



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA
VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE”**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
(ESTRUCTURAS)**

PRESENTA:

Ing. LUIS ENRIQUE CABRAL VÁZQUEZ DEL MERCADO

DIRIGIDO POR:

Dr. GUADALUPE MOISÉS ARROYO CONTRERAS

C.U. QUERÉTARO, QRO., JUNIO DE 2021



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

“DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA
PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta

Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez Del Mercado

Dirigido por:

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Director

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Secretario

Firma

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Vocal

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Suplente

Firma

Dr. Carlos Santiago López Cajún
Suplente

Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Junio de 2021
México

RESUMEN

En las últimas décadas alrededor del mundo se han implementado diversos diseños de viviendas prefabricadas, modulares y ligeras de estructura de acero con capacidad de ser montadas y desmontadas. En algunos casos se han presentado dificultades para ser ensambladas de forma multi-adaptable entre sí, debido a que sus conexiones son variadas y diseñadas para una geometría y disposición específica, haciéndolas incompatibles de manera universal entre sus módulos, aumentando costo y tiempo de fabricación, así como montaje de sus piezas. Es por esto que en este proyecto se concibió y diseñó un sistema modular prefabricado (M-10) de vivienda que integra una conexión universal (H-1), que en conjunto son capaces de adaptar de manera múltiple sus módulos bajo configuraciones variadas. Estos aportes contribuyen significativamente en el ámbito de estructuras prefabricadas debido a que su diseño puede adaptarse a una gran variedad de estructuras metálicas, y con su implementación se pueden construir estructuras de manera rápida, fácil y multi-adaptable; su transporte es sencillo y ligero; además pueden desmontarse de manera simple y ser montadas de nuevo en otro sitio, ya que toda la estructura es atornillada. La conexión universal H-1 puede adaptarse a 63 configuraciones básicas diferentes, según la disposición en que se desee colocar los módulos, pero puede combinarse en configuraciones compuestas con otras conexiones universales, aumentando su versatilidad de manera casi ilimitada. En cuanto al sistema modular, un sólo módulo puede adaptarse con otros en múltiples configuraciones diferentes. Se realizó el cálculo y diseño estructural de la vivienda con este sistema de modulación propuesto acompañado por un análisis de vibraciones de entrepiso, así como el cálculo de la conexión universal simulando los valores de los esfuerzos que está sometida mediante un modelo en ANSYS. Las dimensiones y geometría de la vivienda se basaron en las que posee un prototipo de vivienda modular construido por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro en 2017 llamada «*Casa Solar Experimental*», inspirada en el «*Solar Decathlon*», un concurso internacional universitario de arquitectura e ingeniería sobre viviendas prefabricadas ecológicas.

(Palabras clave: conexión universal, estructura metálica, vivienda modular, módulos multi-adaptables, vibración de entrepiso)

ABSTRACT

In the last decades around the world, designs of prefabricated, modular and lightweight steel structure houses have been implemented with the capacity to be assembled and disassembled. In some cases, there have been difficulties to be assembled in a multi-adaptable way to each other, because their connections are varied and designed for a specific geometry and arrangement, making them universally incompatible between their modules, increasing cost and manufacturing time, as well as assembly of its parts. That is why in this project a prefabricated modular housing system (M-10) was conceived and designed integrating a universal connection (H-1), and as a whole is capable of adapting their modules in a multiple way under varied configurations. These designs contribute significantly in the field of prefabricated structures because their design can be adapted to a wide variety of metal structures, and with their implementation, structures can be built quickly, easily and multi-adaptable; their transport is simple and light; they can also be easily disassembled, transported and reassembled elsewhere, since the entire structure is screwed. The H-1 universal connection can be adapted to 63 different basic configurations, depending on the arrangement of the modules, but it can be combined in composite configuration with other universal connections, increasing its versatility almost unlimited. For the modular system, a single module can be adapted with multiple different others configurations. The calculus and structural design of the house was carried out with this proposed modulation system, with a floor vibration analysis, as well as the calculus of the universal connection simulating the values of the forces it is subjected by means of a model in ANSYS. The dimensions and geometry of the house were based on those of a modular housing prototype built by the Faculty of Engineering of the Universidad Autónoma de Querétaro in 2017 called «*Casa Solar Experimental*», inspired by the «*Solar Decathlon*», an international university competition of architecture and engineering about ecological prefabricated housing.

(Key words: universal connection, metallic structure, modular housing, multi-adaptable modules, floor vibration)

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

*La gente necesita amor, imaginación y mucha motivación.
El mundo necesita gente buena, honesta y responsable;
Pero, sobre todo, muchos ingenieros.*

Para todos aquellos que siempre han confiado en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, brindarme salud y concederme grandes bendiciones, oportunidades y experiencias.

A mi familia, por brindarme apoyo durante muchos años en diversas etapas en la vida, gracias a ellos por confiar en mí y estar siempre presentes.

A mis amigos, por ser buenas personas conmigo y brindarme su amistad y grandes momentos en las buenas; pero, sobre todo, su apoyo en momentos difíciles.

A mis profesores, por brindarme su acompañamiento, así como sus grandes y apreciados conocimientos que son muy valiosos en mi formación profesional.

A mis compañeros de maestría, por brindarme su amistad, disfrutar grandes experiencias y tener la oportunidad de intercambiar ideas y conocimiento.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por concederme la oportunidad de estudio y el apoyo económico otorgado durante mi formación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindarme apoyo económico durante la realización de mi maestría.

Y a todas aquellas personas que han contribuido conmigo en mi crecimiento profesional y personal, ya que me han brindado experiencias, conocimiento y valores para ser un mejor ingeniero y una mejor persona para aportar lo mejor de mí a la sociedad.

Un agradecimiento especial al:

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras.



Por su valiosa y distinguida aportación al presente trabajo de tesis, fungiendo como director del mismo, quien hasta pocas semanas antes de su lamentable fallecimiento me seguía instruyendo a través de su sabio conocimiento, consejos, observaciones, sugerencias y correcciones, mismos que valoro y aprecio.

A quien fue mi profesor tanto en la licenciatura en ingeniería civil como en la maestría en ciencias (estructuras), de quien aprendí valiosos conocimientos básicos y avanzados en el área de ingeniería, mismos que seguiré aplicando en mi vida profesional.

A quien, con su compañerismo, risas y bromas, amenizaba la convivencia con sus alumnos y otros profesores; y a quien, con su exigencia, regaños y correcciones, proporcionaba grandes aprendizajes.

Agradezco también su valiosa contribución al artículo «*Diseño de una Vivienda Habitacional Modular, Prefabricada y Sustentable*», mismo que fue publicado y que se presentó en el marco del *XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, en Cartagena de Indias, Colombia, en noviembre de 2019.

A quien fue docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro durante muchos años aportando apreciables conocimientos a sus alumnos durante generaciones, formando mejores ingenieros.

A quien tuvo una distinguida y reconocida trayectoria durante su vida profesional, contribuyendo a la ciencia con cuantiosos trabajos de investigación y publicaciones en el campo de la ingeniería civil en México y en el extranjero.

Un agradecimiento especial al:

Dr. Carlos Santiago López Cajún. 

Por su valiosa aportación al presente trabajo de tesis, a través de sus consejos, observaciones, sugerencias y correcciones, mismos que valoro y aprecio; con los cuales me apoyó durante meses y hasta pocos días antes de su lamentable fallecimiento.

Agradezco también su valiosa contribución al artículo «*Diseño de una Vivienda Habitacional Modular, Prefabricada y Sustentable*», mismo que fue publicado y que presentamos en una ponencia en el marco del *XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, en Cartagena de Indias, Colombia, en noviembre de 2019.

A quien fue docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro y talentoso investigador del Sistema Nacional de Investigadores del CONACyT, nivel II.

A quien tuvo una distinguida trayectoria durante su vida profesional aportando a la ciencia cuantiosos trabajos de investigación y publicaciones en el campo de la ingeniería.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	JUSTIFICACIÓN.....	4
2	ANTECEDENTES	5
2.1	VIVIENDAS PREFABRICADAS Y MODULARES	6
2.1.1	<i>Solar Decathlon</i>	13
2.1.2	<i>Prototipos de viviendas modulares y prefabricadas FI-UAQ</i>	15
2.1.2.1	Prototipo de 1 nivel.....	15
2.1.2.2	Prototipo de 2 niveles: Casa Solar Experimental (CSE)	18
2.2	CONEXIONES ESTRUCTURALES	21
2.2.1	<i>Conexiones no-universales</i>	21
2.2.1.1	Conexiones columna-trabe de la Casa Solar Experimental.....	22
2.2.2	<i>Conexiones universales</i>	23
2.2.2.1	Prototipos de conexiones universales	23
2.2.2.2	Conexiones universales en edificaciones modulares prefabricados	30
2.2.2.2.1	Patentes	30
2.2.2.2.2	Investigaciones Universidad de Tianjin	32
2.2.2.2.3	Edificio T-30.....	33
2.2.2.2.4	Investigaciones Universidad de Melbourne	37
2.2.2.2.5	Investigaciones de la Universidad Tecnológica de Beijing.....	38
3	HIPÓTESIS	41
4	OBJETIVOS	41
4.1	OBJETIVO GENERAL	41
4.2	OBJETIVOS PARTICULARES	41
5	METODOLOGÍA	42
5.1	GENERAL.....	42
5.2	CONCEPCIÓN Y DISEÑO DE CONEXIÓN UNIVERSAL Y SISTEMA ESTRUCTURAL.....	43
5.3	CÁLCULO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO DE VIVIENDA	44
5.3.1	<i>Cálculo estructural</i>	44
5.3.1.1	Cargas gravitacionales	44
5.3.1.2	Cálculo por viento.....	45
5.3.1.3	Cálculo por sismo	47
5.3.2	<i>Diseño estructural</i>	48
5.3.3	<i>Vibraciones de entrepiso</i>	49
5.4	MODELACIÓN DE LA CONEXIÓN UNIVERSAL EN ANSYS	50

6	DESARROLLO	51
6.1	CONCEPCIÓN Y DISEÑO DE LA CONEXIÓN UNIVERSAL Y SISTEMA ESTRUCTURAL.....	51
6.2	PROCESO DE DISEÑO DE LA CONEXIÓN UNIVERSAL.....	51
6.2.1	<i>Sistema modular M-10</i>	57
6.2.2	<i>Columna base CB-100</i>	60
6.2.3	<i>Conexión universal H-1</i>	61
6.2.4	<i>Sistema modular M-10 con conexión universal H-1</i>	65
6.2.5	<i>Multi-adaptabilidad</i>	76
6.2.5.1	Conexión universal H-1	76
6.2.5.2	Sistema modular M-10.....	79
6.3	VIVIENDA CON SISTEMA MODULAR MULTIADAPTABLE M-10	80
6.4	CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA.....	81
6.4.1	<i>Secciones</i>	81
6.4.2	<i>Materiales</i>	85
6.4.2.1	Materiales de la estructura de acero.....	85
6.4.2.2	Materiales de elementos secundarios.....	85
6.4.3	<i>Consideraciones</i>	86
6.4.3.1	Condiciones de frontera	86
6.4.3.2	Peso propio	87
6.4.3.3	Áreas de entrepiso.....	88
6.4.3.4	Área de muros.....	88
6.4.4	<i>Combinaciones de carga</i>	90
6.4.5	<i>Estados de carga</i>	92
6.4.5.1	Cargas muertas.....	92
6.4.5.2	Cargas vivas.....	94
6.4.6	<i>Aplicación de cargas muertas</i>	95
6.4.6.1	Peso de la estructura	95
6.4.6.2	Cargas sobre áreas	95
6.4.6.3	Cargas sobre elementos.....	96
6.4.7	<i>Aplicación de cargas vivas</i>	97
6.4.7.1	Carga viva máxima	97
6.4.7.2	Carga viva accidental.....	98
6.4.8	<i>Cálculo por viento</i>	99
6.4.8.1	Obtención de parámetros y presiones de viento.....	99
6.4.8.2	Aplicación de presiones de viento sobre la estructura	105
6.4.9	<i>Cálculo por sismo</i>	108

6.4.9.1	Espectro de diseño	109
6.4.9.2	Masas concentradas	112
6.4.9.2.1	Peso de la estructura.....	113
6.4.9.2.2	Aportación de masas de muros a columnas.....	114
6.4.9.2.3	Aportación de masas de entrepisos a columnas	117
6.4.9.3	Aplicación del sismo.....	124
6.5	REVISIÓN DE TORNILLOS PLACAS Y SOLDADURAS	128
6.5.1	<i>Dimensionamiento de agujeros de placas</i>	128
6.5.2	<i>Placa lateral de la conexión universal</i>	129
6.5.2.1	Falla de fluencia en tensión.....	130
6.5.2.2	Falla de fractura a tensión	131
6.5.2.3	Falla de tensión a cortante.....	133
6.5.2.4	Falla de fractura a cortante.....	133
6.5.2.5	Bloque de cortante	134
6.5.2.6	Falla por aplastamiento y desgarre.....	137
6.5.3	<i>Tornillos de la conexión universal</i>	140
6.5.3.1	Tipos de tornillos	140
6.5.3.2	Revisión de falla de tornillos por cortante.	141
6.5.3.3	Revisión de falla de tornillos por tensión axial.	142
6.5.4	<i>Soldaduras</i>	143
6.5.4.1	Balanceo de soldaduras.....	144
6.5.4.2	Resistencia nominal del material de aportación.....	146
6.5.4.3	Resistencia de soldaduras con filete longitudinal	146
6.5.4.4	Resistencia del metal base	148
6.5.4.5	Resistencia de la soldadura con filetes longitudinales	149
6.5.4.5.1	Placa y montante.	149
6.5.4.5.2	Placa y un elemento diagonal cuerda superior.	150
6.5.4.5.3	Placa y elementos diagonales en cuerda inferior.....	151
6.5.4.6	Resistencia de las soldaduras con filete longitudinal y transversal.....	152
6.5.4.6.1	Cuerda superior y placa con montante	153
6.5.4.6.2	Cuerda superior y placa con montante y diagonal	155
6.5.4.6.3	Cuerda inferior y placa con montante y dos diagonales	159
6.6	ANÁLISIS DE VIBRACIÓN DE ENTREPISO.....	162
6.6.1	<i>Parámetros dinámicos</i>	163
6.6.1.1	Amortiguamiento	163
6.6.1.2	Masa modal.....	164

6.6.1.2.1	Momento de inercia del piso	164
6.6.1.2.2	Momento de inercia transformado de la viga compuesta	164
6.6.1.2.3	Distribución de masa	167
6.6.1.2.4	Masa modal	167
6.6.1.3	Eingenfrecuencia	168
6.6.1.3.1	Frecuencia fundamental	168
6.6.1.3.2	Periodo fundamental	168
6.6.1.4	Aceleración máxima	169
6.6.2	<i>Criterios de confort debido a vibraciones de entrepiso</i>	169
6.6.2.1	Aceleración como porcentaje de la gravedad	170
6.6.2.2	Método de OS-RMS ₉₀	172
6.7	MODELACIÓN DE LA CONEXIÓN UNIVERSAL H-1 EN ANSYS	174
6.7.1	<i>Modelo</i>	174
6.7.2	<i>Consideraciones</i>	175
6.7.2.1	Sistema de Unidades	175
6.7.2.2	Materiales	175
6.7.2.3	Ubicación de la conexión analizada	176
6.7.2.4	Mallado	177
6.7.2.5	Restricciones	179
6.7.3	<i>Aplicación de esfuerzos</i>	180
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	181
7.1	CÁLCULO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA VIVIENDA	181
7.1.1	<i>Esfuerzos</i>	181
7.1.2	<i>Reacciones</i>	185
7.1.3	<i>Deflexiones</i>	187
7.1.4	<i>Desplazamiento de los nodos</i>	190
7.1.5	<i>Distorsiones angulares</i>	191
7.1.6	<i>Análisis de vibraciones de entrepiso</i>	193
7.1.6.1	Criterio por aceleración máxima permisible	193
7.1.6.2	Criterio por el método de OS-RSM ₉₀	194
7.2	MODELACIÓN DE LA CONEXIÓN UNIVERSAL EN ANSYS	195
7.2.1	<i>Esfuerzos</i>	195
7.2.2	<i>Deformaciones</i>	198
7.3	ALCANCES	200
7.3.1	<i>Conexión universal H-1</i>	200
7.3.1.1	Dimensionamiento de la conexión universal H-1	200

7.3.1.2	Configuraciones y adaptabilidad.....	200
7.3.2	<i>Sistema modular M-10</i>	201
7.3.2.1	Dimensionamiento de los elementos del sistema modular M-10.....	201
7.3.2.2	Configuraciones geométricas del sistema modular M-10	201
7.3.3	<i>Caso de estudio: Vivienda modular prefabricada basada en la Casa Solar Experimental.</i> ...	201
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	203
8.1	SISTEMA MODULAR M-10.....	203
8.2	CONEXIÓN UNIVERSAL H-1	204
9	REFERENCIAS	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Combinaciones en las que se pueden adaptar elementos a la conexión universal	77
Tabla 2. Desarrollo de las combinaciones posibles en las que la conexión universal H-1 puede acoplar a distintos elementos que se unen en ella (columnas y entrepisos que forman módulos), donde cada módulo se une a la conexión universal a través de 2 armaduras perpendiculares entre sí.	78
Tabla 3. Tipo de sección por elemento.....	81
Tabla 4. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección PTR 4" x 4" x 3/16".....	82
Tabla 5. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección PTR 4" x 2" x 3/16".....	82
Tabla 6. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección 4 MT 16.	83
Tabla 7. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección LI 1" x 1" x 1/8".....	83
Tabla 8. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección 2T LI 1" x 1" x 1/8".....	84
Tabla 9. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección 2T LI 1 1/2" x 1 1/2" x 1/8".....	84
Tabla 10. Materiales de la estructura principal según el tipo de perfil utilizado.	85
Tabla 11. Materiales de elementos secundarios.	85
Tabla 12. Condiciones de frontera de los elementos en sus extremos.....	86
Tabla 13. Condiciones de frontera de los nodos de las columnas de la base.....	86
Tabla 14. Combinaciones de carga de diseño (ASCE, 2017 y NTC, 2017).	90
Tabla 15. Combinaciones de carga de servicio (ASCE, 2017 y NTC, 2017).	91
Tabla 16. Tipo de acciones sobre la estructura.....	91
Tabla 17. Cargas muertas del primer entrepiso.	92
Tabla 18. Carga muerta en escaleras.	92
Tabla 19. Carga muerta por unidad de longitud sobre alfardas debido al peso propio.....	92
Tabla 20. Cargas muertas en entrepiso del segundo nivel.....	93
Tabla 21. Cargas muertas en cubierta.....	93
Tabla 22. Cargas muertas en muros.	93
Tabla 23. Altura de muros y bastidores metálicos que sujetan a los muros.	93
Tabla 24. Carga muerta en muros por unidad de longitud.	94
Tabla 25. Cargas vivas en viviendas en entrepisos según el tipo y ubicación (NTC, 2017).	94
Tabla 26. Cargas vivas en alfardas por unidad de longitud.	95
Tabla 27. Cargas sobre áreas.....	95
Tabla 28. Cargas muertas por unidad de longitud que aportan los muros hacia los elementos de la estructura.	96
Tabla 29. Cargas muertas por unidad de longitud que aportan los escalones hacia las alfardas.	96
Tabla 30. Cargas vivas máximas.	97
Tabla 31. Cargas vivas accidentales.	98

Tabla 32. Parámetros para el cálculo de la presión dinámica de base (q_z).	102
Tabla 33. Parámetros geométricos para el cálculo de la presión de viento para cada dirección.....	103
Tabla 34. Variables para obtener la presión exterior en cada dirección del viento.	104
Tabla 35. Presión exterior de viento en cada dirección, la cual se aplica directamente a la estructura por unidad de área, tanto en muros exteriores como en cubierta.	104
Tabla 36. Valores del espectro de diseño en roca correspondiente a la ubicación de la vivienda.	110
Tabla 37. Desglose del peso propio de los elementos de la estructura según ubicación.	113
Tabla 38. Peso total de los perfiles de la estructura según el entrepiso hacia donde dirige su carga.....	114
Tabla 39. Peso de los muros hacia cada columna por cada entrepiso.....	114
Tabla 40. Pesos de los muros por ubicación.....	117
Tabla 41. Aportaciones de masas hacia el entrepiso donde dirige su carga	119
Tabla 42. Presión promedio de las masas concentradas por tipo de entrepiso.	120
Tabla 43. Valores de las áreas tributarias en la estructura que llegan a columnas.	120
Tabla 44. Masas concentradas por tipo de área en columnas por cada tipo de sistema de entrepiso.	121
Tabla 45. Masas concentradas en las columnas por cada entrepiso. *Área de un entrepiso adyacente pero con una presión distinta.	122
Tabla 46. Masas concentradas totales para cada columna por cada sistema de entrepiso.	123
Tabla 47. Peso total de la vivienda por cada entrepiso.....	125
Tabla 48. Aportación de masas concentradas totales de la vivienda.	125
Tabla 49. Iteraciones realizadas para aproximar el cortante basal en el software con el calculado.	127
Tabla 50. Dimensión de los agujeros según su tipo y diámetro nominal del tornillo (AISC, 2016).	128
Tabla 51. Distancia mínima al borde (AISC, 2016).	128
Tabla 52. Espaciamiento entre agujeros (AISC, 2016).	129
Tabla 53. Dimensiones de los tornillos (ANSI/ASME B18.2.1, 2012).....	140
Tabla 54. Tamaño mínimo de soldadura de filete según el espesor más delgado de los metales unidos (NTC-Acero, 2020).....	143
Tabla 55. Longitudes de soldadura balanceadas de acuerdo al centro de gravedad del perfil.....	146
Tabla 56. Valores de amortiguamiento según las características del sistema de piso (HIVOSS, 2008).	163
Tabla 57. Clasificación de la respuesta de entrepiso recomendada por sector (ISO-10137, 2007).	172
Tabla 58. Materiales usados en la modelación de la conexión universal H-1 en ANSYS.	175
Tabla 59. Restricciones en los extremos verticales de la conexión universal en un intervalo de tiempo.	179
Tabla 60. Esfuerzos aplicados a la conexión universal H-1 en ANSYS.	180
Tabla 61. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a la cuerda superior de las armaduras. .	183
Tabla 62. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a la cuerda inferior de las armaduras. .	183
Tabla 63. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a las diagonales de las armaduras.	183
Tabla 64. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a los montantes de las armaduras.	184

Tabla 65. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a los montenes.	184
Tabla 66. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a las columnas.	184
Tabla 67. Reacciones en la base de la estructura con la condición de carga muerta.	185
Tabla 68. Reacciones en la base de las columnas bajo la combinación D11.	186
Tabla 69. Deflexiones permisibles (NTC, 2017).	188
Tabla 70. Deflexiones presentadas y permisibles de los elementos analizados bajo condiciones de servicio.	189
Tabla 71. Máximos desplazamientos nodales en la estructura bajo condiciones de servicio.	190
Tabla 72. Distorsiones angulares de los nodos de la columna 1, la más desplazada debido a cargas sísmicas bajo condiciones de servicio con la combinación S17 en sentido -Z.	192
Tabla 73. Distorsiones angulares de los nodos de la columna 2, la más desplazada debido a cargas de viento bajo condiciones de servicio con la combinación S15 en sentido -Z.	192
Tabla 74. Resultados del análisis de vibraciones del entrepiso con el criterio de la aceleración.	194
Tabla 75. Resultados sobre los máximos esfuerzos focalizados de la conexión universal H-1.	196

ÍNDICE DE DIAGRAMAS DE FLUJO

Diagrama de flujo 1. Metodología general de la investigación.	42
Diagrama de flujo 2. Generalidades del proceso de concepción y diseño de la conexión universal y del sistema estructural.	43
Diagrama de flujo 3. Generalidades del cálculo estructural para cargas gravitacionales.	44
Diagrama de flujo 4. Obtención de presiones viento sobre la estructura.	45
Diagrama de flujo 5. Aplicación de las presiones de viento sobre la estructura.	46
Diagrama de flujo 6. Generalidades del cálculo por sismo.	47
Diagrama de flujo 7. Generalidades diseño estructural.	48
Diagrama de flujo 8. Vibraciones de entrepiso.	49
Diagrama de flujo 9. Esquema general de la modelación de la conexión universal en ANSYS.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vivienda modular prefabricada de acero y cubierta de madera de VIMOC (Adfer, 2015).	5
Figura 2. Sistema prefabricado de vivienda colonial portátil para migrantes (Smith, 2009).	6
Figura 3. Sistema prefabricado de vivienda de Bellhouse manufacturada en Manchester, Inglaterra y construida en Melbourne, Australia en 1854 (NTA, 2019).	7
Figura 4. Vivienda Aluminaire prefabricada de acero en Nueva York en 1931 (Ovando 2015).	7
Figura 5. Sistema prefabricado de vivienda «Blok Lock» de la compañía IKEA (Smith, 2009).	8
Figura 6. Línea de ensamblaje de viviendas prefabricadas de la compañía Toyota (Smith, 2009).	8
Figura 7. Construcción en 1967 del proyecto «Habitat 67» de módulos prefabricados (Speaman, 1967).	9
Figura 8. Proyecto «Habitat 67» en la actualidad (테반이네, 2018).	9
Figura 9. Sistema de modulo (Lawson, 2006).	10
Figura 10. Sistema modular prefabricado (Kyung-Suk, 2015).	10
Figura 11. Instalación de los módulos contenedores en Londres, Inglaterra. (Lawson, 2009).	11
Figura 12. Módulo prefabricado de Sekisui Heim (Ovando, 2015).	11
Figura 13. Sistema modular prefabricado (NSM-1, 2016).	12
Figura 14. Izamiento de un módulo prefabricado para ser instalado en Murcia, España (NSM-2, 2016).	12
Figura 15. Diseño de vivienda participante en el «Solar Decathlon» del equipo suizo en la categoría «Build Challenge» (Schroeder, 2017).	14
Figura 16. Lugar del evento del «Solar Decathlon» en la categoría «Build Challenge» durante la etapa de construcción de las viviendas (Kelsey, 2015).	14
Figura 17. Prototipo de vivienda de 1 nivel a base paneles con marcos de acero (Escalante, 2017).	15
Figura 18. Estructura del panel propuesto para el prototipo de vivienda de 1 nivel (Escalante, 2017).	16
Figura 19. Pruebas experimentales realizadas a la estructura del panel (Escalante, 2017).	17
Figura 20. Marco de acero del módulo deformado luego de aplicarse carga (Escalante, 2017).	17
Figura 21. «Casa Solar Experimental» construida en las instalaciones de la FI-UAQ (foto obtenida por el autor, 2019).	18
Figura 22. Vista del frente de la CSE de noche (foto obtenida por el autor, 2019).	19
Figura 23. Vista posterior de la CSE (foto obtenida por el autor, 2019).	19
Figura 24. Estructura del modelo original de la CSE con 14 módulos (Álvarez, 2017).	20
Figura 25. Configuración original de la CSE. a) Planta baja. b) Planta alta (Álvarez, 2017).	20
Figura 26. Sistema modular de la CSE compuesto con perfiles de acero estructural. a) Sistema de entrepiso. b) Módulo compuesto por 4 columnas y 2 sistemas de entrepiso (Álvarez, 2017).	20
Figura 27. Árbol de conexiones del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Querétaro (CICQ) que ilustra la variedad de algunas conexiones distintas que se pueden tener en una estructura (Rodríguez, 2019).	21
Figura 28. Conexión en un nodo de una columna que intersecta con una trabe principal (García, 2017).	22

Figura 29. Conexión en un nodo de una columna que intersecta con una trabe secundaria (García, 2017).....	22
Figura 30. Conexión en un nodo de una columna que intersecta con 4 trabes principales (García, 2017).	22
Figura 31. Patente de una conexión universal para una estructura tipo malla espacial (USPTO, 2009).....	23
Figura 32. Conector universal donde se unen hasta 8 elementos de la armadura (Ruiz, 2009).....	24
Figura 33. Armadura en forma de puente con conectores universales (Ruiz, 2009).....	24
Figura 34. Patente de conexión universal circular para estructuras tipo malla espacial (USPTO, 2014).....	25
Figura 35. Conexión universal para un domo geodésico (USPTO, 1999).	26
Figura 36. Patente de conexión universal para elementos tubulares (USPTO, 1930).	27
Figura 37. Conexión universal a base de perfiles con sección circular (USPTO, 1975).....	28
Figura 38. Conexión universal adaptable a diversos ángulos de sus elementos (USPTO, 1972).....	29
Figura 39. Diagramas de la patente de una conexión universal para un edificio con marcos de acero con columnas circulares y trabes tipo-I (OEPM, 2018).	30
Figura 40. Diagramas de la patente de una conexión universal para una estructura de marcos metálicos con columnas de sección cuadrada y trabes tipo-I (USPTO, 2011).	31
Figura 41. Conexiones universales con módulos multiadaptables (Zhihua Chen, 2017).....	32
Figura 42. Conexiones universales propuestas para el sistema de modulación (Zhihua Chen, 2017).	32
Figura 43. Edificio «T-30» en distintas etapas de la construcción durante 15 días (BSB, 2012).....	33
Figura 44. Ensamblaje del sistema modular de entrepiso del edificio «T-30» (BSB, 2012).....	33
Figura 45. Proceso de transporte y construcción del edificio modular «T-30». a) Sistema de transporte. b) Colocación de los módulos de entrepisos completos. c) Incorporación de los módulos de entrepiso hacia las columnas a través de las conexiones universales. d) Colocación de la fachada exterior de vidrio. (Lee, 2012).	34
Figura 46. Fabricación de los entrepisos para el edificio «T-30» en la fábrica BSB (Sheldon, 2012).	34
Figura 47. Configuración en planta de los módulos de entrepiso del edificio «T-30», donde por cada entrepiso se disponen 8 módulos de 3.90 metros de ancho por 15.60 metros de largo y un núcleo central cuadrado de 7.80 m por lado donde se ubican los elevadores y escaleras del edificio (figura elaborada por el autor, 2020).	35
Figura 48. Configuración arquitectónica en planta de los entrepisos del edificio «T-30» (Alter, 2013).....	35
Figura 49. Acoplamiento de un sistema de entrepiso con conexiones universales hacia las columnas. A) El entrepiso cuenta con los sistemas de instalaciones ya pre-instalados. B) El entrepiso se iza con los muros prefabricados desarmados, así como el sistema de instalaciones que va en ellos. C) Entrepiso ya colocado. D) columnas reforzadas con diagonales en sus extremos para darle mayor rigidez a la estructura ante movimientos laterales. E) Conexión universal adherida al sistema de entrepisos (Lee, 2012).	36
Figura 50. Hotel «T-30» de 99.90 metros de altura y 30 entrepisos construido en 15 días (Wood, 2012).....	36
Figura 51. Sistema modular multi-adaptable propuesto para el edificio de 20 niveles (Gunawardena, 2016).....	37
Figura 52. Sistema de conexiones universales que se incorporan en los módulos (Gunawardena, 2016).	37

Figura 53. Sistema de conexión 2017. a) Columna. b) Columna con brida. c) Trabe tipo-I. d) Desmontaje de la conexión. e) Ensamblaje de la conexión. f) Estructura con conexión universal (X.C. Liu et. al., 2017).	38
Figura 54. Sistema estructural de 2015. A) Vista despiezada de sus componentes. B) Montaje del sistema de armaduras a la conexión y ésta a su vez a la columna. C) Conexión ensamblada (X.C. Lui et. al., 2015).	39
Figura 55. Representación del ensamblaje del sistema modular de entrepisos con armaduras conectadas a las conexiones universales (X.C. Liu et. al., 2015).....	40
Figura 56. Edificio experimental construido con el sistema modular de entrepiso con armaduras conectadas a las conexiones universales (X.C. Liu et. al., 2015).	40
Figura 57. Etapas del proceso del diseño, donde se representa visualmente algunas etapas del proceso de la conexión universal H-1 diseñada, con una analogía del diseño de un retrato a mano de un caballo.....	51
Figura 58. Conexión universal diseñada para la Casa Solar Experimental. A la izquierda se aprecia el modelo tridimensional de la conexión en ANSYS y a la derecha el modelo metálico construido.....	52
Figura 59. Despiece de la conexión universal para la CSE, donde se aprecia la manera en la que se conectan los diferentes elementos que se unen entre sí hacia el conector universal central.	53
Figura 60. Etapas iniciales de la construcción de la conexión universal para la CSE. a) Trabes con placas agujereadas soldadas. b) Ajuste y calibración de los agujeros en la conexión. c) Columnas y conector universal agujereados. d) Montaje de la conexión universal con sus tornillos.	53
Figura 61. Etapas finales de la construcción de la conexión universal para la CSE. a) aplicación del «primer» anticorrosivo. b) Pintado de las piezas. c) Piezas totalmente terminadas. d) Conexión universal armada donde se aprecian los tornillos instalados de extremo a extremo de la conexión.	54
Figura 62. Prototipo de conexión universal a base de un perfil PTR central cuadrado con 4 perfiles PTR rectangulares a sus lados que soportan placas laterales que unen a trabes tipo PTR rectangulares con una conexión tipo «end plate», en sus extremos verticales cuenta con placas tapas que conectan a una columna en su parte inferior y otra en su parte superior. a) Vista isométrica. b) Vista lateral. c) Vista en planta.	55
Figura 63. Prototipo de conexión universal a base de un perfil PTR central cuadrado del cual sobresalen placas de cortante a sus 4 lados tanto en la parte superior como en la inferior donde se conectan placas para recibir una armadura, también cuenta con placas tapas para conectar a 2 columnas. a) Vista isométrica. b) Vista lateral. c) Vista en planta.	55
Figura 64. Prototipo semifinalista de la conexión universal, al cual se le integraron placas de absorción de momento que se conectan al perfil PTR central. a) Vista isométrica. b) Vista lateral. c) Vista en planta.....	56
Figura 65. Prototipo de la conexión universal construido en madera.....	56
Figura 66. Visualización de la modelación de la estructura en RAM Elements de un módulo multi-adaptable M-10, el cual incorpora conexiones universales H-1 en los extremos de las armaduras de entrepiso.	57
Figura 67. Vista del módulo M-10 en planta con un sistema de 6 conexiones universales H-1.	58
Figura 68. Vista del módulo M-10 en corte longitudinal.	58
Figura 69. Vista isométrica de un módulo M-10 conformado con un sistema de módulos H-1	59

Figura 70. Columna base CB-100 a la que se le puede incorporar una conexión universal.....	60
Figura 71. Conexión universal H-1. Vista isométrica.	61
Figura 72. Vista isométrica diagonal de la conexión universal H-1.....	62
Figura 73. Vista en planta de la conexión universal H-1, donde se aprecia la placa tapa barrenada donde se acopla a una columna a través de uniones atornillas.	62
Figura 74. Vista lateral de la conexión universal H-1.....	63
Figura 75. Vista lateral diagonal de la conexión universal H-1.	63
Figura 76. Vista isométrica de 8 módulos unidos entre sí, 4 por cada nivel.	67
Figura 77. Vista en planta de la unión de 4 módulos, donde se aprecian las conexiones universales que los unen, tanto las que se incorporan a las columnas como las que no.	67
Figura 78. Corte longitudinal donde se aprecia la unión lateral entre 4 módulos.	68
Figura 79. Corte transversal de la unión entre 4 módulos.	68
Figura 80. Corte longitudinal de una conexión universal de borde unida a 2 columnas y 2 armaduras simples.	69
Figura 81. Corte longitudinal de una conexión universal sin columnas unida a 2 armaduras simples.....	69
Figura 82. Vista isométrica de la columna base conectada a una conexión universal de borde.	70
Figura 83. Conexión universal en una esquina unida a 2 armaduras simples y 2 columnas	70
Figura 84. Otra vista de la conexión universal de esquina unida a 2 armaduras simples y 2 columnas.....	71
Figura 85. Vista isométrica inferior de la conexión universal desde el interior del módulo con 2 columnas y unida a 2 armaduras simples, a las cuales se le conectan las riostras diagonales horizontales.....	71
Figura 86. Conexión universal en cubierta con una columna inferior y 8 armaduras	72
Figura 87. Conexión universal central sin columnas conectada a 8 armaduras.	72
Figura 88. Conexión universal central con columnas conectada a 8 armaduras.	73
Figura 89. Conexión universal de borde sin columnas unida a 4 armaduras.....	73
Figura 90. Conexión universal de borde con columnas unida a 4 armaduras.	74
Figura 91. Conexión de los montenes de dos módulos hacia un sistema de armaduras doble central.	74
Figura 92. Vista de la conexión atornillada de los montenes a las placas de cortante de las armaduras.	75
Figura 93. Vista del sistema de armaduras doble en las caras sin montenes, también se pueden apreciar las riostras diagonales horizontales que le brindan mayor rigidez a la estructura.	75
Figura 94. Vista en planta de la conexión universal H-1 en donde se adaptan un sistema de armaduras que conforman los sistemas de entepiso de los módulos.	76
Figura 95. Ubicaciones en las que pueden situarse diversos módulos respecto a un módulo central “A”, usando el mismo sistema de conexiones universales H-1 que el del módulo de referencia. Las configuraciones de dichas ubicaciones pueden crear una gran variedad de combinaciones posibles en las que podrían disponerse los módulos respecto a otro de referencia.	79
Figura 96. Estructura de acero de la vivienda con el sistema de módulos multiadaptable M-10.	80

Figura 97. Panel propuesto de muro térmico prefabricado de 3 capas, acabado liso (PanelSandwich, 2020).	85
Figura 98. Aplicación de las condiciones de frontera de elementos y en los nodos de columnas en la base. ..	87
Figura 99. Visualización de las áreas generadas de los entresijos de la estructura.....	88
Figura 100. Vista isométrica de la entrada de la vivienda, donde se aprecia la geometría de sus muros.	89
Figura 101. Representación de las áreas de muro generadas de la estructura, sobre las cuales se aplicaron las cargas de viento, así como en las áreas de cubierta.....	89
Figura 102. Cargas muertas aplicadas a la estructura.....	96
Figura 103. Aplicación de cargas vivas máximas sobre la estructura.	97
Figura 104. Cargas vivas instantáneas aplicadas sobre la estructura.	98
Figura 105. Velocidades regionales para un periodo de retorno de 50 años y con un terreno tipo 2, en la República Mexicana (CFE-Viento, 2008).....	100
Figura 106. Aplicación del viento en $-Z$ sobre las superficies de la vivienda (cuando sopla hacia el noreste).	106
Figura 107. Aplicación del viento en $-X$ sobre las superficies de la vivienda (cuando sopla hacia el noroeste).	106
Figura 108. Aplicación de las presiones de viento en dirección X en muros y cubiertas distribuida hacia los elementos de la estructura.	107
Figura 109. Aplicación de las presiones de viento en dirección Z en muros y cubiertas distribuida hacia los elementos de la estructura.	107
Figura 110. Regionalización sísmica de la República Mexicana (CFE-Sismo, 2015).	108
Figura 111. Aceleración máxima en roca, correspondiente al nivel de referencia del espectro de respuesta en la República Mexicana (CFE-Sismo, 2015).....	109
Figura 112. Gráfica del espectro de diseño en roca correspondiente a la ubicación de la vivienda.	111
Figura 113. Muros perimetrales de la base M-1 ubicados en el primer entresijo.	115
Figura 114. Muros perimetrales M-2 y muros interiores M-3 del primer entresijo.....	115
Figura 115. Muros perimetrales M-2 e interiores M-3 del segundo entresijo y muros de pretil M-4 de la cubierta de primer nivel.....	116
Figura 116. Muros de pretil M-4 en la cubierta de segundo nivel.....	116
Figura 117. Ubicación de las áreas tributarias por columna en el entresijo de primer nivel.	117
Figura 118. Ubicación de áreas tributarias del descanso de las escaleras hacia columnas.....	118
Figura 119. Ubicación de las áreas tributarias por columna en el entresijo de segundo nivel colindante con entresijo de cubierta de primer nivel y pergolado.	118
Figura 120. Ubicación de las áreas tributarias por columna en cubierta de 2do nivel.	119
Figura 121. Para el cálculo de sismo se realizó la aplicación de las masas concentradas en los nodos sobre las columnas de la estructura por cada entresijo (valores en toneladas).	124
Figura 122. Vista de la ubicación de la placa analizada en la conexión universal.	129

Figura 123. Representación de la falla por fluencia a tensión de la placa.....	130
Figura 124. Representación de la falla por fractura a tensión de la placa a través de los sus orificios.	131
Figura 125. Representación del bloque de cortante en la placa. (Nota: la trayectoria del bloque de cortante en la figura es sólo representativa).....	134
Figura 126. Representación de las fallas en los agujeros de una la placa de la conexión universal. a) Falla por aplastamiento. b) Falla por desgarre.....	137
Figura 127. Fallas en los agujeros de una placa. a) Falla por aplastamiento. b) Falla por desgarre.....	137
Figura 128. Esquema de las dimensiones de las partes de los tornillos (ANSI/ASME B18.2.1, 2012).	140
Figura 129. Tipo de tornillo utilizado donde se aprecia la norma respectiva de su material.....	140
Figura 130. Representación de la falla por cortante de los tornillos.	141
Figura 131. Representación de la tensión axial en un tornillo con falla de fluencia.	142
Figura 132. Armadura del sistema modular M-10 donde se revisaron las soldaduras de algunas placas conectadas a los perfiles tipo ángulo.	144
Figura 133. Balance de soldaduras. a) Forma incorrecta: centro de gravedad de la soldadura no-balanceado con el centro de gravedad del perfil. b) Forma correcta: entro de gravedad de la soldadura balanceado con el centro de gravedad del perfil.	144
Figura 134. Componentes para balancear las soldaduras en un perfil tipo ángulo de acuerdo a su centroide.	145
Figura 135. Representación del balance de soldaduras de los perfiles tipo ángulo en la armadura. a) Conexión tipo “T”. b) conexión tipo “K-T”. c) Conexión tipo “media K-T”.....	145
Figura 136. Partes de una soldadura, donde se muestra el área efectiva de la soldadura (A_w).....	147
Figura 137. Garganta efectiva (t_e). a) Cuando los lados de la soldadura de filete son iguales. b) cuando los lados de la soldadura son desiguales.	148
Figura 138. Unión entre placa y montante en la parte central de la cuerda superior de la armadura, donde se ubican 2 soldaduras longitudinales balanceadas, las cuales conectan a la placa y al ángulo.	149
Figura 139. Conexión entre una placa y un perfil diagonal tipo ángulo a través de soldadura longitudinal en la cuerda superior de la armadura.	150
Figura 140. Conexión entre una placa y perfiles diagonales tipo ángulo a través de soldadura longitudinal en la cuerda inferior central de la armadura.	151
Figura 141. Unión entre placa y perfil tipo ángulo de la cuerda superior de la armadura a través de 2 tipos de filete, uno transversal de 7.62 cm y 2 de tipo longitudinal con 2.42 cm. La placa se conecta a un montante.	153
Figura 142. Unión entre placa y perfil tipo ángulo de la cuerda superior de la armadura a través de 2 tipos de filete, uno transversal de 11.43 cm y 2 de tipo longitudinal con 2.42 cm cada uno. La placa se conecta a un montante y a una diagonal con perfiles tipo ángulo.	155
Figura 143. Soldaduras longitudinales y transversal que unen a la cuerda inferior con la placa, la cual está conectada a un montante y dos diagonales.	159

Figura 144. Límites de perceptibilidad ante vibraciones por los criterios ASCE y SCI, como un parámetro de medición del estado de confort de los ocupantes ante una vibración con cierta frecuencia (Hernández, 2015).	171
Figura 145. Gráfica del OS-RMS ₉₀ , para un amortiguamiento del 3%, donde se compara la eigenfrecuencia calculada del entrepiso en Hz contra la masa modal calculada del entrepiso en kg, obteniendo un valor de 2.8, por lo cual se clasifica como D, siendo una percepción de vibración recomendada (ArcelorMittal, 2008)....	173
Figura 146. Vista de la conexión universal H-1 en ANSYS	174
Figura 147. Ubicación en la estructura de la conexión universal H-1 analizada en ANSYS.	176
Figura 148. Conexión universal H-1 con el mallado de sus elementos finitos.....	177
Figura 149. Despiece de los elementos mallados que conforman la conexión universal. A) Perfil PTR 4"x4"x3/16", 1 pieza. b) Placas interiores, 8 piezas. c) Placas laterales con 6 agujeros de 3/8" cada uno, 8 piezas. d) soldadura del contorno del perfil PTR, 2 piezas. e) Conjunto de soldaduras entre placas, 8 piezas. f) Placas tapa con 8 agujeros de 1/2" cada uno, 2 piezas. g) Placas diafragma, 2 piezas.....	178
Figura 150. Visualización de la intensidad de la relación de esfuerzos en los elementos de la estructura bajo la condición de carga más desfavorable para cada uno. Si su relación de esfuerzo aplicado entre el resistente es menor que la unidad, está bien diseñado el elemento.	181
Figura 151. Modelación de esfuerzos en la estructura a través del método del elemento finito (FEM) bajo la combinación de carga de diseño D11, la más desfavorable para las conexiones universales que incluye acciones de sismo, donde los esfuerzos a los que los elementos están sometidos son adecuados.....	182
Figura 152. Ubicación en la estructura de los miembros más esforzados por cada tipo.	182
Figura 153. Reacciones en la base de la estructura con la condición de carga muerta.....	185
Figura 154. Reacciones en la base de la estructura bajo la combinación D11.	186
Figura 155. Deflexiones verticales en -Y de una armadura con un claro entre columnas de 4.64 m, ubicada en la cubierta de segundo nivel bajo la combinación de carga de servicio S17, la más desfavorable.....	187
Figura 156. Deflexiones verticales en -Y de una armadura con claro de 2.32 m, ubicada en el entrepiso de 2do nivel colindante con cubierta de 1er nivel bajo la combinación de servicio S17, la más desfavorable....	187
Figura 157. Ubicación de los elementos con las deflexiones analizadas.	188
Figura 158. Ubicación de los nodos con los máximos desplazamientos laterales.....	190
Figura 159. Representación de las distorsiones angulares por entrepiso en un edificio.....	191
Figura 160. Ubicación de las columnas que se revisaron las distorsiones angulares, las cuales cuentan con los máximos desplazamientos nodales: la columna 1 sujeta a acciones sísmicas con la combinación S17 y la columna 2 con acciones de viento con la combinación S15, ambas bajo condiciones de servicio.	192
Figura 161. Modelación de los esfuerzos en la conexión universal H-1 en ANSYS. Vista lateral.	195
Figura 162. Modelación de los esfuerzos en la conexión universal H-1 en ANSYS. Vista isométrica.	195
Figura 163. Modelación de deformaciones en la conexión universal H-1 en ANSYS. Vista lateral.	198
Figura 164. Modelación de deformaciones en la conexión universal H-1 en ANSYS. Vista isométrica.....	198

NOTACIÓN

Estados de carga:

		Unidad
CM	Carga muerta.	[kg/m ²]
CV	Carga viva.	[kg/m ²]
CVi	Carga viva instantánea.	[kg/m ²]
V _x	Viento en dirección X.	[kg/m ²]
V _z	Viento en dirección Z.	[kg/m ²]
S _x	Sismo en dirección X.	[1/g]
S _z	Sismo en dirección Z.	[1/g]

Secciones:

		Unidad
A	Área transversal.	[cm ²]
b	Ancho.	[cm]
d	Peralte.	[cm]
I _x	Momento de inercia alrededor del eje X.	[cm ⁴]
I _y	Momento de inercia alrededor del eje Y.	[cm ⁴]
R	Radio de curvatura.	[cm]
r _x	Radio de giro en X.	[cm]
r _y	Radio de giro en Y.	[cm]
S _x	Módulo de sección elástico en X.	[cm ³]
S _y	Módulo de sección elástico en Y.	[cm ³]
t	Espesor.	[cm]
W	Peso por unidad de longitud.	[kg/m]
Z _x	Módulo de sección plástico en X.	[cm ³]
Z _y	Módulo de sección plástico en Y.	[cm ³]
Ȳ	Distancia al centroide.	[cm]

Diseño por viento:

		Unidad
A	Área tributaria de muros (mayor superficie de muro sin medio de sujeción).	[m ²]
A _{fc}	Área de afectación en cubierta.	[m ²]
A _{fm}	Área de afectación en muros.	[m ²]
b	Ancho de la superficie de la estructura en barlovento expuesta transversalmente al flujo del viento.	[m]
c	coeficiente de escala de rugosidad.	[-]
C _{pe}	Coeficiente de presión exterior.	[-]
d	Ancho de la superficie de la estructura paralela al flujo del viento.	[m]

d / b	Relación d / b .	[-]
e	Espaciamiento entre vigas secundarias.	[m]
F_{rz}	Factor de exposición local.	[-]
F_T	Factor de topografía local.	[-]
G	Factor de corrección por temperatura y altura sobre el nivel de mar.	[-]
h	Altura máxima.	[m]
h	Altura de módulo.	[m]
\bar{h}	Altura promedio de la cubierta hasta el suelo.	[m]
\bar{h} / d	Relación \bar{h} / d .	[-]
K_A	Factor de reducción.	[-]
K_L	Factor de presión local.	[-]
L	Longitud del módulo.	[m]
$P_e(\text{CS})$	Succión aplicada en cubierta de sotavento.	[kg/m ²]
$P_e(\text{MB})$	Presión aplicada en muro de barlovento.	[kg/m ²]
$P_e(\text{ML1})$	Succión aplicada en muro lateral 1.	[kg/m ²]
$P_e(\text{ML2})$	Succión aplicada en muro lateral 2.	[kg/m ²]
$P_e(\text{MS})$	Succión aplicada en muro sotavento.	[kg/m ²]
q_z	Presión dinámica de base del viento.	[kg/m ²]
s	Ancho de módulo.	[m]
T_R	Periodo de retorno.	[Años]
V_D	Velocidad de diseño del viento.	[km/h]
V_R	Velocidad regional del viento.	[km/h]
z	Altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño del viento.	[m]
α	Exponente que determina la velocidad del viento con la altura.	[-]
γ	Pendiente de la cubierta.	[%]
δ	Altura gradiente.	[m]
θ	Dirección del viento.	[°]
λ	Relación de esbeltez de la edificación.	[-]
τ	Temperatura ambiental promedio.	[°C]
Ω	Presión barométrica.	[mmHg]

Diseño por sismo:

Unidad

a_0	Aceleración máxima del terreno.	[1/g]
c	Coefficiente de aceleración sísmica (aceleración máxima espectral).	[1/g]
f	Frecuencia.	[Hz]
F_{BD}	Cortante basal dinámico.	[t]
F_{BDx}	Fuerza basal dinámica en dirección X.	[t]
F_{BDz}	Fuerza basal dinámica en dirección Z.	[t]
F_{BE}	Cortante basal estático.	[t]

FE_x	Factor de escala en dirección X.	[-]
FE_z	Factor de escala en dirección Z.	[-]
g	Aceleración debido a la fuerza de la gravedad.	[m/s^2]
Q	Factor de ductilidad de la estructura.	[-]
S_a	Espectro de diseño transparente.	[$1/g$]
T	Periodo.	[s]
\ddot{U}	Aceleración del suelo.	[m/s^2]
W_0	Concentración de la masa total de la estructura.	[t]
ζ_e	Amortiguamiento de la estructura.	[%]

Cálculo resistencia de placas:

Unidad

A_{Agujeros}	Área de los agujeros.	[cm^2]
A_e	Área neta efectiva.	[cm^2]
A_{gt}	Área bruta en tensión.	[cm^2]
A_{gv}	Área bruta en cortante (paralela a la aplicación de la fuerza).	[cm^2]
A_n	Área neta.	[cm^2]
A_{nt}	Área neta en tensión.	[cm^2]
A_{nv}	Área neta en cortante (paralela a la aplicación de la fuerza).	[cm^2]
d_b	Diámetro nominal del tornillo.	[cm]
f_u	Esfuerzo último del material.	[kg/cm^2]
f_y	Esfuerzo de fluencia del material.	[kg/cm^2]
L_c	Distancia libre, en la dirección de la fuerza, entre el borde de un agujero y el borde del agujero adyacente o del material.	[cm]
P_n	Tensión nominal.	[kg]
P_u	Resistencia de diseño.	[kg/cm^2]
t	Espesor de la placa.	[cm]
U	Factor de corrección que trata de corregir la mala distribución de la conexión debido a la mala homogeneidad del esfuerzo en el elemento.	[-]
U_{bs}	Coefficiente de reducción, para determinar la resistencia de ruptura por bloque de cortante.	[-]
ϕ	Factor de resistencia para aplastamiento (0.75).	[-]
ϕ_f	Factor de resistencia por fluencia (0.9).	[-]
ϕ_F	Factor de resistencia por fractura (0.75).	[-]

Cálculo resistencia de tornillos:

Unidad

A_b	Área de la sección transversal de la parte del vástago no-roscada.	[cm^2]
A_{bv}	Área nominal de la sección transversal de la parte del vástago no-roscada del tornillo la cual está sujeta a cortante.	[cm^2]
d_b	Diámetro del vástago del tornillo.	[cm]
F	Ancho de la cabeza del tornillo.	[cm]

F_n	Resistencia nominal de diseño a la tensión.	[kg/cm ²]
f_t	Resistencia del vástago del tornillo a cortante.	[kg/cm ²]
F_v	Resistencia a cortante.	[kg/cm ²]
G	Largo de la cabeza del tornillo.	[cm]
H	Espesor de la cabeza del tornillo.	[cm]
L	Longitud total del vástago del tornillo.	[cm]
L_{bv}	Longitud del tornillo expuesta al cortante.	[cm]
L_G	Longitud no-roscada del vástago del tornillo.	[cm]
L_T	Longitud roscada del vástago del tornillo.	[cm]
n	Número de tornillos.	[-]
R_n	Resistencia nominal a tensión del tornillo.	[kg/cm ²]
R_{nv}	Resistencia nominal a cortante del tornillo.	[kg]
R_u	Resistencia de diseño a tensión del tornillo.	[kg/cm ²]
R_{uv}	Resistencia de diseño a cortante del tornillo.	[kg]
φ_t	Factor de resistencia para falla por fluencia (0.9).	[-]
φ_v	Factor de resistencia para falla por cortante (0.75).	[-]

Cálculo resistencia de soldaduras:

Unidad

a	Ancho menor de la soldadura para obtener la longitud de la garganta efectiva (cuando los anchos no son iguales).	[cm]
A_s	Área efectiva del metal base.	[cm ²]
A_s	Área de la sección transversal de la placa.	[cm ²]
A_w	Área efectiva de la garganta.	[cm ²]
b	Ancho mayor de la soldadura para obtener la longitud de la garganta efectiva (cuando los anchos no son iguales).	[cm]
F_{Exx}	Resistencia del cordón de soldadura según la especificación del tipo de electrodo.	[kg/cm ²]
F_{MB}	Resistencia nominal del metal base (donde se aplica la soldadura).	[kg/cm ²]
F_{nw}	Resistencia nominal del material de aportación (la soldadura).	[kg/cm ²]
f_y	Esfuerzo de fluencia del metal base.	[kg/cm ²]
L	Longitud efectiva de la soldadura.	[cm]
L_1	Longitud 1.	[cm]
L_2	Longitud 2.	[cm]
R_n	Resistencia nominal de la soldadura.	[kg/cm ²]
R_{nPlaca}	Resistencia nominal de la placa (metal base).	[kg/cm ²]
R_u	Resistencia de diseño de la soldadura.	[kg/cm ²]
R_{uPlaca}	Resistencia de diseño de la placa (metal base).	[kg/cm ²]
R_{wl}	Resistencia nominal total de las soldaduras de filete longitudinales.	[kg/cm ²]
R_{wt}	Resistencia nominal total de las soldaduras de filete transversales.	[kg/cm ²]
t	Espesor del metal base.	[cm]

t_e	Garganta efectiva.	[cm]
w	Ancho de la soldadura para obtener la longitud de la garganta efectiva (cuando es igual a ambos lados).	[cm]
w	Ancho del filete de soldadura.	[cm]
θ	Ángulo del elemento soldado respecto al elemento de referencia.	[°]
ϕ_f	Factor de resistencia a fluencia (0.9).	[-]
ϕ_v	Factor de resistencia a cortante (0.75).	[-]

Cálculo de vibraciones:

Unidad

Δ_{MAX}	Deflexión máxima.	[cm]
Δ_{PISO}	Deflexión del piso.	[cm]
Δ_{VIGA}	Deflexión de la viga.	[cm]
a_0	Aceleración de entrepiso permisible debido a la vibración producida por la fuente excitadora, como porcentaje de la gravedad.	[1/g %]
a_p	Aceleración de entrepiso calculada debido a la vibración producida por la fuente excitadora, como porcentaje de la gravedad.	[1/g %]
$A_{TransPiso}$	Área transformada del piso (transversalmente).	[cm ²]
A_{Viga}	Área transversal de la viga secundaria.	[cm ²]
b	Ancho del entrepiso.	[cm]
b_e	Ancho efectivo del piso (espaciamiento entre vigas secundarias).	[cm]
b_{Piso}	Ancho del entrepiso.	[cm]
B_{PISO}	Ancho del entrepiso.	[m]
$b_{TransPiso}$	Ancho transformado del piso.	[cm]
d	Distancia que separa el centro de gravedad general (de la figura compuesta) con el centro de gravedad de la figura.	[cm]
e	Espaciamiento entre vigas secundarias.	[cm]
e	Número exponencial.	[-]
E_{DimM}	Módulo de elasticidad dinámico de la madera.	[kg/cm ²]
E_{PISO}	Módulo de elasticidad del piso.	[N/m ²]
E_s	Módulo de elasticidad del acero.	[kg/cm ²]
E_{VIGA}	Módulo de elasticidad de la viga.	[N/m ²]
F_n	Frecuencia fundamental del entrepiso (eigenfrecuencia).	[Hz]
h_{Piso}	Espesor del entrepiso.	[cm]
$I_{TransViga}$	Momento de inercia transformado de la sección compuesta de la viga y el piso.	[cm ⁴]
I_x	Momento de inercia del piso en alrededor del eje X.	[cm ⁴]
I_{Y1}	Momento de inercia de la figura de la sección transformada del piso.	[cm ⁴]
I_{Y2}	Momento de inercia de la figura compuesta por la sección de la viga.	[cm ⁴]
L	Longitud del entrepiso.	[cm]
L_{PISO}	Longitud del entrepiso.	[m]
M_{MODAL}	Masa modal del entrepiso.	[kg]

M_{TOTAL}	Distribución de masa en el entrepiso.	[kg]
n	Relación de módulos (entre el módulo de elasticidad dinámico de la madera y el módulo de elasticidad del acero).	[-]
P_o	Amplitud.	[kg]
Q	Masa de la fuente excitadora (individuo caminando).	[kg]
R	Factor de reducción.	[-]
t	Espesor del entrepiso.	[cm]
T	Periodo fundamental.	[s]
w	Carga muerta más una participación de carga viva.	[kg/m ²]
W_{PISO}	Carga muerta más una participación de carga viva del piso.	[kg/m ²]
$Y_{C.G.}$	Centro de gravedad general de la figura compuesta.	[cm]
$Y_{C.G.Piso}$	Distancia que separa el centro de gravedad del piso con el eje de referencia.	[cm]
$Y_{C.G.Viga}$	Distancia que separa el centro de gravedad del de la viga con el eje de referencia.	[cm]
Y_{piso}	Distancia entre el centro de gravedad general (de la figura compuesta) con el eje de referencia.	[cm]
β	Amortiguamiento del sistema de entrepiso.	[%]
π	Número Pi (3.14159...).	[-]

Cálculos de la conexión universal H-1 en ANSYS:

Unidad

E	Módulo de elasticidad del acero.	[N/m ²]
M_{22}	Momento alrededor del eje Z.	[N*m]
M_{33}	Momento alrededor del eje X.	[N*m]
N_1	Carga axial en el elemento (tensión o compresión).	[N]
ν	Módulo de Poisson del acero.	[N/m ³]
V_2	Fuerza cortante del elemento alrededor del eje X del elemento.	[N]
V_3	Fuerza cortante del elemento alrededor del eje Z del elemento.	[N]

Distorsiones angulares:

Unidad

Δh_i	Diferencia de alturas entre los entrepisos contiguos.	[cm]
$D.A.$	Distorsión angular.	[-]
H	Altura total desde el nivel de desplante de la estructura.	[cm]
h_i	Altura del piso en cuestión.	[cm]
R	Relación entre la distorsión angular calculada y distorsión angular permisible.	[-]
δ_i	Desplazamiento horizontal total del entrepiso en cuestión.	[cm]
δ_{i+1}	Desplazamiento horizontal total del entrepiso superior respecto al entrepiso en cuestión.	[cm]
$\delta_{i+1} - \delta_i$	Desplazamiento horizontal relativo en cuestión.	[cm]

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas la construcción de viviendas modulares y prefabricadas ha tenido un gran auge en algunas partes del mundo. Se han creado innovadores prototipos que han resuelto diversas necesidades, algunos destacan por sus bajos costos, otros por la capacidad de aprovechar las propiedades de sus materiales, su disponibilidad en la región o por su durabilidad, mientras que otros, por su habilidad en ser transportados y su facilidad de montar y desmontar su estructura.

Dando continuidad a dicha tendencia internacional y a la motivación de la competencia universitaria «*Solar Decathlon*» (USDE, 2019) sobre arquitectura e ingeniería en viviendas prefabricadas y sustentables, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (FI-UAQ) innovó, diseñó y construyó en 2017 un prototipo de vivienda llamada «*Casa Solar Experimental*» (CSE) (Álvarez, 2017), la cual cuenta con módulos prefabricados de acero y un conjunto de elementos sustentables, entre ellos, paneles fotovoltaicos para la generación de electricidad mediante la radiación solar.

Si bien la CSE es una estructura versátil, innovadora, sustentable y moderna; es preciso un rediseño de sus elementos estructurales para que la vivienda pueda cumplir con los aspectos de la competencia «*Solar Decathlon*». Para ello, se requiere que la estructura desmontada de la vivienda pueda ser transportada con practicidad en un contenedor de carga marítimo de tamaño estándar, y que a través de sus piezas prefabricadas sea construida e instalada en pocos días de manera totalmente operativa en el lugar deseado (USDE, 2019). El tamaño estándar internacional de un contenedor de carga (TEU) es 40 pies de largo (609.6 cm) por 8 pies de ancho (243.84 cm) y 8.5 pies de alto (259.08 cm).

Conforme a lo anterior, se concibió y diseñó una conexión universal para que la estructura modular pueda ser montada en menor tiempo que con la estructura actual de la CSE, ya que ésta, al contar con una diversidad de conexiones en los nodos columna-trabe, hace más compleja y tardada su instalación, así como la fabricación de algunas piezas.

Con la intención de mejorar el prototipo de la CSE, este trabajo se enfoca en crear una alternativa diferente de estructuración; no sólo para cumplir con los requisitos del «*Solar Decathlon*», sino también con los reglamentos vigentes respectivos de construcción; con la característica de multi-adaptabilidad que reduce el costo y el tiempo de fabricación, montaje e instalación de los diversos elementos que conforman la vivienda, derivando en lo siguiente:

- Estructura ligera: Resulta en menores costos de material, fabricación y transporte, así como un transporte más práctico y un montaje más fácil.
- Sistema de muros prefabricados: Hace que su transporte sea más práctico y su instalación más rápida que los muros que cuenta actualmente la CSE, que debido a su material actual requieren más tiempo y personal para su instalación.
- Conexión universal (H-1): Hace que la fabricación de sus piezas y su instalación sea más rápida y mucho más sencilla, de tal manera que a los módulos se le brinda la capacidad de ser multi-adaptables de forma más versátil que la CSE. Además, cuenta con 63 configuraciones básicas en las que los elementos de la estructura pueden combinarse para conectarse a través de ésta.
- Sistema modular multi-adaptable (M-10): Hace posible que la instalación de los módulos sea muy versátil, desde la instalación de piezas por separado o en conjunto, así como la incorporación de módulos completos a la vivienda en un sólo movimiento. También es posible crear miles de combinaciones en las que un único módulo puede ser adaptable con otros, creando configuraciones casi ilimitadas en las que un usuario pudiera readaptar su hogar de manera sencilla cuando éste lo desee.

En el siguiente capítulo se abordan diversos antecedentes mundiales sobre los avances en las investigaciones y proyectos en la creación de conexiones universales y sistemas modulares para edificaciones, de esta manera se pone en contexto el aporte de este trabajo de investigación que es: poder construir estructuras modulares de manera más rápida y eficiente, con una cantidad de posibles combinaciones modulares casi ilimitada.

En el capítulo 2 se abordan los avances en la construcción de viviendas modulares en el mundo a través de la historia, y las investigaciones y proyectos de la FI-UAQ en este rubro; también se presentan distintos tipos de conexiones universales y patentes; y la implementación de sistemas modulares con conexiones universales en la construcción de edificaciones, con las cuales, se construyen en tiempos excepcionalmente cortos.

En el capítulo 3 se presenta la hipótesis; y en el capítulo 4, se presenta el objetivo general y los objetivos particulares de este trabajo de investigación.

En el capítulo 5 se muestra la metodología mediante la cual se realizó este trabajo de investigación, de lo general a lo particular, tomando en cuenta cómo se diseñó y se concibió la conexión universal y el sistema modular multi-adaptable, así como el cálculo y diseño estructural de la vivienda, los cálculos de viento, de sismo y el análisis de vibraciones de entrepiso; y, por último, la metodología para el cálculo de la conexión universal en ANSYS.

En el capítulo 6 se presenta el desarrollo de la investigación, el cual aborda distintos puntos, como el proceso del diseño y concepción de la conexión universal y del sistema modular propuesto, así como el acoplamiento de este sistema modular a la configuración de la CSE. Para ello, se realizó el cálculo y diseño estructural de la vivienda contemplando las cargas gravitacionales, el diseño por viento, el diseño sísmico y un análisis de vibraciones de entrepiso, también se realizaron cálculos de resistencia de los diversos elementos de la estructura en cuanto al diseño de soldaduras, placas y tornillos. Finalmente, en este capítulo también se aborda el cálculo de la conexión universal propuesta en ANSYS tomando en cuenta los esfuerzos a los cuales está sometida, obtenidos del cálculo estructural.

En el capítulo 7 se presentan los resultados del cálculo y diseño estructural de la vivienda, y el de la modelación de la conexión universal en ANSYS, así como los alcances que tienen los 2 productos de esta investigación: la conexión universal H-1 y el sistema modular M-10.

Finalmente, en el capítulo 8 se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación, mencionando el gran aporte que representa la implementación de los productos de la investigación para la construcción de estructuras modulares.

1.1 Justificación

La constante evolución en la vivienda ha provocado que se busquen nuevas alternativas que involucren la construcción de estructuras prefabricadas capaces de ser edificadas de manera rápida, eficiente y segura.

Al diseñar una conexión metálica universal para un prototipo de vivienda prefabricada, modular y desmontable, se reduce el número de conexiones posibles necesarias en el acoplamiento de los elementos modulares, haciendo que el ensamblaje de los componentes prefabricados sea adaptable a módulos adyacentes, así como práctico, eficiente y seguro, disminuyendo posibles errores, tiempo y costos en su fabricación e instalación.

Para impulsar la reproducción de viviendas prefabricadas es necesario que tanto la fabricación de sus piezas como la instalación de las mismas sea lo más práctico y eficiente posible, lográndose a través del acoplamiento de una conexión metálica universal; ya que, en vez de fabricar una gran variedad de conexiones distintas para una estructura, se construye sólo una, reproduciéndose las veces que sea necesario, la cual cuenta con diferentes configuraciones de adaptabilidad según el lugar de la estructura donde se necesite colocar.

La vivienda debe cumplir con todos los requerimientos necesarios por los reglamentos de construcción vigente, y la CSE al no satisfacerlos por completo, se requiere un nuevo diseño de la estructura que los cumpla y actualice.

Siguiendo con la motivación de participar en la competencia internacional «*Solar Decathlon*», se requiere que la vivienda sea fácil y ligera de transportar, así como de un montaje práctico y rápido para que esta edificación pueda ser construida operativamente en un tiempo máximo de 12 días (USDE, 2019).

La necesidad de cuidar el medio ambiente ha orillado a que la vivienda cuente con tecnología sustentable, incorporando diversos elementos eco-técnicos.

El prototipo de vivienda debe ser una alternativa de vivienda para la sociedad, satisfaciendo algunas características para un cierto sector de mercado, el cual cuenta la

tendencia creciente hacia las viviendas prefabricadas y responsables con el ambiente, con la implementación de sistemas de eco-técnicos tales como paneles de generación de energía solar, calentador solar de agua potable y baño seco, así como muros y techos térmicos.

2 ANTECEDENTES

Las estructuras modulares y prefabricadas han representado una alternativa viable para la construcción de viviendas, las cuales han sido construidas principalmente de madera, aunque en las últimas décadas, la utilización de estructuras de acero ha ido en auge debido a las ventajas que tiene dicho material en cuanto a su durabilidad y resistencia en comparación con otros, así como su practicidad en el transporte y montaje de las estructuras.

Además, las conexiones universales han presentado una gran adaptabilidad a diversos tipos de estructuras para que éstas puedan ser dispuestas de una forma más variada y a la vez conectadas de manera más sencilla que con las conexiones convencionales.

Las casas modulares prefabricadas VIMOB (figura 1) partieron de la necesidad de crear hogares en sitios de difícil acceso ajustándose a las necesidades del cliente, las cuales se fabrican bajo pedido, se transportan desarmadas y se montan en el sitio donde se desee ubicar la vivienda (Adfer, 2015).



Figura 1. Vivienda modular prefabricada de acero y cubierta de madera de VIMOC (Adfer, 2015).

2.1 Viviendas prefabricadas y modulares

Las viviendas prefabricadas han sido creadas bajo la necesidad de construir hogares en sitios diferentes a su origen, propiciando su transporte en lugar de construir «*in-situ*» todo; pero debido a que no siempre es posible mover la vivienda completa, se ideó un sistema prefabricado de piezas para transportar y para ser ensambladas en el sitio donde se desea instalar la vivienda. En muchos casos este sistema de prefabricados proveyó estructuras modulares que incorporan un conjunto de elementos más fáciles de instalar.

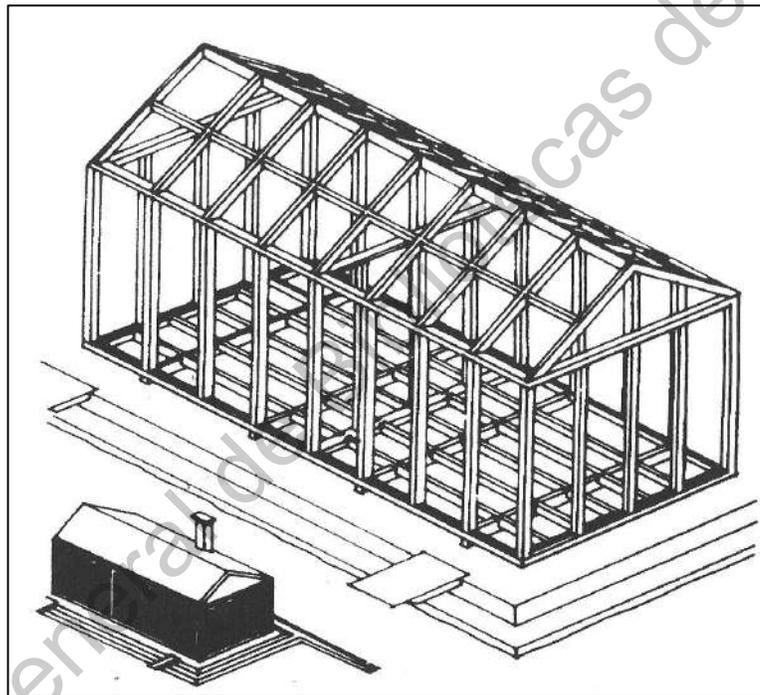


Figura 2. Sistema prefabricado de vivienda colonial portátil para migrantes (Smith, 2009).

