



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PROYECTO “CASA
UNAM”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Civil

P R E S E N T A :

VALENTIN PORTILLO GALVAN



DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Marcos Mauricio Chávez Cano

México D.F., agosto 2015

**RESUMEN**

CASA UNAM, es el nombre del representativo de la UNAM que concursó en el Decatlón Solar Europa 2014 y ganó el primer lugar en la categoría de Ingeniería y Construcción, entre otros reconocimientos. Este concurso consiste en la construcción de una casa que entre muchas otras cualidades debe ser sustentable, inteligente y autónoma energéticamente. La casa fue concebida mediante un sistema tridimensional de perfiles de acero ligeros formados en frío, tomando en cuenta varias características, entre las que destacan: el material, proceso constructivo, y hasta el medio de transporte que sería utilizado para su traslado al sitio del concurso. En este trabajo se presenta el análisis y diseño estructural de la casa con la que se compitió, acorde a los lineamientos del concurso y del sitio donde sería construida en la ciudad de Versalles. También se evalúa el comportamiento sísmico de la estructura en la posible ubicación de su implementación en la ciudad de México. El diseño estructural se hizo para cumplir con los requisitos de diseño bajo acciones permanentes, variables y de viento. Se aprecia la efectividad del sistema elegido para la aplicación en este tipo de vivienda. Asimismo se incluyen las recomendaciones para la implementación de esta vivienda en la ciudad de México.

**ABSTRACT**

CASA UNAM, is the name of the representative team of UNAM which competed in the Solar Decathlon Europe 2014 and won first place in the category of Engineering and Construction. This competition involves the construction of a house which among many other qualities must be sustainable, intelligent and energetically stand-alone. The house was designed using a three-dimensional system with cold rolled steel profiles, where several features were taken into account to choose the system: the material, the constructive process, even the transportation used to move the house to the competition site. In this work is presented the structural analysis and design of the house which competed, according to the guidelines of the contest and the site where it would be built: Versailles town. The seismic behavior of the structure in the possible location of its implementation in Mexico City is evaluated too. It also includes the seismic analysis thinking that the house would be built on the site of study. Structural design is made to comply the design requirements under permanent, variable and wind actions. As well, the effectiveness of this system applied to this type of housing is observed. Furthermore, recommendations for the implementation of this house in Mexico City are included.

**SIMBOLOGÍA**

- a_0 – Aceleración inicial
 b – Ancho de ala
 b_e – Ancho efectivo de un elemento
 c – Coeficiente Sísmico
 c_m – Coeficiente de momento extremo en la fórmula de interacción
 c_p – Coeficiente de presión (Sección 4.4)
 C_w – Constante de Alabeo Torsional de la sección transversal
 c_y – Factor de deformación por compresión
 C_8 – Coeficiente de abolladura del alma
 D – Diámetro exterior
DL – Cargas permanentes o “Dead Loads”
 D_n – Carga muerta aplicada
 E – Módulo de elasticidad longitudinal del acero
 f_{102} – Tensión o compresión resistida por la sección
 f_a – Esfuerzo axial calculado
 f_b – Esfuerzo de compresión producido por la flexión
 F_a – Esfuerzo axial permitido
 F_b – Esfuerzo de compresión permitido para pura flexión
 F_c – Factor de Carga
FS – Factor de seguridad
 F_{TR} – Factor que toma en cuenta la topografía y la rugosidad del horizonte
 F_u – Resistencia a la tracción
 F_y – Límite de fluencia
 F_α – Factor que toma en cuenta la variación de velocidad de acuerdo a la altura del inmueble (Sección 4.4)
 G – Módulo de elasticidad transversal del acero
 I_x – Momento de inercia de la sección respecto al eje principal
 J – Constante de Torsión de St. Venant
 K – Factor de longitud efectiva
 L – Longitud
 L_n – Carga viva considerada (Sección 4.7)
LLacc – Cargas variables máximas o “Accidental Live Loads”
LLmax – Cargas variables máximas o “Maximum Live Loads”
 M_n – Resistencia nominal a la flexión
 M_{nxo}, M_{nyo} – Resistencias nominales a la flexión respecto a los ejes baricéntricos
 M_{nxt}, M_{nyt} – Resistencias nominales a la flexión respecto a los ejes baricéntricos determinados utilizando las propiedades de la sección transversal total, no reducida
 p_z – Presión de diseño
 Q – Factor de Comportamiento Sísmico
 r_0 – Radio de giro polar
 S – Módulo de sección
 S_e – Módulo resistente elástico de la sección efectiva calculado con la fibra extrema comprimida o tensionada a F_y
SW – Peso Propio o “Self Weight”
SX – Sismo en X
SY – Sismo en Y



FACULTAD DE INGENIERÍA

t – espesor del alma

$T_{a,b}$ – Periodos característicos

T_n – Tensión nominal a la tensión

T_u – Resistencia a la tensión

V_n – Resistencia al corte nominal

V_{rot} – Velocidad de ruptura del textil

$V_{rot}F$ – Velocidad de ruptura del textil con factor de seguridad aplicado

V_r – Velocidad regional

V_u – Resistencia al corte requerida

w – Ancho plano de un elemento excluyendo los radios

WX – Acción del Viento en la dirección 1 “Wind X”

WY – Acción del Viento en la dirección 2 “Wind Y”

x_0 – Distancia entre el centro de corte y el baricentro medida sobre el eje principal x

λ_1, λ_2 – Parámetros usados para determinar el factor de deformación por compresión

λ, λ_c – Factores de esbeltez

σ_t – Tensión de pandeo torsional

$\Psi - f_2/f_1$

Φ_b – Factor de resistencia para resistencia a flexión

Φ_v – Factor de resistencia para resistencia a corte

Φ_t – Factor de resistencia para miembros tensionados

Ω_b – Factor de seguridad para resistencia a flexión



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Antecedentes	8
1.2 Objetivos y alcances	9
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO CASA UNAM	11
2.1 General	11
2.2 Arquitectura y su relación con el entorno	15
2.3 Ingeniería y Construcción	17
3. ESTRUCTURACIÓN DE LA CASA	24
3.1 Estructura tridimensional	24
3.2 Columnas	27
3.3 Conectores de columnas al sistema estructural y zapatas	28
3.4 Contraventeos	29
3.5 Propiedades mecánicas y geométricas de los principales elementos estructurales	30
3.6 Cimentación	32
3.7 Elementos no estructurales	34
3.8 La estructura en números	38
4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	39
4.1 Reglamentos de construcción utilizados en el diseño	39
4.2 Análisis de cargas	39
4.3 Análisis sísmico	40
4.4 Análisis por viento	42
4.5 Factores y combinaciones de carga	45
4.6 Modelo numérico	46
4.7 Nota importante del sistema de muros prefabricados	47
5. DISEÑO Y REVISIÓN ESTRUCTURAL	49
5.1 Criterios para la revisión de elementos estructurales	49
5.2 Revisión estructural	59
5.3 Análisis de la respuesta	68
5.4 Simulación con sismo en zona IIIb	71
6. CONCLUSIONES	72
7. AGRADECIMIENTOS	73
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74





1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El Decatlón Solar es una competencia que nace de la iniciativa del Departamento de Energía Solar Decatlón Estados Unidos. Esta galardonada competencia reta a equipos universitarios a diseñar, construir y operar casas con energía solar que las hagan rentables, atractivas y con una alta eficiencia energética. El ganador de la competencia es el equipo que mejor combina la asequibilidad; atractivo para el consumidor, y excelencia en el diseño con la producción de energía óptima con la máxima eficiencia. La primera competencia de este tipo fue realizada en el año 2002, en los Estados Unidos de América.

Esta competencia ha sido tan exitosa que ya se han creado decatlonés en Europa, China, y, recientemente, en América Latina y el Caribe. Estas competencias se han realizado cada dos años; en Estados Unidos (EUA) desde el año 2005, en Europa a partir del 2010, en China en 2013 y en Latino América y el Caribe, la primera competencia tendrá lugar en Colombia en el 2015.

El Decatlón Solar Europa (DSE) es una competencia universitaria internacional que impulsa la investigación en el desarrollo de viviendas eficientes buscando los mismos objetivos que el Decatlón Solar EUA. El objetivo complementario para los equipos participantes es el diseño y construcción de casas que consuman la menor cantidad de recursos naturales, y produzcan la menor cantidad de residuos durante su periodo de vida útil. Se hace especial hincapié en reducir al mínimo el consumo de energía, y que ésta sea obtenida mediante la luz solar.

La organización del evento tiene una finalidad formativa y científica; pues los “decatletas”, que son los estudiantes colaboradores del proyecto, aprenden a trabajar en equipos multidisciplinarios que se enfrentan a los retos que plantean el diseño y construcción de la casa, desarrollando soluciones innovadoras. El público asistente a la competencia comprueba y toma conciencia de las posibilidades reales de aunar una disminución del impacto medioambiental, con el mantenimiento del confort y calidad del diseño en sus hogares. Los profesionales acceden a técnicas y procesos que pueden estudiar y aplicar. Por su parte, las universidades, empresas y organismos públicos contribuyen con sus conocimientos y avances tecnológicos para la realización del proyecto.

La competencia consta de varias etapas, iniciando por la selección por parte del comité organizador del DSE, de los proyectos más viables que previamente fueron registrados. Este comité está formado por especialistas de diferentes universidades, encargados de evaluar cada aspecto de la casa correspondiente a su área de estudio y limitando la competencia a un cierto número de equipos que para este caso fueron veinte.

Una vez realizada la selección de los equipos participantes, éstos tienen el compromiso de presentar siete informes, en distintas fechas ante el comité organizador, donde se describan los avances del proyecto para que sean evaluados. De ser necesario, el comité emitirá críticas y brindará asesoría técnica a los equipos. Por su parte, los miembros del equipo trabajan en la búsqueda de la obtención de recursos y patrocinios para lograr la construcción de la casa. En la entrega del quinto informe, el comité organizador determina si la construcción de la casa es viable o si requiere de la realización de modificaciones importantes para poderse mantener dentro de la competencia.

Cada uno de los equipos se apoya en una o más universidades, con la colaboración económica y técnica de instituciones y empresas. La participación durante todo el proceso, desde el inicio del diseño hasta la



última fase del concurso recae sobre los decatletas, tutelados por un profesor. La competencia se desarrolla en la Villa Solar, que es el nombre del lugar donde se desarrolla esta competencia internacional.

La evaluación de la casa se realiza a través de la obtención de puntos. Estos se ven reflejados en la calificación final que consta de dos etapas: en la primera, la obtención de puntos está basada en la realización de los siete manuales que se entregan periódicamente siendo el séptimo, el último y más completo de todos. En la segunda etapa, el puntaje se obtiene con las mediciones hechas *in situ* cuando la casa ya está construida y operando. El monitoreo abarca tanto la eficiencia energética, como el consumo de energía eléctrica y de agua. Para las categorías no medibles, el puntaje es otorgado por el jurado de la competencia. Las categorías son diez (de ahí el nombre de “decatlón”).

- Arquitectura (contexto, estética, utilidad, espacios adecuados, etc.)
- Eficiencia Energética (Regulación de temperatura, iluminación adecuada y electrodomésticos)
- Condiciones de Confort (Iluminación, temperatura, espacios)
- Comunicación (Publicidad, prensa, material audiovisual)
- Innovación (Diseño, sistemas, funcionalidades, aparatos, etc)
- Ingeniería y Construcción (dificultad, soluciones)
- Balance de Energía Eléctrica (Producción/Consumo)
- Funcionamiento de la Casa (todas las áreas: eléctrica, hidráulica, confort, automatización)
- Diseño Urbano, Transporte y Factibilidad
- Sustentabilidad (materiales, huella de carbono, etc.)

En resumen, el equipo ganador produce una casa en la que sobresalen las siguientes características:

- Es asequible, atractiva y habitable
- Mantiene las condiciones ambientales interiores confortables y saludables
- Suministra energía a todos los electrodomésticos de la cocina, para la limpieza, y el entretenimiento
- Proporciona agua caliente adecuada
- Produce tanta o más energía de la que consume.

CASA UNAM es el nombre de la casa con la que el equipo representativo de la UNAM entró al concurso para competir en estas categorías y pensado a satisfacer los objetivos del concurso y de la propia propuesta de vivienda. Con un total de 35 personas involucradas en el diseño y construcción del prototipo, se obtuvieron primer lugar en Ingeniería y Construcción, segundo en Diseño Urbano, Transporte y Factibilidad, y tercero en Sustentabilidad.

Dentro de este contexto fue entonces que se creó la propuesta estructural de la cual se hablará más adelante.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES

1.2.1 Objetivo

El principal objetivo de este trabajo es hacer el análisis y diseño del sistema estructural del proyecto CASA UNAM acorde a los lineamientos del Decatlón Solar Europa 2014 considerando las características del sitio donde se realizaría la competencia en la ciudad de Versalles.



1.2.2 Alcances

Uno de los mayores retos para poder concebir el proyecto CASA UNAM, fue la elección de un sistema estructural adecuado que permitiera cumplir con las características necesarias que aseguraran el desarrollo del proyecto planteado para el DSE. Además, que facilitara la construcción y transporte de la toda la estructura, pues la casa debía ser trasladada, desarmada y armada más de una vez.

En este documento se describen las características del tipo de estructura elegida y el cálculo del sistema estructural propuesto. Aunque se incluye un análisis sísmico de la estructura pensando en su implementación en la ciudad de México, el diseño estructural de la casa se hizo tomando en cuenta únicamente la influencia de las acciones a que estaría sujeta en el lugar de la competencia, en la ciudad de Versalles, Francia. La implementación de esta vivienda en la ciudad de México requiere de adecuaciones adicionales que no fueron incluidas en este trabajo.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO CASA UNAM

2.1 GENERAL

El proyecto CASA UNAM inició en agosto de 2012 por iniciativa del estudiante de Arquitectura Santiago Mota, líder de equipo, quien comenzó con la formación del equipo y desarrolló las primeras propuestas para el diseño del prototipo junto con otros 5 integrantes. El proyecto fue enfocado para satisfacer la demanda de vivienda de los capitalinos, tomando en cuenta la falta de espacio para la construcción de nuevas viviendas.

La propuesta evolucionó a través de la integración de datos de la realidad espacial y social del Distrito Federal. Específicamente, el caso de estudio para el sistema CASA UNAM fue la Unidad Habitacional Vicente Guerrero (UHVG), ubicada en la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal. Un área en la que se concentran problemáticas de índole socioeconómico, educativo, político y cultural.

El objetivo de CASA UNAM es construir una solución funcional para la realidad donde se plantea el caso de estudio. El prototipo es un cercamiento que trabaja como una red flexible de espacios que se traslapan en funciones y espacios. Enfrenta problemáticas como la aglomeración en la vivienda (entendida como el porcentaje de disponibilidad de vivienda en el que tres o más personas utilizan una habitación para el reposo nocturno), la falta de agua, contaminación, movilidad (dinero y tiempo utilizado en transporte), déficit de energía y la reconstrucción del tejido social (figura 2.1).

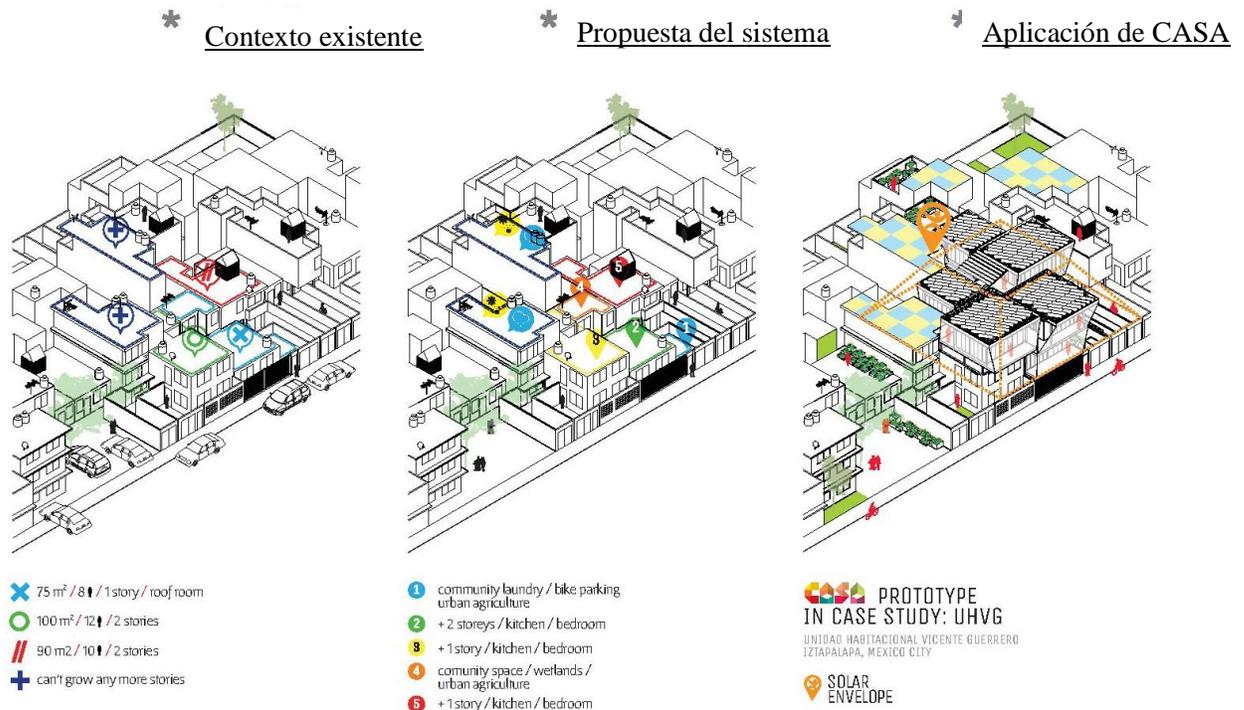


Figura 2.1 Propuesta Urbana CASA UNAM



El equipo desarrolló un prototipo de vivienda contemporánea bajo los siguientes conceptos, como núcleo del proyecto:

- **Interurbano:** Densificar el ambiente ya construido, disminuir el costo de los predios y reducir la distancia entre las personas y sus actividades.
- **Resiliencia:** Adquirir la capacidad de sobrepasar situaciones adversas sin afectar permanentemente o deformar el entorno.
- **Regenerativo:** Transformar el lugar de implementación en un lugar saludable, diverso y abundante en recursos, encaminado hacia una mejoría en la calidad de vida.
- **Simbiótico:** Establecer relaciones de beneficio y dependencia mutua.

De esta manera, en lugar de desarrollar una unidad de vivienda determinada y bajo la idea de que las condiciones del contexto de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) exigen una solución flexible, se decidió desarrollar un sistema constructivo inteligente. CASA UNAM está diseñada para ocupar espacios residuales dentro de la ciudad, como predios desocupados, espacios intersticiales en la infraestructura construida, espacios entre paredes, reformando los edificios existentes al utilizar las azoteas y terrazas como sitios de implementación. Con esto, se pretende atacar problemáticas determinantes para la calidad de vida como contaminación y tiempos de traslado. CASA fue inspirado en las condiciones de barrios en desarrollo de la ZMVM.

CASA UNAM ofrece una serie de opciones que permite a los usuarios aplicar cada uno de sus componentes de acuerdo a sus necesidades específicas. Los principales componentes en que se encuentra estructurada esta vivienda son (figura 2.2):

- a) Sistema estructural modular liviano, con interfaces de anclaje para adaptarse a las diversas condiciones de apoyo sobre la superficie.
- b) Techos aislados, paneles prefabricados y ventanas móviles.
- c) Módulos de muebles, sea de espacios de trabajo o de almacenamiento, todos construidos bajo la misma estructura modular.
- d) Centros de servicios prefabricados que incluyen la cocina y baño(s).
- e) Cuartos técnicos articulados con módulos de servicios prefabricados y consistentes espacialmente con el resto del sistema CASA.
- f) Cubierta externa, integrada con paneles fotovoltaicos, sistema de recolección de agua y vegetación comestible.
- g) Sistema textil. Un sistema de tres capas de diferentes textiles. La primera, es un recolector de agua que se limpia de manera autónoma. La segunda capa, es un gotero perimetral y la tercera, una capa protectora contra la radiación solar y repelente a la humedad.
- h) Sistemas vivos. Humedales superficiales y cubiertas vegetales.
- i) Torre de agua y sistemas pasivos hidráulicos y de calentamiento de agua, pues en México la ubicación elevada de tanques de agua es la solución más común para proveer la presión necesaria y tener un flujo pasivo de agua. Para fines de la competencia esta torre no es necesaria.

