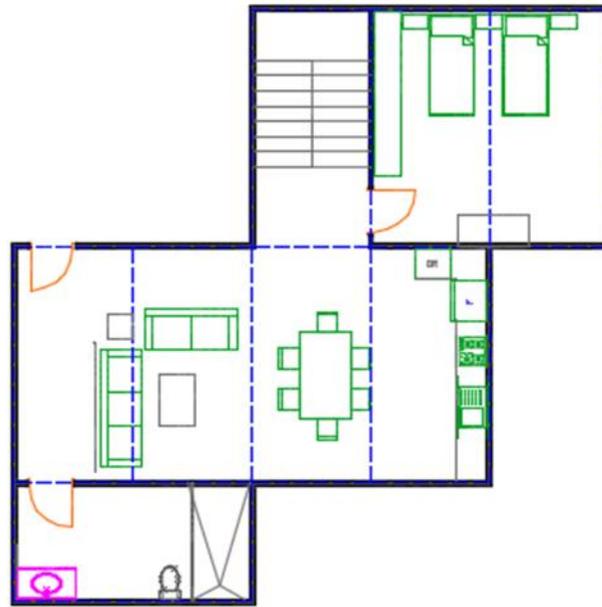
Se aplicó la metodología propuesta en el presente trabajo de investigación con la finalidad de realizar el análisis y diseño del sistema estructural modular propuesto.

5.1. Descripción de la propuesta arquitectónica

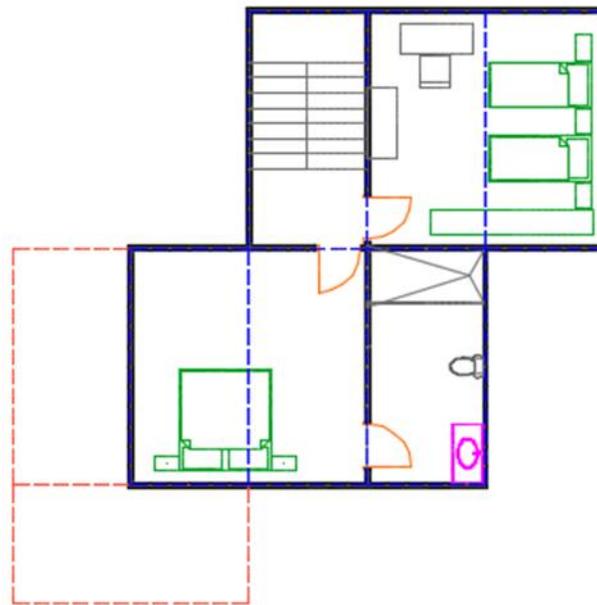
Es importante recalcar que este estudio atiende la reciente convocatoria de la Universidad Autónoma de Querétaro para desarrollar una “Casa Solar Experimental”, por lo cual es un trabajo multidisciplinario en el cual participan varias áreas pertenecientes al Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Entre las áreas que participan en el desarrollo de este proyecto se encuentra el área de arquitectura, contribuyendo con el desarrollo de la propuesta arquitectónica en la cual se basó la propuesta del sistema estructural modular presentada dentro del presente trabajo de investigación.

Una estructura de dos pisos se considera para la casa habitación modular de acero, la cual consiste en tres recamaras que se integran con la utilización de dos módulos individuales cada una de ellas; sala, comedor y cocina donde se utilizan cuatro módulos en total, dos baños que están compuestos por un módulo individual cada uno y por último, dos módulos destinados a los accesos de comunicación (escaleras). En la figura 5-1 se muestra las plantas arquitectónicas de los dos pisos que componen la casa habitación.

La estructura completa se compone de 14 módulos, las dimensiones de dichos módulos son de 2.33 m de ancho y 4.66 m de largo (medidas de centro a centro), tales dimensiones de los módulos fueron desarrolladas por el área de arquitectura perteneciente al Posgrado de la Facultad de ingeniería. El área total de la casa habitación formada por los 14 módulos es de aproximadamente de 152 m².



(a)



(b)

Figura 5-1.- Casa habitación formada por el conjunto de 14 módulos individuales: (a) planta baja; y (b) planta alta.

5.2. Estructuración de los módulos

La estructuración que se eligió para cada una de las unidades modulares individuales consiste en marcos rígidos sin contraventeo. La estructuración de los sistemas de piso para cada uno de los módulos se compone de dos vigas principales, tres vigas secundarias, seis montenes (conectados a las vigas principales) y una serie de tensores. En la Figura 5-2 se muestra en planta un sistema de piso típico, se muestra la disposición de columnas, vigas principales, vigas secundarias, montenes y tensores que componen las unidades modulares.

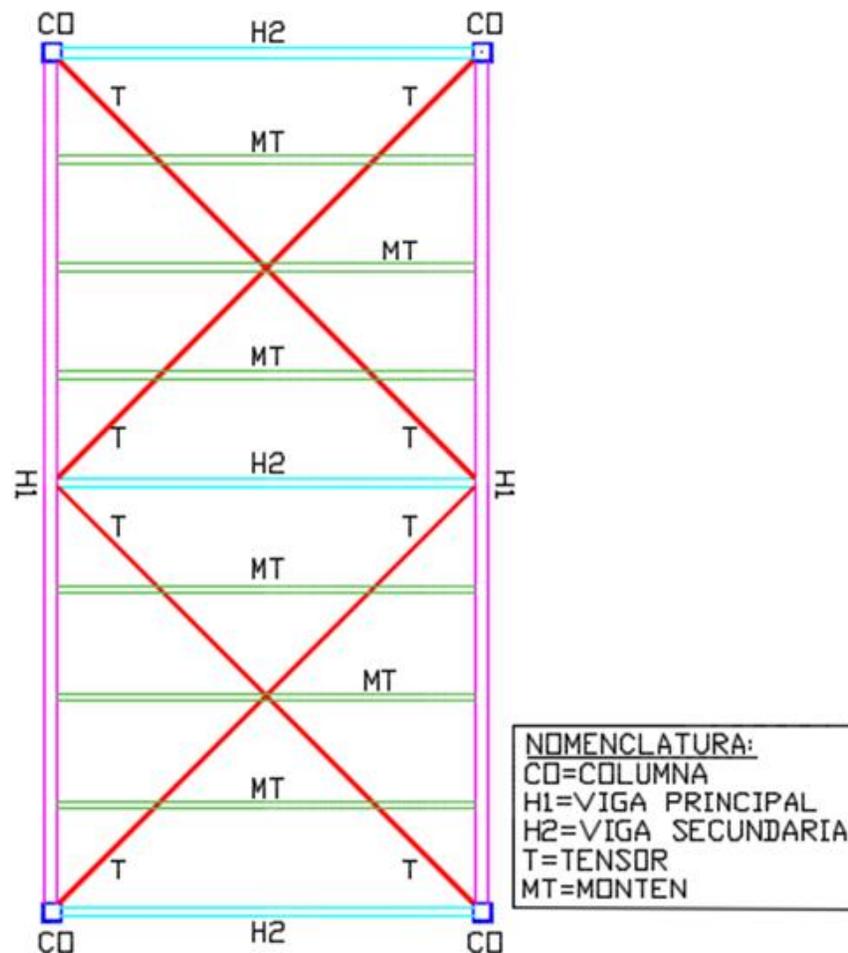


Figura 5-2.- Sistema de piso típico en módulos individuales.

La Figura 5-3 muestra un corte de la fachada norte de la estructura compuesta por los 14 módulos.

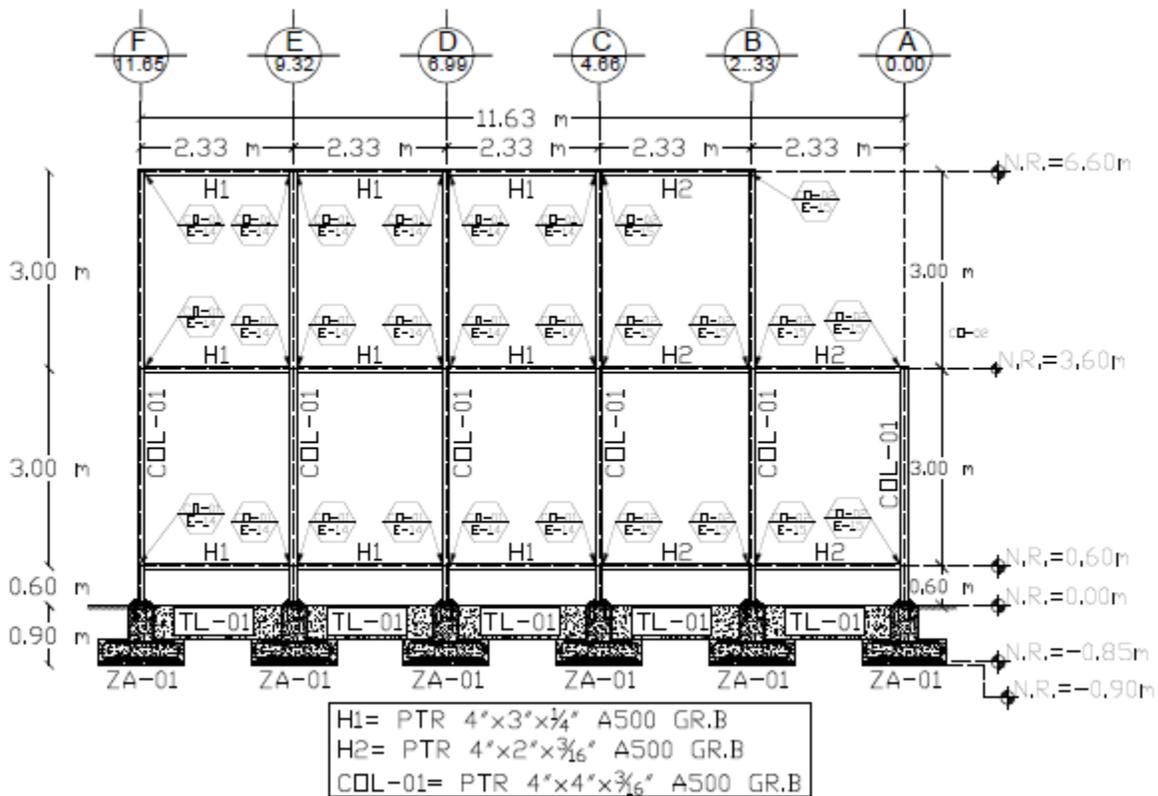


Figura 5-3.- Corte de la fachada norte de la estructura completa.

5.3. Estimación de las acciones de diseño

Comprende la estimación de las acciones que pueden obrar sobre la estructura, así como, el establecimiento de las combinaciones de acciones que deberán suponerse aplicadas simultáneamente para garantizar las condiciones de seguridad y servicio; dentro de las principales acciones de diseño se encuentran las cargas muertas, cargas vivas y cargas accidentales.

5.3.1. Cargas muertas en cubierta.

El sistema de cubierta considerado para la determinación de cargas muertas se basó en un panel aislado marca Ternium Galvatecho de 2.5" de espesor fabricado con lámina metálica calibre

26 en la cara exterior y calibre 28 en la cara interior con núcleo de espuma de poliuretano. En la Tabla 5-1 se muestran las cargas muertas utilizadas en el diseño estructural.

Tabla 5-1. Cargas muertas en cubierta (kg/m²)

Descripción	Carga
Panel aislado marca Ternium Galvatecho de 2.5"	11.5
Instalaciones	15
Total	26.5

5.3.2. Cargas muertas de entrepisos.

Las cargas muertas que se consideraron en los sistemas de entrepisos se basaron en un sistema de piso formado a base de hojas de triplay de 1" de espesor y de una superficie de acabado a base de piso laminado de 14 mm de espesor. En la Tabla 5-2 se encuentran las cargas muertas aplicadas a los sistemas de entepiso para la realización del análisis y diseño estructural.

Tabla 5-2. Cargas muertas de entepiso (kg/m²)

Descripción	Carga
Hoja de triplay de 1" de espesor	23
Piso laminado de 14 mm	15
Instalaciones	15
Total	53

5.3.3. Estimación de cargas vivas

Las cargas vivas que se tomaron en cuenta para el análisis y diseño del sistema estructural modular se basaron en lo que establecen las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTC, 2004) y se muestran en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Cargas vivas unitarias (kg/m²).

Destino de piso o cubierta	W	W _a	W _m
a) Habitación (casa–habitación, departamentos, viviendas, dormitorios)	70	90	170
b) Azoteas con pendiente no mayor de 5 %	15	70	100

W= Cargas vivas medias, W_a = Cargas vivas instantáneas y W_m = Cargas vivas máximas

5.3.4. Estimación de la presión del viento

El cálculo de la presión de viento se realiza con base al Manual de Diseño de Obras Civiles “Diseño por Viento” de la Comisión Federal de Electricidad (CFE 2008b) para la ciudad de Querétaro, Querétaro.

5.3.4.1. Clasificación de la estructura.

5.3.4.1.1 Según su importancia

La estructura propuesta queda clasificada dentro del Grupo B ya que es una estructura para la cual se recomienda un grado de seguridad moderado. Está considerada como una estructura que al fallar, generará baja pérdida de vidas humanas.