En 1820 en la Gran Bretaña se ideó un sistema prefabricado de vivienda colonial portátil (figura 2) para inmigrantes que se instalaron en Sudáfrica, el cual consistía en un armazón de madera con un sistema de relleno. La estructura principal consistía en postes de madera agujereados, los cuales encajaban con paneles de madera que se incorporaban a la vivienda para crear los muros, el piso y el techo (Smith, 2009).



Figura 3. Sistema prefabricado de vivienda de Bellhouse manufacturada en Manchester, Inglaterra y construida en Melbourne, Australia en 1854 (NTA, 2019).

La compañía inglesa Eagle Foundry de Edward Taylor Bellhouse ideó un sistema prefabricado de vivienda (figura 3), el cual utilizaba láminas horizontales que encajaban en columnas de hierro fundido conformadas para ajustarse a la curva de corrugación de las láminas. Este sistema fue creado para abastecer de vivienda a los migrantes producto de la fiebre de oro en California, Estados Unidos de América y posteriormente por la fiebre de oro australiana (NTA, 2019).

En Nueva York, Estados Unidos de América, se ideó la casa Aluminaire (figura 4) que fue un concepto experimental que mostraba los últimos materiales tecnológicos de la época para la construcción de viviendas fáciles y económicas de construir.

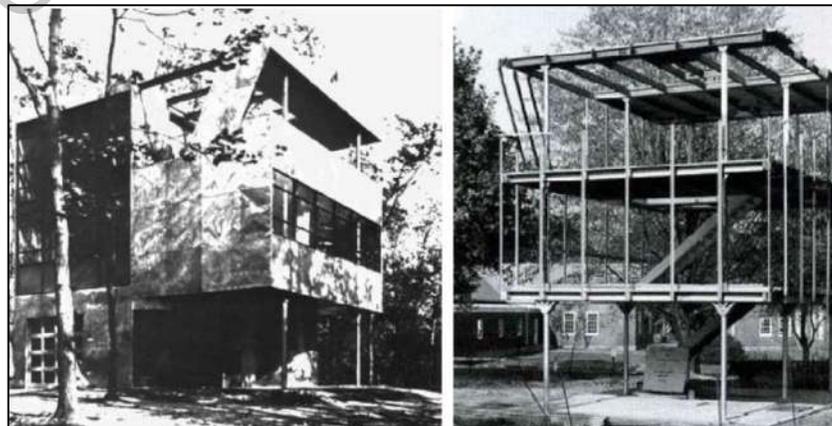


Figura 4. Vivienda Aluminaire prefabricada de acero en Nueva York en 1931 (Ovando 2015).

En 1917 en los países escandinavos se vivía una gran crisis de vivienda, por lo que se pensó en un método de fabricación de casas que fuese rápido y barato de construir a través de prefabricados hechos principalmente de madera. En 1930 había más de 20 compañías que se dedicaban a la construcción de vivienda prefabricada. Pasada la Segunda Guerra Mundial cerca de 70 empresas construían la mitad de la vivienda en la región con más de 17,500 unidades en 1947. En 1980 el 85% de las viviendas construidas eran prefabricadas (Smith, 2009). IKEA fue una de las compañías suecas con mayor auge en viviendas prefabricadas, siendo el sistema «Blok Lock» de los más exitosos (figura 5).



Figura 5. Sistema prefabricado de vivienda «Blok Lock» de la compañía IKEA (Smith, 2009).

En 1923 el Gran terremoto de Kantō destruyó la ciudad de Yokohama, Japón, mató a más de 100 mil personas y causó un gran daño a la infraestructura en muchas ciudades de ese país, dejando sin hogar a miles de familias. Con la crisis de hogares se optó por una visión de vivienda rápida de construir y que fuese duradera, por lo que se crearon prototipos de viviendas modulares. En 1950 la compañía Toyota creó una división para la construcción de casas prefabricadas para sus trabajadores. En 1975 estas viviendas (figura 6) fueron de acceso al público, teniendo la posibilidad de poseer un hogar de manera rápida (Smith, 2009).



Figura 6. Línea de ensamblaje de viviendas prefabricadas de la compañía Toyota (Smith, 2009).

En 1967 en Montreal, Canadá se construyó el proyecto «*Habitat 67*» (figuras 7 y 8), el cual se erigió para la Exposición Universal de tal fecha. Este proyecto consiste en un conjunto habitacional que cuenta con 146 viviendas compuestas por módulos prefabricados de concreto dispuestos de una manera particular que alcanzan hasta 12 niveles, el cual se construyó en un corto tiempo debido al sistema modular empleado (García-Badell, 2017).



Figura 7. Construcción en 1967 del proyecto «*Habitat 67*» de módulos prefabricados (Speaman, 1967).



Figura 8. Proyecto «*Habitat 67*» en la actualidad (데반이네, 2018).

En Plymouth, Reino Unido, se realizó un proyecto de remodelación utilizando módulos prefabricados (figura 9) para dar alojamiento a estudiantes, el cual consistió en colocar 28 habitaciones modulares completamente equipadas en el techo de un antiguo edificio de oficinas de 4 niveles. Dichos módulos utilizan un sistema de muros cortina patentado que es fácil de construir (Lawson, 2006).

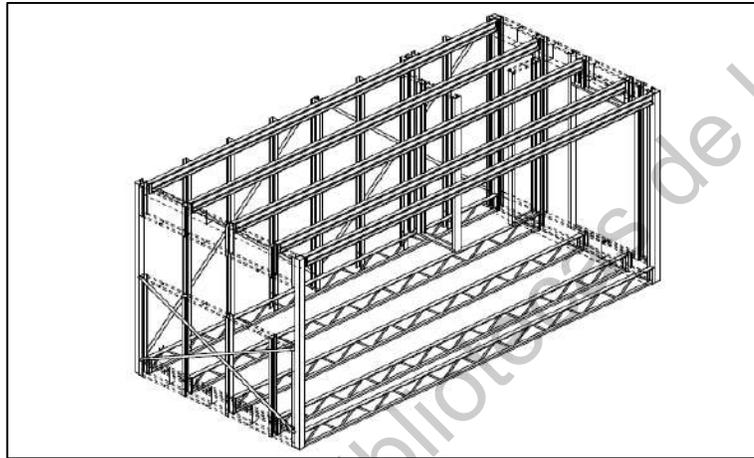


Figura 9. Sistema de modulo (Lawson, 2006).

En 2015, académicos del Departamento de Ingeniería Arquitectónica de la Universidad de Seúl, en Seúl, Corea del Sur, realizaron una investigación sobre la capacidad rotacional en uniones viga-columna en los marcos modulares (figura 10) para vivienda, donde estudiaron su comportamiento ante acciones laterales cíclicas (Kyung-Suk, 2015).

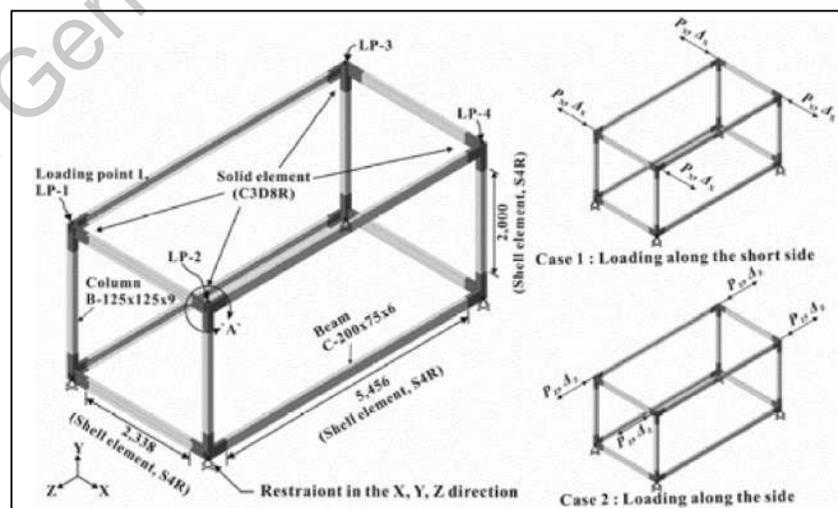


Figura 10. Sistema modular prefabricado (Kyung-Suk, 2015).

El proyecto «*Murray Grove*» en Londres, Inglaterra, contempló la construcción de un edificio de departamentos (figura 11) a través de un conjunto de contenedores marítimos, los cuales conforman viviendas (Lawson, 2009).



Figura 11. Instalación de los módulos contenedores en Londres, Inglaterra. (Lawson, 2009).

En 1970 la empresa japonesa Sekisui Heim, creó un sistema modular de vivienda prefabricada (figura 12) innovador y muy rápido de construir, comprometiéndose a entregarla al cliente en un plazo no mayor a 2 meses a partir de la fecha de firma del contrato, por lo que este sistema fue muy atractivo para los clientes ya que podían disponer de una vivienda en muy poco tiempo (Ovando, 2015).

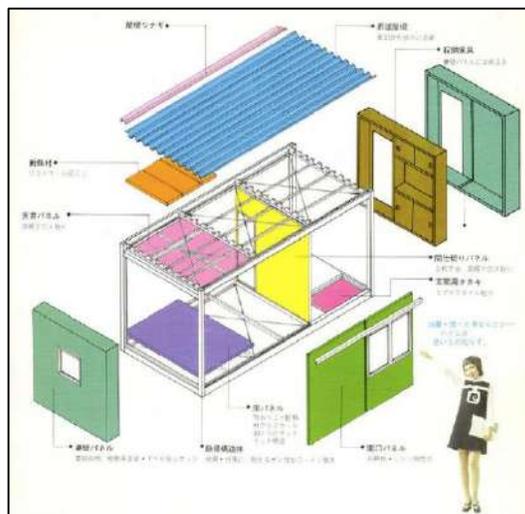


Figura 12. Módulo prefabricado de Sekisui Heim (Ovando, 2015).

El desarrollo de las estructuras modulares a través de las décadas, ha conducido a que dichos módulos sean cada vez más fáciles de instalar y con la menor intervención en el lugar donde se desean situar, lo que ha orillado a que sean casi totalmente construidos en fábrica y en muchos casos con las instalaciones ya acondicionadas, como es el caso del «*Nuevo Sistema Modular*» (figura 13 y 14) donde el 90% de la construcción se realiza en sus instalaciones de fábrica para luego transportar los módulos y colocarlos de manera sencilla en el lugar (NSM, 2016).



Figura 13. Sistema modular prefabricado (NSM-1, 2016).

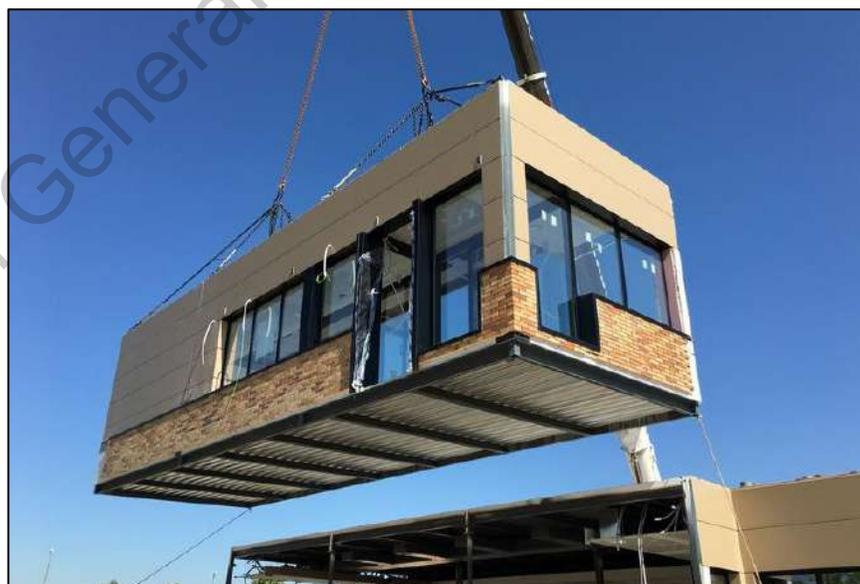


Figura 14. Izamiento de un módulo prefabricado para ser instalado en Murcia, España (NSM-2, 2016).

2.1.1 Solar Decathlon

En 2002 el Departamento de Energía y el Laboratorio de Energías Renovables de Estados Unidos de América crearon un concurso internacional sobre arquitectura e ingeniería llamado «*Solar Decathlon*», donde diversas universidades del mundo participan con sus estudiantes para crear la mejor edificación (enfocada principalmente a vivienda) de acuerdo a las bases del concurso con un enfoque sustentable. Dicha competencia cuenta con 2 categorías: «*Design Challenge*» y «*Build Challenge*» (USDE, 2019).

El «*Design Challenge*» se realiza de manera anual y los participantes deben crear un diseño de una edificación comercial o de vivienda, eligiendo una entre 6 tipos de divisiones donde ellos desean competir: unifamiliar suburbana, unifamiliar urbana, vivienda adjunta, multifamiliar de uso mixto, escuela primaria o edificio de oficinas.

El «*Build Challenge*» se realiza de manera bianual y los participantes pueden elegir entre dos divisiones: el «*National Showcase*» o «*Local Build*», en donde sólo se crean diseños de vivienda. En el «*National Showcase*» se debe crear un diseño de vivienda prefabricado que pueda ser transportado a través del sistema de contenedores marítimos estandarizados (TEU's) y construido en el lugar del evento en un tiempo máximo de 12 días. En el «*Local Build*» se debe crear una vivienda para ser exhibida localmente en la comunidad.

Tanto en el «*Design Challenge*» y «*Build Challenge*», se involucra la evaluación 10 aspectos que deben cumplir los diseños, los cuales son: rendimiento energético; ingeniería; factibilidad financiera y asequibilidad; resiliencia; arquitectura; funcionamiento; potencial de mercado; confort y calidad ambiental; innovación; y presentación (USDE, 2019).

La categoría del «*Build Challenge*» ha demostrado ser una con grandes retos de construcción, puesto que se erigen viviendas prefabricadas en poco tiempo y de manera totalmente funcional (figura 15 y 16).



Figura 15. Diseño de vivienda participante en el «Solar Decathlon» del equipo suizo en la categoría «Build Challenge» (Schroeder, 2017).



Figura 16. Lugar del evento del «Solar Decathlon» en la categoría «Build Challenge» durante la etapa de construcción de las viviendas (Kelsey, 2015).

2.1.2 Prototipos de viviendas modulares y prefabricadas FI-UAQ

Siguiendo con la motivación del «*Solar Decathlon*», en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (FI-UAQ), se realizaron 2 prototipos de viviendas modulares: una de un nivel, donde se construyeron y probaron paneles prefabricados; y otra vivienda de 2 niveles, la cual se llevó a cabo su construcción.

2.1.2.1 Prototipo de 1 nivel

En 2016, Escalante Valdivia terminó el diseño del primer prototipo de vivienda modular (figura 17), el cual contaba con un nivel, como resultado de un proyecto de investigación iniciado en 2015 sobre la implementación de un sistema estructural modular hecho a base de perfiles de acero para una vivienda prefabricada y desmontable. En dicho proyecto se llevaron a cabo pruebas experimentales (figuras 19 y 20) de los módulos prefabricados que fueron diseñados.

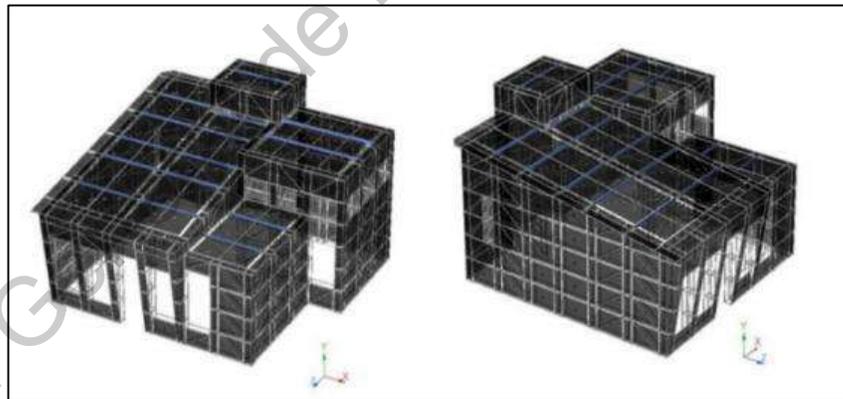


Figura 17. Prototipo de vivienda de 1 nivel a base paneles con marcos de acero (Escalante, 2017).

Para ejemplificar la versatilidad de los módulos que conformaron la estructura propuesta por Escalante, se construyó un panel tipo de la estructura (figura 18), compuesto por una configuración plana de 2.00 m de ancho por 3.60 de altura, en la que se integran 6 marcos dobles de acero de 1.00 m de ancho por 0.60 m de alto con elementos diagonales como contra-vientos concéntricos para mayor rigidez del panel estructural (Escalante, 2017).

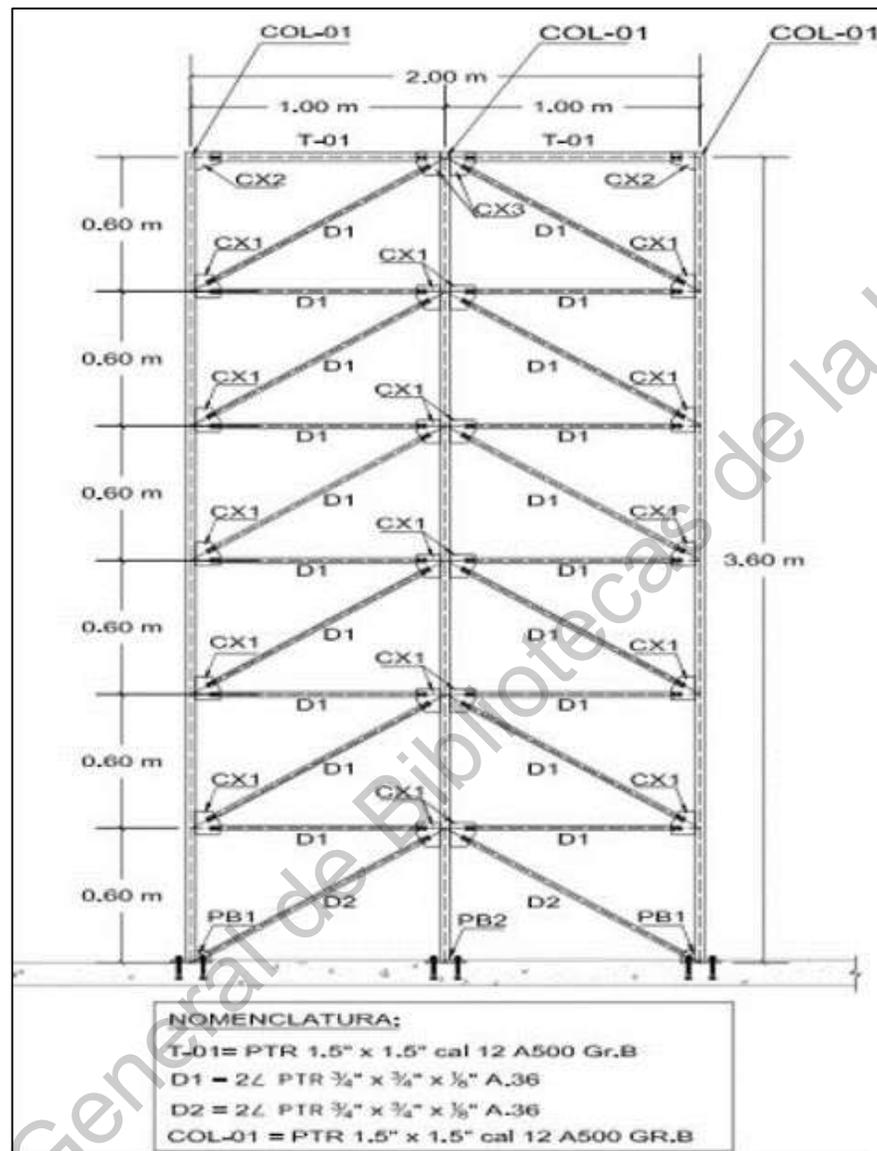


Figura 18. Estructura del panel propuesto para el prototipo de vivienda de 1 nivel (Escalante, 2017).

Los elementos exteriores alrededor del marco, así como la columna central de los paneles eran perfiles tipo PTR 1.5" x 1.5" con acero A500, grado B; los elementos tanto horizontales como diagonales estaban compuestos por perfiles tipo PTR 3/4" x 3/4" x 1/8" con acero A36; unidos por placas en los nodos de manera atornillada; anclándose la estructura a un perfil en su base (Escalante, 2017).



Figura 19. Pruebas experimentales realizadas a la estructura del panel (Escalante, 2017).



Figura 20. Marco de acero del módulo deformado luego de aplicarse carga (Escalante, 2017).

2.1.2.2 Prototipo de 2 niveles: Casa Solar Experimental (CSE)

Posteriormente en 2017 y producto de un continuo mejoramiento manera multidisciplinaria en el desarrollo de viviendas modulares, prefabricadas y sustentables, la FI-UAQ diseñó y construyó la CSE (figuras 21, 22 y 23), la cual es una vivienda de 2 niveles construida a base de estructura metálica con elementos prefabricados que conforman módulos. Además, la CSE cuenta con elementos sustentables para el cuidado del medio ambiente que son: paneles fotovoltaicos para la generación de electricidad mediante la radiación solar, calentador solar de agua potable, baño seco y sistemas inteligentes que monitorean el consumo de agua potable y electricidad de la vivienda.



Figura 21. «Casa Solar Experimental» construida en las instalaciones de la FI-UAQ
(foto obtenida por el autor, 2019).

Cabe señalar que la CSE se diseñó con 14 módulos (figura 24), pero se construyó con 11, excluyendo 3 módulos que originalmente estaban contemplados en la planta alta. En su configuración inicial contaba con 2 baños completos, sala, comedor, cocina y terraza (figura 25); sus módulos son a base de marcos de PTR, unidos con montenes y tensores (figura 26).



Figura 22. Vista del frente de la CSE de noche (foto obtenida por el autor, 2019).



Figura 23. Vista posterior de la CSE (foto obtenida por el autor, 2019).



Figura 24. Estructura del modelo original de la CSE con 14 módulos (Álvarez, 2017).

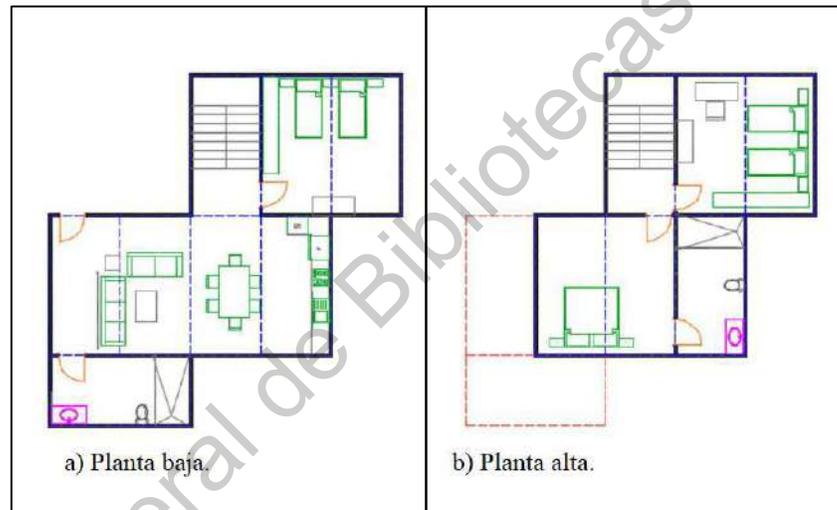


Figura 25. Configuración original de la CSE. a) Planta baja. b) Planta alta (Álvarez, 2017).

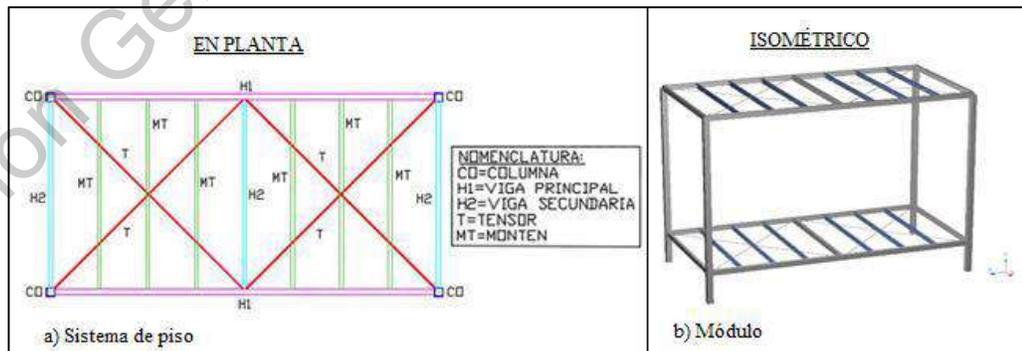


Figura 26. Sistema modular de la CSE compuesto con perfiles de acero estructural. a) Sistema de entrepiso.
b) Módulo compuesto por 4 columnas y 2 sistemas de entrepiso (Álvarez, 2017).

2.2 Conexiones estructurales

Una conexión estructural es una combinación de elementos estructurales y miembros de unión que se ligan entre sí a través del contacto para transmitir esfuerzos entre sus miembros. Pueden ser elementos soldados, atornillados o mixtos, y la transmisión de sus esfuerzos dependerá de la posición y forma en que se ligen entre sí.

2.2.1 Conexiones no-universales

Las conexiones no-universales son aquellas que se incorporan en las estructuras pero que son diseñadas sólo para uniones específicas de elementos, y éstas no pueden implementarse de manera generalizada en otras ubicaciones en la estructura debido a que no cumplen con los requisitos de resistencia y/o geometría para poder incorporarse en un nodo. Un árbol de conexiones ilustra representativamente una serie de diferentes tipos de conexiones que se pueden tener en una estructura (figura 27).



Figura 27. Árbol de conexiones del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Querétaro (CICQ) que ilustra la variedad de algunas conexiones distintas que se pueden tener en una estructura (Rodríguez, 2019).

2.2.1.1 Conexiones columna-trabe de la Casa Solar Experimental

La CSE presenta una variedad de conexiones no-universales, y específicamente en el caso de los nodos columna-trabe cuenta con 5 tipos de conexión (figuras 28, 29 y 30); pero al ser soldadas a las columnas a un cierto espaciamiento de altura para la incorporación de las traves (debido a que existen columnas para un nivel y columnas para 2 niveles), se crean 9 configuraciones de columna con distintas disposiciones de sus conexiones que se soldan.

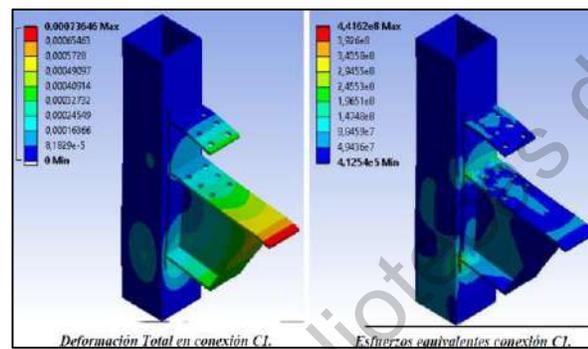


Figura 28. Conexión en un nodo de una columna que intersecta con una trabe principal (García, 2017).

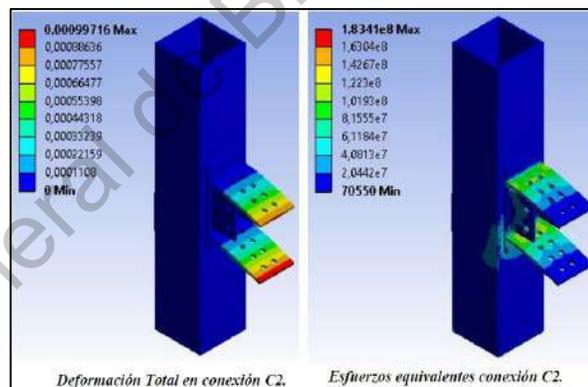


Figura 29. Conexión en un nodo de una columna que intersecta con una trabe secundaria (García, 2017).

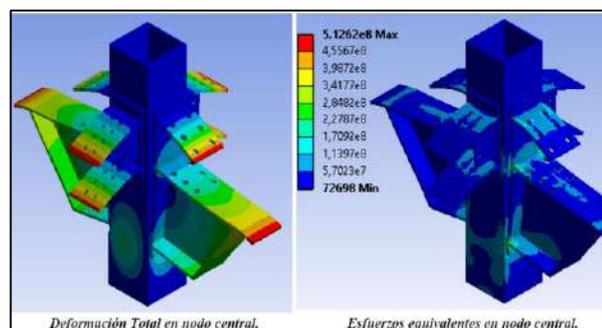


Figura 30. Conexión en un nodo de una columna que intersecta con 4 traves principales (García, 2017).

2.2.2 Conexiones universales

Las conexiones universales son aquellas que incorporan la característica de ser multi-adaptables a los diversos elementos que conforman la estructura, proveyendo una gran versatilidad debido a que pueden integrarse en diversas ubicaciones de la estructura, no sólo cumpliendo requisitos geométricos, sino también de resistencia, soportando y transfiriendo los esfuerzos de los distintos miembros que se unen en dicho nodo.

2.2.2.1 Prototipos de conexiones universales

En 2009 la oficina de patentes y marcas de Estados Unidos de América publicó una innovación que involucra una conexión universal para estructura tipo malla espacial, la cual conecta miembros horizontales y 4 miembros inclinados. La patente (figura 31) conforma elementos metálicos con sección cuadrada, elementos tipo-I y elementos con sección de doble ángulo. La innovación fue producto de Reynolds et. al., y asignada a Gossmer Space Frames (USPTO, 2009).

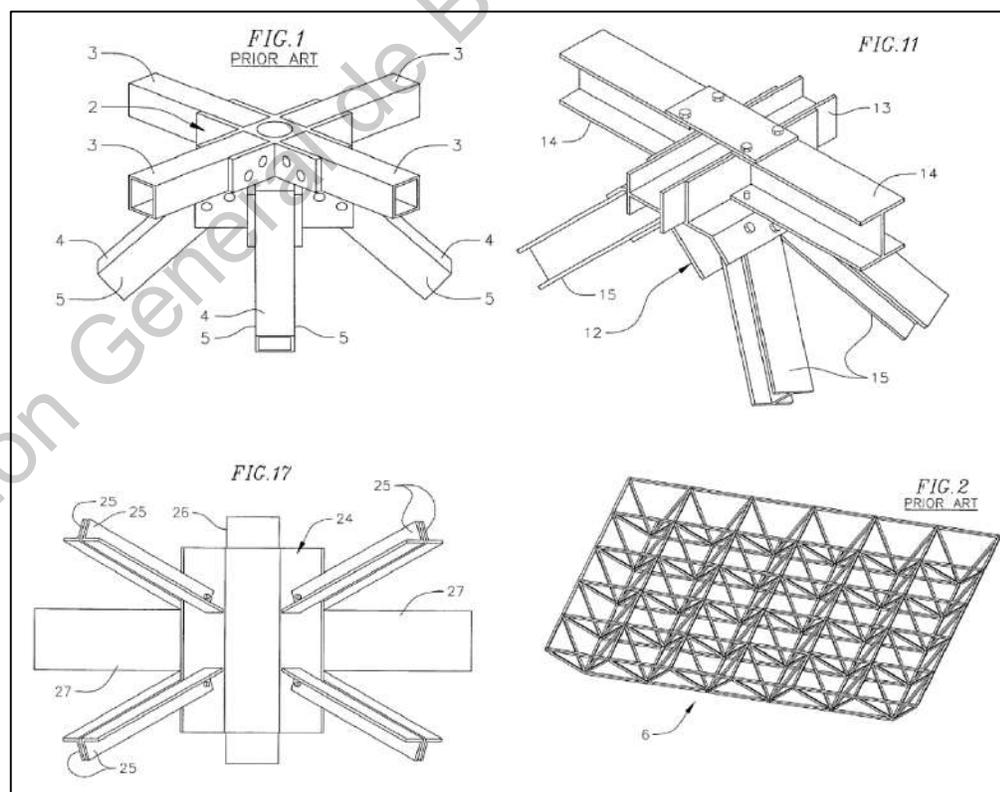


Figura 31. Patente de una conexión universal para una estructura tipo malla espacial (USPTO, 2009).

En un artículo publicado en 2009 por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, investigadores de la Universidad Metropolitana en la Ciudad de México exponen que diseñaron y construyeron una conexión universal articulada para un prototipo de armadura, el cual puede utilizarse en estructuras de puentes y cubiertas tipo malla espacial (figuras 32 y 33). Dicho conector tiene la facultad de ser multi-adaptable a los elementos de la armadura donde se pueden acoplar hasta 8 elementos barras. Dicha investigación tuvo como objetivo la enseñanza en la determinación de las propiedades dinámicas de la estructura de forma experimental (Ruiz, 2009).



Figura 32. Conector universal donde se unen hasta 8 elementos de la armadura (Ruiz, 2009).

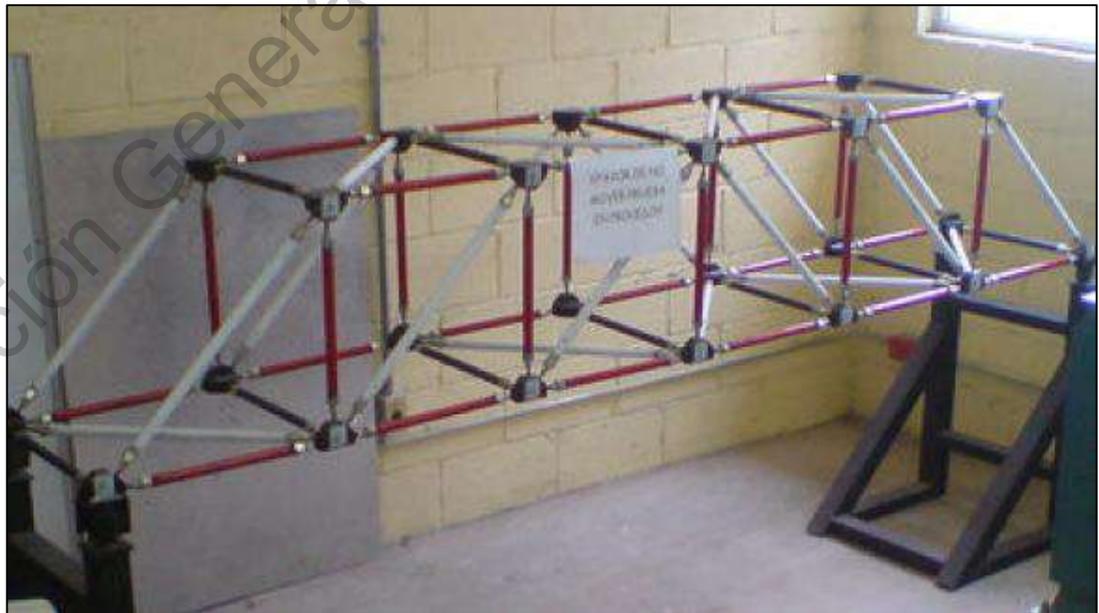


Figura 33. Armadura en forma de puente con conectores universales (Ruiz, 2009).

En 2014 la oficina de patentes y marcas de Estados Unidos de América publicó una innovación que involucra una conexión universal esférica para estructuras tipo malla espacial, la cual puede adaptarse de manera múltiple a diversos elementos en la estructura para crear estructuras con geometrías diversas (figura 34). La invención fue realizada por Teruo Matsuzawa et. al. y asignada para Japan Advance Institute of Science and Technology (USPTO, 2014).

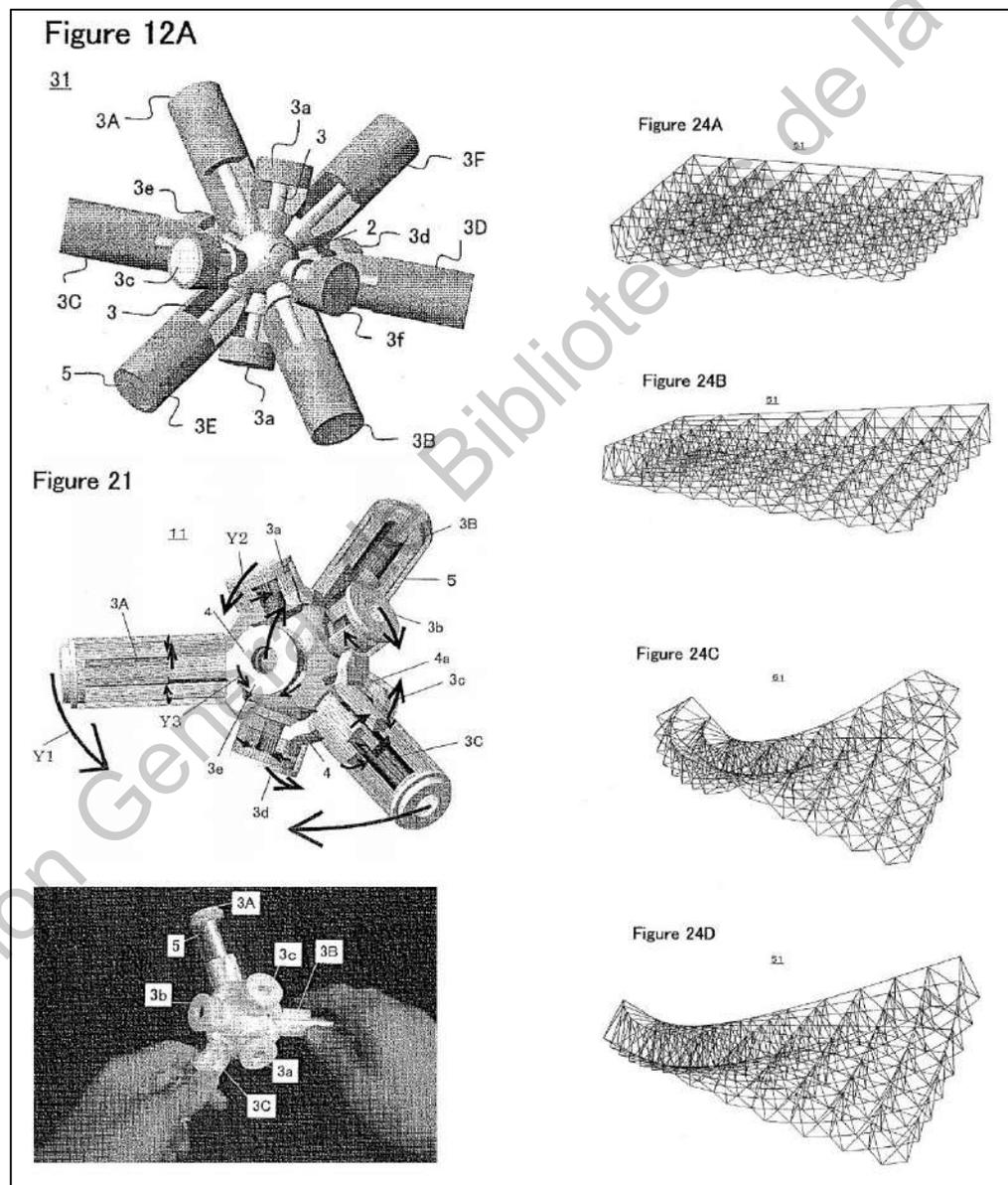


Figura 34. Patente de conexión universal circular para estructuras tipo malla espacial (USPTO, 2014).

En 1999 la oficina de patentes y marcas de Estados Unidos de América publicó una innovación que involucra una conexión universal, en la cual pueden conectar de manera múltiple distintos elementos para formar una estructura tipo domo geodésico (figura 35). Los miembros se adaptan a la conexión de sección circular a través de un sistema de fijación interno multi-lateral para poder conectar a sus elementos en diferentes ángulos. Fue inventada por Ernest G. Aiken (USPTO, 1999).

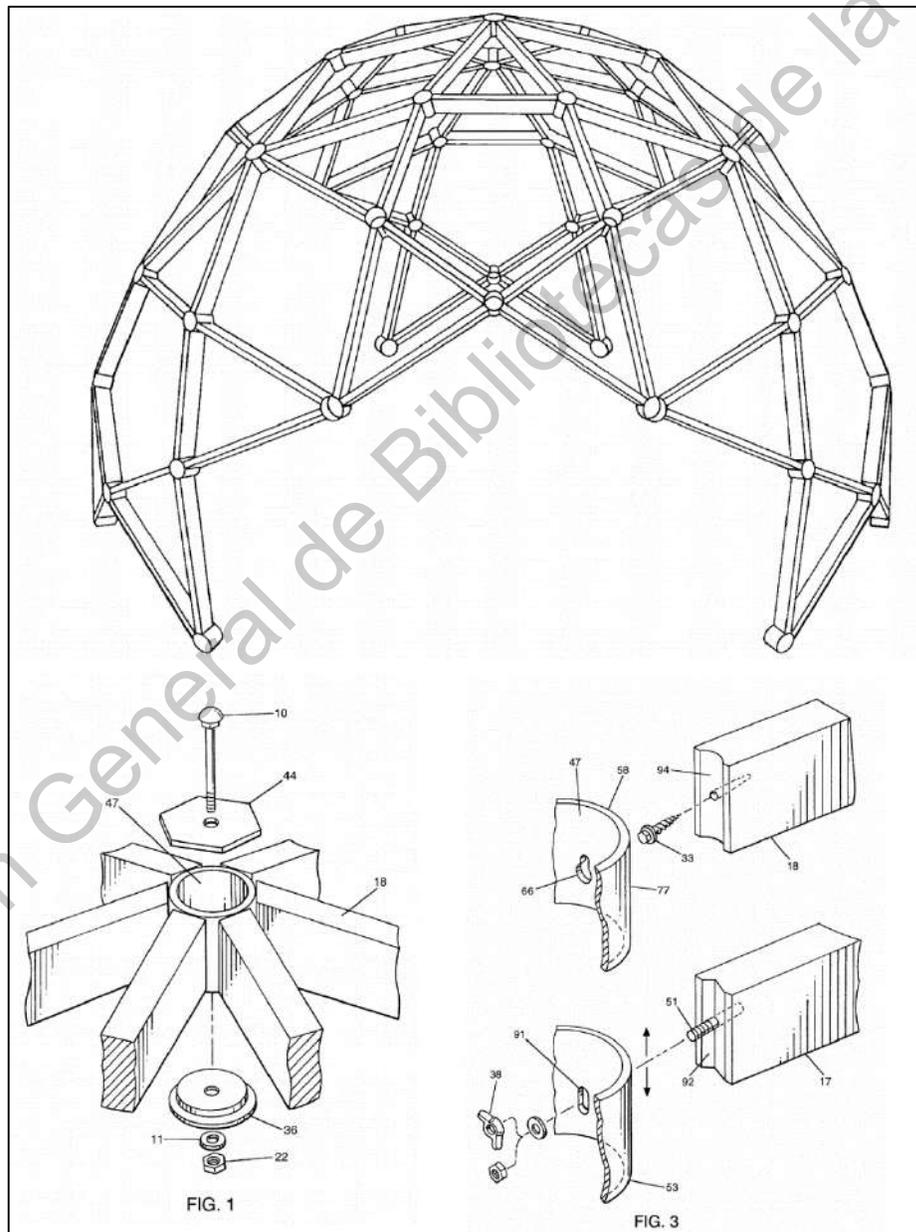


Figura 35. Conexión universal para un domo geodésico (USPTO, 1999).

En 1930 la oficina de patentes y marcas de Estados Unidos de América publicó una invención de una conexión universal, involucrando elementos tubulares que se unen a otros de diversas formas (figura 36), éstos podían incorporarse a la conexión con otros elementos sin soldaduras a través de un sistema de fijación atornillado. La invención fue creada por Herbert H. Moss y adjudicada a Linde Air Products Company (USPTO, 1930).

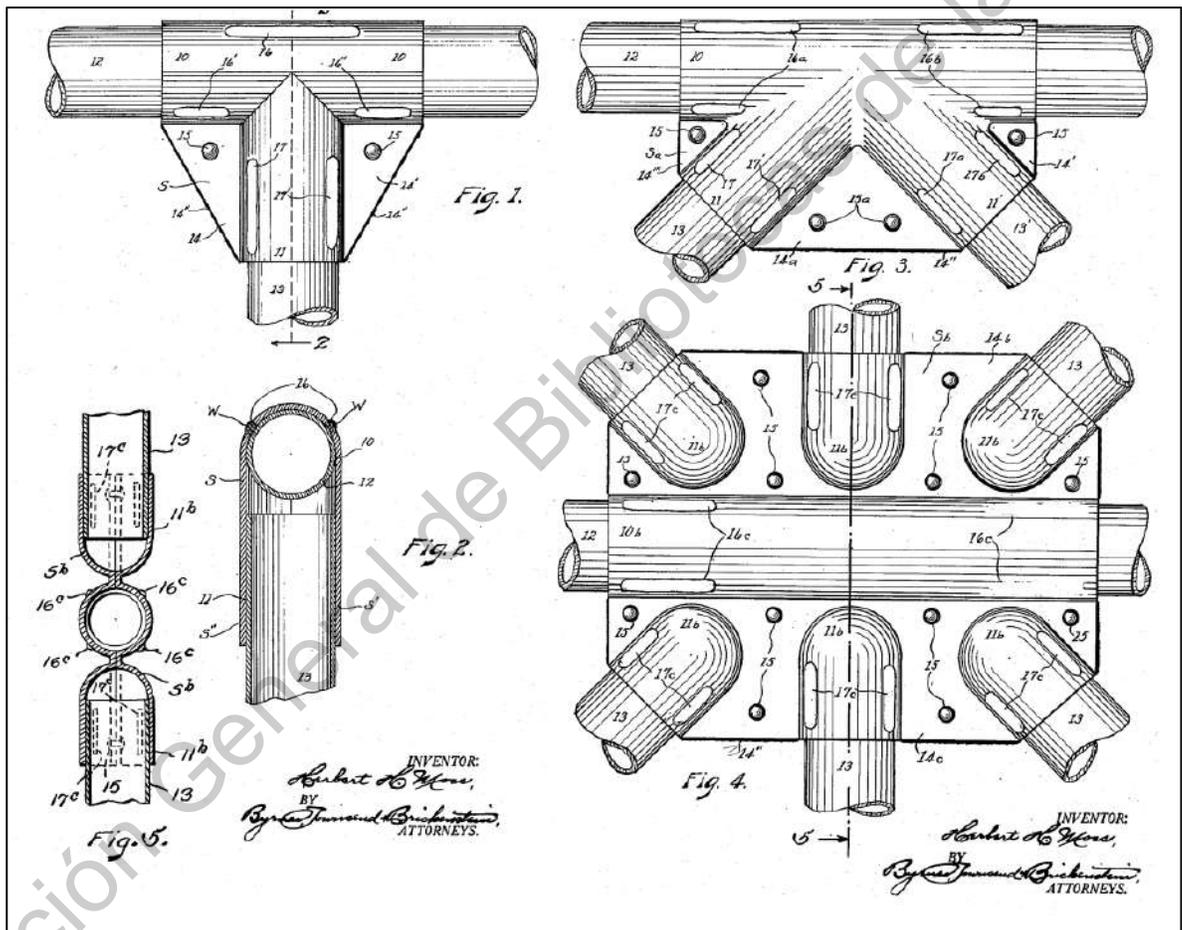


Figura 36. Patente de conexión universal para elementos tubulares (USPTO, 1930).

En 1975 la oficina de patentes y marcas de Estados Unidos de América publicó una innovación de una conexión universal que puede unir de manera multi-adaptable diversos elementos que conforman una estructura con miembros de sección circular (figura 37). Fue inventada por Giancarlo Pofferi (USPTO, 1975).

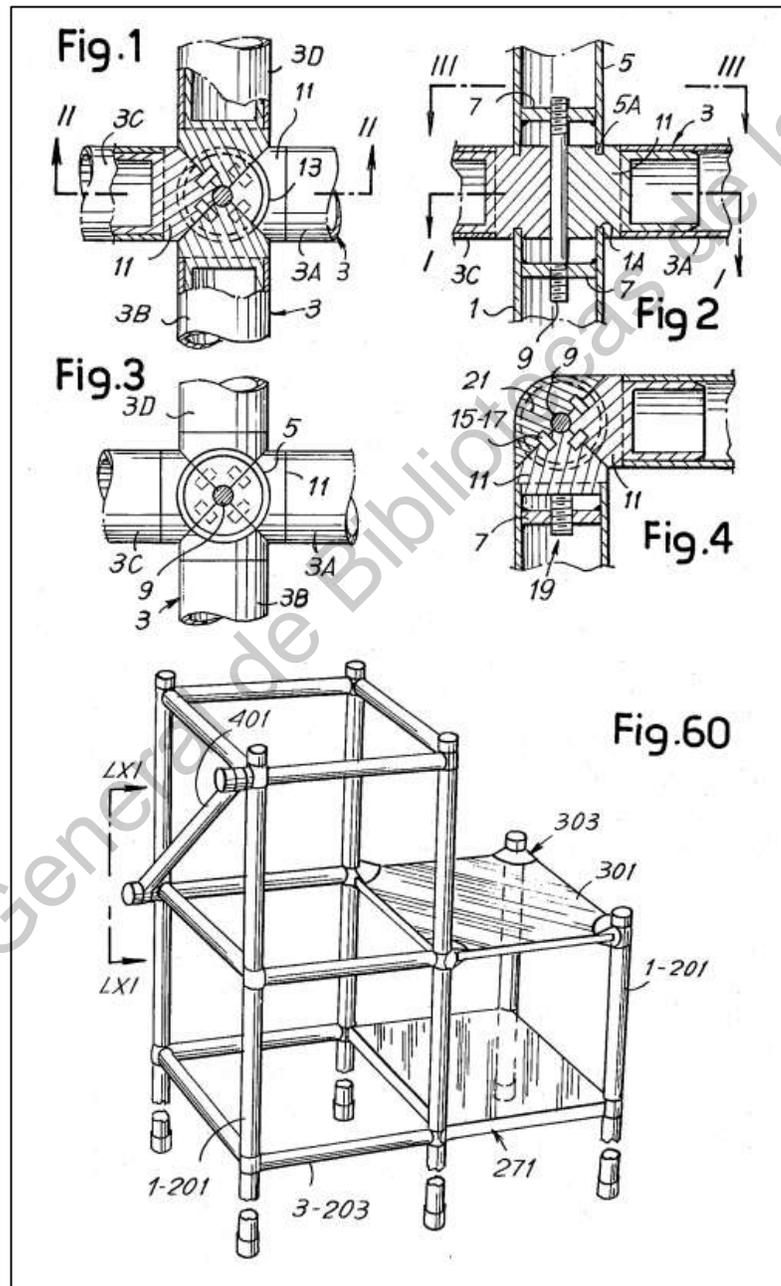


Figura 37. Conexión universal a base de perfiles con sección circular (USPTO, 1975).

En 1972 la oficina de patentes y marcas de Estados Unidos de América publicó una invención de una conexión universal que cuenta con la capacidad de ser multi-adaptable (figura 38), cuenta con 6 extremos y 4 de ellos pueden conectarse con un miembro que puede cambiar el ángulo en el cual está dispuesto a través de un conector interno circular, lo cual puede crear formas muy variadas en las que una estructura puede configurarse. Fue inventada por Charles S. Ogsbury y Don C. Witte (USPTO, 1972).

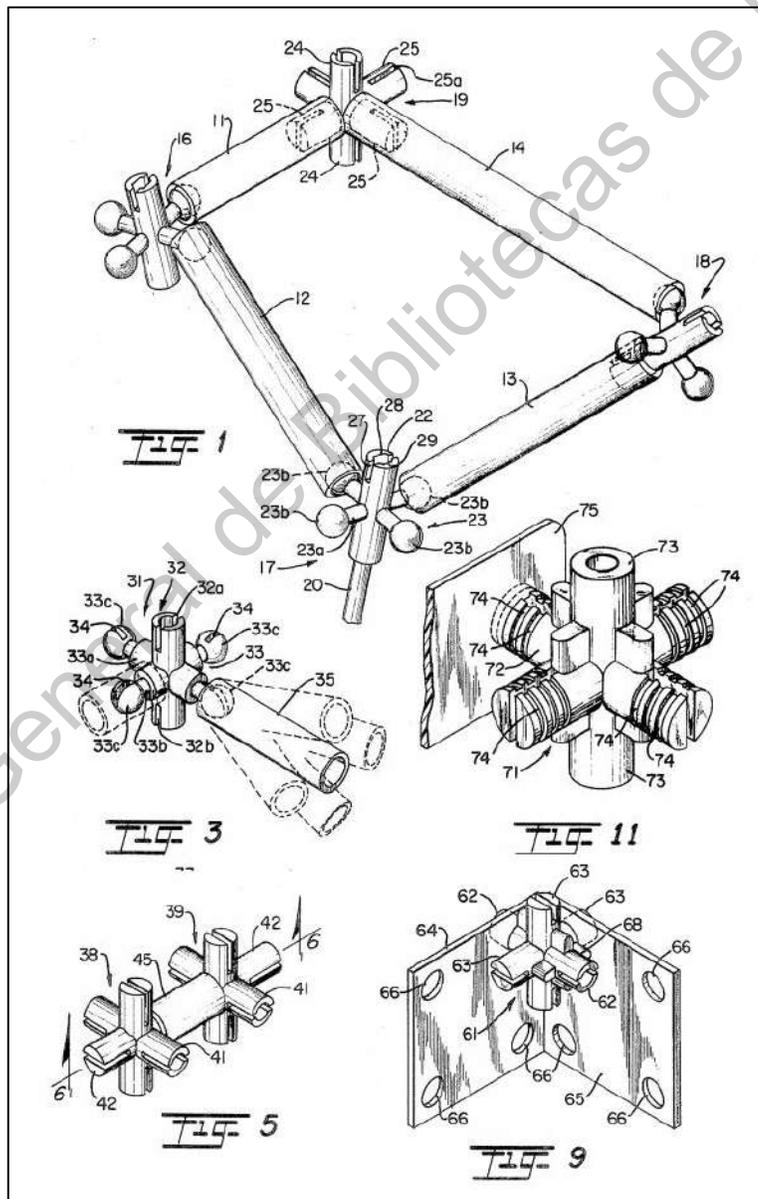


Figura 38. Conexión universal adaptable a diversos ángulos de sus elementos (USPTO, 1972).

2.2.2.2 Conexiones universales en edificaciones modulares prefabricados.

2.2.2.2.1 Patentes

En 2018 en España fue publicado por la oficina española de patentes y marcas una innovación de conexión universal metálica para edificios con marcos de acero y columnas circulares (figura 39), la cual incorpora la posibilidad de conectar 4 traves tipo-I, y a la vez, a una columna de la misma sección que la columna inferior encima de ésta. El caso particular para el cual fue aplicado es para una estructura metálica de un estacionamiento. La invención fue producto de Oliver Ohnheiser y el titular es Duplipark Drance SAS (OEPM, 2018).

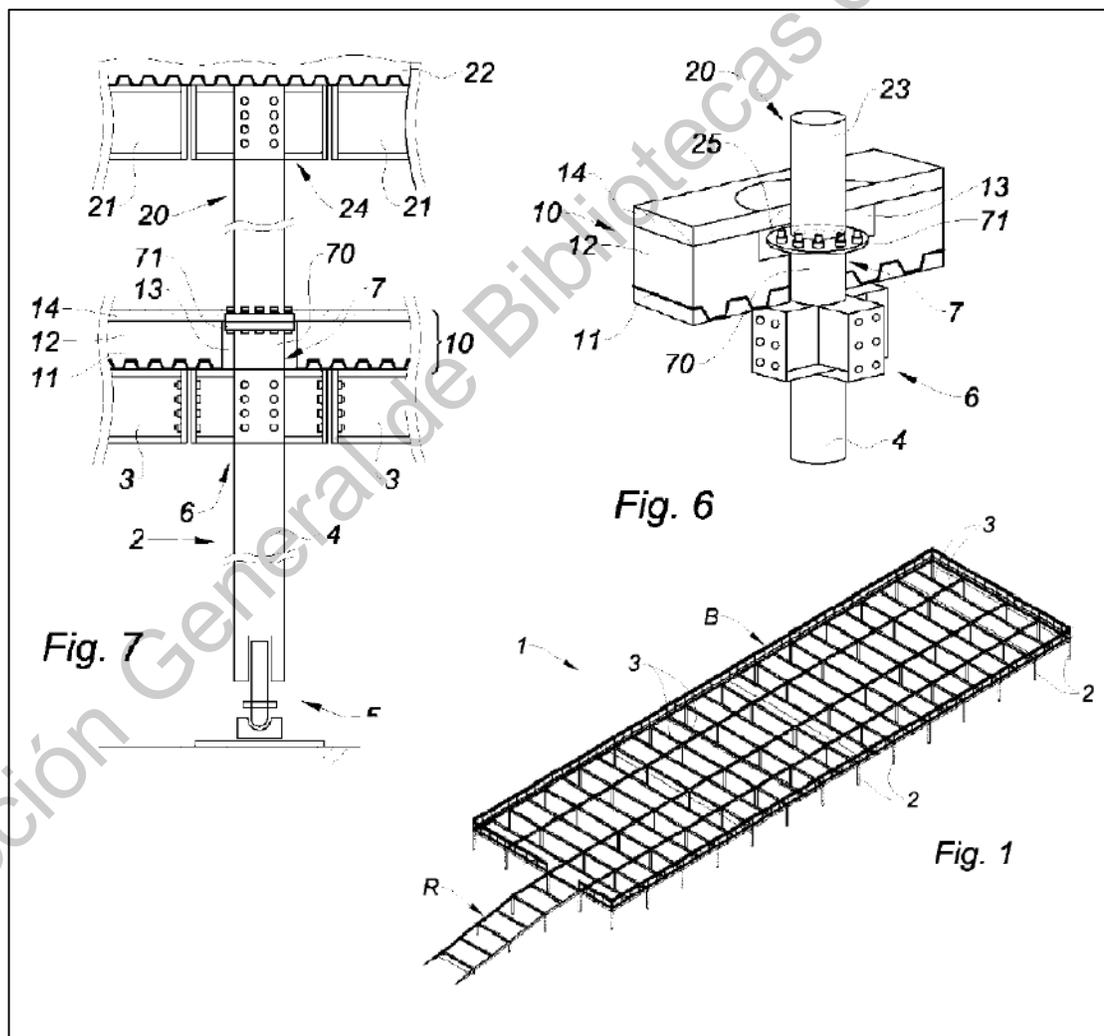


Figura 39. Diagramas de la patente de una conexión universal para un edificio con marcos de acero con columnas circulares y traves tipo-I (OEPM, 2018).

En 2011 la oficina de patentes y marcas de Estados Unidos de América publicó una innovación que involucra una conexión universal para estructura de marcos de acero con columnas cuadradas y traveses tipo-I (figura 40), en la cual se pueden conectar las traveses a las columnas a través de un sistema de elementos de fijación en sus 4 caras. Este invento fue realizado por Robert J. Simmons y fue asignada a ConXtech, Inc. (USPTO, 2011).

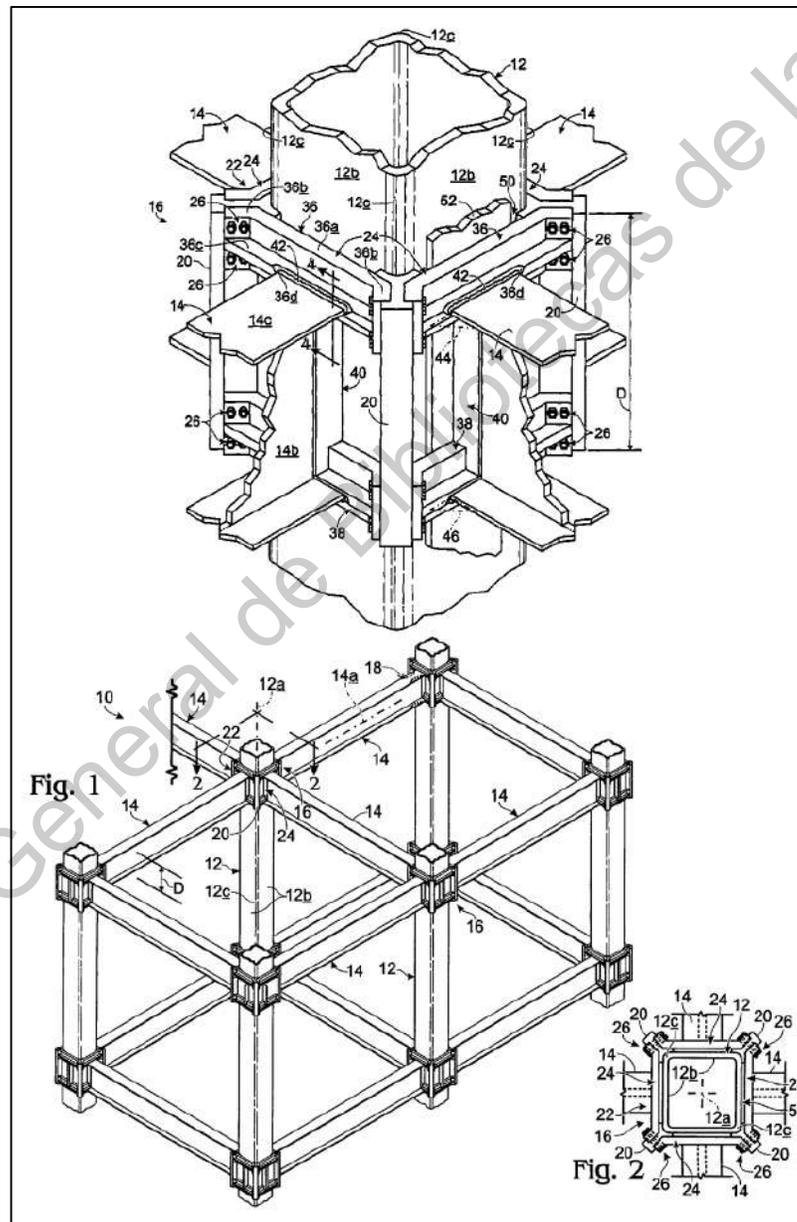


Figura 40. Diagramas de la patente de una conexión universal para una estructura de marcos metálicos con columnas de sección cuadrada y traveses tipo-I (USPTO, 2011).

2.2.2.2.2 Investigaciones Universidad de Tianjin

Investigadores de la Universidad de Tianjin, ubicada en Tianjin, República Popular China, crearon un sistema de módulos multi-adaptable (figuras 41 y 42), los cuales, además de tener una versatilidad en modos de adaptación con otros módulos, éstos pueden ser colocados de manera vertical (Zhihua Chen, 2017).

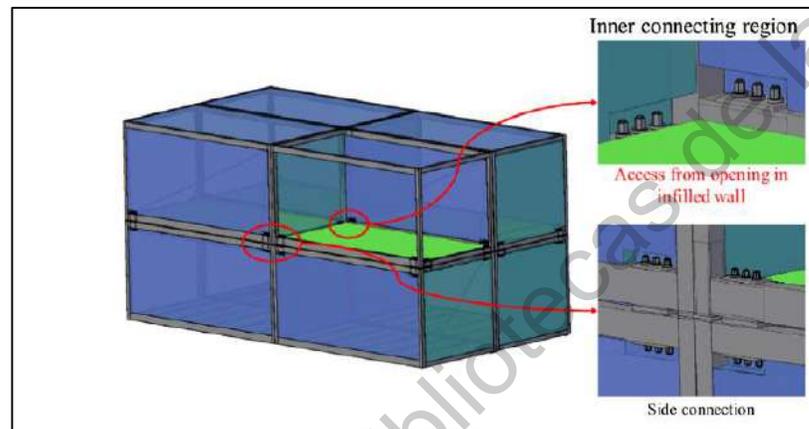


Figura 41. Conexiones universales con módulos multiadaptables (Zhihua Chen, 2017).

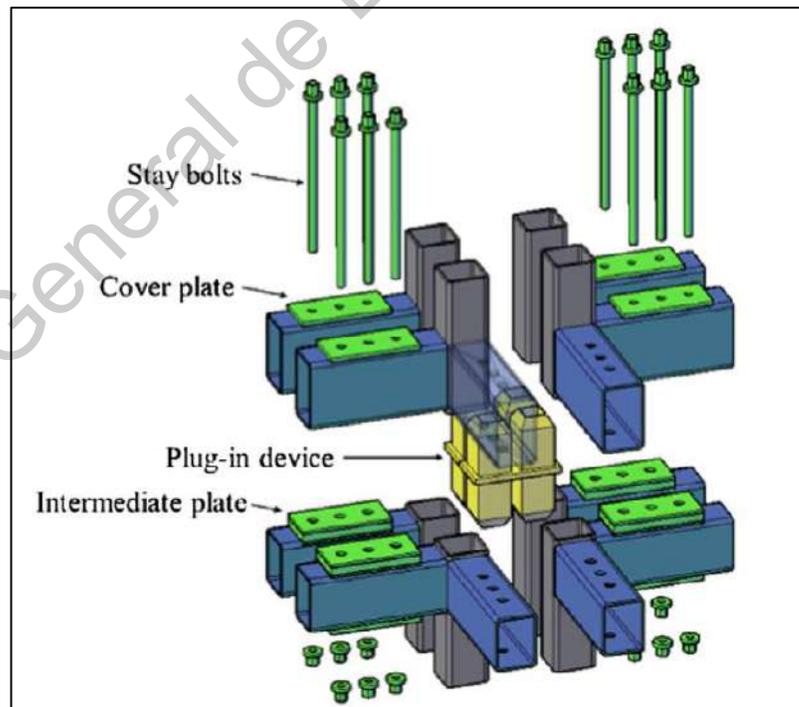


Figura 42. Conexiones universales propuestas para el sistema de modulación (Zhihua Chen, 2016).

2.2.2.2.3 Edificio T-30

En el año 2012 en la ciudad-prefectura de Changsha, provincia de Hunan, en la República Popular China, se construyó un edificio de 99.90 metros de altura con 30 niveles en tan sólo 15 días, llamado «T-30» para uso hotelero (figuras 43 y 50). Esta construcción fue posible en tan poco tiempo debido a una gran logística de fabricación, transporte y ensamblaje (figuras 44 y 45), pero, sobre todo, debido al sistema prefabricado de entresijos modulares (figuras 46 y 49), los cuales cuentan con conexiones universales en las uniones de los entresijos que se conectan a las columnas. La configuración de módulos en planta permite que se conecten fácilmente entre sí (figuras 47 y 48) (Hilgers, 2012).



Figura 43. Edificio «T-30» en distintas etapas de la construcción durante 15 días (BSB, 2012).



Figura 44. Ensamblaje del sistema modular de entresijo del edificio «T-30» (BSB, 2012).

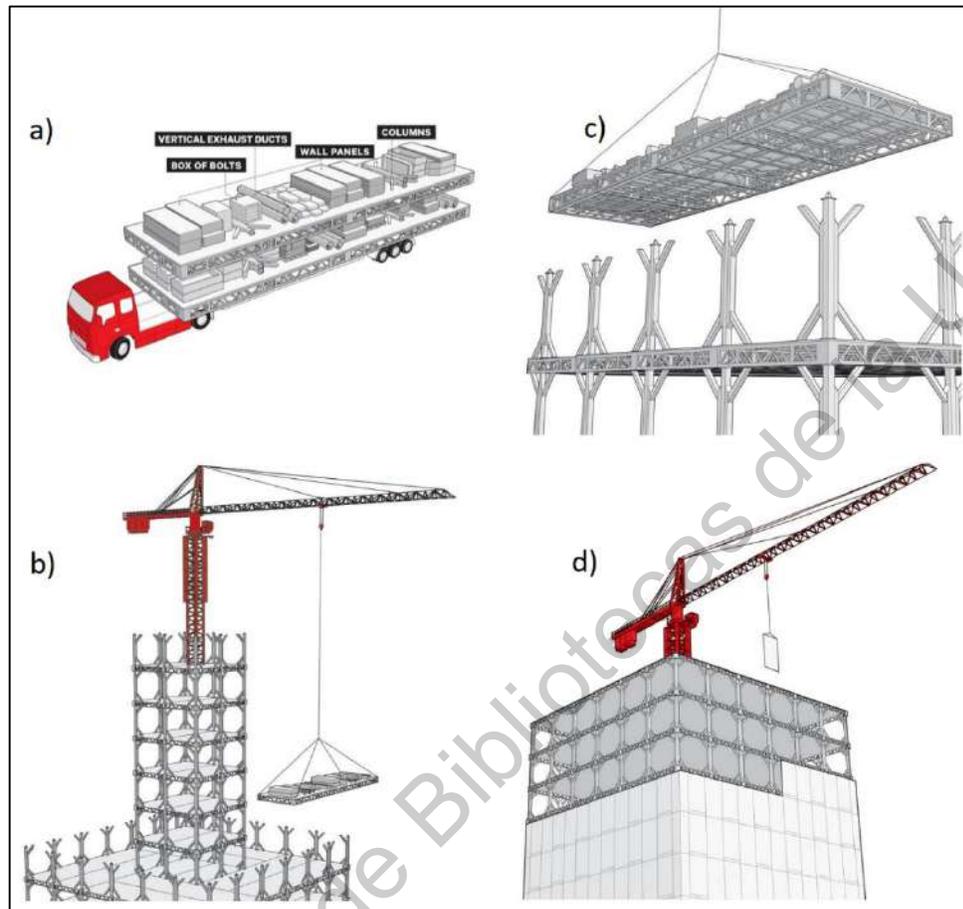


Figura 45. Proceso de transporte y construcción del edificio modular «T-30». a) Sistema de transporte. b) Colocación de los módulos de entrepisos completos. c) Incorporación de los módulos de entrepiso hacia las columnas a través de las conexiones universales. d) Colocación de la fachada exterior de vidrio. (Lee, 2012).



Figura 46. Fabricación de los entrepisos para el edificio «T-30» en la fábrica BSB (Sheldon, 2012).

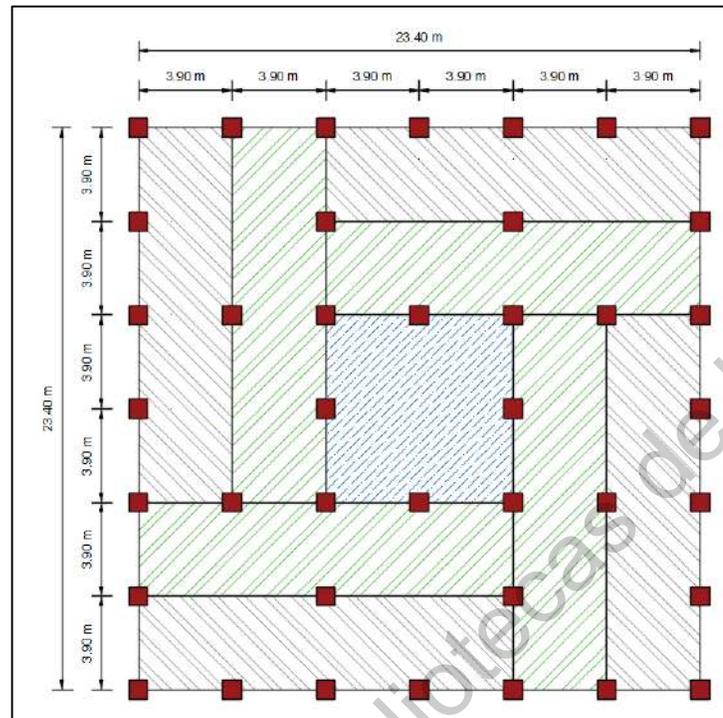


Figura 47. Configuración en planta de los módulos de entrespiso del edificio «T-30», donde por cada entrespiso se disponen 8 módulos de 3.90 metros de ancho por 15.60 metros de largo y un núcleo central cuadrado de 7.80 m por lado donde se ubican los elevadores y escaleras del edificio (figura elaborada por el autor, 2020).