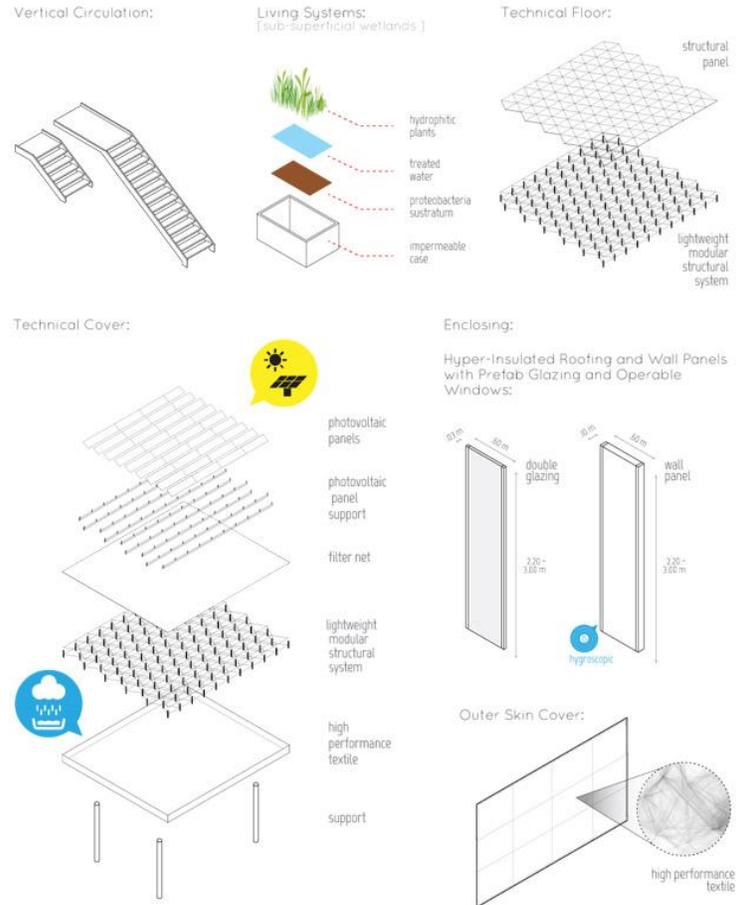


Figura 2.2. Opciones adaptables y elegibles del Sistema

Adicionalmente a estos propósitos, CASA UNAM debía satisfacer dos características propias de la competencia: La primera, que la construcción de la casa se realizara en un periodo no mayor a 10 días; y la segunda, la transportación desde la ciudad de México hasta el lugar de la competencia y después el retorno a su lugar de origen (figura 2.3).

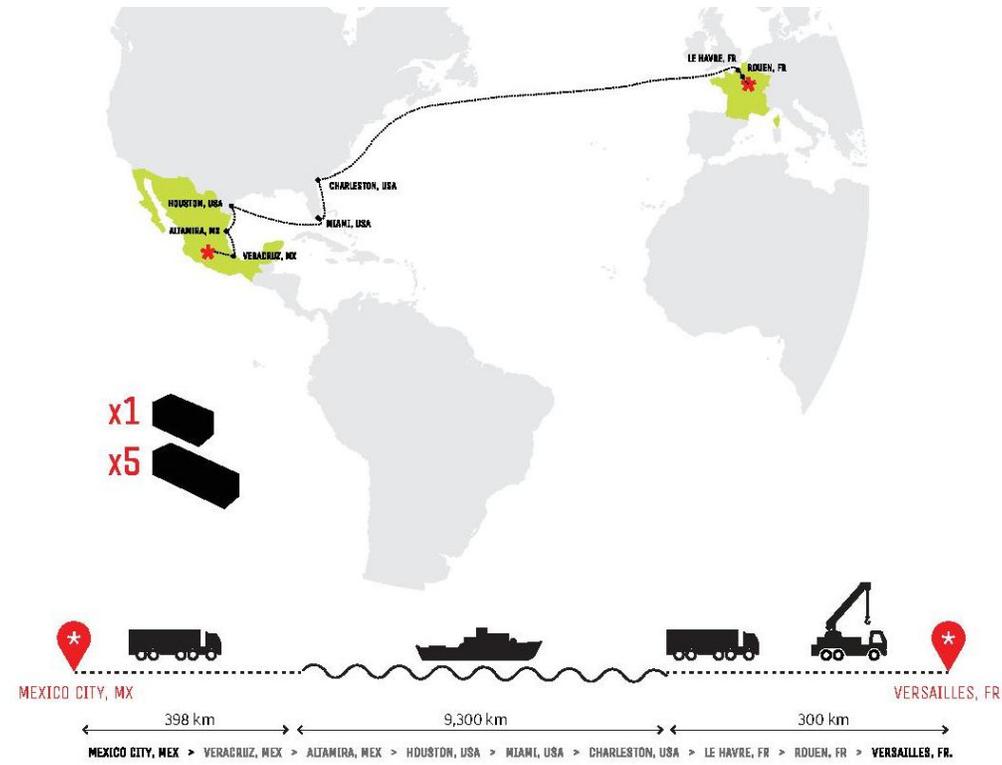


Figura 2.3. Transporte de la casa

En la figura 2.4 se muestra CASA UNAM, en su versión de competencia.



Figura 2.4. Render (imagen tridimensional realística) CASA UNAM en DSE

2.2 ARQUITECTURA Y SU RELACIÓN CON EL ENTORNO

Para evitar continuar creciendo por medio de la autoconstrucción, se planteó una solución más flexible para las condiciones del contexto en forma de un sistema de construcción inteligente. Para este fin, el sistema es modurable, es decir, se adapta a los espacios y además se puede elegir el módulo para la necesidad que se desea atender. Una vez colocada cualquier parte del sistema, se tendrá una vivienda estructurada en capas permitiendo iluminación y control térmico con consumo mínimo de energía para una interacción graduada con el exterior y una acústica óptima. Está diseñada también para crecer gradualmente de acuerdo a las necesidades y la inversión económica de los usuarios.

Varios de los elementos que forman el prototipo permiten la adaptabilidad del sistema, es decir, tiene características configurables que se describen a continuación:

- los textiles; estos permiten el control de temperatura, iluminación, adaptabilidad de espacio (haciéndolo privado o público) (figura 2.5), recolección de agua pluvial y ofrecen estética;
- las puertas y ventanas; estas son configurables, permitiendo una apertura al exterior convirtiendo un área privada en completamente pública conectando los espacios interiores a los exteriores, además de contar con protección acústica y térmica (figura 2.5);
- los muebles son adaptables, en este caso, una recámara se convierte en sala, una cocina con recámara de visitas en una cocina con un gran comedor, y una sala común en sala de convivencia creando espacios interiores adaptables a las necesidades (figura 2.6).

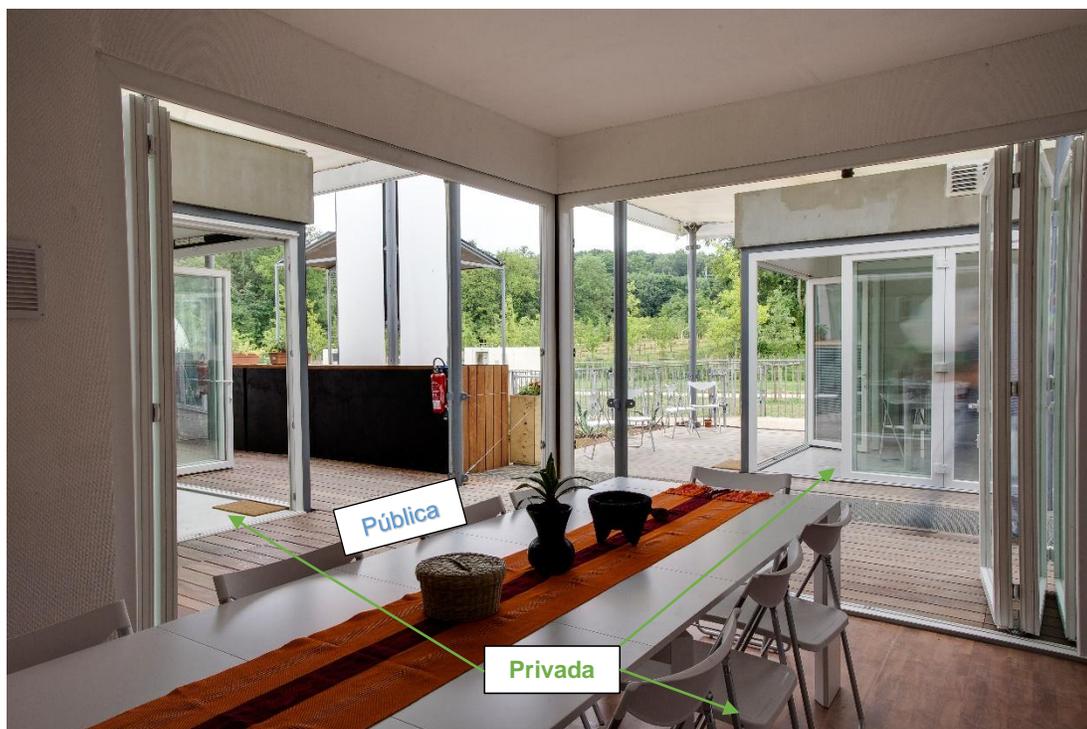


Fig. 2.5. Espacios públicos y privados

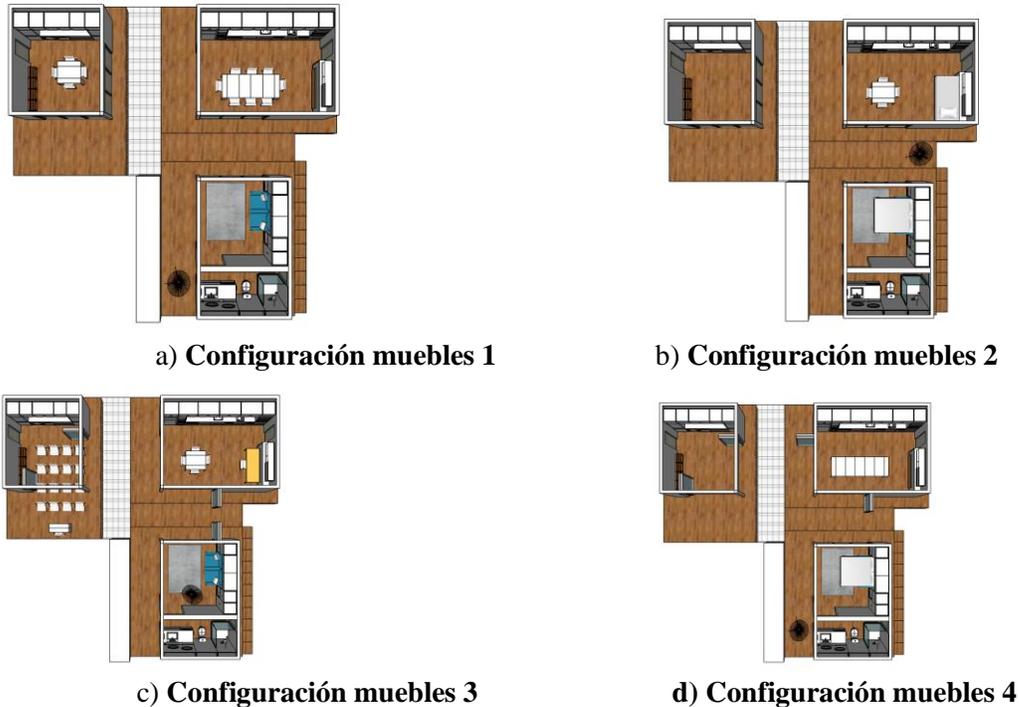


Figura 2.6. Adaptabilidad de la CASA

La integración de sistemas estructurales, técnicos y de estrategias bioclimáticas asignadas a este proyecto nos permite obtener un producto arquitectónico con potencial a ser resiliente a cualquier entorno recolectando y explotando recursos naturales a su máximo potencial para disminuir la necesidad de recursos públicos.

CASA UNAM también pretende ser “regenerativo” restaurando su entorno y creando un estándar de vivienda nuevo y mejorado. Los espacios creados por medio de auto construcción regularmente son de baja calidad, el sistema propone regenerar este entorno por medio de las soluciones adaptables y estéticas y la convivencia social con espacios comunes. También con la implementación de vegetación estética, funcional y comestible en los patios y alrededor de la casa. Y finalmente con el aislamiento hacia el exterior concentrándose en un espacio interior sereno y pacífico.

Igualmente, para lograr un resultado asertivo, se tuvo un acercamiento con la población de la Unidad Habitacional Vicente Guerrero (figura 2.7) preguntando los problemas en la vecindad; en el funcionamiento de las casas o de los servicios y viendo el impacto que tendría la implementación de un sistema sustentable en la vecindad. Esta búsqueda reveló que las casas habían crecido por medio de autoconstrucción, según las necesidades espaciales de las familias, de uno a dos niveles más, usando ladrillos, y concreto armado, por otra parte, también se descubrieron debilidades en el sistema de servicios públicos, el nivel socioeconómico de la zona y la forma de vivir de las familias siendo hasta 10 en una sola casa.



Figura 2.7. Render CASA UNAM en lugar de estudio

2.3 INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN

Las labores de preliminares de construcción previas al envío del prototipo a la ciudad de Versalles se desarrollaron en el Museo Universitario de Ciencias y Arte (MUCA), localizado en Ciudad Universitaria. En la figura. 2.8 se aprecia el armado de las piezas de techo y piso de los módulos.



Figura 2.8. Espacio de trabajo y construcción en el MUCA C.U.

El sistema hidráulico de la vivienda (figura 2.9) está compuesto por los siguientes elementos: una red que abastece de agua al baño, cocina, lavadora, lavavajillas; tuberías de drenaje y de inyección; jardineras de tratamiento biológico y físico; tinacos para agua potable, gris o lluvia y para aguas negras; bomba de agua activada mediante una bicicleta; calentador; calentador solar y almacén de agua calentada térmicamente. Los diámetros de las tuberías fueron asignados por cálculos de acuerdo al punto más lejano y a la altura del tinaco principal, ya que es un sistema que funciona por gravedad. Además la tubería resulta novedosa pues el coeficiente de rugosidad es menor a una tubería convencional. Adicionalmente, se plantea un aprovechamiento máximo del agua con la instalación de sistemas de ahorro que generan una reducción del consumo en los usos domésticos de hasta 40%. También, se tratan y reutilizan las aguas grises, tanto las producidas por la casa, así como las obtenidas de los 100 m² de recolectores pluviales textiles que se encuentran instalados sobre la cubierta (figura 2.10). El sistema en su conjunto, en una aplicación real, pretende que el agua tratada pueda ser también utilizada por las casas de la vecindad, ya que se tiene una gran capacidad de almacenaje y de tratamiento.

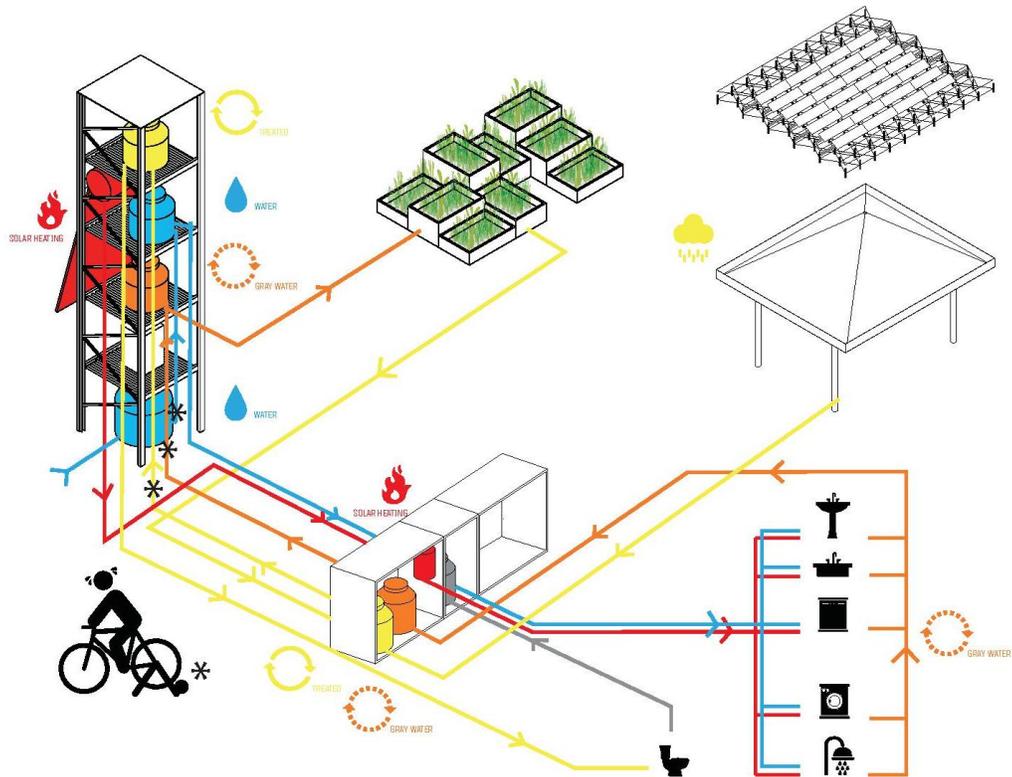


Figura 2.9. Sistema hidráulico

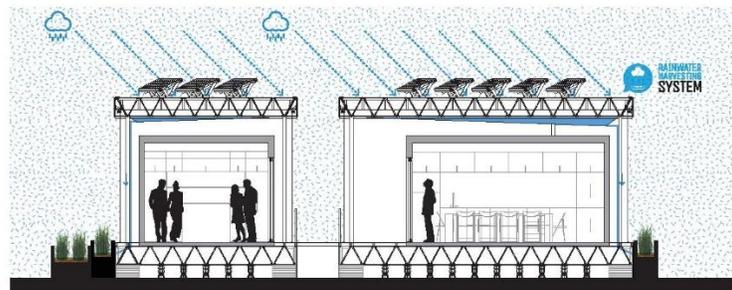


Figura 2.10. Control pluvial y captación

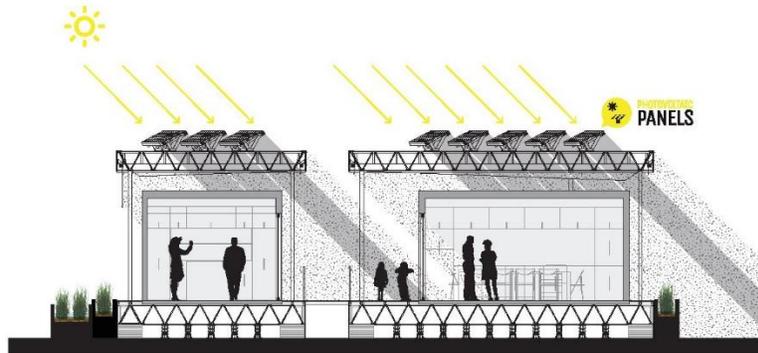


Figura 2.11. Sistema Solar (Control solar y producción energética)

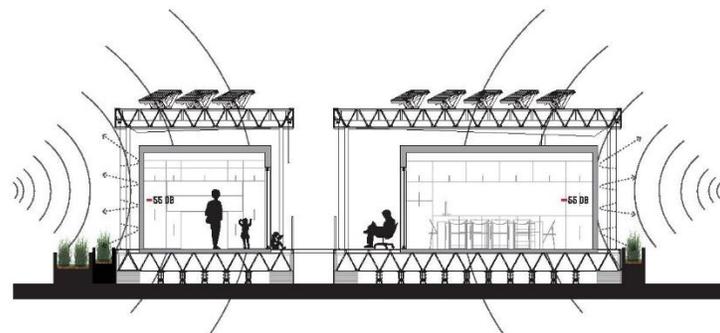


Figura 2.12. Control Acústico

La casa cuenta con paneles fotovoltaicos ubicados sobre la cubierta de cada módulo (figura 2.11). El sistema eléctrico está compuesto por una serie de componentes tales como: conductores eléctricos, interruptores, tablero de mando, contactos, conductos, canastilla y plano de iluminación. Para la competencia en la ciudad de Versalles este sistema tuvo que modificarse para que funcionara con un voltaje de 240 V, en lugar de 120 V, que es el voltaje de la energía eléctrica en México. En el balance eléctrico se procuró crear la mayor cantidad de energía para obtener un balance positivo. Todos los dispositivos electrodomésticos fueron seleccionados de bajo consumo para un mejor aprovechamiento. Adicionalmente, se hizo una estimación del tiempo en el que se empezarían a obtener beneficios ecológicos con el uso de paneles fotovoltaicos, siendo 2.9 años y su periodo de vida útil de 30 años, por lo tanto, se tienen 27 años de energía limpia.