5.3.4.1.2 Según su respuesta ante la acción del viento

Se clasifica como una estructura perteneciente al Tipo 1, ya que es poco sensible a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Queda comprobado al evaluar la relación de esbeltez, λ , (la cual se define como la relación entre la altura y la menor dimensión en planta), que es menor o igual a cinco, y además el periodo natural de vibración de la estructura es menor de 1 segundo.

Ya que la estructura se clasifica como de Tipo 1, la evaluación de las fuerzas inducidas sobre la estructura al paso del flujo del viento se realiza mediante un análisis estático como procedimiento analítico.

5.3.4.2. Efectos a considerar

Para el diseño de estructuras Tipo 1 solo se tomarán en cuenta los efectos estáticos del viento (empujes y succiones estáticos).

5.3.4.3. Método aplicado

Para el cálculo de empujes y succiones sobre estructuras pertenecientes al Tipo 1 debidas a la presión del viento, se emplea el método estático según lo estipulado en el Manual de Diseño de Obras Civiles “Diseño por Viento” de la Comisión Federal de Electricidad (CFE 2008b).

5.3.4.4. Determinación de la velocidad básica de diseño

La velocidad básica de diseño, V_D , es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de la misma (CFE, 2008b).

La velocidad básica de diseño, en km/h, se obtiene con la ecuación:

$$V_D = F_T * F_{rz} * V_R \quad (5-1)$$

donde:

F_T = Factor que depende de la topografía local, adimensional,

F_{rz} = Factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional, y

V_R = Velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en km/h.

5.3.4.5. Velocidad regional para un periodo de retorno fijo

La velocidad regional de ráfaga del viento, V_R , es la velocidad máxima que puede ser excedida en un cierto periodo de retorno, T , en años, en una zona o región determinada del país. Se determina empleando la importancia de la estructura (clasificada dentro del Grupo B) que está relacionada con un periodo de retorno fijo.

En la Figura 5-4 se muestra el mapa de isotacas (líneas que unen puntos donde el viento sopla con la misma intensidad) regionales correspondiente a un periodo de retorno de 50 años, el cual es recomendado para el diseño por viento de estructuras pertenecientes al Grupo B.

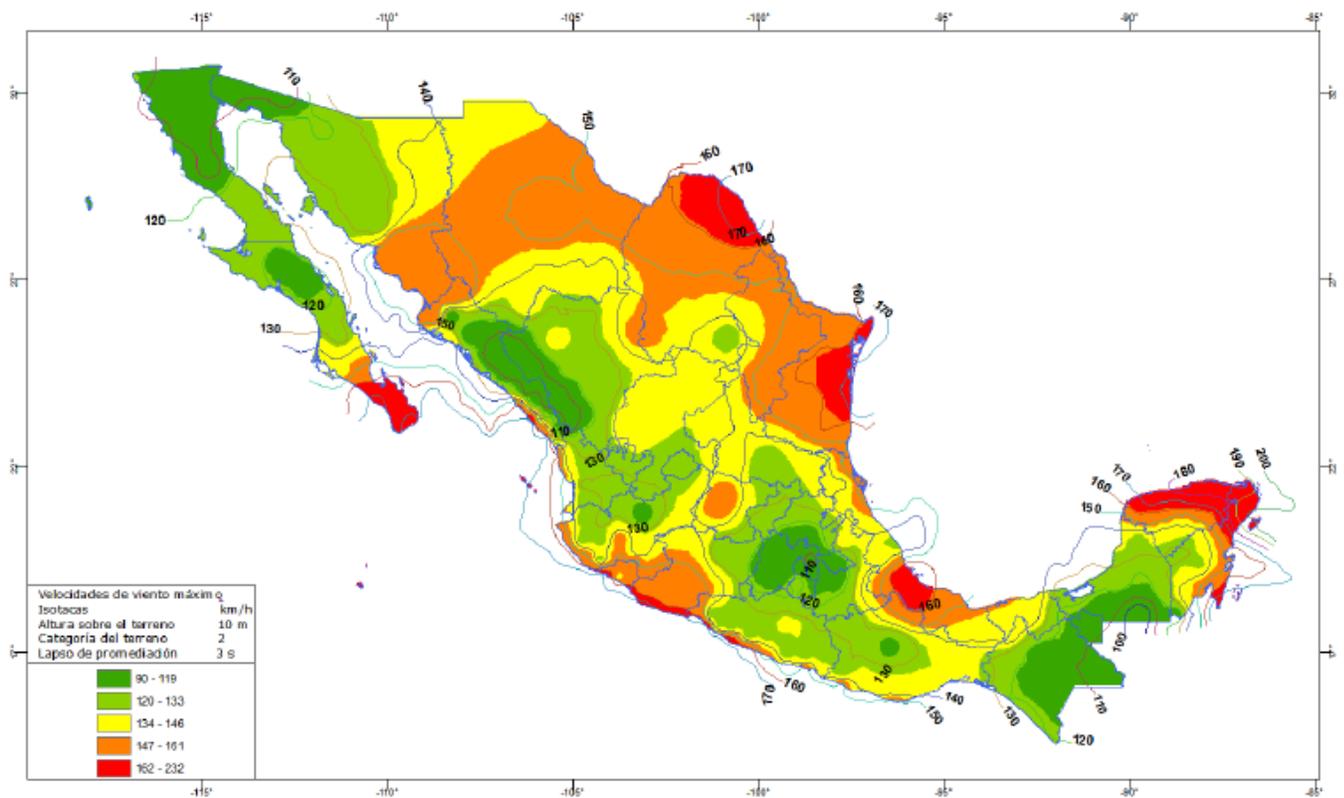


Figura 5-4.- Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años. (CFE, 2008a).

5.3.4.6. Factor de exposición local

El factor de exposición local, F_{rz} , establece la variación de la velocidad del viento con la altura, en función de la categoría del terreno. Este factor se obtiene con la siguiente expresión:

$$F_{rz} = c \quad \text{si} \quad z \leq 10 \quad (5-2)$$

donde:

z = Altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, en m, y

c = el coeficiente de escala de rugosidad, adimensional.

La variable c está en función de la rugosidad del terreno, el valor recomendado para una categoría tres (terreno cubierto por obstrucciones como correspondientes a construcciones de tipo casa habitación) es de 0.881, por lo tanto, el valor del factor de exposición local es igual a 0.881.

5.3.4.7. Datos de diseño para el cálculo de las presiones.

Datos

- Ciudad = Querétaro, Querétaro.
- Clasificación de la Estructura = B (CFE, 2008b).
- Periodo de Retorno = 50 años (CFE, 2008b).
- Velocidad Regional = 130 km/hr
- Altura sobre el nivel mal = 1813 metros (CFE, 2008b).
- Temperatura promedio anual = 18.8 °C (CFE, 2008b).
- Pendiente de la Cubierta = 2 %.
- Altura promedio de la estructura = 6.60 metros.

Con los datos anteriores se procede al cálculo de las presiones de viento netas en las diferentes zonas de ocurrencia de la estructura. En la tabla 5-4 se muestran las presiones netas obtenidas.

Tabla 5-4. Presiones netas de viento (kg/m²).

Zona de Ocurrencia	Presión (kg/m²)	Tipo
Muro Barlovento	67.4	Empuje
Muro Sotavento	-10.375	Succión
Muro Lateral 1	-51.855	Succión
Muro Lateral 2	-36.3	Succión
Cubierta Barlovento	-119.26	Succión
Cubierta Sotavento	-57.04	Succión

5.4. Análisis sísmico

Según lo establecido en el Manual de Diseño de Obras Civiles “Diseño por Sismo” de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008a) el método estático es aplicable a edificios regulares cuya altura sea menor o igual que 30 m y estructuras irregulares con altura no mayor de 20 m. En terreno rocoso, estos límites se incrementan a 40 y 30 m, respectivamente. Por lo anterior, el método de análisis aplicado para el diseño sísmico es el método estático.

El método de análisis estático consta esencialmente de los siguientes pasos:

1. Calcular fuerzas laterales aplicadas en los centros de masa de los pisos que produzcan efectos equivalentes a la acción sísmica.
2. Distribuir las fuerzas laterales del paso 1 y los momentos torsionantes asociados a estas fuerzas entre los sistemas resistentes a carga lateral que conforman la estructura, como son marcos, muros o combinaciones de éstos.
3. Analizar cada sistema resistente ante las cargas laterales que le correspondan.

Para calcular las fuerzas cortantes a diferentes niveles de una estructura se supondrá un conjunto de fuerzas de inercia laterales actuando sobre cada uno de los niveles, en los que se suponen concentradas las masas, como se ilustra en la Figura 5-4.

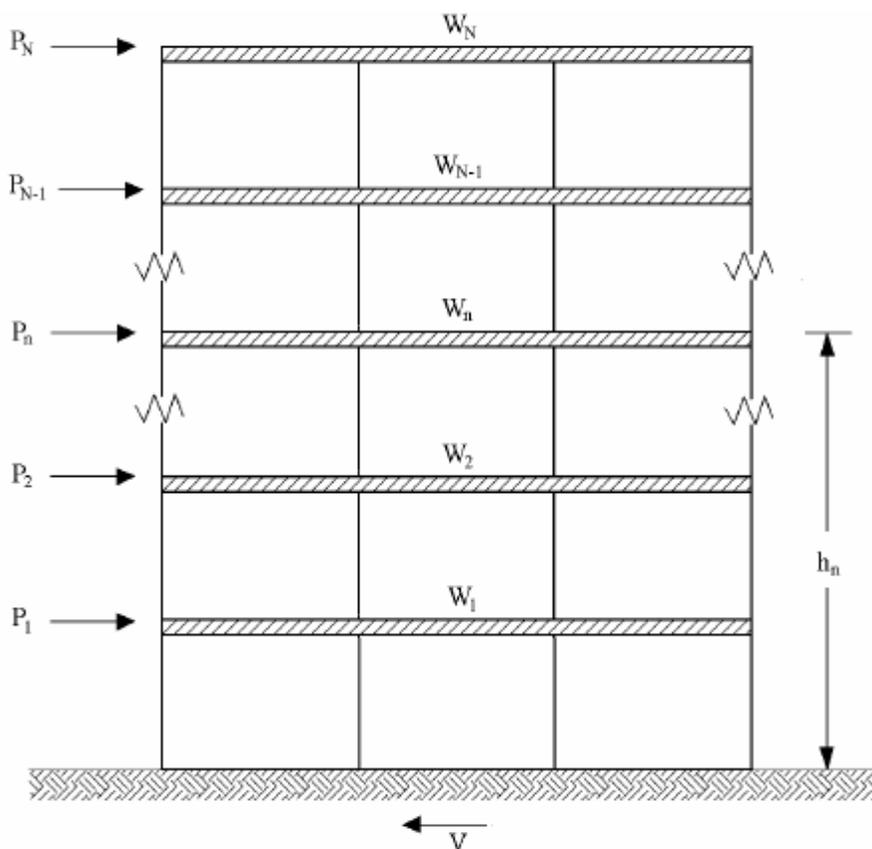


Figura 5-5.- Fuerzas sísmicas aplicadas a un edificio. (CFE, 2008a).

5.5. Determinación de las combinaciones de diseño

Las diferentes combinaciones de acciones que deberán suponerse aplicadas simultáneamente para garantizar las condiciones de seguridad y de servicio se muestran en la Tabla 5-4. Las combinaciones D1, D2 y D17 involucran la interacción entre las acciones permanentes y acciones variables que pueden presentarse en la estructura; las combinaciones que incluyen la interacción entre las acciones permanentes, variables y accidentales son las condiciones D3 a D16, todas las combinaciones anteriores se emplean para la revisión de los estados límite de falla. Por

último la combinación correspondiente a la condición D18 se emplea para la revisión de los estados límite de servicio.

En cuanto a las combinaciones que involucran acciones accidentales (sismo y viento) la estructura se analiza bajo la acción de dos componentes horizontales ortogonales.

Tabla 5-5. Combinaciones de acciones para la revisión de los estados límite (de falla y servicio)

Condición	Descripción	Tipo
D1	1.4CM	Diseño
D2	1.2CM+1.6CV	Diseño
D3	1.2CM+0.8VX	Diseño
D4	1.2CM+0.8VZ	Diseño
D5	1.2CM+1.6VX	Diseño
D6	1.2CM+1.6VZ	Diseño
D7	1.2CM+CVI+1.6VX	Diseño
D8	1.2CM+CVI+1.6VZ	Diseño
D9	1.2CM+SX+0.3SZ	Diseño
D10	1.2CM+0.3SX+SZ	Diseño
D11	1.2CM+CVI+SX+0.3SZ	Diseño
D12	1.2CM+CVI+0.3SX+SZ	Diseño
D13	0.9CM+1.6VX	Diseño
D14	0.9CM+1.6VZ	Diseño
D15	0.9CM+SX+0.3SZ	Diseño
D16	0.9CM+0.3SX+SZ	Diseño
D17	1.4CM+1.4CV	Diseño
D18	CM+CV	Servicio

CM = Carga muerta, CV = Carga viva, VX = Viento en dirección X, VZ = Viento en dirección Z, CVI= Carga viva instantánea, SX = Sismo en dirección X, SZ = Sismo en dirección Z.