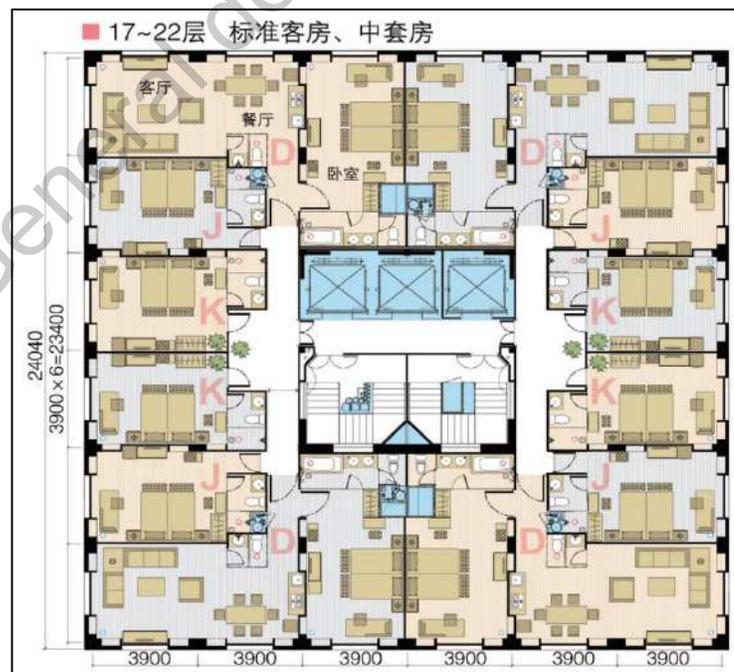


Figura 48. Configuración arquitectónica en planta de los entrespisos del edificio «T-30» (Alter, 2013).

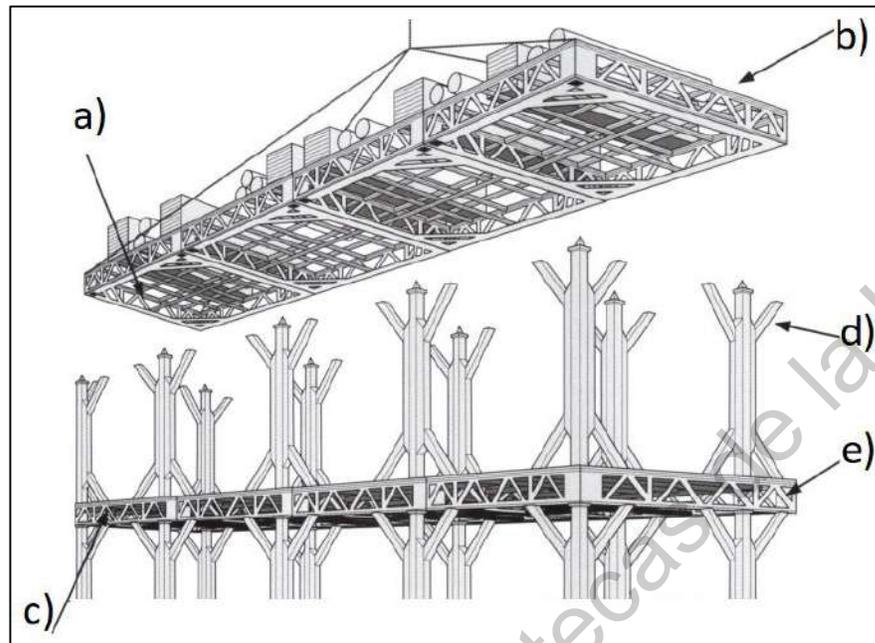


Figura 49. Acoplamiento de un sistema de entresijos con conexiones universales hacia las columnas. A) El entresijo cuenta con los sistemas de instalaciones ya pre-instalados. B) El entresijo se iza con los muros prefabricados desarmados, así como el sistema de instalaciones que va en ellos. C) Entresijo ya colocado. D) columnas reforzadas con diagonales en sus extremos para darle mayor rigidez a la estructura ante movimientos laterales. E) Conexión universal adherida al sistema de entresijos (Lee, 2012).



Figura 50. Hotel «T-30» de 99.90 metros de altura y 30 entresijos construido en 15 días (Wood, 2012).

2.2.2.2.4 Investigaciones Universidad de Melbourne

En el departamento de Ingeniería de Infraestructura de la Universidad de Melbourne, en Melbourne, Australia, propuso un sistema prefabricado de módulos multi-adaptables (figura 51) para un edificio de 20 niveles donde simuló someterlo a cargas laterales debido a acciones de sismo, también realizaron pruebas experimentales del sistema de conexión entre módulos (figura 52) (Gunawardena, 2016).

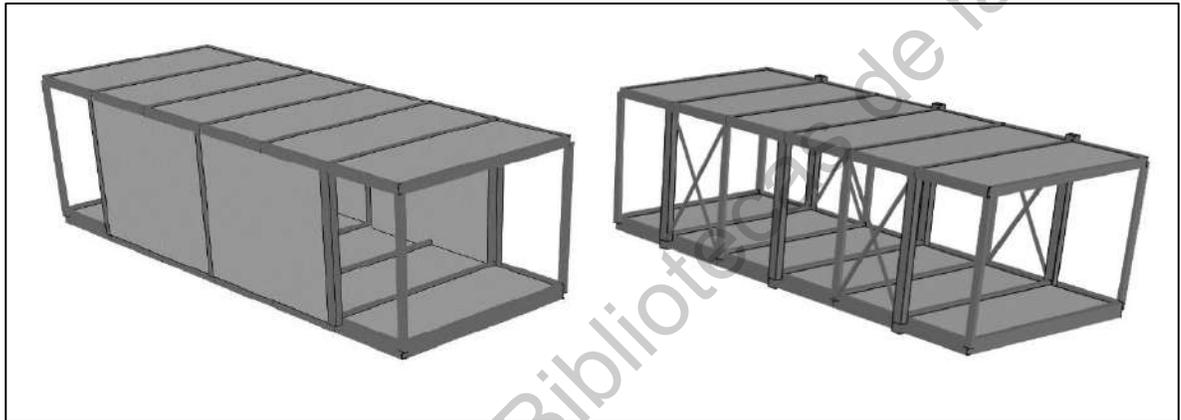


Figura 51. Sistema modular multi-adaptable propuesto para el edificio de 20 niveles (Gunawardena, 2016).

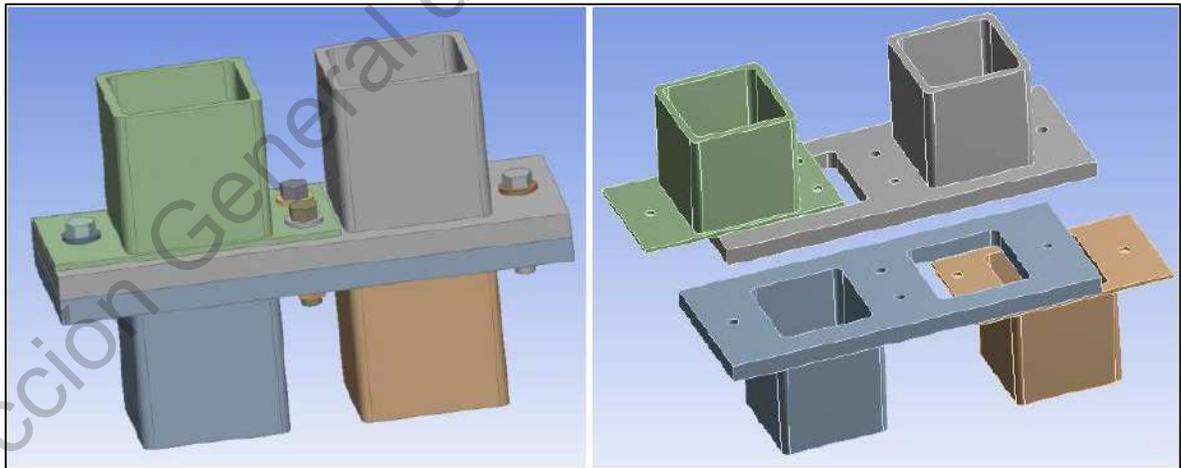


Figura 52. Sistema de conexiones universales que se incorporan en los módulos (Gunawardena, 2016).

2.2.2.2.5 Investigaciones de la Universidad Tecnológica de Beijing

La Universidad Tecnológica de Beijing, ubicada en Beijing, República Popular China, ha realizado diversas investigaciones en el «*Laboratorio de Ingeniería Sísmica y Modernización Estructural*» sobre edificaciones prefabricadas y modulares con estructura de acero, las cuales cuentan con un sistema de conexiones universales en los nodos columna-trabe (figura 53), de esta manera pueden construir edificios muy rápido y a un costo menor que con sistemas constructivos convencionales. Dichas investigaciones se han enfocado en el comportamiento estructural de las conexiones universales debido a movimientos sísmicos (X.C. Lui et. al., 2017).

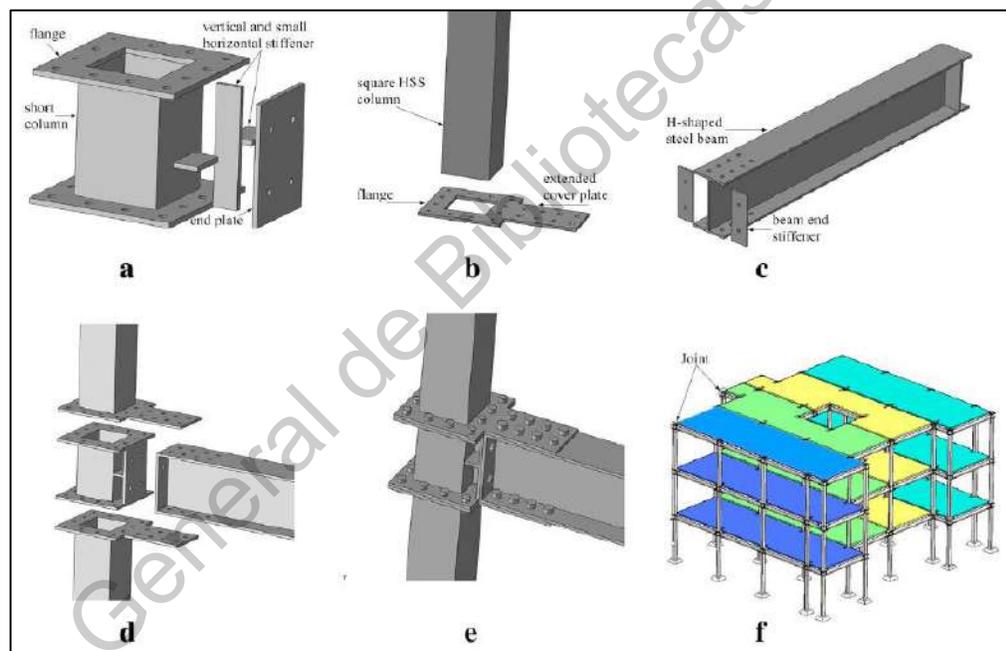


Figura 53. Sistema de conexión 2017. a) Columna. b) Columna con brida. c) Trabe tipo-I. d) Desmontaje de la conexión. e) Ensamblaje de la conexión. f) Estructura con conexión universal (X.C. Liu et. al., 2017).

Investigadores de dicha universidad, entre ellos P.h. D. X.C. Liu, publicaron en 2017 un artículo científico en la revista «*Journal of Constructional Steel Research*» de la editorial «Elsevier» donde detallan un sistema de construcción prefabricado de acero con columnas HSS y traveses tipo-I, en el que incorporan una conexión universal atornillada en la unión columna-trabe (figura 53), de la cual, estudiaron su comportamiento ante acciones sísmicas (X.C. Lui et. al., 2017).

También el P.h. D. X.C. Liu, junto con otro equipo de investigadores, publicaron en 2015 en esa misma revista, un artículo en donde exponen otro sistema constructivo prefabricado de acero con un sistema modular de entresijos reforzados con armaduras de elementos ligeros que se conectan a las columnas a través de conexiones universales (figuras 54, 55 y 56), el cual fue analizado sísmicamente y sometido a pruebas experimentales, además se construyó un edificio experimental que cuenta con este sistema constructivo (X.C. Lui et. al., 2015).

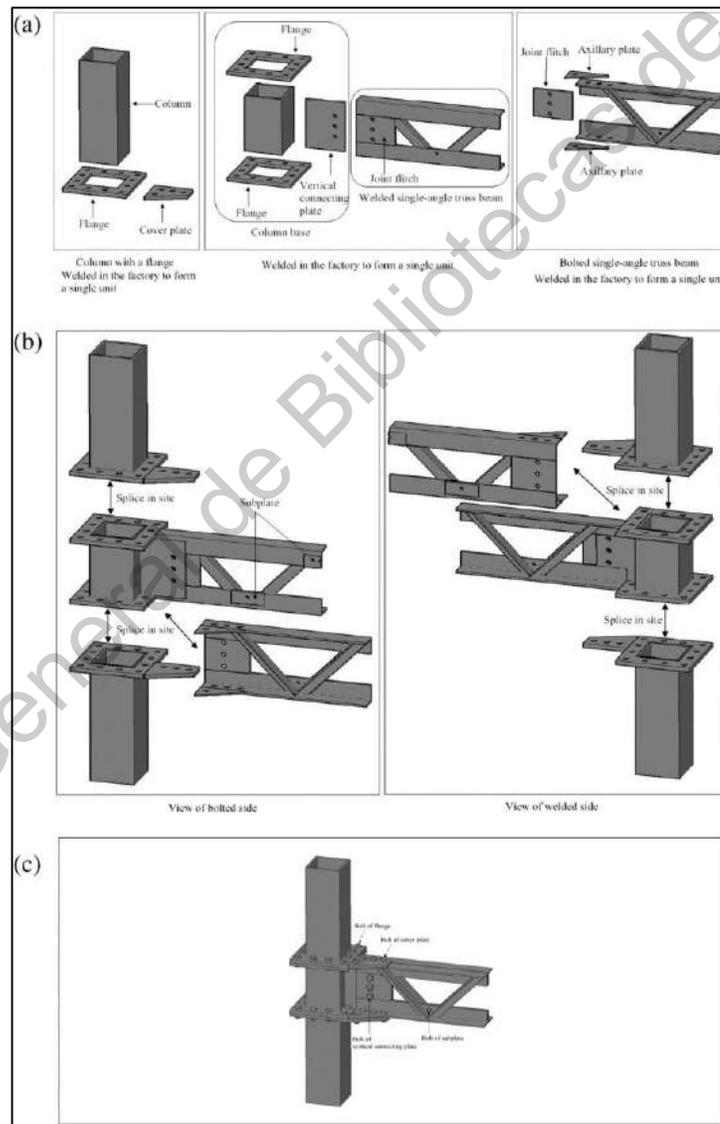


Figura 54. Sistema estructural de 2015. A) Vista despiezada de sus componentes. B) Montaje del sistema de armaduras a la conexión y ésta a su vez a la columna. C) Conexión ensamblada (X.C. Lui et. al., 2015).

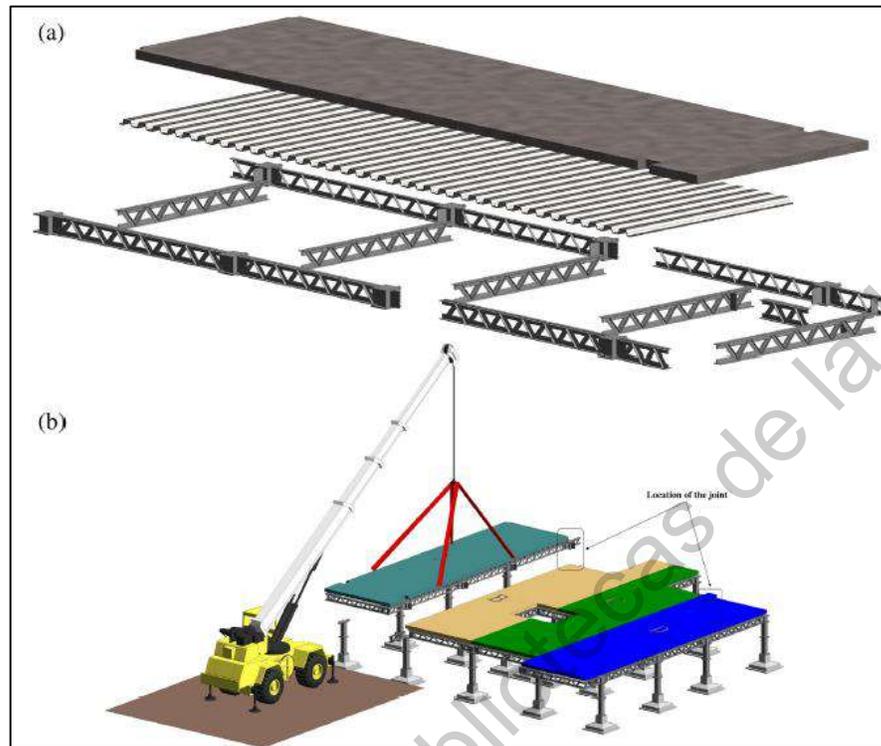


Figura 55. Representación del ensamblaje del sistema modular de entresijos con armaduras conectadas a las conexiones universales (X.C. Liu et. al., 2015).



Figura 56. Edificio experimental construido con el sistema modular de entresijos con armaduras conectadas a las conexiones universales (X.C. Liu et. al., 2015).

3 HIPÓTESIS

A través de la concepción, diseño e implementación de una conexión universal se crea un elemento multi-adaptable a los miembros que componen la estructura, disminuyendo la variedad de conexiones diferentes y haciendo más eficientes los procesos de fabricación y montaje de sus componentes, implementados para una vivienda ligera, prefabricada, modular y desmontable.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Concebir y diseñar una conexión metálica universal para un prototipo de vivienda ligera, prefabricada, modular y desmontable; siendo multi-adaptable a distintos elementos que componen la estructura en nodos principales, para reducir la variedad de conexiones distintas, haciendo más eficientes los procesos de fabricación y montaje.

4.2 Objetivos particulares

Concebir, diseñar y calcular estructuralmente un prototipo de sistema modular de acero, ligero, prefabricado y desmontable para una vivienda, que sea fácil, rápido y práctico de transportar y construir, obteniendo una gran variedad de distintas configuraciones en las que se pueden acoplar diversos módulos, bajo la configuración geométrica de la CSE.

Concebir y diseñar una conexión metálica universal para el sistema modular propuesto que garantice la multi-adaptabilidad de sus módulos para obtener distintas configuraciones.

Realizar un modelo computacional de la conexión universal y someterla a los esfuerzos más significativos que experimentaría en el prototipo de vivienda propuesto.

Aprobar el diseño de la conexión universal a través del análisis de los resultados de los esfuerzos y deformaciones obtenidos del modelo computacional, comparándolos con la capacidad de resistencia de sus materiales.

5 METODOLOGÍA

5.1 General

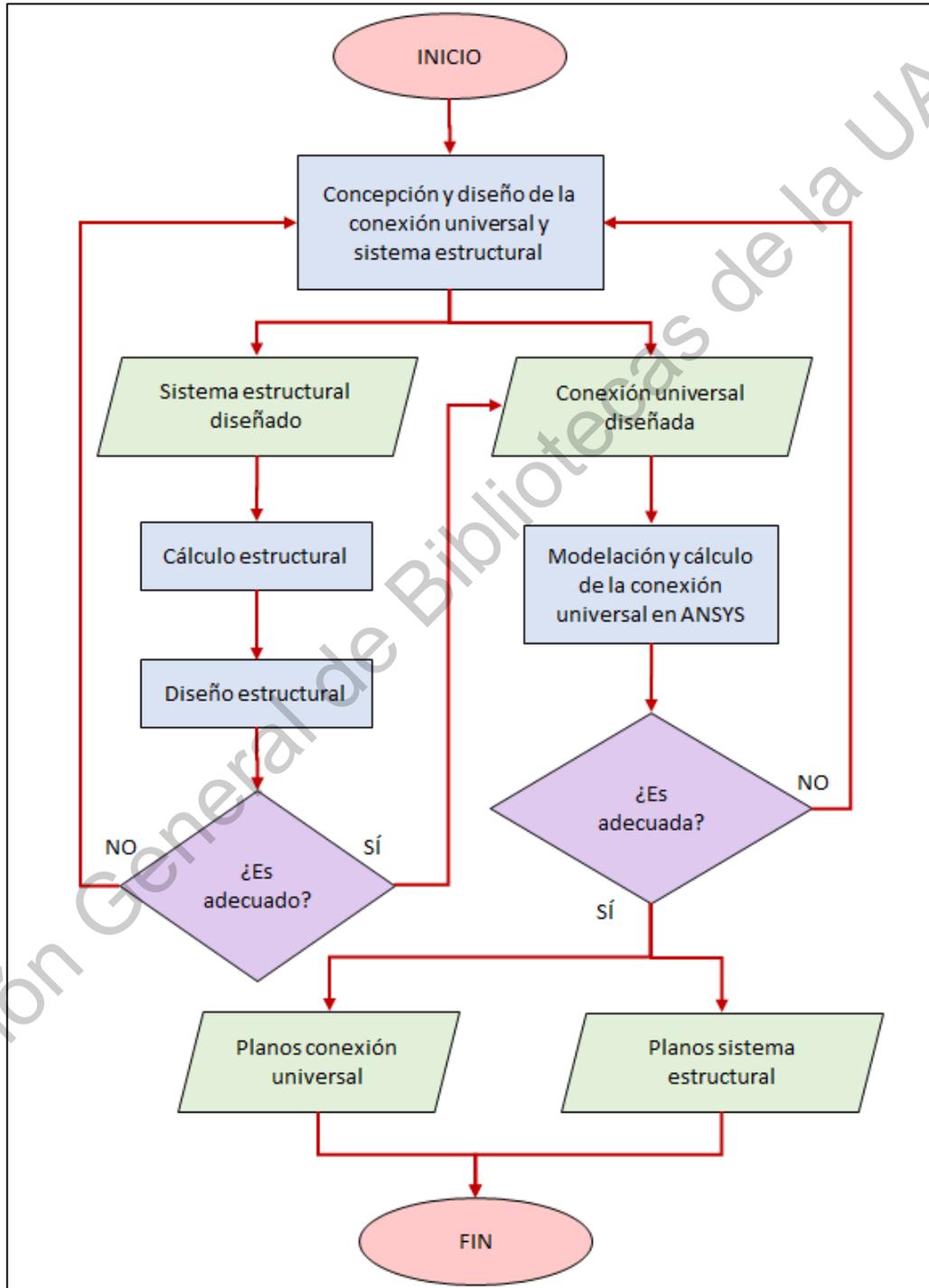


Diagrama de flujo 1. Metodología general de la investigación.

5.2 Concepción y diseño de conexión universal y sistema estructural

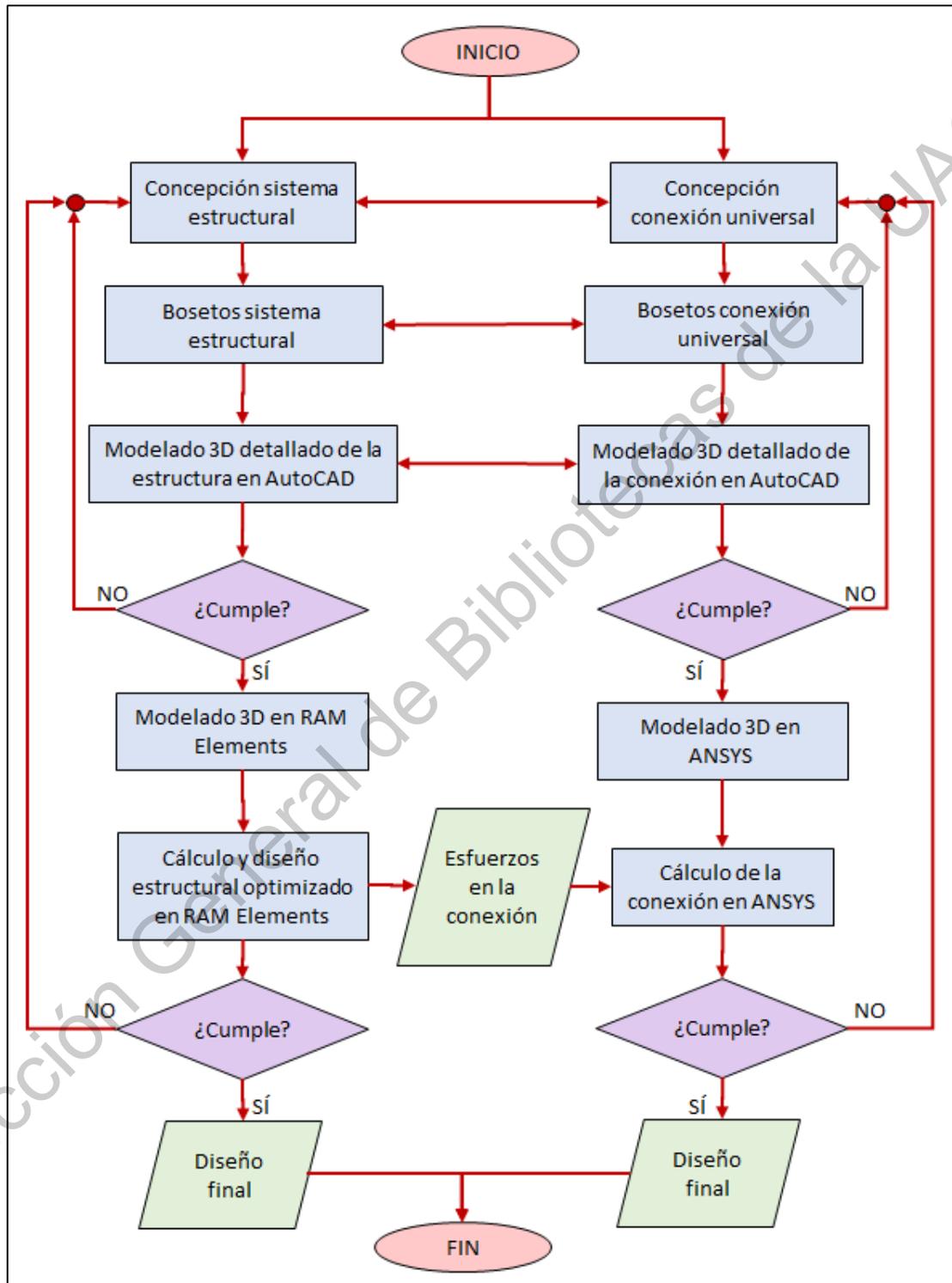


Diagrama de flujo 2. Generalidades del proceso de concepción y diseño de la conexión universal y del sistema estructural.

5.3 Cálculo y diseño estructural del prototipo de vivienda

5.3.1 Cálculo estructural

5.3.1.1 Cargas gravitacionales

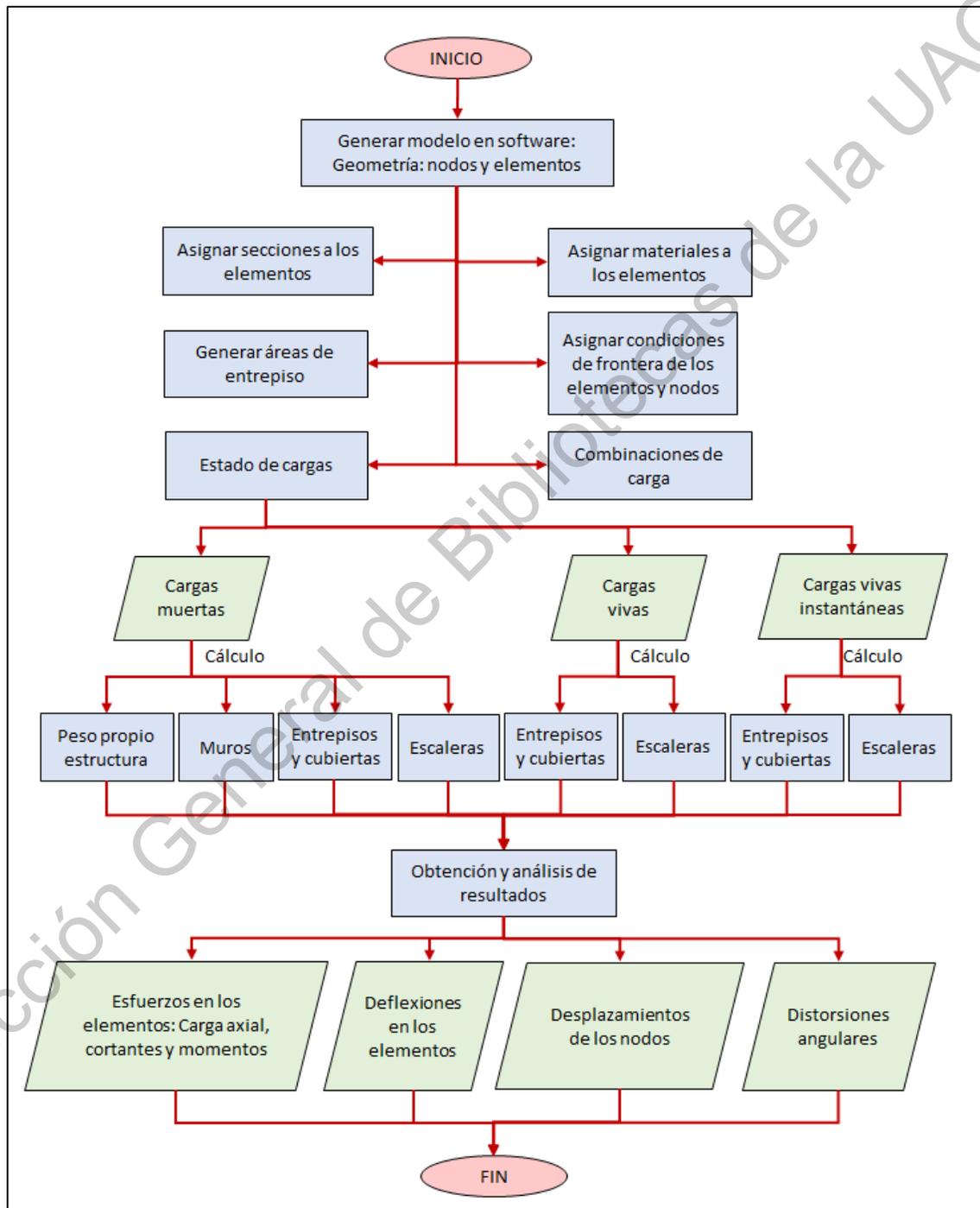


Diagrama de flujo 3. Generalidades del cálculo estructural para cargas gravitacionales

5.3.1.2 Cálculo por viento

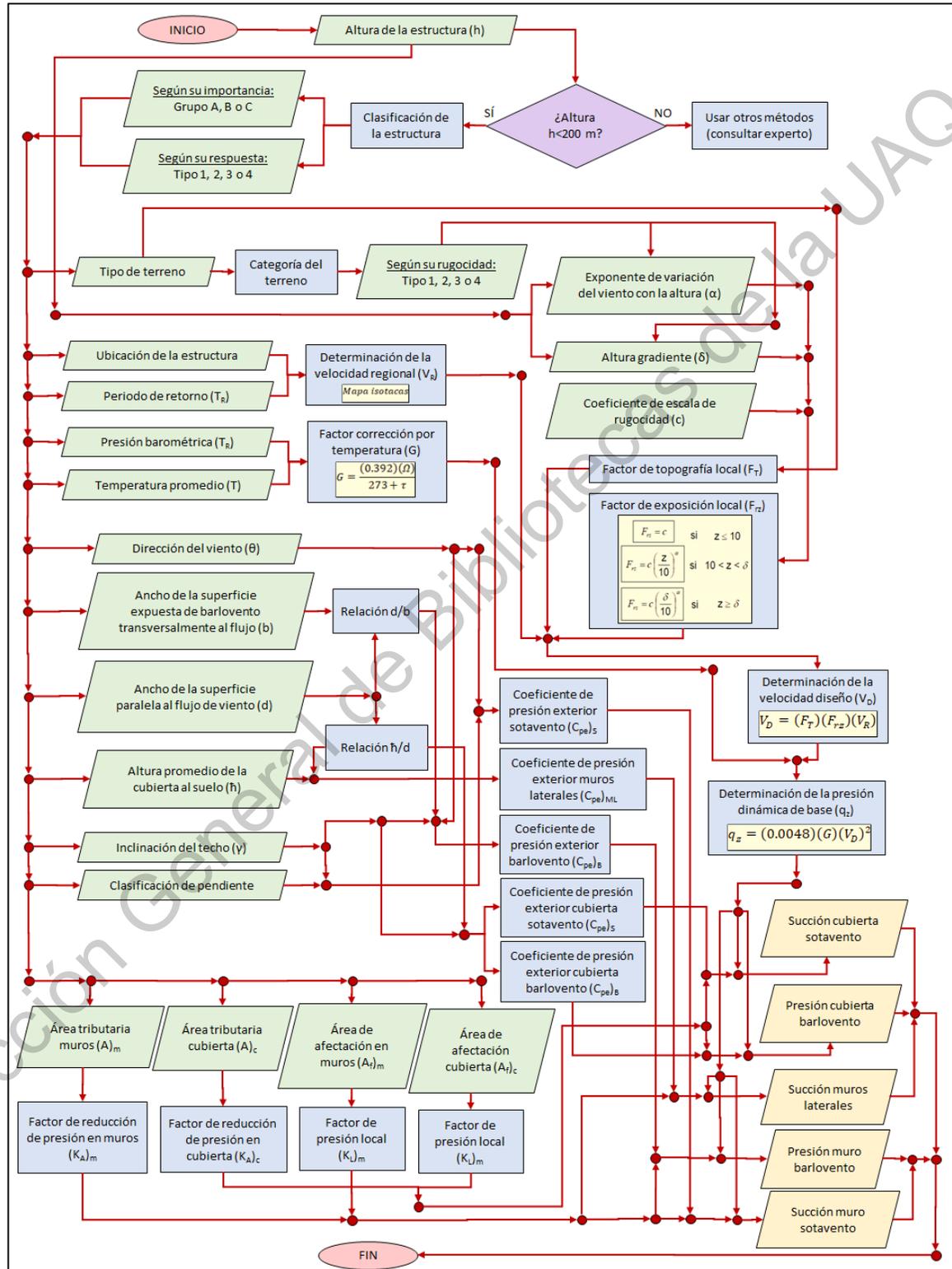


Diagrama de flujo 4. Obtención de presiones viento sobre la estructura.

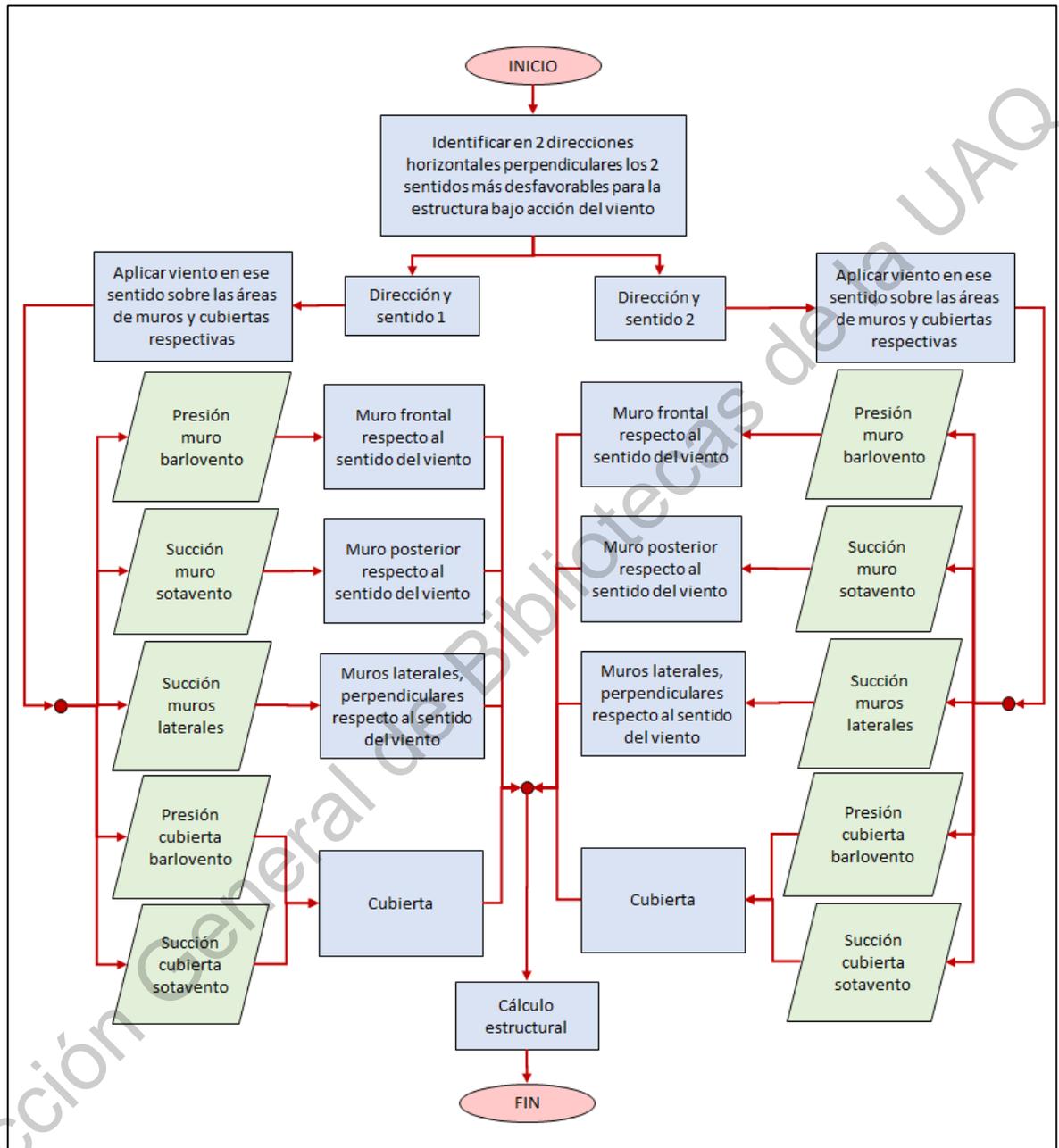


Diagrama de flujo 5. Aplicación de las presiones de viento sobre la estructura.

5.3.1.3 Cálculo por sismo

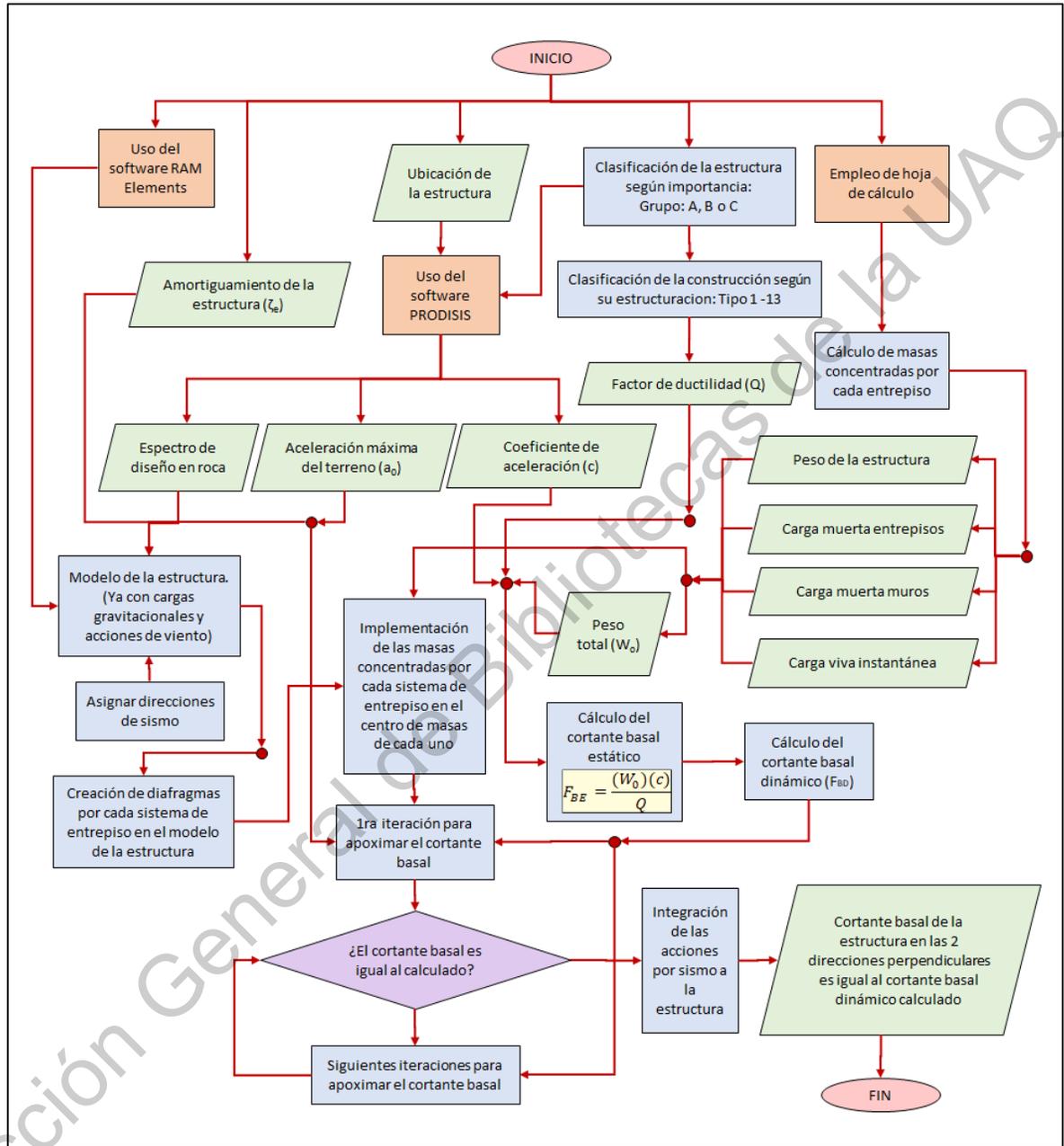


Diagrama de flujo 6. Generalidades del cálculo por sismo.

5.3.2 Diseño estructural

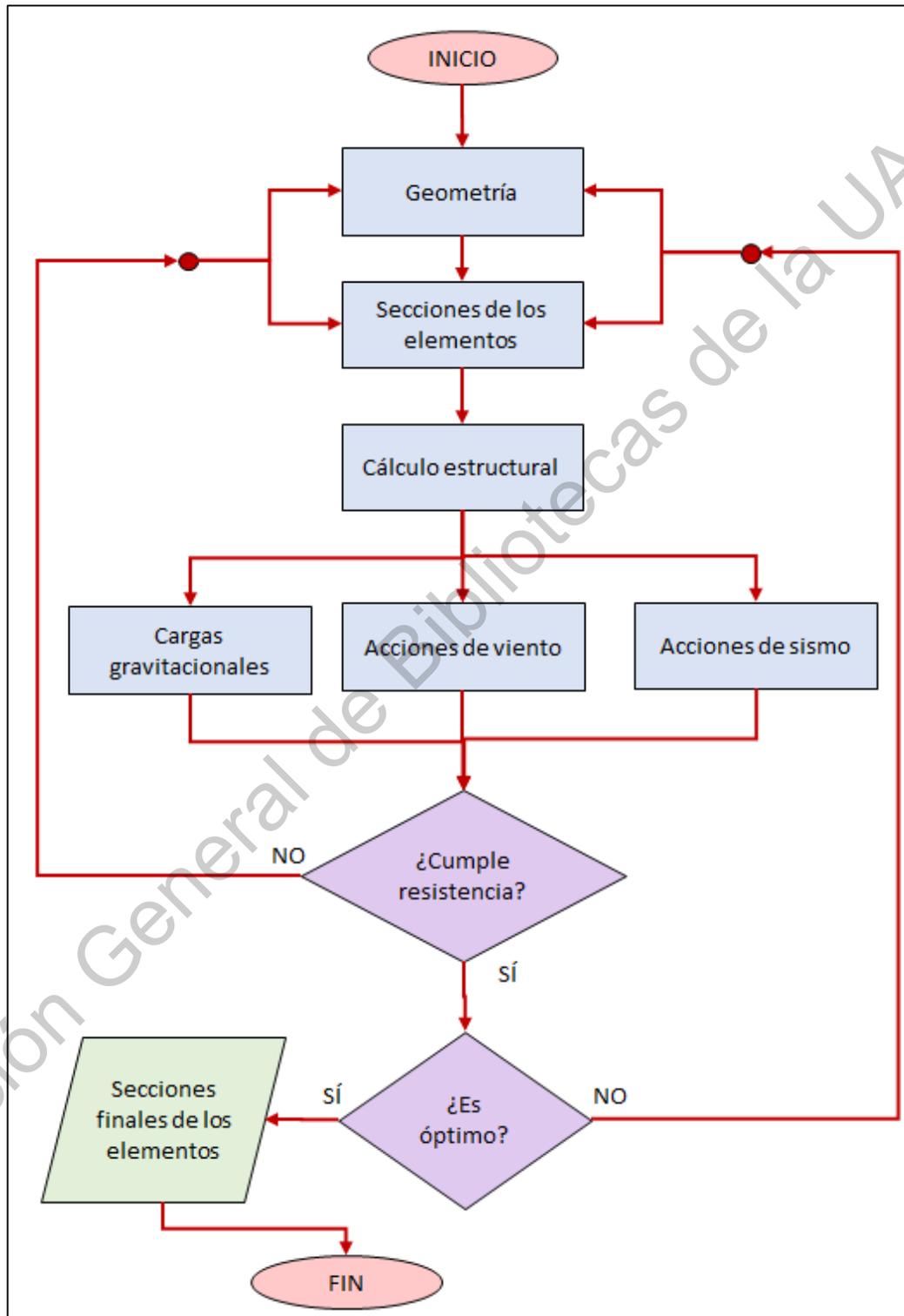


Diagrama de flujo 7. Generalidades diseño estructural.

5.3.3 Vibraciones de entrepiso.

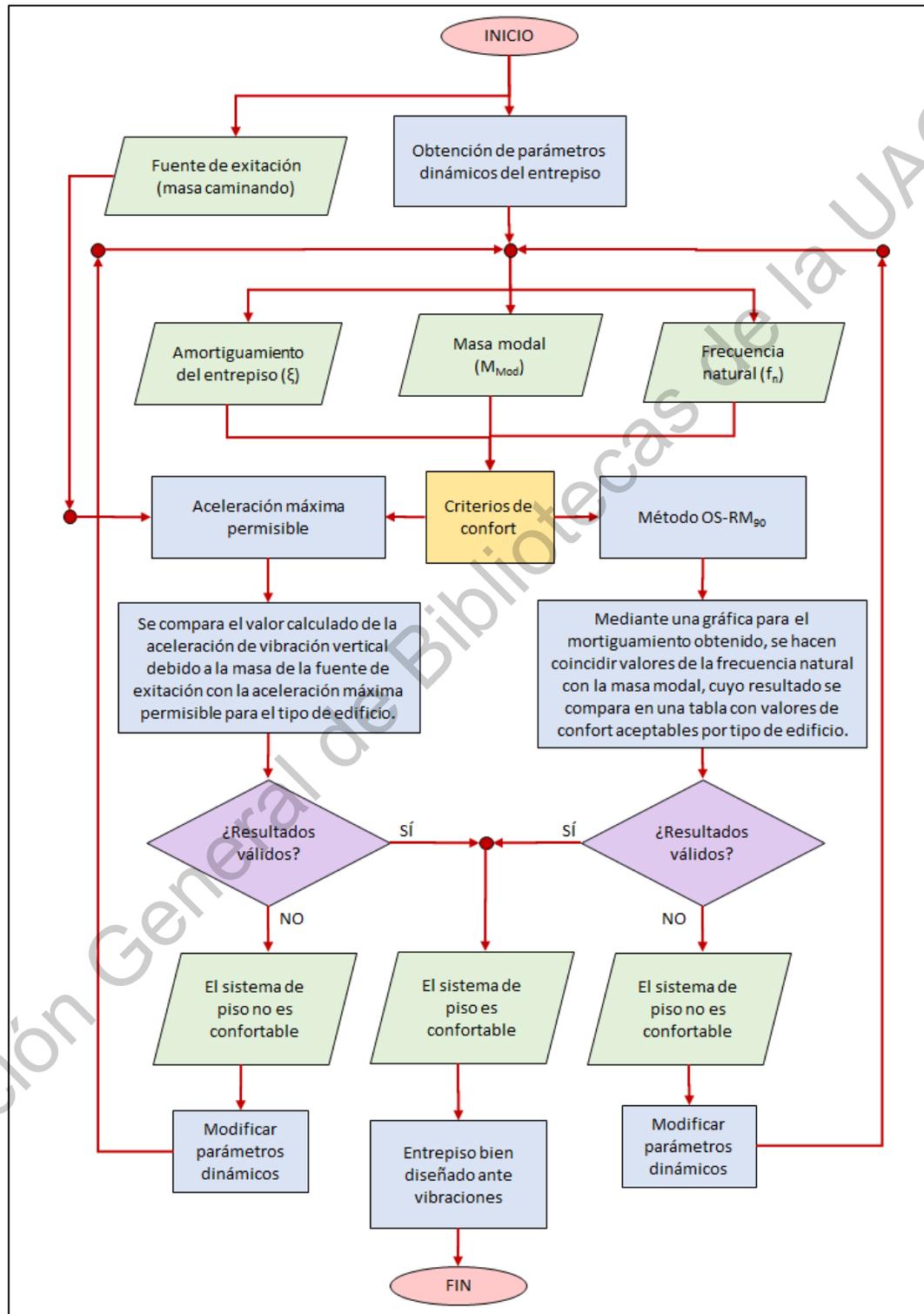


Diagrama de flujo 8. Vibraciones de entrepiso.

5.4 Modelación de la conexión universal en ANSYS

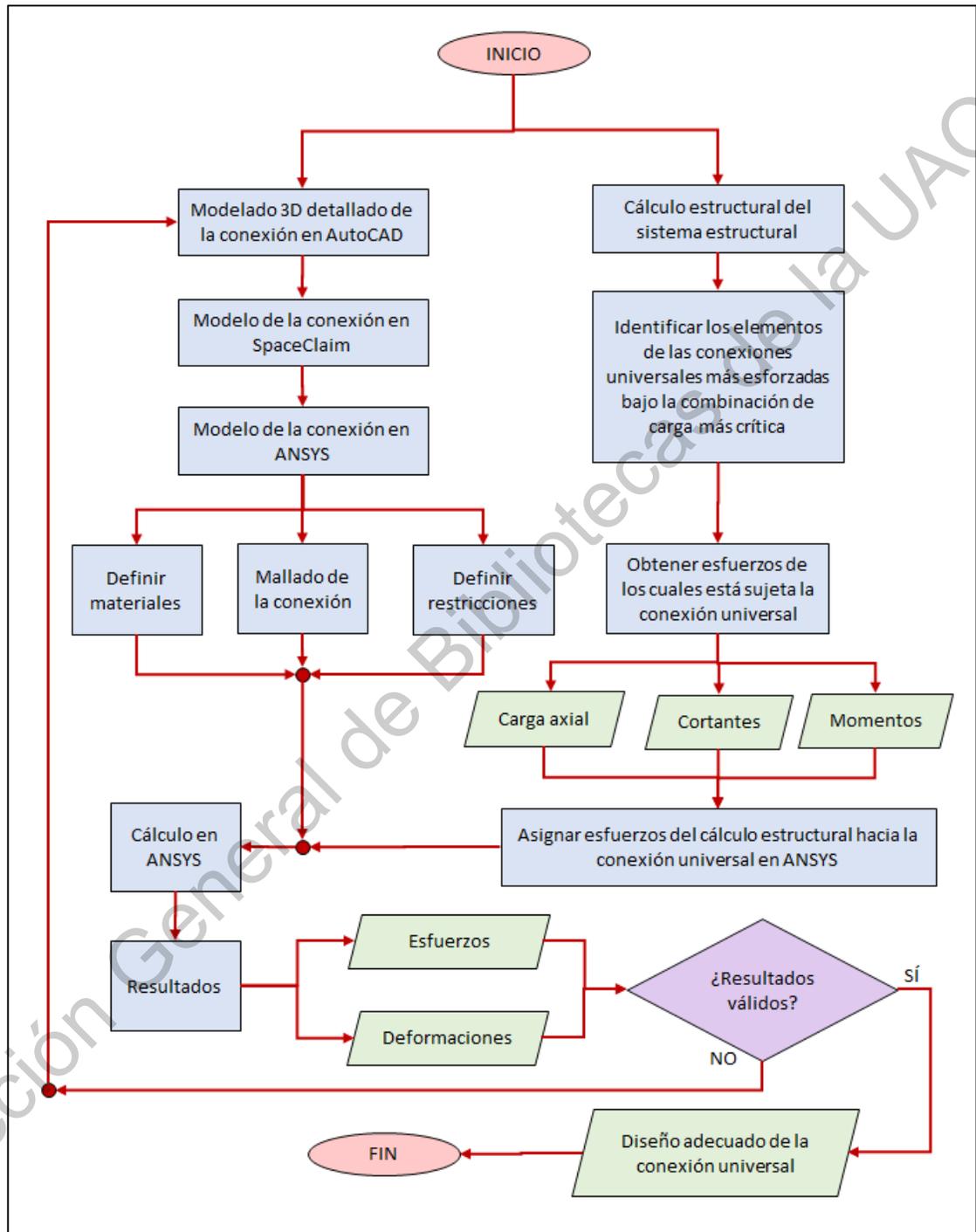


Diagrama de flujo 9. Esquema general de la modelación de la conexión universal en ANSYS.

6 DESARROLLO

6.1 Concepción y diseño de la conexión universal y sistema estructural

6.2 Proceso de diseño de la conexión universal

El proceso de concepción y diseño de una innovación involucra un gran desarrollo, ya que conforme se avanza en diferentes etapas se pueden ir descartando prototipos, algunos con un progreso más avanzado que otros. En el caso de la conexión universal se desarrolló en varias etapas para finalmente lograr un prototipo seguro y funcional (figura 57).

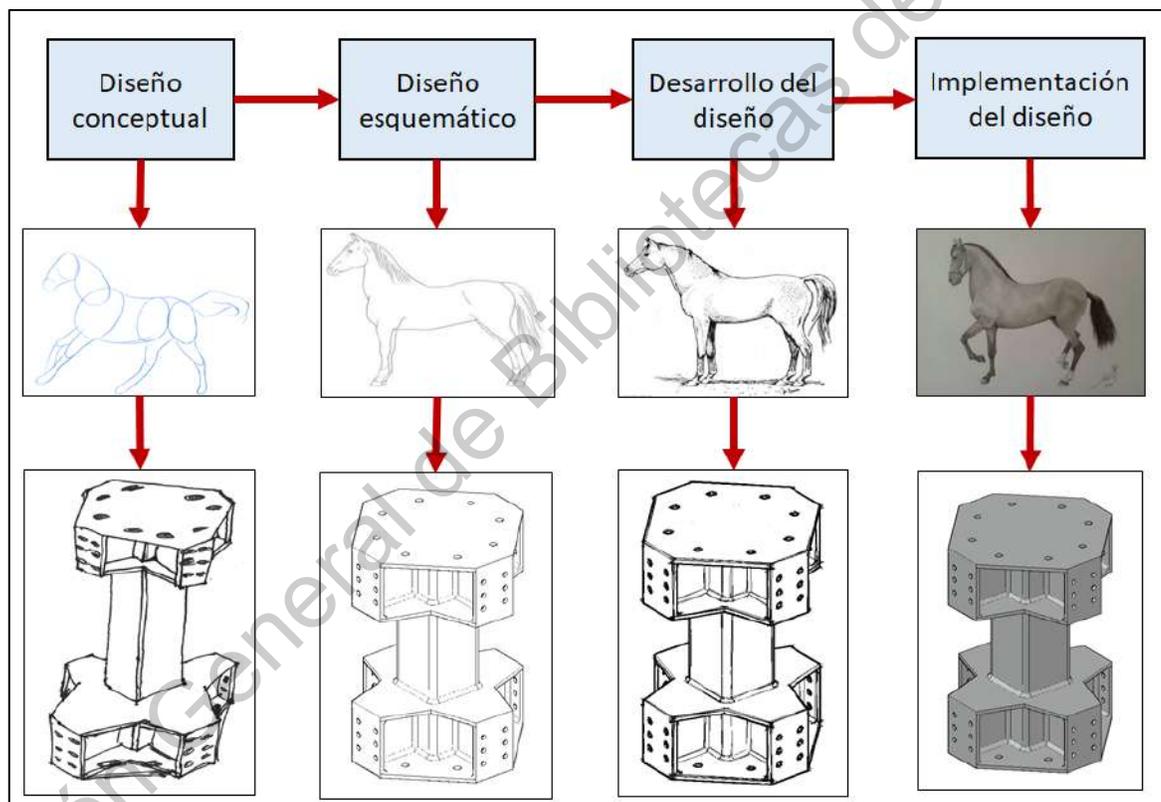


Figura 57. Etapas del proceso del diseño, donde se representa visualmente algunas etapas del proceso de la conexión universal H-1 diseñada, con una analogía del diseño de un retrato a mano de un caballo.

Se realizaron alrededor de 50 diseños conceptuales de una conexión universal, algunos se desarrollaron más que otros, entre los 5 que más se avanzaron —y que en su momento se consideraron como definitivos— se crearon modelados tridimensionales precisos y en 3 de ellos se realizaron planos de detalle, incluso se construyeron 2 prototipos a escala 1:1, uno metálico (figura 58) y el otro en madera (figuras 64 y 65).

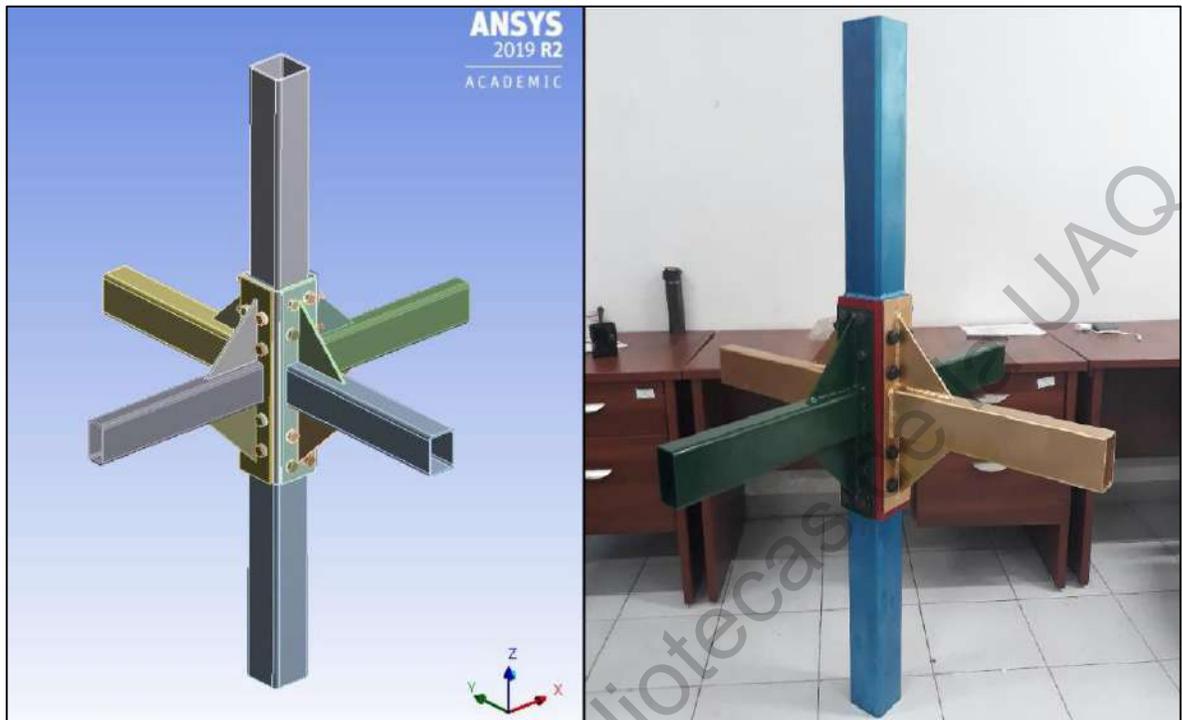


Figura 58. Conexión universal diseñada para la Casa Solar Experimental. A la izquierda se aprecia el modelo tridimensional de la conexión en ANSYS y a la derecha el modelo metálico construido.

Uno de los diseños realizados de una conexión universal fue el que se aprecia en la figura superior (figura 58), el cual fue concebido para implementarse en los nodos de las uniones columna-trabe de la CSE. Este diseño cuenta con la facultad de ser multi-adaptable a los diversos elementos que se integran a ella a través de 63 combinaciones diferentes.

Dicha conexión está constituida por 7 elementos: 2 columnas, 4 traveses y un conector. Las columnas tienen una sección tipo PTR 4"x4"x3/16"; el conector es un HSS de 5"x5"x3/16 con 60 cm de longitud; 2 traveses de PTR 4"x3"x3/16" y 2 traveses de PTR 4"x2"x3/16", cuenta con 16 tornillos de grado 8 de 7 1/2" de longitud y 5/8" de diámetro, con sus respectivas rondanas planas y de presión, así como tuercas de grado 8 (figura 59).

Las traveses cuentan en sus extremos con placas de 1/4" que se unen a las columnas a través de una conexión tipo «end plate» por medio de los tornillos que atraviesan de extremo a extremo a las 2 columnas agujereadas (4 tornillos para la columna inferior y 4 tornillos para la columna superior) y en su lado posterior dichos tornillos sujetan a la otra trabe.

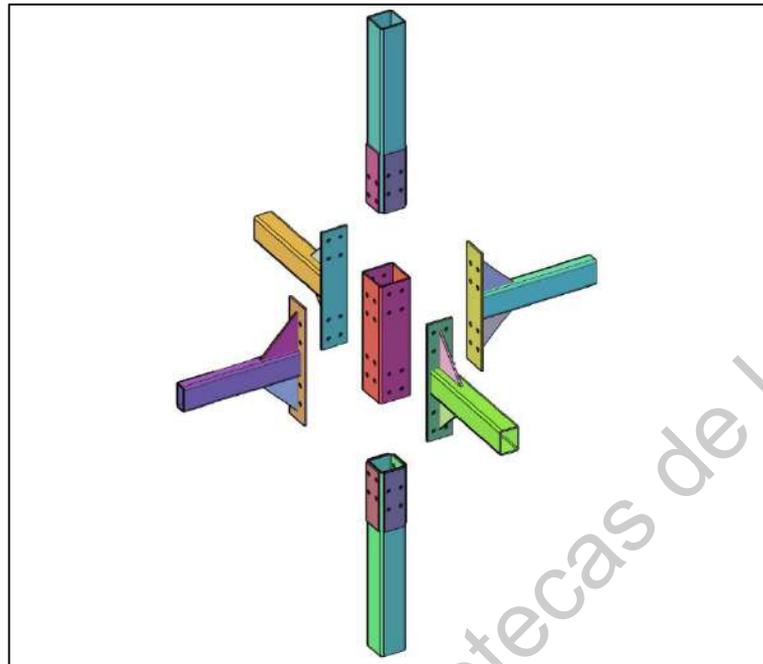


Figura 59. Despiece de la conexión universal para la CSE, donde se aprecia la manera en la que se conectan los diferentes elementos que se unen entre sí hacia el conector universal central.

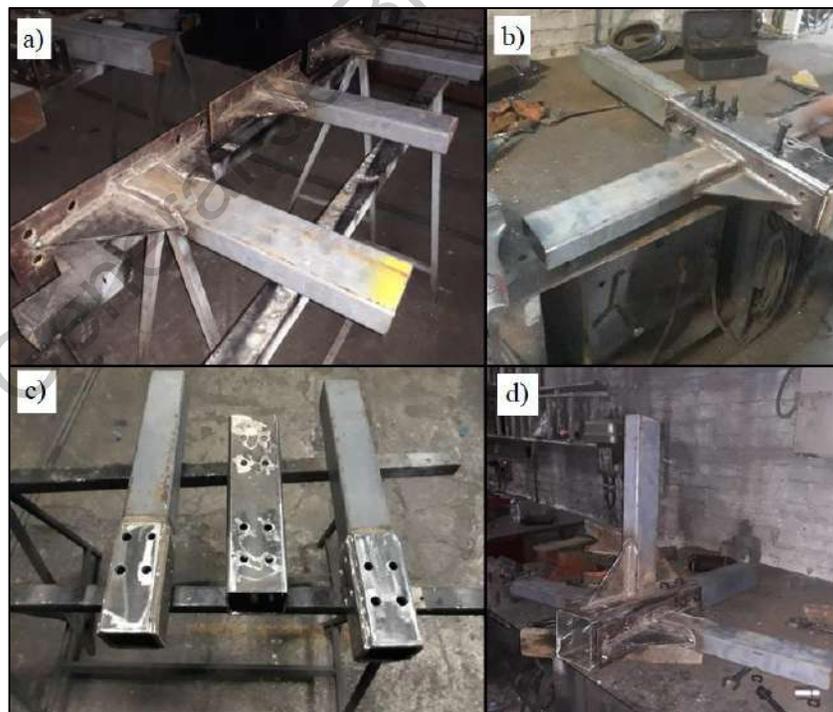


Figura 60. Etapas iniciales de la construcción de la conexión universal para la CSE. a) Traveses con placas agujereadas soldadas. b) Ajuste y calibración de los agujeros en la conexión. c) Columnas y conector universal agujereados. d) Montaje de la conexión universal con sus tornillos.

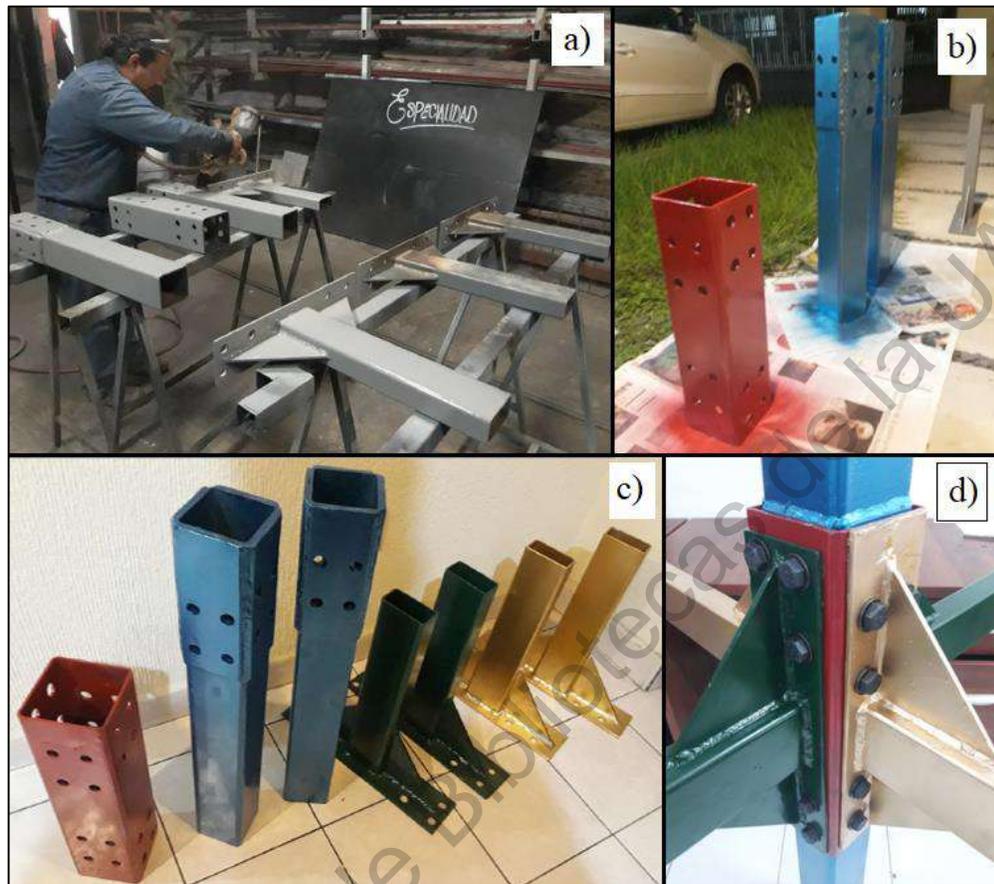


Figura 61. Etapas finales de la construcción de la conexión universal para la CSE. a) aplicación del «primer» anticorrosivo. b) Pintado de las piezas. c) Piezas totalmente terminadas. d) Conexión universal armada donde se aprecian los tornillos instalados de extremo a extremo de la conexión.

A pesar del alto grado de desarrollo de este prototipo de conexión universal, ya que se realizaron planos, modelos computacionales y se llevó a cabo su fabricación (figuras 60 y 61), finalmente se tuvo que desechar y empezar con un diseño conceptual diferente.

Aunque este prototipo pasó por todas las etapas de diseño y cuenta con la característica de ser multi-adaptable bajo 63 configuraciones diferentes, se descartó debido a que su implementación no es práctica, porque para instalar o desinstalar alguna columna o trabe, involucra desconectar más miembros del conector principal —algo no deseado—, así como tampoco cumplía con la condición de independizar a los módulos para que éstos pudiesen ser montados y desmontados de manera desvinculada sin afectar a otros módulos, pero sin crear más columnas o trabes adyacentes que elevaran en gran medida el peso de la estructura.

Posteriormente se crearon más diseños conceptuales (figuras 62 y 63) tratando de satisfacer con los requerimientos deseados que debiera cumplir la conexión universal, para que no sólo fuese multi-adaptable, sino que también que se adecuara a un sistema modular donde su instalación y desinstalación fuese independiente de otros elementos de la estructura, pudiendo incorporar tanto elementos por separado como módulos completos. Los siguientes prototipos fueron concebidos para que se conectaran con módulos lateralmente y ubicarse en el punto intermedio entre dos columnas (una superior y otra inferior).

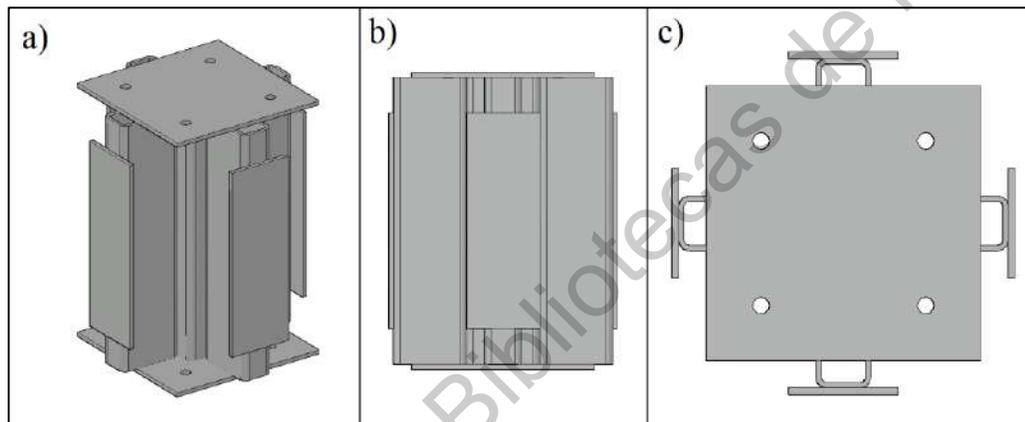


Figura 62. Prototipo de conexión universal a base de un perfil PTR central cuadrado con 4 perfiles PTR rectangulares a sus lados que soportan placas laterales que unen a traves tipo PTR rectangulares con una conexión tipo «end plate», en sus extremos verticales cuenta con placas tapas que conectan a una columna en su parte inferior y otra en su parte superior. a) Vista isométrica. b) Vista lateral. c) Vista en planta.