Otras de las características importantes de CASA UNAM es que cuenta con un sistema de monitoreo que mide el agua, CO₂, temperatura, humedad y acústica. También, cuenta con un sistema de control automático de iluminación y de ventilación de la casa (figura 2.13). En el diseño de la casa se tomó en cuenta la térmica de la casa; la ambientación y los tanques termales solares. En cuanto al ambiente dentro de la casa, a pesar de que se cuenta con un sistema de circulación de aire, este casi es innecesario gracias al sistema de climatización pasiva (muros, textiles y arquitectura). El sistema de climatización consiste en una iluminación eficiente que aprovecha la luz de día, una cubierta ligera que protege el espacio habitable de los rayos del sol permitiendo el intercambio de aire y la ventilación natural, muros y ventanas que aíslan los espacios habitables; se usan colores claros para un efecto albedo, la vegetación es usada para mitigar los efectos del calor y expandir la cubierta verde; y, finalmente la distribución de los espacios está ideada para optimizar los requerimientos de enfriamiento y calentamiento. Además, si fuera necesario, existe un calentador de agua eléctrico por cualquier emergencia.

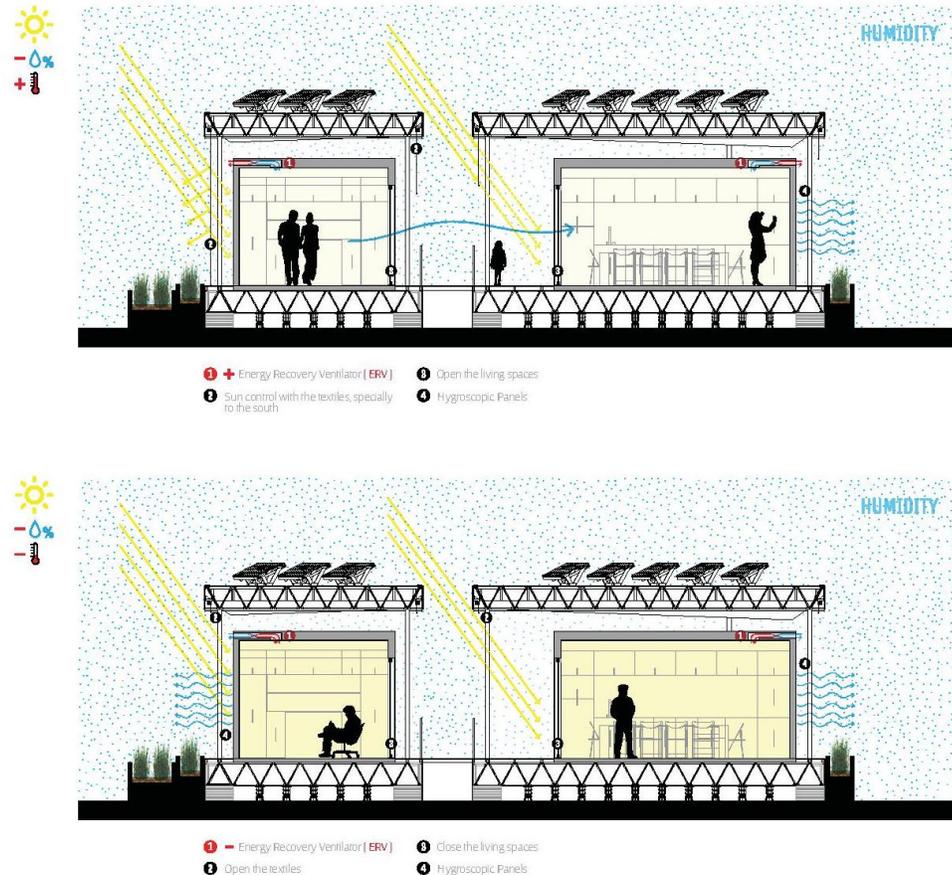


Figura 2.13. Bioclimática en circulación de aire e iluminación solar

La elección del sistema estructural (figura 2.14) fue el resultado de varias condiciones puestas a flote por el concepto, el propósito y la competencia. La solución de la estructura debía hacer converger los fines de la casa en la ciudad de México y los de la competencia. Para la participación en Versailles, se tenían que asegurar tres principales líneas guía: transporte, recursos humanos y el tiempo de construcción. En cuanto al transporte, se tuvieron limitantes de dimensiones, peso, manipulación y costos. Para el tiempo, se contaron con dos retos: el tiempo de envío y el de construcción. Además, la construcción de la casa debía ser completada por los miembros del equipo en un plazo no mayor a diez días. Esto llevó al diseño de un proceso constructivo sencillo y dividido en once fases que se describen en la figura 2.14.



Figura 2.14. Estructura tridimensional del proyecto CASA UNAM en el MUCA C.U.

El proceso constructivo fue determinado por las restricciones que plantea la competencia y el propósito final del diseño. Para la participación en Versalles, se abordaron tres puntos importantes planteados como los que más impactarían al proyecto: transporte, recursos humanos y el tiempo. En cuanto al transporte, las limitantes fueron: dimensiones de contenedores, peso, manipulación de elementos, logística y costos. Para el tiempo, los retos fueron: el tiempo de envío de la casa y el de construcción.

Al momento de competir, el proceso constructivo final planteado para el sitio fue:

1. Primero, la parte inferior de la estructura tridimensional y cimientos
2. Luego, pisos de madera, muros prefabricados y techos de los módulos habitables
3. Después columnas y cubiertas con paneles fotovoltaicos.
4. Cuarto, acabados y textiles
5. Finalmente, rampas de acceso.

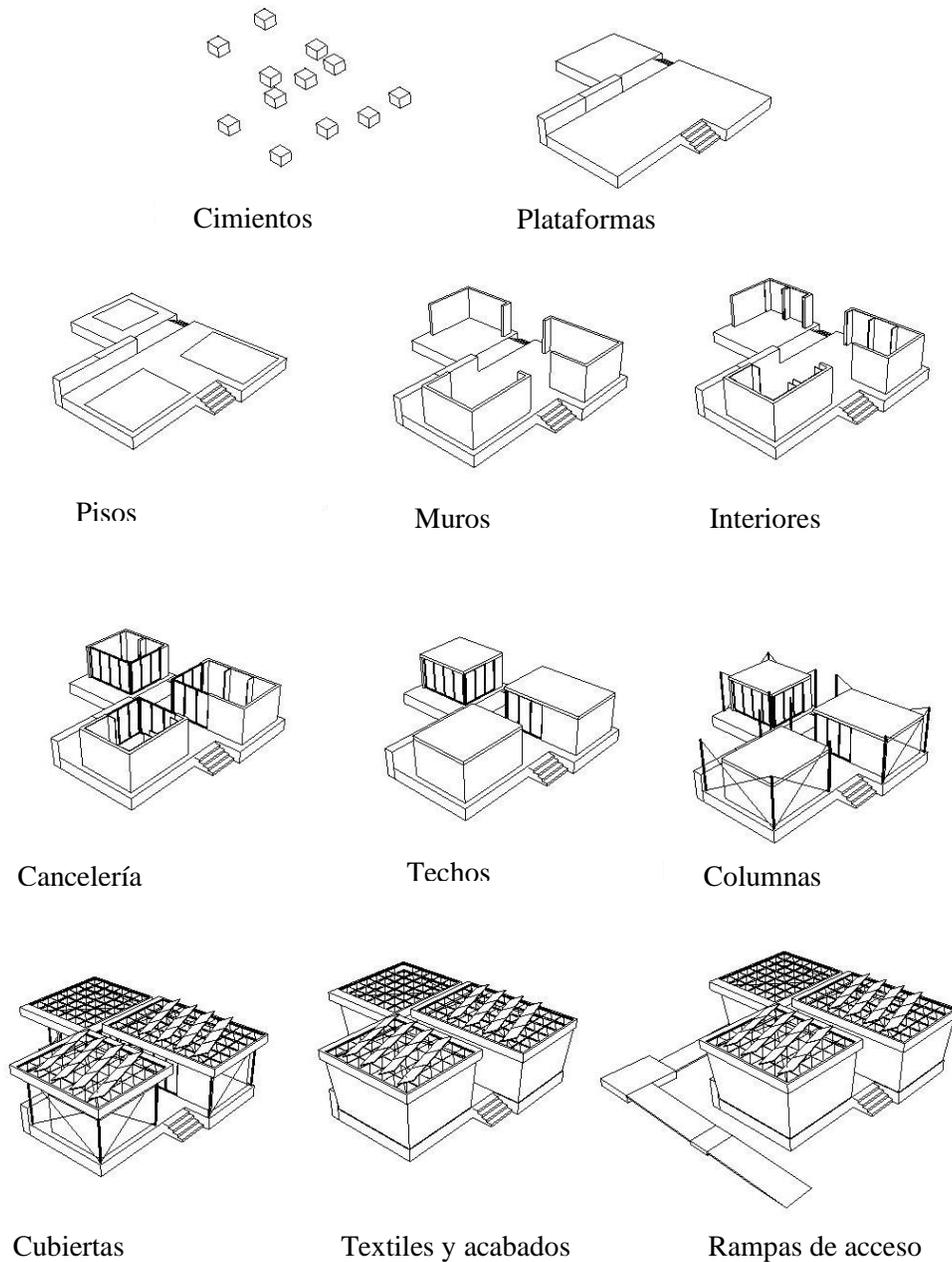


Fig. 2.14 – Proceso constructivo

De este modo, para la elección del sistema estructural de la casa se consideraron los siguientes puntos:

- Modularidad
- Ligereza
- Auto construcción
- Fácil de ensamblar y desensamblar
- Transportabilidad
- Compatibilidad con otros sistemas
- Flexibilidad
- Optimización en cuanto a ocupación del área.

Bajo la consideración de estos puntos y de entre diversas propuestas, la elección final fue una estructura tridimensional (figura 2.15). Esta estructura está compuesta por nodos, cuerdas y diagonales construidos con perfiles de acero ligero, unidos mediante conexiones atornilladas. A pesar de que no es utilizada para fines habitacionales, estas características permitieron obtener una estructura simple y eficiente, atendiendo problemas de soporte, cimentación, peso y sujeción tanto en la competencia como en el caso de aplicación en México. Las características de este sistema cumplen en gran medida con los propósitos definidos. Además, se tiene la ventaja de que este tipo de sistema se encuentra disponible en el mercado y fue posible conseguir el patrocinio de estos materiales con uno de los principales fabricantes en el mercado nacional. Solo fue necesario adaptarlo a nuestras necesidades.



Figura 2.15. Estructura Tridimensional

3 ESTRUCTURACIÓN DE LA CASA

3.1 ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL DEL SISTEMA DE CUBIERTA Y PISO

El sistema tridimensional de acero formado en frío utilizado tanto en la cubierta como en el piso, ofrece alta resistencia y bajo peso, reduciendo la carga muerta. Esto también permitió reducir los costos de transporte (fundamental para el concurso). Además, permite una mejor distribución de las cargas y cubre claros grandes.

Debido a la prefabricación de las piezas y a que las conexiones de estos elementos son atornilladas, el proceso constructivo resultó simple. Con el adecuado mantenimiento, las estructuras diseñadas con este tipo de perfiles, pueden tener un periodo prolongado de vida de al menos 70 años [10].

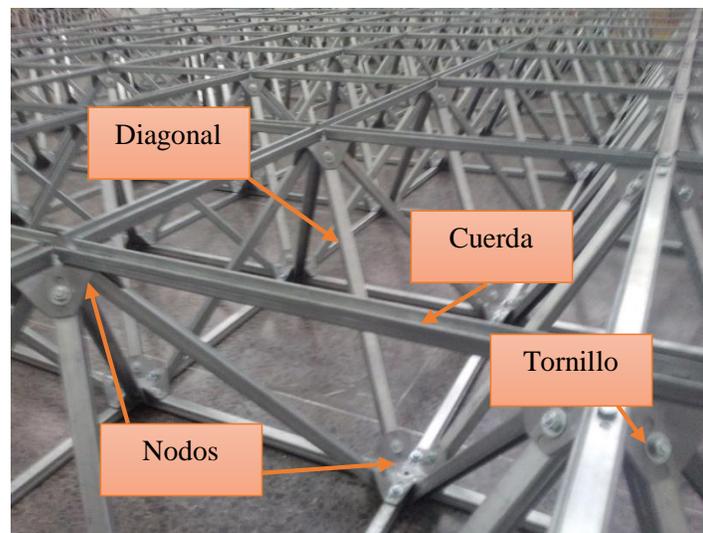


Figura 3.1. Partes de la estructura tridimensional

La estructura tridimensional de la cubierta está formada por cuerdas superiores e inferiores y diagonales. Estos elementos son armados en módulos de forma triangular (figura 3.1), estos se encuentran conectados por medio de nodos y cada una de las cuerdas o diagonales se conecta a un nodo con un tornillo, de manera que, idealmente, todos los elementos se encuentran trabajando en compresión o en tensión pura (sin flexión o cortante) y que todas las fuerzas de empuje se resuelvan internamente. Sin embargo, para este estudio, no se consideraron las juntas como articuladas sino que se consideró la posible transmisión de momentos.

Con este sistema, las únicas actividades a realizar para el armado fueron: el atornillado de barras a nodos y la fijación de la estructura sobre los apoyos distribuidos, las zapatas y las columnas, pues como se recordará todos los elementos estructurales son prefabricados. Además, no se requiere de mano de obra especializada ni de herramientas sofisticadas. Sólo para el izaje y montaje de la cubierta fue necesario contar con el apoyo de una grúa, pues la cubierta fue armada a nivel del suelo. El armado de la estructura es por secciones: primero cuerdas inferiores, luego diagonales y por último cuerdas superiores.

3.1.1 Cuerdas y diagonales

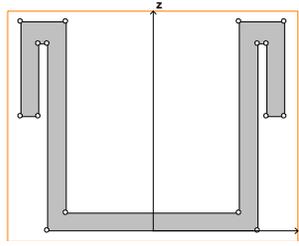


Figura 3.2. Perfil del elemento “cuerda y diagonal”

Las cuerdas y diagonales fueron proporcionadas por el proveedor con las dimensiones y perforaciones requeridas (figura 3.2). Estas tienen un espesor de 1.9mm (Cal. 14). El acero formado en frío, facilita la fabricación de perfiles con secciones transversales poco comunes y de acuerdo con las demandas del proyecto. Asimismo, puede reciclarse. Por otra parte, cuenta con un baño de galvanizado tratado con zinc para evitar la corrosión de los perfiles.

3.1.2 Tornillos

El tipo de tornillos seleccionado fue de cabeza hexagonal ($5/16'' \times 3/4''$) galvanizado y con un grado 5. Principalmente, se hizo esta elección debido al reúso al que estarían sometidos estos, pues la estructura tenía que armarse y desarmarse al menos tres veces, además, debían protegerse de la corrosión.

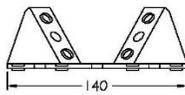
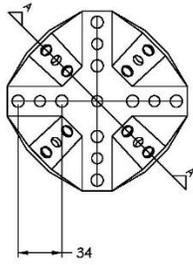
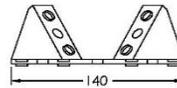
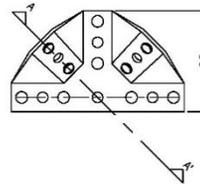
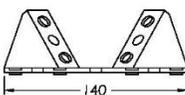
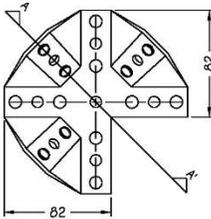
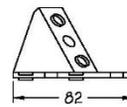
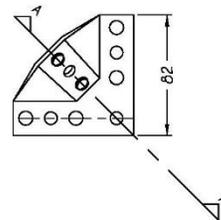
3.1.3 Nodos

Los nodos son prefabricados, disponibles en el mercado. Se producen específicamente para cada tipo de formación tridimensional y, en este caso, permiten un ángulo de inclinación para las diagonales de 52° .

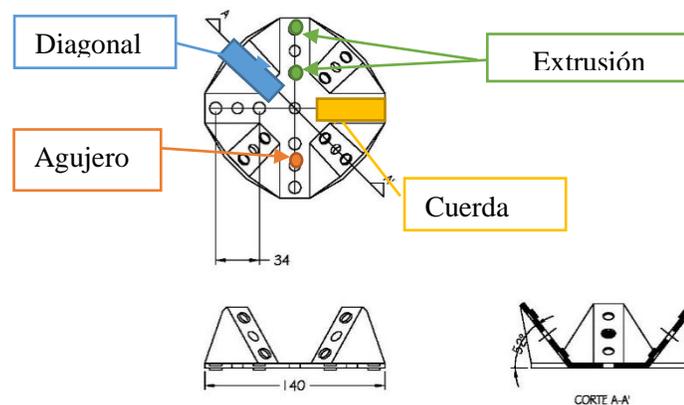
Para este sistema se utilizaron ocho tipos de conectores: 4 diferentes para la parte superior y 4 diferentes para la parte inferior. Estos se diferencian por la dirección de las extrusiones, lo cual indica su posición dentro del sistema estructural: superior o inferior. En estas extrusiones se insertan las cuerdas y diagonales y se fijan con un tornillo. A continuación se describen las características de cada uno:

- El Nodo A o “completo” (figura 3.3), es el que recibe de todos sus lados diagonales y cuerdas y se utiliza para el centro de la estructura, es decir la mayor parte de la estructura.
- El Nodo B o “mitad” (figura. 3.4), recibe dos diagonales y tres cuerdas. Se coloca en toda la orilla de la estructura menos esquinas.
- El Nodo C o “7/8” (figura 3.5), recibe todas las cuerdas y sólo 3 diagonales. Se usa muy poco y es para una esquina donde suceda esa característica.
- El Nodo D o “esquina” (figura 3.6), se usa sólo en las esquinas donde se acoplan 2 cuerdas y una diagonal.

Aunque los nodos se conectan a las barras mediante un solo tornillo, estos nodos cuentan con un par extrusiones que se insertan en las barras simulando la adición de un par de tornillos de sujeción, restringiendo la capacidad de giro de estas conexiones.

**Figura 3.3. Nodo A****Figura 3.4. Nodo B****Figura 3.5. Nodo C****Figura 3.6. Nodo D**

En la figura 3.7 se indica la posición de los agujeros, de las extrusiones, de las cuerdas y diagonales.

**Figura 3.7. Armado de un nodo**

3.2 COLUMNAS

Las columnas fueron diseñadas utilizando un perfil OC (tubular circular) (figura 3.8) por ser el más adecuado para el proyecto. A estas se les adaptaron, por medio de soldaduras, los apoyos donde los tensores serían colocados. En los extremos se colocaron placas base para facilitar su conexión con las estructuras de la cubierta y del sistema de piso (figura 3.9). La placa base (o placa de asiento) es una pieza plana cuadrada soldada al perfil tubular y con los orificios necesarios para ser atornillada a la estructura tridimensional.

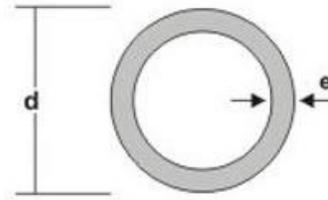


Figura 3.8. Perfil Columna

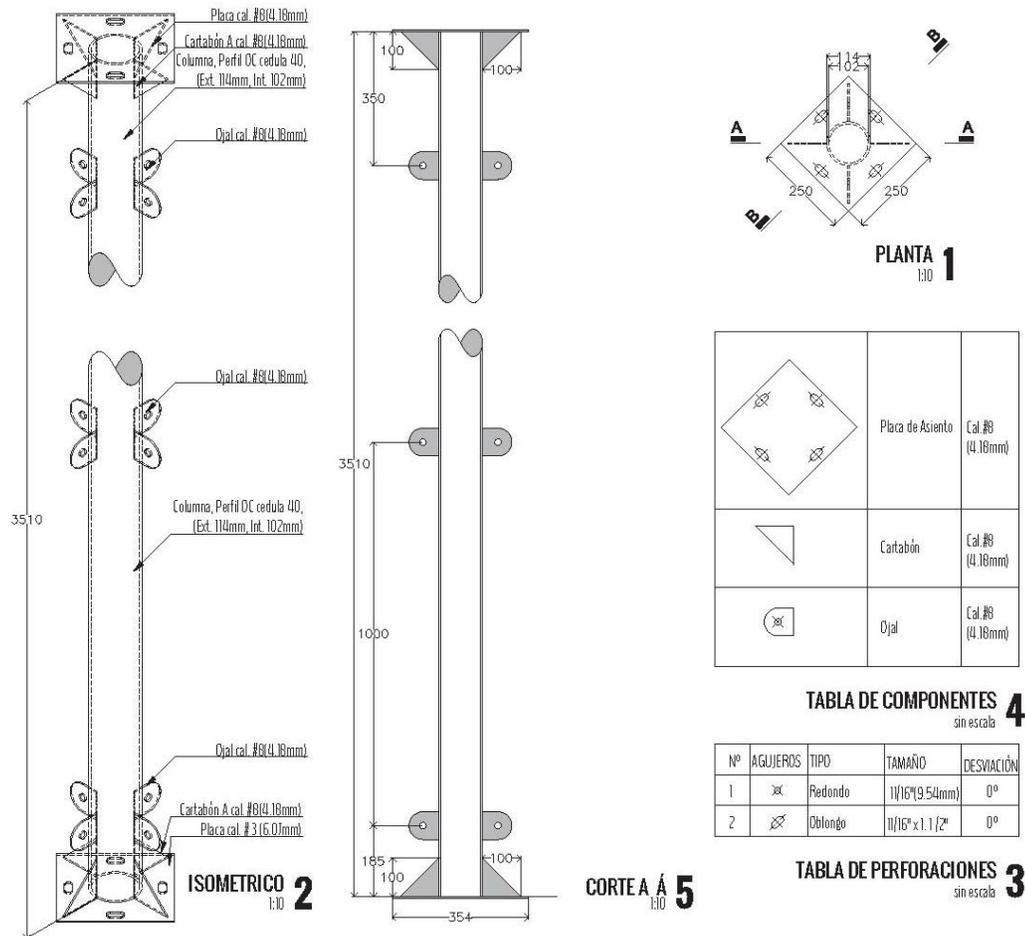


Figura 3.9. Geometría de las columnas

3.3 CONECTORES DE COLUMNA AL SISTEMA ESTRUCTURAL Y A ZAPATAS

El diseño de los elementos “conector de columna” fue muy importante, pues estos debían asegurar una correcta interacción entre elementos. Por un lado se tiene el “conector de cimentación” (figura 3.10), sobre la cual descansa la columna, además la estructura tridimensional inferior se conecta y, este conector se atornilla a las zapatas de cimentación. En otras palabras, el objetivo de este conector es que la transmisión de las cargas de las columnas hacia las tablas de cimentación sea directa y no a través de la estructura del sistema de piso. Esto, para asegurar un mejor comportamiento estructural de toda la vivienda. Fue uno de los elementos estructurales más complicado en definir, pues este debía ser de rápido ensamble, seguro y efectivo en cuanto a interacción entre elementos. Por otra parte, para lograr la conexión de la columna con la cubierta, se diseñó un conector que permite la interacción de la estructura tridimensional superior con la columna y además, de la estructura inferior con los apoyos distribuidos. A este elemento se le denominó “interfaz” (figura 3.11).