5.6. Análisis y diseño estructural

El análisis y diseño estructural del sistema propuesto se realiza mediante la utilización del software sistematizado RAM Elements v13.00.22. El sistema estructural propuesto se compone por un conjunto de 14 módulos individuales, los cuales tienen unas dimensiones de 2.33 m de ancho, 4.66 m de largo y una altura de 3 m.

La Figura 5-5 presenta el modelo tridimensional de uno de los módulos individuales que componen al sistema estructural global.

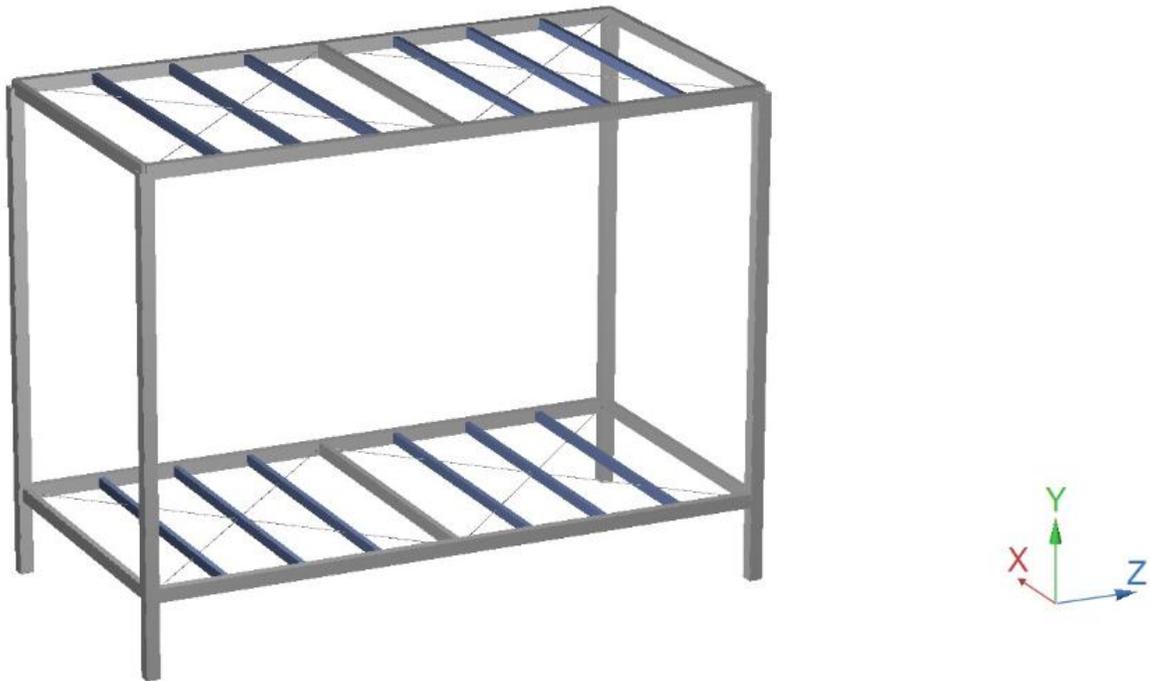


Figura 5-6.- Modelo tridimensional de un módulo individual

En las Figuras 5-6 se muestra el modelo del sistema estructural completo, el cual está compuesto por un total de 14 módulos individuales distribuidos de acuerdo a la propuesta arquitectónica realizada por el área de arquitectura del Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

La Figura 5-7 muestra las condiciones de frontera de cada uno de los elementos que componen el sistema estructural.

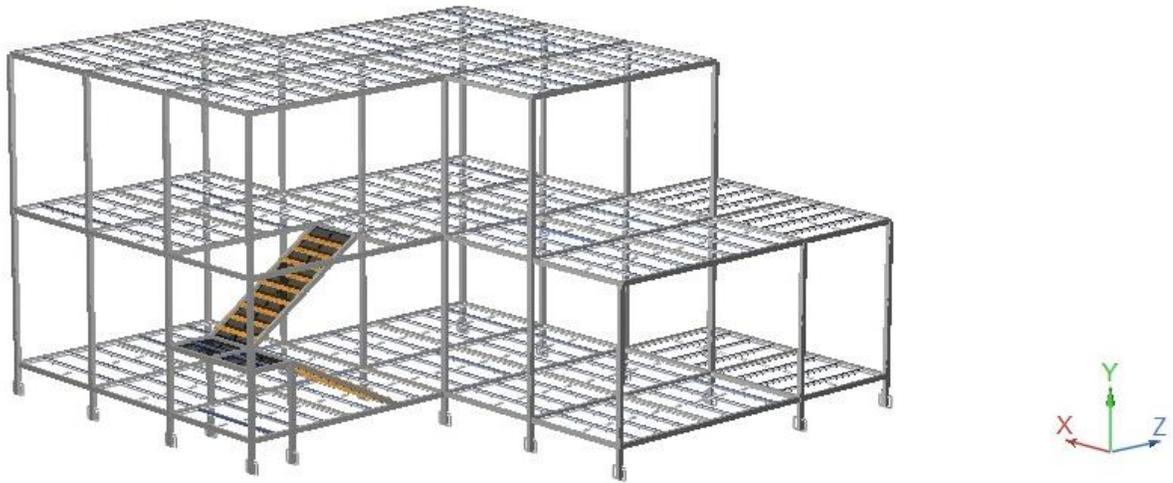


Figura 5-7.- Modelo tridimensional del sistema estructural propuesto

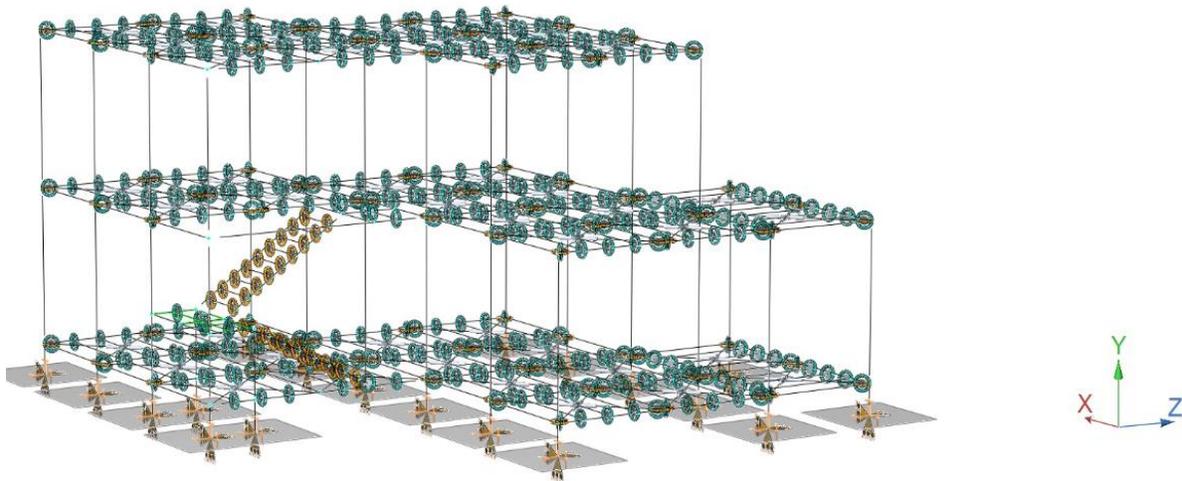


Figura 5-8.- Condiciones de frontera del sistema estructural propuesto

5.7. Elaboración de los planos estructurales

Una vez que se finalizó con el análisis y diseño estructural del sistema propuesto y se realizó la revisión del estado límite de falla o resistencia y de los estados límite de servicio, se procede a la elaboración de los planos estructurales que servirán para la etapa de fabricación y montaje de la estructura completa. En la Tabla 5-6 se muestra la relación de los planos que se elaboraron.

Tabla 5-6. Listado de planos estructurales del sistema propuesto

Nomenclatura	Descripción
E-00	Especificaciones generales
E-01	Planta de cimentación
E-02	Detalles de cimentación
E-03	Desplante de columnas
E-04	Detalles de placas base
E-05	Planta de diafragma 1
E-06	Planta de montenes 1
E-07	Planta de diafragma 2
E-08	Planta de montenes 2
E-09	Planta de diafragma 3
E-10	Planta de montenes 3
E-11	Cortes en Fachadas
E-12	Corte A-A' y B-B '
E-13	Detalles de escalera, cortes C-C ' y D-D '
E-14	Plano de conexión CX-01
E-15	Plano de conexión CX-02
E-16	Plano de conexión CX-03 y CX-04A
E-17	Plano de conexión CX-04B y CX-04C
E-18	Plano de conexión CX-05
E-19	Plano de conexión CX-06
E-20	Plano de conexión CX-07
E-21	Plano de conexión CX-08
E-22	Plano de conexión CX-09
E-23	Plano de conexión CX-10 y CX-11
E-24	Plano de conexión CX-12
E-25	Plano de conexión CX-13
E-26	Plano de conexión CX-14
E-27	Plano de conexión CX-15
E-28	Plano de conexión CX-16 y CX-17

En el apéndice A que se encuentra en la parte final de este proyecto de investigación se muestra la totalidad de los planos realizados. Es importante mencionar que los planos correspondientes a conexiones surgieron de la tesis de Maestría “Diseño de conexiones para una estructura de acero tipo vivienda sustentable, prefabricable, modular y desmontable” (García, 2017).

5.8. Fabricación de la estructura

La fabricación de los elementos que conforman la estructura, así como los elementos que permitan la conexión entre los diferentes elementos estructurales se construyeron todos y cada uno de ellos en un taller de fabricación especializado, la etapa de fabricación tuvo una duración de aproximadamente 2 semanas. En las Figuras 5-9 a 5-13 se muestra el proceso de fabricación de algunos de los elementos que componen el sistema estructura.



Figura 5-9.- Fabricación de las diferentes conexiones para unir a los elementos estructurales



Figura 5-10.- Unión de conexiones a elementos estructurales tipo columna



Figura 5-11.- Fabricación de vigas principales y unión de placas de cortante para conectar montenes.



Figura 5-12.- Fabricación de montenes.



Figura 5-13.- Unión de conexiones a vigas principales para conectar vigas secundarias.

5.9. Montaje de la estructura.

El proceso de montaje ayuda a conocer ventajas y desventajas asociadas al sistema estructural desarrollado, como ya se mencionó anteriormente este proceso se llevó a cabo con la ayuda de estudiantes de Licenciatura de la Universidad Autónoma de Querétaro. La cimentación que soporta el sistema estructural se realizó mediante la contratación de personal de obra civil y con la ayuda del financiamiento recibido por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de la convocatoria “Casa Solar Experimental” impulsada por la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (DIPFI-UAQ).

En las Figuras 5-14 a 5-16 se muestra el proceso de construcción de la cimentación y en las Figuras 5.17 a 5-22 se muestra el proceso de ensamblado de cada uno de los elementos pertenecientes al sistema estructural modular.

Así como la totalidad de la estructura se manufacturó en un entorno de taller (prefabricación), la totalidad de los elementos estructurales se montaron o ensamblaron en campo o sitio de la obra.



Figura 5-14.- Retiro de jardinería en zona donde se construirá la cimentación.



Figura 5-15.- Nivelación de zona donde se construirá la cimentación



Figura 5-16.- Cimentación terminada al 100% y lista para recibir estructura



Figura 5-17.- Traslado de los elementos que conforman la estructura al sitio donde se realizará el montaje



Figura 5-18.- Montaje de elementos verticales tipo columna



Figura 5-19.- Montaje de sistemas de piso



Figura 5-20.- Montaje de escalera



Figura 5-21.- Montaje de últimos elementos de azotea



Figura 5-22.- Estructurara ensamblada al 100 %

El proceso de montaje duro aproximadamente 6 meses, fue un periodo donde se trabajaba en promedio 10 horas por semana. Se lograron identificar ventajas asociadas al sistemas estructural modular propuesto tales como: el fácil montaje, ya que se cuenta con poco elementos estructurales y se logra ensamblar de manera muy intuitiva, elementos relativamente ligeros que facilitan el ensamblaje, y la rapidez con la que se puede montar teniendo una experiencia previa en el montado de estructuras metálicas. También se logró identificar desventajas, las cuales fueron: errores en el proceso de perforación de las conexiones y la peligrosidad del manejo de los elementos en las alturas.

Al momento de redactar esta tesis se encuentran realizando trabajos en la envolvente del edificio (plomería, electricidad, así como acabados interiores y exteriores). En la Figuras 5-23 (a) (b) y (c) se muestran los avances que se tienen al momento de la redacción de este documento.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-23 (a), (b) y (c).- Avances en la envolvente del edificio.

6. RESULTADOS

6.1. Revisión del estado límite de resistencia

Los resultados obtenidos del análisis y diseño del sistema estructural a base de módulos individuales tomando como referencia el estado límite de resistencia son los siguientes:

- La resistencia de los elementos rolados en caliente que conforman la súper-estructura cumplen con la normativa del “American Institute of Steel Construction” (AISC-10 LRFD), el cálculo de esta resistencia se realizó utilizando el criterio de diseño por factores de carga y resistencia.
- La resistencia de los elementos formados en frío cumplen con la normativa del “American Iron and Steel Institute” (AISI-01 LRFD) de igual forma utilizando el criterio de diseño por factores de carga y resistencia.