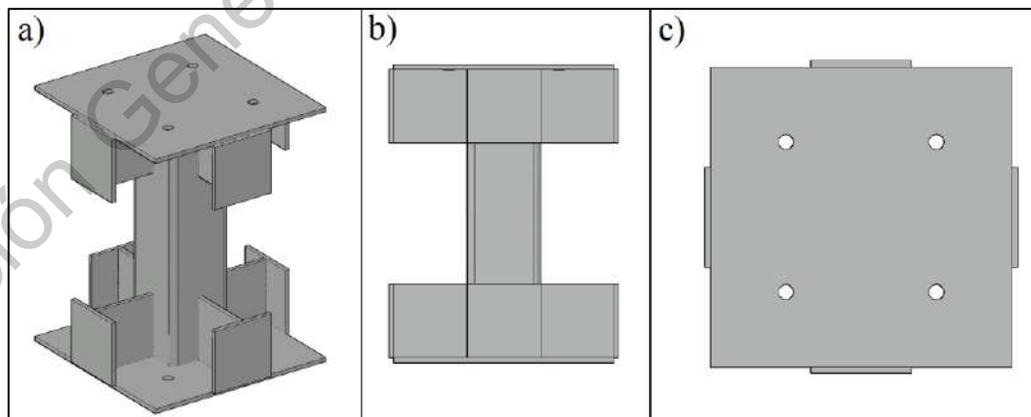


Figura 63. Prototipo de conexión universal a base de un perfil PTR central cuadrado del cual sobresalen placas de cortante a sus 4 lados tanto en la parte superior como en la inferior donde se conectan placas para recibir una armadura, también cuenta con placas tapas para conectar a 2 columnas. a) Vista isométrica. b) Vista lateral. c) Vista en planta.

Posteriormente se diseñó un prototipo de conexión universal (figura 64) que fue concebido para unir un sistema de 8 armaduras en sus placas laterales agujereadas a través de un sistema de «end plate» además de 2 columnas, dicho prototipo cuenta con placas de cortante y momento.

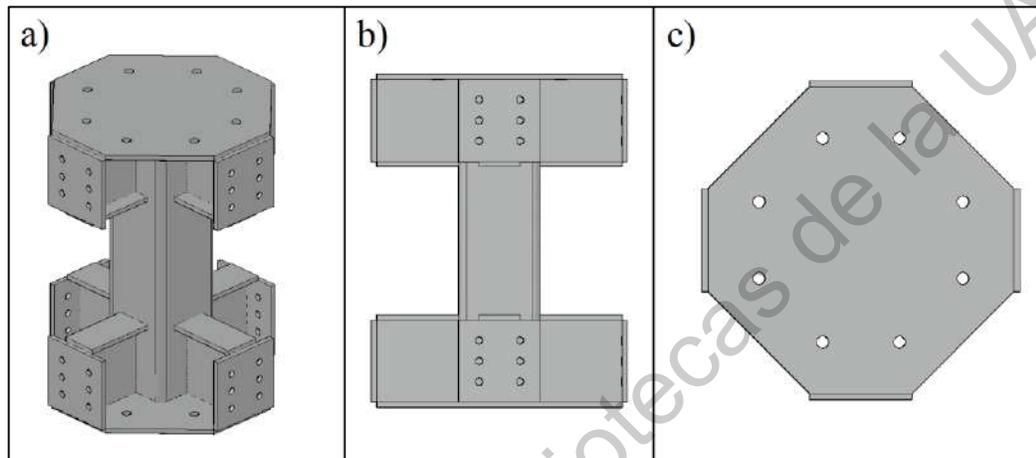


Figura 64. Prototipo semifinalista de la conexión universal, al cual se le integraron placas de absorción de momento que se conectan al perfil PTR central. a) Vista isométrica. b) Vista lateral. c) Vista en planta.

Este prototipo de conexión universal se consideró en su momento como el diseño final, el cual se construyó una pieza a escala 1:1 con madera de cedro de manera muy precisa (figura 65), para visualizar físicamente sus características; aunque posteriormente fue remplazado por otro prototipo al hacerle una mejora al incorporar placas diafragma para soportar los momentos de las armaduras, en lugar de placas individuales, distribuyendo mejor los esfuerzos en la conexión universal y para facilitar el trabajo de taller en su fabricación.

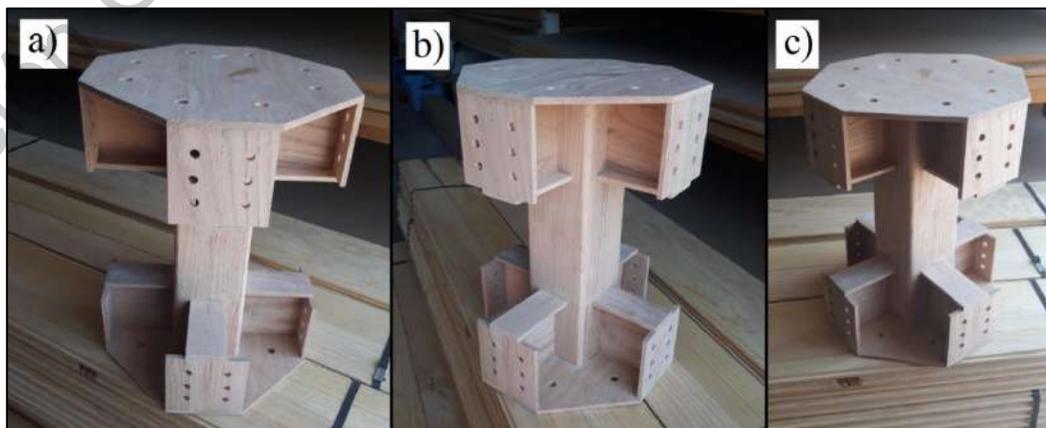


Figura 65. Prototipo de la conexión universal construido en madera.

6.2.1 Sistema modular M-10

El sistema modular consiste en un conjunto de elementos que dispuestos de cierta manera tiene la característica de ser multi-adaptable. Incluye 4 columnas con las cuales se conectan armaduras para conformar 2 sistemas de entrepiso. Los extremos de las armaduras cuentan con un conjunto de conexiones universales H-1 que le da la facultad al módulo de acoplarse con otros en maneras muy variadas (figuras 66, 67, 68 y 69).



Figura 66. Visualización de la modelación de la estructura en RAM Elements de un módulo multi-adaptable M-10, el cual incorpora conexiones universales H-1 en los extremos de las armaduras de entrepiso.

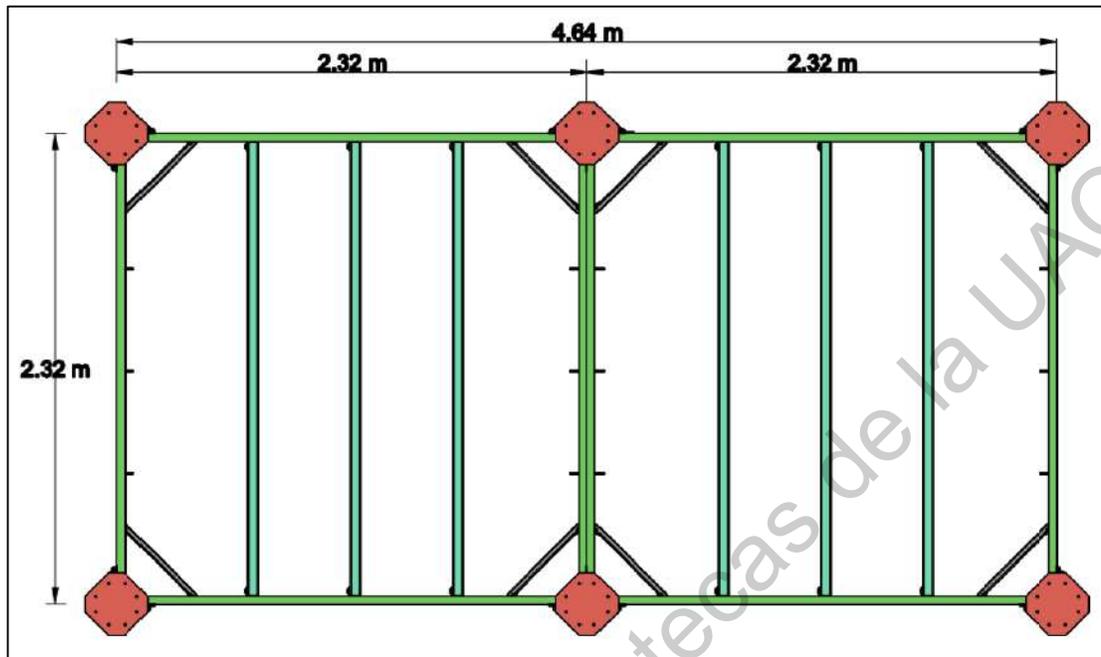


Figura 67. Vista del módulo M-10 en planta con un sistema de 6 conexiones universales H-1.

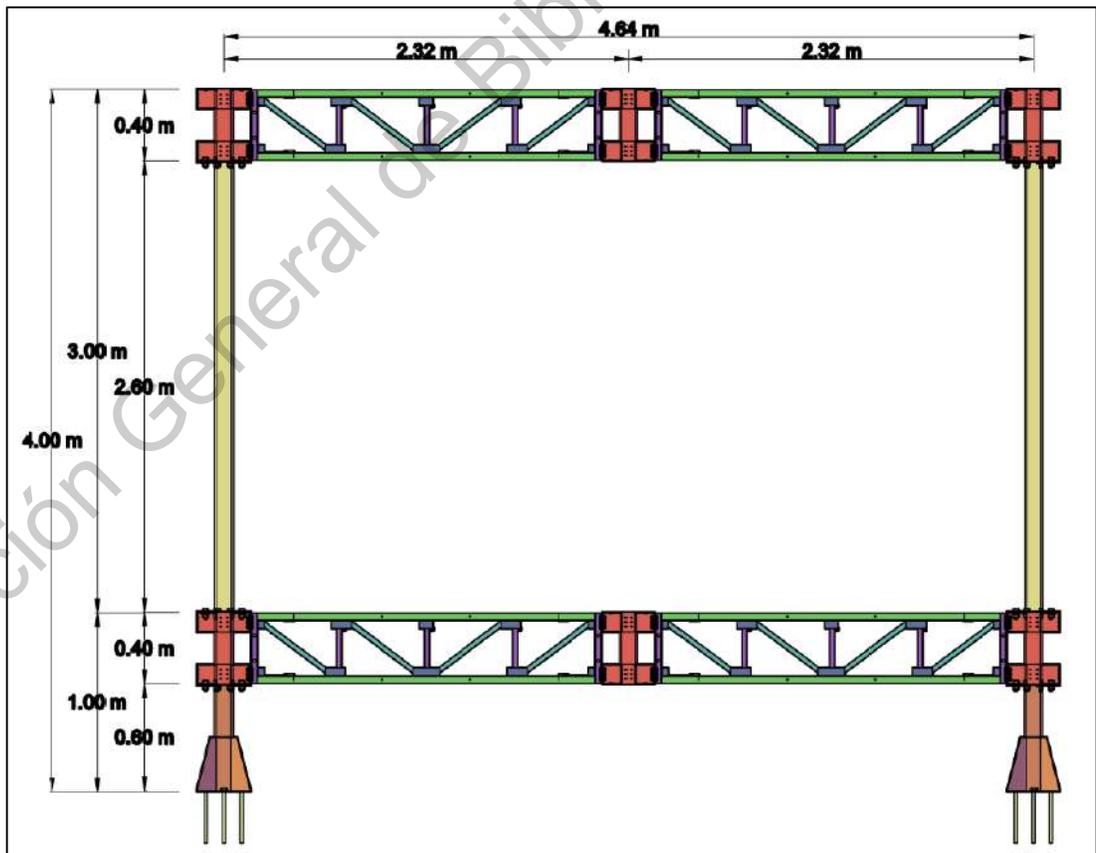


Figura 68. Vista del módulo M-10 en corte longitudinal.

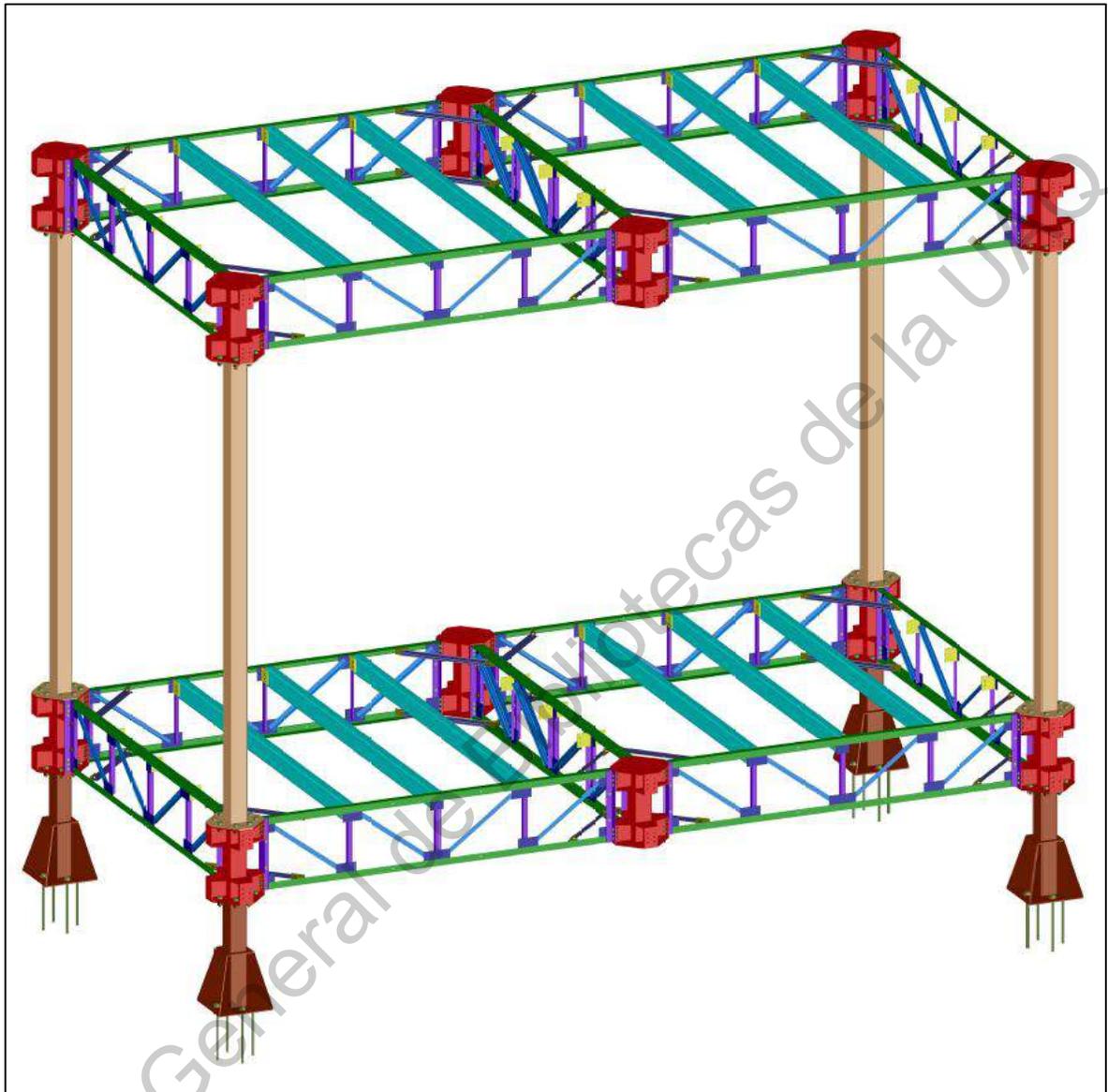


Figura 69. Vista isométrica de un módulo M-10 conformado con un sistema de módulos H-1

Un módulo M-10 (figura 69) está constituido por el conjunto de elementos: 4 columnas, 2 sistemas de entrepiso conformados por armaduras, en ellos se disponen longitudinalmente una serie de montenes, que en conjunto con las cuerdas superiores de las armaduras sostienen al piso y a la cubierta, respectivamente. Las armaduras cuentan diagonalmente de manera horizontal un conjunto de riostras para mantener la rigidez del módulo ante acciones de torsión de la estructura. En los extremos de las armaduras se ubican un conjunto de conexiones universales H-1 que le dan la facultad al módulo de ser multi-adaptable.

6.2.2 Columna base CB-100

Se diseñó también un elemento con el cual la columna estuviese asentada, éste consiste en un elemento de columna de la misma sección que las columnas de la estructura C-1, el cual en su parte superior contiene una placa que puede adaptarse a las conexiones universales H-1, y en la parte inferior consiste en una serie de elementos placa que conforman una base.

La columna base CB-100 (figura 70) puede colocarse directamente sobre la superficie donde se desea situar la estructura; recomendando sea un terreno plano con superficie de concreto o de asfalto; o bien, sobre un terreno compuesto por suelo seco con capacidad de carga desde 10 t/m^2 , aunque no es recomendable en caso de que éste se humedezca debido a que la capacidad del suelo podría reducirse.

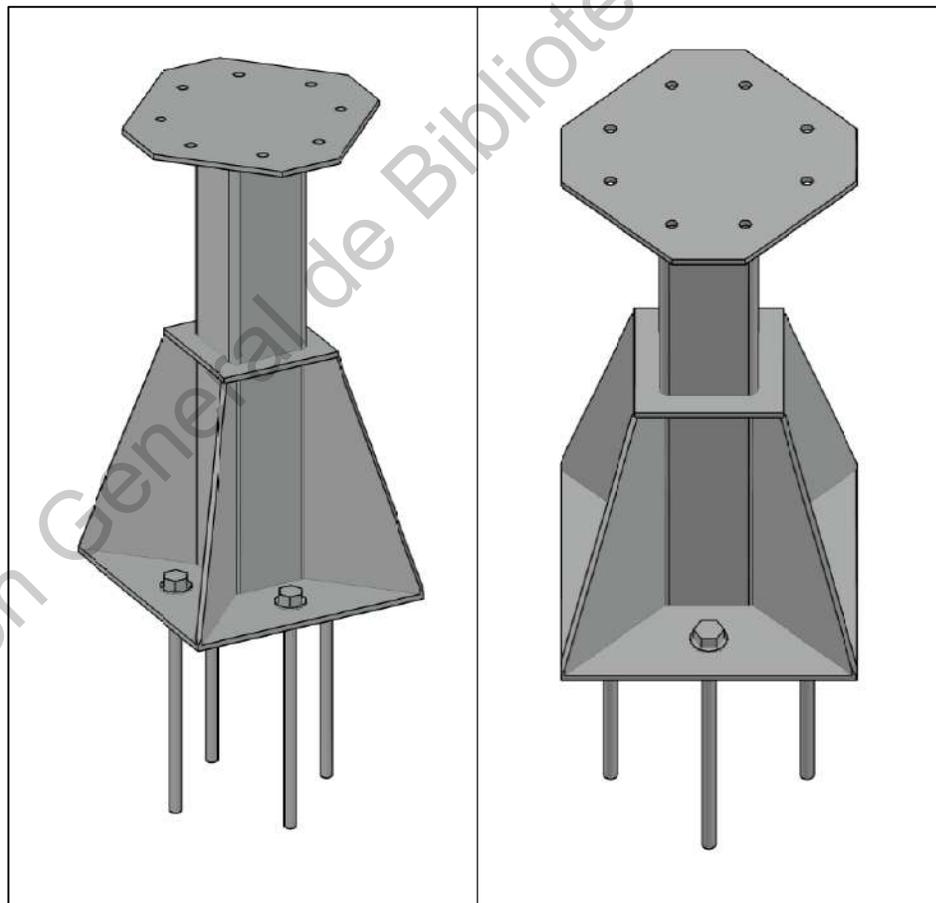


Figura 70. Columna base CB-100 a la que se le puede incorporar una conexión universal.

6.2.3 Conexión universal H-1

A través de un proceso de desarrollo, transformación y mejora de prototipos, se concibió y diseñó una conexión universal multi-adaptable al sistema estructural diseñado, a la cual se le nombró como conexión universal H-1, cuyas dimensiones generales son de 30 cm por lado y 40 cm de altura, se compone por elementos de acero soldados entre sí que en conjunto conforman la conexión universal. (figuras 71 - 75).

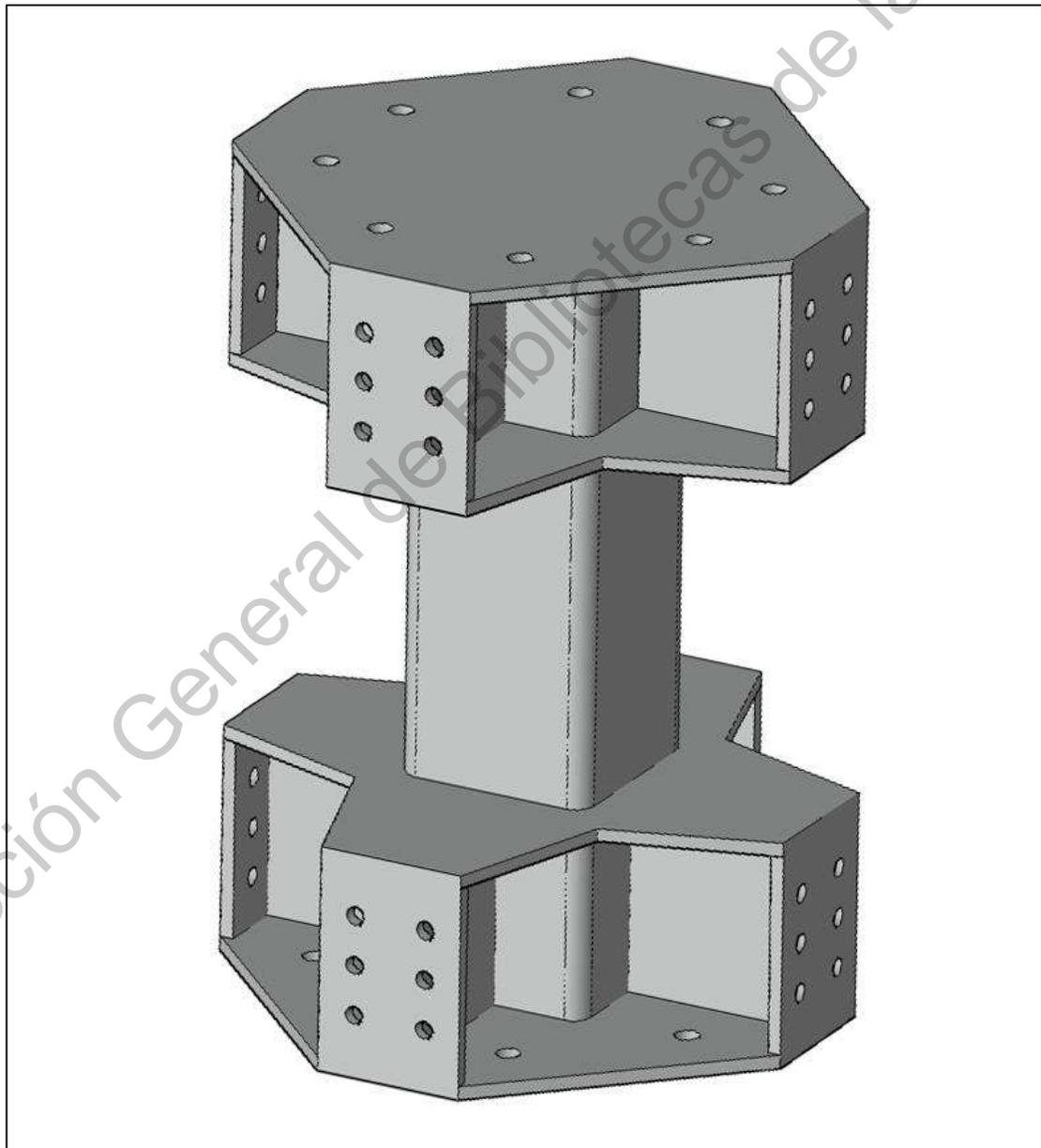


Figura 71. Conexión universal H-1.

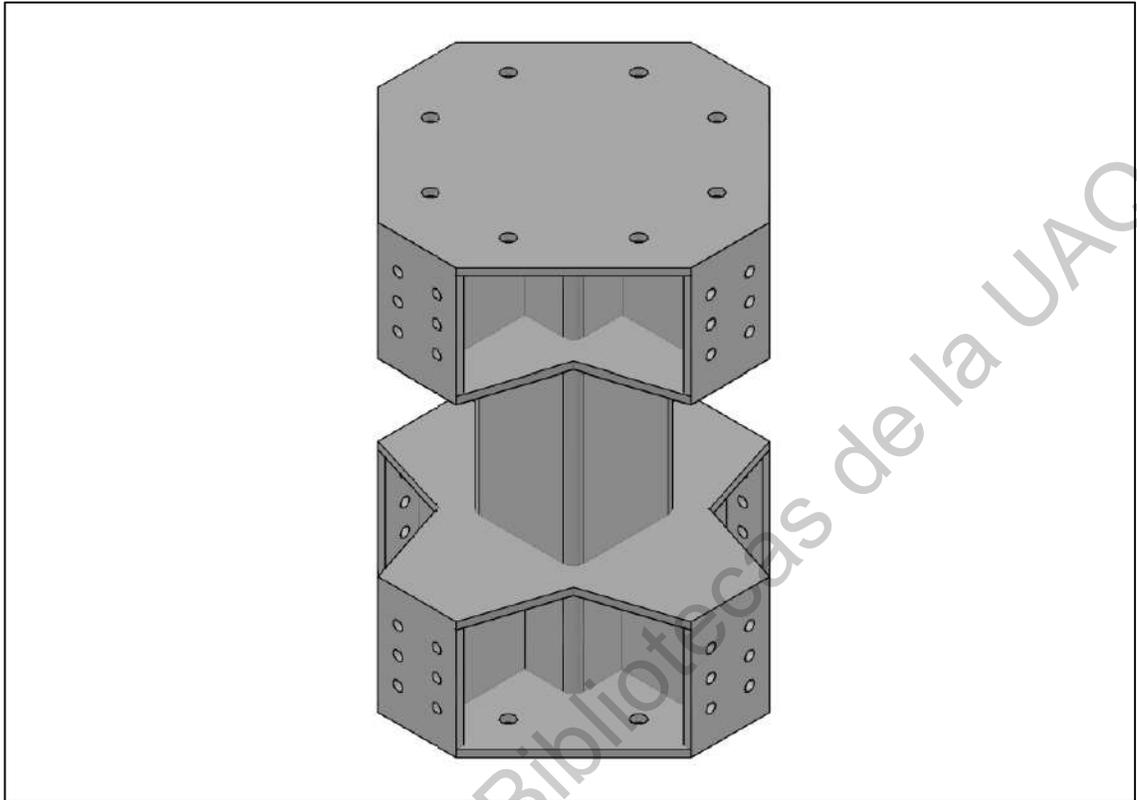


Figura 72. Vista isométrica diagonal de la conexión universal H-1.

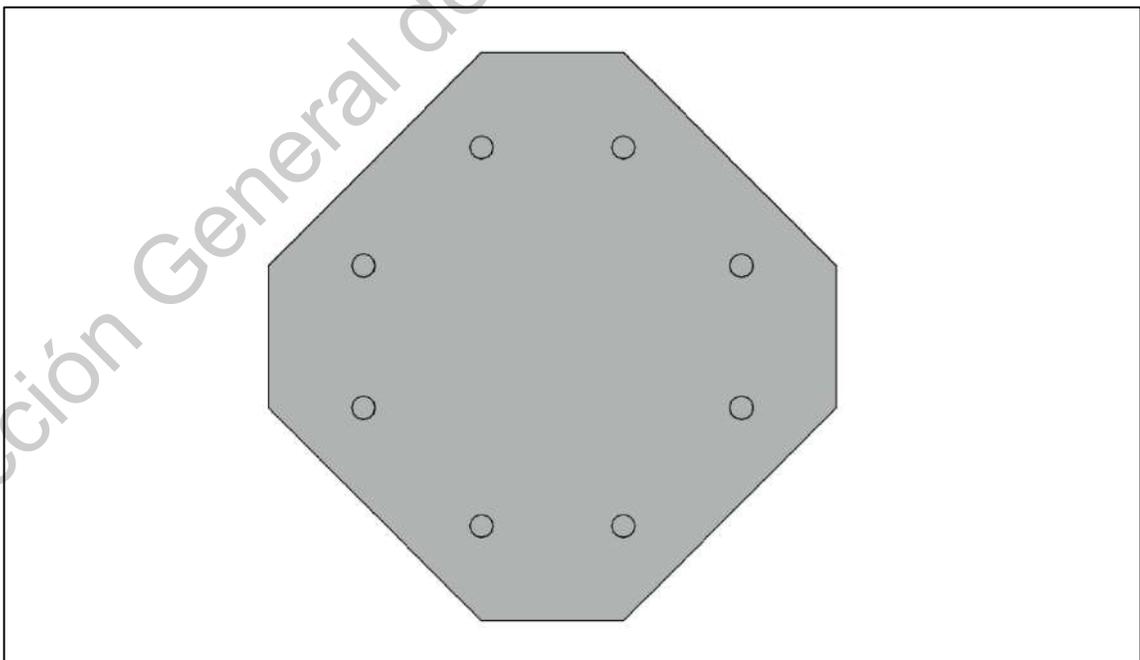


Figura 73. Vista en planta de la conexión universal H-1, donde se aprecia la placa tapa barrenada donde se acopla a una columna a través de uniones atornilladas.

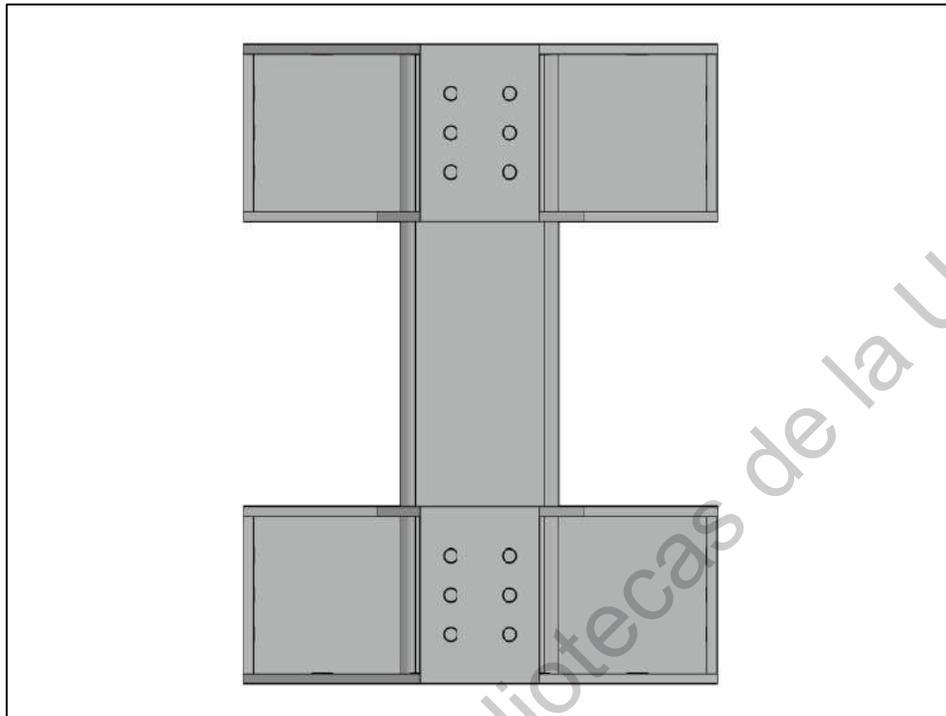


Figura 74. Vista lateral de la conexión universal H-1.

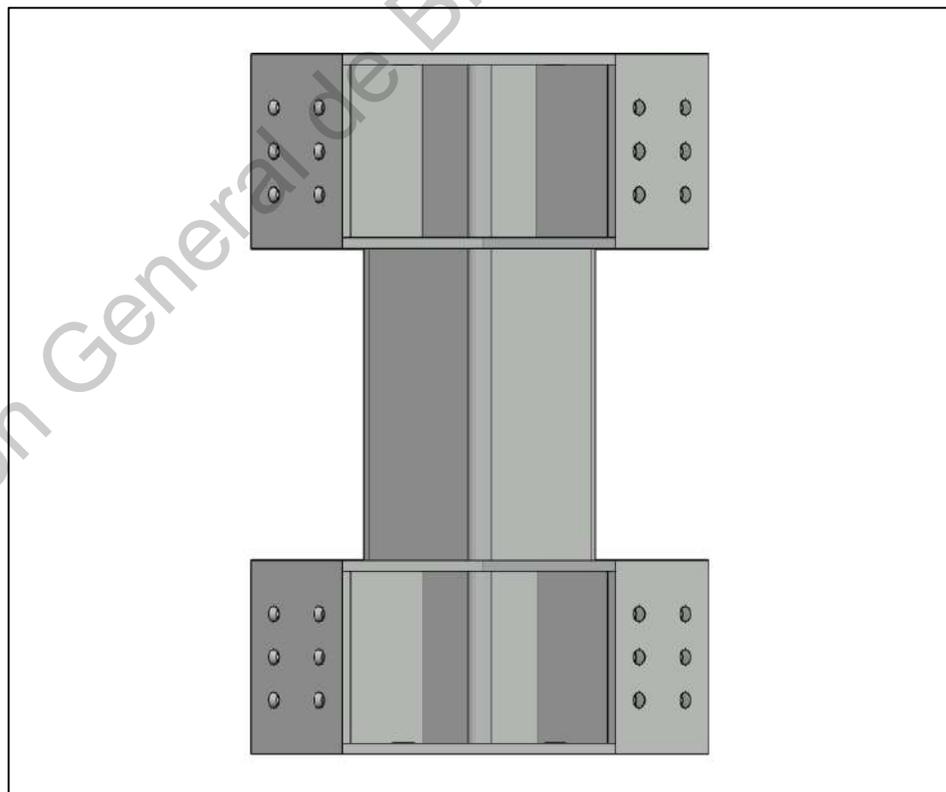


Figura 75. Vista lateral diagonal de la conexión universal H-1.

Cada conexión universal H-1 puede conectarse con 2 columnas: una en la parte inferior y otra en la superior; además pueden incorporarse hasta 8 armaduras con una unión atornillada tipo «*end plate*», 2 armaduras hacia cada extremo de la conexión universal, ya que en cada uno de sus 4 lados pueden incorporarse hasta 2 armaduras.

La conexión universal diseñada se constituye básicamente de un perfil PTR cuya sección cuadrada es la misma que la de las columnas, a ésta se le incorporan en sus extremos 2 placas tapa barrenadas para la unión entre la columna inferior y superior, respectivamente.

Además, cuenta con 2 diafragmas placa —que a través de unas placas de cortante dispuestas verticalmente y conectadas al perfil columna— se unen a sus respectivas placas tapas de sus extremos, absorbiendo los momentos de la estructura.

Este conjunto de placas sobresale hacia los 4 lados del perfil columna en cada uno de sus extremos, en los cuales se conectan una serie de placas de colindancia barrenadas dispuestas verticalmente que son las que se unen con las armaduras de la estructura.

La conexión universal H-1 es totalmente soldada en taller, así la instalación de los elementos de la estructura que se unen a ella «*in-situ*» es únicamente de manera atornillada.

Es muy importante mencionar que la conexión universal H-1 no interfiere en la geometría del módulo en cuanto a restar dimensiones en la incorporación de muros, puertas, ventanas, techo ni instalaciones; ya que ésta, al ubicarse dentro del sistema de entrepiso siempre estará oculta, debido a que el sistema de techo interior se coloca debajo de las cuerdas inferiores de la armadura superior, y sobre las cuerdas superiores de la misma, se coloca ya sea el piso o la cubierta, según corresponda el caso. En cuanto a muros interiores y exteriores, puertas y ventanas, éstos se pueden colocar a una altura máxima que comprende desde la cuerda superior del entrepiso en cuestión, hasta la cuerda inferior del entrepiso de superior. En lo correspondiente a las instalaciones, éstas pueden colocarse ocultas dentro del sistema de entrepiso y en muros. De esta manera la conexión universal H-1 queda oculta en la estructura y no obstruye a ningún elemento de acabados o de instalaciones.

6.2.4 Sistema modular M-10 con conexión universal H-1

La conexión universal H-1 está incorporada al sistema modular M-10, y juntos pueden anexar a otros módulos de manera multi-adaptable y sencilla, siendo una estructura con un montaje 100% atornillado, teniendo la facultad de poder ser desmontada, transportada a otro sitio y vuelta a montar, ya sea con la misma geometría u otra que se desee, sin impedimentos de acoplamiento para que puedan instalarse módulos de maneras diversas y casi ilimitadas.

La característica más destacada es su versatilidad, ya que un sistema de entrepiso de un módulo está constituido en su perímetro por 4 armaduras simples; donde si otro módulo se une a éste, en dicho lado coexistirán 2 armaduras juntas opuestas, que, al estar atornilladas entre sí, trabajan como un sistema, así se unen lateralmente a otro entrepiso. Cada armadura se acopla de manera independiente a las conexiones universales respectivas.

Si bien cada sistema de armaduras es independiente para su módulo correspondiente, cuando éste se acopla junto a otro módulo, el sistema de armadura simple se transforma en doble, ya que éstos pueden ser conectados a través de tornillos, trabajando estructuralmente unidos entre sí, dando continuidad lateralmente a los módulos a través de sus sistemas de entrepiso conformados por armaduras, y no sólo por la unión entre conexiones universales.

Cabe señalar que en un módulo existen 2 conexiones universales intermedias (por cada sistema de entrepiso) que no son unidas con columnas; éstas en cambio, tienen la facultad de unir una armadura intermedia perpendicular que le añade rigidez al módulo. La ubicación de dichas conexiones universales intermedias obedece a la cualidad del sistema modular M-10 de ser multi-adaptable, porque no sólo unen sistemas de armaduras; sino que también, a través de ellas se pueden acoplar módulos en dirección perpendicular al otro módulo de referencia, ya que la longitud de un módulo en su dirección más alargada es el doble que la longitud más corta del módulo. Además, si se llegara a requerir, en esta conexión universal intermedia puede instalarse también una columna en su parte inferior y/o superior, haciendo muy versátil la conectividad de dicha conexión universal con los módulos en diversas geometrías.

Los módulos pueden instalarse de diversas formas, entre ellas, las 3 más generales son:

- Elemento por elemento: donde sus piezas pueden ser llevadas al sitio de construcción mediante un transporte forma sencilla y ahí ser ensambladas de manera 100% atornillada. Este sistema de ensamblaje puede o no requerir de una grúa para su instalación, ya que puede instalarse manualmente con ayuda del acoplamiento de andamios y sistemas de polipastos.
- Módulos completos pre-ensamblados: se pueden acoplar en un único movimiento a otros módulos previamente instalados —ya sea que dichos módulos hayan sido transportados ya montados o que no— y en el sitio de construcción pueden ser montados a un costado de la estructura y luego ensamblados directamente con otros módulos. Un gran y muy valioso aporte de este sistema modular M-10 es que, en caso de optar por esta opción de ensamblaje de módulos completos, éstos pueden ser izados verticalmente tanto para su instalación como para su desinstalación, sin interferir geométricamente con ningún otro módulo, incluso si dicho módulo en cuestión se encontrase dentro de un sistema de 4 módulos laterales, uno por cada uno de sus lados, ya que cada uno cuenta con un sistema de armaduras propio e independiente a otros módulos. Este sistema de ensamblaje requiere grúa para su instalación.
- Sistema de entrepisos completos: se pueden armar en sitio o también pueden ser transportados ya armados. Dichos sistemas de entrepiso pueden ser ensamblados a la estructura, módulo por módulo o en sitio pueden unirse sistemas de entrepiso de diversos módulos y éstos ser instalados en la estructura como un conjunto. Este sistema de ensamblaje requiere grúa para su instalación.

A continuación (figuras 76 - 93), se presenta un conjunto de 8 módulos M-10 dispuestos simétricamente en 2 niveles (4 en el primer nivel y 4 en el segundo nivel), en donde se aprecia cómo está constituido este sistema cuando se le incorporan más módulos, a través de la adhesión de las conexiones universales como elemento de unión entre módulos:

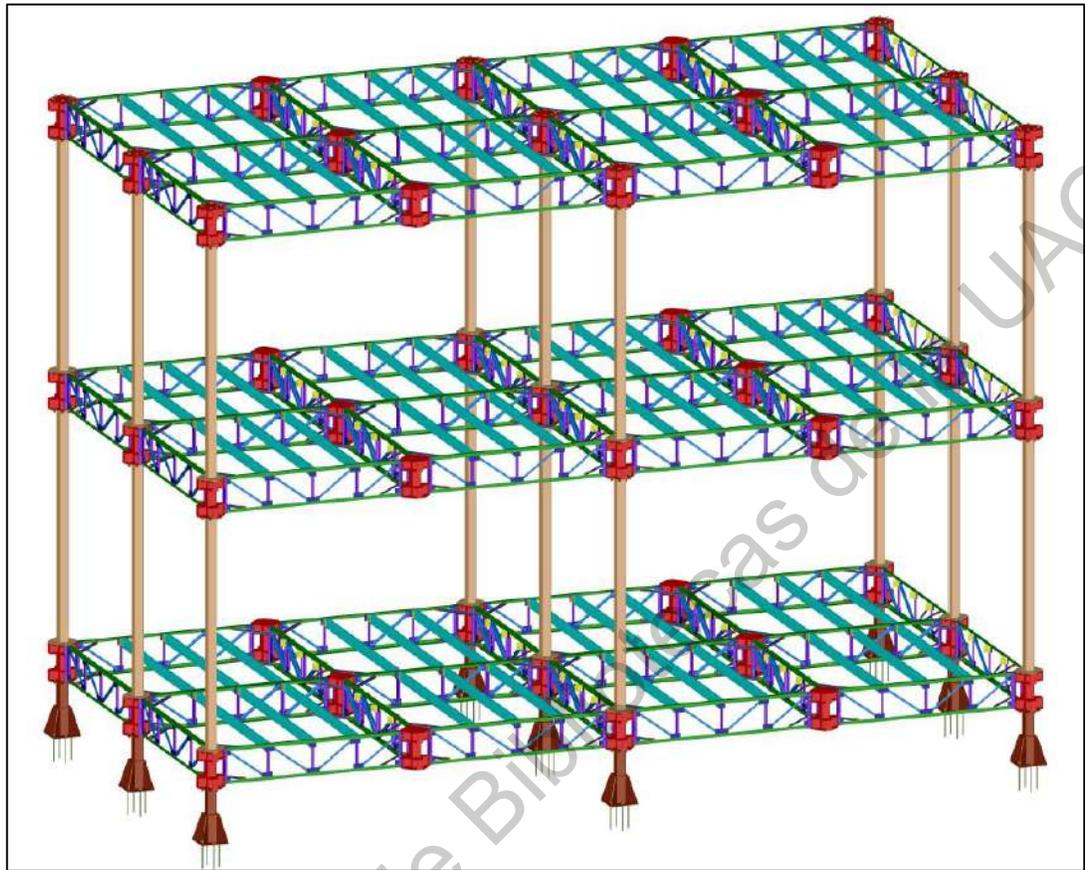


Figura 76. Vista isométrica de 8 módulos unidos entre sí, 4 por cada nivel.

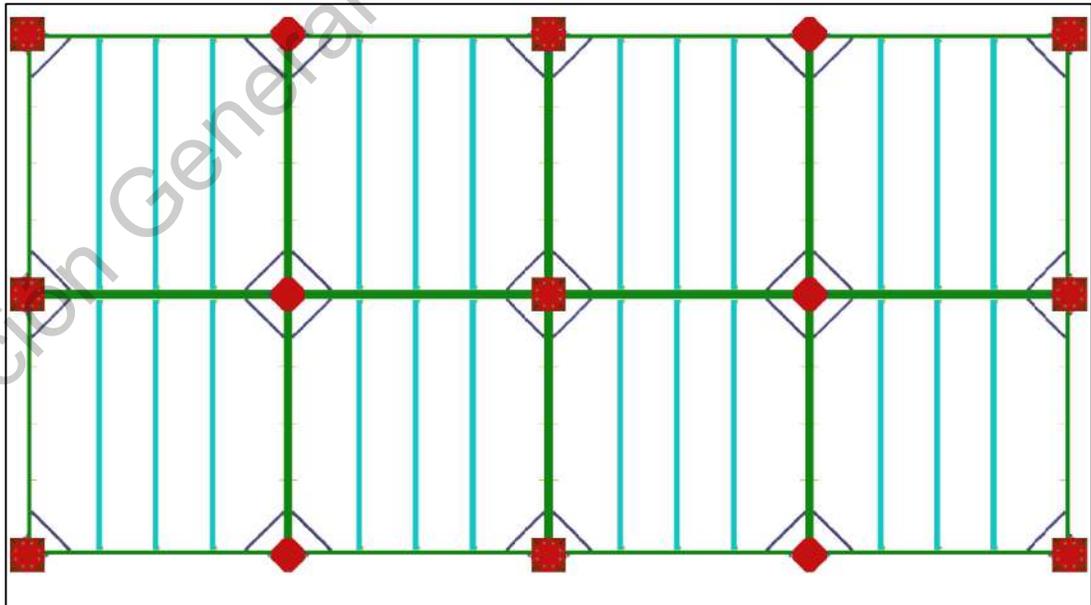


Figura 77. Vista en planta de la unión de 4 módulos, donde se aprecian las conexiones universales que los unen, tanto las que se incorporan a las columnas como las que no.

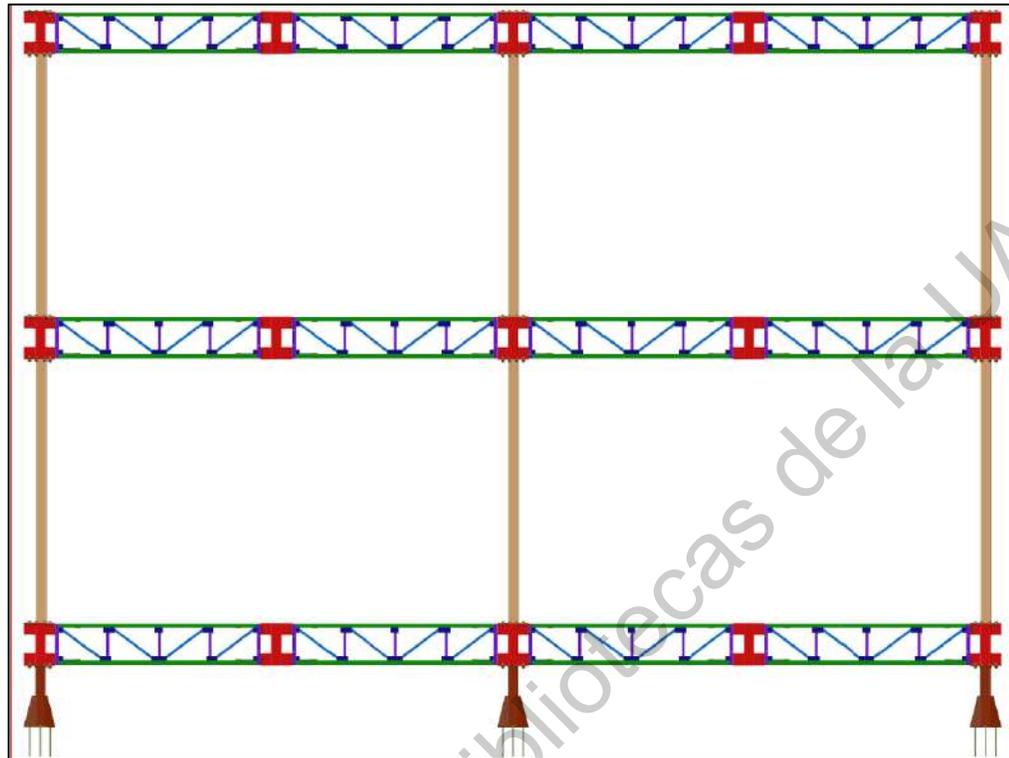


Figura 78. Corte longitudinal donde se aprecia la unión lateral entre 4 módulos.

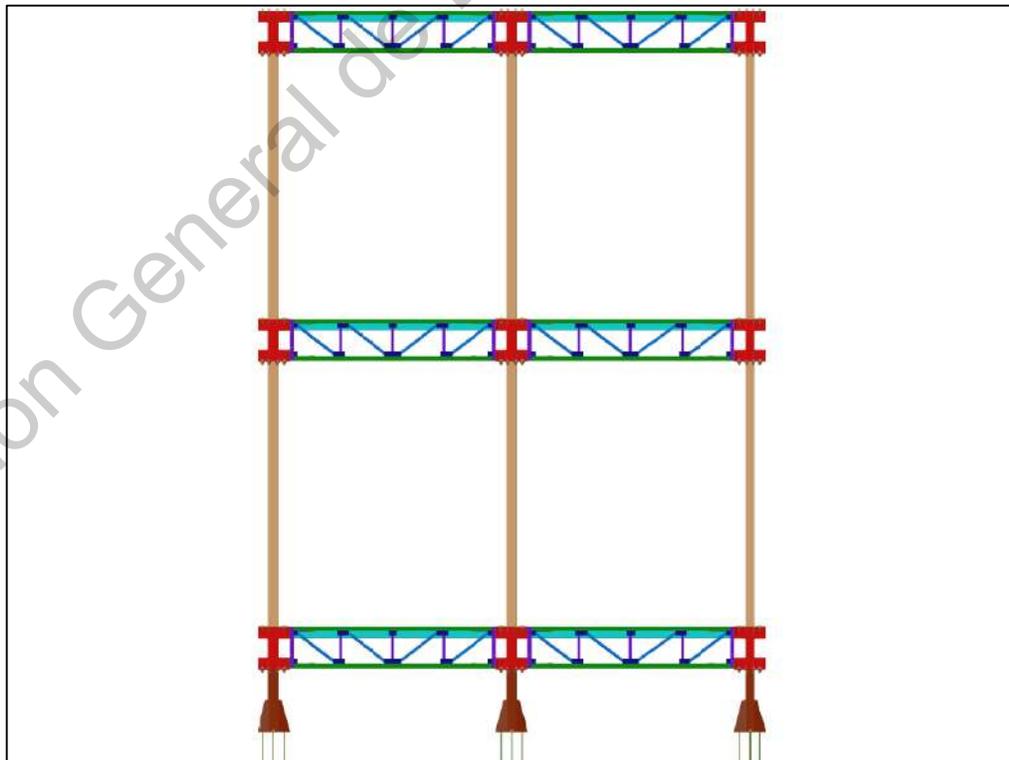


Figura 79. Corte transversal de la unión entre 4 módulos.

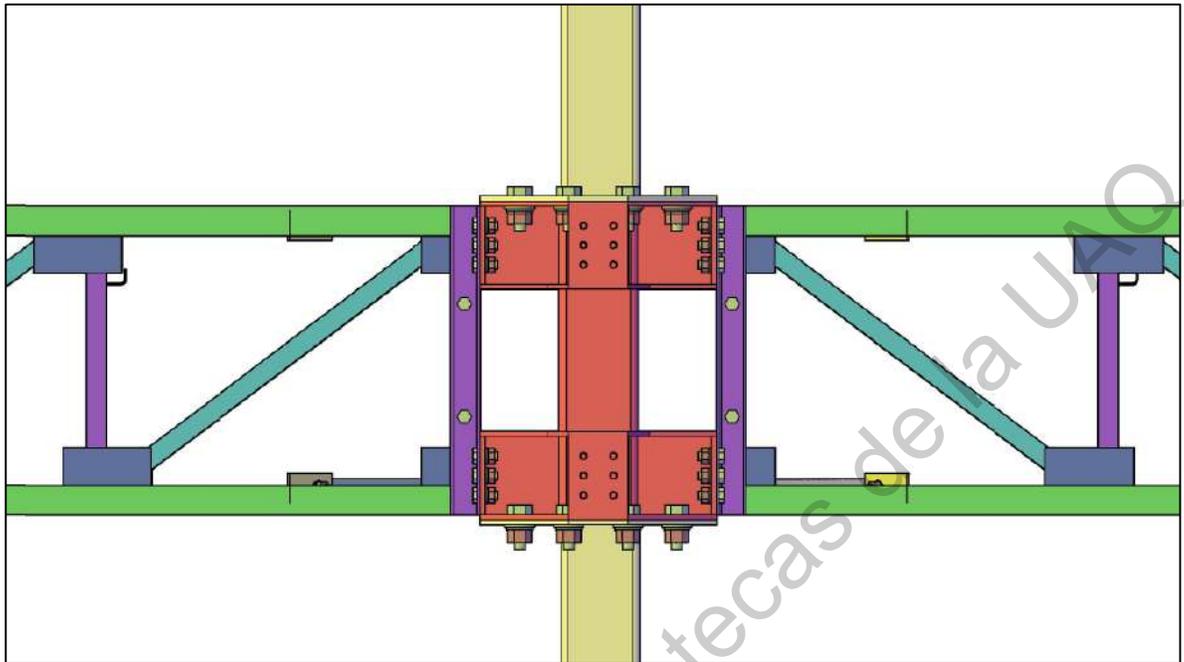


Figura 80. Corte longitudinal de una conexión universal de borde unida a 2 columnas y 2 armaduras simples.

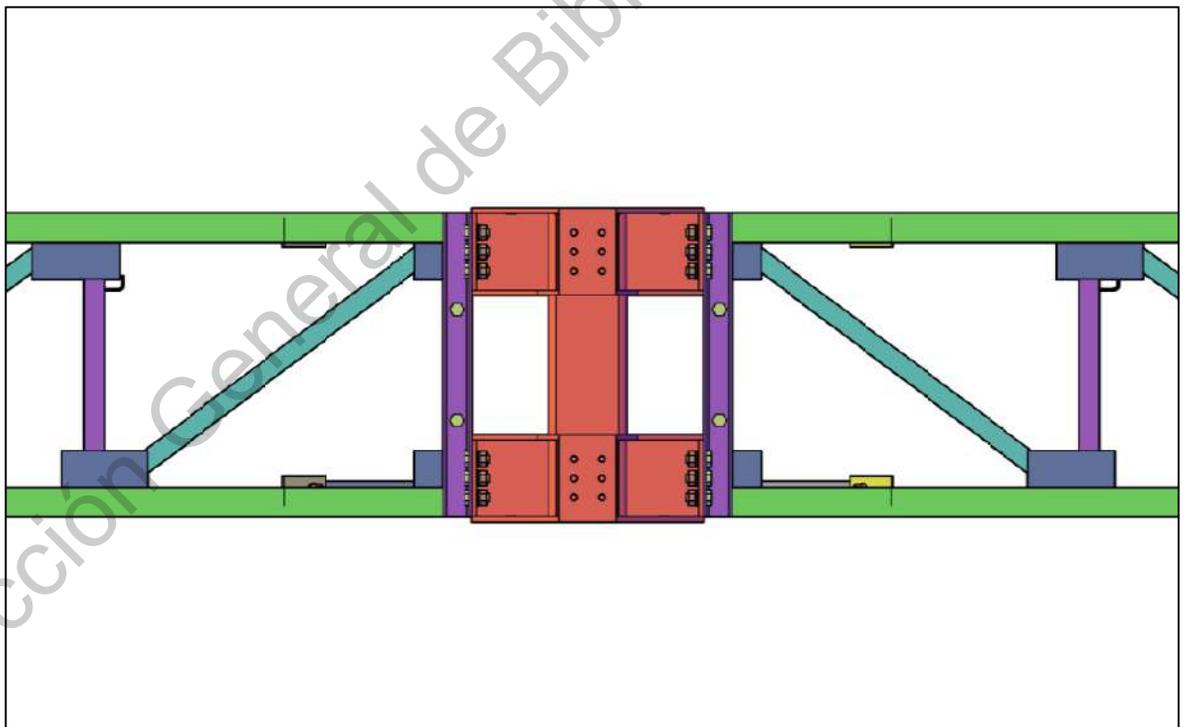


Figura 81. Corte longitudinal de una conexión universal sin columnas unida a 2 armaduras simples.

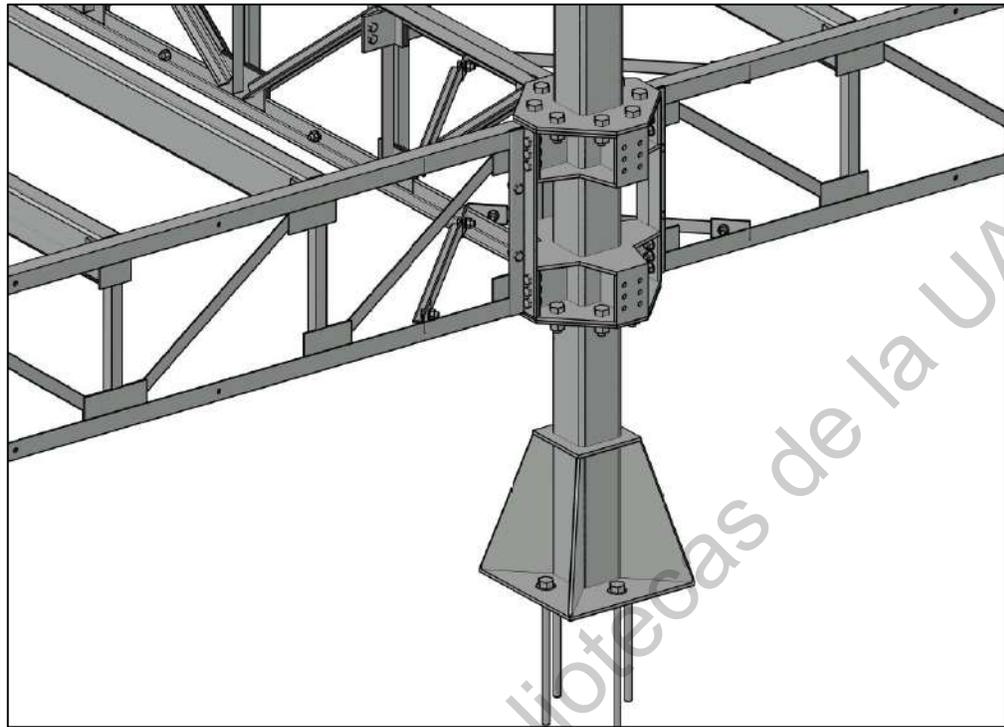


Figura 82. Vista isométrica de la columna base conectada a una conexión universal de borde.

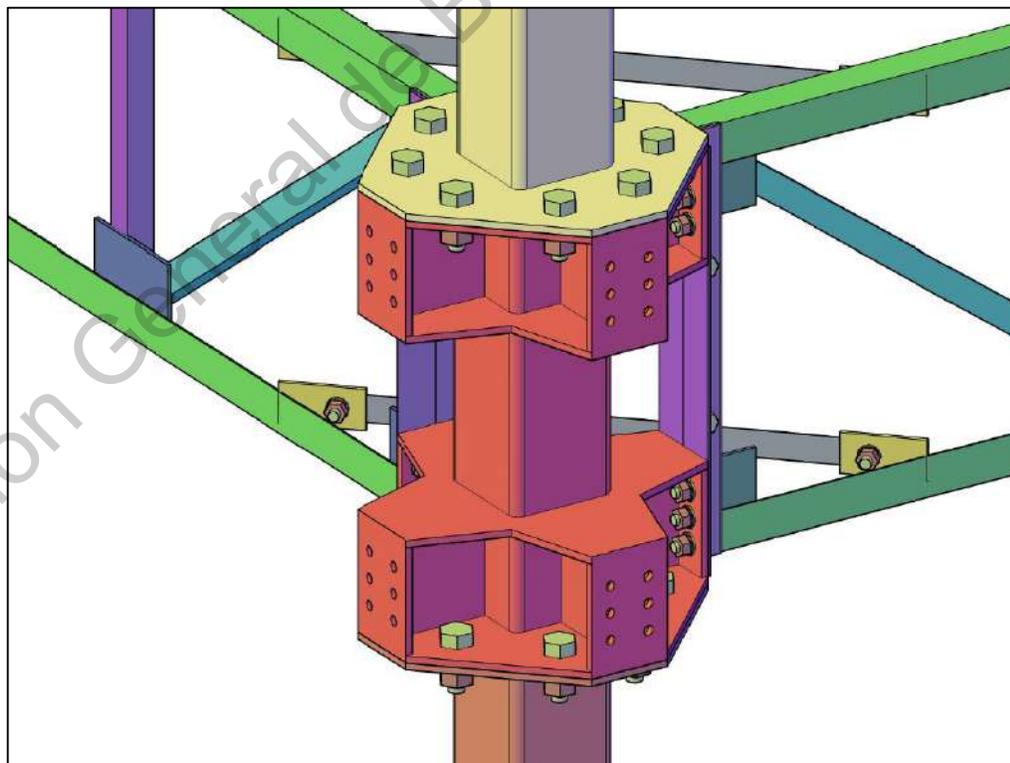


Figura 83. Conexión universal en una esquina unida a 2 armaduras simples y 2 columnas

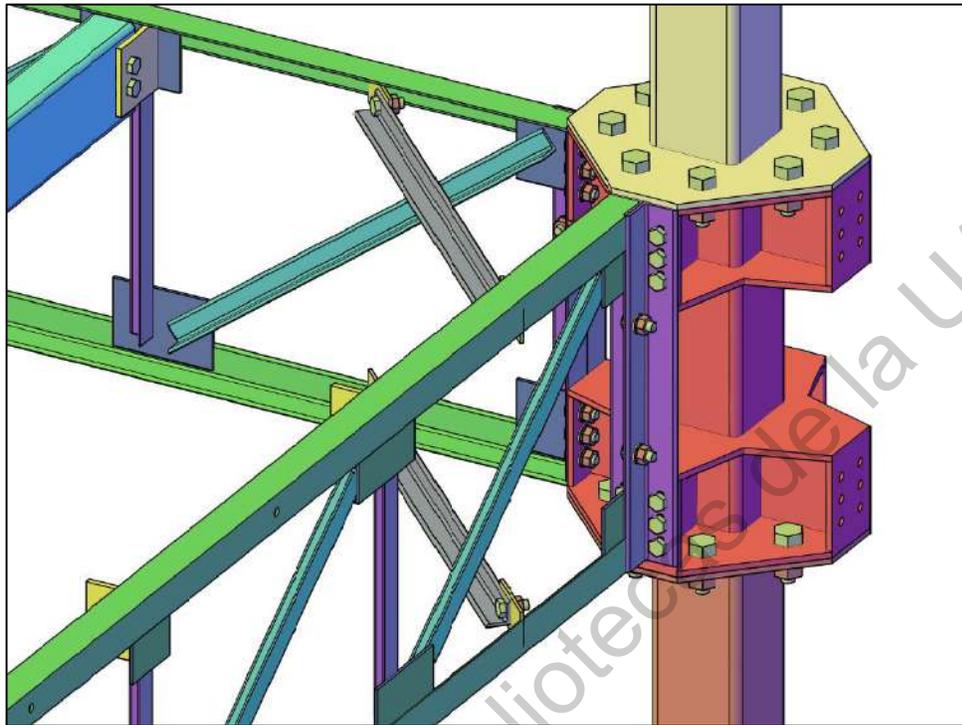


Figura 84. Otra vista de la conexión universal de esquina unida a 2 armaduras simples y 2 columnas.

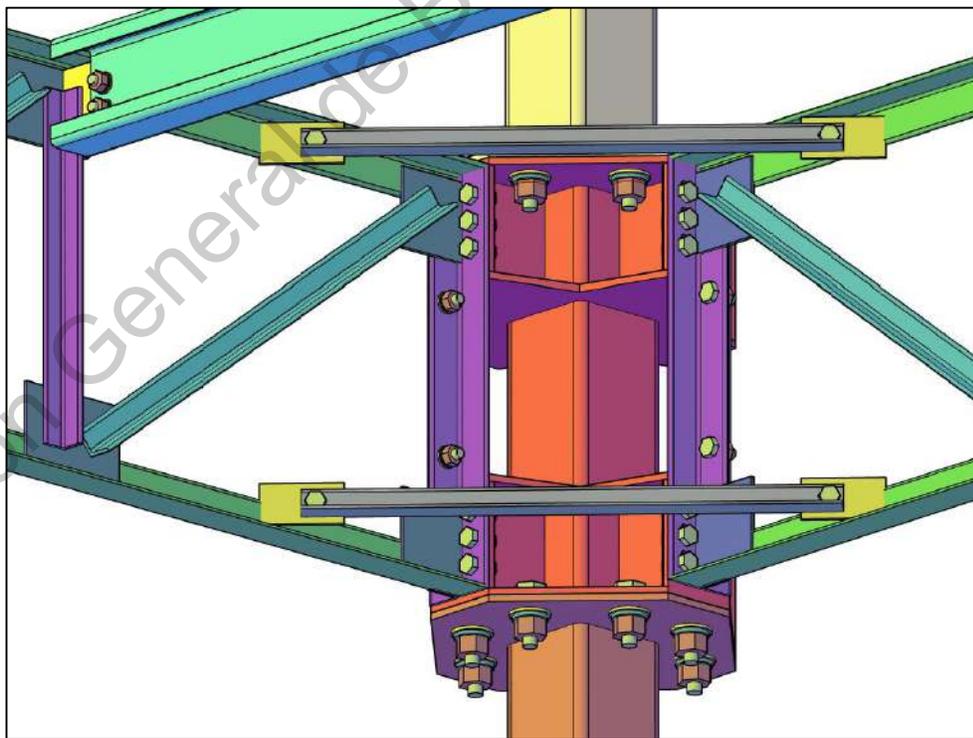


Figura 85. Vista isométrica inferior de la conexión universal desde el interior del módulo con 2 columnas y unida a 2 armaduras simples, a las cuales se le conectan las riostras diagonales horizontales.

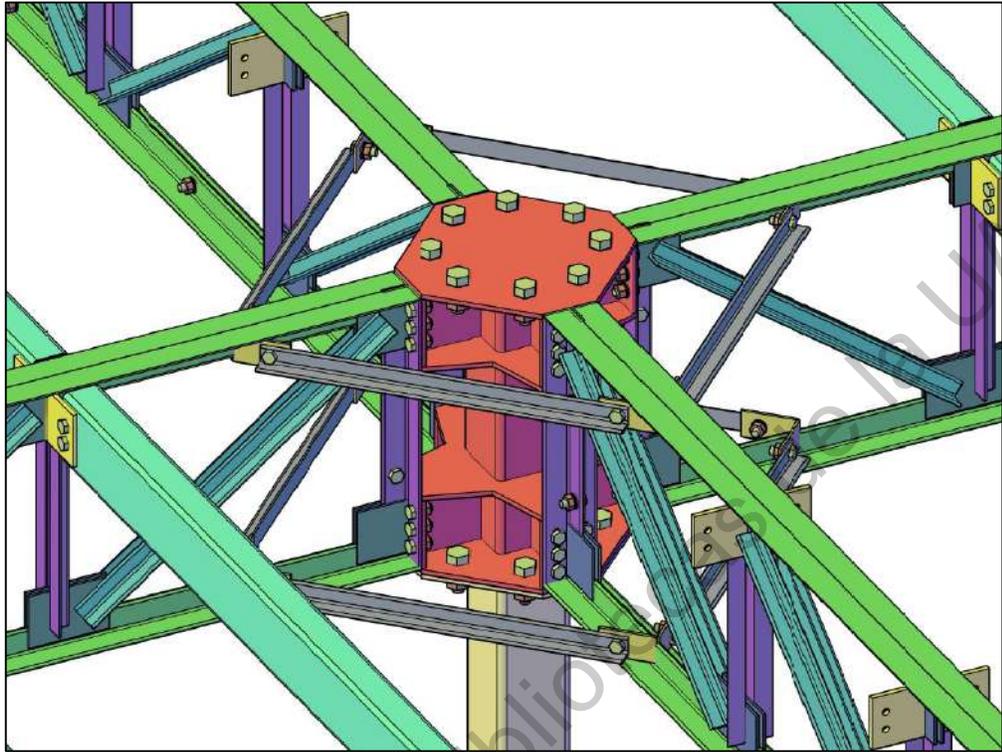


Figura 86. Conexión universal en cubierta con una columna inferior y 8 armaduras

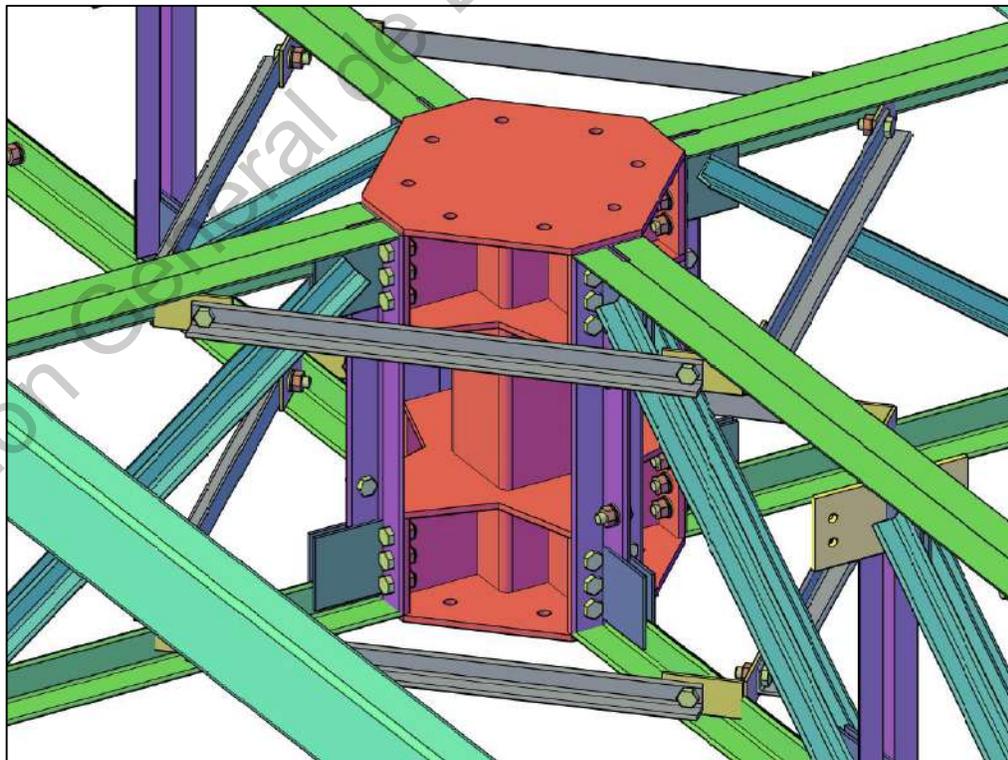


Figura 87. Conexión universal central sin columnas conectada a 8 armaduras.

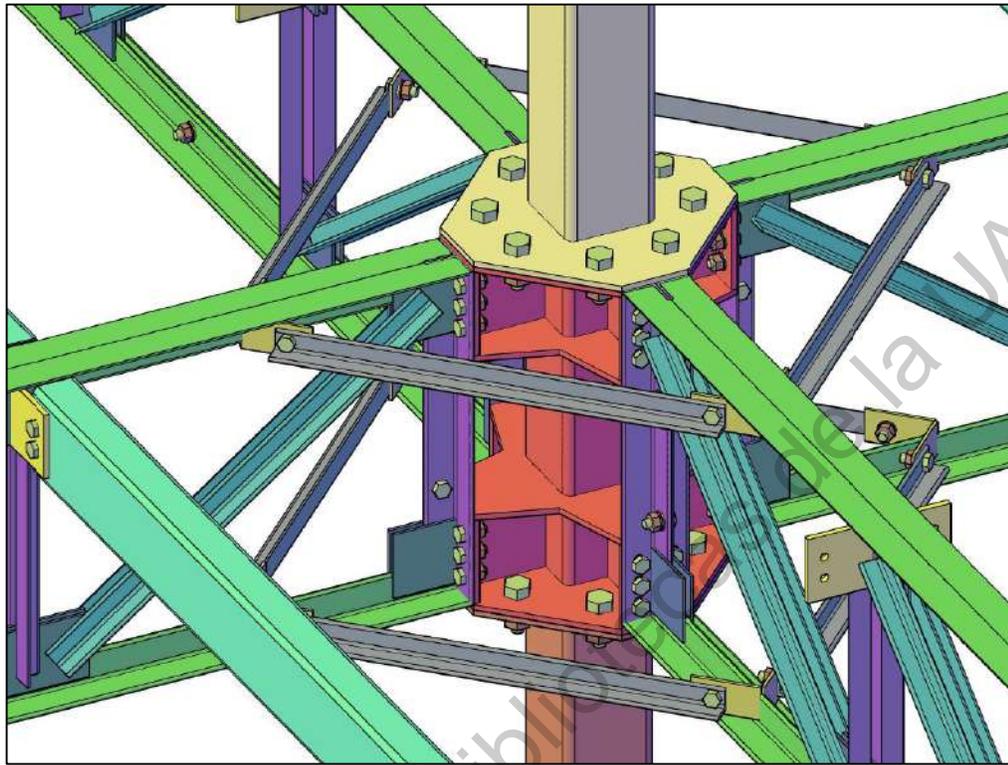


Figura 88. Conexión universal central con columnas conectada a 8 armaduras.