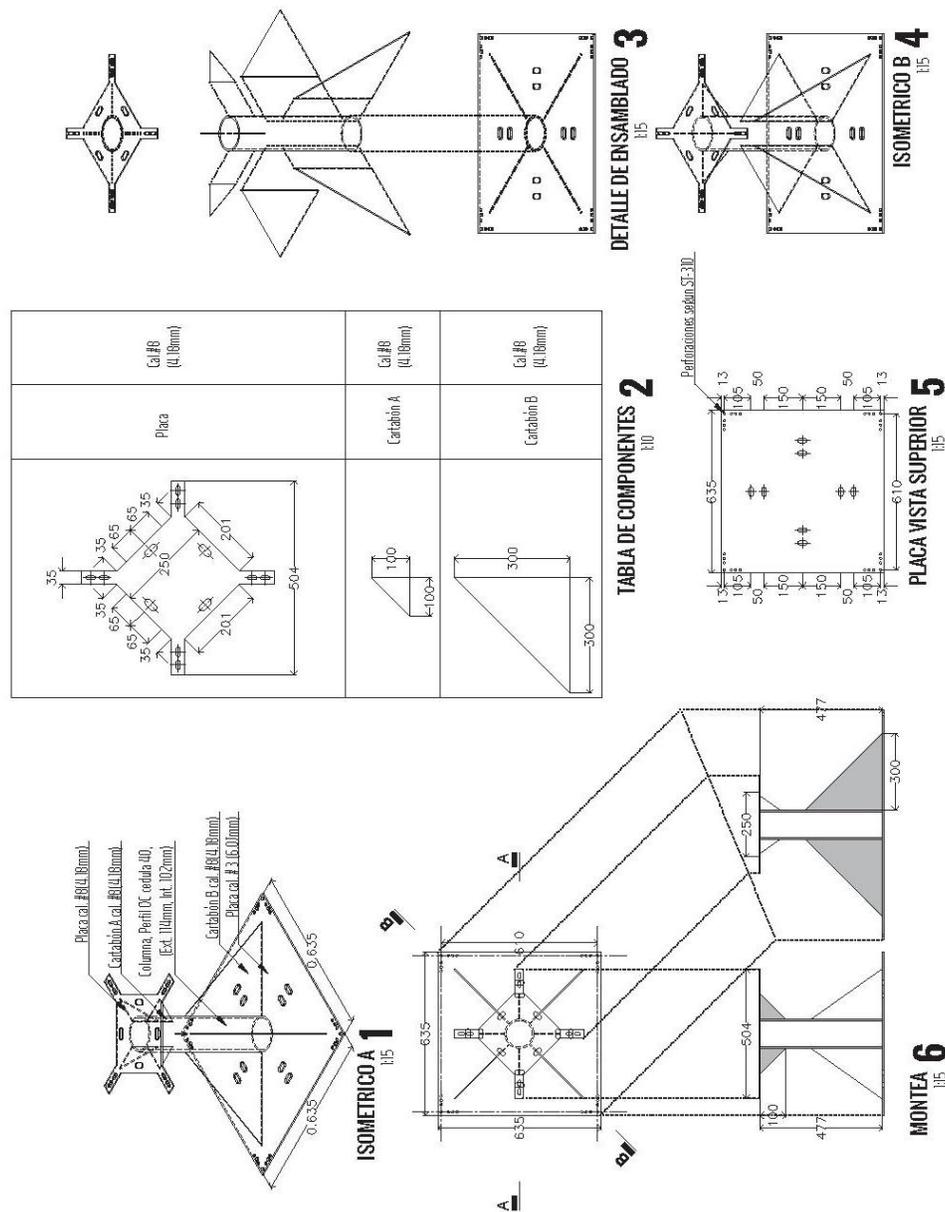


Figura 3.10. “Conector de cimentación” - Conector de columna al sistema de piso y cimentación

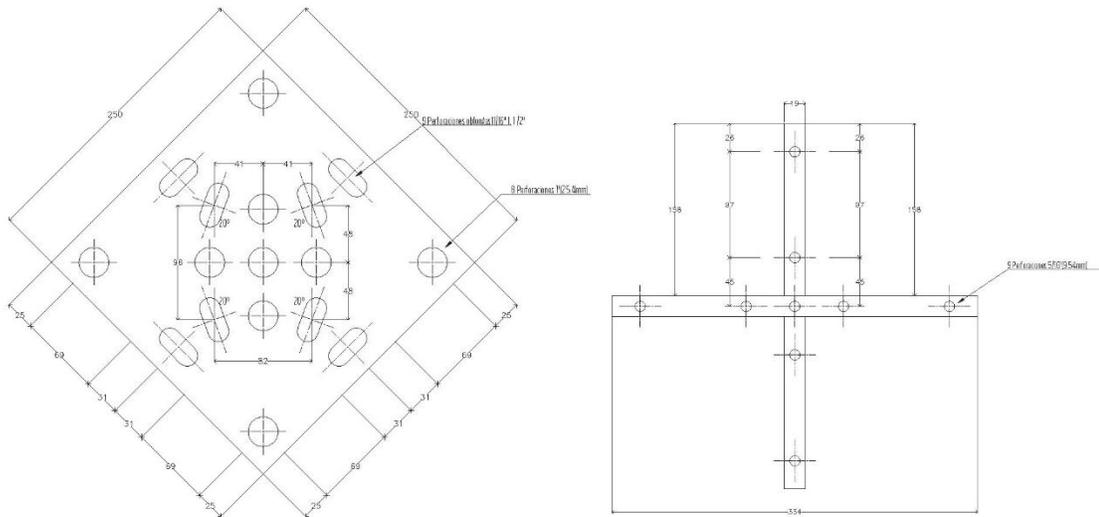


Figura 3.11. “Interfaz” – Conector de columna-estructura y estructura-apoyos

3.4 CONTRAVENTEOS

Se colocaron contraventeos para incrementar la rigidez y reducir los efectos de torsión de la estructura. Sin embargo, por limitaciones impuestas por el proyecto arquitectónico, estos no se ubicaron donde eran más efectivos. Se utilizaron cables de $\frac{1}{4}$ ” de diámetro (figura 3.12).

El cable que se eligió tiene características que se adaptan al proyecto. Además de la resistencia a las cargas aplicadas están la facilidad de transporte y colocación, y su resistencia a la corrosión.

Así mismo, cada cable lleva un juego de grilletes para adaptarse a la conexión de la columna y un tensor. De igual manera, los tensores y los grilletes fueron elegidos de manera a que respondieran a las necesidades de las cargas aplicadas más desfavorables y con consejo del proveedor.

- El tensor (figura 3.13) elegido fue de $\frac{1}{2}$ ”x6” con capacidad para 680 kg (6.67 kN) por disponibilidad y aceptación del fabricante.
- El grillete (figura 3.14) fue de $\frac{1}{2}$ ” con capacidad para 2 t (19.62 kN) por necesidad para librar la geometría de la columna, además de que satisface los límites.



Figura 3.12. Corte transversal de tipo de cable utilizado

**Figura 3.13. Tensor 1/2*6****Figura 3.14. Grillete de 1/2**

En la Tabla 3.1 se muestran las características de los cables:

Tabla 3.1. Características de los cables

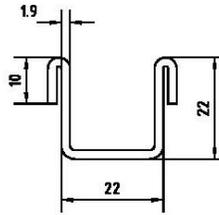
Concepto	
Nombre	Barracuda
Serie	6 X 19
Diámetro	1/4 "
Alma	Acero
Terminado	Galvanizado
Peso (kg/m)	0.18
Carga de Ruptura (kN)	30.411 (3.1 ton)

Debido a su tipo de uso (habitacional), el Factor de Seguridad es 3 de acuerdo con las normas de la empresa fabricante. Esto resulta en un cable capaz de resistir al menos 10.14 kN (1 033 kg) de acuerdo al factor de seguridad.

3.5 PROPIEDADES MECÁNICAS Y GEOMÉTRICAS DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES

3.5.1 Cuerdas y diagonales

Las cuerdas y diagonales empleadas en el sistema de piso y de cubierta tienen las características mostradas en las tablas 3.2 y 3.3.


Figura 3.15. Geometría del elemento “cuerda y diagonal”
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del acero laminado en frío

Propiedades del acero laminado en frío	Valor
Esfuerzo de Fluencia (F_y)	344737 kN/m ²
Módulo Elástico (E)	206000000 kN/m ²
Peso Volumétrico (W)	76.97 kN/m ³
Esfuerzo último (F_u)	448317 kN/m ²
G	80472656.3 kN/m ²
Relación de Poisson (μ)	0.28

Tabla 3.3. Propiedades geométricas del elemento “cuerda y diagonal”

Parámetro		Valor	
A	Área transversal	1.61	cm ²
Av,y	Área convencional de cortante a lo largo del eje Y	0.6	cm ²
Av,z	Área convencional de cortante a lo largo del eje Z	0.25	cm ²
Iy	Momento de inercia respecto a eje paralelo a Y	0.9	cm ⁴
Iz	Momento de inercia respecto a eje paralelo a Z	1.64	cm ⁴
J	Momento torsional de inercia (St. Venant)	0.02	cm ⁴
Cw	Contante de Pandeo	0.54	cm ⁶
ry	Radio de giro del eje paralelo a Y pasando por el centroide	0.75	cm
rz	Radio de giro del eje paralelo a Z pasando por el centroide	1.01	cm
yM	Distancia al centroide en Y	1.1	cm
zM	Distancia al centroide en Z	1.05	cm
Yb	Distancia al centro de cortante en Y	0.01	cm
Zb	Distancia al centro de cortante en Z	-0.76	cm
Ip	Momento de Inercia Polar	2.53	cm ⁴
ip	Radio de Giro Polar	1.26	cm

3.5.2 Columnas

El elemento columna utilizado para el proyecto contiene las características mostradas en las tablas 3.4 y 3.5.

Tabla 3.4. Propiedades mecánicas del acero A-36

Propiedades del acero A-86 (columnas)	Valor
Esfuerzo de Fluencia (F_y)	248211 kN/m ²
Esfuerzo último (F_u)	399896 kN/m ²
Módulo Elástico (E)	200000000 kN/m ²
Peso Volumétrico (W)	76.97 kN/m ³
Módulo de cortante (G)	76903069 kN/m ²
Relación de Poisson (μ)	0.3

**Tabla 3.5. Propiedades geométricas del elemento Columna**

Propiedades Geométricas	Valor	U
Diámetro (d)	114	mm
Espesor (t)	6	mm
Área	2036	mm ²
h/tw	20.5	
Ix	297.73	cm ⁴
Sx	52.23	cm ³
Rx	3.9	cm
Cc	128.38	
KL/r	91.78	
C	99	cm ³
J	566	cm ⁴

3.6 CIMENTACIÓN

Como se mencionó anteriormente, las cargas soportadas por las columnas se transmitieron directamente a las zapatas de cimentación mediante el uso del conector “zapata de cimentación”. Además, se utilizaron unos apoyos distribuidos denominados “buzones” como complemento de la cimentación.

3.6.1 Apoyos distribuidos (“buzones”)

Estos apoyos prefabricados fueron distribuidos estratégicamente bajo ciertos nodos para repartir las cargas (muertas y vivas) hacia la superficie de apoyo (suelo).

Las características que proporciona el fabricante son que cada uno de estos buzones tiene un sistema ajustable en altura y ángulo de inclinación en el contacto directo al suelo (figura 3.16). Asimismo, la carga máxima que puede soportar cada buzón es de una tonelada.

Para evitar concentraciones de esfuerzos sobre el suelo debido a los buzones y evitar hundimientos diferenciales, se incrementó el área de contacto con este mediante la colocación de una base cuadrada de 0.50m de lado y 0.01 m de espesor.

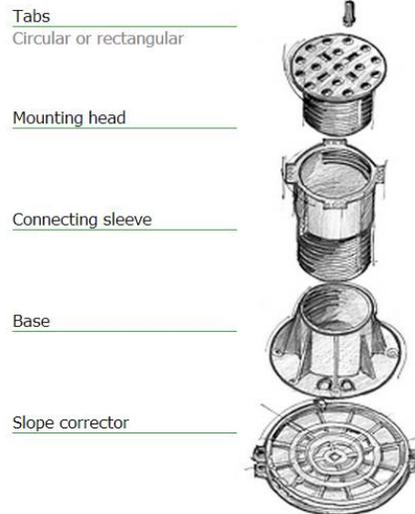


Figura 3.16. Apoyo distribuido (“Buzón”)

3.6.2 Zapatas para columnas “zapatas de cimentación”

Las zapatas para columnas son hojas de madera cuadradas de 0.01m de espesor y 0.90m de lado apiladas y clavadas. Estas reciben las cargas transmitidas por la columna y de cierta cantidad de la parte inferior de la casa: la del área tributaria a ese apoyo. Este tipo de zapata cuadrada tiene una mayor área de contacto que la base cuadrada de madera utilizada por los apoyos distribuidos (0.01m de espesor y 0.50m de lado) debido a que la carga recibida de las columnas es mayor. También, para dimensionar estos apoyos y evitar la presencia de hundimientos no deseados, se tomaron en cuenta las características del terreno donde se desarrollaría la competencia en Versailles (figura 3.17). Estos datos fueron proporcionados por el Comité Organizador de la competencia. En la figura 3.18, se aprecian la ubicación de todos los apoyos.



Figura 3.17. Terreno de la Villa Solar, Versailles, Francia

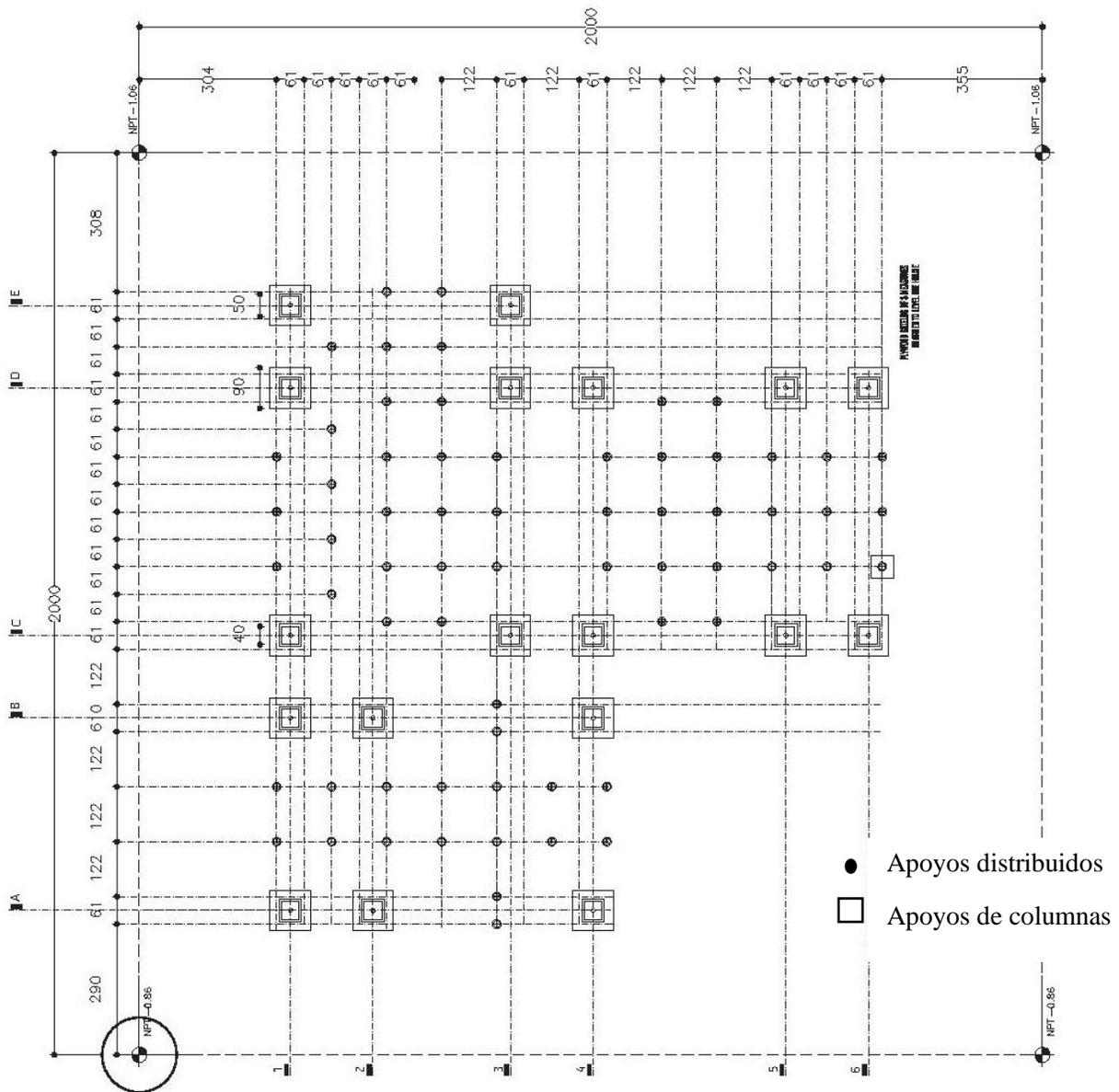


Figura 3.18. Plano de ubicación de apoyos

3.7 ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

3.7.1 Muros de paneles prefabricados

El sistema de muros consta de una estructura de perfiles de aluminio con tensores colocados estratégicamente para rigidizar el conjunto (figura 3.19). Estos son cubiertos y rigidizados por tablas prefabricadas de yeso y fibra de vidrio principalmente (figura 3.20). Varias capas de estas tablas envuelven la estructura del muro ofreciendo un clima seco dentro de la casa y de seguridad ante

incendios. Además entre estos muros, dentro del espacio creado por la estructura de acero, se colocó una capa de lana de piedra la cual tiene la función de brindar protección acústica y de temperatura.