La relación de esfuerzos de cada uno de los diferentes elementos que conforman la súper-estructura del sistema propuesto se muestra en la tabla 6-1.

Tabla 6-1. Relación de esfuerzos de los elementos críticos del sistema estructural

Elemento	Perfil	Material	Miembro Crítico	Relación de esfuerzos
Columna	PTR 4"x4"x3/16"	A500 GRB Rectangular	93	0.54
Viga Principal	PTR 4"x3"x3/16"	A500 GRB Rectangular	62	0.97
Viga Secundaria	PTR 4"x2"x3/16"	A500 GRB Rectangular	66	0.47
Monten	3 MT 14	A570 GR50 Cold Form	163	0.87
Alfardas	PTR 4"x3"x3/16"	A500 GRB Rectangular	417	0.49
Tensor	Redondo 3/8	A36	284	0.89

6.2. Revisión de los estados límite de servicio.

Los resultados obtenidos en la revisión de los estados límite de servicio, cumplen con los requisitos establecidos por el Reglamento de las construcciones para el Distrito Federal en sus Normas técnicas complementarias (NTC, 2004), así como con lo estipulado en el International Building Code (IBC, 2009) con relación a desplazamientos verticales permisibles y a desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas cortantes sísmicas.

6.2.1. Desplazamientos verticales

Con base en el análisis y diseño del sistema estructural modular propuesto se determinaron los elementos críticos ante desplazamientos verticales, dichos elementos fueron las vigas principales y montenes.

La tabla 6-2 muestra los límites de deflexiones establecidos en el International Building Code (IBC, 2009), y la tabla 6-3 muestra los desplazamiento verticales máximos de los elementos críticos, desplazamientos que se obtuvieron en la etapa de análisis y diseño estructural.

Tabla 6-2. Límites de deflexiones

Miembros	Condiciones de Carga	
	CV	CM+CV
Para miembros de entepiso	L/360	L/240
Para miembros de techo que soportan plafón de yeso	L/360	L/240
Para miembros de techo que soportan plafones que no son de yeso	L/240	L/180
Para miembros de techo que no soportan plafones	L/180	L/120

CM = Carga muerta, CV = Carga viva. (IBC, 2009)

Tabla 6-3. Deflexiones en elementos críticos

Elemento	Perfil	Condición de carga	
		CV	CM+CV
Viga Principal	PTR 4"x3"x3/16"	L/389	L/293
Monten	3 MT 14	L/396	L/243

En las tablas 6-3 se puede apreciar que las deflexiones máximas en los elementos críticos del sistema estructural modular son menores a las deflexiones permisibles que se muestran en la tabla 6-2, por lo cual, el sistema estructural propuesto cumple con los criterios del estado límite de servicio establecidos en el Reglamento de las construcciones para el Distrito Federal en sus Normas técnicas complementarias (NTC, 2004), y en el International Building Code (IBC, 2009)

6.3. Relación peso/Superficie

En cuanto a la relación peso/superficie del sistema propuesto, en la tabla 6-4 se muestra el peso total de los diferentes elementos que componen el sistema estructural, así como el peso total de la estructura global.

Tabla 6-4. Peso de la totalidad de elementos que componen el sistema estructural

Elemento	Perfil	Material	Unidad de peso (t/m)	Longitud (m)	Peso Total (t)
Columna	PTR 4"x4"x3/16"	A500 GRB Rectangular	0.0144	103.97	1.50
Viga Principal	PTR 4"x3"x3/16"	A500 GRB Rectangular	0.0125	134.85	1.69
Viga Secundaria	PTR 4"x2"x3/16"	A500 GRB Rectangular	0.0106	137.18	1.45
Monten	3 MT 14	A570 GR50 Cold Form	0.00264	295.28	0.78
Alfaldas	PTR 4"x3"x3/16"	A500 GRB Rectangular	0.0124	20.48	0.25
Tensor	Redondo 3/8	A36	0.00056	276.20	0.15
				Total	5.82

La relación peso superficie del sistema estructural propuesto queda de la siguiente forma:

- Peso total de la estructura = 5.82 ton = 5, 820 kg
- Superficie ocupada = 226 m²

Por lo tanto,

- Relación peso/superficie = 25.75 kg/m²

La relación peso/superficie obtenida en el sistema estructural propuesto se compara con la relación peso/superficie de estructuras para la construcción de naves industriales, las cuales están consideradas como estructuras ligeras. Por lo anterior, se logra cumplir con el objetivo de desarrollar y fabricar un sistema estructural de acero para soporte de una vivienda sustentable a base de unidades modulares ligeras, objetivo que se planteó al inicio de este proyecto de investigación.

7. CONCLUSIONES

Se logra cumplir con el objetivo general de desarrollar y fabricar un sistema estructural de acero para soporte de una vivienda sustentable, a base de unidades modulares individuales, ligeras, prefabricadas y desmontables. Además el sistema desarrollado cumple con los principios de diseño de estados limite (estado límite de falla o resistencia y estado límite de servicio) estipulados en la normativa actual.

La fabricación de los elementos estructurales que componen la estructura global fue relativamente fácil ya que se cuenta con un número reducido de ellos.

El tiempo de fabricación se reduce sustancialmente llevando el proceso a un entorno de taller donde se puede tener un mayor control en la calidad de los materiales y en los procesos de fabricación.

El montaje fue rápido, sencillo y con la menor cantidad de herramienta y mano de obra especializada, se logró realizar el montaje del 80% de la estructura con ayuda de estudiantes de licenciatura, los cuales no tienen ningún tipo experiencia o certificación en el montaje de estructuras de acero, por lo anterior, se comprueba que el sistema estructural desarrollado puede ser montado por personas con habilidades básicas de construcción.

El motivo por el cual no se montó el 100 % de la estructura es por el riesgo que implica el trabajar en las alturas (ya que los estudiantes no tienen la pericia necesaria para realizar este tipo de trabajos) y por la falta de algunas herramientas que son de uso común en el montaje de estructuras de acero pero con las cuales no contábamos.

Se cumple con el objetivo de que el sistema estructural sea prefabricable, ya que la totalidad de la de los elementos que lo componen se manufacturó en un entorno de taller.

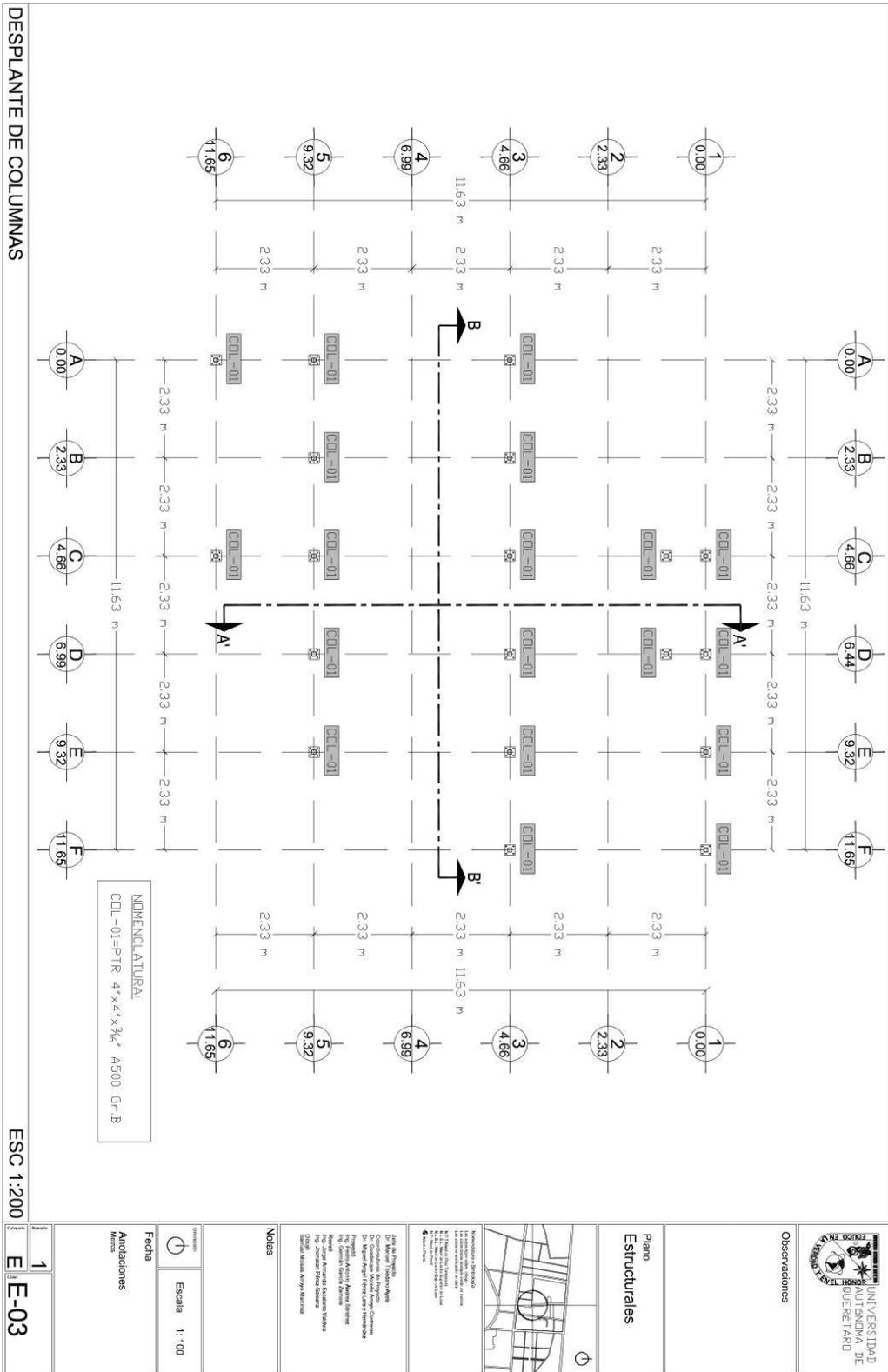
En resumen, este proyecto de investigación logra desarrollar y fabricar un sistema estructural ligero (gracias a su baja relación peso/superficie), prefabricable (ya que reduce las actividades in situ, reemplazándolas por procesos de fabricación más eficientes y rápidos dentro de taller), montable y desmontable (lo cual se comprobó al armar y desarmar en varias ocasiones secciones del sistema estructural global).