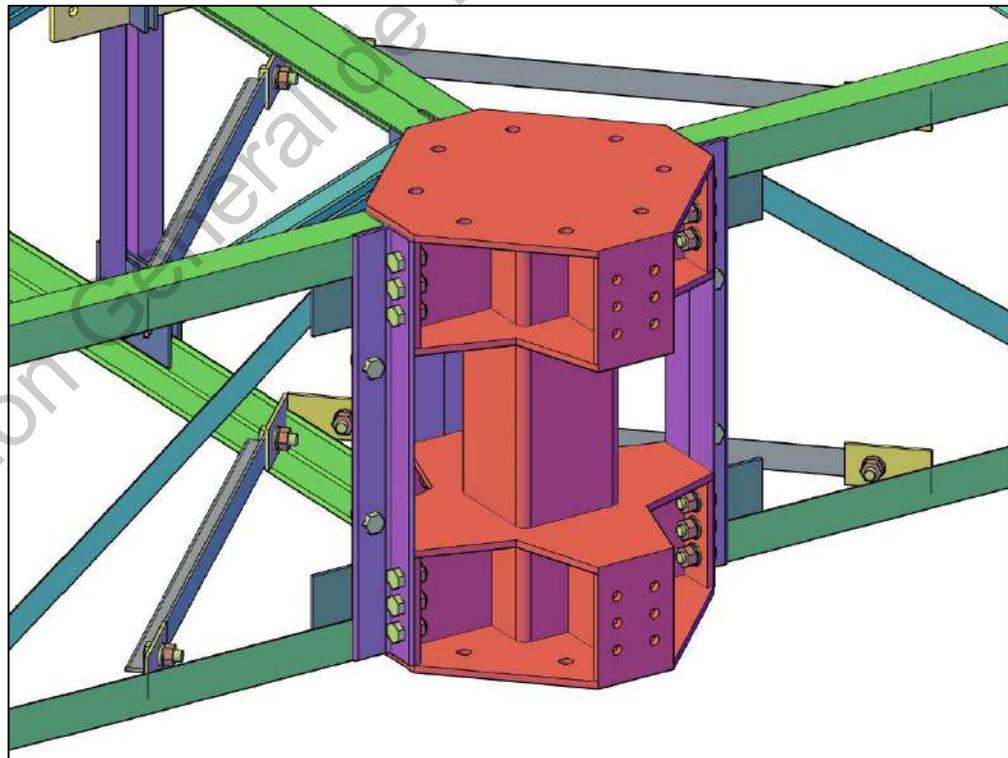


Figura 89. Conexión universal de borde sin columnas unida a 4 armaduras.

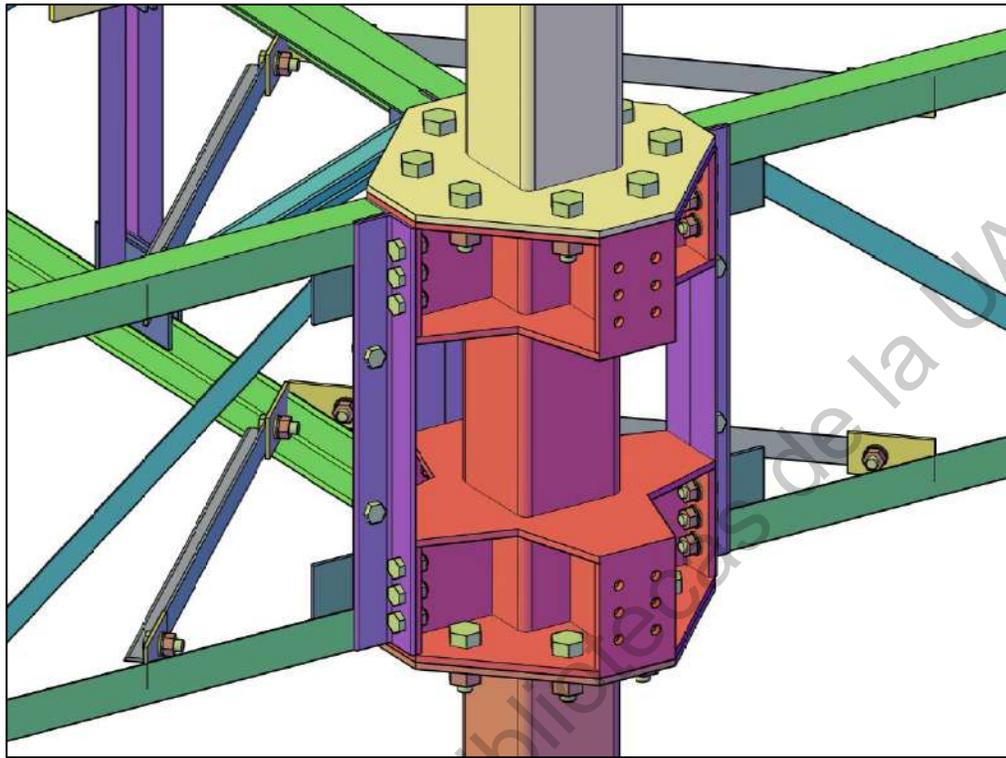


Figura 90. Conexión universal de borde con columnas unida a 4 armaduras.

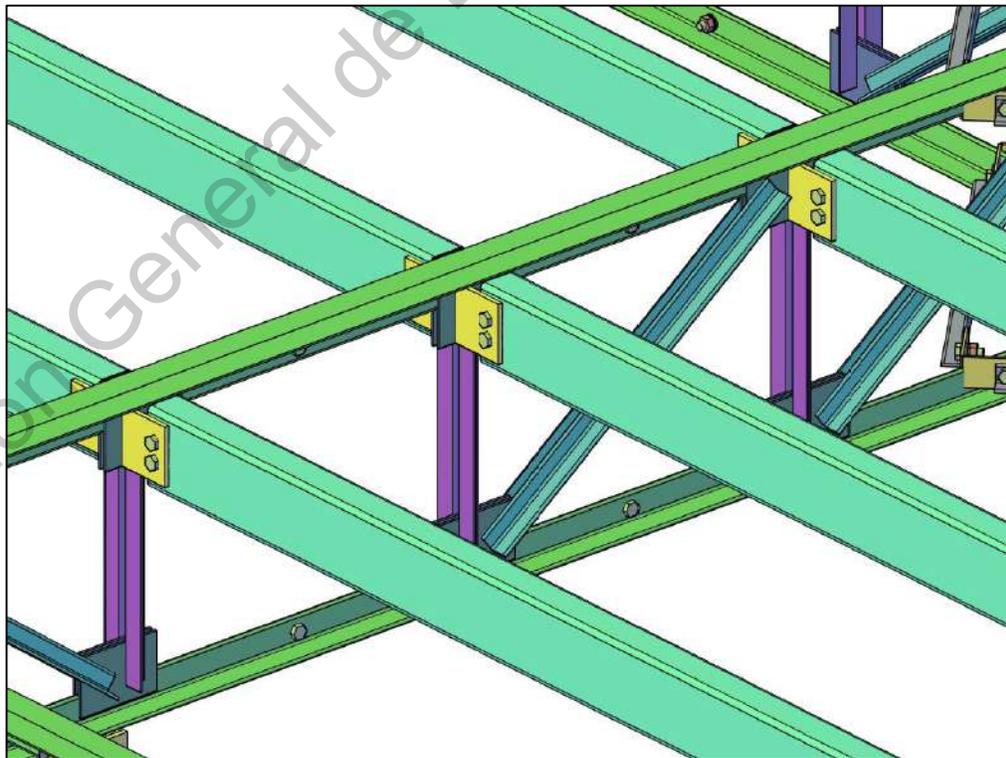


Figura 91. Conexión de los montenes de dos módulos hacia un sistema de armaduras doble central.

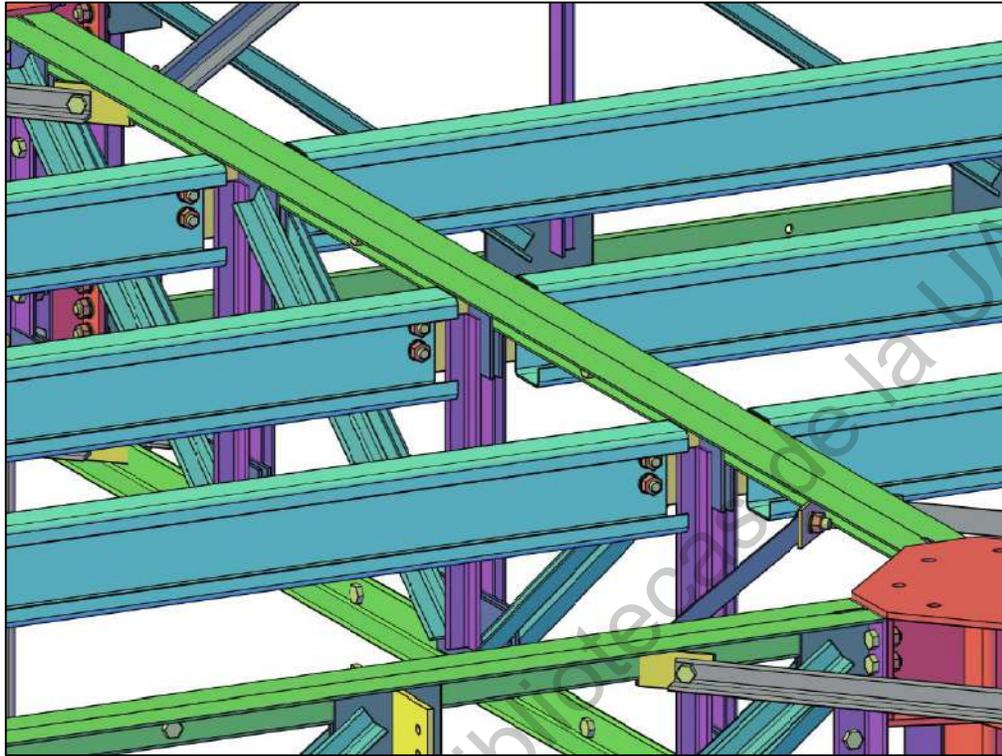


Figura 92. Vista de la conexión atornillada de los montenes a las placas de cortante de las armaduras.



Figura 93. Vista del sistema de armaduras doble en las caras sin montenes, también se pueden apreciar las riostras diagonales horizontales que le brindan mayor rigidez a la estructura.

6.2.5 Multi-adaptabilidad

6.2.5.1 Conexión universal H-1

La conexión universal H-1 puede adaptar varios elementos bajo diversas configuraciones, haciendo muy versátil su uso en la estructura, ya que puede acoplar módulos y columnas de manera multi-adaptable.

Si bien la conexión universal puede adaptarse de manera horizontal hasta con 8 armaduras, cada módulo que se acopla a través de sus armaduras a una conexión universal debe estar integrado por 2 armaduras dispuestas de manera perpendicular entre sí, es decir, en una única conexión universal se pueden unir 4 sistemas de entrepiso a través de 8 armaduras (figura 94).

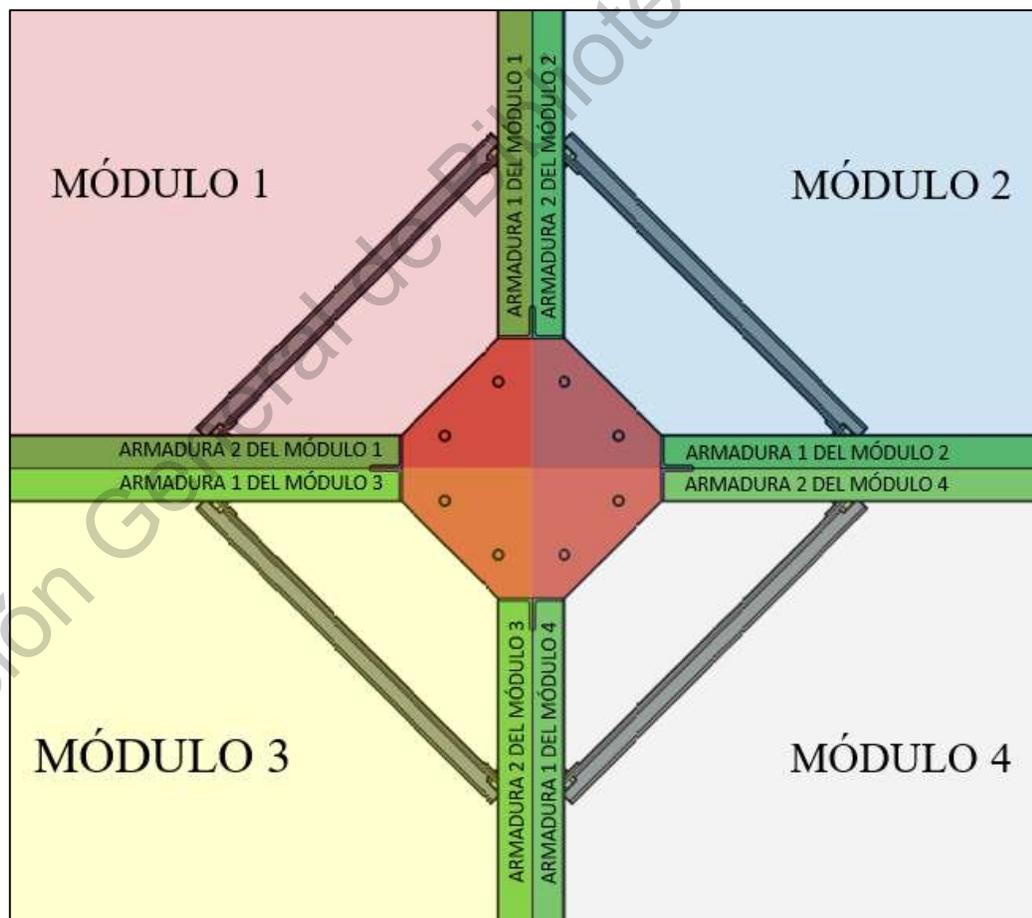


Figura 94. Vista en planta de la conexión universal H-1 en donde se adaptan un sistema de armaduras que conforman los sistemas de entrepiso de los módulos.

A continuación, se presentan las combinaciones posibles en las que la conexión universal H-1 se puede adaptar a los elementos que se unen en ella (tablas 1 y 2), tanto de manera vertical con las columnas superior e inferior, como horizontalmente con los sistemas de armaduras que conforman los entrepisos de los módulos, usando las siguientes ecuaciones de combinación:

$$C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (1)$$

$$C_{k\ Total}^n = C_1^6 + C_2^6 + C_3^6 + C_4^6 + C_5^6 + C_6^6 \quad (2)$$

Donde: k es el número de elementos colocados en un momento determinado; y n es el número total de elementos que se pueden unir a la conexión universal, los cuales son: columna inferior, columna superior, módulo 1, módulo 2, módulo 3 y módulo 4; teniendo en cuenta que a cada uno de los módulos le corresponde un sistema de entrepiso, a los cuales le pertenecen 2 armaduras perpendiculares entre sí que se unen a la misma conexión universal.

Tabla 1. Combinaciones en las que se pueden adaptar elementos a la conexión universal.

N	n	k	Fórmula	Total
C_1^6	6	1	$\frac{6!}{1!(6-1)!}$	6
C_2^6	6	2	$\frac{6!}{2!(6-2)!}$	15
C_3^6	6	3	$\frac{6!}{3!(6-3)!}$	20
C_4^6	6	4	$\frac{6!}{4!(6-4)!}$	15
C_5^6	6	5	$\frac{6!}{5!(6-5)!}$	6
C_6^6	6	6	$\frac{6!}{6!(6-6)!}$	1
Total				63

Por lo tanto, la conexión universal H-1 puede adaptarse bajo 63 configuraciones diferentes para recibir columnas y sistemas de entrepiso que forman módulos. En el caso particular de la geometría de la CSE se pueden configurar 10 de estas 63 posibles formas en que se pudieran adaptar las conexiones universales H-1, lo que abre la posibilidad de crear otras configuraciones diversas en las que se pueden acoplar módulos en la estructura.

Tabla 2. Desarrollo de las combinaciones posibles en las que la conexión universal H-1 puede acoplar a distintos elementos que se unen en ella (columnas y entrepisos que forman módulos), donde cada módulo se une a la conexión universal a través de 2 armaduras perpendiculares entre sí.

COMB	A	B	C	D	E	F	N	
1	X						1	
2	X		X				2	
3	X			X			2	
4	X				X		2	
5	X					X	2	
1*	6	X		X	X		3	
	7	X		X		X	3	
2*	8	X		X		X	3	
3*	9	X			X	X	3	
	10	X			X		X	3
4*	11	X			X	X	3	
	12	X		X	X	X	4	
	13	X		X		X	X	4
	14	X		X	X		X	4
	15	X			X	X	X	4
5*	16	X		X	X	X	X	5
	17	X	X					2
	18	X	X	X				3
	19	X	X		X			3
	20	X	X			X		3
	21	X	X				X	3
6*	22	X	X	X	X			4
	23	X	X	X		X		4
7*	24	X	X	X			X	4
8*	25	X	X		X	X		4
	26	X	X		X		X	4
9*	27	X	X			X	X	4
	28	X	X	X	X	X		5
	29	X	X	X		X	X	5
	30	X	X	X	X		X	5
	31	X	X		X	X	X	5
10*	32	X	X	X	X	X	X	6

COMB	A	B	C	D	E	F	N
33		X					1
34		X	X				2
35		X		X			2
36		X			X		2
37		X				X	2
38		X	X	X			3
39		X	X		X		3
40		X	X			X	3
41		X		X	X		3
42		X		X		X	3
43		X			X	X	3
44		X	X	X	X		4
45		X	X		X	X	4
46		X	X	X		X	4
47		X		X	X	X	4
48		X	X	X	X	X	5
49			X				1
50				X			1
51					X		1
52						X	1
53			X	X			2
54			X		X		2
55			X			X	2
56				X	X		2
57				X		X	2
58					X	X	2
59			X	X	X		3
60			X		X	X	3
61			X	X		X	3
62				X	X	X	3
63			X	X	X	X	4

COMB	Número de combinación en que puede acoplarse una conexión universal H-1.
A	Columna inferior.
B	Columna superior.
C	Entrepiso de módulo de lado 1 (con dos armaduras perpendiculares unidas a la conexión).
D	Entrepiso de módulo de lado 2 (con dos armaduras perpendiculares unidas a la conexión).
E	Entrepiso de módulo de lado 3 (con dos armaduras perpendiculares unidas a la conexión).
F	Entrepiso de módulo de lado 4 (con dos armaduras perpendiculares unidas a la conexión).
N	Cantidad de elementos conectados a la conexión (columnas y/o módulos).
*	Número de configuración que la conexión universal es adaptable a la geometría de la CSE.

6.2.5.2 Sistema modular M-10

El sistema modular M-10 es muy versátil ya que puede combinarse con otros módulos para crear geometrías muy diversas. A continuación, se presenta un diagrama de ubicaciones representativas, mas no limitativas, en las cuales diversos módulos pueden conectarse a través de la conexión universal H-1 a un módulo de referencia (figura 95). No todas estas ubicaciones pueden darse al mismo tiempo, pero sí combinarse con las que son compatibles entre sí para crear una configuración única entre cientos de miles posibles. Todas son considerando un sólo y mismo nivel (contemplando planta baja), pero también, el módulo de referencia podría estar ubicado en el segundo nivel, tanto cuando sólo existan 2 niveles, como cuando existan 3 niveles, creando millones de combinaciones posibles en que un único módulo M-10 puede adaptarse a otros.

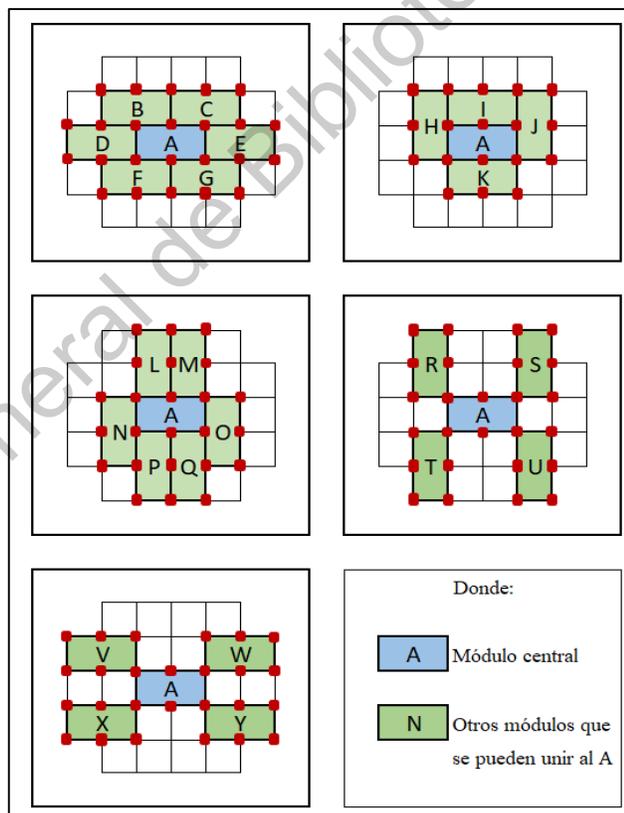


Figura 95. Ubicaciones en las que pueden situarse diversos módulos respecto a un módulo central “A”, usando el mismo sistema de conexiones universales H-1 que el del módulo de referencia. Las configuraciones de dichas ubicaciones pueden crear una gran variedad de combinaciones posibles en las que podrían disponerse los módulos respecto a otro de referencia.

6.3 Vivienda con sistema modular multiadaptable M-10

El sistema modular M-10 diseñado se aplicó de manera analítica a la CSE que fue construida en la FI-UAQ (figura 96), respetando la geometría y dimensiones de ésta; siendo una estructura con un peso ligero, con mayor resistencia en sus elementos horizontales, con menores deflexiones y menores desplazamientos nodales que la CSE, contemplando las actualizaciones de la reglamentación correspondiente.

El sistema modular M-10 hace posible que sus elementos en los nodos columna-trabe se conecten a través de una única conexión, la H-1, y no a través de las 9 diferentes que cuenta la CSE en los nodos columna-trabe, haciendo los procesos de fabricación y montaje más rápidos, fáciles y, por ende, con menores costos, ya que además incorpora un sistema prefabricado modular de muros que pueden instalarse en menor tiempo que los muros con los que cuenta la CSE, que son de Tablaroca® y Durock® convencional.

Aplicando este sistema constructivo se puede montar la estructura y acoplar sus muros, sistemas de entrepiso, cubiertas e instalaciones en un tiempo muy corto.

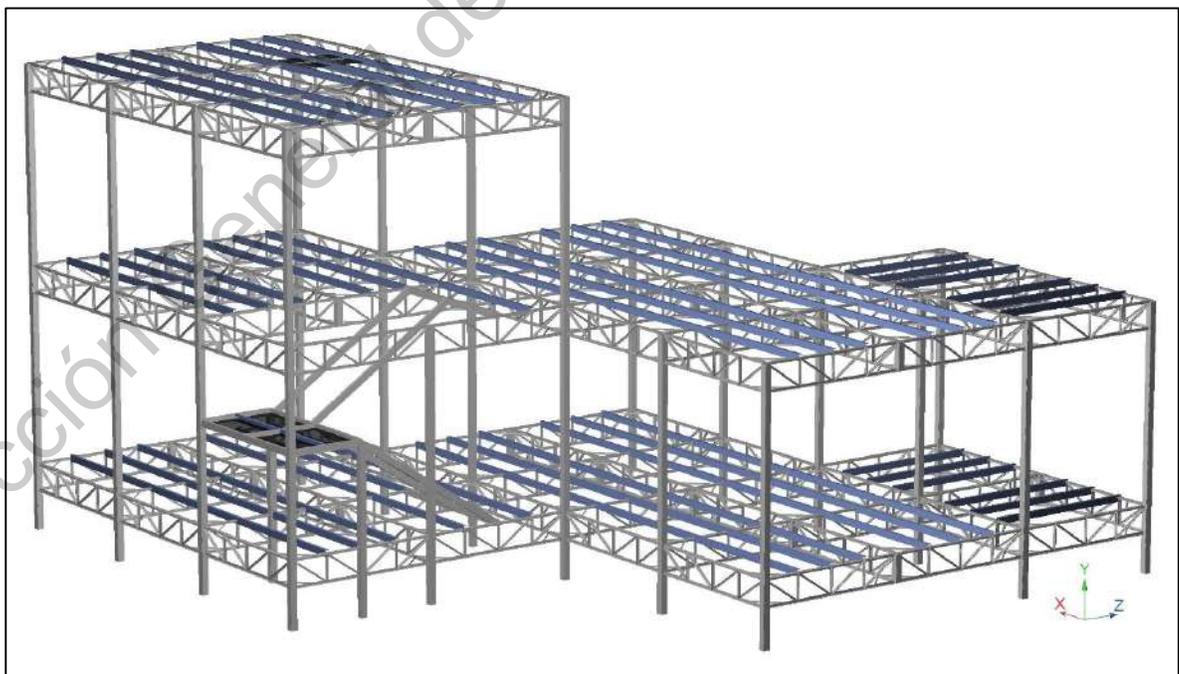


Figura 96. Estructura de acero de la vivienda con el sistema de módulos multiadaptable M-10.

6.4 Cálculo estructural de la vivienda

Se realizó el cálculo estructural del sistema modular M-10 bajo la configuración geométrica de la CSE en el software RAM Elements, al cual se le añadió la información necesaria para obtener los diversos esfuerzos a la cual está sometida la estructura. Esta información es sobre las combinaciones de carga, las secciones y materiales de los elementos, sus condiciones de frontera, la carga muerta, la carga viva, la carga viva instantánea, viento en 2 direcciones horizontales perpendiculares y sismo en 2 direcciones horizontales perpendiculares. Se optimizaron las secciones de los elementos de la estructura para que el peso fuese el menos posible, utilizando el sistema de armaduras dobles de módulo.

Dicha optimización se refiere a que se diseñó estructuralmente los elementos con la sección de perfil más ligero posible (dentro del catálogo de perfiles disponibles en México), pero bajo el criterio de homogenización de la sección de todos los elementos de un mismo tipo. De tal forma que todos los elementos cumplen con la resistencia requerida, algunos con la capacidad de resistencia cercana a su límite, pero la mayoría se encuentran bajo un porcentaje alto de capacidad respecto a la requerida, debido a esa homogenización de los elementos de un mismo tipo, que hace más práctica la construcción.

6.4.1 Secciones

En la vivienda se emplearon secciones según el diseño estructural (tablas 3 - 9).

Tabla 3. Tipo de sección por elemento.

Elemento	Nomenclatura	Perfil	Material	
Columna	COL	PTR 4" x 4" x 3/16"	A500, grado B, rectangular	
Viga secundaria (monten)	MT	4 MT 16	A570, grado 50, formado en frío	
Alfardas	ALF	PTR 4" x 2" x 3/16"	A500, grado B, rectangular	
Placas	PL	PL (espesores 1/4" y 1/8")	A-36	
Sistema de armaduras	Cuerda superior	C-SUP	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	A-36
	Cuerda inferior	C-INF	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	A-36
	Montante	MTT	2T LI 1" x 1" x 1/8"	A-36
	Diagonales	DIA	2T LI 1" x 1" x 1/8"	A-36
	Riostras	RIO	LI 1" x 1" x 1/8"	A-36

Tabla 4. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección PTR 4" x 4" x 3/16".

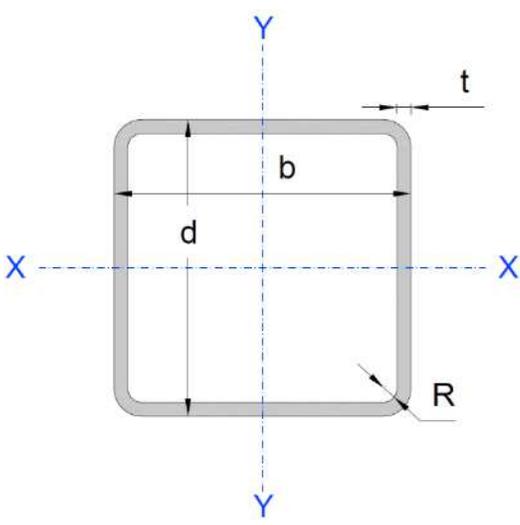
PTR 4" x 4" x 3/16" (Columnas)				
Imagen de la sección	Dimensiones y propiedades geométricas de la sección			
	Dimensión / Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
 <p>Diagrama de la sección PTR 4" x 4" x 3/16" (Columnas). Muestra un perfil rectangular con esquinas redondeadas. Las dimensiones indicadas son: Peralte (d), Ancho (b), Espesor (t) y Radio de curvatura (R). Se muestran también los ejes de referencia X-X' y Y-Y'.</p>	Peralte	d	10.16	cm
	Ancho	b	10.16	cm
	Espesor	t	0.47625	cm
	Radio de curvatura	R	0.47625	cm
	Área	A	16.65	cm ²
	Peso	W	14.00	kg/m
	Momento de inercia	I _x	258.50	cm ⁴
		I _y	258.50	cm ⁴
	Módulo de sección elástico	S _x	50.08	cm ³
		S _y	50.08	cm ³
	Módulo de sección plástico	Z _x	60.10	cm ³
		Z _y	60.10	cm ³
	Radio de giro	r _x	3.94	cm
		r _y	3.94	cm

Tabla 5. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección PTR 4" x 2" x 3/16".

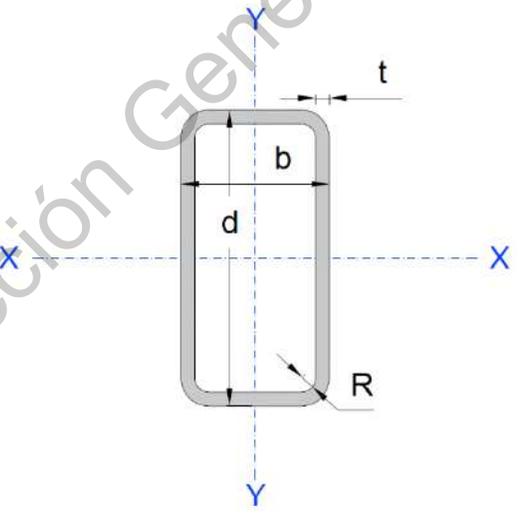
PTR 4" x 2" x 3/16" (Alfardas)				
Imagen de la sección	Dimensiones y propiedades geométricas de la sección			
	Dimensión / Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
 <p>Diagrama de la sección PTR 4" x 2" x 3/16" (Alfardas). Muestra un perfil rectangular con esquinas redondeadas. Las dimensiones indicadas son: Peralte (d), Ancho (b), Espesor (t) y Radio de curvatura (R). Se muestran también los ejes de referencia X-X' y Y-Y'.</p>	Peralte	d	10.16	cm
	Ancho	b	5.08	cm
	Espesor	t	0.47625	cm
	Radio de curvatura	R	0.47625	cm
	Área	A	12.19	cm ²
	Peso	W	10.22	kg/m
	Momento de inercia	I _x	152.30	cm ⁴
		I _y	50.80	cm ⁴
	Módulo de sección elástico	S _x	30.00	cm ³
		S _y	20.00	cm ³
	Módulo de sección plástico	Z _x	38.30	cm ³
		Z _y	23.40	cm ³
	Radio de giro	r _x	3.63	cm
		r _y	2.04	cm

Tabla 6. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección 4 MT 16.

4 MT 16 (Trabes secundarias)				
Imagen de la sección	Dimensiones y propiedades geométricas de la sección			
	Dimensión / Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
	Peralte	d	10.16	cm
	Ancho	b	5.08	cm
	Espesor	t	1.91	cm
	Radio de curvatura	R	1.91	cm
	Área	A	3.43	cm ²
	Peso	W	2.69	kg/m
	Distancia al centroide	\bar{X}	1.85	cm
	Momento de inercia	I_x	55.91	cm ⁴
		I_y	13.07	cm ⁴
	Módulo de sección elástico	S_x	11.01	cm ³
		S_y	4.04	cm ³
	Radio de giro	r_x	4.040	cm
		r_y	1.950	cm

Tabla 7. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección LI 1" x 1" x 1/8".

LI 1" x 1" x 1/8" (Riostras)				
Imagen de la sección	Dimensiones y propiedades geométricas de la sección			
	Dimensión / Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
	Peralte	d	2.54	cm
	Ancho	b	2.54	cm
	Espesor	t	0.3175	cm
	Radio de curvatura	R	0.3175	cm
	Área	A	1.50	cm ²
	Peso	W	1.19	kg/m
	Distancia al centroide	\bar{X}	0.76	cm
		\bar{Y}	0.76	cm
	Momento de inercia	I_x	0.90	cm ⁴
		I_y	0.90	cm ⁴
	Módulo de sección elástico	S_x	0.50	cm ³
		S_y	0.50	cm ³
	Módulo de sección plástico	Z_x	0.90	cm ³
Z_y		0.90	cm ³	
Radio de giro	r_x	0.79	cm	
	r_y	0.79	cm	

Tabla 8. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección 2T LI 1" x 1" x 1/8".

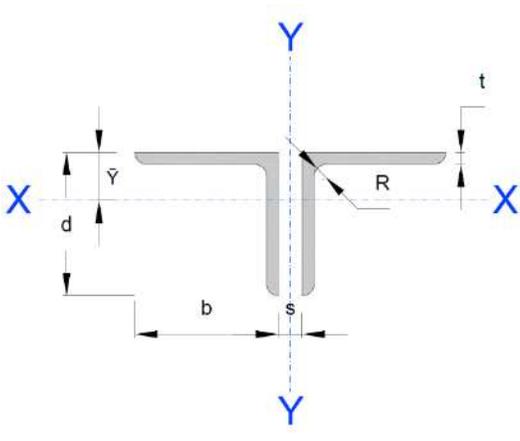
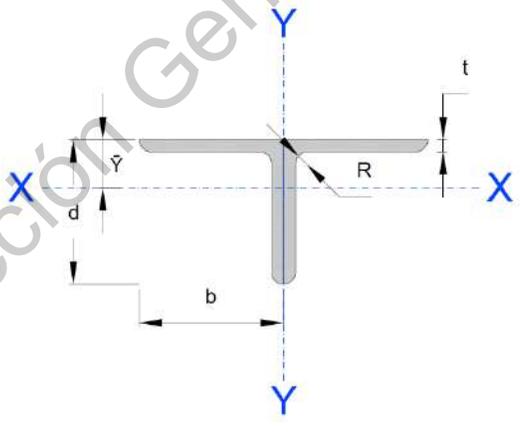
2T LI 1" x 1" x 1/8" (Diagonales y montantes de las armaduras)				
Imagen de la sección	Dimensiones y propiedades geométricas de la sección			
	Dimensión / Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
	Peralte	d	2.54	cm
	Ancho	b	2.54	cm
	Espesor	t	0.3175	cm
	Radio de curvatura	R	0.3175	cm
	Separación	S	0.64	cm
	Área	A	3.02	cm ²
	Peso	W	2.37	kg/m
	Distancia al centroide	\bar{Y}	0.52	cm
	Momento de inercia	I_x	1.80	cm ⁴
		I_y	5.27	cm ⁴
	Módulo de sección elástico	S_x	2.39	cm ³
		S_y	1.01	cm ³
	Módulo de sección plástico	Z_x	3.24	cm ³
		Z_y	1.81	cm ³
Radio de giro	r_x	0.77	cm	
	r_y	1.32	cm	

Tabla 9. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección 2T LI 1 1/2" x 1 1/2" x 1/8".

2T LI 1 1/2" x 1 1/2" x 1/8" (Cuerda superior e inferior de las armaduras)				
Imagen de la sección	Dimensiones y propiedades geométricas de la sección			
	Dimensión / Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
	Peralte	d	3.81	cm
	Ancho	b	3.81	cm
	Espesor	t	0.3175	cm
	Radio de curvatura	R	0.3175	cm
	Separación	S	0.00	cm
	Área	A	4.64	cm ²
	Peso	W	3.65	kg/m
	Distancia al centroide	\bar{Y}	0.83	cm
	Momento de inercia	I_x	6.47	cm ⁴
		I_y	11.80	cm ⁴
	Módulo de sección elástico	S_x	6.04	cm ³
		S_y	2.36	cm ³
	Módulo de sección plástico	Z_x	4.98	cm ³
		Z_y	4.25	cm ³
Radio de giro	r_x	1.18	cm	
	r_y	1.59	cm	

6.4.2 Materiales

Los materiales en la estructura principal son de acero estructural según el tipo de perfil (tabla 10), y los secundarios, son según su función y ubicación (tabla 11 y figura 97).

6.4.2.1 Materiales de la estructura de acero

Tabla 10. Materiales de la estructura principal según el tipo de perfil utilizado.

Perfil		Norma		Grado	Esfuerzo de fluencia (fy)		
ID	Nombre	Estados Unidos de América	México		(KSI)	(kg/cm ²)	(MPa)
PTR	Perfil tubular rectangular	ASTM A500/A500M-18	NMX-B-199-CANACERO-1986	B	46	3,235	317
MT	Monten	ASTM A1008/A1008M-18	NMX-B-225-CANACERO-2006	50	50	3,515	345
PL	Placa	ASTM A36/A36M-19	NMX-B-254-CANACERO-2008	36	36	2,530	248
L	Ángulo	ASTM A36/A36M-19	NMX-B-254-CANACERO-2008	36	36	2,530	248

6.4.2.2 Materiales de elementos secundarios

Tabla 11. Materiales de elementos secundarios.

Uso y ubicación		Material	Espesor	Peso (kg/m ²)	Marca
Entrepiso	Piso	Hoja de contrachapado	1"	10.67	MASISA®, Tipo Triplay®
	Piso	Piso laminado madera de roble	1/2"	9.06	Par-ky®, Tipo Sound®
	Escaleras	Madera de pino amarillo	2"	25.91	---
Muros	Interior	Panel de muro térmico 3 capas. Acabado liso.	30 mm	10.05	Panel Sandwich® Multipanel para Muro Arquitectónico®
	Exterior		30 mm	10.05	
Techo	Interior	Plafón de panel de yeso	5/8"	11.60	USG Tablaroca® Ultralight® Firecode® X
Cubierta	Exterior	Panel aislado. Calibre 26/26	2.5"	11.47	Ternium®, Tipo Galvatecho®



Figura 97. Panel propuesto de muro térmico prefabricado de 3 capas, acabado liso (PanelSandwich, 2020).

6.4.3 Consideraciones

6.4.3.1 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son las características mecánicas que posee un elemento en sus extremos, éstas pueden proporcionarle al elemento la capacidad de permanecer o no en cierta posición, así como la disposición al giro en algún eje local ante la acción de una fuerza; además, dependiendo de cuál sea su condición de frontera, el elemento podrá transferir los esfuerzos hacia los elementos con los cuales tiene contacto de manera distinta (tablas 12 y 13).

Tabla 12. Condiciones de frontera de los elementos en sus extremos.

Elemento	ID	Perfil	Extremos del elemento	Pueden transmitir hacia otros elementos:			Elemento liberado en:	
				Fuerza axial	Fuerza cortante	Momento		
Columna	COL	PTR 4" x 4" x 3/16"	Empotrado	✓	✓	✓	---	
Viga secundaria	MT	4 MT 16	Simplemente apoyado	✓	✓	---	JM3 y KM3	
Alfardas	ALF	PTR 4" x 2" x 3/16"	Empotrado	✓	✓	✓	---	
Placas	PL	PL (espesor 1/4")	Empotrado	✓	✓	✓	---	
Sistema de armaduras	Cuerda superior	C-SUP	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	Empotrado	✓	✓	✓	---
	Cuerda inferior	C-INF	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	Empotrado	✓	✓	✓	---
	Montante	MTT	2T LI 1" x 1" x 1/8"	Articulado	✓	---	---	JM3, KM3, JM2 y KM2
	Diagonales	DIA	2T LI 1" x 1" x 1/8"	Articulado	✓	---	---	JM2 y KM2
	Riostras	RIO	LI 1" x 1" x 1/8"	Articulado horizontalmente	✓	✓	---	JM2 y KM2

Tabla 13. Condiciones de frontera de los nodos de las columnas de la base.

Elemento	ID	Perfil	Nodo de la base del elemento	Traslación liberada en:	Rotaciones
Columnas en la base	COL	PTR 4" x 4" x 3/16"	Simplemente apoyado	TX, TY y TZ	No liberadas

La condición de frontera de los nodos de los elementos en las bases de las edificaciones normalmente es empotrada; es decir, no permite rotaciones ni traslaciones de los elementos debido a que cuentan con cimentación enterrada que restringe su movimiento; en cambio, en este caso particular, corresponde a una condición de simplemente apoyada, ya que, si bien no permite rotaciones, los elementos se pueden trasladar, debido a que la cimentación de la vivienda es totalmente superficial; es decir, no cuenta con ningún elemento enterrado bajo el suelo que le impida el movimiento de traslación, pero debido al peso de ésta y la fricción de los elementos en la base con el suelo, la vivienda cuenta con movimientos casi nulos de traslación (figura 98).



Figura 98. Aplicación de las condiciones de frontera de elementos y en los nodos de columnas en la base.

6.4.3.2 Peso propio

En la condición de carga muerta, además del peso de los entrepisos y muros, se considera el peso propio de los elementos de la estructura, en este caso en el software en el modelo se le activó dicho requerimiento en el sentido $-Y$.

6.4.3.3 Áreas de entrepiso

Se crearon áreas horizontales en los entrepisos de la vivienda y en las cubiertas, a través de las cuales se distribuye de manera tributaria los pesos propios de los entrepisos y cubiertas hacia los elementos sobre los cuales éstas se soportan. También se creó un área especial para el tinaco, la cual distribuye el peso de éste en ciertos elementos de la cubierta del segundo nivel (figura 99).



Figura 99. Visualización de las áreas generadas de los entrepisos de la estructura.

6.4.3.4 Área de muros

Se crearon áreas verticales en todo el perímetro de la estructura donde se ubican los muros exteriores para simular los muros que reciben la presión o succión del viento de manera horizontal, las cuales transmiten dichas fuerzas de manera tributaria a los elementos del perímetro respectivo del muro (columnas y traveses). En el caso de los muros de la base y de los pretilos, no se crearon áreas para distribuir la carga de viento; en cambio, se aplicó directamente a las traveses una carga lateral uniforme equivalente por unidad de longitud, la cual corresponde a la presión que ejerce el viento en dicha superficie (figuras 100 y 101).



Figura 100. Vista isométrica de la entrada de la vivienda, donde se aprecia la geometría de sus muros.



Figura 101. Representación de las áreas de muro generadas de la estructura, sobre las cuales se aplicaron las cargas de viento, así como en las áreas de cubierta.

6.4.4 Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga son una serie de condiciones posibles en que la estructura pudiera estar sujeta en su vida útil bajo distintas acciones o fuerzas, las cuales son afectadas por factores, creando diversos casos posibles. Estas acciones son: carga muerta (CM), carga viva (CV), carga viva instantánea (CVi), viento en dos direcciones perpendiculares distintas (V_x y V_y) y sismo en dos direcciones perpendiculares distintas (S_x y S_y) (tabla 16). Se usaron 18 combinaciones de diseño (tabla 14) y 21 combinaciones de servicio (tabla 15), según los reglamentos y su aplicabilidad para el caso de estudio.

Tabla 14. Combinaciones de carga de diseño (ASCE, 2017 y NTC, 2017).

COMBINACIONES DE CARGA DE DISEÑO (Criterio LRFD)					Apartado en el reglamento	
Condición	Combinación	Reglamento		Estado	ASCE	NTC
		ASCE/SEI- 07-2017	NTC-2017			
D1	1.4(CM)	✓		Diseño*	2.3.1	
D2	1.2(CM) + 1.6(CV)	✓		Diseño*	2.3.1	
D3	1.2(CM) + 1.0(CV)	✓		Diseño*	2.3.1	
D4	1.2(CM) + 0.5(V_x) + 0.15(V_z)	✓		Diseño*	2.3.1	
D5	1.2(CM) + 0.15(V_x) + 0.5(V_z)	✓		Diseño*	2.3.1	
D6	1.2(CM) + 1.0(CV) + 1.0(V_x) + 0.3(V_z)	✓		Diseño*	2.3.1	
D7	1.2(CM) + 1.0(CV) + 0.3(V_x) + 1.0(V_z)	✓		Diseño*	2.3.1	
D8	0.9(CM) + 1.0(V_x) + 0.3(V_z)	✓	✓	Diseño**	2.3.1	3.4.c)
D9	0.9(CM) + 0.3(V_x) + 1.0(V_z)	✓	✓	Diseño**	2.3.1	3.4.c)
D10	1.2(CM) + 1.0(CV) + 1.0(S_x) + 0.3(S_z)	✓		Diseño*	2.3.6	
D11	1.2(CM) + 1.0(CV) + 0.3(S_x) + 1.0(S_z)	✓		Diseño*	2.3.6	
D12	0.9(CM) + 1.0(S_x) + 0.3(S_z)	✓	✓	Diseño**	2.3.6	3.4.c)
D13	0.9(CM) + 0.3(S_x) + 1.0(S_z)	✓	✓	Diseño**	2.3.6	3.4.c)
D14	1.2(CM) + 1.1(CVi) + 1.0(V_x) + 0.3(V_z)	✓	✓	Diseño**	2.6.1	3.4.b)
D15	1.2(CM) + 1.1(CVi) + 0.3(V_x) + 1.0(V_z)	✓	✓	Diseño**	2.6.1	3.4.b)
D16	1.2(CM) + 1.1(CVi) + 1.0(S_x) + 0.3(S_z)	✓	✓	Diseño**	2.6.1	3.4.b)
D17	1.2(CM) + 1.1(CVi) + 0.3(S_x) + 1.0(S_z)	✓	✓	Diseño**	2.6.1	3.4.b)
D18	1.3(CM) + 1.5(CV)		✓	Diseño*		3.4.a)

* Combinación de carga perteneciente a un sólo reglamento (ya sea al ASCE o a las NTC).

** Combinación de carga del ASCE que se liga con requisitos de las NTC (carga viva instantánea para cargas accidentales y acciones o fuerzas desfavorables para la estructura).

*** Combinación de carga perteneciente a ambos reglamentos (tanto ASCE como a las NTC).

Tabla 15. Combinaciones de carga de servicio (ASCE, 2017 y NTC, 2017).

COMBINACIONES DE CARGA DE SERVICIO (Criterio ASD)					Apartado en el reglamento	
Condición	Combinación	Reglamento		Estado	ASCE	NTC
		ASCE/SEI -07-2017	NTC-2017			
S1	1.0(CM)	✓		Servicio*	2.4.1	
S2	1.0(CM) + 1.0(CV)	✓	✓	Servicio***	2.4.1	3.4.d)
S3	1.0(CM) + 0.75(CV)	✓		Servicio*	2.4.1	
S4	1.0(CM) + 0.6(Vx) + 0.18(Vz)	✓		Servicio*	2.4.1	
S5	1.0(CM) + 0.18(Vx) + 0.6(Vz)	✓		Servicio*	2.4.1	
S6	1.0(CM) + 0.75(CV) + 0.45(Vx) + 0.135(Vz)	✓		Servicio*	2.4.1	
S7	1.0(CM) + 0.75(CV) + 0.135(Vx) + 0.45(Vz)	✓		Servicio*	2.4.1	
S8	0.6(CM) + 0.6(Vx) + 0.18(Vz)	✓		Servicio*	2.4.1	
S9	0.6(CM) + 0.18(Vx) + 0.6(Vz)	✓		Servicio*	2.4.1	
S10	1.0(CM) + 0.7(Sx) + 0.21(Sz)	✓		Servicio*	2.4.5	
S11	1.0(CM) + 0.21(Sx) + 0.7(Sz)	✓		Servicio*	2.4.5	
S12	1.0(CM) + 0.75(CV) + 0.525(Sx) + 0.1575(Sz)	✓		Servicio*	2.4.5	
S13	1.0(CM) + 0.75(CV) + 0.1575(Sx) + 0.525(Sz)	✓		Servicio*	2.4.5	
S14	1.0(CM) + 1.0(CVi) + 0.7(Vx) + 0.21(Vz)	✓	✓	Servicio**	2.6.2	3.4.d)
S15	1.0(CM) + 1.0(CVi) + 0.21(Vx) + 0.7(Vz)	✓	✓	Servicio**	2.6.2	3.4.d)
S16	1.0(CM) + 1.0(CVi) + 0.7(Sx) + 0.21(Sz)	✓	✓	Servicio**	2.6.2	3.4.d)
S17	1.0(CM) + 1.0(CVi) + 0.21(Sx) + 0.7(Sz)	✓	✓	Servicio**	2.6.2	3.4.d)
S18	0.6(CM) + 1.0(CVi) + 0.7(Vx) + 0.21(Vz)	✓	✓	Servicio**	2.6.2	3.4.d)
S19	0.6(CM) + 1.0(CVi) + 0.21(Vx) + 0.7(Vz)	✓	✓	Servicio**	2.6.2	3.4.d)
S20	0.6(CM) + 1.0(CVi) + 0.7(Sx) + 0.21(Sz)	✓	✓	Servicio**	2.6.2	3.4.d)
S21	0.6(CM) + 1.0(CVi) + 0.21(Sx) + 0.7(Sz)	✓	✓	Servicio**	2.6.2	3.4.d)

Tabla 16. Tipo de acciones sobre la estructura.

CM	Carga muerta	Cargas gravitacionales
CV	Carga viva	
CVi	Carga viva instantánea	
Vx	Viento en dirección X	Cargas accidentales
Vz	Viento en dirección Z	
Sx	Sismo en dirección X	
Sz	Sismo en dirección Z	

Las combinaciones de diseño se utilizan para revisión de la resistencia de los elementos de la estructura y las condiciones de servicio son para revisión de condiciones de confort de los que habitan la edificación, como son el grado de las deflexiones de sus elementos, vibraciones y desplazamientos nodales.

6.4.5 Estados de carga

6.4.5.1 Cargas muertas

Son todas aquellas cargas permanentes incluyendo el peso propio de los elementos estructurales, los entrepisos, los acabados, instalaciones y todo aquel elemento que sea de carácter permanente en la vida útil de la estructura.

Se calcularon las cargas muertas del primer entrepiso (tabla 17), en escaleras y alfardas (tablas 18 y 19), en entrepiso de segundo nivel (tabla 20), en cubierta (tabla 21) y debido a muros (tablas 22 - 24).

Tabla 17. Cargas muertas del primer entrepiso.

Elemento	Peso
	(kg/m ²)
Hoja de contrachapado. Espesor 1" (marca MASISA®, tipo Triplay®).	10.67
Hoja de contrachapado. Espesor 1" (marca MASISA®, tipo Triplay®).	10.67
Piso laminado. Madera de roble. Espesor 1/2" (Par-ky®, tipo Sound®).	9.06
Instalaciones.	15.00
Total:	45.40

Tabla 18. Carga muerta en escaleras.

Elemento	Peso
	(kg/m ²)
Madera de pino amarillo. Espesor 2".	25.91
Total:	25.91

Tabla 19. Carga muerta por unidad de longitud sobre alfardas debido al peso propio.

Descripción	Valor	Unidad
Longitud de alfarda (en planta)	2.32	m
Distancia entre alfardas (longitud de escalones)	0.96	m
Área de escalones por cada rampa (en planta)	2.2272	m ²
Área tributaria de escalones hacia cada alfarda (en planta)	1.1136	m ²
Peso escalones por unidad de área	25.91	kg/m ²
Carga correspondiente por alfarda (total)	28.8534	kg
Longitud de alfarda (en diagonal)	2.6249	m
Carga por unidad de longitud por alfarda (en diagonal)	10.99	kg/m

Tabla 20. Cargas muertas en entepiso del segundo nivel

Elemento	Peso
	(kg/m ²)
Hoja de contrachapado. Espesor 1" (marca MASISA®, tipo Triplay®).	10.67
Hoja de contrachapado. Espesor 1" (marca MASISA®, tipo Triplay®).	10.67
Piso laminado. Madera de roble. Espesor 1/2" (Par-ky®, tipo Sound®).	9.06
Instalaciones.	15.00
Plafón de panel de yeso (marca USG Tablaroca® Ultralight® Firecode® X).	11.60
Total:	57.00

Tabla 21. Cargas muertas en cubierta.

Elemento	Peso
	(kg/m ²)
Panel aislado. Cal. 26/26. Espesor 2.5" (marca Ternium®, tipo Galvatecho®).	11.47
Instalaciones.	15.00
Plafón de panel de yeso (marca USG Tablaroca® Ultralight® Firecode® X).	11.60
Total	38.07

Tabla 22. Cargas muertas en muros.

Elemento	Peso
	(kg/m ²)
Panel de muro térmico 3 capas. Acabado liso. Espesor 30 mm (Panel Sandwich® Multipanel para Muro Arquitectónico®).	10.05
Bastidor muro perimetral (perfiles tubulares de acero de herrería de 1" Cal. 16).	7.87
Bastidor muro no-perimetral (perfiles tubulares de acero de herrería de 1" Cal. 16).	7.36

Tabla 23. Altura de muros y bastidores metálicos que sujetan a los muros.

Tipo de muro según ubicación		Altura del muro		Altura de bastidor	
Clave	Ubicación	Cara 1	Cara 2	Perimetral	Interior
		(m)	(m)	(kg/m)	(kg/m)
M-1	Base	0.40	-	-	-
M-2	Perimetral	3.00	2.60	3.00	-
M-3	Interior	2.60	2.60	-	2.60
M-4	Pretil	0.60	0.60	0.60	-

Tabla 24. Carga muerta en muros por unidad de longitud.

Tipo de muro según ubicación		Peso del muro		Peso del bastidor		Peso total
Clave	Ubicación	Cara 1	Cara 2	Perimetral	Interior	
		(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)
M-1	Base	4.02	-	-	-	4.02
M-2	Perimetral	30.15	26.13	20.46	-	76.74
M-3	Interior	26.13	26.13	-	19.14	71.40
M-4	Pretil	6.03	6.03	4.72	-	16.78

6.4.5.2 Cargas vivas

Son todas aquellas cargas que pudieran ser producidas por sus ocupantes con el uso durante la vida útil de la estructura, tanto por el peso de sus ocupantes como todo aquel mobiliario instalado que no sea permanente.

Para el cálculo estructural de la vivienda se emplearon 2 tipos de cargas vivas: las cargas vivas máximas (CV ó W_m) debido a fuerzas gravitacionales; y las cargas vivas instantáneas (CV_i ó W_a), que se emplean para fuerzas accidentales, como lo son para el diseño sísmico y por viento; las cuales son aplicadas en entrepiso, cubierta, pasillos y escaleras (tabla 25). También se realizó el cálculo de la carga viva en alfardas (tabla 26).

Las cargas vivas aplicadas a la estructura son las correspondientes a una edificación tipo vivienda y con una pendiente menor a 5% en cubierta, de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias (NTC, 2017).

Tabla 25. Cargas vivas en viviendas en entrepisos según el tipo y ubicación (NTC, 2017).

Ubicación	Carga viva máxima	Carga viva instantánea
	W_m	W_a
	(CM)	(CV _i)
	(kg/m ²)	(kg/m ²)
Entrepiso	190	100
Cubierta (pendiente menor a 5 %)	100	70
Pasillos y escaleras	350	150

Tabla 26. Cargas vivas en alfardas por unidad de longitud.

Descripción	Carga viva máxima	Carga viva instantánea	Unidad
	W_m (CM)	W_a (CVi)	
	Valor	Valor	
Longitud de alfarda (en planta)	2.32	2.32	m
Distancia entre alfardas (longitud de escalones)	0.96	0.96	m
Área de escalones por cada rampa (en planta)	2.2272	2.2272	m ²
Área tributaria de escalones hacia cada alfarda (en planta)	1.1136	1.1136	m ²
Carga viva por unidad de área	350.00	150.00	kg/m ²
Carga correspondiente por alfarda (total)	389.76	167.04	kg
Longitud de alfarda (en diagonal)	2.6249	2.6249	m
Carga viva por unidad de longitud por alfarda (en diagonal)	148.49	63.64	kg/m

6.4.6 Aplicación de cargas muertas

6.4.6.1 Peso de la estructura

La carga muerta debido al peso propio de los elementos de la estructura fue aplicada de manera directa en el software de cálculo estructural con valor de -1 en el eje vertical Y, es decir, de manera gravitacional (figura 102).

6.4.6.2 Cargas sobre áreas

La carga muerta por unidad de área se aplicó a la superficie de cada una de las áreas creadas según el tipo de entrepiso (tabla 27).

Tabla 27. Cargas sobre áreas.

Ubicación	Carga muerta
	(kg/m ²)
1er entrepiso	45.40
Descanso escaleras	25.91
2do entrepiso	57.00
Cubiertas	38.07

También se le aplicaron cargas muertas por unidad de longitud a los elementos debido a cargas de muros (tabla 28) y alfardas (tabla 29).

6.4.6.3 Cargas sobre elementos

Tabla 28. Cargas muertas por unidad de longitud que aportan los muros hacia los elementos de la estructura.

Ubicación	Zona	Tipo de elemento sobre el cual se aplica la carga de los muros			Muros que aportan carga		Carga muerta (kg/m)
		Elemento	ID	Perfil	Clave	Ubicación	
Muros perimetrales	1er entrepiso terraza	Cuerda superior	C-SUP	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	M1	Base	4.02
	1er entrepiso	Cuerda superior	C-SUP	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	M1	Planta baja	4.02 + 76.74 = 80.76
			C-SUP		M2		
	2do entrepiso	Cuerda superior	C-SUP	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	M2	Planta alta	76.74
Cubiertas (pretil)	Cuerda superior	C-SUP	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	M4	Pretil	16.78	
Muros interiores	1er entrepiso	Cuerda superior	C-SUP	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	M3	Planta baja	71.40
		Monten	MT	4 MT 16	M3	Planta baja	71.40
	2do entrepiso	Cuerda superior	C-SUP	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	M4	Planta alta	16.78

Tabla 29. Cargas muertas por unidad de longitud que aportan los escalones hacia las alfardas.

Ubicación	Elemento sobre el cual se aplica la carga de los escalones			Elemento que aporta carga	Carga muerta (kg/m)
	Elemento	ID	Perfil		
Escaleras	Alfardas	ALF	PTR 4" x 2" x 3/16"	Escalones	10.99

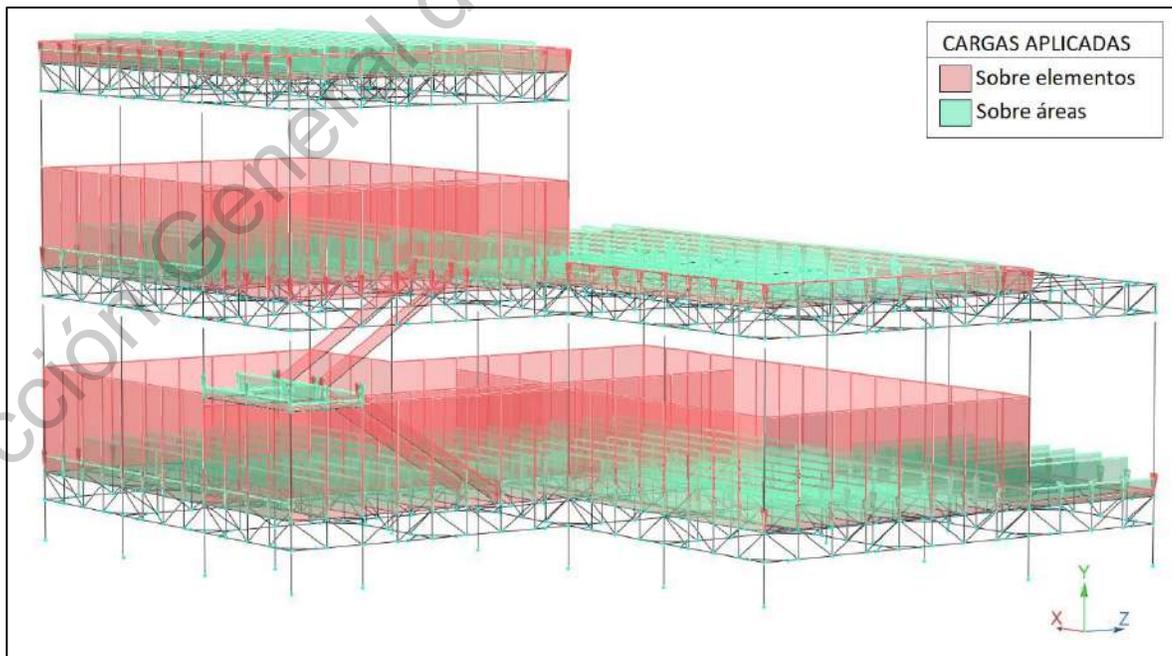


Figura 102. Cargas muertas aplicadas a la estructura.

6.4.7 Aplicación de cargas vivas

6.4.7.1 Carga viva máxima

La carga viva máxima se aplicó a la superficie de cada una de las áreas creadas según el tipo de entrepiso (figura 103). En el caso de las alfardas se le aplicó la carga correspondiente por metro lineal sobre ellas (tabla 30).

Tabla 30. Cargas vivas máximas.

Entrepiso	Cubierta	Descanso escaleras	Alfardas
(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m)
190	100	350	148.49

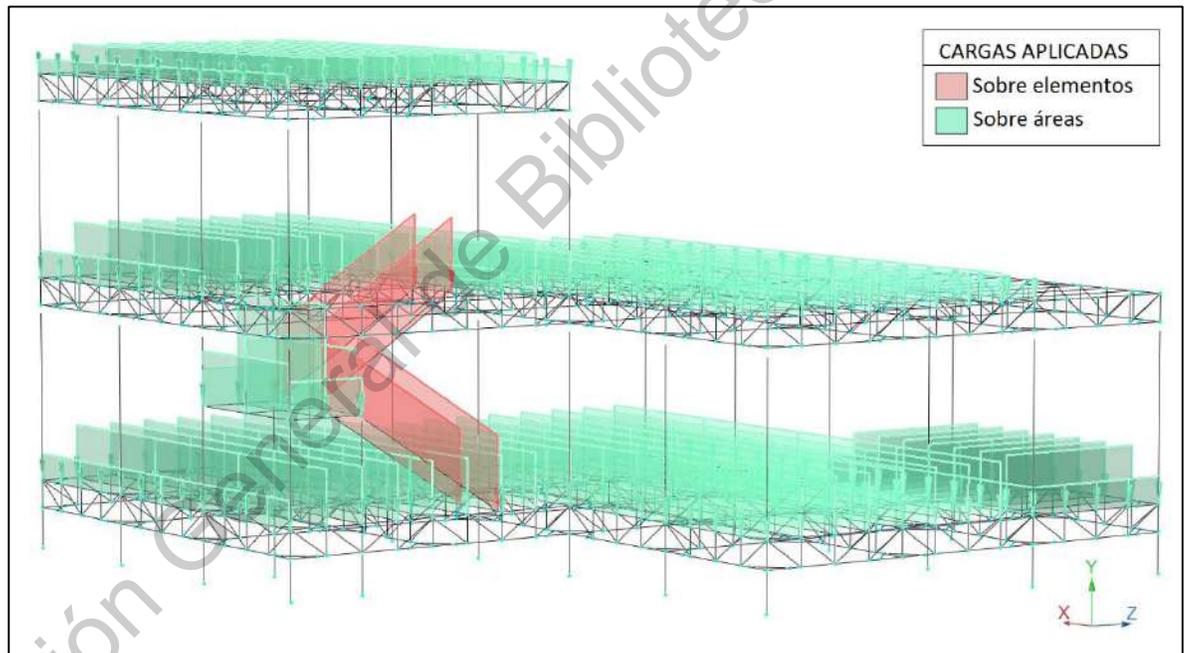


Figura 103. Aplicación de cargas vivas máximas sobre la estructura.

6.4.7.2 Carga viva accidental

La carga viva accidental se aplicó a la superficie de cada una de las áreas creadas según el tipo de entrepiso (figura 104). En el caso de las alfardas se le aplicó la carga correspondiente por metro lineal sobre ellas (tabla 31).

Tabla 31. Cargas vivas accidentales.

Entrepiso	Cubierta	Descanso escaleras	Alfardas
(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m)
100	70	150	63.64

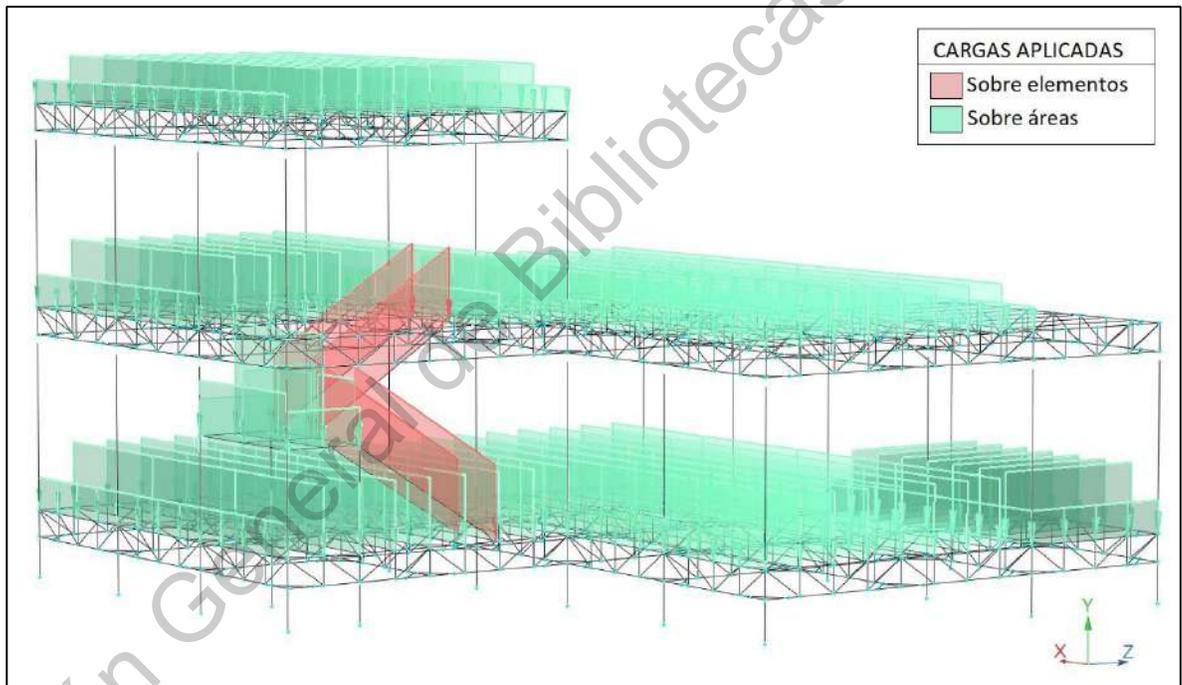


Figura 104. Cargas vivas instantáneas aplicadas sobre la estructura.

6.4.8 Cálculo por viento

A la vivienda se le aplicó el diseño por acciones de viento siguiendo la metodología del Manual de Obras Civiles, Diseño por Viento, de la Comisión Federal de Electricidad de 2008 (CFE-Viento, 2008). El diseño por viento consiste en 2 etapas:

Primera etapa: Obtención de las presiones y succiones que se estiman puedan ejercer acción sobre las diversas superficies de la edificación, las cuales dependen de una serie de parámetros, de la geometría de la estructura y las características geográficas donde se localiza, siguiendo el manual antes mencionado (CFE-Viento, 2008).

Segunda etapa: Es la aplicación de dichas presiones sobre las superficies de la estructura correspondientes en la dirección y sentido en que se presentan para las 2 direcciones perpendiculares principales de viento en dirección X (V_x) y viento en dirección Z (V_z), para las cuales pudieran ser más desfavorables para la estructura, aplicándolas en las combinaciones de carga respectivas.

6.4.8.1 Obtención de parámetros y presiones de viento

A la estructura se le clasificó según su importancia en el “grupo B”, ya que al tener un uso para vivienda su grado de seguridad es moderado.

A la estructura se le clasificó según su respuesta ante acción del viento como “tipo 1” debido a que es la más recomendada para uso en viviendas y en edificaciones con relación de esbeltez, $\lambda \leq 5$, el cual es el caso.

La categoría del terreno según su rugosidad es “2”, debido a que el terreno es plano y tiene pocas obstrucciones, las cuales tienen una altura menor a 10 metros.

El factor de topografía local es $F_T=1.0$, ya que su terreno se clasifica como normal y prácticamente plano, con ausencia de cambios topográficos importantes y con pendientes menores al 5%.

La estructura de la vivienda al tener una altura máxima de 7.60 m, se clasifica como una edificación menor a 10.00 m, $z < 10$ m, dicha clasificación es importante porque de ella depende el valor del factor de exposición local, F_{Tz} ; y debido a esta clasificación de altura, no aplica el exponente que determina la variación de la velocidad del viento con la altura, α , ni tampoco aplica el factor de altura gradiente, δ .

La ubicación de la vivienda es dentro de las instalaciones del Centro Universitario de la Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro., México; en donde la temperatura promedio anual es de $\tau = 18.8$ °C y una presión barométrica de $\Omega = 758$ mmHg a 1,821 msnm.

El coeficiente de rugosidad es $c = 1.0$ debido a que la categoría del terreno según su rugosidad es “2”.

La velocidad regional de ráfaga es $V_R = 129$ km/h para la ciudad donde se ubica la vivienda, de acuerdo al mapa de las isotacas correspondiente a un periodo de retorno de $T_R = 50$ años y a un terreno tipo 2 (figura 105).

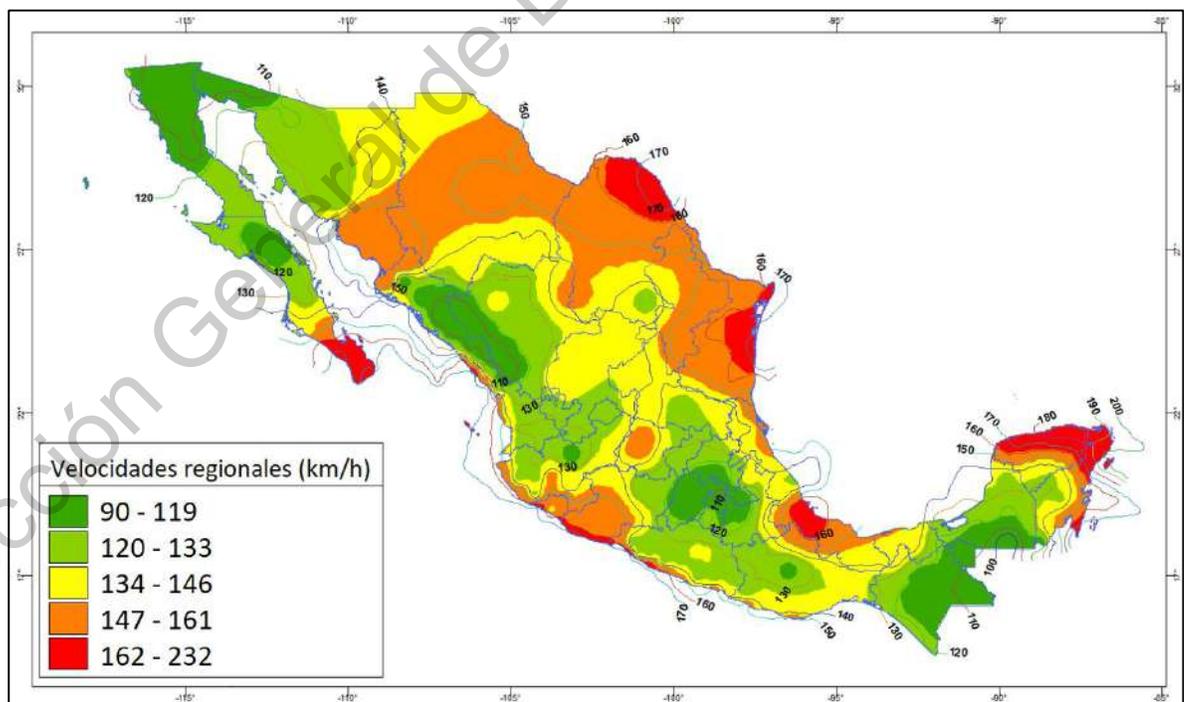


Figura 105. Velocidades regionales para un periodo de retorno de 50 años y con un terreno tipo 2, en la República Mexicana (CFE-Viento, 2008).