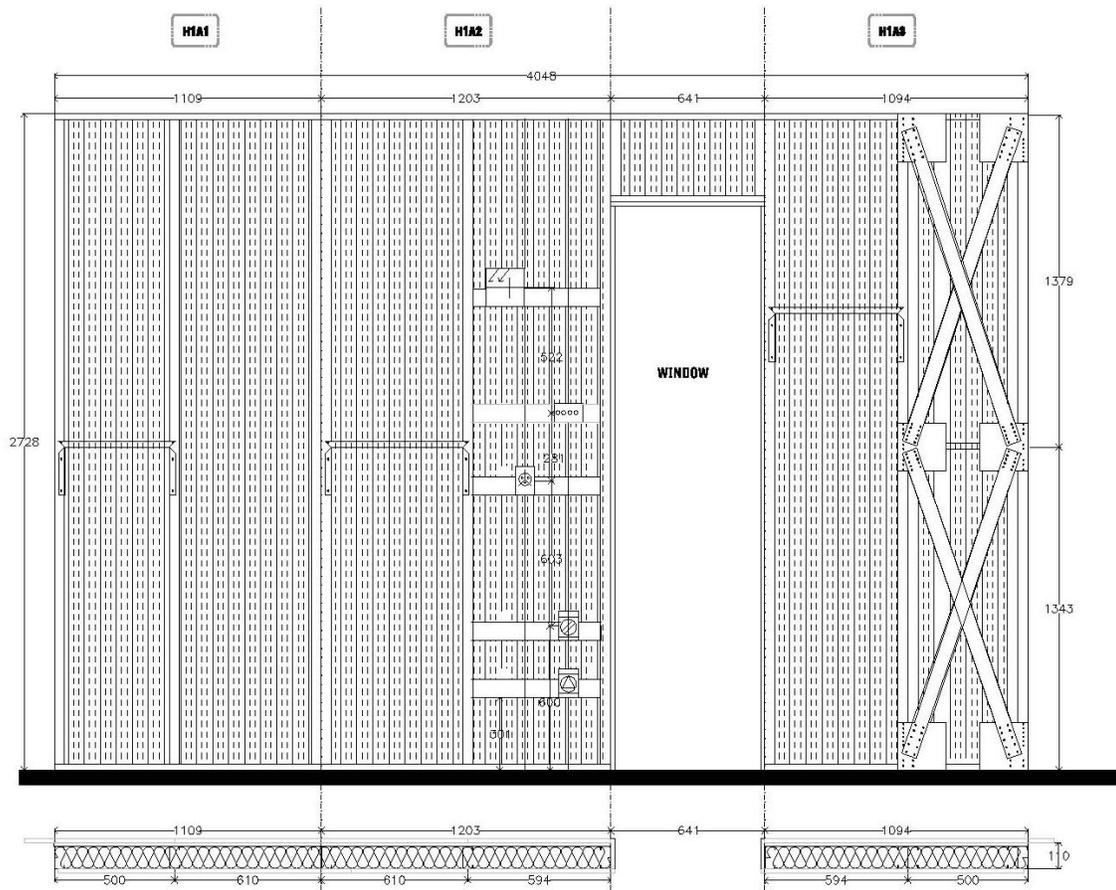


Figura 3.19. Estructura de aluminio con muros prefabricados

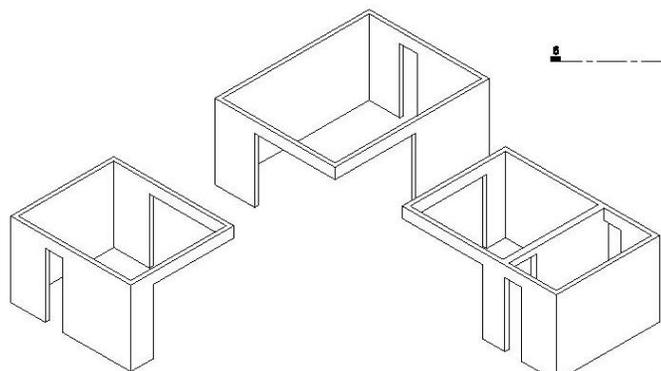


Figura 3.20. Diseño de los muros prefabricados

Cabe destacar, que estos muros funcionan de manera independiente de la cubierta de estructura tridimensional y las columnas, es decir, no están fijados a estos, sólo al piso. Además, hay una distancia considerable entre los muros y las columnas y entre el techo de los módulos y la cubierta.

3.7.2 Piso y techo

Estos elementos constan de un bastidor de madera que alberga en su interior lana de piedra para cumplir las mismas funciones que los muros en cuanto a conservación de temperatura y protección acústica. Además, contienen la colocación de las instalaciones eléctricas y del ventilador (figura 3.21).

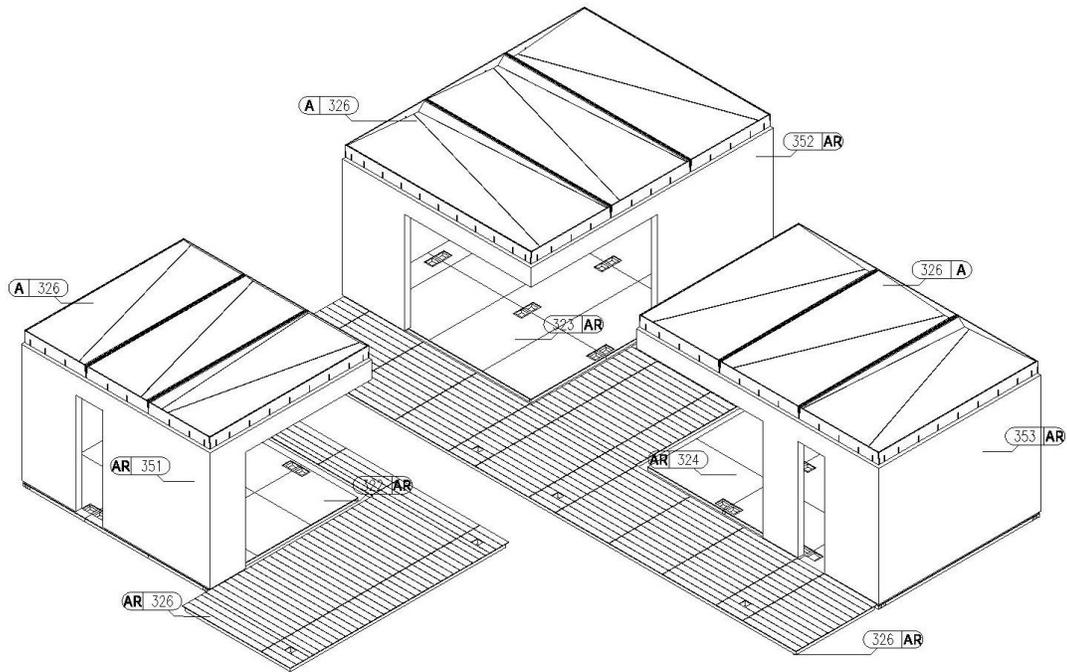


Figura 3.21. Piso y Techo de modulo habitable

En cada módulo, estas piezas son ensambladas sencillamente con tornillos (de 9/16”). Luego para el sellado de juntas, a lo largo de ellas, se aplica una capa de silicona (figura 3.22).

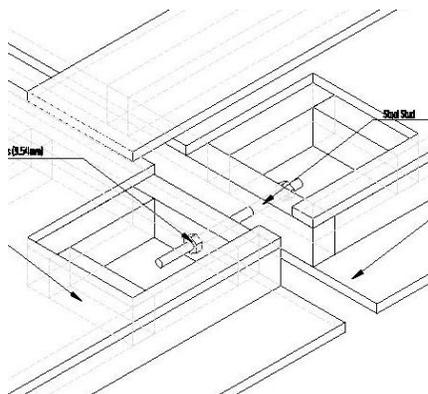


Figura 3.22. Atornillado de piezas de los módulos habitables

3.7.3 Cancelería

El sistema de la cancelería está formado por la cancelería misma y por marcos anclados a la estructura que aseguran la estabilidad del conjunto. Además de la estabilidad del voladizo que se crea en algunas secciones de la vivienda (figura 3.23).



Figura 3.23. Render de módulo “Recámara” (se aprecia voladizo)

Los perfiles utilizados para la cancelería y postes, tienen un perfil PTR (63.5x63.5x3.2 mm) y se muestran en la figura 3.24.

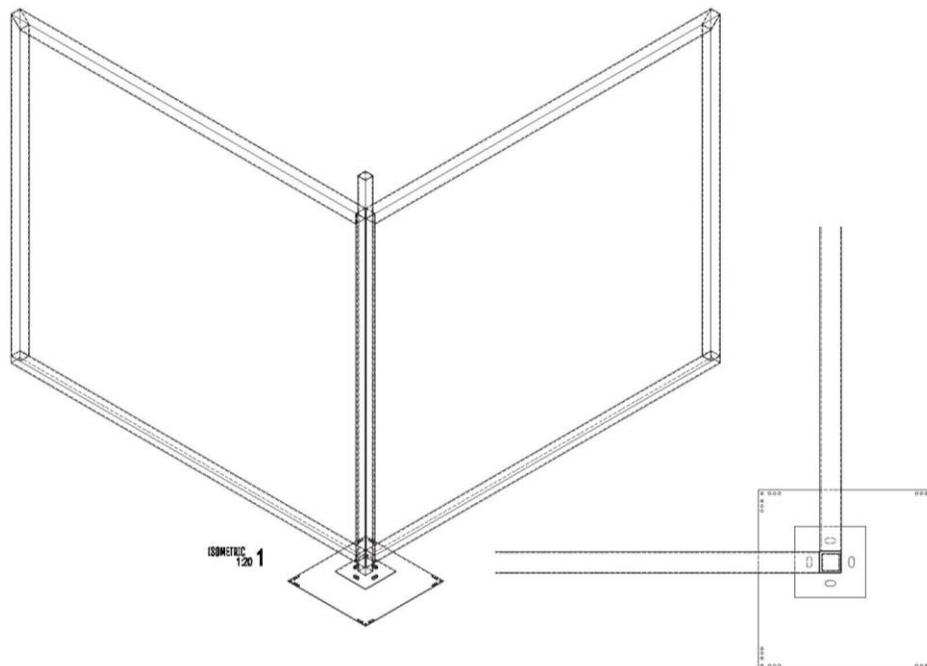


Figura 3.24. Planos de postes y marcos



3.8 LA ESTRUCTURA EN NÚMEROS

Dentro de la tabla 3.6 están indicados los conceptos que fueron utilizados para la construcción de la estructura: desde los tornillos, hasta las columnas. En ésta, vienen indicadas las cantidades requeridas de cada elemento al igual que las cantidades solicitadas al proveedor (las cantidades de los elementos de la estructura tridimensional contemplan el desperdicio).

El concepto “tornillos” incluye el propio tornillo, rondana y tuerca.

Tabla 3.6. Cantidades por concepto de los distintos elementos usados en la estructura

Concepto	Cantidad requerida	Al Proveedor		
<i>Elementos de la estructura tridimensional</i>				
TORNILLOS	10776	12500		
CUERDAS	2665	2800		
DIAGONALES	2669	2800		
Nodo A SUP	628	650		
Nodo A INF	565	630		
Nodo B SUP	42	50		
Nodo B INF	193	230		
Nodo C INF	2	5		
Nodo D SUP	1	5		
Nodo D INF	18	30		
<i>Elementos especializados fabricados</i>				
Columnas	18	18		
Conectores de columnas al sistema de piso y zapata de cimentación	18	18		
Accesorio "interface" para conexión columna-estructura y estructura-apoyos	90	90		
<i>Cables</i>			Long. Necesaria	Long. Solicitada
Cortos	12	12	284.7	285
Módulo 1	2	2	449.93	450
Módulo 2	2	2	500.38	500
Módulo 3	2	2	552.77	550
<i>Accesorios para cables</i>				
Grillete	18	18		
Tensor	18	18		
<i>Elementos de la cimentación</i>				
Apoyo "Buzón"	65	80		
Maderas para buzón	65	80		
Maderas para columna	36	40		



4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.1 REGLAMENTOS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

El análisis y diseño estructural de CASA UNAM se realizó siguiendo las recomendaciones incluidas en los siguientes reglamentos.

- RCDF (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2004) y sus Normas Técnicas Complementarias [1],[2]
- Especificaciones para el diseño de miembros estructurales de acero formado en frío, 1996. AISI (America Iron and Steel Institute) [3]
- NF EN 1990/Mars 2003 (Normas Francesas/Norma Europea) (*Sólo para comparación*) [5]

Se usaron las normas del AISI para el acero formado en frío y no aquellas del IMCA pues se decidió usar un documento internacional dada la naturaleza del concurso.

Dado que la construcción y puesta en operación de la casa sería en la ciudad de Versalles, por indicación del Comité Organizador, fue necesario la consulta de las normas francesas de construcción, específicamente para verificar el cumplimiento de las normas mexicanas con aquellas francesas respecto a acciones vivas, muertas y por viento.

Como resultado de esta comparación se pudo apreciar que las normas francesas, para viento resultaban las mismas restricciones. Por ello se decidió continuar únicamente con las normas mexicanas y se mencionarán a lo largo de esta tesis.

Para el análisis sísmico propuesto se utilizaron únicamente las normas mexicanas ya que además, en este ámbito las RCDF es más estricto que aquel que se maneja en Francia.

4.2 ANÁLISIS DE LAS CARGAS

Para las acciones permanentes o cargas muertas, se estudiaron las condiciones de carga de los tres módulos, seleccionando el valor más desfavorable para aplicarlo en el diseño de cada uno de estos módulos. Para el piso, se tomaron en cuenta los muebles, el piso, techo y muros de los habitáculos, y la fachada ventilada. Para la cubierta se tomaron en cuenta los paneles solares, y el sistema de textiles.

En cuanto a las cargas variables o cargas vivas, se utilizaron las condiciones especificadas en [2].

A continuación, en la tabla 4.1, se presentan las cargas permanentes y variables consideradas en la cubierta y en el piso.

Tabla 4.1. Acciones Permanentes (DL) y Variables (LL)

Ubicación	Tipo	Carga (kPa)
PISO	DL	1.53
	LLmax	1.7
	LLacc	0.9
TECHO	DL	0.11
	LLmax	1.0
	LLacc	0.7

4.3 ANÁLISIS SÍSMICO

4.3.1 Planteamiento del problema

Para propósitos de la competencia no era necesario realizar un análisis sísmico riguroso del modelo como el que conlleva plantear un proyecto estructural en la ZMVM. Sin embargo, para el caso de estudio, se hizo un análisis preliminar de comportamiento sísmico de CASA UNAM. Aunque, es importante mencionar que para su implementación en el DF, es necesario hacer una serie de adecuaciones de acuerdo con las condiciones del sitio donde se desee desplantar y que no se incluyen dentro de esta tesis. Por ejemplo, de acuerdo al sitio de estudio, para fijar los módulos de CASA UNAM sobre la casa que se desee desplantar una de las soluciones es colocarla sobre un armado de acero apoyado en los muros.

El caso de estudio, como se mencionó, fue planteado en la Unidad Habitacional Vicente Guerrero de la Delegación Iztapalapa, México, D.F. Este punto se encuentra en una zona lacustre del Distrito Federal (figura 4.1) donde las acciones sísmicas son muy importantes. De acuerdo con [2], se encuentra ubicado en la Zona IIIb.

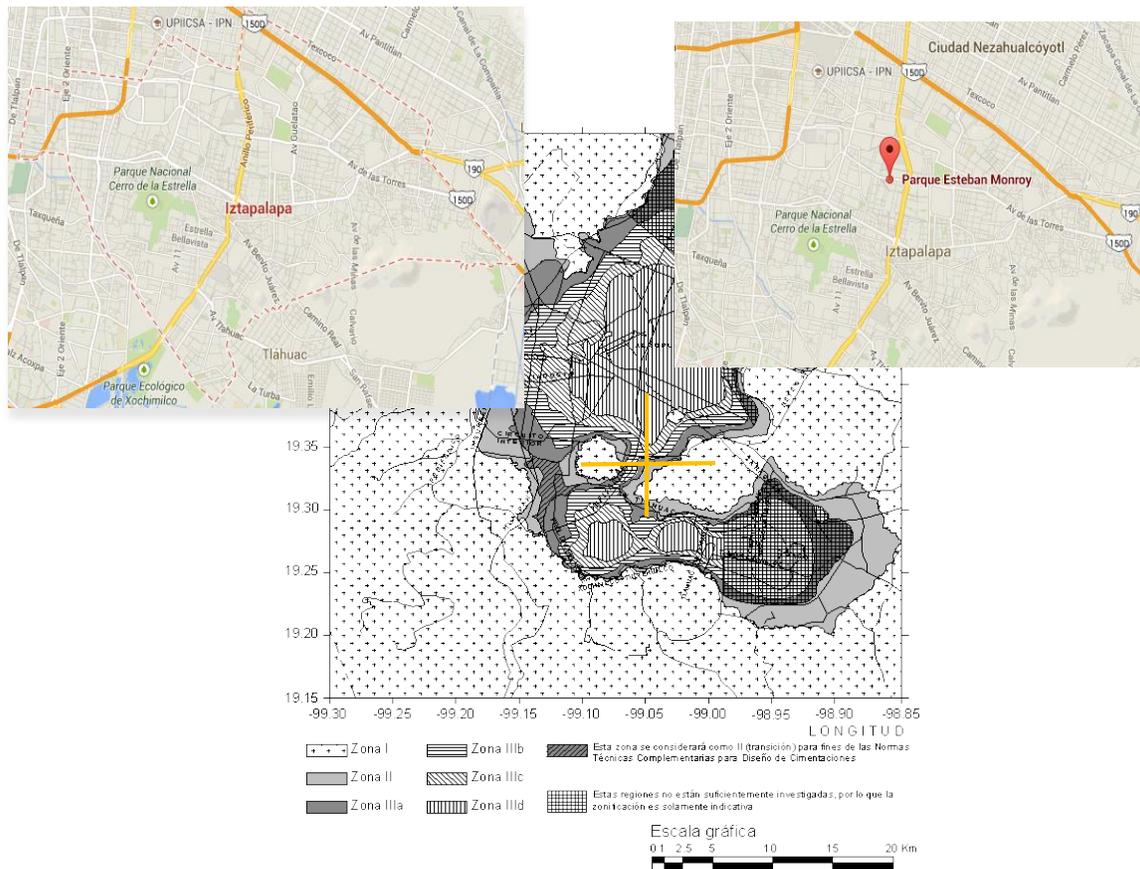


Figura 4.1. Ubicación de la zona de estudio

Bajo estas condiciones se obtuvieron las siguientes características:

- Coeficiente Sísmico (c)

El Coeficiente Sísmico para construcciones clasificadas en el Grupo B, en Zona IIIb, de acuerdo con el artículo 139 en [1], es igual a 0.45. Por el tipo de sistema estructural: los marcos formados por las



columnas y el sistema de cubierta son los que soportan más del 80% de las cargas laterales (no se tienen muros, sólo contraventeos). Esto cumple con los estándares para marcos de acero dúctiles debido al material y el cable de acero. Además, la resistencia está dada por columnas de acero de entrepiso. Sin embargo, por falta de pruebas de laboratorio e incertidumbre en el funcionamiento del sistema, se optó por un Factor de Comportamiento Sísmico $Q=1$.

4.3.2 Análisis modal espectral

Para el análisis modal espectral, con los datos mostrados en la tabla 4.1 y las ecuaciones respectivas, se generó el espectro de diseño mostrado en la figura 4.2.