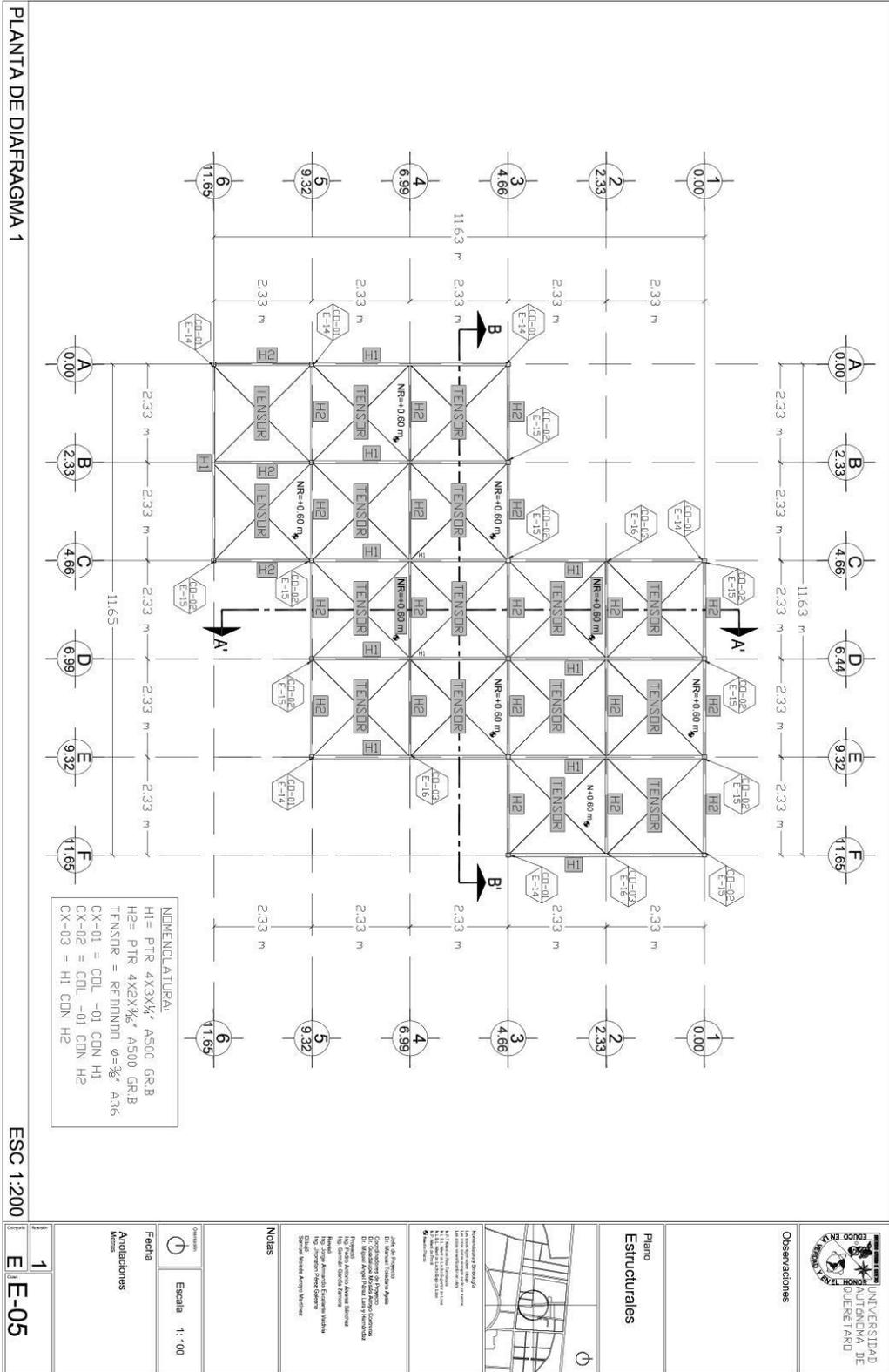
8. REFERENCIAS

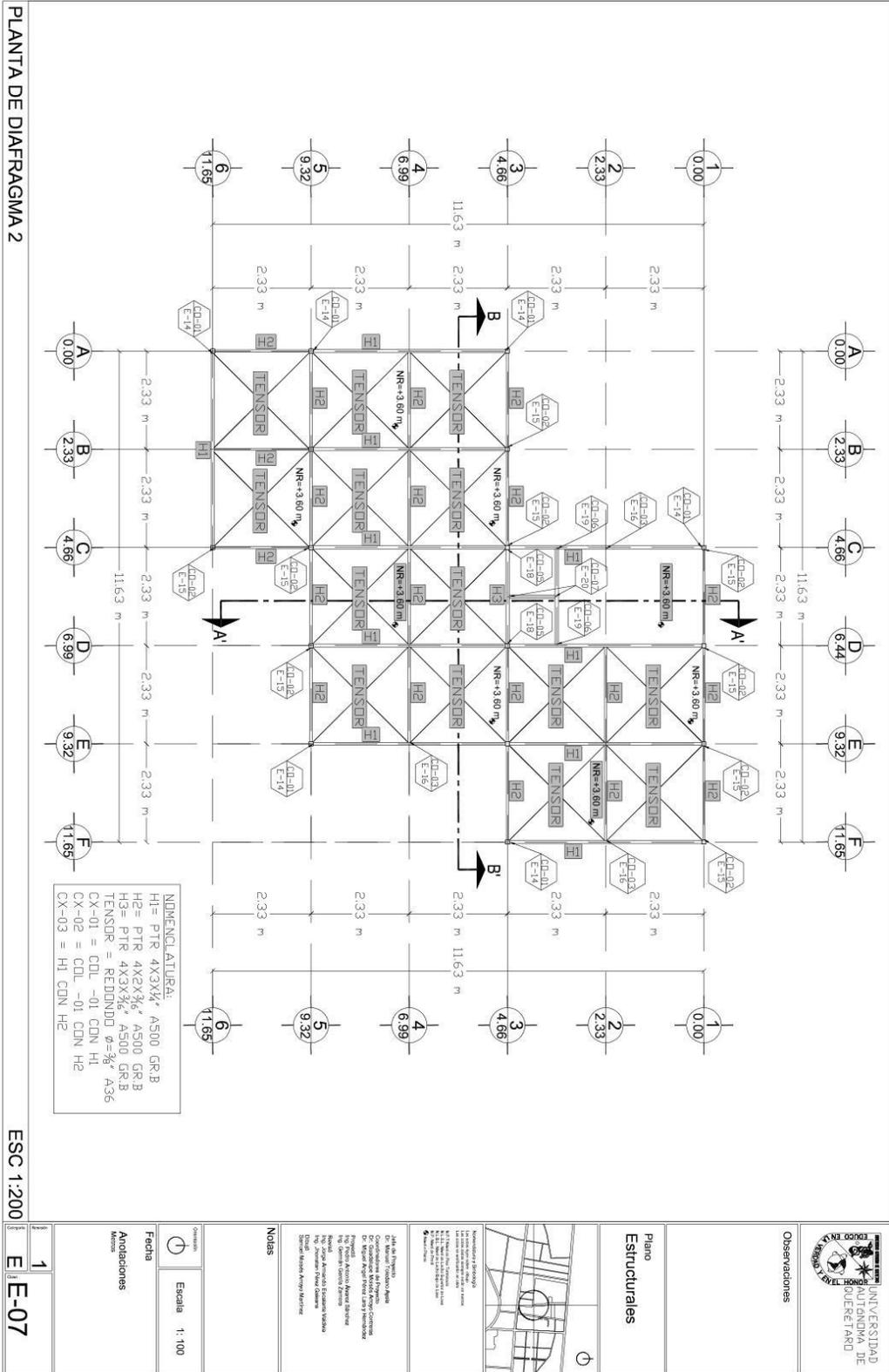
- American Concrete Institute (ACI), 2011, Building code requirements for structural concrete and commentary, Farmington Hills, MI.
- American Institute of Steel Construction (AISC), 2010, Specifications for structural steel buildings, Chicago.
- American Iron and Steel Institute (AISI), 2001, Specification for the design of cold formed steel structural members, Washington, D. C.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010, Minimum design loads for buildings and other structures, Standard Committee, Reston, Virginia.
- Annan C. D., Youssef M. A., y Naggar M. H., 2009, Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames, *Eng. Struct.*, 31, 1435–1446.
- Annan C. D., Youssef M. A., y El-Naggar M. H., 2009, Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings, *J. Earthquake Eng.* 13 (1), 1–21.
- Arenas Cabello, F. J. 2008. Los materiales de construcción y el medio ambiente. *Revista electrónica de derecho ambiental* N°17 - ISSN 1576-3196.
- Burgan, B. A., and M. R. Sansom. 2006. Sustainable steel construction. *J. Constr. Steel Res.* 62:1178–1183.
- Casañas, V. 2011. La energía como indicador del impacto ambiental en los sistemas constructivos, conformados a partir de materiales de producción nacional. Porto Alegre, Brasil.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2008, Manual de diseño de obras civiles diseño por sismo, México.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2008, Manual de diseño de obras civiles diseño por viento, México.
- Congress, S. 2012. Structures Congress 2012 © ASCE 2012 35:35–45.
- Hernández Castañeda, O., y C. J. Mendoza Escobedo. 2006. Durabilidad e Infraestructura: Retos e Impacto Económico. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. VII, pp. 57-70.

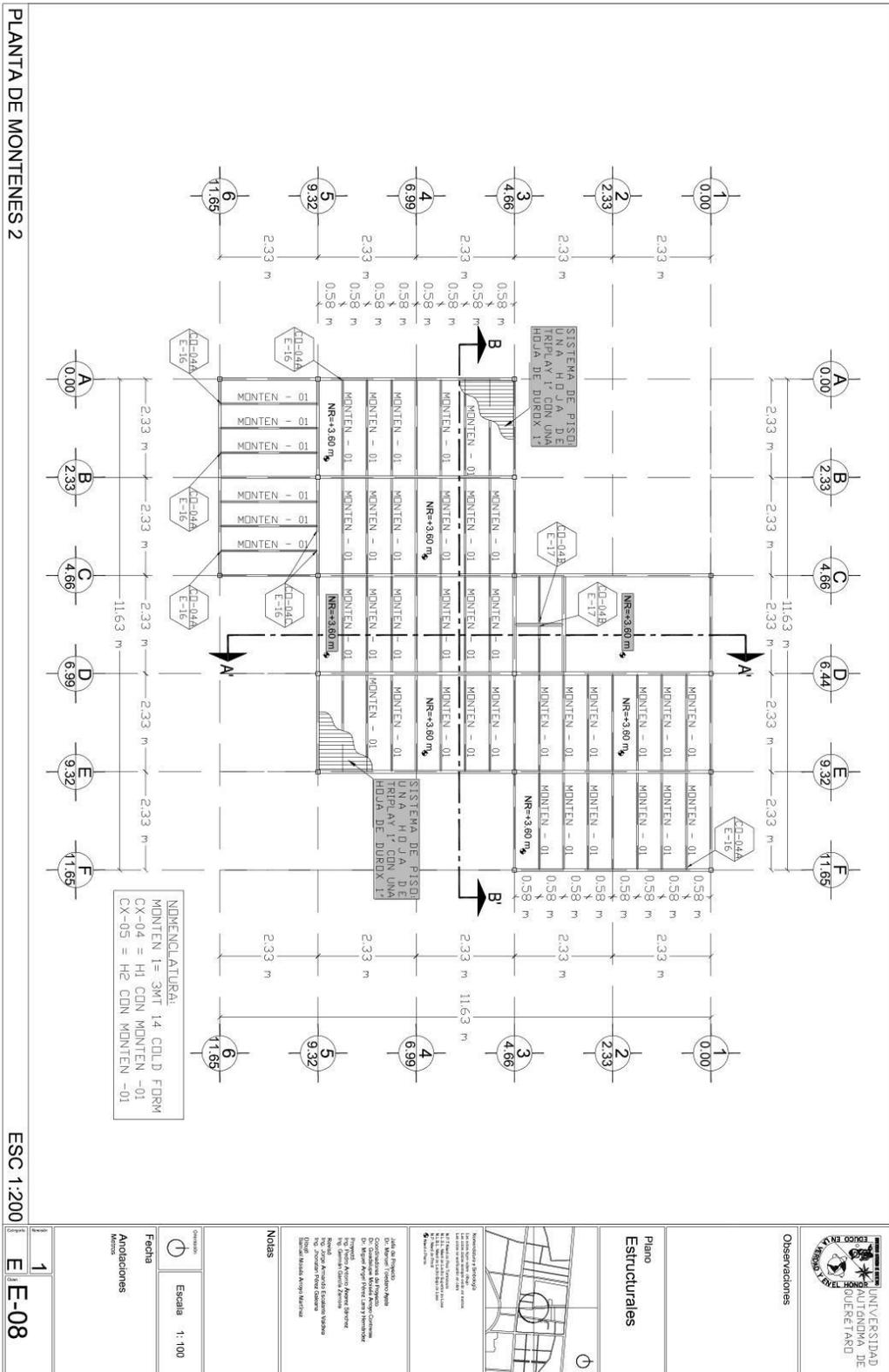
- Hong S-G., Cho B-H., Chung K-S., y Moon J-H., 2011, Behavior of framed modular building system with double skin steel panels, *J. Constr. Steel Res.*, 67, 936–946.
- International Building Code (IBC), 2009, International Code Council, Inc., Washington, DC.
- Lawson, R. M. 2007. Building design using modules, The Steel Construction Institute, Ascot, UK.
- Lawson, R. M., and J. Richards. 2010. Modular design for high-rise buildings. *Proc. ICE-Structures Build.* 163:151–164.
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., Pedreschi, R., Popo-Ola, S., and Grubb, J. 2005. Developments in prefabricated systems in light steel and modular construction. *Struct. Eng.*, 83(6), 28–35
- Lawson R. M., Ogden R. G., y Bergin R., 2012, Application of Modular Construction in High-Rise Buildings, *J. Archit. Eng. ASCE*, 18(2),148–154.
- Majid Zamani, S., A. Vafai, A. A. Aghakouchak, and M. T. Kazemi. 2012. Experimental investigation of steel frames with single bays of symmetrical y-shaped concentric bracings. *Sci. Iran.* 19:195–210.
- Majid Zamani, S., A. Vafaei, C. Desai, and M. Rasouli. 2012. Experimental investigation of behavior of steel frames with y-shaped concentric bracing. *J. Constr. Steel Res.* 70:12–27
- Martínez Romero, E. 1993. Diseño Y Construcción de Estructuras de Acero. México D.F.
- McCormac, J. C., and S. F. Cernak. 2013. Diseño de Estructuras de Acero. 5th ed. (Editor AG, ed.). México D.F.
- Meli Piralla, R. 1976. Bases para los criterios de diseño estructural del proyecto del reglamento de construcción para el distrito federal. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Musa, M. F., M. F. Mohammad, and R. Mahbub. 2014. Enhancing the Quality of Life by Adopting Sustainable Modular Industrialised Building System (IBS) in the Malaysian Construction Industry. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 153:79–89.
- Novas Cabrerías, J. A. 2010. Sistemas Constructivos Prefabricados Aplicables a la Construcción de Edificaciones en Países en Desarrollo. Madrid.
- Ogden, R. G., R. M. Lawson, and R. Bergin. 2012. Application of Modular Construction in High-Rise Buildings. *J. Archit. Eng.* 18:148–154.
- Órgano del gobierno del Distrito Federal, 2004, Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones, *Gaceta oficial del Distrito Federal*, 2, 2–10.