El factor de exposición local es $F_{rz}=1.0$, debido a que el coeficiente de rugosidad es $c=1$ y a que la altura de la edificación es $z < 10.00$ m, con base a la siguiente ecuación:

$$\text{si } z < 10 \text{ m} \rightarrow F_{rz} = c \quad (3)$$

La velocidad de diseño es $V_D=129$ km/h, lo cual resulta del producto entre el factor de topografía local, F_T ; el factor de exposición local, F_{rz} ; y la velocidad regional de viento V_R :

$$V_D = (F_T)(F_{rz})(V_R) \quad (4)$$

El factor de corrección de temperatura y altura sobre el nivel del mar es de $G=1.018$, el cual resulta del cociente entre el producto la presión atmosférica, Ω , por un factor; entre la suma de la temperatura, τ , y un factor de corrección; como se indica en la siguiente expresión:

$$G = \frac{(0.392)(\Omega)}{273 + \tau} \quad (5)$$

La presión dinámica de base es $q_z=81.34$ kgf/m², que resulta del producto entre el factor de corrección de temperatura y altura sobre el nivel de mar, G ; el cuadrado de la velocidad de diseño, V_D ; y un factor de presión del viento con un valor de 0.0048 (el cual se deriva de las ecuaciones de Bernoulli, tomando en cuenta una densidad del aire de $\rho=1.225$ kg/m³ y 15°C a nivel de mar); como se enuncia en la siguiente ecuación del manual de viento:

$$q_z = (0.0048)(G)(V_D)^2 \quad (6)$$

La dirección del viento se considera con un ángulo $\theta=90^\circ$, perpendicular a las generatrices, ya que el viento de barlovento y la superficie de la estructura con la que éste incide son ortogonales.

El ancho de la superficie de barlovento expuesta transversalmente al flujo del viento es $b=11.60$ m y el ancho de la superficie de la estructura paralela al flujo del viento es $d=11.60$ m, con una relación $d/b=1.0$.

La altura promedio de la cubierta hasta el suelo es $h=7.60$ m, ya que, en la altura máxima de cubierta, el elemento más alto es el pretil, el cual tiene una altura constante de 7.60 m desde el suelo en todo su perímetro.

Tabla 32. Parámetros para el cálculo de la presión dinámica de base (q_z).

Concepto		Dato
Clasificación de la estructura según su importancia:		GRUPO B
Clasificación de la estructura según su respuesta ante la acción del viento:		Tipo 1
Categoría del terreno según su rugosidad:		2
Factor de topografía local:	F_T	1.0
Altura de la estructura:	h	7.60 m
Clasificación de altura de la estructura:		$z < 10$ m
Ubicación:		Querétaro, Qro.
Periodo de Retorno:	T_R	50 años
Velocidad regional de ráfaga (con un periodo de retorno = 50 años):	V_R	129 km/h
Exponente que determina la variación de la velocidad del viento con la altura:	α	(No aplica)
Altura gradiente:	δ	(No aplica)
Coefficiente de escala de rugosidad:	c	1.000
Factor de exposición local:	F_{rz}	1.000
Velocidad de diseño:	V_D	129 km/h
Presión barométrica (Querétaro, Qro.):	Ω	758 mmHg
Temperatura ambiental promedio (Querétaro, Qro.):	τ	18.8 °C
Factor de corrección por temperatura y altura sobre el nivel de mar:	G	1.0183
Presión dinámica de base		q_z 81.34 kgf/m²

La pendiente de la cubierta de la vivienda es de $\gamma=2.0\%$, lo cual es importante conocer, ya que, de acuerdo a su inclinación, la relación d/b , el ángulo respecto a las generatrices y la cantidad de aguas de su techo, depende el coeficiente de presión exterior, C_{pe} , para cubiertas, el cual modifica el valor de la presión exterior p_e . Dicha pendiente se inclina para un sólo lado, por lo tanto, se clasifica como un techo con «1 o 2 aguas».

La relación entre la altura promedio de la cubierta hasta el suelo y el ancho de la superficie de la estructura paralela al flujo del viento es $h/d=0.655$, la cual junto con la inclinación del techo $\gamma=2.0\%$, determinan el coeficiente de presión exterior p_e correspondiente a la cubierta de barlovento.

El área tributaria en muros es $A=11.60 \text{ m}^2$, la cual se origina de identificar la mayor superficie de muro sin medio de sujeción, que resulta de multiplicar la longitud del módulo: $L=4.64 \text{ m}$ y la altura libre de éste: $h=2.50 \text{ m}$; la cual determina el factor de reducción K_A , cuyo valor es de $K_A=0.99$ en muros, que resulta de la interpolación de valores relacionados entre el área tributaria y el factor de reducción.

El área de afectación en muros en este caso es de $A_{fm}=11.60 \text{ m}^2$, la cual corresponde al mismo valor que el área tributaria, debido a las mismas condiciones; este valor determina el factor de presión local, el cual es $K_L=1.0$ para muros.

El área tributaria en cubierta es $A=1.35 \text{ m}^2$, la cual se origina de identificar la mayor superficie de cubierta sin medio de sujeción, que resulta de multiplicar el ancho de un módulo: $s=2.32 \text{ m}$ y el espaciamiento libre de éste hacia otro elemento: $e=0.58 \text{ m}$ (espaciamiento entre montenes); la cual determina el factor de reducción K_A , cuyo valor es de $K_A=1.0$ en cubierta.

El área de afectación en cubierta es de $A_{fc}=10.76 \text{ m}^2$, la cual corresponde al área en planta de un módulo, resultado de multiplicar su ancho $s=2.32 \text{ m}$ por su longitud $L=4.64 \text{ m}$; este valor determina el factor de presión local, el cual es $K_L=1.0$ para cubierta.

Tabla 33. Parámetros geométricos para el cálculo de la presión de viento para cada dirección.

Concepto		Dato
Dirección del viento (0° = normal o 90° perpendicular a las generatrices):	θ	90°
Ancho de la superficie de barlovento expuesta transversalmente al flujo del viento:	b	11.60 m
Ancho de la superficie de la estructura paralela al flujo del viento:	d	11.60 m
Relación d/b :	d/b	1.000
Inclinación del techo:	γ	2.0%
Clasificación de pendiente del techo:	/	$1 \text{ ó } 2 \text{ aguas}$
Altura promedio de la cubierta hasta el suelo:	h	7.60 m
Relación h/d :	h/d	0.655
Área tributaria en muros:	A	11.60 m^2
Área de afectación en muros:	A_{fm}	11.60 m^2
Área tributaria en cubierta:	A	1.35 m^2
Área de afectación en cubierta:	A_{fc}	10.76 m^2

Los parámetros geométricos obtenidos son de acuerdo a las características físicas de la vivienda (tabla 33), posteriormente se obtienen las variables para la obtención de la presión exterior de viento en cada dirección (tabla 34).

Tabla 34. Variables para obtener la presión exterior en cada dirección del viento.

Dirección del viento		Coeficiente de presión exterior	Factor de reducción de presión por tamaño de área	Factor de presión local	Presión dinámica de base
Nombre	Nomenclatura				C_{pe}
Muro barlovento	MB	0.80	0.99	1.00	81.34
Muro sotavento	MS	-0.50	0.99	1.00	81.34
Muro lateral 1	ML1	-0.65	0.99	1.00	81.34
Muro lateral 2	ML2	-0.65	0.99	1.00	81.34
Cubierta sotavento	CS	-0.70	1.00	1.00	81.34

Tabla 35. Presión exterior de viento en cada dirección, la cual se aplica directamente a la estructura por unidad de área, tanto en muros exteriores como en cubierta.

Dirección del viento		Presión		Tipo de empuje
		Sistema Internacional de Unidades (SI)	Sistema Técnico de Unidades (STU)	
Nombre	Nomenclatura	(MPa)	(kgf/m ²)	
Muro barlovento:	P_e (MB)	6.32	64.38	Presión
Muro sotavento:	P_e (MS)	- 3.95	- 40.23	Succión
Muro lateral 1:	P_e (ML1)	- 5.13	- 52.31	Succión
Muro lateral 2:	P_e (ML2)	- 5.13	- 52.31	Succión
Cubierta de sotavento:	P_e (CS)	- 5.53	- 56.33	Succión

Estos valores de presión del viento fueron los que se le aplicaron a la estructura de la vivienda en cada una de las direcciones por cada sentido de empuje del viento en los ejes perpendiculares horizontales X y Z, respectivamente (tabla 35).

6.4.8.2 Aplicación de presiones de viento sobre la estructura

Existen 2 ejes horizontales que son ortogonales entre sí (eje X y eje Z, correspondientes a V_x y V_z) en los cuales la vivienda está alineada perpendicularmente. Para cada una de estas direcciones existe un sentido hacia el cual el viento ejerce empuje principalmente debido a las construcciones aledañas (en este caso: $-V_x$ y $-V_z$), tal empuje es el correspondiente al sentido de la presión de barlovento y la succión de sotavento, respectivamente, para cada una de las direcciones.

Los empujes aplicados son los correspondientes a la presión exterior en cada una de las direcciones correspondientes:

- La presión de barlovento: Se aplica en los muros de la parte frontal de la estructura, empujando desde el exterior hacia la edificación en la misma dirección y sentido del viento.
- La succión de sotavento: Se aplica en los muros de la parte posterior de la estructura, empujando desde la edificación hacia el exterior en la misma dirección y sentido del viento.
- La succión de muro lateral 1 y 2: Se aplica en los muros laterales de la estructura en sentido opuesto respectivamente, empujando desde la edificación hacia el exterior en los muros que son perpendiculares respecto a la dirección del viento.
- La succión de cubierta de sotavento: Se aplica a la superficie de la cubierta de la estructura, empujando desde la edificación hacia el exterior en sentido vertical en el eje Y.

Se muestra la aplicación de las presiones de viento sobre la superficie de la vivienda en cada una de las 2 direcciones horizontales perpendiculares; es decir, cuando el viento sopla hacia el noreste y cuando el viento sopla hacia el noroeste (figuras 106 y 107).

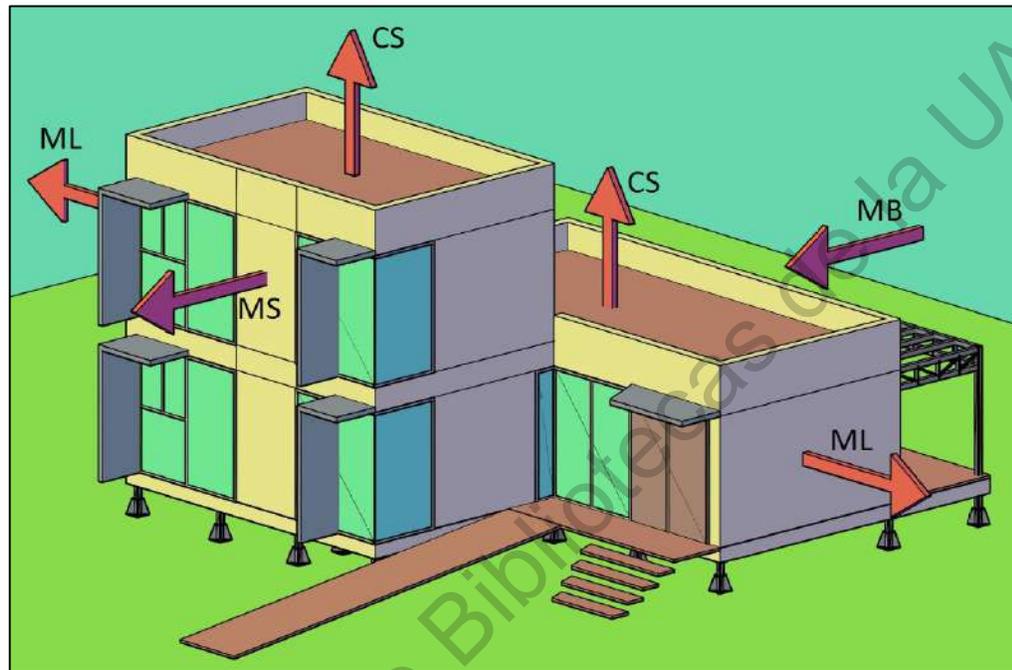


Figura 106. Aplicación del viento en $-Z$ sobre las superficies de la vivienda (cuando sopla hacia el noreste).

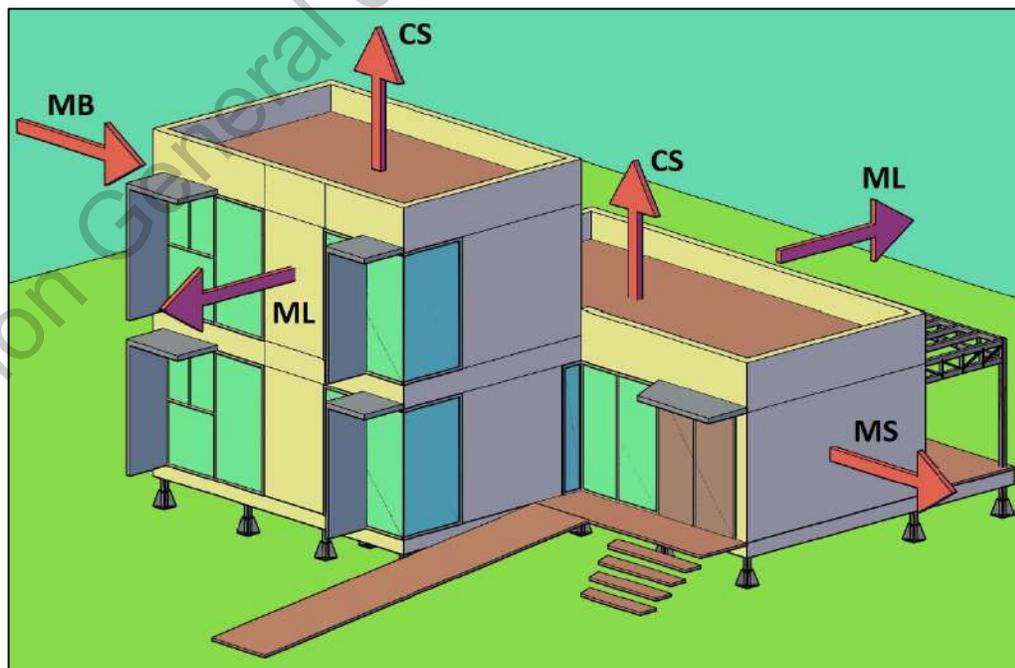


Figura 107. Aplicación del viento en $-X$ sobre las superficies de la vivienda (cuando sopla hacia el noroeste).

Se muestra la aplicación de las cargas de viento en las 2 direcciones principales en el software RAM Elements (figura 108 y 109).

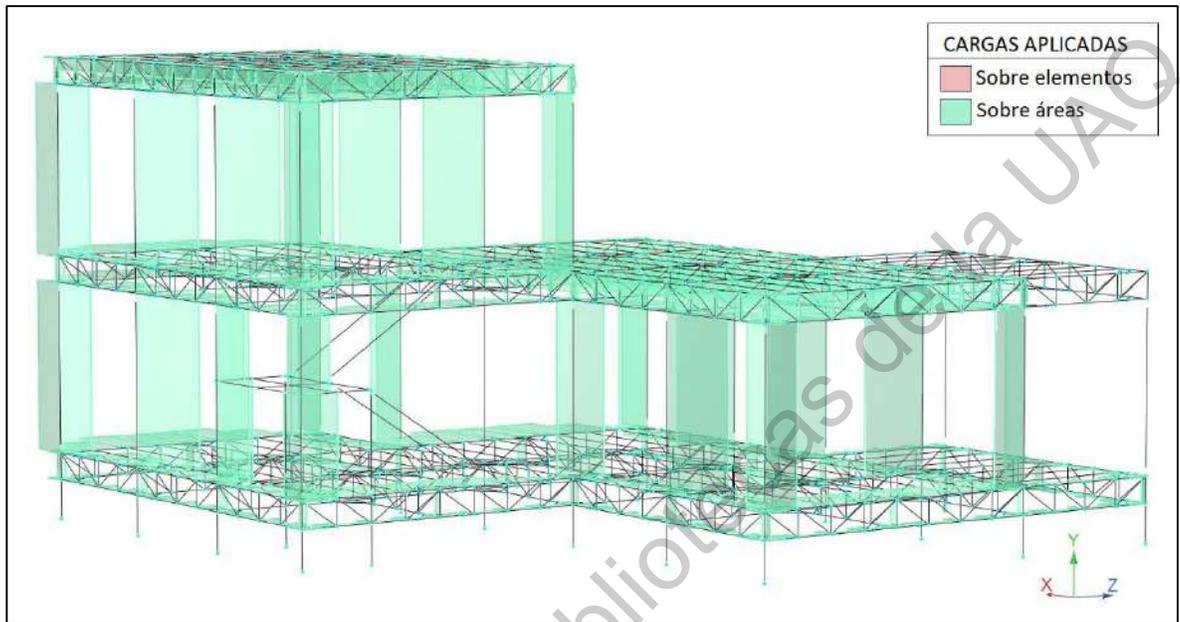


Figura 108. Aplicación de las presiones de viento en dirección X en muros y cubiertas distribuida hacia los elementos de la estructura.

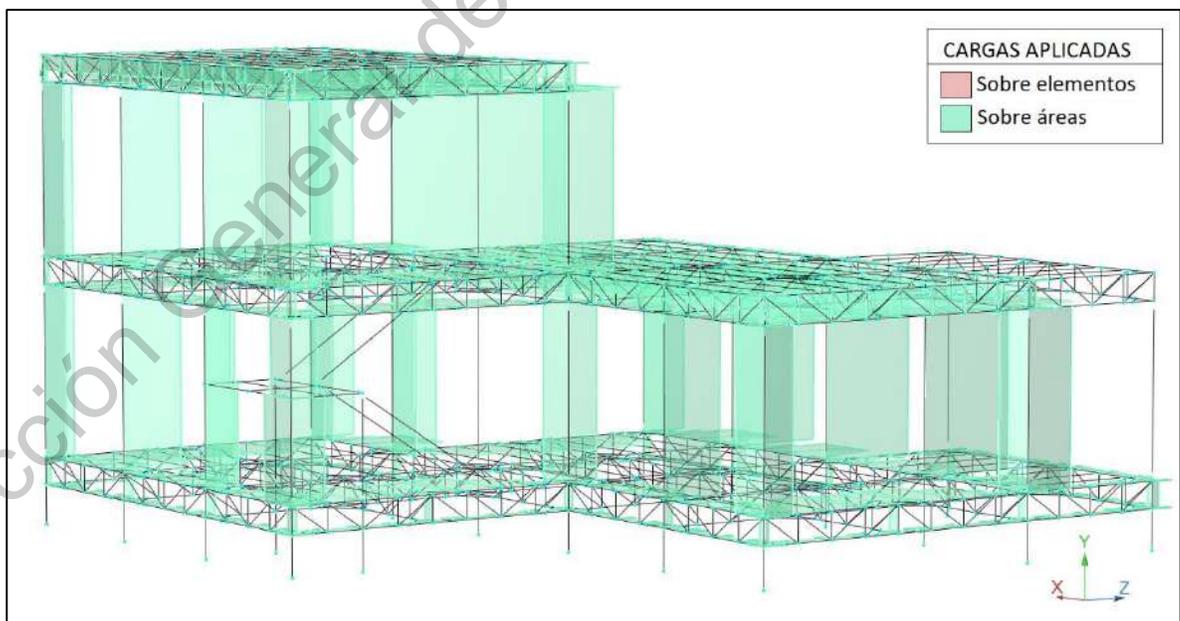


Figura 109. Aplicación de las presiones de viento en dirección Z en muros y cubiertas distribuida hacia los elementos de la estructura.

6.4.9 Cálculo por sismo

Se realizó un análisis sísmico por el Método Dinámico de Superposición Modal en el software RAM Elements, a través de la implementación del Manual de Obras Civiles, Diseño por Sismo, de la Comisión Federal de Electricidad 2015 (CFE-Sismo, 2015), mediante el uso del espectro de diseño obtenido por software PRODISIS.

Se empleó un Espectro de Respuesta de Referencia (ER), el cual se utiliza para todas las estructuras del Grupo B, con el que se establece el nivel de seguridad mínimo recomendado por el manual antes mencionado (CFE-Sismo, 2015).

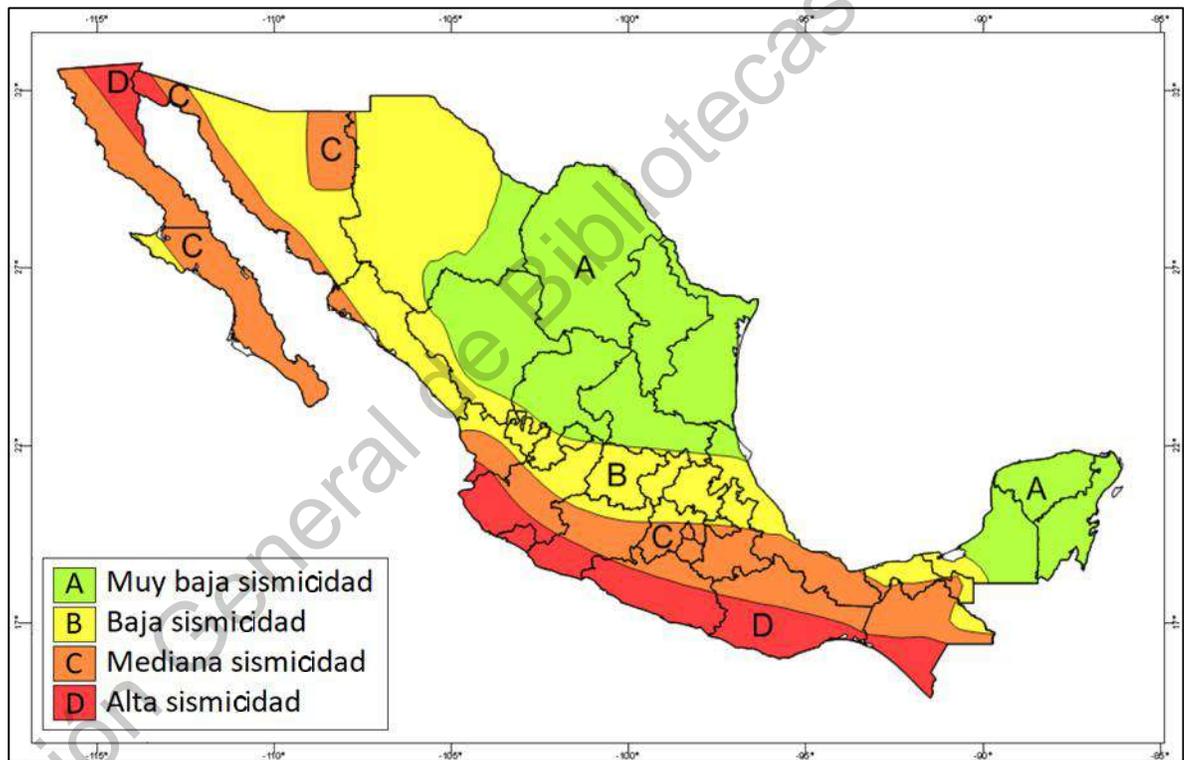


Figura 110. Regionalización sísmica de la República Mexicana (CFE-Sismo, 2015).

La República Mexicana está constituida por 4 zonas según su tipo de sismicidad: donde la «A» presenta muy baja sismicidad; la «B», baja sismicidad; la «C», mediana sismicidad; y la «D», alta sismicidad. La ciudad de Santiago de Querétaro se ubica en la zona «B», donde la ocurrencia de actividad sísmica es relativamente baja, pero existe; contando con valores de aceleración del terreno menores que en las zonas «C» y «D» (figura 110).

6.4.9.1 Espectro de diseño

De acuerdo al manual de sismo (CFE-Sismo, 2015), la vivienda se consideró como una estructura Tipo B según su clasificación debido a su destino y nivel de seguridad (vivienda con nivel de seguridad convencional), en este grupo se catalogó con la clase B2 dadas sus dimensiones (con altura menor a 13.00 m y área total construida menor a 400.00 m²).

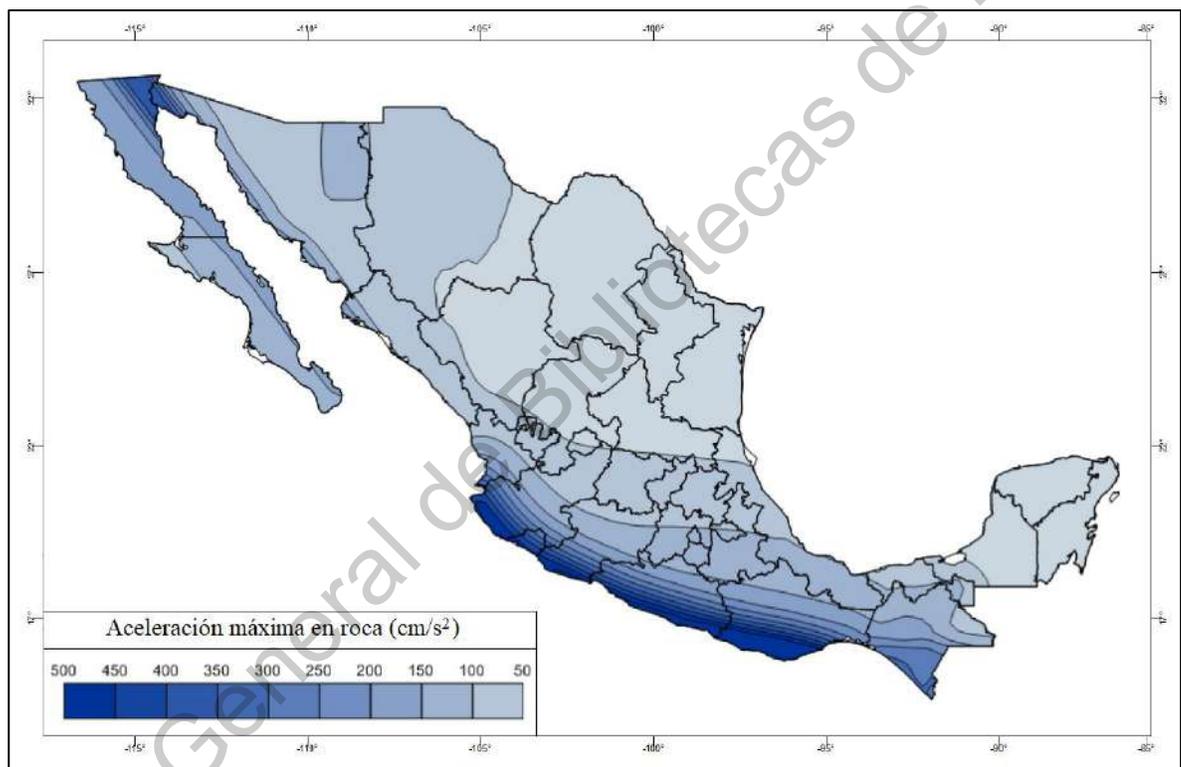


Figura 111. Aceleración máxima en roca, correspondiente al nivel de referencia del espectro de respuesta en la República Mexicana (CFE-Sismo, 2015).

En la figura presentada (figura 111) se aprecia la distribución de las aceleraciones máximas en roca (a_0^r) en la República Mexicana, que corresponden al nivel de referencia del espectro de respuesta, el cual está relacionado con el enfoque probabilista dado por el peligro sísmico para la condición en roca. Estas aceleraciones pueden obtenerse a través del uso del software PRODISIS, en el cual al suministrarle unas coordenadas proporciona un espectro de diseño probable.

A través de uso del software PRODISIS se obtuvieron los valores del espectro de diseño transparente en roca (S_a) para los cuales a cada uno le corresponde un periodo (T) (tabla 36), realizando una gráfica de los datos (figura 112). También se calculó la frecuencia (f) respectiva a través del inverso del periodo. Se obtuvo su aceleración en metros sobre segundo al cuadrado multiplicando el espectro de diseño transparente por el valor de la aceleración de la gravedad ($g=9.81 \text{ m/s}^2$), así como su respectivo valor en gales.

Tabla 36. Valores del espectro de diseño en roca correspondiente a la ubicación de la vivienda.

Periodo	Espectro de diseño transparente	Aceleración		frecuencia
		\ddot{U}		
T	S_a	\ddot{U}		f
(s)	(1/g)	(m/s^2)	(gal)	(Hz)
0.0	0.0708	0.69	69.45	-
0.1	0.1896	1.86	186.00	10.00
0.2	0.1896	1.86	186.00	5.00
0.3	0.1896	1.86	186.00	3.33
0.4	0.1896	1.86	186.00	2.50
0.5	0.1896	1.86	186.00	2.00
0.6	0.1896	1.86	186.00	1.67
0.7	0.1755	1.72	172.17	1.43
0.8	0.1642	1.61	161.08	1.25
0.9	0.1548	1.52	151.86	1.11
1.0	0.1468	1.44	144.01	1.00
1.1	0.1400	1.37	137.34	0.91
1.2	0.1340	1.31	131.45	0.83
1.3	0.1288	1.26	126.35	0.77
1.4	0.1241	1.22	121.74	0.71
1.5	0.1199	1.18	117.62	0.67
1.6	0.1161	1.14	113.89	0.63
1.7	0.1126	1.10	110.46	0.59
1.8	0.1094	1.07	107.32	0.56
1.9	0.1065	1.04	104.48	0.53
2.0	0.1038	1.02	101.83	0.50
2.1	0.0986	0.97	96.73	0.48
2.2	0.0933	0.92	91.53	0.45
2.3	0.0881	0.86	86.43	0.43
2.4	0.0831	0.82	81.52	0.42
2.5	0.0784	0.77	76.91	0.40
2.6	0.0740	0.73	72.59	0.38
2.7	0.0698	0.68	68.47	0.37
2.8	0.0659	0.65	64.65	0.36
2.9	0.0623	0.61	61.12	0.34
3.0	0.0590	0.58	57.88	0.33

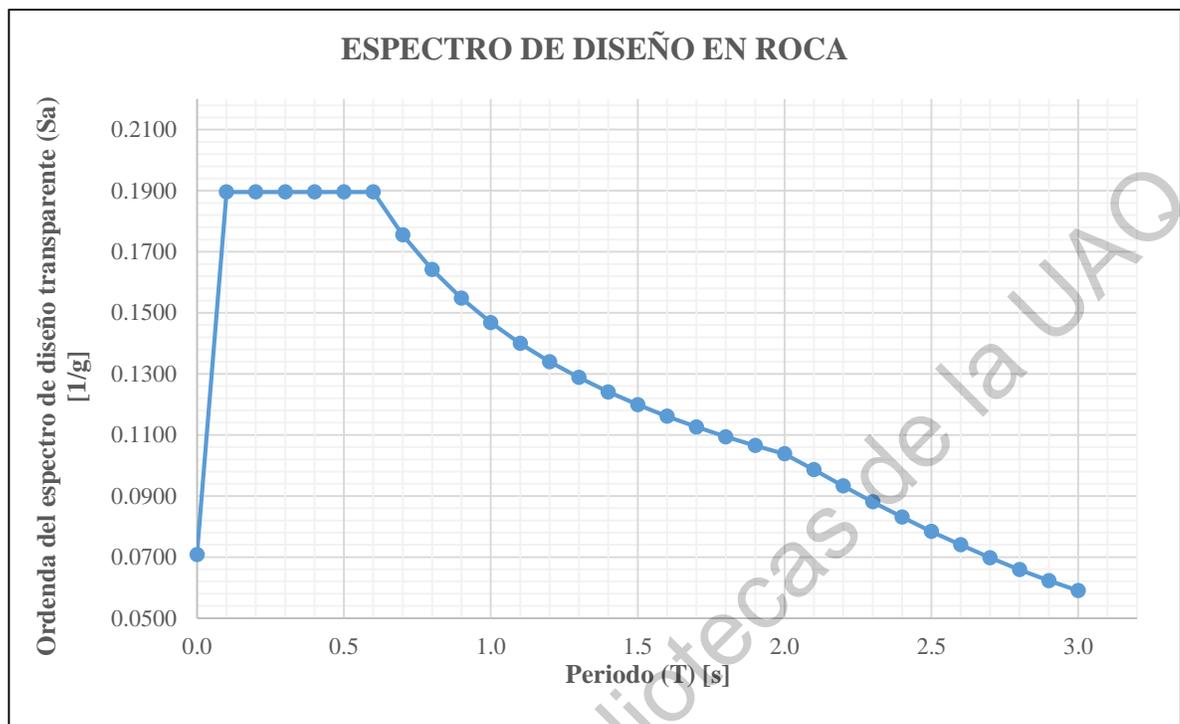


Figura 112. Gráfica del espectro de diseño en roca correspondiente a la ubicación de la vivienda.

La gráfica del espectro de diseño en roca corresponde a los valores obtenidos de dicho espectro mediante el software PRODISIS para la ubicación precisa de la CSE, cuyas coordenadas son: 20°35'27" N, 100°24'46" O, situada en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de Campus Universitario de la Universidad Autónoma de Querétaro, en la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro., México.

En dicha gráfica en el eje de las abscisas están representados los valores del periodo (T) en segundos, y en el eje vertical el correspondiente a la ordenada del espectro de diseño transparente (Sa), el cual está en función de la gravedad.

El software PRODISIS (Programa de Diseño Sísmico) pertenece al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) de la Secretaría de Energía (SE), el cual se coordina con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para que dicho software sea una herramienta para conocer los valores probables de aceleración del terreno en un lugar específico dentro de la República Mexicana, obteniendo un espectro de diseño, entre otras funciones.

6.4.9.2 Masas concentradas

En el análisis dinámico se hace uso de las masas concentradas en distintos puntos de la estructura, habiendo dos métodos para su aplicación: en el primero se contempla una única masa por cada entrepiso de la estructura, donde dicha masa se concentra geoméricamente en el centro de masas del entrepiso, se recomienda usar este método para entrepisos simétricos; o bien, en el segundo método se contempla concentrar varias masas en distintos puntos del entrepiso, recayendo directamente sobre las columnas, una masa por cada columna por cada entrepiso. En ambos casos la masa debe ser igual a la carga tributaria correspondiente a cada punto, dicha carga se debe a toda la carga muerta y a la carga viva instantánea.

En este caso se optó por emplear el método de masas concentradas sobre columnas, ya que es el más adecuado para esta estructura debido a que la geometría de la vivienda no es muy simétrica, y también porque la mayoría de los muros están concentrados en el perímetro de la estructura, lo que provoca que el peso de los mismos se distribuya principalmente a las columnas perimetrales y muy poco a las interiores.

El análisis realizado para obtener la concentración de masas en cada una de las columnas se divide en 2: uno el debido al peso de los muros, donde se realizó el desglose del peso de los muros dependiendo de una longitud tributaria de muro hacia las columnas; y el otro es el análisis de las cargas muertas, cargas vivas instantáneas y el peso propio de la estructura de acero, en donde se consideró cada uno de estos valores dependiendo del entrepiso en cuestión, así como la ubicación de la columna más cercana para que la carga se distribuyera a ésta. Para este análisis se consideró emplear la carga viva instantánea ya que es la que debe contemplarse en cálculos de sismo.

En el caso del peso propio de la estructura se realizó un desglose del peso de cada uno de los elementos según su ubicación en la vivienda, para luego ser concentrados en cada sistema de entrepiso respectivo; en donde los pesos de los elementos propios del entrepiso, le corresponden a dicho entrepiso, pero en el caso del peso de las columnas, la mitad del peso de las mismas le corresponde al entrepiso debajo y la otra mitad al entrepiso superior.

6.4.9.2.1 Peso de la estructura

Tabla 37. Desglose del peso propio de los elementos de la estructura según ubicación.

Elemento	Sección de perfil	Ubicación		Peso	
					(kg)
Columnas	PTR 4x4x3/16	Base		173	1,188
		Escaleras	Bajo el descanso	43	
			Al lado del descanso	75	
		Planta baja	Con entepiso arriba	261	
			Con cubierta arriba	263	
			Pergolado	74	
		Planta alta		299	
Conexiones universales	PTR4x4x3/16	Entrepiso	1er nivel	167	391
			2do nivel	69	
		Cubierta	1er nivel	52	
			Pergolado	34	
			2do nivel	69	
Cuerda superior	2T LI 1_1/2x1_1/2x1/8	Entrepiso	1er nivel	356	846
			2do nivel	135	
		Cubierta	1er nivel	161	
			Pergolado	50	
			2do nivel	144	
Cuerda inferior	2T LI 1_1/2x1_1/2x1/8	Entrepiso	1er nivel	356	846
			2do nivel	135	
		Cubierta	1er nivel	161	
			Pergolado	50	
			2do nivel	144	
Diagonales	2T LI 1x1x1/8	Entrepiso	1er nivel	282	670
			2do nivel	107	
		Cubierta	1er nivel	147	
			Pergolado	20	
			2do nivel	114	
Montantes	2T LI 1x1x1/8	Entrepiso	1er nivel	118	283
			2do nivel	46	
		Cubierta	1er nivel	51	
			Pergolado	20	
			2do nivel	48	
Riostras	LI 1x1x1/8	Entrepiso	1er nivel	86	199
			2do nivel	27	
		Cubierta	1er nivel	44	
			Pergolado	10	
			2do nivel	32	
Montenes	4 MT 16	Entrepiso	1er nivel	294	680
			2do nivel	81	
		Descanso escaleras		6	
		Cubierta	1er nivel	149	
			Pergolado	38	
			2do nivel	112	
Alfardas	PTR 4x2x3/16	Escaleras		253	253
Peso total (kg):				5,356	5,356

Tabla 38. Peso total de los perfiles de la estructura según el entrepiso hacia donde dirige su carga.

Sección de perfil	1er entrepiso	Descanso escaleras	2do entrepiso	Cubierta 1er nivel	Cubierta 2do nivel	TOTAL
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
PTR 4x4x3/16	652	59	349	255	219	1,582
2T LI 1_1/2x1_1/2x1/8	712	-	270	422	288	1,692
2T LI 1x1x1/8	400	-	153	238	162	953
LI 1x1x1/8	86	-	27	54	32	199
4 MT 16	294	6	81	187	112	680
PTR 4x2x3/16	63	127	63	-	-	253
Total (kg)	2,207	192	944	1,156	813	5,359

6.4.9.2.2 Aportación de masas de muros a columnas

Tabla 39. Peso de los muros hacia cada columna por cada entrepiso.

Número de columna C-1	Peso de muros hacia columnas							Peso total (kg)
	Muros perimetrales					Muros interiores		
	M-1	M-2		M-4		M-3		
	Base	Planta baja	Planta alta	Cubierta 1er nivel	Cubierta 2do nivel	Planta baja	Planta alta	
#	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
1	13.99	267.06	267.06	-	58.39	-	-	606.49
2	13.99	267.06	267.06	-	58.39	-	-	606.49
3	9.33	178.04	178.04	-	38.93	165.65	-	569.98
4	13.99	267.06	89.02	38.93	38.93	-	-	447.92
5	13.99	267.06	-	58.39	-	-	-	339.44
6	9.33	178.04	178.04	-	38.93	41.41	165.65	611.39
7	-	-	-	-	-	207.06	-	207.06
8	-	-	178.04	-	38.93	289.88	165.65	672.50
9	9.33	178.04	-	38.93	-	-	-	226.29
10	6.99	133.53	178.04	-	58.39	-	-	376.95
11	4.66	89.02	-	-	-	-	-	93.68
12	6.99	133.53	178.04	-	-	-	-	318.56
13	9.33	178.04	89.02	19.46	58.39	-	-	354.24
14	9.33	178.04	-	19.46	-	-	-	206.83
15	13.99	267.06	-	-	-	-	-	281.04
16	9.33	178.04	-	38.93	-	-	-	226.29
17	-	-	-	38.93	-	-	-	38.93
18	13.99	267.06	-	58.39	-	-	-	339.44
19	13.99	267.06	-	58.39	-	-	-	339.44
20	13.99	267.06	-	-	-	-	-	281.04
Total:	186.53	3,560.74	1,602.33	369.83	389.30	704.00	331.30	7,144.02

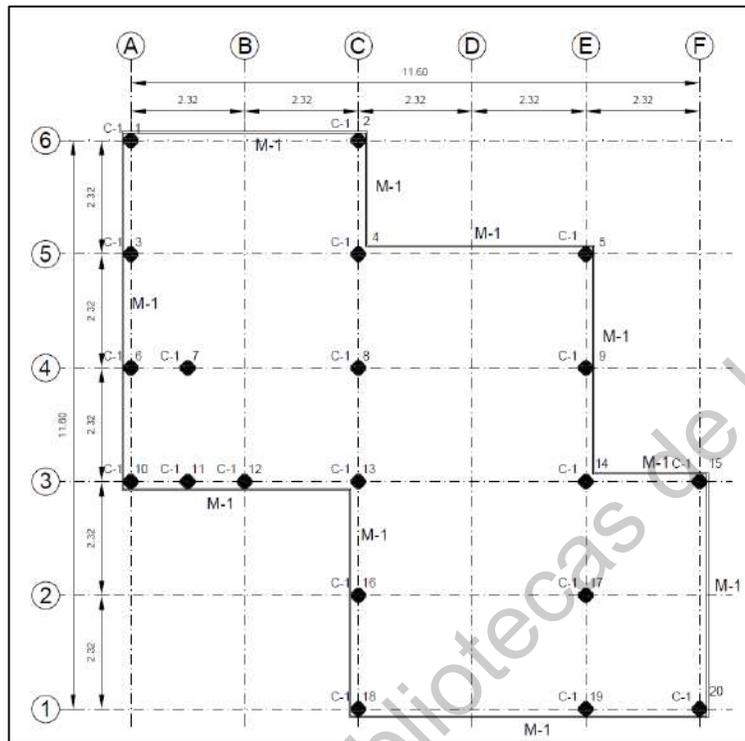


Figura 113. Muros perimetrales de la base M-1 ubicados en el primer entrespiso.

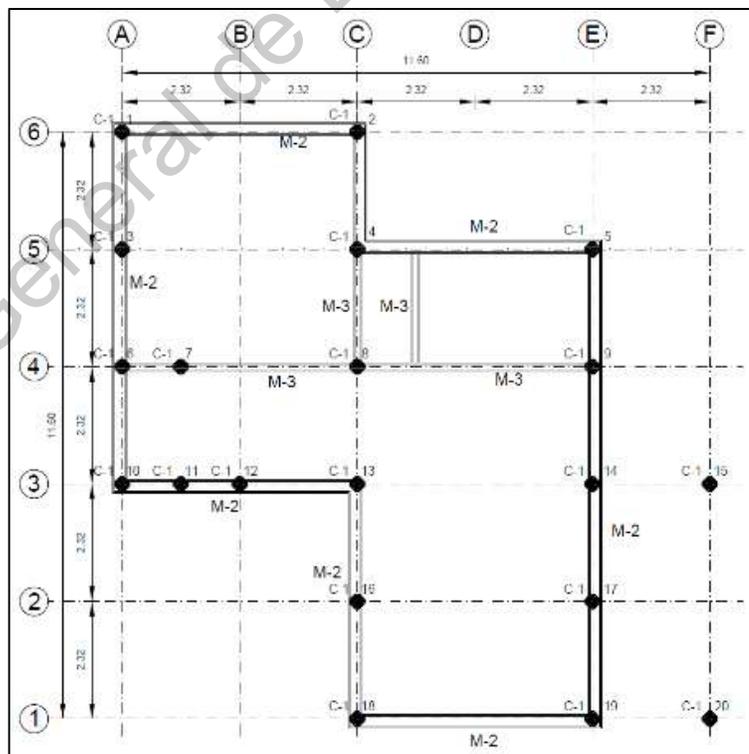


Figura 114. Muros perimetrales M-2 y muros interiores M-3 del primer entrespiso.

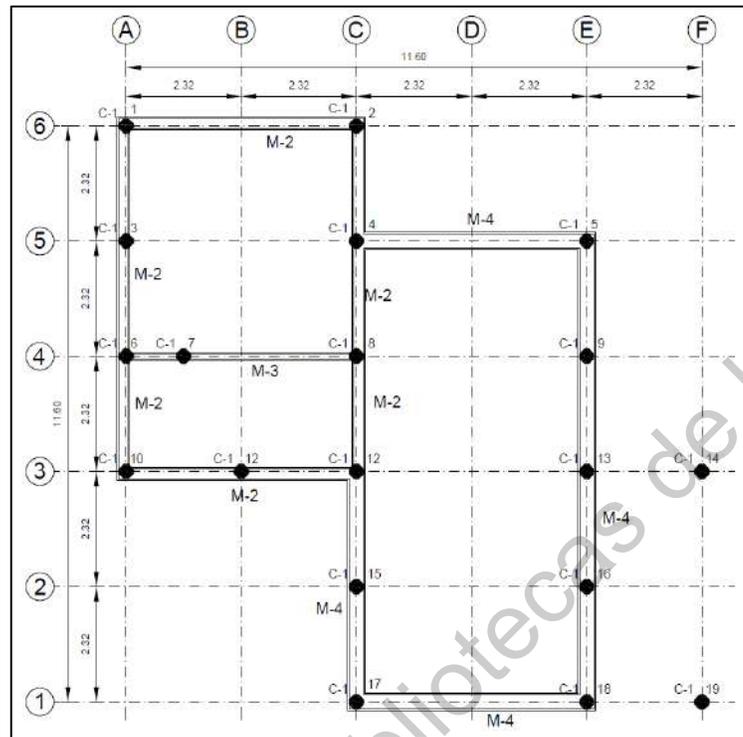


Figura 115. Muros perimetrales M-2 e interiores M-3 del segundo entrespiso y muros de pretil M-4 de la cubierta de primer nivel.

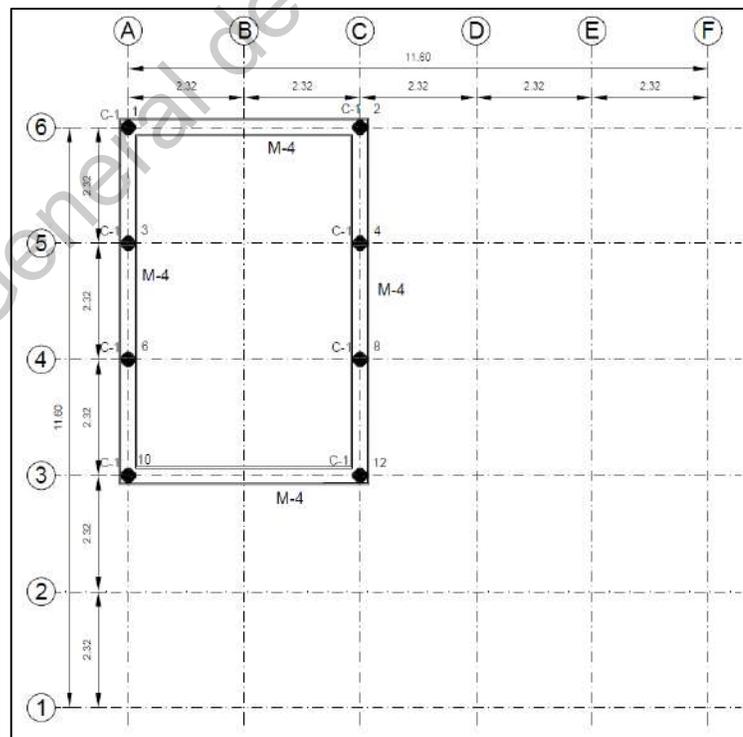


Figura 116. Muros de pretil M-4 en la cubierta de segundo nivel.

Tabla 40. Pesos de los muros por ubicación.

Tipo de muro según ubicación		1er entepiso	2do entepiso	Cubierta 1er nivel	Cubierta 2do nivel	TOTAL
Clave	Ubicación	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
M-1	Base	186.53	-	-	-	186.53
M-2	Perimetral	3560.74	1602.33	-	-	5,163.07
M-3	Interior	704.00	331.30	-	-	1,035.30
M-4	Pretil	-	-	369.83	389.30	759.13
Total (kg)		4,451.27	1,933.63	369.83	389.30	7,144.02

Se realizó el desglose del peso propio de los elementos de la estructura (tabla 37) y su distribución por entepiso por cada tipo de sección (tabla 38), así como la aportación de las masas de los muros hacia las columnas (tabla 39). Los muros M1, M2, M3 y M4 están distribuidos según se indica (figuras 113 - 116).

6.4.9.2.3 Aportación de masas de entepisos a columnas

Los entepisos de la vivienda están compuestos de un sistema de elementos de armaduras y montenes, éstos absorben la carga del piso o cubierta y a su vez conducen dicha carga hacia las columnas. Para poder saber cuánta carga están sosteniendo las columnas se dividieron los entepisos en áreas tributarias según la orientación, ubicación y extensión de las armaduras y montenes, como se muestra (figuras 117 – 120).

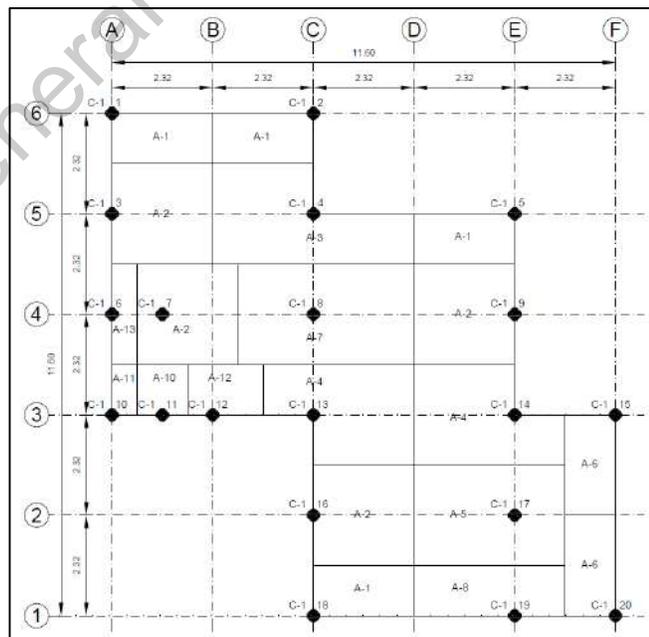


Figura 117. Ubicación de las áreas tributarias por columna en el entepiso de primer nivel.

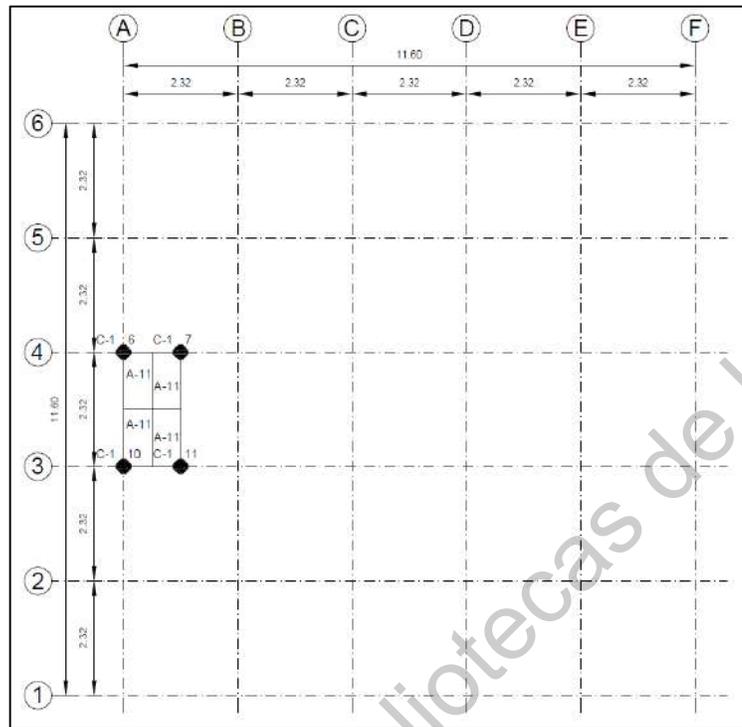


Figura 118. Ubicación de áreas tributarias del descanso de las escaleras hacia columnas.

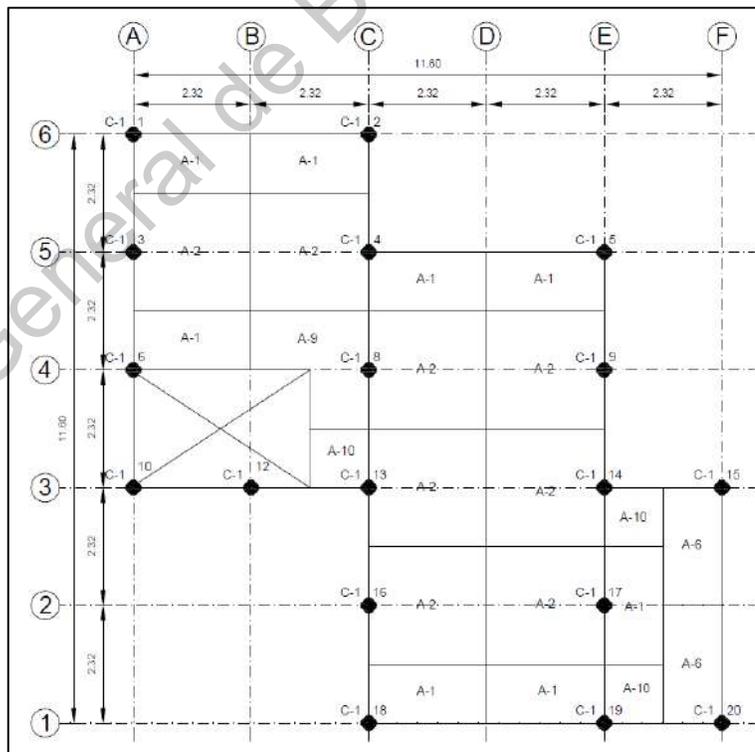


Figura 119. Ubicación de las áreas tributarias por columna en el entrepiso de segundo nivel colindante con entrepiso de cubierta de primer nivel y pergolado.

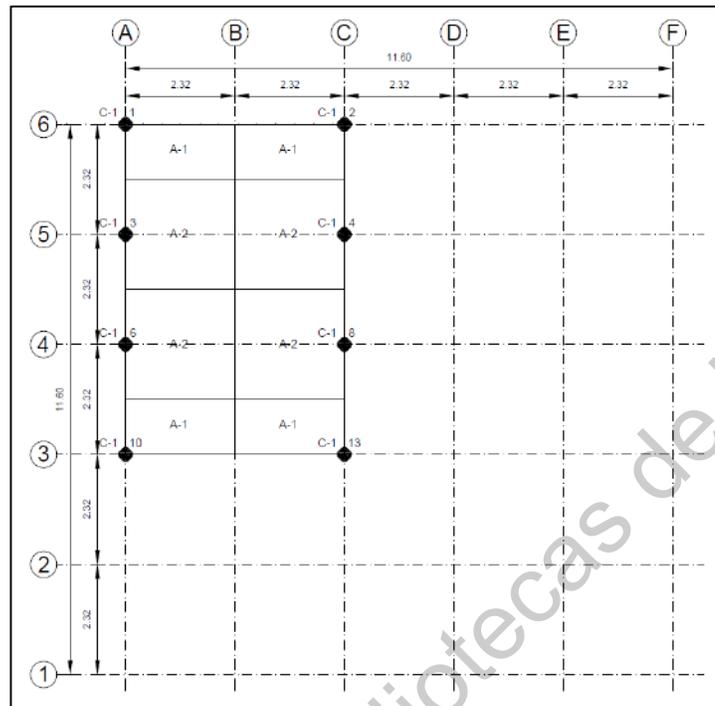


Figura 120. Ubicación de las áreas tributarias por columna en cubierta de 2do nivel.

Para conocer la carga sobre las columnas, primero se hizo un desglose de la aportación de la carga muerta, carga viva instantánea y el peso propio de la estructura por cada ubicación en la vivienda. En el caso de la aportación de las rampas de escaleras, la mitad de la rampa inferior se transmitió al primer entrepiso y la otra mitad al descanso de la escalera; de la misma manera, la aportación de la rampa superior la mitad se transmitió hacia el segundo entrepiso y la otra mitad para el descanso de las escaleras (tabla 41).

Tabla 41. Aportaciones de masas hacia el entrepiso donde dirige su carga

Ubicación	Área (m ²)	Peso por unidad de superficie		Aportación			Total (kg)
		Carga muerta (kg/m ²)	Carga viva instantánea (kg/m ²)	Cargas		Peso propio	
				Carga muerta (kg)	Carga viva instantánea (kg)	Estructura (kg)	
1er entrepiso	86.12	45.40	100.00	3,909.78	8,611.84	2,197.50	14,719.12
Descanso escaleras	2.69	25.91	150.00	69.73	403.68	191.50	664.91
Alfarda rampa inferior	2.23	25.91	150.00	57.71	334.08	-	391.79
Alfarda rampa superior	2.23	25.91	150.00	57.71	334.08	-	391.79
2do entrepiso	24.22	57.00	100.00	1,380.59	2,422.08	962.00	4,764.67
Cubierta 1er nivel	43.06	38.07	70.00	1,639.26	3,014.14	896.50	5,549.91
Pergolado 1er nivel	10.76	-	-	-	-	296.00	296.00
Cubierta 2do nivel	32.29	38.07	70.00	1,229.45	2,260.61	812.50	4,302.56
Total	203.60			8,344.22	17,380.51	5,356.00	31,080.73

Posteriormente se dividió la carga concentrada por entre piso entre el área respectiva de cada uno, para así obtener una presión promedio de cada entrepiso (tabla 42).

Tabla 42. Presión promedio de las masas concentradas por tipo de entrepiso.

Tipo de entrepiso por altura	Carga muerta	Peso propio de la estructura	Carga viva instantánea	Peso total de las masas concentradas (sin muros)	Área por entrepiso	Peso por unidad de superficie de las masas concentradas (sin muros)
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(m ²)	(kg/m ²)
1er entrepiso	3,938.63	2,197.50	8,778.88	14,915.01	86.12	173.19
Descanso escaleras	127.44	191.50	737.76	1,056.70	2.69	392.65
2do entrepiso	1,409.44	962.00	2,589.12	4,960.56	24.22	204.81
Cubierta 1er nivel	1,639.26	896.50	3,014.14	5,549.91	43.06	128.89
Cubierta pergolado 1er nivel	-	296.00	-	296.00	10.76	27.50
Cubierta 2do nivel	1,229.45	812.50	2,260.61	4,302.56	32.29	133.23
Total	8,344.22	5,356.00	17,380.51	31,080.73	199.15	

Dicha presión promedio de masas por entrepiso se multiplicó por el área tributaria respectiva de cada columna y por cada entrepiso, de esta manera se obtuvo la masa concentrada en cada una de las columnas debido a los entrepisos (tabla 43), a la que posteriormente se le sumó la masa concentrada en cada columna debido al peso de los muros (tablas 44 y 45).

Tabla 43. Valores de las áreas tributarias en la estructura que llegan a columnas.

Tipo de área tributaria	Polígono 1		Polígono 2		Área tributaria total (m ²)
	Lado 1	Lado 2	Lado 1	Lado 2	
	(m)	(m)	(m)	(m)	
A-1	2.32	1.16	-	-	2.69
A-2	2.32	2.32	-	-	5.38
A-3	2.32	1.16	2.32	2.32	8.07
A-4	1.16	1.16	2.32	2.32	6.73
A-5	3.48	2.32	-	-	8.07
A-6	1.16	2.32	-	-	2.69
A-7	4.06	2.32	-	-	9.42
A-8	3.48	1.16	-	-	4.04
A-9	2.32	1.16	1.16	1.16	4.04
A-10	1.16	1.16	-	-	1.35
A-11	0.58	1.16	-	-	0.67
A-12	1.74	1.16	-	-	2.02
A-13	0.58	2.32	-	-	1.35

Tabla 44. Masas concentradas por tipo de área en columnas por cada tipo de sistema de entrepiso.

Tipo de entrepiso	Área tributaria		Cantidad de áreas por tipo y entrepiso	Área total (m ²)	Presión sobre el entrepiso (kg/m ²)	Masa concentrada sobre la columna por cada tipo de área (kg)	
	Tipo	Área (m ²)				Una columna	Todas
1er entrepiso	A-1	2.69	4	10.76	173.19	466.09	1,864.38
	A-2	5.38	4	21.53		932.19	3,728.75
	A-3	8.07	1	8.07		1,398.28	1,398.28
	A-4	6.73	2	13.46		1,165.24	2,330.47
	A-5	8.07	1	8.07		1,398.28	1,398.28
	A-6	2.69	2	5.38		466.09	932.19
	A-7	9.42	1	9.42		1,631.33	1,631.33
	A-8	4.04	1	4.04		699.14	699.14
	A-10	1.35	1	1.35		233.05	233.05
	A-11	0.67	1	0.67		116.52	116.52
	A-12	2.02	1	2.02		349.57	349.57
	A-13	1.35	1	1.35		233.05	233.05
	Descanso escaleras	A-11	0.67	4		2.69	392.65
2do entrepiso	A-1	2.69	3	8.07	204.81	551.17	1,653.52
	A-2	5.38	2	10.76		1,102.35	2,204.69
	A-9	4.04	1	4.04		826.76	826.76
	A-10	1.35	1	1.35		275.59	275.59
Cubierta 1er nivel	A-1	2.69	4	10.76	128.89	346.87	1,387.48
	A-2	5.38	6	32.29		693.74	4,162.43
Pergolado 1er nivel	A-1	2.69	1	2.69	27.50	74.00	74.00
	A-6	2.69	2	5.38		74.00	148.00
	A-10	1.35	2	2.69		37.00	74.00
Cubierta 2do nivel	A-1	2.69	4	10.76	133.23	358.55	1,434.19
	A-2	5.38	4	21.53		717.09	2,868.37
Total:				199.15			31,080.73

Tabla 45. Masas concentradas en las columnas por cada entrepiso.

*Área de un entrepiso adyacente pero con una presión distinta.

Columna	Masa concentrada sobre la columna por entrepiso												Total
	1er entrepiso		Descanso escaleras		2do entrepiso / Cubierta 1er nivel*		Cubierta 1er nivel / Pergolado 1er nivel*		Pergolado 1er nivel		Cubierta 2do nivel		
#	Área	(kg)	Área	(kg)	Área	(kg)	Área	(kg)	Área	(kg)	Área	(kg)	(kg)
1	A1	466.09	-	-	A1	551.17	-	-	-	-	A1	358.55	1,375.81
2	A1	466.09	-	-	A1	551.17	-	-	-	-	A1	358.55	1,375.81
3	A2	932.19	-	-	A2	1,102.35	-	-	-	-	A2	717.09	2,751.63
4	A3	1,398.28	-	-	A2+A1*	1,449.22	-	-	-	-	A2	717.09	3,564.59
5	A1	466.09	-	-	-	-	A1	346.87	-	-	-	-	812.96
6	A13	233.05	A11	264.17	A1	551.17	-	-	-	-	A2	717.09	1,765.49
7	A2	932.19	A11	264.17	-	-	-	-	-	-	-	-	1,196.36
8	A7	1,631.33	-	-	A9+A2*	1,520.50	-	-	-	-	A2	717.09	3,868.92
9	A2	932.19	-	-	-	-	A2	693.74	-	-	-	-	1,625.93
10	A11	116.52	A11	264.17	-	-	-	-	-	-	A1	358.55	739.24
11	A10	233.05	A11	264.17	-	-	-	-	-	-	-	-	497.22
12	A12	349.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	349.57
13	A4	1,165.24	-	-	A10+A2*	969.33	-	-	-	-	A1	358.55	2,493.11
14	A4	1,165.24	-	-	-	-	A2+A10*	730.74	-	-	-	-	1,895.97
15	A6	466.09	-	-	-	-	-	-	A6	74.00	-	-	540.09
16	A2	932.19	-	-	-	-	A2	693.74	-	-	-	-	1,625.93
17	A5	1,398.28	-	-	-	-	A2+A1*	767.74	-	-	-	-	2,166.02
18	A1	466.09	-	-	-	-	A1	346.87	-	-	-	-	812.96
19	A8	699.14	-	-	-	-	A1+A10*	383.87	-	-	-	-	1,083.01
20	A6	466.09	-	-	-	-	-	-	A6	74.00	-	-	540.09
Total		14,915.01		1,056.70		6,694.91		3,963.56		148.00		4,302.56	31,080.73

El entrepiso de segundo nivel está compartido a la misma altura con otros tipos de entrepiso que cuentan con presiones distintas, los cuales son la cubierta de primer nivel y el pergolado de primer nivel. En este caso cuando hay una columna que colinda con 2 sistemas de entrepiso distintos, ésta soporta parte de la carga tributaria de un entrepiso y parte de la carga tributaria del otro, por lo que se tomó en cuenta tanto la presión como el área tributaria de cada una para luego sumarse.

Finalmente se sumaron todas las aportaciones hacia cada una de las columnas por cada tipo de entrepiso: el peso propio de la estructura, la carga muerta, la carga viva instantánea y el peso de los muros, así se obtuvo la masa concentrada total por cada columna en cada entrepiso (tabla 46).

Tabla 46. Masas concentradas totales para cada columna por cada sistema de entrepiso.

Número de columna C-1	Peso propio estructura, peso de muros, carga muerta y carga viva instantánea				Total
	Planta baja	Descanso escaleras	Planta alta, cubierta 1er nivel y cubierta pergolado	Cubierta 2do nivel	
#	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
1	747.14	-	818.23	416.94	1,982.31
2	747.14	-	818.23	416.94	1,982.31
3	1,285.20	-	1,280.38	756.02	3,321.60
4	1,679.33	-	1,577.16	756.02	4,012.51
5	747.14	-	405.26	-	1,152.40
6	461.82	264.17	894.86	756.02	2,376.88
7	1,139.25	264.17	-	-	1,403.42
8	1,921.21	-	1,864.18	756.02	4,541.42
9	1,119.55	-	732.67	-	1,852.22
10	257.05	264.17	178.04	416.94	1,116.20
11	326.73	264.17	-	-	590.90
12	490.09	-	178.04	-	668.13
13	1,352.60	-	1,077.81	416.94	2,847.35
14	1,352.60	-	750.20	-	2,102.80
15	747.14	-	74.00	-	821.14
16	1,119.55	-	732.67	-	1,852.22
17	1,398.28	-	806.67	-	2,204.95
18	747.14	-	405.26	-	1,152.40
19	980.19	-	442.26	-	1,422.45
20	747.14	-	74.00	-	821.14
Total:	19,366.28	1,056.70	13,109.93	4,691.85	38,224.75

Una vez obtenidas las masas concentradas de las columnas por cada sistema de entrespiso, éstas fueron aplicadas en los nodos encima de dichas columnas por cada entrespiso a través del uso del software de cálculo estructural RAM Elements. Además, también se le aplicó una masa concentrada de 1,100 kg a un nodo de la cubierta de segundo nivel simulando el peso de un tinaco de 1,100 litros. En total se aplicaron masas en 51 nodos distintos distribuidos en diferentes entrespisos (figura 121).

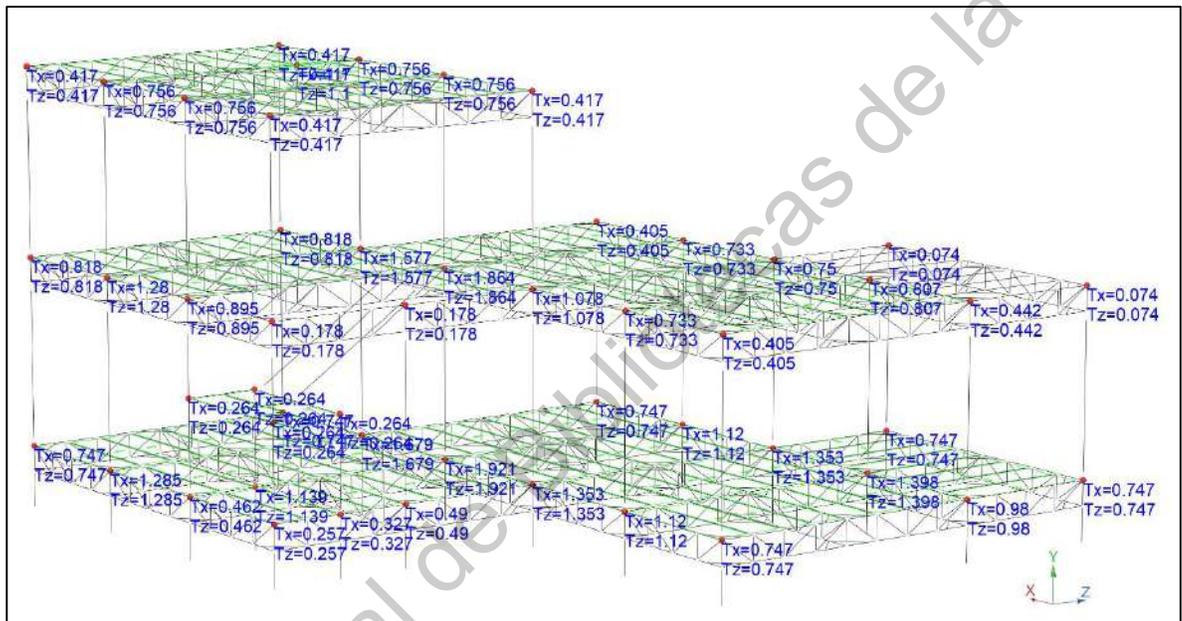


Figura 121. Para el cálculo de sismo se realizó la aplicación de las masas concentradas en los nodos sobre las columnas de la estructura por cada entrespiso (valores en toneladas).

6.4.9.3 Aplicación del sismo

Para que el software de cálculo estructural RAM Elements pueda considerar la fuerza sísmica que le corresponde a la estructura debido a su geometría y distribución de masas concentradas en sus columnas y tomando en cuenta el espectro de diseño sísmico del terreno donde se ubica la vivienda; se aproximó el cortante basal de la estructura en las dos direcciones horizontales perpendiculares (S_x y S_z), al cortante basal dinámico (F_{BD}) calculado, siguiendo una serie de pasos que a continuación se describen:

Se calculó la masa total de la vivienda incluyendo la carga muerta de los entresijos, el peso propio de los elementos de la estructura y el peso de los muros (tabla 47), y posteriormente se le añadió la aportación de la carga viva instantánea (tabla 48).

Tabla 47. Peso total de la vivienda por cada entresijo.

Tipo de entresijo por altura	Carga muerta (entresijos)	Peso estructura	Peso muros	Peso total vivienda
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
1er entresijo	3,938.63	2,197.50	4,451.27	10,587.40
Descanso escaleras	127.44	191.50	-	318.94
2do entresijo	1,409.44	962.00	1,933.63	4,305.07
Cubierta 1er nivel	1,639.26	896.50	369.83	2,905.59
Cubierta pergolado 1er nivel	-	296.00	-	296.00
Cubierta 2do nivel	1,229.45	812.50	389.30	2,431.24
Peso total (kg)	8,344.22	5,356.00	7,144.02	20,844.24

Tabla 48. Aportación de masas concentradas totales de la vivienda.

Tipo de entresijo por altura	Peso total vivienda	Carga viva instantánea	Total masas concentradas
	(kg)	(kg)	(kg)
1er entresijo	10,587.40	8,778.88	19,366.28
Descanso escaleras	318.94	737.76	1,056.70
2do entresijo	4,305.07	2,589.12	6,894.19
Cubierta 1er nivel	2,905.59	3,014.14	5,919.74
Cubierta pergolado 1er nivel	296.00	-	296.00
Cubierta 2do nivel	2,431.24	2,260.61	4,691.85
Peso total (kg)	20,844.24	17,380.51	38,224.75

Se obtuvo el cortante basal estático de la estructura con un valor de $F_{BE}=3.631$ toneladas, mediante el cociente del producto de la concentración de masa total, $W_0=38.224$ toneladas; por el coeficiente de aceleración sísmica, $c=0.19$ de g (obtenido del software PRODISIS); entre el factor de ductilidad de la estructura, $Q=2$; como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_{BE} = \frac{(W_0)(c)}{Q} \quad (7)$$

Se obtuvo el cortante basal dinámico con un valor de $F_{BD}=2.91$ toneladas a través del producto con el factor de 0.8, por el cortante basal estático, F_{BE} .