Tabla 4.1. Espectro elástico de diseño con $Q=1$

c	a_0	T_a (s)	T_b (s)	r
0.45	0.11	0.85	3	2

Si $T < T_a$

$$a = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a}$$

Si $T_a \leq T \leq T_b$

$$a = c$$

Si $T > T_b$

$$a = qc$$

Donde

$$q = \left(\frac{T_b}{T} \right)^r$$

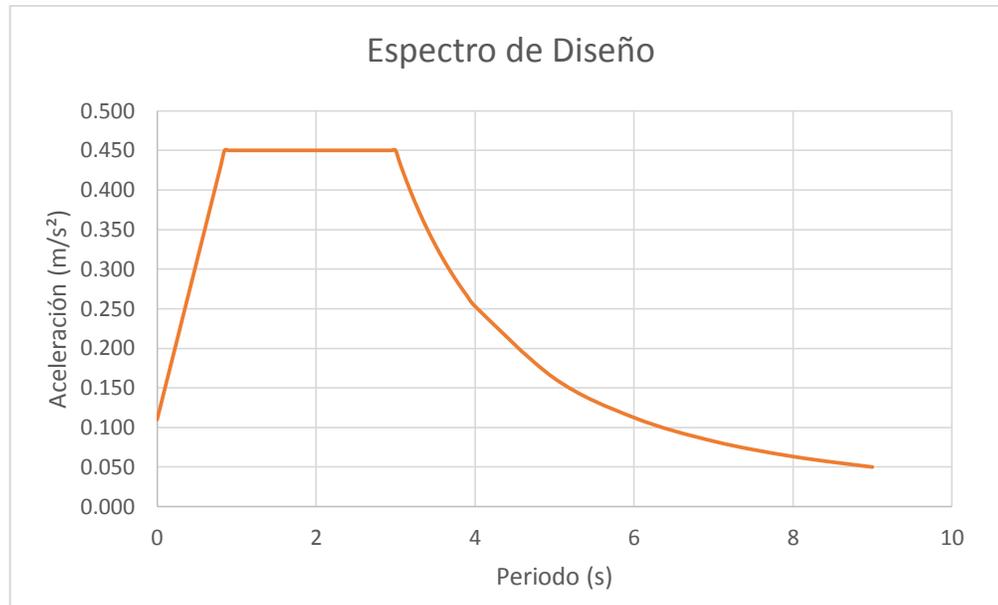


Figura 4.2. Gráfica del espectro de diseño tomado en cuenta para el cálculo

4.4 ANÁLISIS POR VIENTO

De acuerdo con los datos de resistencia proporcionados por el proveedor de los textiles, la casa fue analizada utilizando la información de ruptura del sistema y de los textiles mismos. Como se muestra en la tabla 4.2, la velocidad de ruptura con factor de seguridad para los textiles es aún más desfavorable que la velocidad regional indicada en [2], por lo tanto se asume que el sistema de viento no se romperá y se utiliza la velocidad de diseño indicado en [2]

Tabla 4.2. Planteamiento del análisis por viento

Diseño por viento	
V rot (m/s)	22 (Velocidad de Ruptura del Textil)
V rot F (m/s)	27 (Velocidad de Ruptura con un factor de seguridad)
Vr [m/s]	26.67 (Velocidad regional RCDF)
F α	1.0 (Factor que toma en cuenta la variación de velocidad de acuerdo a la altura del inmueble)
Ftr	0.79 (Factor que toma en cuenta la topografía y la rugosidad del horizonte)
Vd [m/s]	21.07 (Velocidad de Diseño)
Pd [kPa]	0.209 (Presión última)

La representación gráfica de la intervención del viento en un módulo se indica en la figura 4.3, siendo:

- WX – Línea continua
- WY – Línea punteada

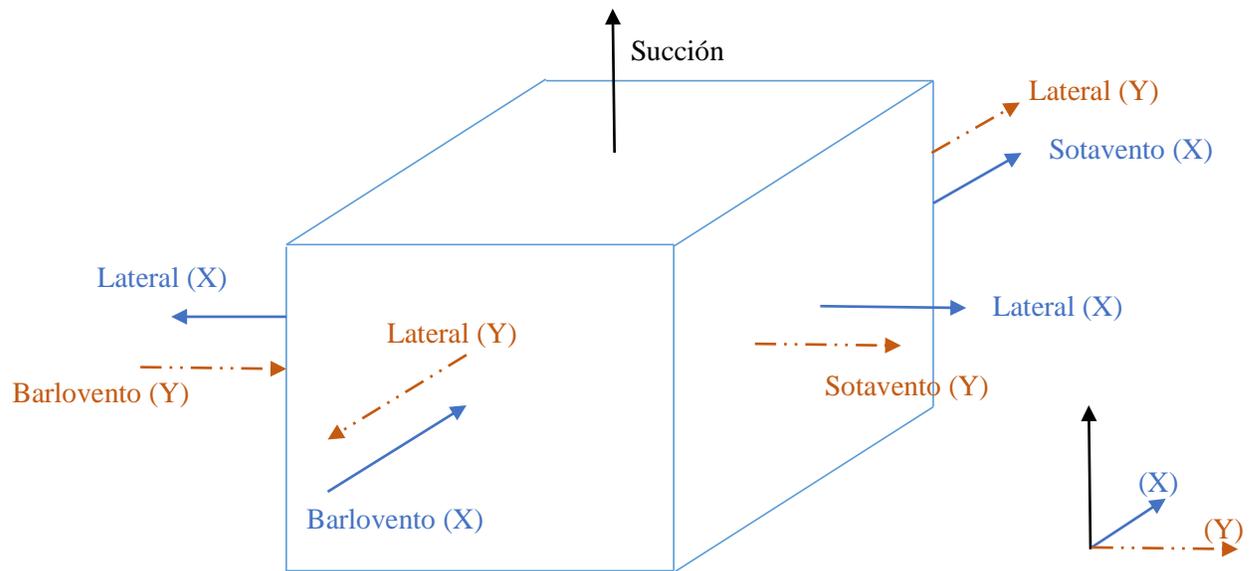


Figura 4.3. Planteamiento gráfico del análisis por viento

Para la combinación WX, se supone la acción del viento en la dirección y sentido del eje X. Para la combinación WY, se supone que la acción del viento es en dirección y sentido del eje Y. Finalmente, con las combinaciones de carga que más adelante se describen, se logra realizar un análisis más completo de los efectos que produce el viento sobre CASA.

Para calcular la fuerza total actuante en cada una de las caras de los distintos módulos, se tomó el área respectiva de contacto, multiplicada por la presión de diseño que se indica en la tabla 4.3. Las áreas superiores, para succión se indican en la tabla 4.5 y aquellas para barlovento, sotavento y laterales en la tabla 4.6. Cabe mencionar que para estas últimas, de entre las áreas laterales de cada módulo, se eligieron las áreas más desfavorables.



Figura 4.3. Ubicación de áreas cortas y largas

Tabla 4.3. Presión de diseño

p_z [kg/ m ²] - (Presión de Diseño) - $p_z = 0.48C_pV_D^2$			
Cp (Coeficiente de Presión)			
Zona	Cp	p_z [kg/m ²]	p_z [kPa]
Barlovento	0.8	17.04	0.17
Sotavento	0.4	8.52	0.08
Lateral	0.8	17.04	0.17
Succión	0.8	17.04	0.17

Siendo “Cp” el coeficiente local de presión, el cual depende de la forma de la estructura y por el cual se tienen que multiplicar los valores dependiendo del grado de afectación correspondiente a la dirección del viento, es decir, en una parte es más fuerte que en otras.

Por otro lado, dado que los textiles verticales están fijados a las cuatro esquinas de cada uno de los lados de cada módulo, se asume que la fuerza ejercida por el viento es recibida por estos cuatro puntos según sea el caso (Barlovento, Sotavento o Lateral en Módulo “común”, “cocina” o “recámara”). Los resultados obtenidos se indican en la tabla 4.4:

Tabla 4.4. Presión de diseño en los puntos de aplicación

Módulo	Común		Cocina		Recámara	
	WY [kN]	WX [kN]	WY [kN]	WX [kN]	WY [kN]	WX [kN]
Barlovento	0.63	0.89	1.07	0.72	0.8	0.89
Sotavento	0.31	0.45	0.54	0.39	0.4	0.45
Lateral	0.89	0.8	0.72	1.07	0.89	0.8
Succión	1.2		1.49		1.4	

Áreas de afectación para el viento en la tabla 4.4 y 4.5:

Tabla 4.5. Áreas entre las cuales se divide la presión de diseño de succión

Área superior (m ²)	
1	28.61
2	35.69
3	33.44

Tabla 4.6. Áreas entre las cuales se divide la presión de diseño a barlovento, sotavento y laterales

Área más desfavorable (m ²)	
Con lado corto	19.26
Con lado largo	25.68



4.5 FACTORES Y COMBINACIONES DE CARGA

4.5.1 Factores de seguridad

El coeficiente de carga (Construcciones tipo A)

- i. $F_c = 1.4$
(Para combinaciones – Acciones Permanentes + Acciones Variables)
- ii. $F_c = 1.1$
(Para combinaciones – Acciones Permanentes + Acciones Variables + Accidentales)

4.5.2 Combinaciones de Cargas

DL – Cargas permanentes o “Dead Loads”

LLacc – Cargas variables máximas o “Accidental Live Loads”

LLmax – Cargas variables máximas o “Maximum Live Loads”

SW – Peso Propio o “Self Weight”

SX – Sismo en X (en la dirección 1)

SY – Sismo en Y (en la dirección 2)

WX – Acción del Viento en la dirección 1 “Wind X”

WY – Acción del Viento en la dirección 2 “Wind Y”

Para revisión de resistencia:

1. $(DL + LLmax + SW) * 1.4$
2. $(DL + LLacc) * 1.4$

Para cargas sísmicas:

3. $(DL + SW + LLacc + SX + 0.3 * SY) * 1.1$
4. $(DL + SW + LLacc + SX - 0.3 * SY) * 1.1$
5. $(DL + SW + LLacc - SX + 0.3 * SY) * 1.1$
6. $(DL + SW + LLacc - SX - 0.3 * SY) * 1.1$
7. $(DL + SW + LLacc + 0.3 * SX + SY) * 1.1$
8. $(DL + SW + LLacc + 0.3 * SX - SY) * 1.1$
9. $(DL + SW + LLacc - 0.3 * SX + SY) * 1.1$
10. $(DL + SW + LLacc - 0.3 * SX - SY) * 1.1$

Para cargas por viento

*WX y WY contienen – Viento a Barlovento, viento a Sotavento, viento hacia la dirección izquierda y derecha (se explica en la figura XX).

$$WX = \text{Barlovento}X + \text{Sotavento}X + \text{LateralIzq}X + \text{LateralDer}X$$

$$WY = \text{Barlovento}Y + \text{Sotavento}Y + \text{LateralIzq}Y + \text{LateralDer}Y$$

*No se utiliza la carga viva accidental en estas fórmulas pues es una carga vertical que sería favorable al comportamiento de la estructura frente a la acción del viento.

11. $(SW + DL + LLacc + WX + 0.3 * WY) * 1.1$
12. $(SW + DL + LLacc + WX - 0.3 * WY) * 1.1$
13. $(SW + DL + LLacc - WX + 0.3 * WY) * 1.1$

14. $(SW + DL + LLacc - WX - 0.3 * WY) * 1.1$
15. $(SW + DL + LLacc + 0.3 * WX + WY) * 1.1$
16. $(SW + DL + LLacc + 0.3 * WX - WY) * 1.1$
17. $(SW + DL + LLacc - 0.3 * WX + WY) * 1.1$
18. $(SW + DL + LLacc - 0.3 * WX - WY) * 1.1$

Para la revisión de Servicio

19. $DL + SW + LLmax$
20. $DL + SW + LLacc + SX$
21. $DL + SW + LLacc + SY$
22. $DL + SW + LLacc + WX$
23. $DL + SW + LLacc + WY$

4.6 MODELO NUMÉRICO

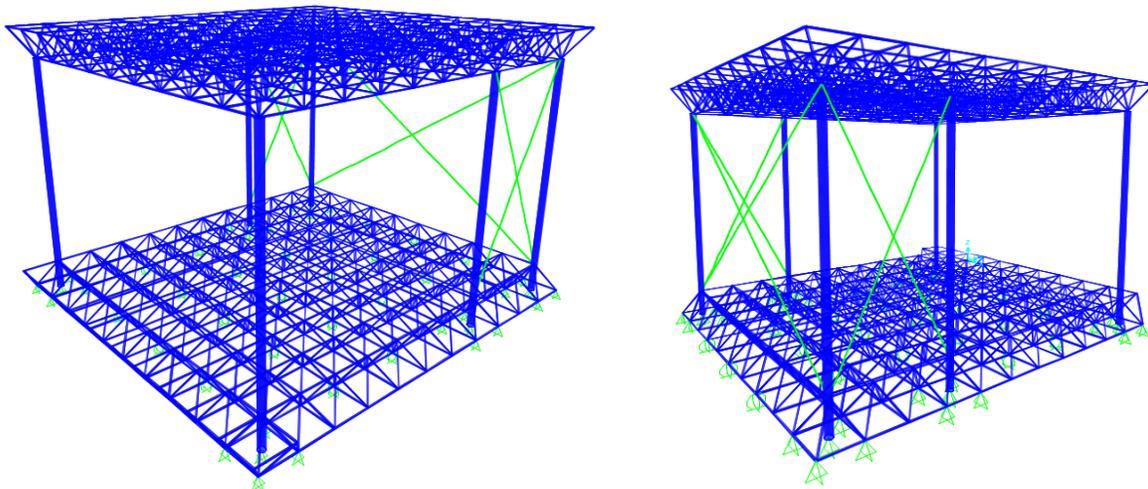


Figura 4.4. Modelo tridimensional con Sap2000

El análisis numérico se hizo bajo las siguientes consideraciones:

- En el análisis dinámico se consideró la aportación de la masa de las siguientes cargas: DL (Carga Permanente), SW (Peso Propio) y LLAcc (Carga Viva Accidental).
- Los nodos no son considerados como articulación, es decir, existe la transmisión de momentos. Por ello se llama “estructura tridimensional” y no “armadura tridimensional”.
- Los apoyos son considerados como soportes articulados y aquellos de la columna como apoyos simples.
- Las cargas fueron aplicadas a los nodos. En la realidad no sucede así pues la carga es repartida a lo largo de toda la estructura tridimensional (el elemento piso, de madera, es simplemente apoyado sobre la estructura y anclado en esta misma). Para fines prácticos y ya que los nodos son numerosos, se aplicó directamente a los nodos pues se tiene un comportamiento sin diferencias importantes.
- Dado que los cables en la práctica deben ser tensados para su buen funcionamiento, para el modelado, la tensión fue aplicada como una deformación unitaria de 0.0012, que equivale a un esfuerzo de 250 MPa.



- Los resultados no se indican completos en este trabajo pues son mínimo 150 000 filas de valores de momentos, fuerzas y cortantes debido a las diferentes combinaciones aplicadas en los diferentes puntos de los más de 1600 elementos de cuerdas y diagonales. Lo mismo para las columnas donde son 900 filas de valores para cada módulo.

4.7 NOTA ACERCA DEL SISTEMA DE MUROS PREFABRICADO

En el análisis realizado, se trabajó en conjunto con el equipo de ingenieros de la empresa fabricante de los muros prefabricados para calcular la resistencia de este sistema al viento y al sismo. Se envió al proveedor la información necesaria para plantear el problema estructural: zona sísmica IIIb en el D.F. y velocidad de diseño para el viento de 28 m/s, mismos que se utilizaron para el análisis anterior. Ellos entregaron el análisis que se ve reflejado en la configuración del armado de la estructura de acero para la colocación de estos muros: cercanía entre postes y vigas, y ubicación de contraventeos. Por lo tanto, de acuerdo con el fabricante, este sistema de muros (estructura y paneles prefabricados) resulta resistente ante el efecto de sismo. Para el caso en que el sistema de la lona perimetral falle y los muros se vean expuestos a la acción del viento, también estos son resistentes.

De acuerdo con datos del fabricante:

- Postes, las ecuaciones de interacción arrojan 0.44 y 0.45 inferiores a 1, entonces pasan.

Las ecuaciones de interacción son las del IMCA [12]:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{c_{mx}f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right)F_{bx}} + \frac{c_{my}f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right)F_{by}} \leq 1.0$$

$$\frac{f_a}{0.60F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1$$

- Vigas, una carga distribuida permitida de 3.44 kN/m y una carga aplicada de 3.0 kN/m, entonces pasan.

Para obtener este valor, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\frac{S * F_y}{FS} = \frac{L^2 S}{8} (D_n + L_n)$$

$$W(\text{carga repartida}) = 0.6 * \frac{8}{FS} * \frac{S * F_y}{L^2}$$

Nota: Estas ecuaciones se obtuvieron a partir de [11] y [12]

- Contraventeos, con una tensión actuante de 18.37 kN y una resistencia de 20.93 kN, entonces pasa.

Se obtuvo el valor máximo de la tensión actuante en base a los resultados de las fuerzas cortantes del análisis sísmico estático.



$$F_i = \frac{c}{Q'} W_i h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i}$$

Con ese valor y con las características geométricas del armado, se obtuvo el resultante en la tensión en los contraventeos.

- Deflexiones, sea la máxima permitida de 1 cm y la obtenida de 0.2 cm, entonces pasa.

Para la deflexión permitida se usó:

$$\text{Deflexión} = \left(\frac{L}{240} \right) + 5\text{mm}$$

Y para obtener aquella producida se usó:

$$\text{Deflexión} = \frac{5WI^4}{384EI}$$

La conexión de los muros prefabricados con el piso de madera fue realizada con tronillos a cada 20 cm y la conexión de este piso con la estructura tridimensional a cada 60 cm.



5 DISEÑO Y REVISIÓN ESTRUCTURAL

5.1 CRITERIOS PARA LA REVISIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

5.1.1 Cuerdas y diagonales

Estos elementos se revisaron utilizando los criterios de diseño para elementos estructurales de acero formado en frío [6] y del manual del AISI [3].

Relación ancho plano y espesor (w/t)

Esta relación debe cumplir:

$$\frac{w}{t} \leq 60 \text{ para rigidizadores}$$

$$\frac{w}{t} \leq 200 \text{ para elementos rigidizados}$$

Por las características del perfil, el valor de esta relación que se maneja es:

$$\frac{w}{t} \approx 7$$

El procedimiento de cálculo nos indica que para una condición de frontera dada, para calcular el esfuerzo crítico de pandeo se toma:

$$k = 4$$

Para la siguiente expresión tomamos $f = F_y$ (caso más desfavorable)

$$\lambda = \left(\frac{1.052}{\sqrt{k}} \right) (w/t) \left(\frac{\sqrt{f}}{E} \right)$$

Sustituyendo los valores de cada incógnita obtenemos,

$$\lambda = 0.152$$

De acuerdo a las normas, si $\lambda \leq 0.673$ entonces $b=w$, siendo

$$w = B - 2 * (R + t)$$

De donde se obtiene:

$$w \text{ (perfil)} = 1.34 \text{ cm}$$

**Comprobación del ala**

$$S = 1.28\sqrt{E/f}$$

Como $w/t \leq S/3$, de acuerdo a las normas, el rigidizador no es necesario, sin embargo para fines de experimentación, el fabricante, indica que el ala es importante para el funcionamiento del sistema.

Al hacer revisión, el ala cumple con las normas.

$$\frac{w}{t} = 3 \leq 60$$

De donde

$$w (\text{ala}) = 0.57 \text{ cm}$$

Propiedades de la sección

Para lograr obtener la fuerza a tensión o compresión resistida por la sección se utiliza la siguiente expresión:

$$f_{1 \text{ o } 2} (\text{tensión o compresión}) = F_y \left(\frac{C_{T \text{ o } C}}{B - y_{cg}} \right)$$

Siendo

$$\text{Lado efectivo a compresión} = y_{cg} - (R + t)$$

$$\text{Lado efectivo a tensión} = (B - y_{cg})$$

De donde resulta:

$$f_1 (\text{compresión } +) = 18\,284\,859 \text{ kPa } (186\,390 \text{ kg/cm}^2)$$

$$f_2 (\text{tensión } -) = -21\,229\,723 \text{ kPa } (-216\,409 \text{ kg/cm}^2)$$

Además se cuenta con la siguiente expresión donde si $\Psi < -0.236$, entonces $b_e = b$

$$\Psi = \frac{f_2}{f_1} = -1.161 < -0.236$$

Se verifica:

$$k = 4 + 2 * (1 - \Psi)^3 + 2 * (1 - \Psi) = 28.5$$

$$\lambda = 0.0419 < 0.673$$

Entonces

$$b_e = b = 1.34 \text{ cm}$$



Y se continúa con las siguientes expresiones para determinar la efectividad de la sección a compresión:

$$b_1 = \frac{b_e}{3 - \psi} = 0.323 \text{ cm}$$

$$b_2 = \frac{b_e}{2} = 0.672 \text{ cm}$$

Como $b_1 + b_2 > \text{al lado efectivo a compresión}$, entonces la compresión es completamente efectiva en la sección a compresión.

Para calcular el esfuerzo máximo a compresión se necesita hacer un proceso iterativo comenzando con la suposición de que $F_y = f$, luego con la fórmula que sigue, hasta que resultados sean iguales.

$$f = F_y \left(\frac{y_{cg}}{B - y_{cg}} \right)$$

Sin embargo, dado que la sección efectiva de este perfil nunca cambia pues $b=w$, entonces se asume que el esfuerzo máximo a compresión es el obtenido desde la primera iteración siendo así la sección totalmente efectiva.

A. En base a la iniciación de la fluencia tenemos que la resistencia nominal de la sección es:

$$M_n = S_e F_y = S_x F_y$$

Siendo

$$S_x = \frac{I_{xx}}{y_{cg}}$$

Donde

S_x – Módulo elástico de la sección efectiva calculado con la fibra extrema comprimida o traccionada.