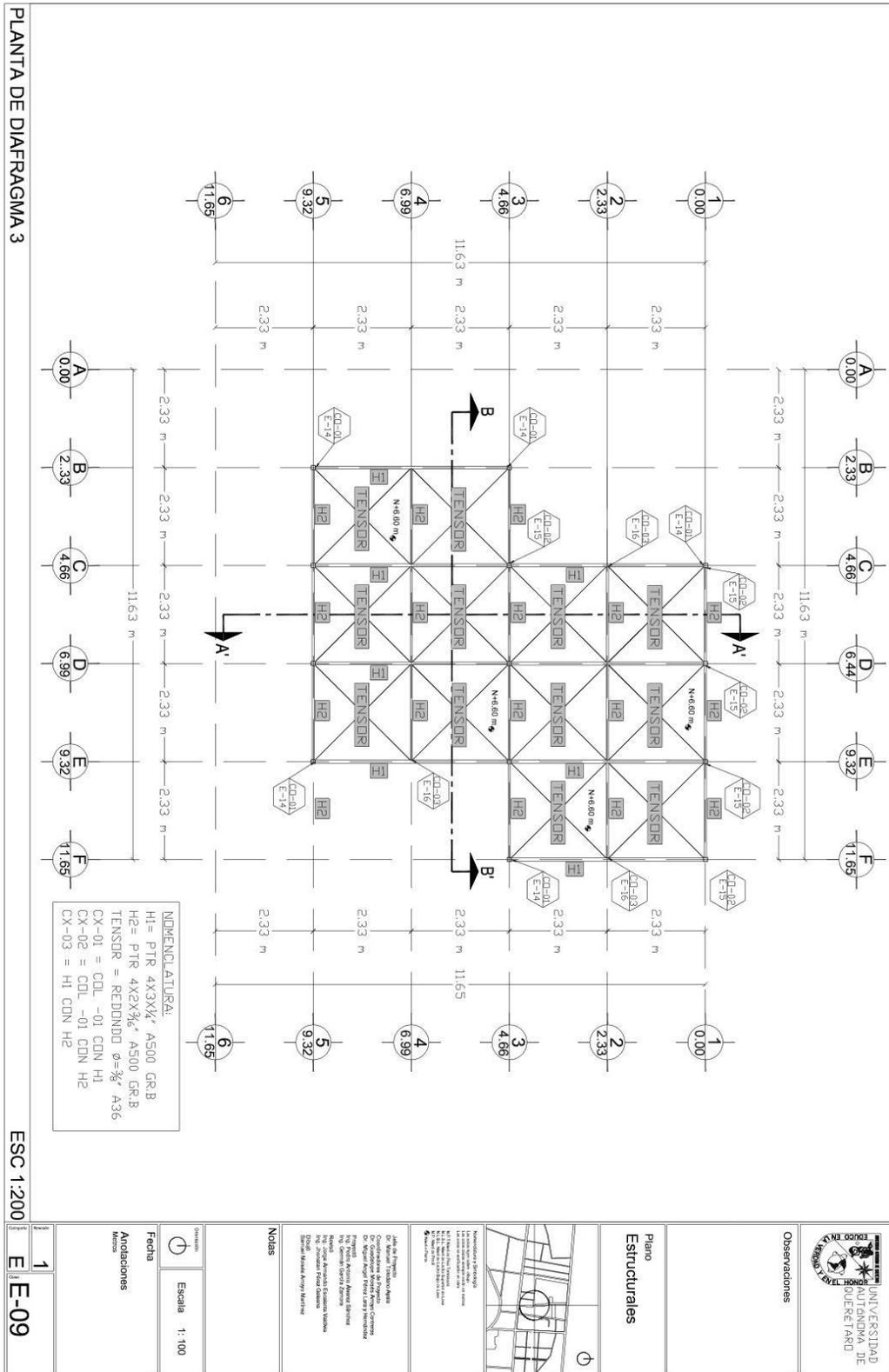
- Park, K.-S., J. Moon, S.-S. Lee, K.-W. Bae, and C. W. Roeder. 2016. Embedded steel column-to-foundation connection for a modular structural system. *Eng. Struct.* 110:244–257.
- Popo-Ola, S. O., P. M. Lawson, P. J. Grubb, and M. P. Byfield. 2008. Robustness of light steel frames and modular construction. *Proc. ICE - Struct. Build.* 161:3–16.
- Ramaji, I. J., and A. M. Memari. 2013. Identification of structural issues in design and construction of multi-story modular buildings. :294–303.
- Reglamento de las construcciones para el Distrito Federal. 2004. Normas técnicas complementarias. México.
- Soto Rodríguez, H. 2014. Manual De Criterios Generales Para La Estructuración de Edificios De Acero. Morelia.

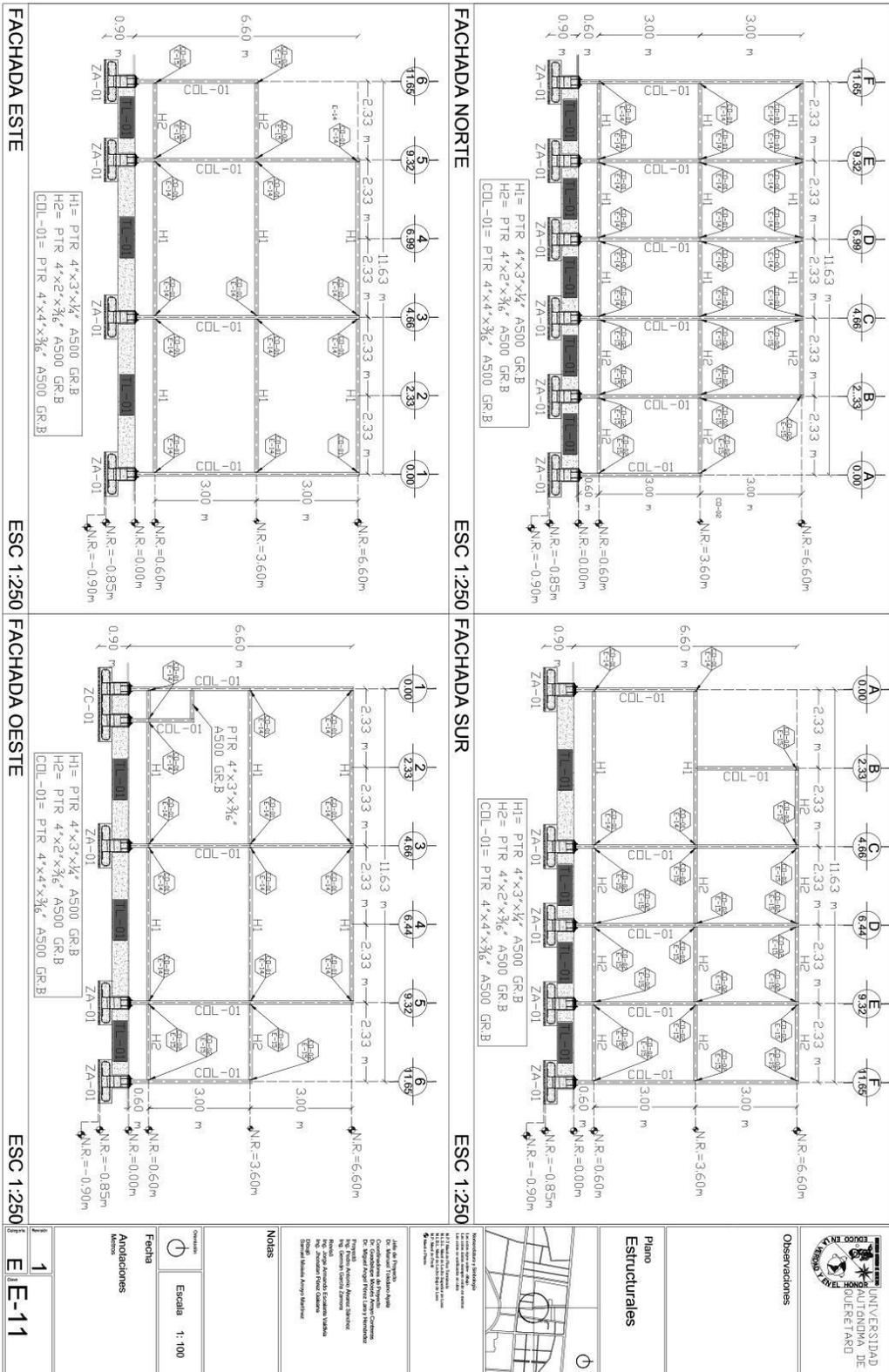


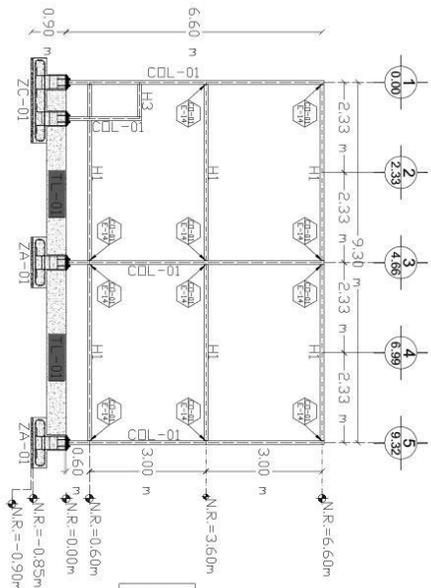








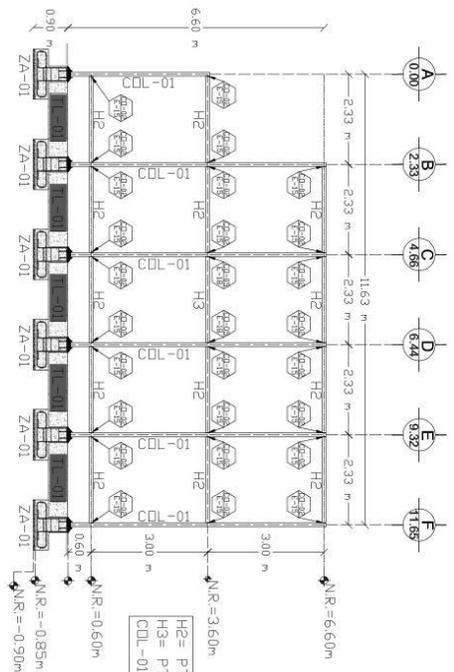




H1= PTR 4"x3"x3/4" A500 GR.B
 H2= PTR 4"x2"x3/4" A500 GR.B
 H3= PTR 4"x3"x3/4" A500 GR.B
 CDL-01= PTR 4"x4"x3/4" A500 GR.B

CORTE AA'

ESC 1:250



H2= PTR 4"x2"x3/4" A500 GR.B
 H3= PTR 4"x3"x3/4" A500 GR.B
 CDL-01= PTR 4"x4"x3/4" A500 GR.B

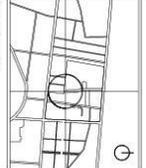
CORTE B-B'