En el software RAM Elements se activó un caso de carga correspondiente a sismo (ya sea S_x o S_z), de esta manera se asignaron las acciones de sismo en las combinaciones de carga.

Luego se agregó el espectro de respuesta sísmico, que en este caso fue el espectro de diseño en roca obtenido del software PRODISIS de la CFE, para la ubicación de la vivienda.

Posteriormente se aplicaron las 50 masas concentradas antes calculadas en los nodos superiores de las columnas por cada entrepiso, así como una masa concentrada de 1,000 kg en un nodo de la cubierta del segundo entrepiso debido al peso del agua del tinaco.

En el software se le adicionó la aceleración máxima del terreno $a_0=0.076$ de g, y un amortiguamiento de la estructura de $\zeta_e=5\%$ (recomendado por PRODISIS), para cada dirección horizontal perpendicular, S_x y S_z ; además se le agregó el sentido del sismo en sentido $-S_x$, correspondiente a 180° en el software; y a 90° para $-S_z$.

Después se corrió el programa para realizar el cálculo estructural bajo esas condiciones, con lo cual se obtuvo un cortante basal en ambas direcciones (S_x y S_z), dicho valor calculado por el software tuvo que aproximarse al valor calculado del cortante basal dinámico, F_{BD} , por lo que se realizaron múltiples iteraciones hasta lograrlo. De esta manera se aseguró que el software estuvo trabajando correctamente con los valores de cortante basal que se calcularon presentaría la estructura en caso de un sismo con el espectro considerado.

La primera iteración para aproximar el valor del cortante basal en el software tanto en dirección S_x como en S_z , se realizó obteniendo un factor de escala por cada dirección, FE_{i_x} y FE_{i_z} ; a través del cociente del producto de la aceleración máxima del terreno $a_0=0.076$ de g; por el cortante basal dinámico F_{BD} , entre la fuerza basal dinámica resultante en el software en la primera corrida del programa, por cada dirección (F_{BDi_x} y F_{BDi_z}), como se muestra en la siguiente expresión:

$$FE_{i\ x,z} = \frac{(a_0)(F_{BD})}{F_{BDi\ x,z}} \quad (8)$$

Producto de la iteración anterior (la primera), se obtuvo el nuevo factor de escala por cada dirección $FE_{i\ x}$ y $FE_{i\ z}$; el cual se multiplicó por el cortante basal dinámico F_{BD} ; estos dos valores se dividieron entre los cortantes basales máximos por cada dirección ($F_{BDi\ x}$ y $F_{BDi\ z}$), valores que fueron obtenidos del producto de la primera iteración por medio del software, como se muestra en la siguiente expresión:

$$FE_{i\ x,z} = \frac{(FE_{i-1\ x,z})(F_{BD})}{F_{BDi\ x,z}} \quad (9)$$

Posteriormente se realizaron varias iteraciones con la ecuación anterior hasta obtener que los valores del cortante basal calculado por el software en cada dirección ($F_{BDi\ x}$ y $F_{BDi\ z}$) y el calculado por medio de la ecuación del cortante basal dinámico (F_{BD}), fuesen iguales o muy aproximados entre sí ($F_{BDi\ x} = F_{BD}$ y $F_{BDi\ z} = F_{BD}$). Cuando esto sucede se tiene la certeza que el software le ha proporcionado a la estructura la fuerza lateral de sismo esperada, de acuerdo a su geometría y masa de la estructura, así como por las condiciones de terreno con las aceleraciones máximas esperadas para dicha ubicación.

En este caso se realizaron 8 iteraciones hasta aproximar el cortante basal calculado por el software en cada una de las dos direcciones horizontales perpendiculares (S_x y S_z), con el cortante basal dinámico calculado con la ecuación (tabla 49).

Tabla 49. Iteraciones realizadas para aproximar el cortante basal en el software con el calculado.

Iteración	Factores de escala			Cortante basal dinámico		
	Aceleración máxima del suelo	Dirección S_x	Dirección S_z	Ecuación	Software	
					Dirección S_x	Dirección S_z
				a_0	$FE_{i\ x}$	$FE_{i\ z}$
1	0.076	-	-	2.91	0.26	0.20
2	-	0.7885	1.0514	2.91	2.88	2.96
3	-	0.7954	1.0319	2.91	2.90	2.90
4	-	0.7968	1.0337	2.91	2.90	2.91
5	-	0.7982	1.0319	2.91	2.91	2.90
6	-	0.7968	1.0337	2.91	2.90	2.91
7	-	0.7982	1.0320	2.91	2.90	2.90
8	-	0.7996	1.0338	2.91	2.91	2.91

6.5 Revisión de tornillos placas y soldaduras

6.5.1 Dimensionamiento de agujeros de placas

Diámetro de los agujeros: en el caso de agujeros redondos: si el agujero es de un diámetro estándar, éste debe ser 1/16 más grande que el diámetro del tornillo; y si el agujero es de clasificado como sobredimensionado, éste debe ser como se indica (tabla 50) (AISC, 2016).

Tabla 50. Dimensión de los agujeros según su tipo y diámetro nominal del tornillo (AISC, 2016).

Diámetro del tornillo		Diámetro del agujero (estándar)		Diámetro del agujero (sobredimensionado)	
(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)
1/2	12.70	9/16	14.29	11/16	17.46
5/8	15.88	11/16	17.46	13/16	20.64
3/4	19.05	13/16	20.64	15/16	23.81
7/8	22.23	15/16	23.81	1 1/16	26.99
1	25.40	1 1/16	26.99	1 1/4	31.75
d > 1	d > 25.40	d + 1/16		d + 5/16	

Distancia al borde: debe ser del diámetro del tornillo más 1/4 del diámetro nominal de éste, para diámetros de atornillo de hasta 1 pulgada; y para diámetros de tornillo mayores a una pulgada será lo indicado (tabla 51) (AISC, 2016).

Tabla 51. Distancia mínima al borde (AISC, 2016).

Diámetro del tornillo		Distancia mínima a borde, desde el centro del agujero hasta y una parte conectada	
(in)	(mm)	(in)	(mm)
1/2	12.70	3/4	19.05
5/8	15.88	7/8	22.23
3/4	19.05	1	25.40
7/8	22.23	1 1/8	28.58
1	25.40	1 1/4	31.75
1 1/8	28.58	1 1/2	38.10
1 1/4	31.75	1 5/8	41.28
d > 1 1/4	d > 31.75	d + 1/4	

El espaciamiento entre agujeros: debe ser al menos 2 2/3 veces el diámetro nominal del sujetador, el cual se toma de centro a centro de los agujeros (tabla 52) (AISC, 2016).

Tabla 52. Espaciamiento entre agujeros (AISC, 2016).

Diámetro del tornillo		Distancia mínima entre agujeros, entre centro y centro de agujeros	
(in)	(mm)	(in)	(mm)
3/8	9.53	1	25.40
7/16	11.11	1 1/6	29.63
1/2	12.70	1 1/3	33.87
9/16	14.29	1 1/2	38.10
5/8	15.88	1 2/3	42.33
11/16	17.46	1 5/6	46.57
3/4	19.05	2	50.80

Cabe señalar que en el caso de las placas agujereadas de la conexión universal H-1, éstas cumplen con todos los requisitos, tanto en tamaño de agujeros respecto al diámetro del tornillo, el espaciamiento mínimo entre agujeros y la distancia mínima a los bordes, desde el centro del agujero hasta una parte conectada.

6.5.2 Placa lateral de la conexión universal

Se tiene una placa agujereada con una sección de 3 pulgadas de ancho por 4 pulgadas de alto y con un espesor de 1/4 de pulgada. La cual se revisó su condición ante las fuerzas actuantes a través de los tornillos que transmiten los esfuerzos a la placa (figura 122).

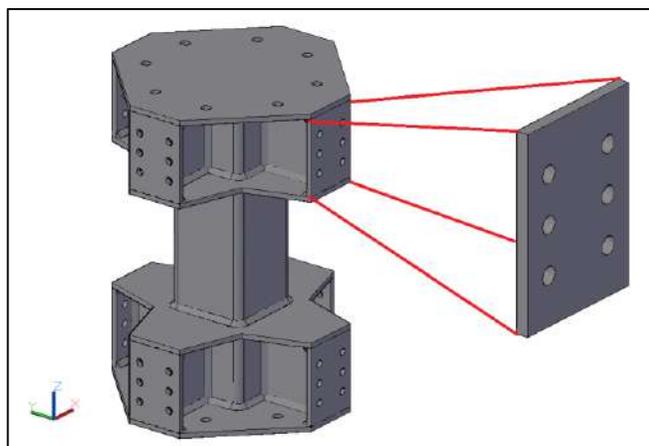


Figura 122. Vista de la ubicación de la placa analizada en la conexión universal.

6.5.2.1 Falla de fluencia en tensión

La falla por fluencia en tensión se refiere cuando en alguna zona del elemento, ésta llega al límite de fluencia, donde su sección transversal en dicha zona se deforma de manera importante, siendo alargado el elemento perdiendo área transversal, hasta llegar a la posible separación del elemento en dicha zona (figura 123).

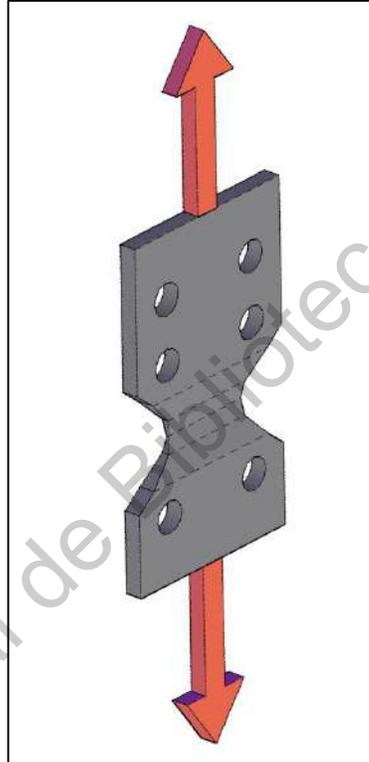


Figura 123. Representación de la falla por fluencia a tensión de la placa.

La falla por fluencia en tensión se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P_n = (f_y)(A_{gt}) \quad (10)$$

$$P_u = (\phi_f)(P_n) \quad (11)$$

Donde:

ϕ_f : Factor de resistencia para falla por fluencia en tensión, donde: $\phi_f = 0.9$ (LRFD).

A_{gt} : Área bruta en tensión de la placa, transversal a la aplicación de la fuerza.

P_n : Tensión nominal.

f_y : Esfuerzo de fluencia del material, donde: $f_y = 2,530 \frac{kg}{cm^2}$

Entonces se tiene que:

$$A_g = (7.62 \text{ cm})(0.635 \text{ cm}) = 4.8387 \text{ cm}^2$$
$$P_n = (4.8387 \text{ cm}^2) \left(2,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 12,241.91 \text{ kg}$$

Por lo que la resistencia de diseño por fluencia en tensión de la placa es de:

$$P_u = (0.9)(12,241.91 \text{ kg}) = 11,017.72 \text{ kg}$$

6.5.2.2 Falla de fractura a tensión

La falla por fractura a tensión se produce cuando el área efectiva del elemento en dirección perpendicular a la aplicación de la fuerza, sufre una ruptura debido a la tensión, la cual se presenta normalmente entre los agujeros (figura 124).

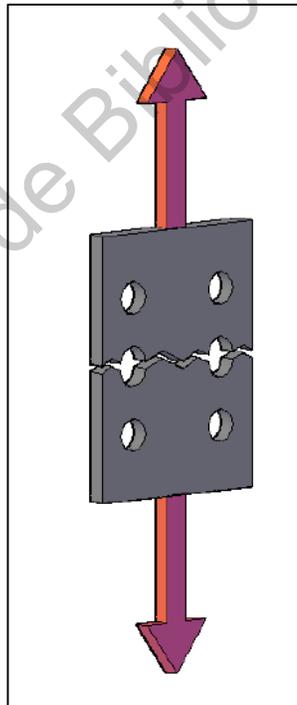


Figura 124. Representación de la falla por fractura a tensión de la placa a través de los sus orificios.

La falla por fractura a tensión se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P_n = (f_u)(A_e) \tag{12}$$

$$P_u = (\phi_F)(P_n) \tag{13}$$

Donde:

- ϕ_F : Factor de resistencia para falla por fractura en tensión, donde:
 $\phi_F = 0.75$ (LRFD).
 A_e : Área neta efectiva en tensión de la placa, transversal a la aplicación de la fuerza.
 P_n : Tensión nominal.
 f_u : Esfuerzo último del material, donde: $f_u = 4,080 \frac{kg}{cm^2}$

El área neta efectiva se calculó mediante la siguiente expresión:

$$A_e = (A_{nt})(U) \quad (14)$$

Donde:

- A_{nt} : Área neta en tensión de la placa, transversal a la aplicación de la fuerza, la cual no debe ser mayor a $0.85A_g$.
 U : Factor de corrección que trata de corregir la mala distribución de la conexión debido a la mala homogeneidad del esfuerzo en el elemento.
En este caso $U = 1$.

El área neta se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$A_n = (A_{gt}) - (A_{Agujeros}) \quad (15)$$

Donde:

- A_{gt} : Área bruta en tensión de la placa, transversal a la aplicación de la fuerza.
 $A_{Agujeros}$: Área de los agujeros en misma hilera.

Para la aplicación de la falla por tensión por fractura como en este caso se tienen 2 hileras de agujeros perpendicularmente a la dirección de la fuerza, entonces se toman en cuenta 2 agujeros, los cuales tienen un diámetro de 1/2 pulgada. La placa cuenta con un espesor de 1/4 de pulgada. En este caso el factor de corrección es $U=1$.

$$A_{gt} = (7.62 \text{ cm})(0.635 \text{ cm}) = 4.8387 \text{ cm}^2$$

$$A_{Agujeros} = (1.2667 \text{ cm}^2)(2 \text{ agujeros}) = 2.5334 \text{ cm}^2$$

$$A_{nt} = (4.8387 \text{ cm}^2) - (2.5334 \text{ cm}^2) = 2.3053 \text{ cm}^2$$

$$2.3053 \text{ cm}^2 = A_{nt} \leq (0.85)(A_g) = 4.477 \text{ cm}^2$$

$$A_e = (2.3053 \text{ cm}^2)(1) = 2.3053 \text{ cm}^2$$

$$P_n = (2.3053 \text{ cm}^2) \left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 9,405.62 \text{ kg}$$

Por lo que la resistencia de diseño que tiene la placa por fractura a tensión es de:

$$P_u = (0.75)(9,405.62 \text{ kg}) = 7,054.22 \text{ kg}$$

Entonces el elemento fallaría primero a fractura por tensión que a fluencia por tensión.

6.5.2.3 Falla de tensión a cortante

Las fallas por cortante —ya sea en tensión o por fractura— se determinan bajo una cierta longitud de corte del elemento, donde puede ser la longitud total de éste en caso de que el miembro tenga una longitud pequeña respecto a su ancho, o bien, bajo un bloque de cortante.

La falla por tensión en cortante se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P_n = (0.6)(f_y)(A_{gv}) \quad (16)$$

$$P_u = (\phi_f)(P_n) \quad (17)$$

Donde:

ϕ_f : Factor de resistencia para falla por tensión en cortante,
 donde: $\phi_f = 0.9$ (LRFD).

A_{gv} : Área bruta en cortante de la placa, paralela a la aplicación de la fuerza.

P_n : Tensión nominal.

f_y : Esfuerzo de fluencia del material, donde: $f_y = 2,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

6.5.2.4 Falla de fractura a cortante

La falla por tensión por fractura se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P_n = (0.6)(f_u)(A_{nv}) \quad (18)$$

$$P_u = (\phi_F)(P_n) \quad (19)$$

Donde:

ϕ_F : Factor de resistencia para falla por fractura en cortante,
donde: $\phi_F = 0.75$ (LRFD)

A_{nv} : Área neta en cortante de la placa, paralela a la aplicación de la fuerza.

P_n : Tensión nominal.

f_u : Esfuerzo último del material, donde: $f_u = 4,080 \frac{kg}{cm^2}$

6.5.2.5 Bloque de cortante

Un bloque de cortante es un pedazo del elemento que cede a través del área transversal más débil del elemento, ésta puede tener distintos patrones de falla, la cual tratándose de elementos atornillados depende de la ubicación de los orificios, donde el área de falla es la distancia más corta entre éstos, originando un bloque de cortante (figura 125).

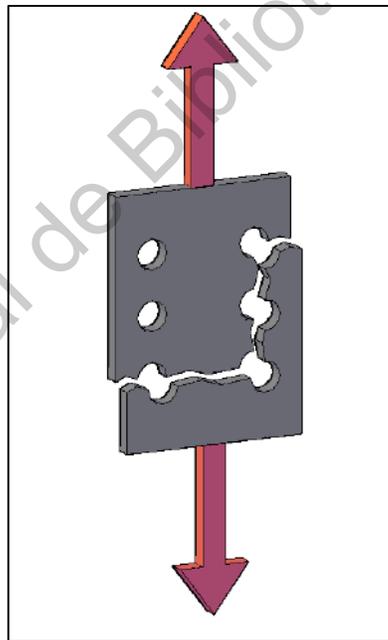


Figura 125. Representación del bloque de cortante en la placa.

(Nota: la trayectoria del bloque de cortante en la figura es sólo representativa)

El bloque de cortante se calcula de la siguiente manera:

$$P_n = (0.6)(f_u)(A_{nv}) + (U_{bs})(f_u)(A_{nt}) \leq (0.6)(f_y)(A_{gv}) + (U_{bs})(f_u)(A_{nt}) \quad (20)$$

$$P_u = (\phi)(P_n) \quad (21)$$

Donde:

ϕ : Factor de resistencia para falla por fractura en cortante, donde: $\phi = 0.75$ (LRFD).

A_{gv} : Área bruta en cortante de la placa, paralela a la aplicación de la fuerza.

A_{nv} : Área neta en cortante de la placa, paralela a la aplicación de la fuerza.

A_{nt} : Área neta en tensión de la placa, perpendicular a la aplicación de la fuerza.

U_{bs} : Coeficiente de reducción, para determinar la resistencia de ruptura por bloque de cortante, donde $U_{bs} = 1$, cuando el esfuerzo a tensión es uniforme; y $U_{bs} = 0.5$, cuando no es uniforme.

P_n : Tensión nominal.

f_y : Esfuerzo de fluencia del material, donde: $f_u = 2,530 \frac{kg}{cm^2}$

f_u : Esfuerzo último del material, donde: $f_u = 4,080 \frac{kg}{cm^2}$

En el bloque de cortante se tienen esfuerzos tanto de cortante como de tensión. El bloque de cortante siempre falla por fractura, ya sea a cortante o a tensión; y en adición a esta falla, le sigue la falla por fluencia, ya sea a cortante o a tensión; donde siempre predominará la fractura sobre la fluencia, de acuerdo a las expresiones de los siguientes casos:

- Caso 1: Falla por fractura a cortante, más por fluencia a tensión:

$$\text{Si: } (0.6)(F_u)(A_{nv}) > (F_u)(A_{nt}) \quad (22)$$

Entonces:

$$P_u = (\phi)[(0.6)(f_u)(A_{nv}) + (f_y)(A_{gt})] \quad (23)$$

- Caso 2: Falla por fractura a tensión, más por fluencia a cortante:

$$\text{Si: } (0.6)(f_u)(A_{nv}) \leq (f_u)(A_{nt}) \quad (24)$$

Entonces:

$$P_u = (\phi)[(f_u)(A_{nt}) + (0.6)(f_y)(A_{gv})] \quad (25)$$

Si se calcula la falla del bloque de cortante en la figura se tiene que:

$$A_{gv} = (10.16 \text{ cm})(0.635 \text{ cm}) = 6.4516 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = \left\{ (2) \left(2.54 \text{ cm} - \left[(2) \left(\frac{1.27 \text{ cm}}{2} \right) \right] \right) \right\} (0.635 \text{ cm}) = 2.54 \text{ cm}^2$$

$$A_{nt} = [(7.62 \text{ cm}) - (2)(1.27 \text{ cm})](0.635 \text{ cm}) = 3.2258 \text{ cm}^2$$

$$U_{bs} = 1$$

$$P_n = (0.6) \left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (2.54 \text{ cm}^2) + (1) \left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (3.2258 \text{ cm}^2)$$

$$\leq (0.6) \left(2,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (6.4516 \text{ cm}^2) + (1) \left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (3.2258 \text{ cm}^2)$$

$$P_n = 19,379.18 \text{ kg} \leq 22,954.79 \text{ kg}$$

$$P_u = (0.75)(19,379.18 \text{ kg}) = 14,534.39 \text{ kg}$$

Se revisan las condiciones del caso 1 y 2 para conocer a qué caso pertenece:

$$(0.6) \left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (2.54 \text{ cm}^2) \leq \left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (3.2258 \text{ cm}^2)$$

$$6,217.92 \text{ kg} \leq 13,161.26 \text{ kg}$$

Pertenece al caso 2, por lo tanto se aplicó la ecuación correspondiente:

$$P_u = (0.75) \left[\left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (3.2258 \text{ cm}^2) + (0.6) \left(2,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (6.4516 \text{ cm}^2) \right]$$

$$P_u = 17,216.09 \text{ kg}$$

Entonces el bloque de cortante fallaría por fractura a tensión, más fluencia a cortante.

6.5.2.6 Falla por aplastamiento y desgarre

La falla por aplastamiento en una placa atornillada se da cuando los orificios de la placa comienzan a deformarse debido a la fuerza actuante, ya que los orificios de la placa ceden antes que el tornillo. También se puede producir el desgarre si el área efectiva entre agujero y agujero o el área efectiva entre un agujero de borde inferior y dicho borde, se desprende (figuras 126 y 127).

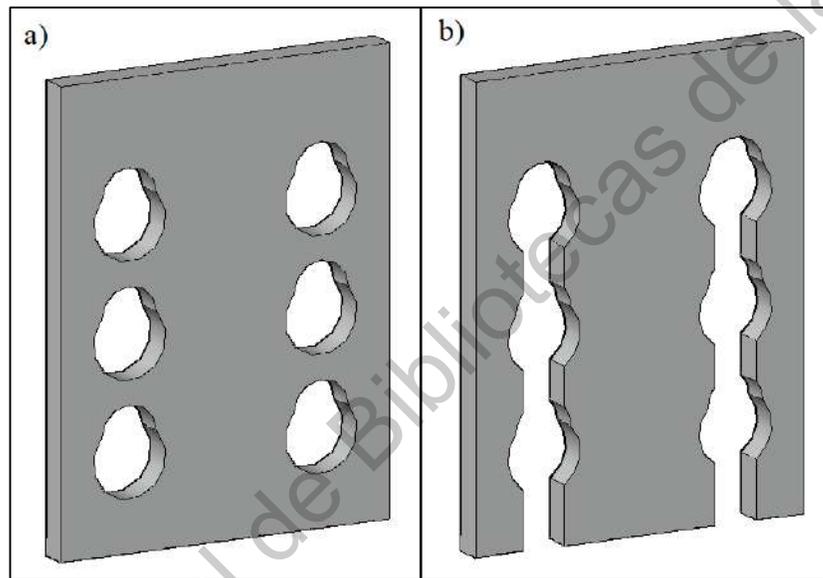


Figura 126. Representación de las fallas en los agujeros de una la placa de la conexión universal.

a) Falla por aplastamiento. b) Falla por desgarre.

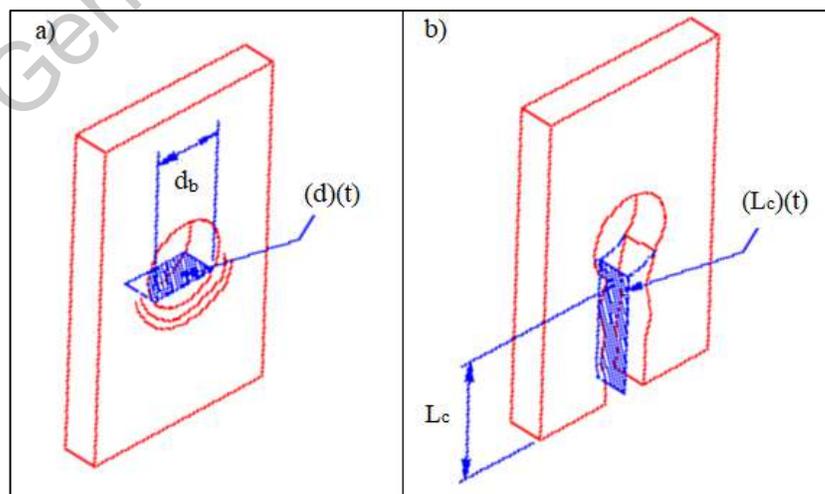


Figura 127. Fallas en los agujeros de una placa. a) Falla por aplastamiento. b) Falla por desgarre.

La resistencia por diseño al aplastamiento en los agujeros está dada por:

$$P_n = (2.4)(d_b)(t)(F_u) \quad (26)$$

$$P_u = (\phi)(P_n) \quad (27)$$

$$P_{uTOTAL} = \sum_{i=1}^{n=agujeros} P_{u_i} \quad (28)$$

La resistencia por diseño al desgarre en los agujeros está dada por:

$$P_n = (1.2)(L_c)(t)(F_u) \quad (29)$$

$$P_u = (\phi)(P_n) \quad (30)$$

$$P_{uTOTAL} = \sum_{i=1}^{n=Agujeros} P_{u_i} \quad (31)$$

Revisión de la relación entre el desgarre y el aplastamiento:

$$P_n = (1.2)(L_c)(t)(F_u) \leq (2.4)(d)(t)(F_u) \quad (32)$$

Desgarre ≤ Aplastamiento

$$P_u = (\phi)(P_n) \quad (33)$$

Donde:

ϕ : Factor de resistencia para aplastamiento, donde: $\phi = 0.75$ (LRFD).

Esfuerzo mínimo especificado de ruptura del material conectado,

F_u : donde: $F_u = 4,080 \frac{kg}{cm^2}$

L_c : Distancia libre, en la dirección de la fuerza, entre el borde de un agujero y el borde del agujero adyacente o del material.

d_b : Diámetro nominal del tornillo.

t : Espesor de la parte conectada crítica.

Se tiene que la distancia libre entre agujeros es:

$$L_c = 1/2 \text{ in} = 1.27 \text{ cm}$$

La resistencia al desgarre entre agujero y agujero es:

$$P_n = (1.2)(1.27 \text{ cm})(0.635 \text{ cm}) \left(4,080 \frac{kg}{cm^2} \right) = 3,948.38 \text{ kg}$$

Se tiene que la distancia libre entre agujero inferior y el borde inferior es:

$$L_c = 3/4 \text{ in} = 1.905 \text{ cm}$$

La resistencia al desgarre entre agujero inferior y el borde inferior es:

$$P_n = (1.2)(1.905 \text{ cm})(0.635 \text{ cm}) \left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 5,922.57 \text{ kg}$$

Por lo que es más fácil que se desgarre un agujero intermedio que un agujero junto al borde inferior del elemento.

En este caso se suman las resistencias de los 2 agujeros del borde inferior con la de los otros 4 agujeros, los cuales cuentan con otro agujero respectivo debajo del mismo, por lo que la resistencia de diseño al desgarre total es:

$$P_{u_{TOTAL}} = (2)(5,922.57 \text{ kg}) + (4)(3,948.38 \text{ kg}) = 27,638.66 \text{ kg}$$

Luego se analiza la resistencia de diseño por aplastamiento:

$$P_n = (2.4)(0.9525 \text{ cm})(0.635) \left(4,080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 5,922.57 \text{ kg}$$

En este caso todos los agujeros cuentan con el mismo diámetro, por lo que la resistencia de diseño al aplastamiento es de:

$$P_{u_{TOTAL}} = (6)(5,922.57 \text{ kg}) = 35,535.42 \text{ kg}$$

Se puede apreciar que el desgarre de los orificios ocurriría primero que el aplastamiento de los mismos en caso de que la fuerza actuante fuese superior a la fuerza resistente de desgarre. Por lo que la fuerza de desgarre se tomará como la fuerza de diseño en la resistencia de los orificios.

La fuerza actuante sobre los orificios de las placas es $P_a=52.1 \text{ kg}$ y la fuerza resistente es $P_{u_{total}}= 27,638.66 \text{ kg}$, por lo que los orificios de la placa no se desgarran y mucho menos sufren aplastamiento. Por lo tanto, la placa no falla en sus orificios.

6.5.3 Tornillos de la conexión universal

6.5.3.1 Tipos de tornillos

Los tornillos utilizados tienen un diámetro nominal de 3/8 y 1/2 pulgadas respectivamente, dimensiones definidas según el «American National Standards Institute» (ANSI) y el «American Society of Mechanical Engineers» (ASME) (tabla 53), con un material tipo A307 Grado A, definido por el «American Society for Testing and Materials» (ASTM), cuya resistencia nominal de diseño a la tensión es de $F_n=3,160 \text{ kg/cm}^2$ y resistencia a cortante de $f_v=1,900 \text{ kg/cm}^2$. Los tornillos no requieren una pretensión (figuras 128 y 129).

Tabla 53. Dimensiones de los tornillos (ANSI/ASME B18.2.1, 2012).

Diámetro nominal del tornillo	Vástago			Cabeza		
	Longitud no-roscada	Longitud roscada	Total	Espesor	Ancho	Largo
(d _b)	(L _G)	(L _T)	(L)	(H)	(F)	(G)
(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)
3/8	3/8	1	1 3/8	1/4	9/16	13/20
1/2	1/2	1	1 1/2	11/32	3/4	84/97

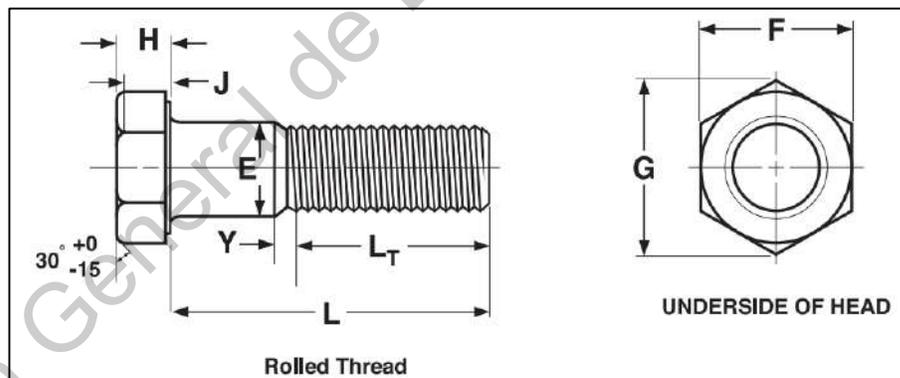


Figura 128. Esquema de las dimensiones de las partes de los tornillos (ANSI/ASME B18.2.1, 2012).

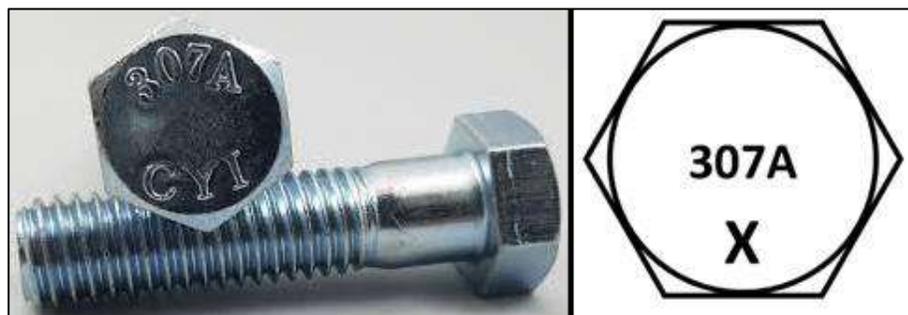


Figura 129. Tipo de tornillo utilizado donde se aprecia la norma respectiva de su material.

6.5.3.2 Revisión de falla de tornillos por cortante.

La falla de cortante en los tornillos se produce cuando existe una fuerza cortante transmitida a través de un plano transversal del tornillo que es mayor en comparación con la resistencia de corte de éste. Esto sucede cuando el tornillo está sujeto entre dos o más elementos que empujan hacia sentidos opuestos (figura 130).

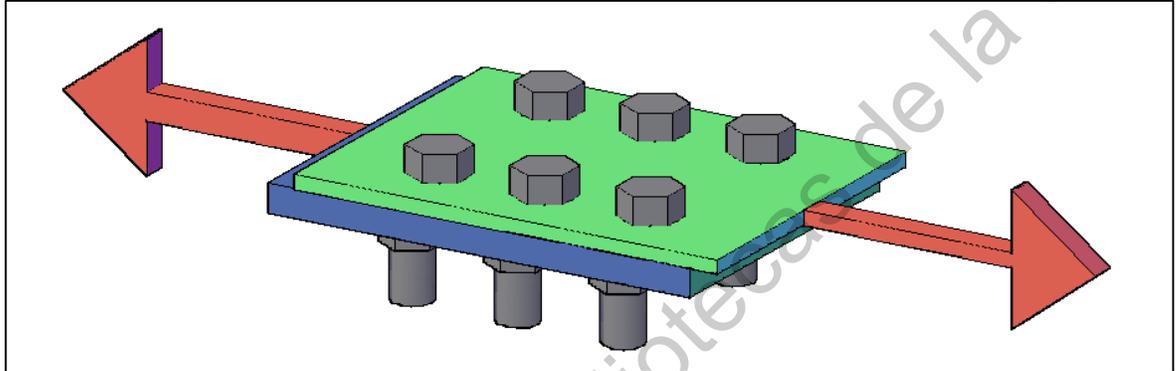


Figura 130. Representación de la falla por cortante de los tornillos.

La fuerza cortante promedio de diseño que los tornillos son capaces de resistir se calcula con la siguiente expresión:

$$R_{nv} = (f_v)(A_{bv})(n) \quad (34)$$

$$R_{uv} = (\phi_v)(R_{nv}) \quad (35)$$

Donde:

ϕ_v : Factor de resistencia para falla por cortante, donde: $\phi_v = 0.75$

f_v : Resistencia del vástago del tornillo a cortante $f_v = 1,900 \frac{kg}{cm^2}$

A_{bv} : Área nominal de la sección transversal de la parte del vástago no roscada del tornillo la cual está sujeta a cortante.

n : Número de tornillos

$$A_{bv} = (d_b)(L_{bv}) \quad (36)$$

a

Donde:

d_b : Diámetro del vástago del tornillo expuesto al cortante.

L_{bv} : Longitud del tornillo expuesta al cortante

En este caso el diámetro nominal del tornillo es $d_b=3/8$ de pulgada y la longitud del tornillo expuesta a cortante es $L_{bv}=3/8$ de pulgada, por lo que el área a cortante es:

$$A_{bv} = (0.9525 \text{ cm})(0.9525 \text{ cm}) = 0.9073 \text{ cm}^2$$
$$R_{nv} = \left(1,900 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) (0.9073 \text{ cm}^2)(6) = 10,343.22 \text{ kg}$$

Por lo que la resistencia de diseño al esfuerzo cortante de los tornillos es:

$$R_{uv} = (0.75)(10,343.22 \text{ kg}) = 7,757.42 \text{ kg}$$

6.5.3.3 Revisión de falla de tornillos por tensión axial.

La falla por tensión axial en los tornillos se produce cuando existe una fuerza paralela a la longitud del tornillo que trata de empujar al tornillo en dicha dirección cuando el tornillo está sujeto a otro elemento fijo, desde donde se produce una reacción la misma magnitud y dirección, pero en sentido contrario (figura 131).

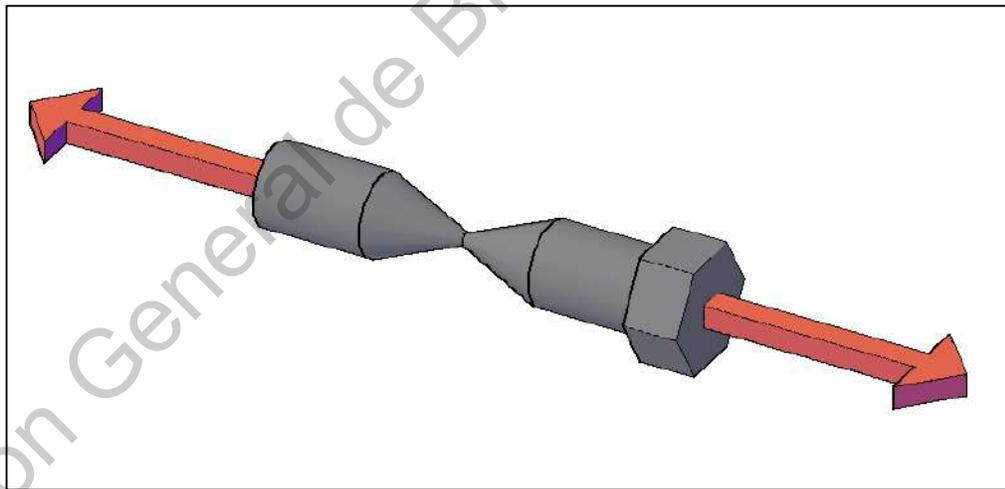


Figura 131. Representación de la tensión axial en un tornillo con falla de fluencia.

La fuerza de tensión que los tornillos son capaces de resistir se calculó con la siguiente expresión:

$$R_n = (f_t)(A_b)(n) \quad (37)$$

$$R_u = (\phi_v)(R_{nv}) \quad (38)$$

Donde:

- ϕ_t : Factor de resistencia para falla por fluencia, donde: $\phi_t = 0.9$
- f_t : Resistencia del vástago del tornillo a cortante $f_t = 3,160 \frac{kg}{cm^2}$
- A_b : Área de la sección transversal de la parte del vástago no roscada.
- n : Número de tornillos.

El tornillo tiene un diámetro de $d_b=3/8$ de pulgada, por lo que el área de su sección transversal es de $A_b=0.7126 \text{ cm}^2$, entonces la resistencia nominal a tensión de los tornillos es:

$$R_n = \left(3,160 \frac{kg}{cm^2} \right) (0.7126 \text{ cm}^2)(6) = 13,510.90 \text{ kg}$$

Entonces la resistencia de diseño a la tensión de los 6 tornillos es de:

$$R_u = (0.9)(13,510.90 \text{ kg}) = 12,159.81 \text{ kg}$$

6.5.4 Soldaduras

La revisión de las soldaduras se considera en las uniones entre los perfiles tipo ángulos que conforman los miembros de las armaduras y las placas que hacen que se conecten entre sí a través de dichas soldaduras.

Tabla 54. Tamaño mínimo de soldadura de filete según el espesor más delgado de los metales unidos (NTC-Acero, 2020).

Espesor de la más delgada de las partes unidas	Tamaño mínimo de filete
(t)	(w)
(in)	(in)
$t \leq 1/4$	1/8
$1/4 < t \leq 1/2$	3/16
$1/2 < t \leq 3/4$	1/4
$t > 3/4$	5/16

Los espesores de filete mínimo y máximo, así como el tipo de soldadura empleada, son los adecuados según los espesores de los perfiles unidos, de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Acero (NTC-Acero, 2020). Para el caso de materiales con un espesor igual o menor que 1/4 de pulgada, el tamaño máximo de la soldadura de filete no debe ser mayor que el espesor del material, y el mínimo espesor de filete debe ser de acuerdo a la tabla mostrada (tabla 54).

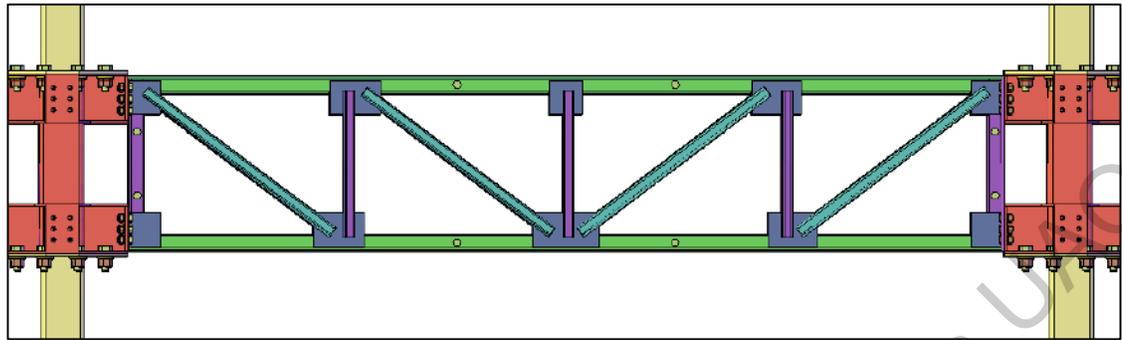


Figura 132. Armadura del sistema modular M-10 donde se revisaron las soldaduras de algunas placas conectadas a los perfiles tipo ángulo.

6.5.4.1 Balanceo de soldaduras

En los perfiles asimétricos —como los perfiles tipo ángulo (figura 133)— su centro de gravedad longitudinal en el mismo plano de la unión soldada no corresponde con la mitad de la longitud transversal de éste. Los perfiles bajo cargas axiales cuyas uniones no están balanceadas pueden sufrir fuerzas de torsión, por lo que es conveniente realizar un balanceo del centro de gravedad de las soldaduras o tonillos con el centro de gravedad del elemento a través de la variación del área efectiva de la garganta del lado que le corresponda, que cuando se tiene el mismo tamaño del filete de la soldadura, la variación se da en la longitud de la soldadura. Cabe señalar que las dimensiones de las placas también deben estar balanceadas, ubicando el centro de gravedad de la placa con el centro de gravedad del perfil tipo ángulo.

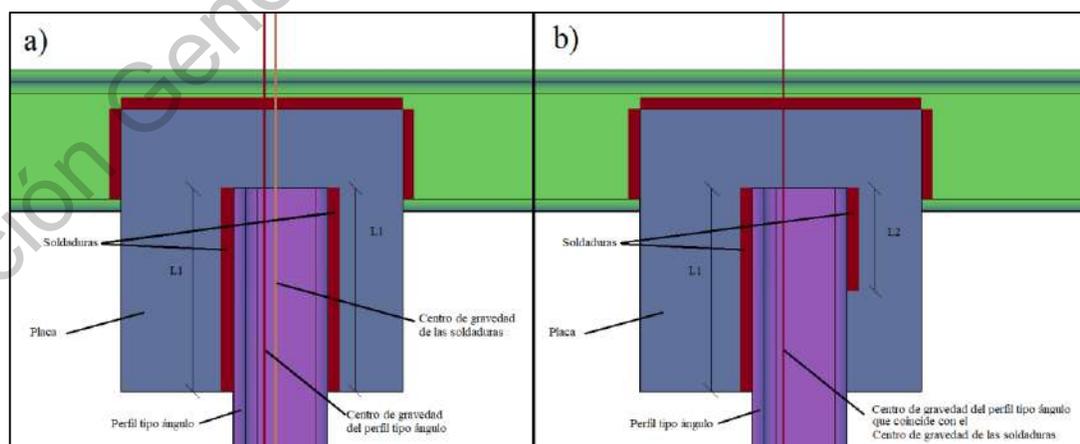


Figura 133. Balanceo de soldaduras.

- a) Forma incorrecta: centro de gravedad de la soldadura no-balanceado con el centro de gravedad del perfil.
- b) Forma correcta: entro de gravedad de la soldadura balanceado con el centro de gravedad del perfil.

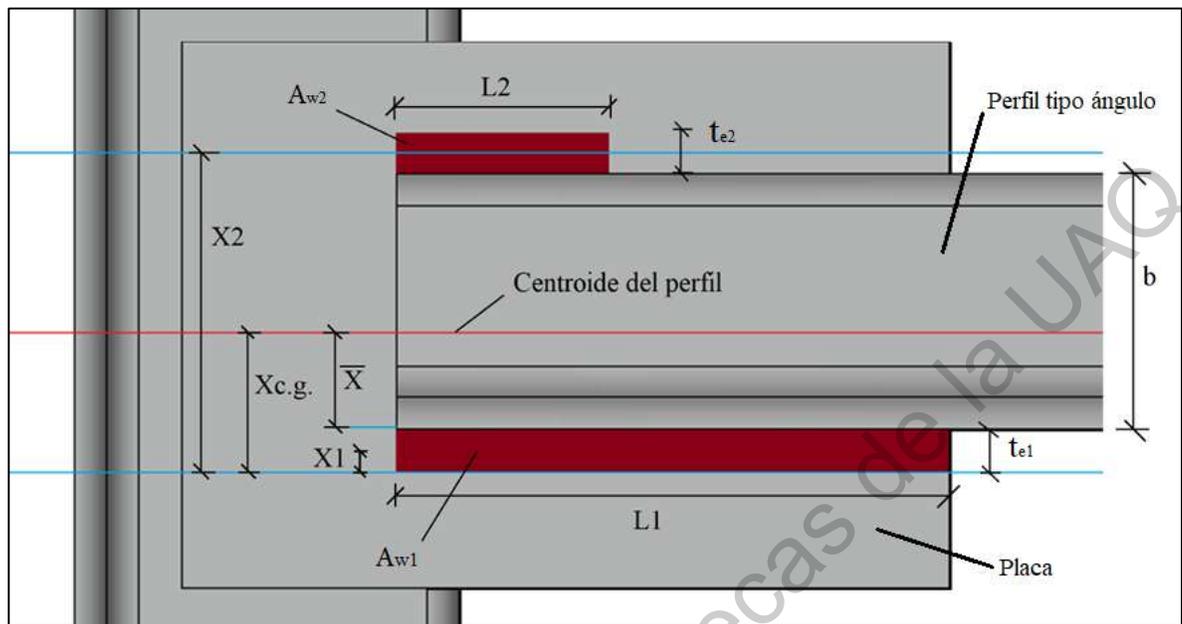


Figura 134. Componentes para balancear las soldaduras en un perfil tipo ángulo de acuerdo a su centroide.

Para balancear las soldaduras de perfiles no-regulares (como perfiles tipo ángulo) es necesario conocer su centroide, ya que en torno a éste actúan las fuerzas (figuras 134 y 135). El tener soldaduras balanceadas puede evitar posibles torsiones en el perfil. El balance de las soldaduras a partir de una longitud L_1 propuesta, se realiza con las siguientes expresiones:

$$A_{w1} = (L_1)(t_{e1}) \quad (39)$$

$$A_{w2} = \frac{(A_{w1})[(X_{c.g.})(X_1)]}{(X_2)(X_{c.g.})} \quad (40)$$

$$L_2 = \frac{(A_{w2})}{t_{e2}} \quad (41)$$

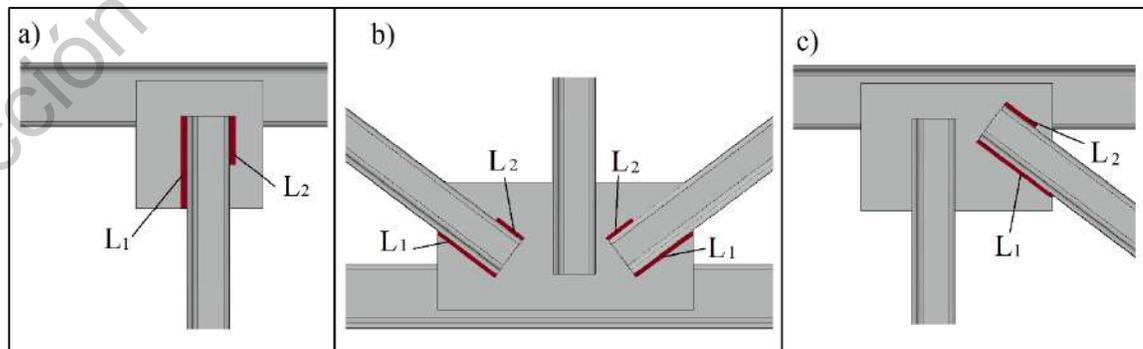


Figura 135. Representación del balance de soldaduras de los perfiles tipo ángulo en la armadura.

a) Conexión tipo "T". b) conexión tipo "K-T". c) Conexión tipo "media K-T".

Se balancearon las soldaduras (tabla 55) de los ángulos de la armadura (figura 132).

Tabla 55. Longitudes de soldadura balanceadas de acuerdo al centro de gravedad del perfil.

Ubicación según tipo de conexión	Longitud de soldadura	
	L1	L2
	(cm)	(cm)
"T"	5.5	2.84
"media K-T"	5.64	2.91
"K-T"	4.39	2.27

6.5.4.2 Resistencia nominal del material de aportación

La resistencia nominal del material de aportación (la soldadura), F_{nw} , depende del ángulo en el cual se encuentre la hilera de la soldadura respecto a la dirección de la transmisión de la fuerza, donde se identifican 3 casos generales:

- Caso 1: Para $\theta = 0^\circ$:

$$F_{nw} = (0.6)(F_{E_{XX}}) \quad (42)$$

- Caso 2: Para $\theta = 90^\circ$:

$$F_{nw} = (0.9)(F_{E_{XX}}) \quad (43)$$

- Caso 3: Para otro ángulo:

$$F_{nw} = (0.6)(F_{E_{XX}})\{1.0 + (0.5)[\text{sen}^{1.5}(\theta)]\} \quad (44)$$

Donde:

θ : Ángulo entre el eje de la soldadura y el eje de la fuerza aplicada.

$F_{E_{XX}}$: Resistencia del cordón de soldadura según la especificación del tipo de electrodo.

6.5.4.3 Resistencia de soldaduras con filete longitudinal

Las soldaduras con filete longitudinal se refieren a las que cuentan con hileras paralelas a la dirección de la fuerza, es decir a un ángulo de $\theta = 0^\circ$.

Su resistencia de diseño se calcula con el valor menor entre los siguientes 2 casos:

- Caso 1: Para el metal de la soldadura:

$$R_n = (F_{nw})(A_w) \quad (45)$$

$$R_u = (\phi)(R_n) \quad (46)$$

- Caso 2: Para el metal base:

$$R_n = (F_{MB})(A_s) \quad (47)$$

$$R_u = (\phi)(R_n) \quad (48)$$

Donde:

ϕ : Factor de resistencia, donde: $\phi = 0.75$

F_{nw} : Resistencia nominal del material de aportación, donde $F_{nw} = (0.6)(F_{EXX})$

Resistencia del cordón de soldadura según la especificación del tipo de electrodo.

F_{EXX} : Donde para el electrodo E₇₀₁₈, es: $F_{E70} = 4,920 \frac{kg}{cm^2}$

A_w : Área efectiva de la garganta.

F_{MB} : Resistencia nominal del metal base, donde $F_{MB} = (0.9)(f_y)$

f_y : Límite de fluencia del metal base, donde $f_y = 2,530 \frac{kg}{cm^2}$

A_s : Área efectiva del metal base.

Para calcular la resistencia de una soldadura se requiere conocer el área efectiva de su garganta (A_w), la cual es la superficie longitudinal que corresponde al plano entre la garganta efectiva (t_e) y la longitud efectiva de la soldadura (L), expresándose de la siguiente manera:

$$A_w = (t_e)(L) \quad (37)$$

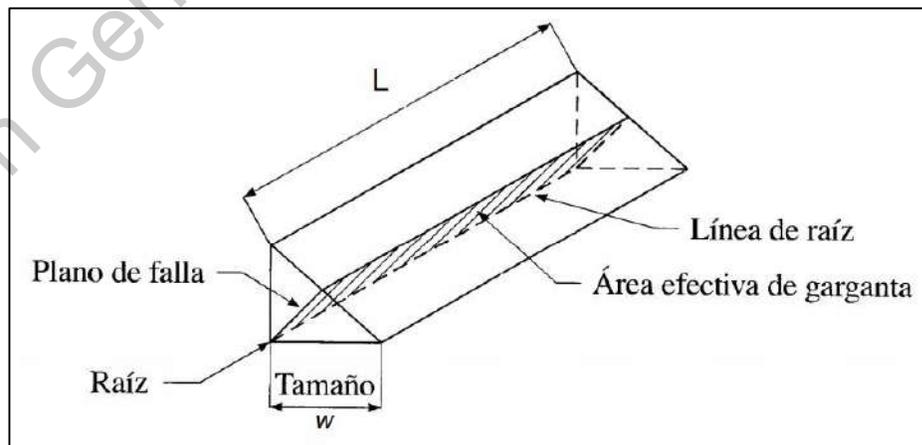


Figura 136. Partes de una soldadura, donde se muestra el área efectiva de la soldadura (A_w).

La garganta efectiva (t_e) es la longitud más corta que existe desde la raíz de la soldadura hasta la superficie de ésta, también conocida como el plano de falla (figuras 136 y 137).

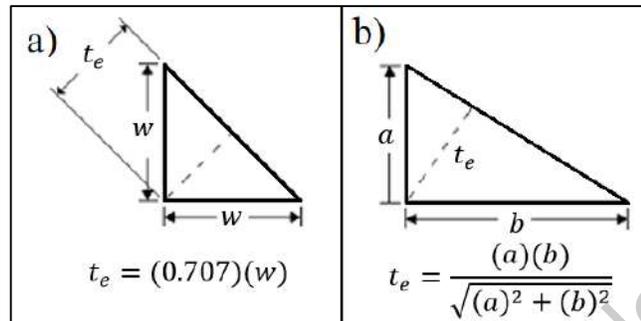


Figura 137. Garganta efectiva (t_e). a) Cuando los lados de la soldadura de filete son iguales.
 b) cuando los lados de la soldadura son desiguales.

Garganta efectiva (t_e) cuando el ancho de soldadura es igual a ambos lados:

$$t_e = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(w) \quad (49)$$

Garganta efectiva (t_e) cuando el ancho de soldadura es desigual en sus lados:

$$t_e = \frac{(a)(b)}{\sqrt{(a)^2 + (b)^2}} \quad (50)$$

6.5.4.4 Resistencia del metal base

Se revisaron algunas partes de las uniones de las soldaduras en la armadura cuando se tienen filetes longitudinales, en todos los casos el metal base son perfiles tipo ángulo de 1"x1"x1/8", el cual se revisa para el caso 2, éste tiene un área transversal de $A_s=1.50 \text{ cm}^2$ y un límite de fluencia de $f_y=2,530 \text{ kg/cm}^2$, por lo tanto, su resistencia es de:

$$R_n = \left(2,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) (1.50 \text{ cm}^2) = 3,795 \text{ kg}$$

$$R_u = (0.75)(3,795 \text{ kg}) = 2,846.25 \text{ kg}$$

Este valor se toma como resistencia de diseño en caso de que la resistencia de la soldadura (del caso 1) fuese mayor que dicho valor; si no, se toma el de la soldadura.

6.5.4.5 Resistencia de la soldadura con filetes longitudinales

6.5.4.5.1 Placa y montante.

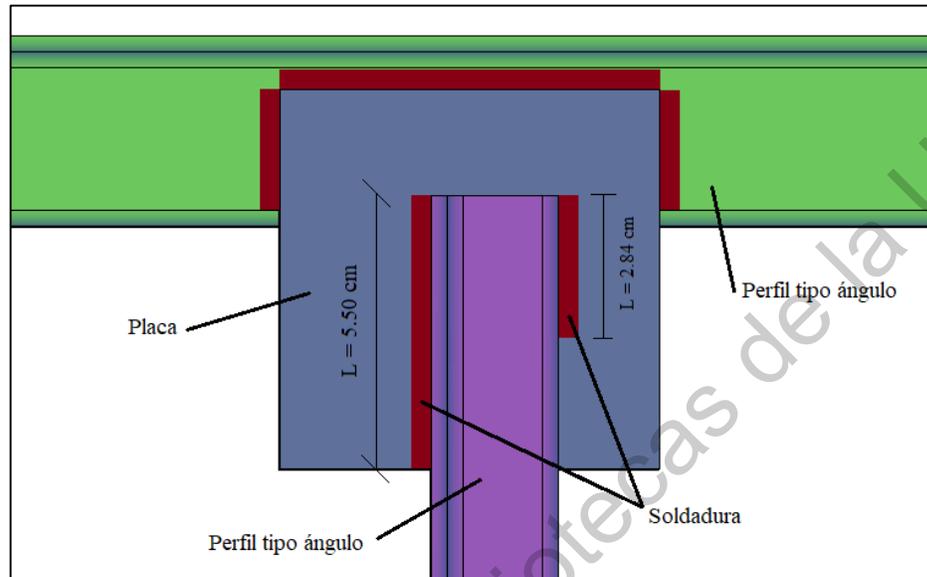


Figura 138. Unión entre placa y montante en la parte central de la cuerda superior de la armadura, donde se ubican 2 soldaduras longitudinales balanceadas, las cuales conectan a la placa y al ángulo.

Se tiene que el ancho del filete de soldadura es de $w=1/8$ de pulgada con un ángulo de aplicación de 45° (figura 138), por lo que la longitud de la garganta efectiva es de:

$$t_e = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(0.3175 \text{ cm}) = 0.2245 \text{ cm}$$

Se tienen 2 cordones de soldadura longitudinales, uno de 5.50 cm y el otro de 2.84 cm, por lo que la longitud efectiva de soldadura es de $L=8.34$ cm, por lo que el área efectiva de soldadura es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(8.34 \text{ cm}) = 1.8723 \text{ cm}^2$$

Usando un electrodo E_7018, la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura longitudinalmente es:

$$R_n = \left(2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) (1.8723 \text{ cm}^2) = 5,527.03 \text{ kg}$$

$$R_u = (0.75)(5,527.03 \text{ kg}) = 4,145.27 \text{ kg}$$

Como la resistencia del metal base es menor que la del metal de aportación, se toma como resistencia de diseño la del metal base: $R_u=2,846.2 \text{ kg}$.

6.5.4.5.2 Placa y un elemento diagonal cuerda superior.

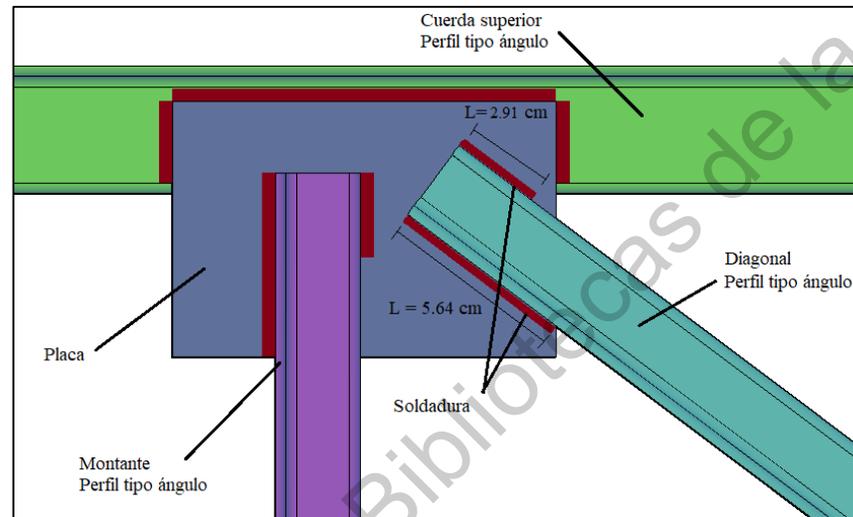


Figura 139. Conexión entre una placa y un perfil diagonal tipo ángulo a través de soldadura longitudinal en la cuerda superior de la armadura.

En el caso de la resistencia de las soldaduras longitudinales en los elementos en diagonal, se toma el mismo criterio, pero con diferentes longitudes de soldadura.

Se tiene que el ancho del filete de soldadura es de $w=1/8$ de pulgada con un ángulo de aplicación de 45° (figura 139), por lo que la longitud de la garganta efectiva es de:

$$t_e = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)(0.3175 \text{ cm}) = 0.2245 \text{ cm}$$

Se tienen 2 cordones de soldadura, uno con una longitud de 5.64 cm y el otro de 2.91 cm, por lo que la longitud efectiva de soldadura es de $L=8.55 \text{ cm}$, por lo que el área efectiva de soldadura es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(8.55 \text{ cm}) = 1.9195 \text{ cm}^2$$

Usando un electrodo E_7018, la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{kg}{cm^2} \right) = 2,952 \frac{kg}{cm^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura longitudinalmente es:

$$R_n = \left(2,952 \frac{kg}{cm^2} \right) (1.9195 cm^2) = 5,666.36 kg$$

$$R_u = (0.75)(5,666.36 kg) = 4,249.77 kg$$

Como resistencia del metal base es menor que la del metal de aportación, se toma como resistencia de diseño la del metal base: $R_u=2,846.2 kg$.

6.5.4.5.3 Placa y elementos diagonales en cuerda inferior.

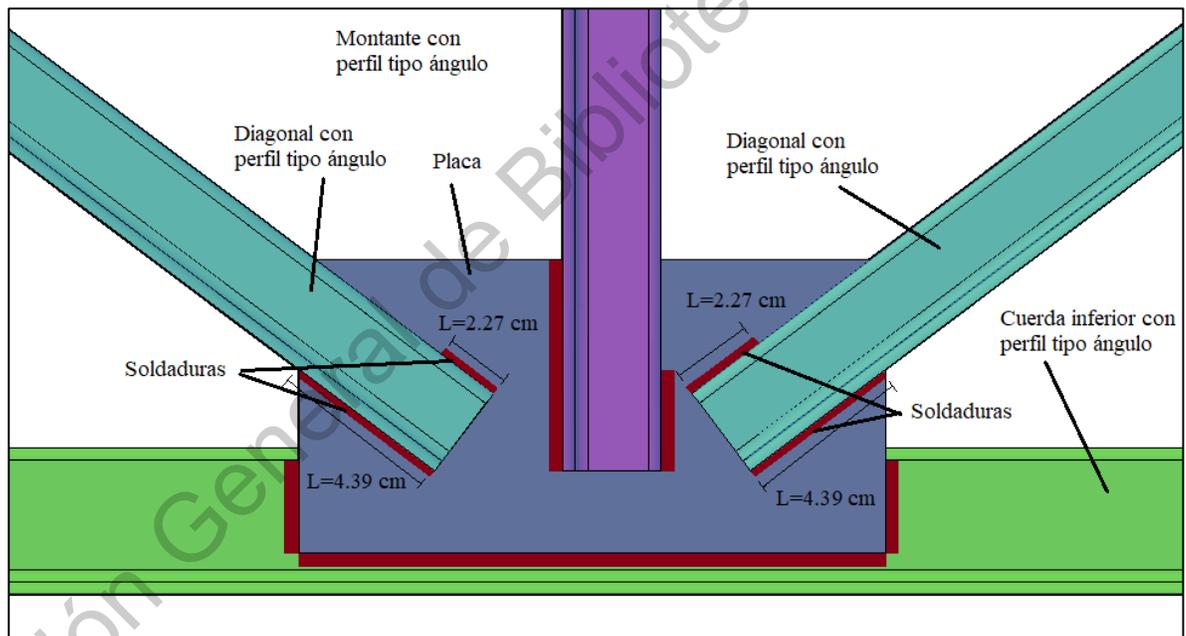


Figura 140. Conexión entre una placa y perfiles diagonales tipo ángulo a través de soldadura longitudinal en la cuerda inferior central de la armadura.

Se tiene que el ancho del filete de soldadura es de $w=1/8$ de pulgada con un ángulo de aplicación de 45° (figura 140), por lo que la longitud de la garganta efectiva es de:

$$t_e = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) (0.3175 cm) = 0.2245 cm$$

En cada diagonal se tienen 2 cordones de soldadura, uno con una longitud de 4.39 cm y el otro de 2.27 cm, por lo que la longitud efectiva de soldadura es de $L=6.66$ cm, por lo que el área efectiva de soldadura es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(6.66 \text{ cm}) = 1.4952 \text{ cm}^2$$

Usando un electrodo E_7018, la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura longitudinalmente para cada una de las diagonales es:

$$R_n = \left(2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (1.4982 \text{ cm}^2) = 4,422.69 \text{ kg}$$

$$R_u = (0.75)(4,422.69 \text{ kg}) = 3,317.02 \text{ kg}$$

Como resistencia del metal base es menor que la del metal de aportación, se toma como resistencia de diseño la del metal base: $R_u=2,846.2$ kg.

6.5.4.6 Resistencia de las soldaduras con filete longitudinal y transversal

En el caso de las soldaduras orientadas longitudinalmente y transversalmente respecto a la dirección de la aplicación de la carga, la resistencia combinada (R_n) del grupo de soldadura de filete debe ser determinado a través del valor mayor entre:

- Caso 1:

$$R_n = (R_{wl}) + (R_{wt}) \quad (51)$$

- Caso 2:

$$R_n = (0.85)(R_{wl}) + (1.5)(R_{wt}) \quad (52)$$

Donde:

R_{wl} : Resistencia nominal total de las soldaduras de filete longitudinales.

R_{wt} : Resistencia nominal total de las soldaduras de filete transversales.

6.5.4.6.1 Cuerda superior y placa con montante

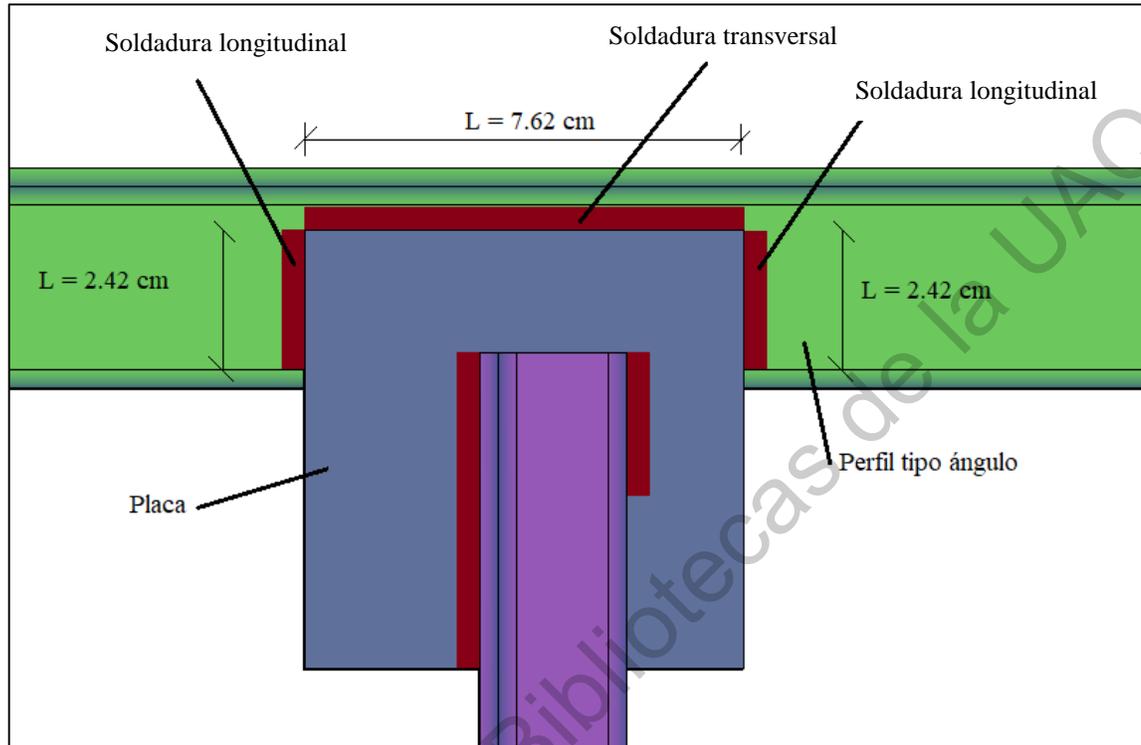


Figura 141. Unión entre placa y perfil tipo ángulo de la cuerda superior de la armadura a través de 2 tipos de filete, uno transversal de 7.62 cm y 2 de tipo longitudinal con 2.42 cm. La placa se conecta a un montante.

En la conexión entre la placa y el ángulo de la cuerda superior (figura 141) se tiene que se usó una soldadura con un filete de 1/8 de pulgada, donde existen dos filetes longitudinales de 2.42 cm para hacer un total de 4.84 cm de soldadura longitudinal, y un filete transversal de 7.62 cm, por lo tanto:

1. Soldadura longitudinal:

El área efectiva de soldadura longitudinal es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(4.84 \text{ cm}) = 1.0866 \text{ cm}^2$$

La soldadura longitudinal tiene un ángulo $\theta=0^\circ$ respecto a la aplicación de la fuerza del montante, y usando un electrodo de E_7018 la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura longitudinal es:

$$R_{wl} = \left(2,952 \frac{kg}{cm^2} \right) (1.0866 \text{ cm}^2) = 3,207.64 \text{ kg}$$

2. Soldadura transversal:

El área efectiva de soldadura transversal es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(7.62 \text{ cm}) = 1.7107 \text{ cm}^2$$

La soldadura transversal tiene un ángulo $\theta=90^\circ$ respecto a la aplicación de la fuerza del montante, y usando un electrodo de E_7018 la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.9) \left(4,920 \frac{kg}{cm^2} \right) = 4,428 \frac{kg}{cm^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura transversal es:

$$R_{wt} = \left(4,428 \frac{kg}{cm^2} \right) (1.7107 \text{ cm}^2) = 7,574.98 \text{ kg}$$

Revisión caso 1:

$$R_n = (3,207.64 \text{ kg}) + (7,574.98 \text{ kg}) = 10,782.62 \text{ kg}$$

Revisión caso 2:

$$R_n = (0.85)(3,207.64 \text{ kg}) + (1.5)(7,574.98 \text{ kg}) = 14,088.96 \text{ kg}$$

Se toma la mayor resistencia nominal entre los dos casos, entonces su resistencia de diseño es de:

$$R_u = (0.75)(14,088.96 \text{ kg}) = 10,566.72 \text{ kg}$$

Revisando resistencia de la placa:

$$R_{nplaca} = (f_y)(A_s) \tag{53}$$

$$R_{uPlaca} = (\phi_v)(R_{nplaca}) \tag{54}$$

Donde:

ϕ : Factor de resistencia para falla por fluencia, donde: $\phi = 0.9$

f_y : Límite de fluencia de la placa $f_y = 2,530 \frac{kg}{cm^2}$

A_s : Área de la sección transversal de la placa.

La placa cuenta con un espesor de 1/8 de pulgada y una longitud transversal de 7.62 cm, por lo que el área de su sección transversal es:

$$A_s = (7.62 \text{ cm})(0.3175 \text{ cm}) = 2.4194 \text{ cm}^2$$

La resistencia a la fluencia de la placa es:

$$R_{nplaca} = \left(2,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) (2.4194 \text{ cm}^2) = 6,121.08 \text{ kg}$$

Y la resistencia de diseño de la placa es de:

$$R_{u_{placa}} = (0.9)(6,121.08 \text{ kg}) = 5,508.97 \text{ kg}$$

En este caso la soldadura fallaría después que la placa comience a fluir, aunque las fuerzas actuantes son inferiores que la capacidad de resistencia de diseño de la placa; por lo tanto, la conexión no falla.