Se obtiene

$$S_x = 0.857 \text{ cm}^3$$

$$M_n = 0.296 \text{ kN.m (3013 kg.cm)}$$

Entonces el momento de diseño es

$$M_n \cdot \Phi_b = 0.296 * 0.95 = 0.281 \text{ kN.m (2862 kg.cm)}$$

B. En base a la capacidad de reserva inelástica, la resistencia nominal de la sección se obtiene como sigue:



Primero el ancho de la brida a compresión,

$$b_c = B - t = 20.1 \text{ mm}$$

Luego, el ancho de la brida a tensión,

$$b_t = 2 * \left(D - \frac{t}{2} \right) = 18.1 \text{ mm}$$

Después, la altura de la membrana,

$$d = B - t = 20.1 \text{ mm}$$

Y se tiene para el diagrama de esfuerzos:

$$\lambda_1 = \frac{1.11}{\sqrt{F_y/E}} = 27, \lambda_2 = \frac{1.28}{\sqrt{F_y/E}} = 31$$

Como $\frac{w}{t} \leq \lambda_1$, entonces $C_y = 3 \therefore \varepsilon_{cu} = 3\varepsilon_y$

Dado que el eje neutral está más próximo al ala en compresión, es decir, que en el momento nominal el ala a tensión fluye, se usan las siguientes fórmulas.

$$y_c = \frac{b_t - b_c + 2d}{4} = 9.55 \text{ mm}$$

$$y_t = d - y_c = 10.55 \text{ mm}$$

$$y_p = \frac{y_c}{\varepsilon_{cu}/\varepsilon_y} = 3.18 \text{ mm}$$

$$y_{cp} = y_c - y_p = 6.37 \text{ mm}$$

$$y_{tp} = y_t - y_p = 7.37 \text{ mm}$$

$$\frac{y_c}{t} = 5 \leq \lambda_1$$

Entonces se puede utilizar la capacidad inelástica de reserva

$$\begin{aligned} M_n &= F_y t \left[b_c y_c + 2y_{cp} \left(y_p + \frac{y_{cp}}{2} \right) + \frac{4}{3} (y_p)^2 + 2y_{tp} \left(y_p + \frac{y_{tp}}{2} \right) + b_y y_t \right] \\ &= 0.374 \text{ kN.m (3815 kg.cm)} \end{aligned}$$

Obtenemos

$$M_y = S_e F_y = 0.296 \text{ kN.m (3013 kg.cm)}$$

$$1.25M_y = 1.25 * 3013 = 0.369 \text{ kN.m (3766 kg.cm)}$$



De los resultados $M_n > 1.25M_y$, se toma el menor de los resultados para definir el momento de diseño

De donde

$$M_n \cdot \Phi_b = 3766 * 0.95 = 0.351 \text{ kN.m (3578 kg.cm)}$$

C. Resistencia al Pandeo Lateral

$$M_n = S_c \frac{M_c}{S_f}$$

Donde S_f – Módulo elástico de la sección total, no reducida, calculado para la fibra extrema comprimida.

S_c – Módulo elástico de la sección efectiva calculado para una tensión M_c/S_f en la fibra extrema comprimida.

Se sabe que la sección es totalmente efectiva, por lo tanto se asume que $S_f = S_c$.

Siendo M_c el momento crítico donde si se cumple que $M_e \geq 2.78M_y$ entonces $M_c = M_y$

Para obtener M_e se procede de la siguiente manera:

Datos previos:

$K = 1$ (Factor de longitud efectiva)

$L = 60 \text{ cm}$ (Longitud no arriostrada del miembro)

$C_b = 1$ (para un resultado conservador)

Operaciones

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y}\right)^2} = 576 \ 141 \text{ kPa (5 873 kg/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right] = 550 \ 439 \text{ kPa (5 611 kg/cm}^2\text{)}$$

M_e – para flexión alrededor del eje de simetría

$$M_e = C_b r_o A \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} = 1.285 \text{ kN.m (13 102 kg.cm)}$$

Además se compara M_e con $2.78 M_y$

$$2.78 M_y = 0.822 \text{ kPa (8 376 kg.cm)} < M_e$$



De donde se sabe que

$$M_c = M_y$$

Entonces

$$M_n = M_y = 0.296 \text{ kN.m (3013 kg.cm)}$$

D. Resistencia a la abolladura del alma

Dado que se tienen cargas opuestas con separación $\leq 1.5h$, donde la reacción es de extremo y una sección que proporciona un el evado grado de restricción contra la rotación del alma, tenemos la siguiente ecuación para determinar la resistencia nominal a la abolladura del alma:

$$P_n = t^2 F_y C_8 (0.64 + 0.31m) (10 + 1.25\sqrt{N/t})$$

Donde P_n – Resistencia nominal a la abolladura del alma

$$C_8 = \left[0.98 - \left(\frac{h/t}{865} \right) \right] \frac{1}{k}$$

$$k = 894 F_y / E$$

$$m = \frac{t}{1.91} \text{ (t en mm)}$$

N – Longitud de apoyo real

E. Resistencia al Corte

$k_v = 5.34$ – Coeficiente de pandeo por corte

Con las siguientes ecuaciones se obtiene el corte máximo nominal:

$$\frac{h}{t} = \frac{w}{t} = 7$$

$$0.96 \sqrt{E k_v / F_y}$$

Para $h/t \leq 0.96 \sqrt{E k_v / F_y}$

$$V_n = 0.60 F_y h t$$

F. Compresión Pura

La ecuación de resistencia a la compresión es:

$$P_n = A_e F_n$$

Donde

$A_e = 152 \text{ mm}^2$ – área efectiva



Y para $\lambda_c \leq 1.5$, $F_n = (0.658^{\lambda_c^2})F_y$

Siendo $\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$

Para calcular F_e se obtiene la menor de las tensiones de pandeo elástico flexional, torsional y torsional flexional con las expresiones siguientes:

$$1 \sim F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$2 \sim F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right]$$

Donde:

$$r - \text{Radio de giro}$$

$$\beta = 1 - (x_o/r_o)^2 = 0.73$$

Se obtiene la menor de las dos y resulta $\lambda_c = 1.17 < 1.5$

Entonces

$$F_n = 194\,532 \text{ kPa} (1983 \text{ kg/cm}^2)$$

Y

$$P_n = 29.55 \text{ kN} (3\,012 \text{ kg})$$

G. Tensión Pura

La expresión de la resistencia la tensión es:

$$T_n = A_e F_y = 52.38 \text{ kN} (5\,339 \text{ kg})$$

Donde

T_n – Resistencia nominal del miembro cuando está traccionado

H. Combinación de Flexión y Corte (LRFD)

Las resistencias requeridas V_u, M_u deben de satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción:

$$\left(\frac{M_u}{\Phi_b M_{nxxo}} \right)^2 + \left(\frac{V_u}{\Phi_v V_n} \right)^2 \leq 1.0$$



Donde

- M_n – Resistencia nominal a la flexión cuando sólo existe flexión
 M_{nxo} – Resistencia nominal a la flexión respecto al eje x baricéntrico
 Φ_b – Factor de resistencia para flexión
 Φ_v – Factor de resistencia para el corte

I. Combinación de Flexión y Abolladura del Alma (LRFD)

Las resistencias requeridas P_u, M_u deben de satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción:

$$0.82 \left(\frac{P_u}{\Phi_w P_n} \right) + \left(\frac{M_u}{\Phi_b M_{nxo}} \right) \leq 1.32$$

Donde

- Φ_w – Factor de resistencia para abolladura del alma

J. Combinación de Flexión y Tracción Axial (LRFD)

Las resistencias requeridas T_u, M_{ux}, M_{uy} deben de satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción:

$$\left(\frac{\Omega_b M_{ux}}{\Phi_b M_{nxt}} \right) + \left(\frac{\Omega_b M_{uy}}{\Phi_b M_{nyt}} \right) + \left(\frac{T_u}{\Phi_t T_n} \right) \leq 1.0$$

$$\left(\frac{M_{ux}}{\Phi_b M_{nx}} \right) + \left(\frac{M_{uy}}{\Phi_b M_{ny}} \right) - \left(\frac{T_u}{\Phi_t T_n} \right) \leq 1.0$$

Donde

M_{nx}, M_{ny} – Resistencias nominales a la flexión respecto a los ejes baricéntricos (se tomará la más pequeña comparando los diferentes resultados anteriores)

$M_{nxt}, M_{nyt} = S_{fy} F_y$

Φ_t – Factor de resistencia a la tracción

K. Combinación de Flexión y Compresión Axial (LRFD)

Las resistencias requeridas P_u, M_{ux}, M_{uy} deben de satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción:

$$\left(\frac{P_u}{\Phi_c P} \right) + \left(\frac{M_{ux} C_{mx}}{\Phi_b M_{nx} \alpha_x} \right) + \left(\frac{M_{uy} C_{my}}{\Phi_b M_{ny} \alpha_y} \right) \leq 1.0$$

$$\left(\frac{M_{ux}}{\Phi_b M_{nx}} \right) + \left(\frac{M_{uy}}{\Phi_b M_{ny}} \right) + \left(\frac{P_u}{\Phi_c P_n} \right) \leq 1.0$$



Donde

$$\alpha_x = 1 - P_u/P_{Ex}$$

$$\alpha_y = 1 - P_u/P_{Ey}$$

$$P_{Ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}$$

$$P_{Ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}$$

$$C_m = 0.85$$

❖ Los valores que se tomarán para verificar las diferentes ecuaciones de interacción son los siguientes:

- Flexión y corte

M_{no}	0.28 kN.m (2862 kg.cm)
V_n	5.28 kN (538 kg)
Φ_b	0.95
Φ_v	1

- COMBINACION TRACCION ACCIAL Y FLEXION

T_n	0.524 kN.m (5339 kg.cm)
M_{nxt}	0.296 kN.m (3013 kg.cm)
M_{nyt}	0.539 kN.m (5490 kg.cm)
M_{nx}	0.281 kN.m (2862 kg.cm)
M_{ny}	0.356 kN.m (3625 kg.cm)
Φ_b	0.95
Φ_t	0.95
$\Omega_b = \Omega_t$	1.67

- RESISTENCIA A LA FLEXION Y ABOLLADURA DEL ALMA

M_{no}	0.281 kN.m (2862 kg.cm)
M_{noy}	0.356 kN.m (3625 kg.cm)
P_n	13.05 kN (1330 kg)
Φ_w	0.75
Φ_b	0.95



- COMBINACION COMPRESION AXIAL Y FLEXION

P_n	29.55 kN (3012 kg)
P_{no}	52.38 kN (5339 kg)
P_{ex}	50.83 kN (5181 kg)
P_{ey}	92.63 kN (9442 kg)
Φ_b	0.95
Φ_c	0.85
C_m	0.85

5.1.2 Columnas

Las expresiones usadas para el diseño de las columnas, son de acuerdo al LRFD:

Con las propiedades geométricas y mecánicas del perfil de la columna se obtiene primero el área transversal del perfil.

$$A = \frac{\pi * \text{diámetro exterior}^2}{4} - \frac{\pi * \text{diámetro interior}^2}{4}$$

Luego se obtienen los siguientes elementos:

$$\text{Momento de inercia} - I_x = \frac{\pi}{4} (r_2^4 - r_1^4)$$

$$\text{Módulo de sección} - S_x = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{32d_2}$$

$$\text{Radio de Giro} - r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$\text{Factor de esbeltez} - C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$$

$$\text{Relación de esbeltez} - \frac{KL}{r}$$

* (la relación de esbeltez es menor a 200)

$$\text{Fuerza nominal} - P_u = A_g F_{cr}$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

$$\text{para } \lambda_c \leq 1.5, F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y$$



A. Cuando $\frac{P_u}{P_n\phi_t} < 0.2$, como lo es para estos casos, se usa la siguiente ecuación de interacción

$$\frac{P_u}{2P_n\phi_t} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1.0$$

5.2 REVISIÓN ESTRUCTURAL

5.2.1 Cuerdas y diagonales

5.2.1.1 Módulo 1 (Común)

A. VALORES DE MOMENTOS Y FUERZAS (los más desfavorables)

Con apoyo del programa de modelado a computadora, se obtuvieron listas con más de 150 000 filas de valores de momentos, fuerzas y cortantes debido a las diferentes combinaciones aplicadas en los diferentes puntos de los más de 1600 elementos “cuerdas y diagonales”. Por ello se decidió resumir en tablas como a continuación se explica.

La tabla 5.1 es la primera de las tablas que muestra los valores más grandes en las fuerzas y momentos resultantes, ordenados horizontalmente y sombreados. Cada uno de estos valores está acompañado de un par de valores, acomodados verticalmente, que corresponde al par de valores que se suscitan en la misma combinación de cargas y elemento estructural que este. Lo mismo para la tabla 5.2, donde el cortante más desfavorable es indicado.

Tabla 5.1. Matriz con terna de valores para cada fuerza y momento más desfavorable

	Fuerza (kN)		Momento M2 (kN.m)		Momento M3 (kN.m)	
	+ (comp.)	- (tens.)	+	-	+	-
Momento M2	0.0000	0.0003	0.0334	-0.0352	0.021	-0.007
Momento M3	0.0013	0.0013	0.0190	-0.0220	0.0230	-0.0351
Fuerza	7.14	-6.37	-1.73	-2.07	-0.01	-0.20

Tabla 5.2. Valor del cortante más desfavorable

V (más desfavorable)	kN	0.085
----------------------	----	--------------

B. DESARROLLO

De acuerdo a los criterios para la revisión estructural, se revisan los elementos cuerdas y diagonales contenidos en este módulo.

Resistencia a la flexión y corte	2E-02 <=1	OK
Resistencia a la Abolladura del alma y flexión	0.67 <=1.32	OK
Combinación de tracción Axial y Flexión	0.47 <=1	OK
	0.09 <=1	OK
Combinación de compresión Axial y Flexión	α_x 0.87	
	α_y 0.93	
	0.48 <=1	OK
	0.38 <=1	OK

5.2.1.2 Módulo 2 (Cocina)

A. VALORES DE MOMENTOS Y FUERZAS

Tabla 5.3. Matriz con terna de valores para cada fuerza y momento más desfavorable

	Fuerza (kN)		Momento M2 (kN.m)		Momento M3 (kN.m)	
	+ (comp.)	- (tens.)	+	-	+	-
Momento M2	0.0009	-0.0020	0.0916	-0.0905	0.006	-0.011
Momento M3	0.0021	0.0021	0.0205	-0.0581	0.0679	-0.0794
Fuerza	9.65	-8.97	-1.47	-3.69	-4.43	-2.21

Tabla 5.4. Valor del cortante más desfavorable

V (más desfavorable)	kN	0.2
----------------------	----	------------

B. DESARROLLO

De acuerdo a los criterios para la revisión estructural, se revisan los elementos cuerdas y diagonales contenidos en este módulo.

Resistencia a la flexión y corte	9E-02 <=1	OK
Resistencia a la Abolladura del alma y flexión	1.09 <=1.32	OK
Combinación de tracción Axial y Flexión	1.00 <=1	OK
	0.38 <=1	OK
Combinación de compresión Axial y Flexión	α_x 0.82	
	α_y 0.90	
	0.93 <=1	OK
	0.78 <=1	OK

5.2.1.3 Módulo 3 (Recámara)

A. VALORES DE MOMENTOS Y FUERZAS

Tabla 5.5. Matriz con terna de valores para cada fuerza y momento más desfavorable

	Fuerza (kN)		Momento M2 (kN.m)		Momento M3 (kN.m)	
	+ (comp.)	- (tens.)	+	-	+	-
Momento M2	0.0000	-0.0001	0.0390	-0.0395	0.003	-0.009
Momento M3	0.0017	0.0015	0.0239	-0.0151	0.0264	-0.0416
Fuerza	9.19	-7.83	-2.01	-4.60	-1.78	-0.10

Tabla 5.6. Valor del cortante más desfavorable

V (más desfavorable)	kN	0.101
----------------------	----	--------------

B. DESARROLLO

De acuerdo a los criterios para la revisión estructural, se revisan los elementos cuerdas y diagonales contenidos en este módulo.

Resistencia a la flexión y corte

9E-02 \leq 1 OK

Resistencia a la Abolladura del alma y flexión

0.80 \leq 1.32 OK

Combinación de tracción Axial y Flexión

0.68 \leq 1 OK

0.20 \leq 1 OK

Combinación de compresión Axial y Flexión

α_x 0.85

α_y 0.92

0.68 \leq 1 OK

0.56 \leq 1 OK

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis, todas las barras cumplen con el reglamento. La mayor parte de los elementos están sub esforzados. Esto es consecuencia de que para fines prácticos, en toda la estructura se consideró el uso de un solo tipo de perfil. Este diseño podría optimizarse si se revisaran los requerimientos que demanda cada una de las barras pero no sería algo practico, sobre todo por el número total de elementos de este tipo que componen toda la estructura.

**5.2.2 Columnas****5.2.2.1 Módulo 1 (Común)****A. VALORES DE MOMENTOS Y FUERZAS****Tabla 5.7. Matriz con terna de valores para cada fuerza y momento más desfavorable**

	Fuerza (kN)		Momento M2 (kN.m)		Momento M3 (kN.m)	
	+ (comp)	- (tens)	+	-	+	-
Momento M2	1.73	-4E-15	1.75	-2.07	1.62	-2.03
Momento M3	-0.03	-1E-15	-0.13	-1.74	5.32	-5.31
Fuerza	14.64	-22.09	9.74	-5.29	-4.72	-5.40

Tabla 5.8. Valor del cortante más desfavorable

V (más desfavorable)	kN	11.05
----------------------	----	--------------

B. DESARROLLO

De acuerdo a los criterios para la revisión estructural, se revisan los elementos columna contenidos en este módulo.

OK, Esbeltez < 200

$$\lambda_c \quad 1.011 < 1.5$$

$$F_{cr} \quad 160841 \text{ kPa}$$

$$P_u \quad 327 \text{ kN}$$

$$S_x \quad 52 \text{ cm}^3$$

$$M_n \quad 13 \text{ kN.m}$$

$$\Phi_t \quad 0.9$$

$$\Phi_b \quad 0.9$$

$$\frac{P_u}{P_n \Phi_t} \quad 0.075 < 0.2$$

$$\frac{P_u}{2P_n \Phi_t} + \left(\frac{M_{ux}}{\Phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi_b M_{ny}} \right) \quad 0.675 < 1$$

Como la ecuación de interacción es menor a uno, la columna pasa.

5.2.2.2 Módulo 2 (Cocina)

A. VALORES DE MOMENTOS Y FUERZAS

Tabla 5.9. Matriz con terna de valores para cada fuerza y momento más desfavorable

	Fuerza (kN)		Momento M2 (kN.m)		Momento M3 (kN.m)	
	+(comp.)	-(tens.)	+	-	+	-
Momento M2	0.53	0.00	4.90	-4.90	2.00	-4.32
Momento M3	0.84	0.00	1.09	-1.76	1.18	-1.77
Fuerza	22.01	-29.63	-5.98	-6.66	-3.00	-6.66

Tabla 5.10. Valor del cortante más desfavorable

V (más desfavorable)	kN	10.19
----------------------	----	-------

B. DESARROLLO

OK, Esbeltez < 200

RESULTADOS

$$\lambda_c \quad 1.011 < 1.5$$

$$F_{cr} \quad 160841 \text{ kPa}$$

$$P_u \quad 327 \text{ kN}$$

$$S_x \quad 52 \text{ cm}^3$$

$$M_n \quad 13 \text{ kN.m}$$

$$\Phi_t \quad 0.9$$

$$\Phi_b \quad 0.9$$

$$\frac{P_u}{P_n \Phi_t} \quad 0.101 < 0.2$$

$$\frac{P_u}{2P_n \Phi_t} + \left(\frac{M_{ux}}{\Phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi_b M_{ny}} \right) \quad 0.625 < 1$$

Como la ecuación de interacción es menor a uno, la columna pasa.

5.2.2.3 Módulo 3 (Recámara)

A. VALORES DE MOMENTOS Y FUERZAS

Tabla 5.11. Matriz con terna de valores para cada fuerza y momento más desfavorable

	Fuerza (kN)		Momento M2 (kN.m)		Momento M3 (kN.m)	
	+ (comp.)	- (tens.)	+	-	+	-
M2	0.71	-2E-15	1.37	-0.92	1.37	-0.92
M3	-0.09	-3E-15	2.71	-1.71	3.31	-3.31
P	16.60	-24.54	-5.53	-17.90	-5.53	-5.99

Tabla 5.12. Valor del cortante más desfavorable

V (más desfavorable)	kN	6.87
----------------------	----	-------------

B. DESARROLLO

OK, Esbeltez < 200

RESULTADOS

$$\lambda_c \quad 1.011 < 1.5$$

$$F_{cr} \quad 160841 \text{ kPa}$$

$$P_u \quad 327 \text{ kN}$$

$$S_x \quad 52 \text{ cm}^3$$

$$M_n \quad 13 \text{ kN.m}$$

$$\Phi_t \quad 0.9$$

$$\Phi_b \quad 0.9$$

$$\frac{P_u}{P_n \Phi_t} \quad 0.083 < 0.2$$

$$\frac{P_u}{2P_n \Phi_t} + \left(\frac{M_{ux}}{\Phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi_b M_{ny}} \right) \quad 0.445 < 1$$

Como la ecuación de interacción es menor a uno, la columna pasa.

Como se observa, las columnas pasan la revisión tomando la terna de valores de la tensión o compresión más desfavorable, combinándolo con el momento más desfavorable (es decir, se toman los valores más desfavorables en general sea para la fuerza que para momento en X y en Y y con ellos se calcula).



Habiendo dicho lo anterior y dados los resultados obtenidos, podemos decir que las columnas están sobredimensionadas en cuanto a las fuerzas y momentos aplicados.

5.2.3 Conexiones

5.2.3.1 Expresiones utilizadas para conexiones y resultados

Para revisar las conexiones, se revisaron los elementos más desfavorables.