ESC 1:250



Observaciones

Piano Estructurales

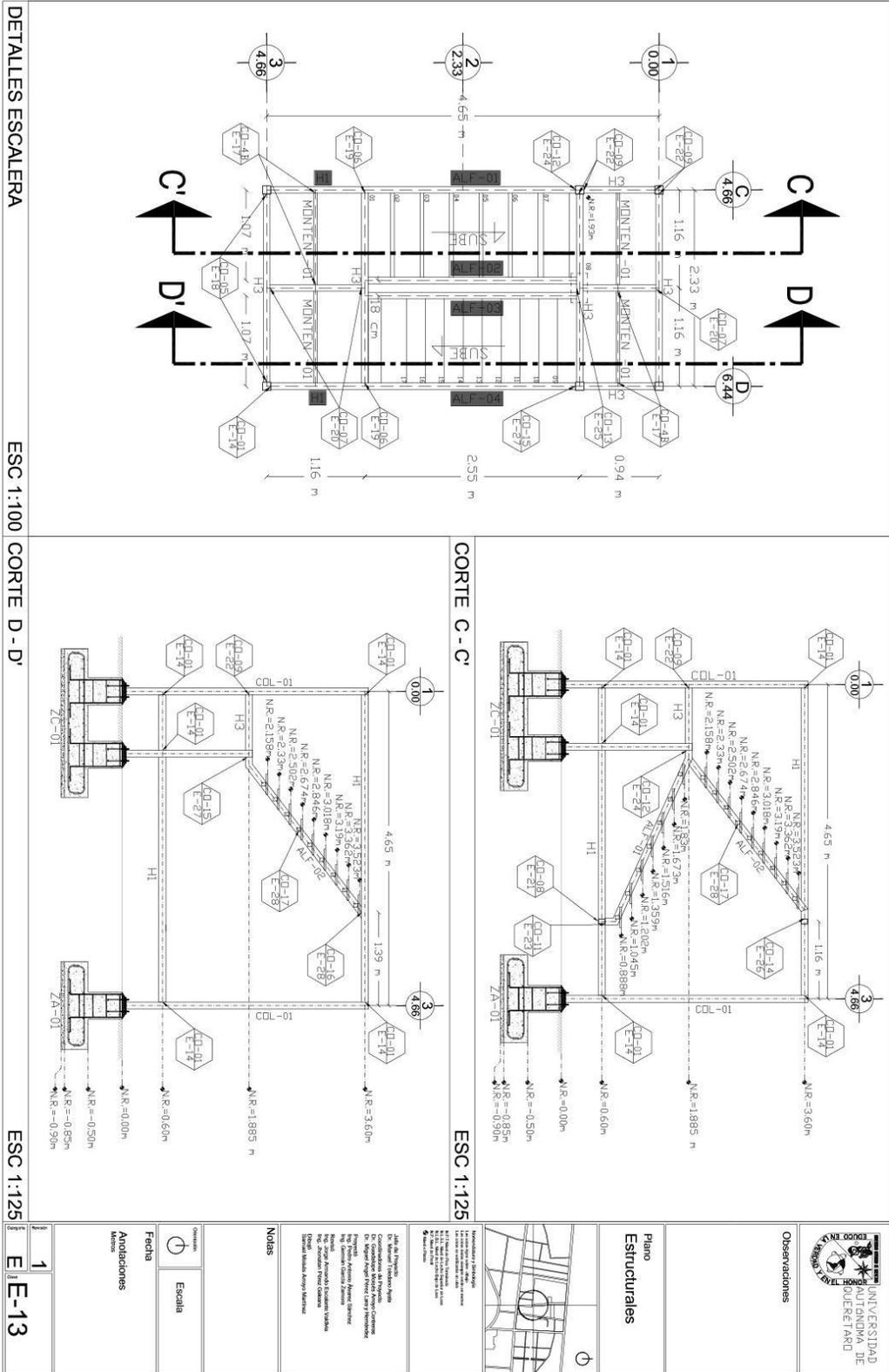


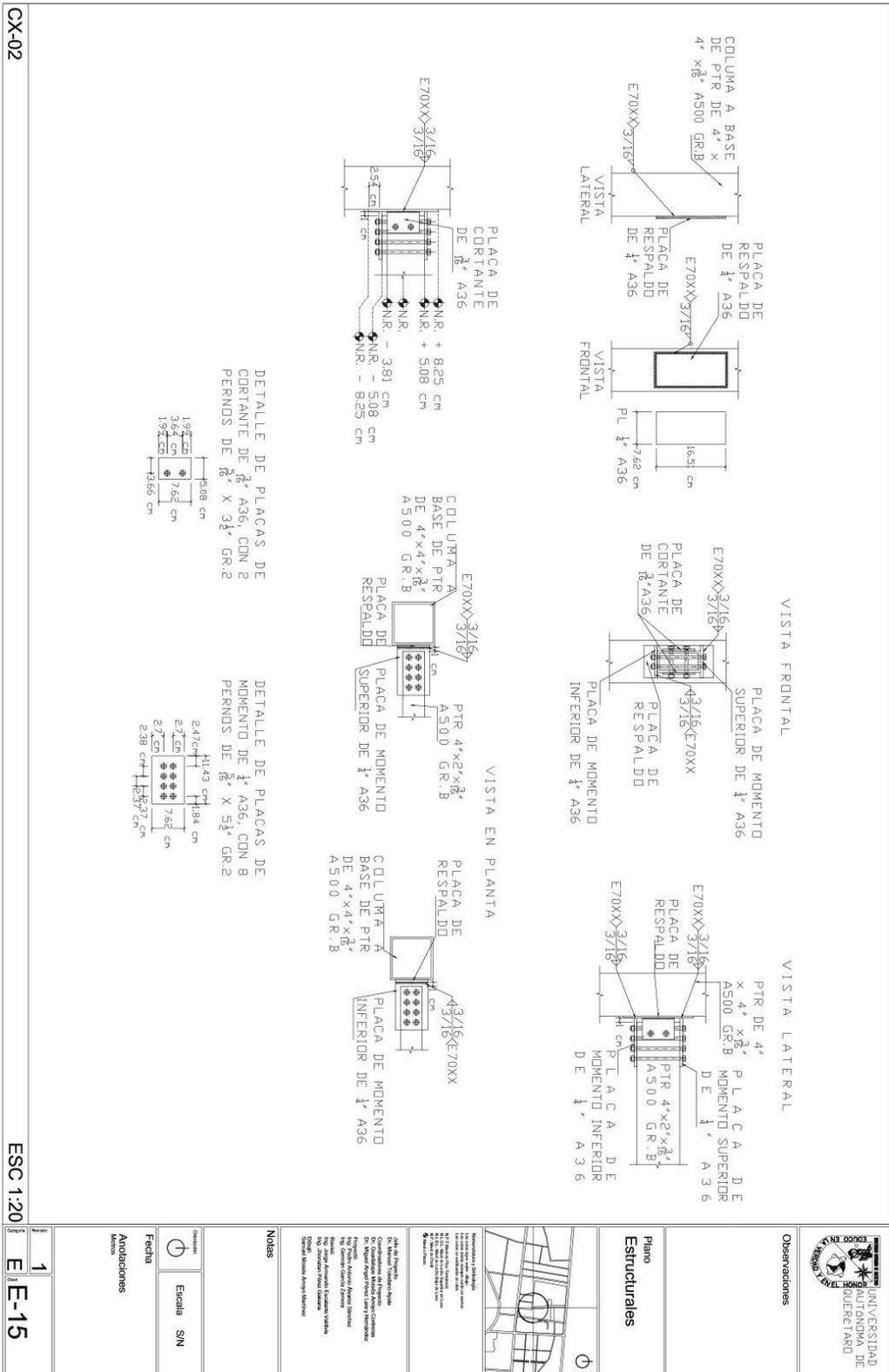
Notas

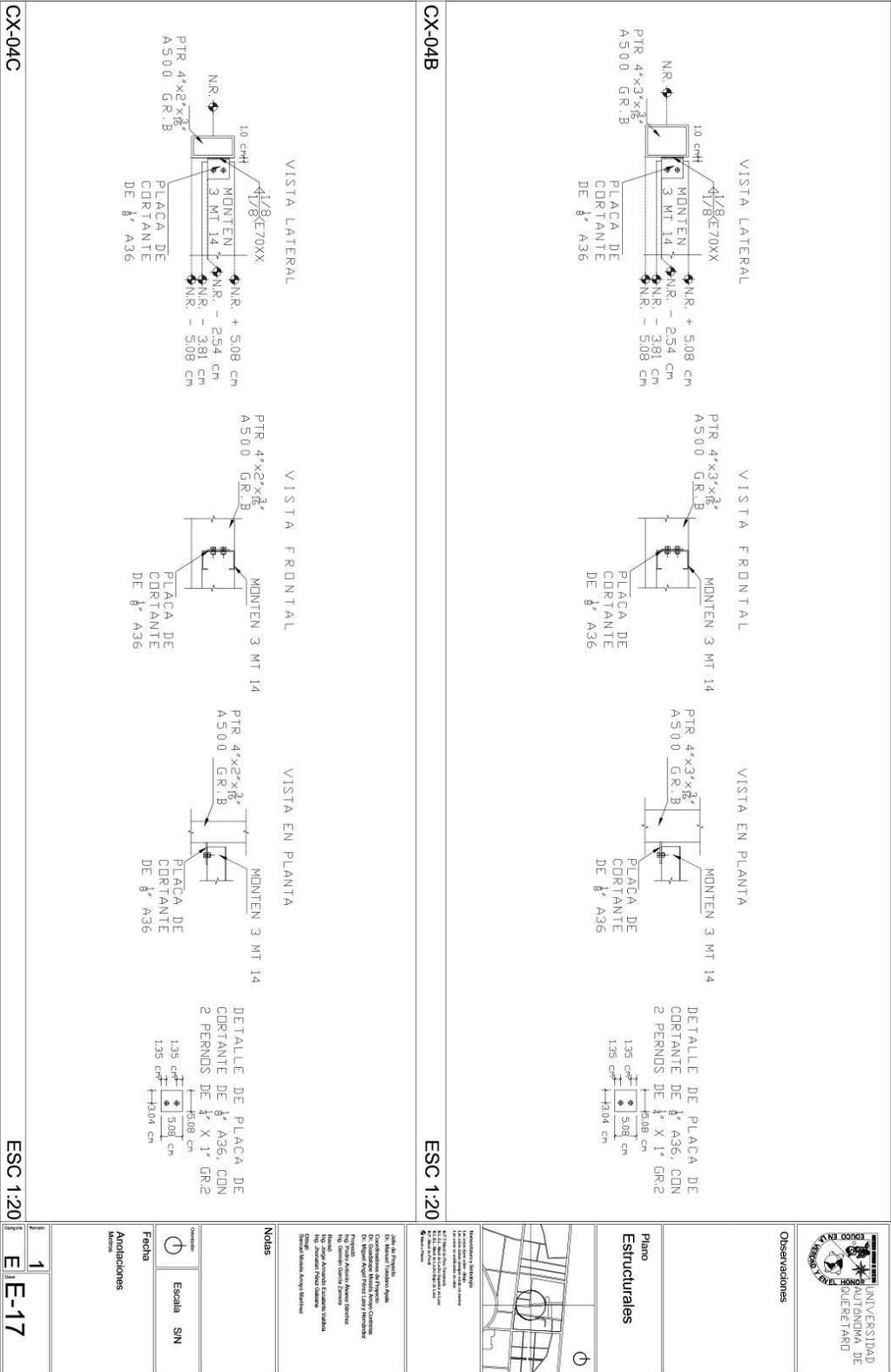
Elaborado por:
 Ing. Juan Carlos Martínez
 Ing. Juan Carlos Martínez
 Ing. Juan Carlos Martínez
 Ing. Juan Carlos Martínez
 Ing. Juan Carlos Martínez