- a) Para el análisis de la barra (Resistencia del bloque)

Si $F_u A_{NT} \geq 0.6 F_y A_{NV}$ (Fluencia por cortante y fractura por tensión)

$$R_{bs} = \Phi (U_{bs} F_u A_{NT} + 0.6 F_y A_{NV})$$

Donde

A_{NT} – Área a tensión
 A_{NV} – Área neta a cortante

Obteniendo

A_{NT}	72.96 mm ²
A_{NV}	47.50 mm ²
R_{bs}	19.54 kN

- b) Para el análisis de la conexión de la columna (Resistencia del bloque)

Si $F_u A_{NT} \geq 0.6 F_y A_{NV}$ (Fluencia por cortante y fractura por tensión)

$$R_{bs} = \Phi (U_{bs} F_u A_{NT} + 0.6 F_y A_{NV})$$

Donde

A_{NT} – Área a tensión
 A_{NV} – Área neta a cortante

Obteniendo

A_{NT}	2087 mm ²
A_{NV}	136 mm ²
R_{bs}	372 kN

Siendo las características geométricas de las conexiones de las columnas más favorables que

- c) Para el análisis de los tornillos de las barras (A325)

Para cortante simple

$$\Phi R_{NV} = 0.65 * R_n * A_s$$



Donde

R_n – Resistencia cortante nominal (3800 kg/cm^2)
 A_s – Área transversal del tornillo

Para Aplastamiento

$$\Phi R_{NT} = 0.75 * 2.4 * dtF_u$$

Donde

d – diámetro del tornillo
 t – Espesor del miembro que se apoya contra el tornillo

Obteniendo

$$\begin{array}{ll} \Phi R_{NV} & 19.23 \text{ kN} \\ \Phi R_{NT} & 16.86 \text{ kN} \end{array}$$

d) Para el análisis de los tornillos de las conexiones de las columnas (A325)

Para cortante simple

$$\Phi R_{NV} = 0.65 * R_n * A_s$$

Donde

R_n – Resistencia cortante nominal (3800 kg/cm^2)
 A_s – Área transversal del tornillo

Para Aplastamiento

$$\Phi R_{NT} = 0.75 * 2.4 * dtF_u$$

Donde

d – diámetro del tornillo
 t – Espesor del miembro que se apoya contra el tornillo

Obteniendo

$$\begin{array}{ll} \Phi R_{NV} & 34.62 \text{ kN} \\ \Phi R_{NT} & 66.75 \text{ kN} \end{array}$$

e) Cortantes

f)

Tabla 5.13. Cortantes más desfavorables

	En Barras (kN)	En Columnas (kN)
Módulo Común	0.85	6.87
Módulo Cocina	0.2	11.03
Módulo Recámara	0.101	10.19



Como se aprecia en la tabla 5.13, la resistencia de los elementos en las conexiones es mayor a los cortantes que se presentan tanto en columnas como en barras.

5.2.4 Apoyos

Para el diseño de los apoyos solo se tomaron en cuenta los valores más desfavorables de cada combinación de carga. Se tienen apoyos en las columnas y apoyos múltiples distribuidos denominados “buzones” en ciertos puntos de la base para distribuir la carga de los módulos sobre el terreno.

La resistencia del suelo de la Villa Solar fue proporcionada por el comité organizador del DSE, siendo esta de 50 kN/m². Los apoyos en contacto directo con el suelo se eligieron de forma cuadrada y hechos con madera por facilidad de fabricación. Las dimensiones de estos se determinó por los resultados de los cálculos mostrados en la tabla 5.14.

Tabla 5.14. Resumen de Apoyos (en kN)

Apoyos	COCINA	COMÚN	RECÁMARA
	MAX	MAX	MAX
F6 (Apoyo Columna)	22.47	22.05	17.59
F5 (Apoyo Columna)	38.58	33.96	33.55
F4 (Apoyo Columna)	34.84	25.69	31.18
F3 (Apoyo Columna)	22.20	25.74	31.18
F2 (Apoyo Columna)	15.96	34.01	33.54
F1 (Apoyo Columna)	34.93	22.09	17.60
“Buzón” (Apoyos distribuidos)	7.09	7.66	6.68

Para los apoyos de las columnas, tomando la carga más desfavorable para cada apoyo, el área de contacto necesaria de los apoyos se indica en la tabla 5.15. De esta manera, se propusieron cuadros de 0.90 m de lado para obtener un área de contacto de 0.81 m² para los apoyos de las columnas y de 0.50 m los cuales ofrecerán 0.25 m² de contacto con el suelo.

Ambas propuestas cumplen con la exigencia de la organización para la competencia.

Tabla 5.15. Cálculo de áreas necesarias

Apoyo	MAX/50	
F6	0.45	m ²
F5	0.77	m ²
F4	0.70	m ²
F3	0.62	m ²
F2	0.68	m ²
F1	0.70	m ²
“Buzón” o apoyo distribuido	0.15	m ²

5.2.5 Cables

Los valores obtenidos del análisis estructural se muestran en la tabla 5.16.

Tabla 5.16. Valores máximos en cables

Módulo	Valor máximo (kN)
Común	8.17
Cocina	10.11
Recámara	6.39

La resistencia máxima nominal con factor de seguridad aplicado es de 10.14 kN. De los resultados obtenidos se observa que en los 3 módulos, los cables sobrepasan esta resistencia. Estos valores extremos se presentan sólo en el caso de las combinaciones de sismo.

Los cables no pasan entonces, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Sin embargo, sabemos que los cables siguen debajo de su punto de ruptura.

Por ello, la recomendación es que se aumente el diámetro de los cables de $\frac{1}{4}$ " a la siguiente medida más grande en caso de implementar CASA en su punto de estudio, es decir, de $\frac{1}{2}$ ". Para el prototipo se dejó el diámetro de $\frac{1}{4}$ " por disponibilidad, y porque para las combinaciones de carga de sismo donde se presentan estos valores no ocurren en el lugar de la competencia.

5.3 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA (PARA EL CONCURSO)

5.3.1 Periodos

En la Tabla 5.17 se indican los periodos obtenidos del análisis modal con software para cada módulo.

Tabla 5.17. Periodos en Modo 1 y Modo 2

Módulo	Periodo (s)	
	Modo 1	Modo 2
Común	0.63	0.43
Cocina	0.60	0.36
Recámara	0.52	0.35

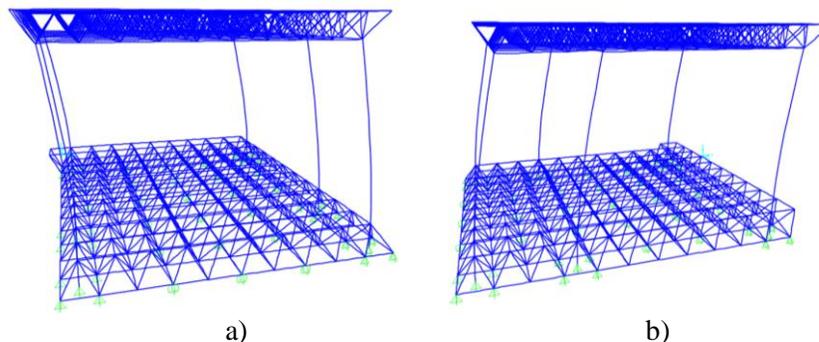


Figura 5.1. Modo 1 (a) y modo 2 (b)

FACULTAD DE INGENIERÍA

Sólo se muestran los periodos 1 y 2 pues son los que representan el movimiento en X y Y siendo estos los casos más significativos en afectación para esta estructura.

Estos valores son altos para un sistema de un piso pues el sistema estructural es muy flexible por la falta de elementos que rigidicen más la estructura.

5.3.2 Deflexiones

Las deflexiones se calcularon con la expresión (ec. 5.1) que se recomienda en [2]. Esta representa la deflexión máxima (desplazamiento vertical) permitida en el centro del claro:

$$\text{Deflexión} = \left(\frac{L}{240}\right) + 5\text{mm} \quad (5.1)$$

La longitud del claro se consideró como la distancia entre las columnas ubicadas en la diagonal del área (figura 5.1) pues es la longitud más desfavorable posible. Las longitudes calculadas se indican en la tabla 5.18.

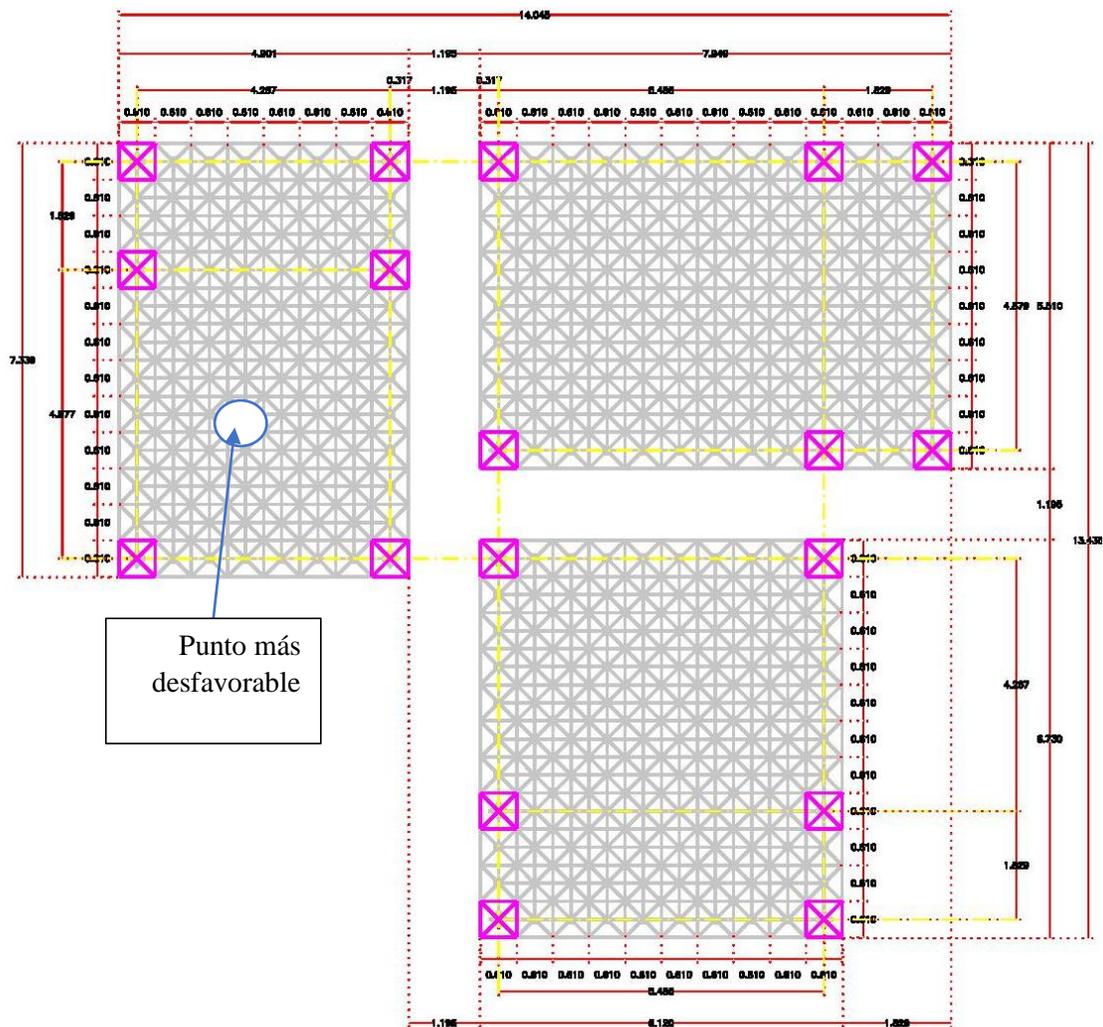


Figura 5.1. Longitud de diagonales para el cálculo de las deflexiones

**Tabla 5.18 Diagonales más grandes en el plano del techo**

	Lado 1 (m)	Lado 2 (m)	Diagonal (m)
Común	4.977	4.267	6.480
Cocina	5.486	4.879	7.342
Recámara	5.486	4.267	6.950

Las deflexiones máximas calculadas se presentan en la tabla 5.19:

Tabla 5.19. Deflexiones máximas

Módulo	Deflexión máxima (mm)	
	Obtenida	Permitida [1]
Común	22	$\left(\frac{6480}{240}\right) + 5 = 32$
Cocina	36	$\left(\frac{7342}{240}\right) + 5 = 36$
Recámara	33	$\left(\frac{6950}{240}\right) + 5 = 34$

De acuerdo con los resultados obtenidos y comparándolos con las deflexiones permitidas, todos los módulos están dentro de las normas.

5.3.3 Distorsiones

Para el caso del diseño por viento [2], se indica que para cuando no haya elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares, los desplazamientos relativos entre niveles no deben de exceder el resultado dado por la ec. 5.2.

$$\frac{\text{Desplazamiento Relativo Horizontal entre 2 niveles}}{\text{Altura de entre piso}} < 0.005 \quad (5.2)$$

En [2], para diseño por sismo, se indica que para muros separados de la estructura principal o capaces de soportar deformaciones apreciables (en nuestro caso los muros funcionan de manera independiente de la estructura), la relación de distorsión multiplicada por el factor de comportamiento sísmico, Q, no debe exceder el resultado dado por la Ec. 5.3.

$$\text{Distorsión} = \frac{\text{Desplazamiento Relativo Horizontal entre 2 niveles (D)}}{\text{Altura de entre piso } (\Delta H)} \times Q < 0.012 \quad (5.3)$$

Nota: La altura de entrepiso a tomar en cuenta será la altura de la columna, es decir, 3.5m.

En la tabla 5.20 se presentan solo los resultados de los casos más desfavorables de los análisis: por viento.

Tabla 5.20. Resumen de Distorsiones

		Desplazamiento	Distorsiones		
		MAX (mm)	MAX	MAX permitido	Estatus
COCINA	VIENTO	14	0.004	0.005	PASA
COMÚN	VIENTO	14	0.004	0.005	PASA
RECÁMARA	VIENTO	10	0.003	0.005	PASA

De acuerdo con los resultados obtenidos y comparándolos con las distorsiones permitidas, todos los módulos se comportan de manera correcta para la distorsión.



5.4 SIMULACIÓN CON SISMO EN ZONA IIIB (CASO DE ESTUDIO)

Adicionalmente, pensando en su implementación en la ciudad de México, se realizó el análisis estructural de la casa tal y como fue concebida para la competencia considerando su construcción en la zona IIIB de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo del DF.

De acuerdo a los resultados, todos los elementos son capaces de resistir adecuadamente las fuerzas producidas por el sismo en esta zona salvo en la tensión aplicada a los cables y las distorsiones presentes en el sistema:

- 1.- Los resultados para la tensión más desfavorable en los cables de cada módulo se pueden apreciar en la tabla 5.21.

Tabla 5.21. Valores máximos en cables para sismo

Módulo	Valor máximo (kN)	
Común	16.70	Supera en un 60% la recomendación pero es la mitad de la resistencia a la ruptura
Cocina	13.20	Supera en un 25% la recomendación pero es un tercio de la resistencia a la ruptura
Recámara	11.10	Supera por 10% la recomendación de seguridad pero es un tercio de la resistencia a la ruptura

Como se explica en la tabla, de acuerdo a la resistencia de ruptura del cable, la tensión se encuentra por debajo de este máximo. Sin embargo, ningún cable cumple la especificación de seguridad del fabricante que es el máximo sugerido de 10.14 kN. Por ello se hace la recomendación de colocar un cable con diámetro de 3/8 el cual resiste 22.56 kN con factor de seguridad de 3.

- 2.- Las distorsiones: En la tabla 5.22 se observan los resultados desfavorables para cada módulo.

Tabla 5.22. Resumen de Distorsiones en sismo

		Desplazamiento	Distorsiones		
		MAX (mm)	MAX	MAX permitido	Estatus
COCINA	SISMO	50	0.014	0.012	No Pasa
COMÚN	SISMO	54	0.016	0.012	No Pasa
RECÁMARA	SISMO	34	0.010	0.012	PASA

De acuerdo con los resultados obtenidos y comparándolos con las distorsiones permitidas, dos módulos presentan problemas para cumplir con el reglamento. Sin embargo, esto no afectaría los criterios del estado límite de servicio pues la casa está formada por un doble fondo, es decir, se tiene la estructura envolvente (estructura tridimensional y columnas) y la “estructura envuelta” o el módulo habitable (madera y muros prefabricados). Además entre estos existe un espacio considerable de más de 0.2 m. Entonces el confort de los habitantes no se ve afectado ni hay elementos que resientan este movimiento.

Por otra parte, este análisis no tomó en cuenta las condiciones de empotramiento que tendría la vivienda en la ciudad de México, por lo tanto, cuando se defina específicamente el lugar donde se construirá esta vivienda, es necesario que se realice un análisis y diseño acorde a los requisitos específicos del sitio.



CONCLUSIONES

El sistema CASA UNAM es una propuesta atractiva como una solución urbanística para la ciudad de México y puede ser adoptada por las personas en su proyecto habitacional demostrando que es rentable a largo plazo entre otras ventajas tecnológicas que ofrece.

En cuanto al diseño estructural, este satisfizo todos los requerimientos necesarios para fines de la competencia en la ciudad de Versalles, Francia. Las columnas tienen la resistencia suficiente para flexo compresión y los perfiles formados en frío para flexo tensión y flexo compresión. También los cables son suficientes para las restricciones de la competencia. Asimismo, las conexiones son resistentes al aplastamiento, al cortante y a la tensión sea en la estructura tridimensional como en las conexiones de esta con los demás elementos.

Además, se puede apreciar que se aprovechó la alta resistencia a tensión del acero, sobre todo en los perfiles de la estructura tridimensional.

Respecto a los apoyos del prototipo, estos fueron diseñados para evitar el hundimiento de este mismo en el sitio de construcción ya que estos fueron planteados para el caso de la competencia. Para su implementación sobre una casa, habría que hacer el estudio pertinente para una correcta interacción entre la casa y el módulo CASA UNAM.

Por otra parte, para la simulación con sismo, se puede apreciar que el sistema estructural no satisface al RCDF en cuanto a las distorsiones, aunque no afecta el estado límite de servicio. Sin embargo, como propuesta que no entra dentro de este trabajo, el posicionamiento de los contraventeos debe ser replanteado ya que no logran dar la rigidez suficiente al sistema para satisfacer las restricciones de distorsiones.

Para la simulación de construcción en el sitio de estudio, se recomienda poner el cable del siguiente diámetro (de tres octavos).

En caso de replantear el sitio de construcción en otra zona que no sea la IIIb, se debe replantear el problema y verificar si para una zona I por ejemplo, los cables son suficientes y las distorsiones respetan las normas. Esto sin tener que hacer mayores cambios al diseño.



AGRADECIMIENTOS

A mi tutor y amigo Marcos Mauricio Chávez Cano quien apoyó al proyecto CASA UNAM desde sus comienzos y a mí durante mi participación en el proyecto y tesis. Al equipo de CASA UNAM por hacer posible tantas vivencias y aprendizaje en esta etapa, al Instituto de Ingeniería de la UNAM y finalmente a mis amigos y familiares quienes aguantaron el proceso del proyecto y de la tesis.

Agrego a los diversos patrocinadores dentro de los cuales la UNAM, GMI que donó la estructura tridimensional y Panel Rey que patrocinó la estructura de paneles y perfiles delgados de acero.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Gobierno del Distrito Federal (2004), **“Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”**, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México D.F.
- (2) Gobierno del Distrito Federal (2004), **“Normas técnicas Complementarias”**, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México D.F.
- (3) American Iron and Steel Institute (1996), **“Especificación para el Diseño de Miembros Estructurales de Acero Conformado en Frío”**, Manual para el Diseño de Acero Conformado en Frío – Parte V, Washington, DC.
- (4) Cristina Beatriz Ramírez Alva (2005), **“Diseño de Estructuras de Acero Formado en Frío Usando las Especificaciones AISI-96”**, Tesis, Instituto Politécnico Nacional.
- (5) Norma Europea (2003), **“Acciones sobre las estructuras”**.
- (6) Wei-Wen Yu (2000), **“Cold Formed Steel Design”**, 3a edición, John Wiley & Sons Inc., Estados Unidos de América, Nueva York.
- (7) Jack C. McCormac (1999), **“Diseño de Estructuras metálicas, método ASD”**, 4ª Edición, Alfaomega, México D.F.
- (8) Equipo Casa UNAM (2014), “Project Manual”, 6 entrega, México D.F.
- (9) Equipo Casa UNAM (2014), “Project Drawings”, 6 entrega, México D.F.
- (10) National Association House of Building (NAHB) (2007), “Study of life expectancy of home components”, Bank of America Home Equity, USA.
- (11) American Iron and Steel Institute (1983), “Cold-Formed Steel Design Manual”, AISI – Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members.
- (12) Departamento de Ingeniería Panel Rey (2005), “Manual de Diseño Estructural”, Panel Rey, Monterrey N.L.