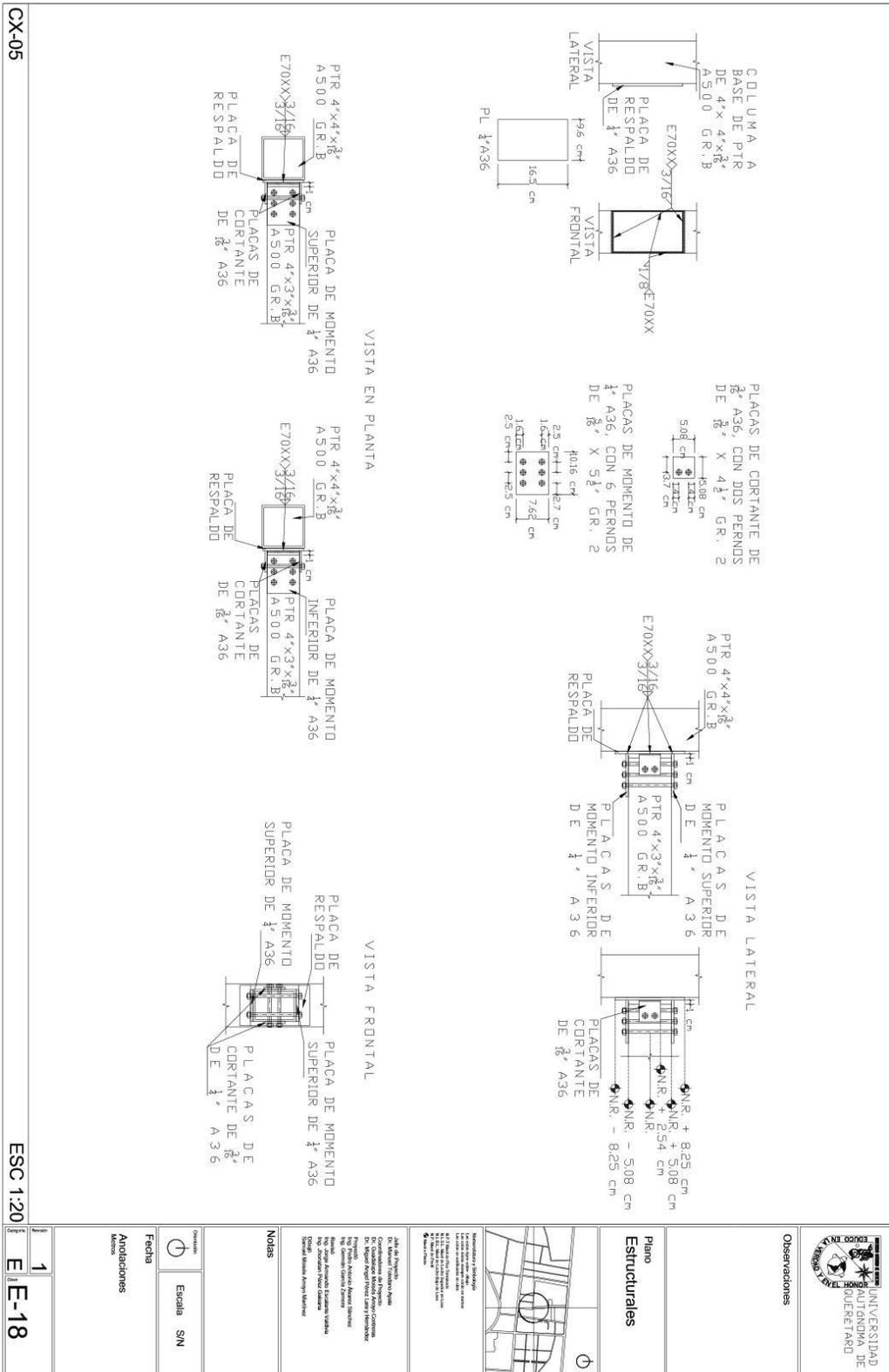
Fecha	Escala
1	1:100

Andadores	1
Modos	E-12



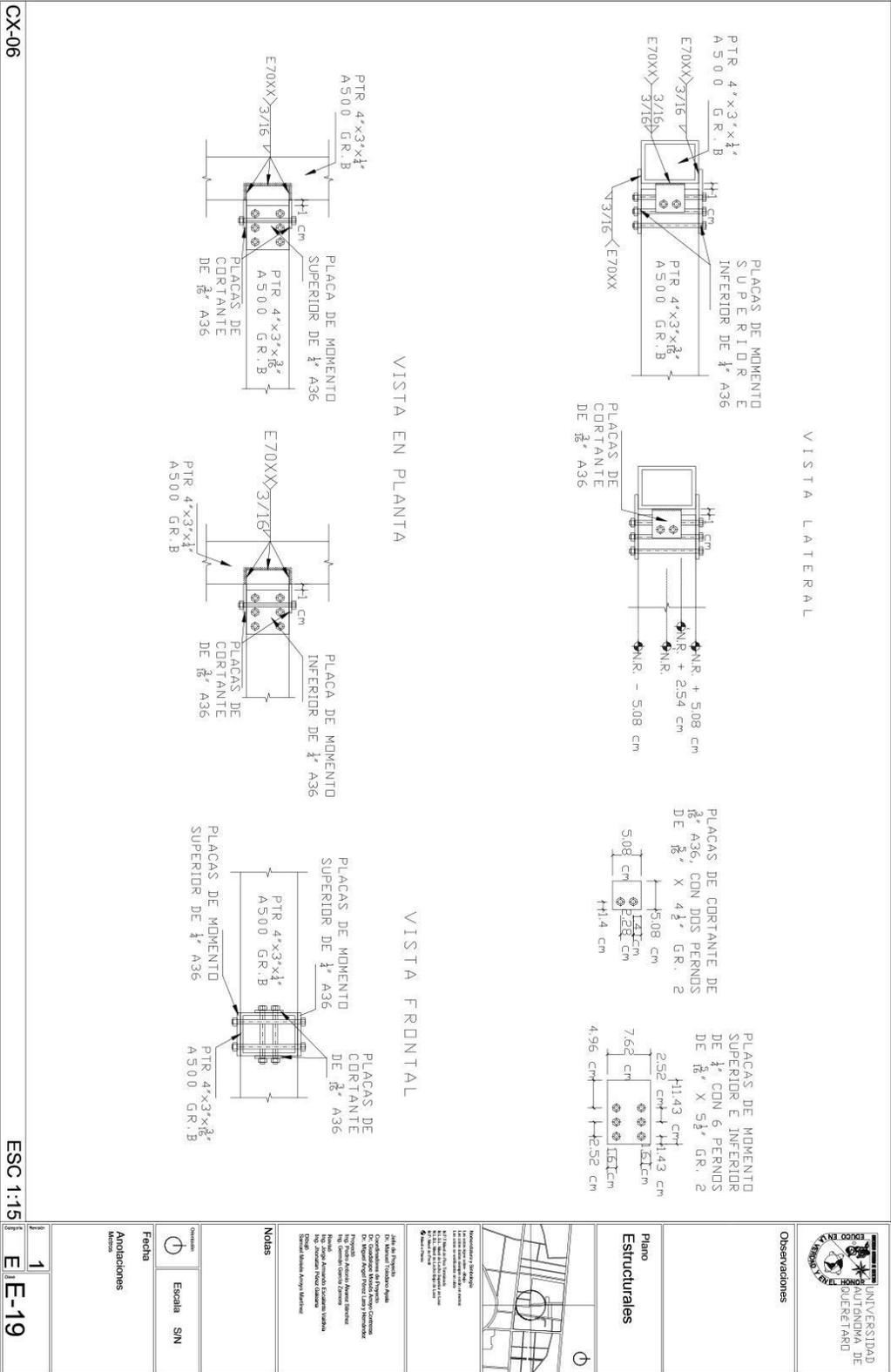






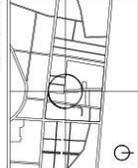
CX-05

ESC 1:20
E-18



Observaciones

Plano Estructurales



Notas

Fecha

Autores

Aprobaciones

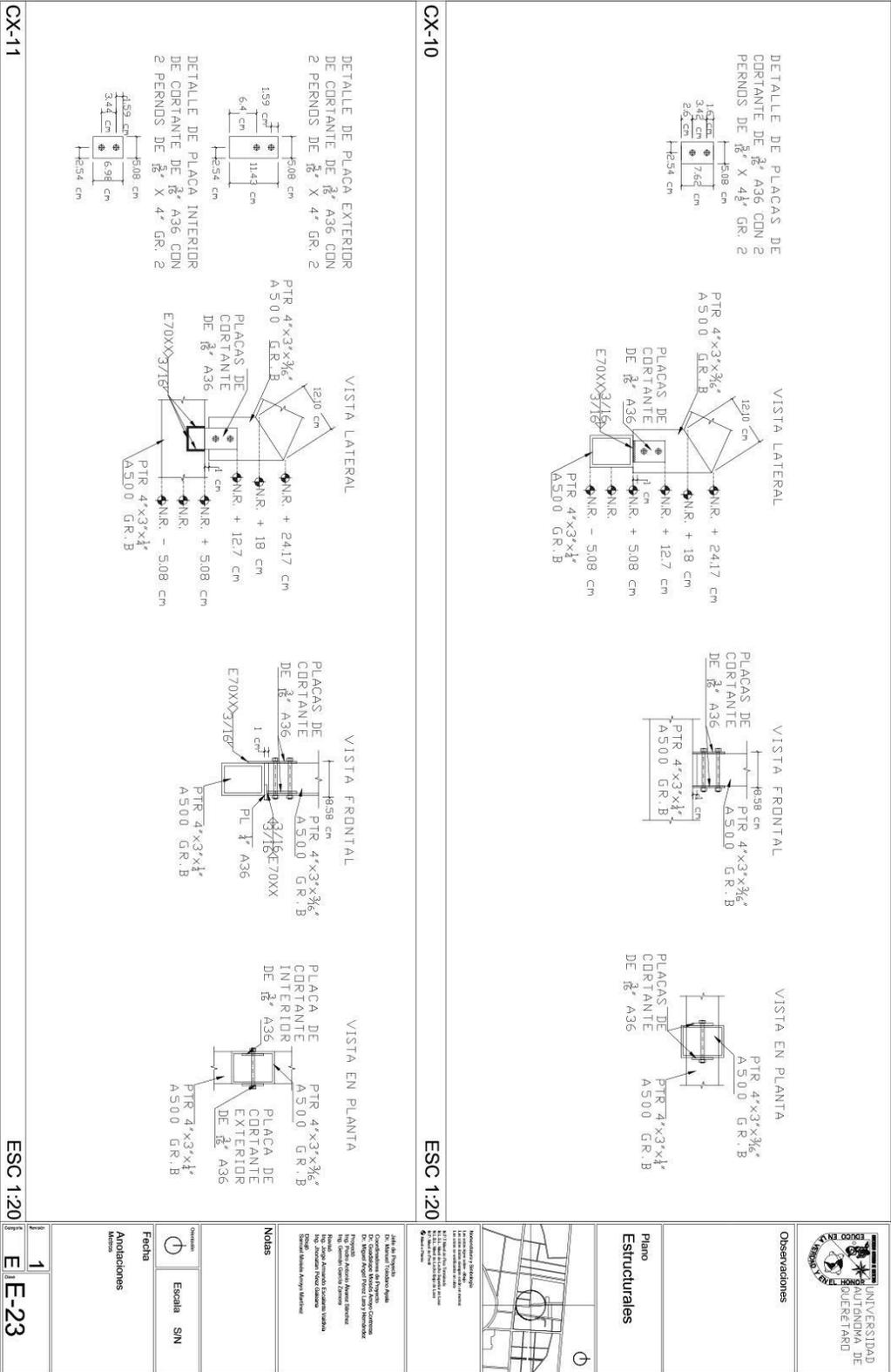
Escala

SM

E-19

ESC 1:15

CX-06



CX-10

ESC 1:20

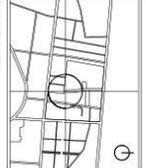
CX-11

ESC 1:20



Observaciones

Piano Estructurales



Notas

1. Verificar especificaciones de los materiales.

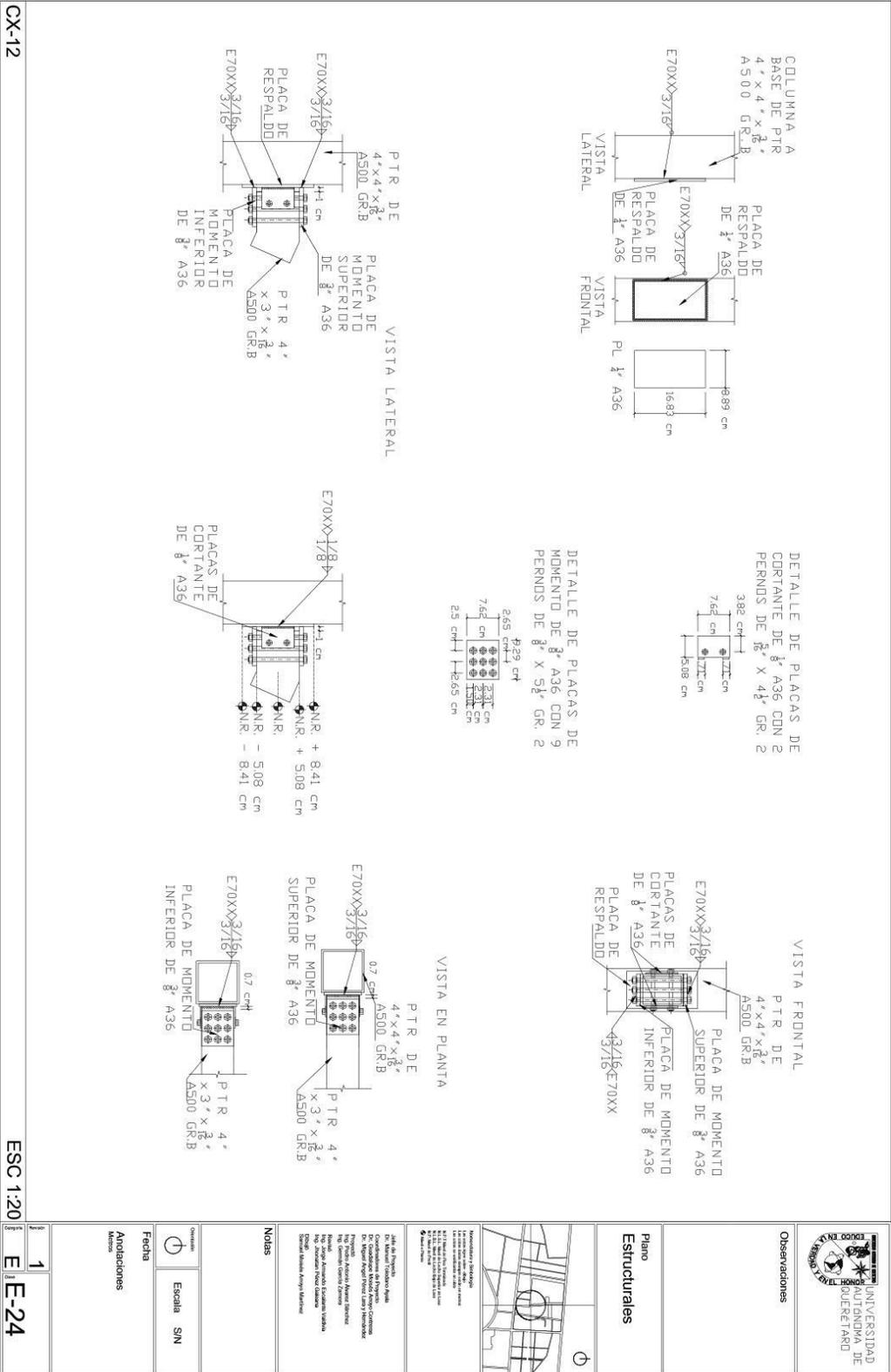
2. Verificar especificaciones de los pernos.

3. Verificar especificaciones de las placas.

4. Verificar especificaciones de los detalles.

Fecha	Escala
1	SN
Modificaciones	

1 E-23



CX-12

ESC 1:20

<p>UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO</p>	
Observaciones	
<p>Piano Estructurales</p>	
<p>Notas</p> <p>1. Verificar el tipo de concreto. 2. Verificar el tipo de acero. 3. Verificar el tipo de juntas. 4. Verificar el tipo de juntas. 5. Verificar el tipo de juntas. 6. Verificar el tipo de juntas. 7. Verificar el tipo de juntas. 8. Verificar el tipo de juntas. 9. Verificar el tipo de juntas.</p>	
<p>Fecha</p> <p>Autodibujos</p> <p>Autores</p>	<p>Escala</p> <p>SM</p>
<p>1</p>	<p>E-24</p>