6.5.4.6.2 Cuerda superior y placa con montante y diagonal

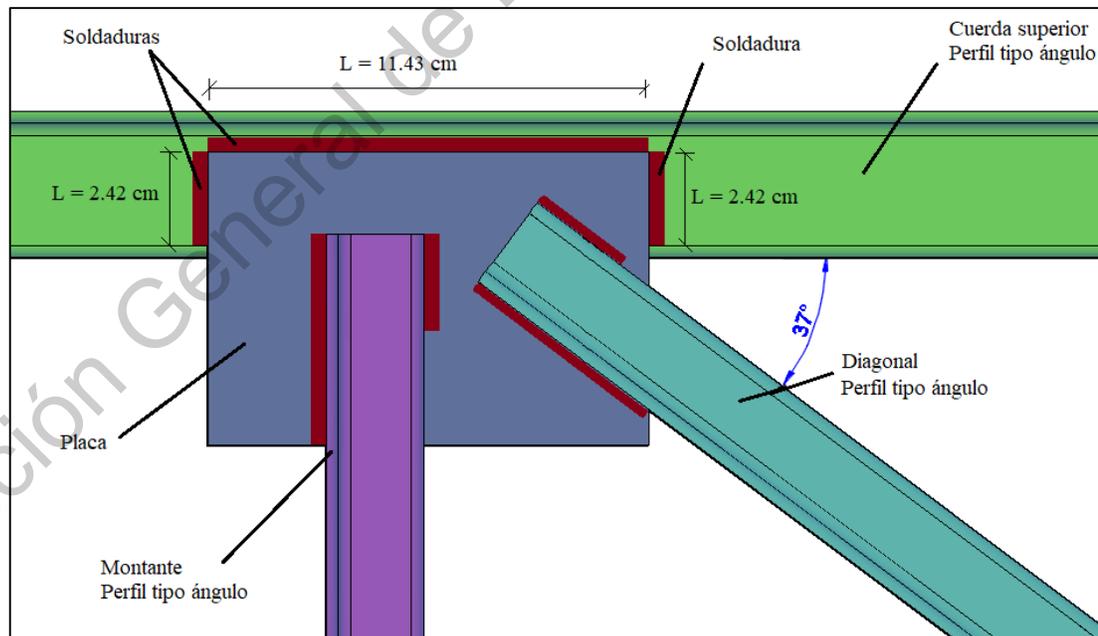


Figura 142. Unión entre placa y perfil tipo ángulo de la cuerda superior de la armadura a través de 2 tipos de filete, uno transversal de 11.43 cm y 2 de tipo longitudinal con 2.42 cm cada uno. La placa se conecta a un montante y a una diagonal con perfiles tipo ángulo.

Se tiene en la cuerda superior un perfil tipo ángulo que está unido a una placa por medio de 2 filetes longitudinales de 2.42 cm para hacer un total de 4.84 cm de soldadura longitudinal, y un filete transversal de 11.43 cm, se usó una soldadura de filete de 1/8 de pulgada (figura 142). Dicha placa está conectada a 2 elementos: un montante a $\theta=0^\circ$ respecto a la soldadura longitudinal al sentido de la fuerza de dicho montante, y una diagonal con un ángulo de $\theta=37^\circ$ respecto a la cuerda superior (correspondiente al filete transversal), y para los filetes longitudinales dicha diagonal se encuentra a $\theta=90^\circ-37^\circ=53^\circ$. Se realizó de manera independiente el cálculo de las soldaduras tanto transversal como longitudinal de la conexión de la placa con la cuerda superior, tanto para el perfil diagonal como para el montante.

A) Resistencia de las soldaduras longitudinal y transversal de la placa con la cuerda superior correspondiente al montante (R_{wl}):

1. Soldadura longitudinal:

El área efectiva de soldadura longitudinal es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(4.84 \text{ cm}) = 1.0866 \text{ cm}^2$$

La soldadura longitudinal tiene un ángulo $\theta=0^\circ$ respecto a la aplicación de la fuerza del montante, y usando un electrodo de E_7018 la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura longitudinal es:

$$R_{wl} = \left(2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (1.0866 \text{ cm}^2) = 3,207.64 \text{ kg}$$

2. Soldadura transversal:

El área efectiva de soldadura transversal es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(11.43 \text{ cm}) = 2.5660 \text{ cm}^2$$

La soldadura transversal tiene un ángulo $\theta=90^\circ$ respecto a la aplicación de la fuerza del montante, y usando un electrodo de E_7018 la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.9) \left(4,920 \frac{kg}{cm^2} \right) = 4,428 \frac{kg}{cm^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura transversal es:

$$R_{wl} = \left(4,428 \frac{kg}{cm^2} \right) (2.5660 \text{ cm}^2) = 11,362.25 \text{ kg}$$

Revisión caso 1:

$$R_n = (3,207.64 \text{ kg}) + (11,362.25 \text{ kg}) = 14,569.89 \text{ kg}$$

Revisión caso 2:

$$R_n = (0.85)(3,207.64 \text{ kg}) + (1.5)(11,362.25 \text{ kg}) = 19,769.87 \text{ kg}$$

Se toma la mayor resistencia nominal entre los dos casos, entonces su resistencia de diseño es de:

$$R_{u1} = (0.75)(19,769.87 \text{ kg}) = 14,827.40 \text{ kg}$$

B) Resistencia de las soldaduras longitudinal y transversal de la placa con la cuerda superior correspondiente a la diagonal (R_{u2}):

1. Soldadura longitudinal:

El área efectiva de soldadura longitudinal es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(4.84 \text{ cm}) = 1.0866 \text{ cm}^2$$

La soldadura longitudinal tiene un ángulo $\theta=53^\circ$ respecto a la aplicación de la fuerza de la diagonal, y usando un electrodo de E_7018 la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{kg}{cm^2} \right) \{ 1 + (0.5)[\text{SEN}^{1.5}(53^\circ)] \} = 4,005.44 \frac{kg}{cm^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura longitudinal es:

$$R_{wl} = \left(4,005.44 \frac{kg}{cm^2}\right) (1.0866 \text{ cm}^2) = 4,352.31 \text{ kg}$$

2. Soldadura transversal:

El área efectiva de soldadura transversal es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(11.43 \text{ cm}) = 2.5660 \text{ cm}^2$$

La soldadura transversal tiene un ángulo $\theta=37^\circ$ respecto a la aplicación de la fuerza de la diagonal, y usando un electrodo de E_7018 la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{kg}{cm^2}\right) \{1 + (0.5)[\text{SEN}^{1.5}(37^\circ)]\} = 3,641.10 \frac{kg}{cm^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura transversal es:

$$R_{wl} = \left(3,641.10 \frac{kg}{cm^2}\right) (2.5660 \text{ cm}^2) = 9,343.06 \text{ kg}$$

Revisión caso 1:

$$R_n = (4,352.31 \text{ kg}) + (9,343.06 \text{ kg}) = 13,695.37 \text{ kg}$$

Revisión caso 2:

$$R_n = (0.85)(4,352.31 \text{ kg}) + (1.5)(9,343.06 \text{ kg}) = 17,714.05 \text{ kg}$$

Se toma la mayor resistencia nominal entre los dos casos, entonces su resistencia de diseño es de:

$$R_{u2} = (0.75)(17,714.05) = 13,285.54 \text{ kg}$$

C) Resistencia de las soldaduras en la cuerda superior y la placa

La resistencia de las soldaduras (longitudinal y transversal) entre la cuerda superior y la placa están dada por la menor de las resistencias entre la resistencia debido al montante y la debido a la diagonal, teniendo el valor de:

$$R_u = 13,285.54 \text{ kg}$$

Revisando la resistencia de la placa:

La placa cuenta con un espesor de 1/8 de pulgada y una longitud transversal de 11.43 cm, por lo que el área de su sección transversal es:

$$A_s = (11.43 \text{ cm})(0.3175 \text{ cm}) = 3.6290 \text{ cm}^2$$

La resistencia a la fluencia de la placa es:

$$R_{nplaca} = \left(2,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) (3.6290 \text{ cm}^2) = 9,181.37 \text{ kg}$$

Y la resistencia de diseño de la placa es de:

$$R_{uplaca} = (0.9)(9,181.37 \text{ kg}) = 8,263.23 \text{ kg}$$

En este caso la soldadura fallaría después que la placa comience a fluir, aunque las fuerzas actuantes son inferiores que la capacidad de resistencia de diseño de la placa; por lo tanto, la conexión no falla.

6.5.4.6.3 Cuerda inferior y placa con montante y dos diagonales

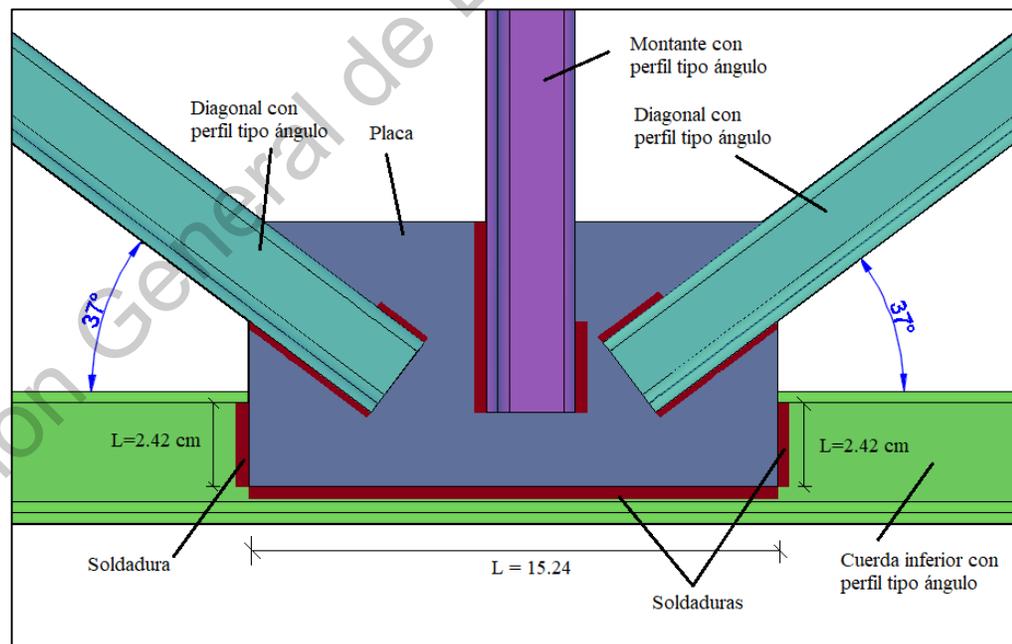


Figura 143. Soldaduras longitudinales y transversal que unen a la cuerda inferior con la placa, la cual está conectada a un montante y dos diagonales.

Se tiene en la cuerda inferior un perfil tipo ángulo que está unido a una placa por medio de 2 filetes longitudinales de 2.42 cm para hacer un total de 4.84 cm de soldadura longitudinal, y un filete transversal de 15.24 cm, se usó una soldadura de filete de 1/8 de pulgada (figura 143). Dicha placa está conectada a 3 elementos: un montante a $\theta=0^\circ$ respecto a la soldadura longitudinal al sentido de la fuerza de dicho montante; una diagonal con un ángulo de $\theta=37^\circ$ respecto a la cuerda inferior (correspondiente al filete transversal), y para los filetes longitudinales dicha diagonal de encuentra a $\theta=90^\circ-37^\circ=53^\circ$; también está unido a otra diagonal de manera totalmente simétrica con un ángulo de $\theta= -53^\circ$ respecto al montante.

1. Soldadura longitudinal:

El área efectiva de soldadura longitudinal es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(4.84 \text{ cm}) = 1.0866 \text{ cm}^2$$

La soldadura longitudinal tiene un ángulo $\theta=0^\circ$ respecto a la aplicación de la fuerza del montante, y usando un electrodo de E_7018 la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura longitudinal es:

$$R_{wt} = \left(2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (1.0866 \text{ cm}^2) = 3,207.64 \text{ kg}$$

2. Soldadura transversal:

El área efectiva de soldadura transversal es:

$$A_w = (0.2245 \text{ cm})(15.24 \text{ cm}) = 3.4213 \text{ cm}^2$$

La soldadura transversal tiene un ángulo $\theta=0^\circ$ respecto a la aplicación de la fuerza del montante, y usando un electrodo de E_7018 la resistencia nominal de aportación es de:

$$F_{nw} = (0.6) \left(4,920 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 2,952 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Entonces la resistencia de la soldadura transversal es:

$$R_{wl} = \left(2,952 \frac{kg}{cm^2} \right) (3.4213 \text{ cm}^2) = 10,099.68 \text{ kg}$$

Revisión caso 1:

$$R_n = (3,207.64 \text{ kg}) + (10,099.68 \text{ kg}) = 13,307.32 \text{ kg}$$

Revisión caso 2:

$$R_n = (0.85)(3,207.64 \text{ kg}) + (1.5)(10,099.68 \text{ kg}) = 17,876.01 \text{ kg}$$

Se toma la mayor resistencia nominal entre los dos casos, entonces su resistencia de diseño es de:

$$R_u = (0.75)(17,876.01 \text{ kg}) = 13,407.01 \text{ kg}$$

Revisando la resistencia de la placa:

La placa cuenta con un espesor de 1/8 de pulgada y una longitud transversal de 15.24 cm, por lo que el área de su sección transversal es:

$$A_s = (15.24 \text{ cm})(0.3175 \text{ cm}) = 4.8387 \text{ cm}^2$$

La resistencia a la fluencia de la placa es:

$$R_{nplaca} = \left(2,530 \frac{kg}{cm^2} \right) (4.8387 \text{ cm}^2) = 12,241.91 \text{ kg}$$

Y la resistencia de diseño de la placa es de:

$$R_{uplaca} = (0.9)(9,181.37 \text{ kg}) = 11,017.72 \text{ kg}$$

En este caso la soldadura fallaría después que la placa comience a fluir, aunque las fuerzas actuantes son inferiores que la capacidad de resistencia de diseño de la placa; por lo tanto, la conexión no falla.

6.6 Análisis de vibración de entrepiso

Existen diversos métodos para obtener los parámetros dinámicos de sistemas estructurales, éstos pueden ser analíticos o experimentales.

Debido a que un sistema estructural complejo cuenta con una gran cantidad de grados de libertad, resulta muy laborioso obtener de manera analítica los parámetros dinámicos del sistema al realizar grandes cálculos matriciales; de tal forma que, para facilitar dichos cálculos, se pueden simplificar a través del uso de una única eigenfrecuencia y una única masa modal bajo un amortiguamiento propuesto según las características de la estructura.

Realizar un análisis de vibraciones con métodos puramente analíticos, resulta en obtener valores aproximados, los cuales —en la medida de lo posible y para una mayor precisión— son recomendables acompañarlos con mediciones experimentales cuando sea posible.

Se realizó el cálculo de vibración de un bloque de entrepiso del sistema estructural propuesto aplicando a las características propias de la «*Casa Solar Experimental*», obteniendo los parámetros dinámicos del entrepiso, los cuales fueron comparados bajo 2 criterios distintos, resultando ambos satisfactorios.

Las consideraciones bajo las cuales se obtuvieron los parámetros dinámicos del entrepiso son los siguientes:

La carga w que se consideró corresponde a la carga muerta más una participación de la carga viva, de acuerdo a lo estipulado en el manual (ASCE-SEI-7-16), donde se propuso que fuese evaluada bajo a la combinación de servicio $S_2=1.0(CM)+1.0(CV)$; la cual corresponde a un total de 247 kg/m^2 .

Se consideró un entrepiso de 2.32 m de ancho por 4.64 m de largo, aplicando una metodología para la obtención de los parámetros dinámicos para un piso ortotrópico, bajo la condición de tener un piso de madera sujeto con vigas de acero con un cierto espaciamiento entre ellas.

6.6.1 Parámetros dinámicos

Para realizar el análisis de vibraciones del entrepiso se obtuvieron sus parámetros dinámicos: el amortiguamiento del sistema estructural, la masa modal y la eigenfrecuencia, resultando una aceleración, la cual fue comparada bajo dos métodos de confort diferentes.

6.6.1.1 Amortiguamiento

El amortiguamiento del sistema se da bajo diferentes condiciones de la estructura, su configuración y su mobiliario. Para este caso el amortiguamiento recomendable para la aplicación del método de vibración de entrepiso es del 3%, según la suma de los amortiguamientos obtenidos de la tabla de valores de amortiguamiento (tabla 56).

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 \quad (55)$$

$$\beta = 1\% + 1\% + 1\% = 3\%$$

Tabla 56. Valores de amortiguamiento según las características del sistema de piso (HIVOSS, 2008).

Amortiguamiento debido a:	Tipo	Porcentaje de amortiguamiento (β)	
Material de la estructura	β_1	Madera	6%
		Concreto	2%
		Acero	1%
		Acero-concreto	1%
Mobiliario	β_2	Oficina tradicional	2%
		Oficina vacía	0%
		Oficina abierta	1%
		Librería	1%
		Vivienda	1%
		Escuelas	0%
		Gimnasios	0%
Acabados	β_3	Techo bajo el piso	1%
		Piso laminado	0%
		De alberca	1%

6.6.1.2 Masa modal

Para obtener la masa modal del sistema de entrepiso, se multiplicó la masa total del entrepiso por un factor que se obtuvo derivado de las diversas características físicas y de carga que actúan en el entrepiso.

El entrepiso cuenta con las siguientes dimensiones: longitud, $L=4.64$ m; ancho, $b=2.32$ m; espesor, $t=6.35$ cm; además tiene una carga distribuida de: $w=247$ kg/m², que incluye carga muerta y carga viva en condiciones de servicio bajo la combinación de carga S2. El material del piso es madera y cuenta con un módulo de elasticidad dinámico de $E_{DimM}=130,000$ kg/cm². Debido a que la madera usada como piso es un conglomerado, se hace la suposición que el módulo de elasticidad es isotrópico.

La viga que se analiza es la que está bajo el piso, la cual es de acero con un perfil tipo monten 14 MT 16, este perfil tiene un momento de inercia de 55.91 cm⁴, un módulo de elasticidad de $E_s=2,039,000$ kg/cm² y un área de sección transversal de $A_{Viga}=3.43$ cm². Se desprecia el peso propio de la viga. Las vigas están espaciadas a $e=58$ cm entre sí.

6.6.1.2.1 Momento de inercia del piso

Momento de inercia de la sección del piso perpendicular a la dirección de las vigas:

$$I_x = \frac{(b_{Piso})(h_{PISO})^3}{12} \quad (56)$$

$$I_x = \frac{(232 \text{ cm})(6.35)^3}{12} = 4,950.26 \text{ cm}^4$$

6.6.1.2.2 Momento de inercia transformado de la viga compuesta

Debido a que la viga y el piso se comportan conjuntamente, es necesario crear una sección compuesta transversal, en donde el ancho transversal del piso se pueda transformar a un ancho equivalente a través de la relación de módulos (módulo de elasticidad del acero entre el módulo de elasticidad dinámico de la madera), siguiendo las recomendaciones de la guía de diseño de acero ([ASCE-SDG-11, 2016](#)).

$$n = \frac{E_s}{E_{Dim_M}} \quad (57)$$

$$n = \frac{2'039,000 \frac{kg}{cm^2}}{130,000 \frac{kg}{cm^2}} = 15.685$$

El ancho efectivo b_e del piso tiene a un valor de $b_e = 58$ cm, correspondiente a la viga secundaria sobre la cual descansa el piso.

El ancho transformado del piso:

$$b_{TransPISO} = \frac{b_e}{n} \quad (58)$$

$$b_{TransPISO} = \frac{58 \text{ cm}}{15.685} = 3.698 \text{ cm}$$

El área transformada del piso:

$$A_{TransPISO} = (h_{PISO})(b_{TransPISO}) \quad (59)$$

$$A_{TransPISO} = (6.35 \text{ cm})(3.689 \text{ cm}) = 23.425 \text{ cm}^2$$

El centro de gravedad general $Y_{C.G.}$ de la figura compuesta:

$$Y_{C.G.} = \frac{(A_{TransPISO})(Y_{PISO}) + (A_{VIGA})(Y_{VIGA})}{(A_{TransPISO})(A_{VIGA})} \quad (60)$$

$$Y_{PISO} = \frac{h_{PISO}}{2} + d \quad (61)$$

$$Y_{PISO} = \frac{6.35 \text{ cm}}{2} + 0 \text{ cm} = 3.175 \text{ cm}$$

$$Y_{VIGA} = \frac{h_{VIGA}}{2} + d \quad (62)$$

$$Y_{VIGA} = \frac{10.16 \text{ cm}}{2} + 6.35 = 11.43 \text{ cm}$$

$$Y_{C.G.} = \frac{(23.425 \text{ cm}^2)(3.175 \text{ cm}) + (3.43 \text{ cm}^2)(11.43 \text{ cm})}{(23.425 \text{ cm}^2) + (3.43 \text{ cm}^2)} = 4.23 \text{ cm}$$

El momento de inercia de la figura de la sección transformada de piso es:

$$I_{Y1} = \frac{(b_{TransPISO})(h_{PISO})^3}{12} + (A_{TransPISO})(Y_{C.G.} - Y_{C.G.PISO})^2 \quad (63)$$

$$Y_{C.G.PISO} = \frac{h_{PISO}}{2} \quad (64)$$

$$Y_{C.G.PISO} = \frac{6.35 \text{ cm}}{2} = 3.175 \text{ cm}$$

$$I_{Y1} = \frac{(3.698 \text{ cm})(6.35 \text{ cm})^3}{12} + (23.425 \text{ cm}^2)[(4.23 \text{ cm}) - (3.175 \text{ cm})]^2 = 104.98 \text{ cm}^4$$

El momento de inercia de la figura compuesta por la sección de la viga es:

$$Y_{C.G.VIGA} = \frac{h_{VIGA}}{2} \quad (65)$$

$$Y_{C.G.VIGA} = \frac{10.16}{2} = 5.08 \text{ cm}$$

$$I_{Y2} = I_{VIGA} + (A_{VIGA})(Y_{C.G.VIGA} - Y_{C.G.})^2 \quad (66)$$

$$I_{Y2} = 55.91 \text{ cm}^4 + (3.43 \text{ cm}^2)(5.08 - 4.23)^2 = 58.39 \text{ cm}^4$$

El momento de inercia transformado de la sección compuesta de la viga y el piso es:

$$I_{TrasVIGA} = I_{Y1} + I_{Y2} \quad (67)$$

$$I_{TrasVIGA} = 104.98 \text{ cm}^4 + 58.39 \text{ cm}^4 = 163.37 \text{ cm}^4$$

6.6.1.2.3 Distribución de masa

La distribución de la masa es el peso uniformemente distribuido del entrepiso por el área total del bloque del entrepiso analizado (Allen, 1993):

$$M_{TOTAL} = (L_{PISO})(b_{PISO})(w_{PISO}) \quad (68)$$

$$M_{TOTAL} = (4.64 \text{ m})(2.32 \text{ m}) \left(247 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) = 2,658.91 \text{ kg}$$

6.6.1.2.4 Masa modal

Finalmente, la masa modal para este caso específico de un entrepiso ortotrópico, se puede obtener a través de la ecuación (HIVOSS, 2008) del producto de la masa total multiplicada por un factor referente a las deflexiones de la viga y del piso:

$$M_{MODAL} = (M_{TOTAL}) \left[\left(\frac{(\Delta_{VIGA})^2 + (\Delta_{PISO})^2}{(2)(\Delta_{MAX})^2} \right) + \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \left(\frac{(\Delta_{VIGA})(\Delta_{PISO})}{(\Delta_{MAX})^2} \right) \right] \quad (69)$$

Puede omitirse el cálculo de las deflexiones de la viga y del piso con la aproximación siguiente:

$$0.5 \approx \left[\left(\frac{(\Delta_x)^2 + (\Delta_y)^2}{(2)(\Delta_{MAX})^2} \right) + \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \left(\frac{(\Delta_x)(\Delta_y)}{(\Delta_{MAX})^2} \right) \right] \quad (70)$$

$$M_{MODAL} \approx (M_{TOTAL})(0.5) \quad (71)$$

$$M_{MODAL} \approx (2,658.91 \text{ kg})(0.5) \approx 1,329.46 \text{ kg}$$

6.6.1.3 Eingenfrecuencia

6.6.1.3.1 Frecuencia fundamental

En un sistema estructural se tiene un conjunto de múltiples grados de libertad, por lo que se puede simplificar de manera que se obtenga una única frecuencia con la cual se facilitan diversos cálculos para conocer algunas características dinámicas de la estructura.

La ecuación para obtener la frecuencia fundamental del sistema de entrepiso (Saidi Ibrahim, 2012) está basada en un sistema de entrepiso ortotrópico con la característica de tener una plancha como sistema de piso la cual es soportada por vigas espaciadas a una cierta distancia. Los cálculos se realizan en Sistema Internacional de Unidades (SI):

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{(E_{VIGA})(I_{VIGA_{Trans}})}{(w)(b)^4}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{e}{b} \right)^2 + \left(\frac{e}{b} \right)^4 \right] \left(\frac{(E_{PISO})(I_{PISO})}{(E_{VIGA})(I_{VIGA_{Trans}})} \right)} \quad (72)$$

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\left(200,025.9 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \right) (163.37 \times 10^{-8} m^4)}{\left(247 \frac{kg}{m^2} \right) (0.58 m)^4}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{0.58 m}{2.32 m} \right)^2 + \left(\frac{0.58 m}{2.32 m} \right)^4 \right] \left(\frac{\left(12,753 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \right) (4,950 \times 10^{-8} m^4)}{\left(200,025.9 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \right) (163.37 \times 10^{-8} m^4)} \right)}$$

$$f_n = 11.86 \text{ Hz}$$

6.6.1.3.2 Periodo fundamental

El periodo del entrepiso es el inverso de la frecuencia:

$$T = \frac{1}{f_n} \quad (73)$$

$$T = \frac{1}{11.86 \text{ Hz}} = 0.0843 \text{ s}$$

6.6.1.4 Aceleración máxima

La amplitud, tomando en cuenta la caminata de una persona con un peso de 60 kg:

$$P_o = (0.83)(R)(Q) \quad (74)$$

$$P_o = (0.83)(0.5)(60 \text{ kg}) = 24.9 \text{ kg}$$

La aceleración como porcentaje de la gravedad es:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(P_o)(e^{(-0.35)(f_n)})}{(\beta)(W)} \leq \frac{a_0}{g} \quad (75)$$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(24.9 \text{ kg})(e^{(-0.35)(11.86 \text{ Hz})})}{(0.03)(2,658.91 \text{ kg})} \leq \frac{a_0}{g}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.00491 \leq \frac{a_0}{g}$$

$$a_p = 0.491\% g \leq \frac{a_0}{g}$$

El valor de $\frac{a_0}{g} = 0.005$, es recomendable para valores de frecuencia menores de 8 Hz.

Cuando las frecuencias son mayores que 8 Hz (el cual es el caso, donde $f_n=11.56$ Hz), se puede hacer uso de los valores recomendados de aceleración dados por los límites de perceptibilidad ante vibraciones bajo ciertos criterios ([ASCE-SEI-7-16](#)) para cada tipo de edificación.

6.6.2 Criterios de confort debido a vibraciones de entresiso

El confort en una vivienda es el conjunto de condiciones ambientales y materiales que proporcionan la sensación de bienestar y comodidad para sus habitantes. Entre los distintos parámetros de confort aplicables para una vivienda se encuentran: sensación térmica, acústica, de humedad, lumínica, espacial y de vibraciones, entre muchos otros.

El diseño de una edificación no sólo debe garantizar la integridad y seguridad de la estructura; sino también, cumplir con criterios de confort para sus ocupantes. En este caso se realizó el cálculo de vibraciones verticales de entrepiso del sistema estructural propuesto basado en las características de la «*Casa Solar Experimental*», comparando sus resultados con dos tipos de criterios de confort ampliamente estudiados en el campo de vibraciones estructurales.

La percepción de las vibraciones por las personas depende de diversos factores, y a pesar de ello, la sensación es muy particular, ya que no todos los individuos cuentan con la misma capacidad de percepción de las vibraciones.

Un sistema de entrepiso puede ser perturbado por una fuerza externa, la cual provoca que dicho entrepiso vibre con ciertas características, las cuales si son muy intensas pudieran afectar la percepción de confort de sus habitantes, y en ciertos casos, podría entrar en resonancia si la frecuencia del entrepiso coincide con la frecuencia de la fuente perturbadora.

6.6.2.1 Aceleración como porcentaje de la gravedad

El valor de la aceleración cuando un sistema de entrepiso se encuentra en vibración depende del valor de la fuerza perturbadora, del amortiguamiento del sistema de entrepiso, de la masa del entrepiso y de la frecuencia del entrepiso, y ésta a su vez depende de las deflexiones presentadas que están en función de la carga distribuida sobre el entrepiso y los valores de rigidez de sus elementos, los cuales están relacionados las características mecánicas de sus materiales, las dimensiones y ubicación de los elementos.

En la siguiente gráfica (figura 144) se muestra el valor máximo permisible de aceleración como porcentaje de la gravedad que es aceptable dentro del criterio de confort de aceleración (Hernández, 2015). En este caso el valor permisible de aceleración vertical del entrepiso es de $\frac{a_0}{g} = 0.65\%$ de g, debido a que la eigenfrecuencia del entrepiso es de $f_n=11.86$ Hz.

El valor calculado de la aceleración como porcentaje de la gravedad depende directamente de la fuerza perturbadora, en este caso el peso de una persona caminando: entre mayor sea el peso de la persona, mayor perturbación y aceleración del entrepiso; y viceversa.

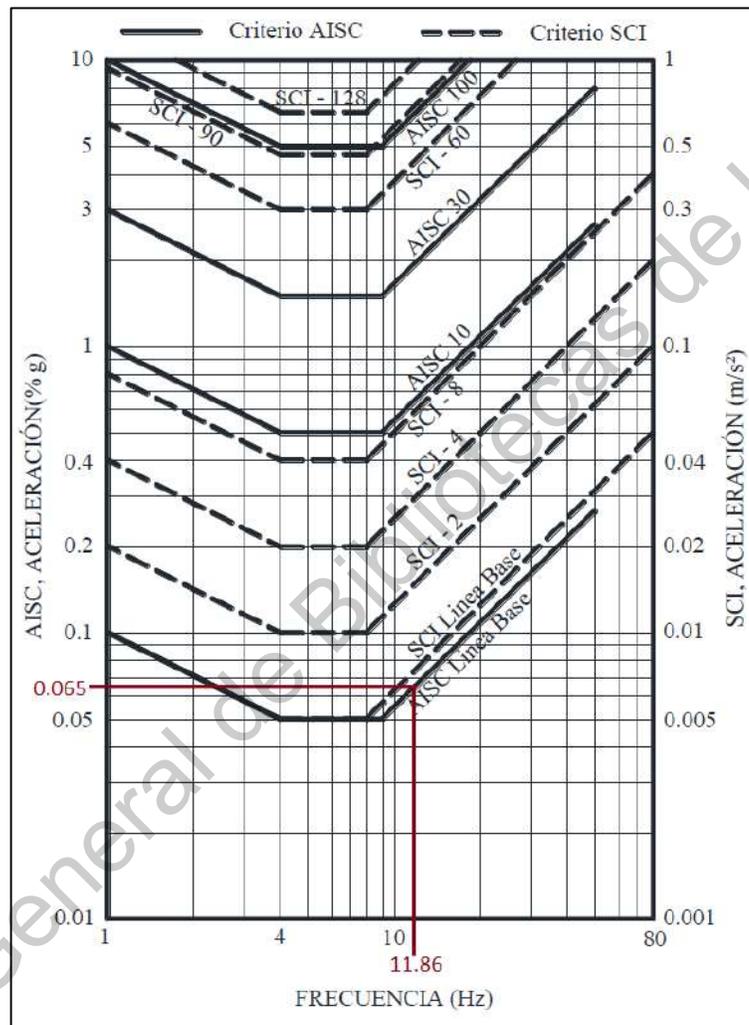


Figura 144. Límites de perceptibilidad ante vibraciones por los criterios ASCE y SCI, como un parámetro de medición del estado de confort de los ocupantes ante una vibración con cierta frecuencia (Hernández, 2015).

Por lo que con un peso 60 kg de una persona caminando sobre el entrepiso se tiene una aceleración de 0.491% de g, menor que el límite permisible para este caso específico de 0.65% de g, obteniendo un valor aceptable.

$$a_p = 0.491\% g \leq 0.65\% g$$

6.6.2.2 Método de OS-RMS₉₀

El método europeo llamado «*One-Step Root Mean Square 90*» (OS-RMS₉₀) se basa en un criterio de confort estadístico con una certificación internacional (ISO-10137, 2007), realizado a través de mediciones experimentales y cálculos analíticos que definen el estado de confort de una edificación según el tipo de uso que ésta tenga a través de una clasificación (A, B, C, D, E y F) (tabla 57), la cual es obtenida de manera simple con la implementación de una gráfica según el porcentaje de amortiguamiento (figura 145), donde se hacen coincidir dos parámetros dinámicos del entrepiso: la eigenfrecuencia y la masa modal del entrepiso.

Para este caso, la eigenfrecuencia del entrepiso fue de $f_n = 11.86$ Hz, la masa modal de $M_{Mod} = 1,329.43$ kg y un amortiguamiento del $\beta = 3\%$. Por lo que, utilizando la gráfica respectiva para dicho porcentaje de amortiguamiento, se hicieron coincidir la eigenfrecuencia y la masa modal del entrepiso, obteniendo un valor aproximado de OS-RMS=2.8 mm/s, con dicho valor se encuentra en la clasificación D y siendo vivienda el tipo de uso de la edificación, el resultado obtenido es satisfactorio, por lo que la sensación de vibraciones en la estructura se encuentra dentro de los límites permisibles de confort.

Tabla 57. Clasificación de la respuesta de entrepiso recomendada por sector (ISO-10137, 2007).

Uso de entrepiso por sector	Clase					
	A	B	C	D	E	F
	[0.0 - 0.1)	[0.1 - 0.2)	[0.2 - 0.8)	[0.8 - 3.2)	[3.2 - 12.8)	[12.8 - 51.2)
Deportivo	✓	✓	✓	✓	✓	▪
Industrial	✓	✓	✓	✓	✓	▪
Hotelero	✓	✓	✓	✓	▪	✗
Comercio	✓	✓	✓	✓	▪	✗
Reuniones	✓	✓	✓	✓	▪	✗
Oficina	✓	✓	✓	✓	▪	✗
Residencial	✓	✓	✓	✓	▪	✗
Educativo	✓	✓	✓	▪	✗	✗
Salud	✓	✓	✓	▪	✗	✗
Espacios de trabajo críticos	✓	▪	✗	✗	✗	✗

Recomendado	✓
Crítico	▪
No recomendado	✗

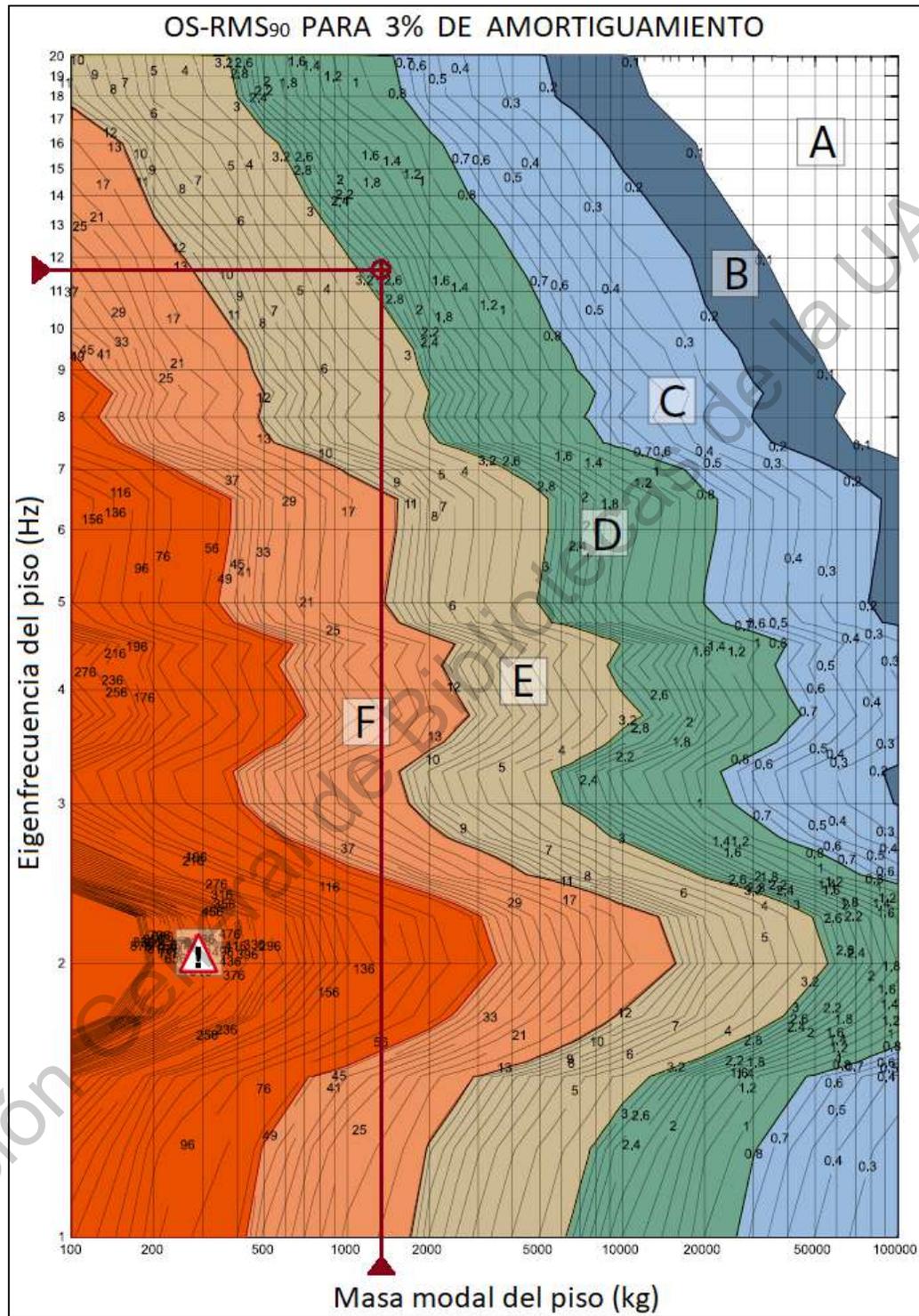


Figura 145. Gráfica del OS-RMS₉₀, para un amortiguamiento del 3%, donde se compara la eigenfrecuencia calculada del entrepiso en Hz contra la masa modal calculada del entrepiso en kg, obteniendo un valor de 2.8, por lo cual se clasifica como D, siendo una percepción de vibración recomendada (ArcelorMittal, 2008).

6.7 Modelación de la conexión universal H-1 en ANSYS

6.7.1 Modelo

Se realizó el modelado geométrico de la conexión universal H-1 en AutoCAD 3D para posteriormente ser trabajada en ANSYS Workbench (figura 146).

Dicho modelado contempla con precisión las dimensiones de cada parte de la conexión: incluyendo las líneas de soldadura, espesores de las placas, así como el diámetro y ubicación de los agujeros donde se atornillan los diferentes elementos que se unen a la conexión.

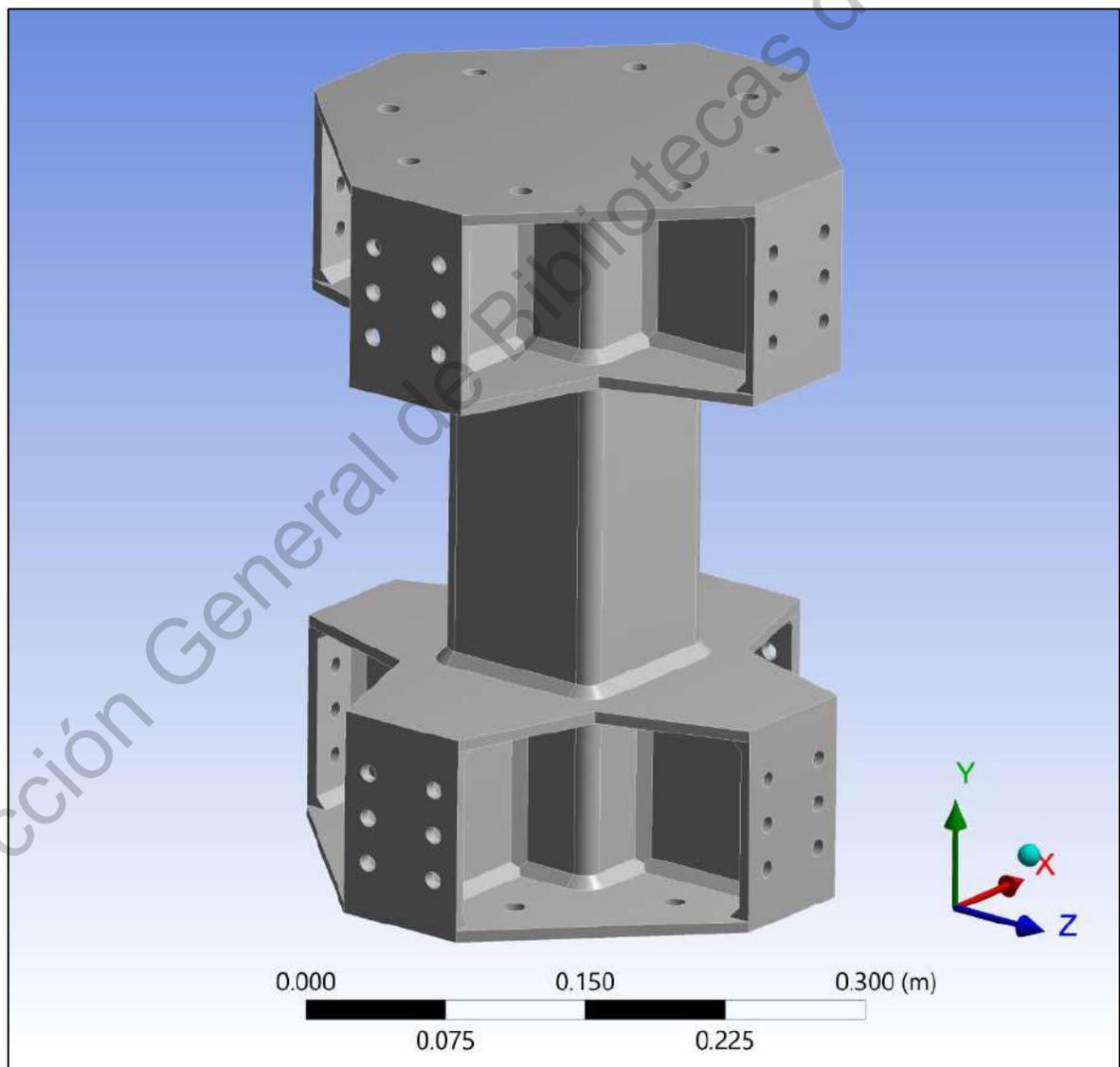


Figura 146. Vista de la conexión universal H-1 en ANSYS

6.7.2 Consideraciones

6.7.2.1 Sistema de Unidades

En ANSYS Workbench se trabajó con en el Sistema Internacional de Unidades, utilizando el metro como unidad de longitud, el Newton como unidad de fuerza y el Pascal como unidad de presión; por lo que se realizaron las conversiones de unidades respectivas de los esfuerzos a los cuales están sujetos los elementos, derivado del cálculo estructural de la vivienda a través del software RAM Elements.

6.7.2.2 Materiales

Para el cálculo de la conexión universal H-1 en ANSYS fueron usados 3 tipos de materiales: siendo el elemento principal de la conexión un perfil tipo PTR 4"x4"x3/16", el cual es un acero tipo A500 Grado B; las placas que se unen al perfil de PTR son de un acero tipo A36; y el material de las soldaduras es del tipo E 7018 (tabla 58).

Cada uno de estos metales cuenta con propiedades mecánicas diferentes, y entre las que más se destacan son: el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último; el primero es cuando el material deja de comportarse de manera lineal en el rango elástico y pasa al estado elastoplástico, donde el elemento se deforma más rápidamente y de manera no-lineal respecto al esfuerzo aplicado en comparación con el rango elástico; y el esfuerzo último es cuando la resistencia del material se acerca a la falla.

Tabla 58. Materiales usados en la modelación de la conexión universal H-1 en ANSYS.

Elemento	Norma	Esfuerzo de fluencia			Esfuerzo último		
		(KSI)	(kg/cm ²)	(MPA)	(KSI)	(kg/cm ²)	(MPA)
PTR 4"x4"x3/16"	ASTM A500/A500M-18	46	3,235	315	58	4,080	400
Placas 1/4"	ASTM A36/A36M-19	36	2,530	250	58	4,080	400
Soldadura E 7018	AWS E-7018-G	70	4,920	480	77	5,410	530

Se consideró un módulo de elasticidad de $E = 29,000$ KSI, equivalentes a $2'039,000$ kg/cm², un coeficiente de Poisson de $\nu = 0.3$ y una densidad del acero de $7,850$ kg/m³.

6.7.2.3 Ubicación de la conexión analizada

Se contempló analizar una conexión universal de las 68 conexiones que cuenta la estructura de la vivienda en cuestión, por lo que se revisaron todas las conexiones y se encontró que bajo la combinación de carga de diseño D11 —que contempla acciones de sismo— había una conexión con el máximo esfuerzo en toda la estructura, ubicada en la columna número 4 en el segundo entrepiso (figura 147).

Esta conexión universal cuenta con una columna bajo de ella y otra columna sobre ésta, también se le conectan 8 armaduras (las cuales en el cálculo estructural se contemplan como 4 armaduras dobles). Esta conexión soporta de un lado el entrepiso de segundo nivel y del otro lado el entrepiso de cubierta de primer nivel, así como a una columna que soporta las cargas de cubierta de segundo nivel en la cual el peso del tinaco reside principalmente sobre ella; además, dicha conexión soporta el peso de muros perimetrales sobre 2 de las armaduras dobles que se conectan a ella; por lo que es la conexión más esforzada en la estructura.

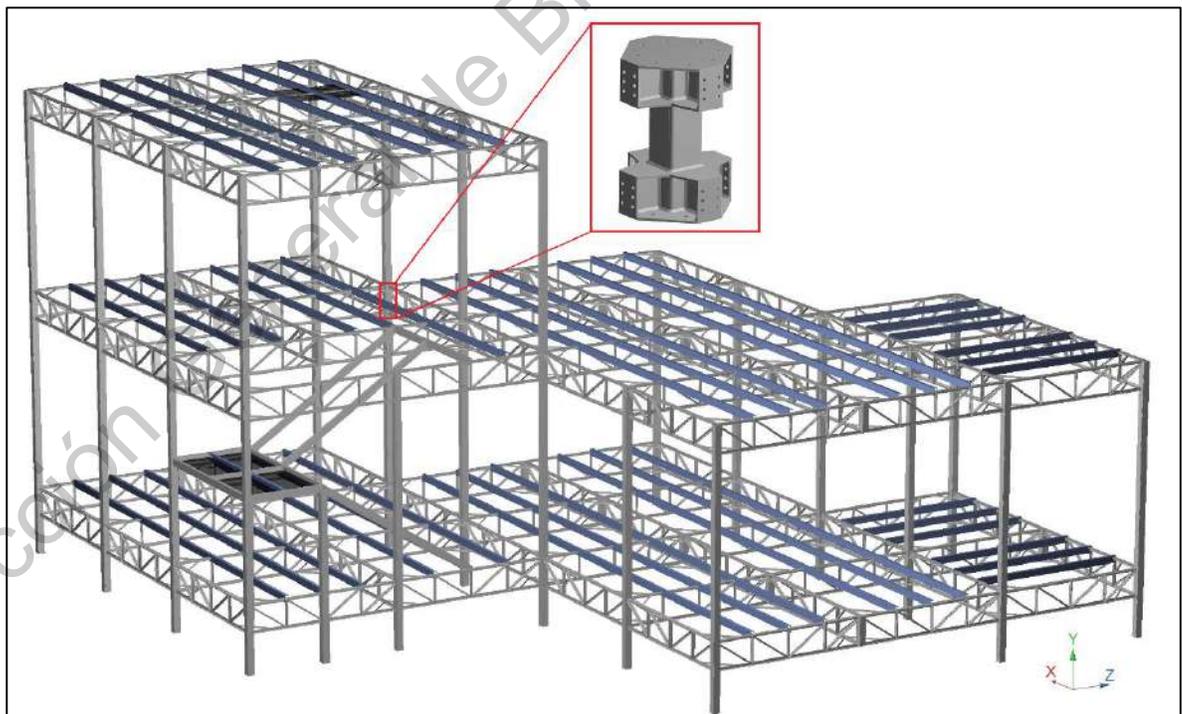


Figura 147. Ubicación en la estructura de la conexión universal H-1 analizada en ANSYS.

6.7.2.4 Mallado

El software ANSYS Workbench trabaja a través del uso del Método del Elemento Finito (FEM), en el cual se realizan divisiones de un elemento en otros más pequeños para estudiar con más precisión el comportamiento en un punto dado de la figura.

El cálculo de la conexión universal se realizó con un total de 5,132 elementos finitos, donde el mallado que se realizó es diferente para los miembros que integran la conexión: el perfil PTR se dividió en elementos hexaédricos regulares alargados y cuenta con 640 elementos finitos; las placas tapa, con 207; las placas diafragma, con 103; las placas interiores, con 56; las placas laterales, con 107; las soldaduras del contorno con el perfil PTR, con 141; y las soldaduras entre placas, con 270 cada conjunto, donde todas las soldaduras cuentan con elementos finitos tetraédricos (figuras 148 y 149).

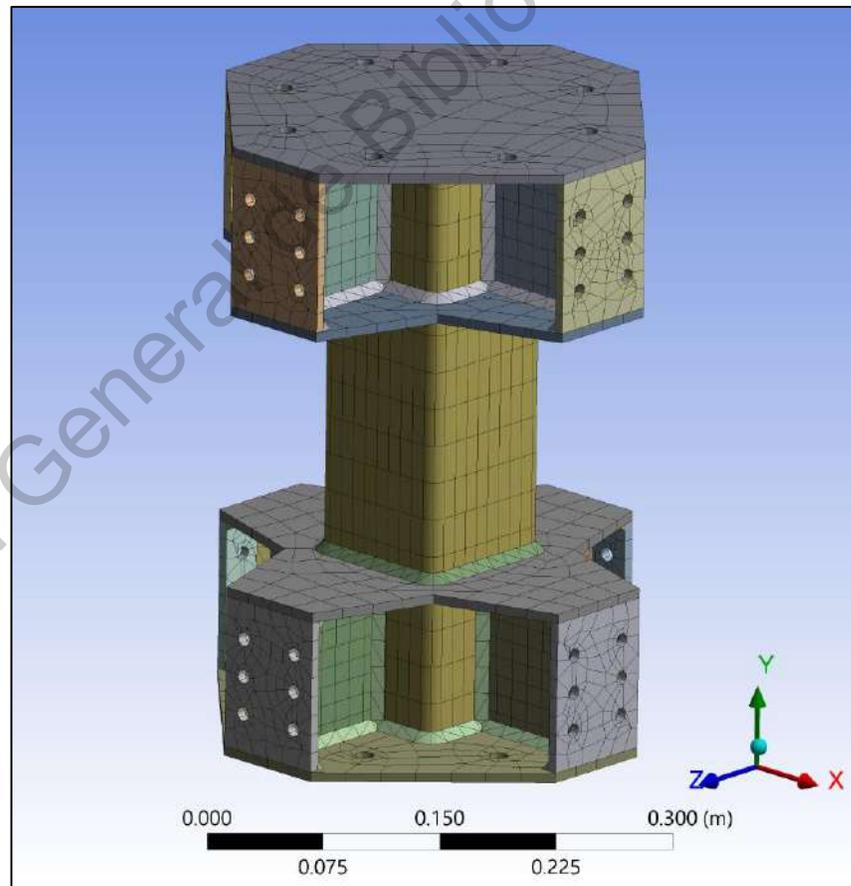


Figura 148. Conexión universal H-1 con el mallado de sus elementos finitos.

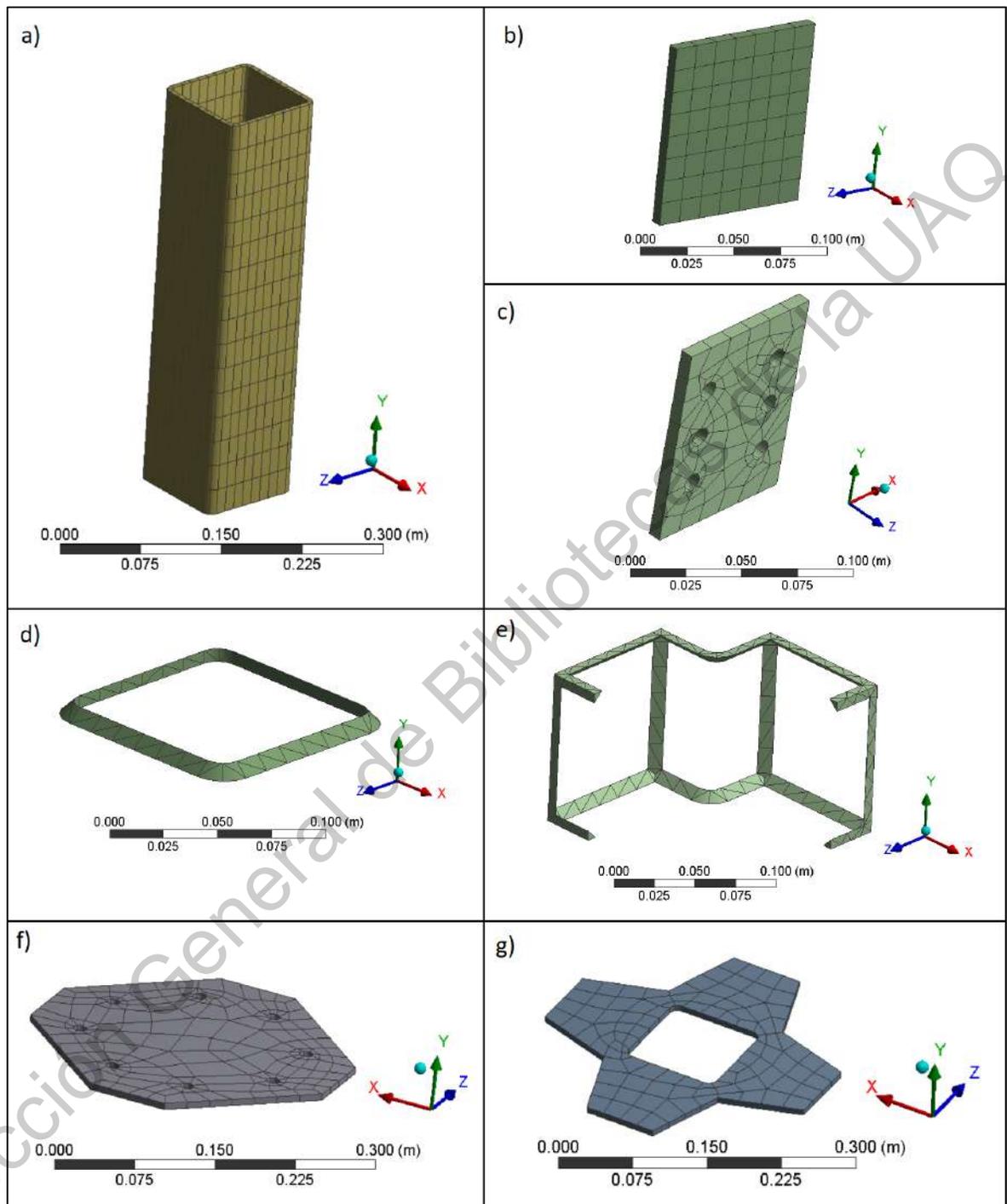


Figura 149. Despiece de los elementos mallados que conforman la conexión universal. A) Perfil PTR 4"x4"x3/16", 1 pieza. b) Placas interiores, 8 piezas. c) Placas laterales con 6 agujeros de 3/8" cada uno, 8 piezas. d) soldadura del contorno del perfil PTR, 2 piezas. e) Conjunto de soldaduras entre placas, 8 piezas. f) Placas tapa con 8 agujeros de 1/2" cada uno, 2 piezas. g) Placas diafragma, 2 piezas.

6.7.2.5 Restricciones

Se consideró que la conexión universal tuviera ciertas restricciones de movimiento en sus extremos verticales con una mínima libertad de desplazamiento y de giro según los resultados obtenidos del cálculo estructural en el software RAM Elements.

En el software ANSYS la simulación de la aplicación de esfuerzos en la conexión tiene un intervalo de 1.0 segundo, donde en el tiempo inicial cero no se aplica ningún esfuerzo, posteriormente se fue aplicando gradualmente los esfuerzos y en el tiempo de 1.0 s se aplica el 100% de esfuerzos. Análogamente a la aplicación de esfuerzos, también se emplearon ciertas condiciones de soporte en los extremos de la conexión universal, donde en el tiempo inicial cero está totalmente restringido tanto el movimiento como la rotación hacia algún eje, y gradualmente se libera un cierto desplazamiento y rotación hasta llegar al tiempo de 1 s donde es el 100%. De esta manera se simula el movimiento de la conexión universal que tiene bajo el comportamiento de los esfuerzos de la estructura, evitando 2 situaciones: un soporte totalmente fijo y un movimiento de la conexión totalmente libre.

La aplicación de estas restricciones fue en las caras interiores de los agujeros de las placas tapa, las cuales colindan con una columna superior e inferior respectivamente.

Los valores aplicados de desplazamientos y giros en los nodos con restricciones de movimiento se obtuvieron del análisis estructural. Como se puede apreciar en la siguiente tabla, dichos valores son muy pequeños, prácticamente insignificantes, pero proveen una redistribución de esfuerzos y deformaciones adecuada en la conexión universal y es más acorde con la realidad en un intervalo de tiempo dado (tabla 59).

Tabla 59. Restricciones en los extremos verticales de la conexión universal en un intervalo de tiempo.

Nodo	Tiempo	Desplazamiento en el eje			Giro hacia el eje		
		X	Y	Z	X	Y	Z
	(s)	(cm)	(cm)	(cm)	(Grados)	(Grados)	(Grados)
Superior	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.0	0.0000174	-0.0001614	0.00008662	-0.00006672	0.00001004	0.00001206
Inferior	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.0	0.00002346	-0.00014826	0.00014358	-0.000143	-0.000009079	0.00001355

6.7.3 Aplicación de esfuerzos

Del análisis estructural realizado en el software RAM Elements se obtuvieron una serie de resultados de 57 esfuerzos que transmiten los elementos hacia la conexión universal, éstos se convirtieron al Sistema Internacional de Unidades y se aplicaron en ANSYS según la dirección y sentido correspondiente al eje local de cada elemento (tabla 60).

Las cargas axiales de los elementos de las armaduras se aplicaron sobre la cara de los elementos correspondientes (placas laterales agujereadas), y sus cortantes y momentos (tanto en placas laterales agujereadas como en placa tapa agujereada) se aplicaron en la superficie interna de los agujeros de dichas placas, simulando los esfuerzos que los tornillos transmiten hacia la conexión, dividiendo dicho esfuerzo entre el número de agujeros correspondiente. En cuanto a los esfuerzos transmitidos por los elementos diagonales, éstos fueron aplicados con sus respectivas componentes con un ángulo de 37° , que es el que forma dicha diagonal con la cuerda superior. La carga axial de la columna superior se aplicó sobre la superficie de una sección simulada tipo PTR 4"x4"x3/16" encima de la placa tapa de la conexión.

Tabla 60. Esfuerzos aplicados a la conexión universal H-1 en ANSYS.

Esfuerzo proveniente del elemento:	Ubicación	Carga axial (N)		Cortante (V)		Momento (M)	
		Del eje local		Hacia el eje local		Alrededor del eje local	
		N ₁ (N)	Compresión / Tensión	V ₂ (N)	V ₃ (N)	M ₂₂ (N*m)	M ₃₃ (N*m)
Armadura lado 1	Arriba	2,242.75	Tensión	576.63	459.93	54.57	24.87
	Diagonal	945.36	Tensión	8.14	1.40	0.00	0.00
	Abajo	-5,403.46	Compresión	121.60	-11.86	-109.83	-50.87
Armadura lado 2	Arriba	205.94	Tensión	-8.94	412.86	10.90	-20.10
	Diagonal	-768.84	Compresión	-7.51	-3.02	0.00	0.00
	Abajo	-24,026.29	Compresión	4.53	689.41	-142.20	-97.83
Armadura lado 3	Arriba	5,771.21	Tensión	-588.40	672.74	-78.55	45.44
	Diagonal	-403.05	Compresión	-8.47	-1.35	0.00	0.00
	Abajo	316.75	Tensión	6.73	524.60	-72.39	-50.83
Armadura lado 4	Arriba	1,549.45	Tensión	462.87	103.95	-9.64	64.94
	Diagonal	19,221.03	Tensión	-42.31	1.55	0.00	0.00
	Abajo	-34,617.47	Compresión	306.95	201.04	-78.45	-156.91
Columna	Superior	-44,424.12	Compresión	6,550.84	20,397.83	-4,707.19	-1,382.74

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Cálculo y diseño estructural de la vivienda

Se revisaron los esfuerzos en los elementos por cada tipo de miembro, sus deflexiones, las reacciones en los apoyos, los desplazamientos nodales y distorsiones angulares; y los resultados fueron aceptables; por lo que se considera que el dimensionamiento de los elementos fue el correcto para que la estructura soporte las acciones a las cuales se espera, tanto acciones gravitacionales de carga muerta y carga viva, como accidentales de viento y sismo.

7.1.1 Esfuerzos

Producto del diseño estructural se obtuvieron los resultados de los esfuerzos a los cuales están sometidos los 3,448 elementos que conforman la estructura, y en todos los casos se presenta un diseño correcto, por lo tanto, las dimensiones de los elementos bajo la configuración geométrica de la estructura son correctas (figuras 150 y 151).

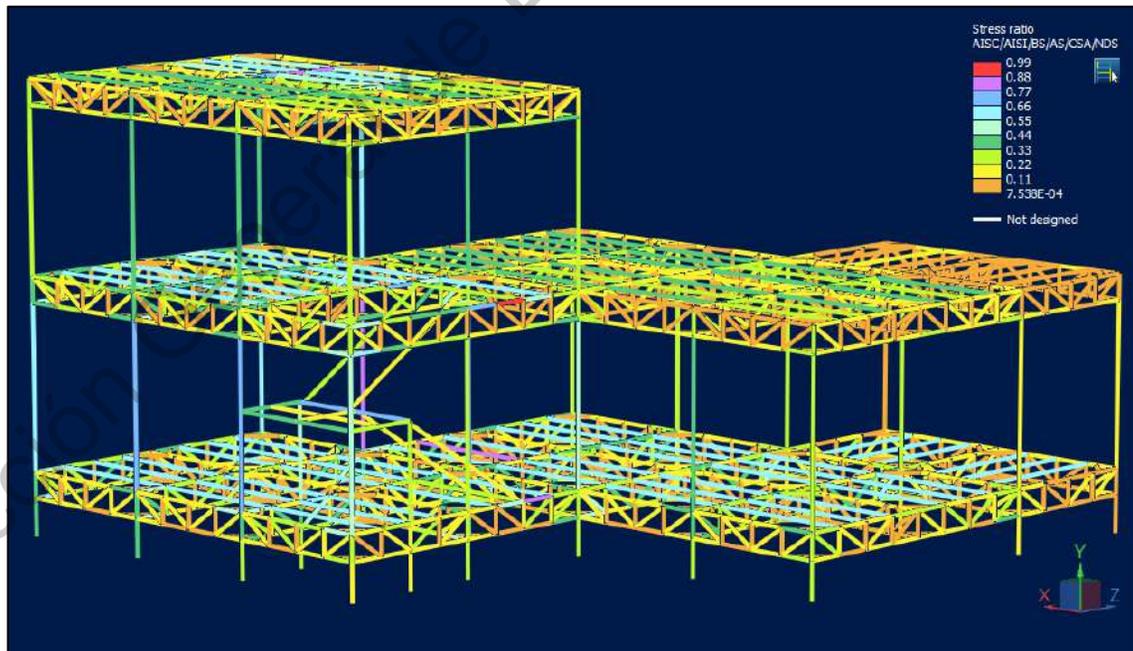


Figura 150. Visualización de la intensidad de la relación de esfuerzos en los elementos de la estructura bajo la condición de carga más desfavorable para cada uno. Si su relación de esfuerzo aplicado entre el resistente es menor que la unidad, está bien diseñado el elemento.

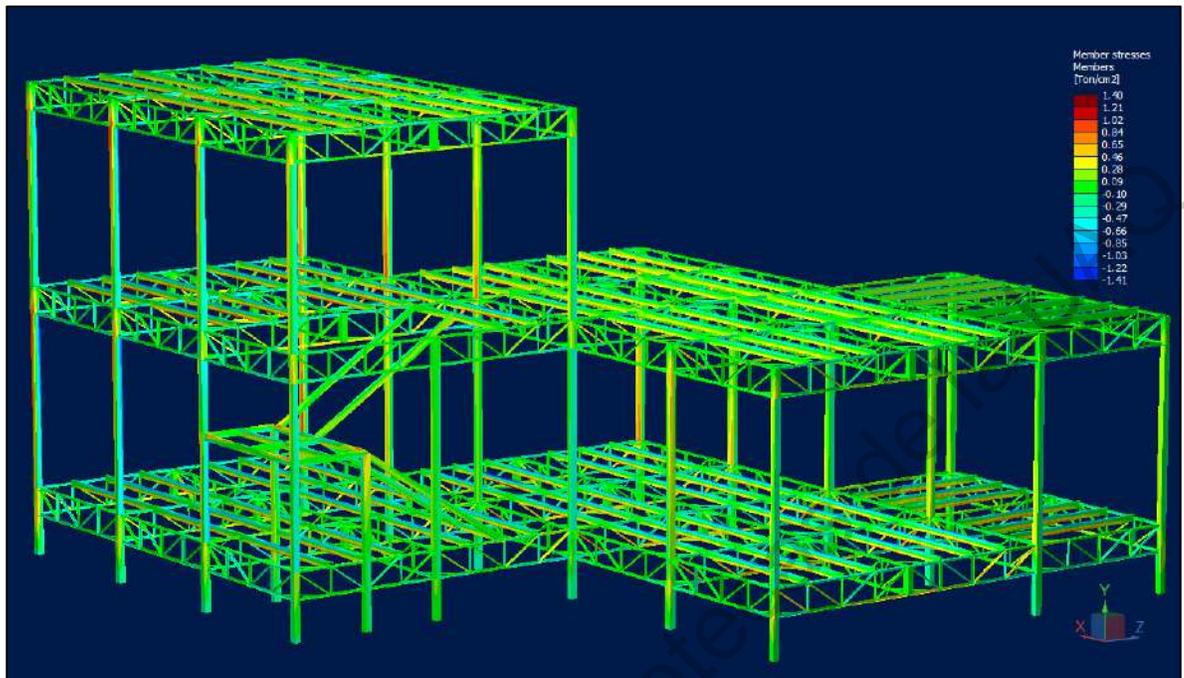


Figura 151. Modelación de esfuerzos en la estructura a través del método del elemento finito (FEM) bajo la combinación de carga de diseño D11, la más desfavorable para las conexiones universales que incluye acciones de sismo, donde los esfuerzos a los que los elementos están sometidos son adecuados.

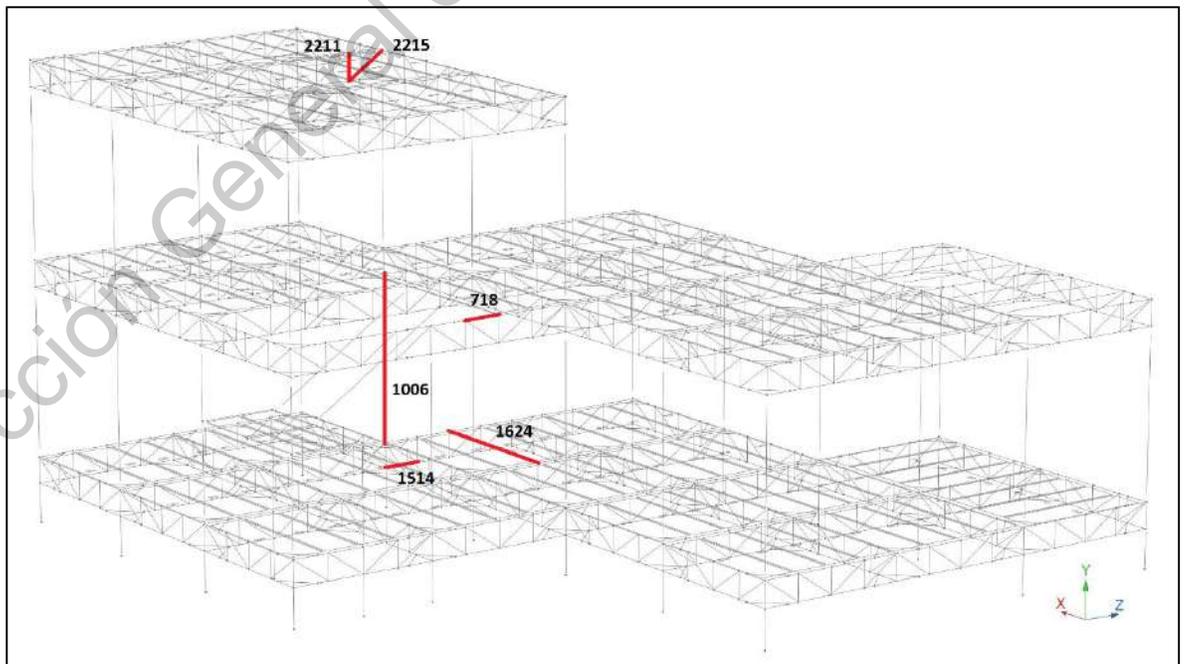


Figura 152. Ubicación en la estructura de los miembros más esforzados por cada tipo.

Se revisó la capacidad y la demanda de esfuerzos en los elementos más exigidos por cada tipo (figura 152), donde la relación demanda/capacidad indica el nivel de esfuerzo en la que el miembro se encuentra. Si esta relación es igual o mayor que 1.0, indica una insuficiente capacidad de resistencia del elemento; y si es menor que 1.0, indica que el elemento está correctamente diseñado y puede resistir los esfuerzos a los cuales la estructura está sujeta. Los resultados de la capacidad y la demanda de los elementos fueron obtenidos del diseño estructural realizado en el software RAM Elements (tablas 61 - 66).

Tabla 61. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a la cuerda superior de las armaduras.

Elemento			Esfuerzo	Eje local	Unidad	Capacidad	Demanda	Relación Demanda / Capacidad	Resultado
N°	Nombre	Sección							
718	Cuerda superior	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	Tensión axial	1	(t)	10.56	0.00	0.00	Aceptable ✓ ✓
			Compresión axial	1	(t)	10.11	0.49	0.05	Aceptable ✓ ✓
			Cortante	2'	(t)	3.17	0.24	0.08	Aceptable ✓ ✓
			Flexión	3' - 3'	(t*m)	0.81	0.13	0.16	Aceptable ✓ ✓
			Cortante	3'	(t)	3.17	0.05	0.02	Aceptable ✓ ✓
			Flexión	2' - 2'	(t*m)	0.05	0.005	0.10	Aceptable ✓ ✓
			Flexocompresión	Combinación D11					0.87

Tabla 62. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a la cuerda inferior de las armaduras.

Elemento			Esfuerzo	Eje local	Unidad	Capacidad	Demanda	Relación Demanda / Capacidad	Resultado
N°	Nombre	Sección							
1514	Cuerda inferior	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	Tensión axial	1	(t)	10.56	0.00	0.00	Aceptable ✓ ✓
			Compresión axial	1	(t)	10.11	3.86	0.38	Aceptable ✓ ✓
			Cortante	2'	(t)	3.17	0.02	0.01	Aceptable ✓ ✓
			Flexión	3' - 3'	(t*m)	0.11	0.01	0.09	Aceptable ✓ ✓
			Cortante	3'	(t)	3.17	0.05	0.02	Aceptable ✓ ✓
			Flexión	2' - 2'	(t*m)	0.1	0.014	0.14	Aceptable ✓ ✓
			Flexocompresión	Combinación D7					0.62

Tabla 63. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a las diagonales de las armaduras.

Elemento			Esfuerzo	Eje local	Unidad	Capacidad	Demanda	Relación Demanda / Capacidad	Resultado
N°	Nombre	Sección							
2215	Diagonal	LI 1" x 1" x 1/8"	Tensión axial	1	(t)	6.89	4.21	0.61	Aceptable ✓ ✓
			Compresión axial	1	(t)	5.93	0.00	0.00	Aceptable ✓ ✓
			Cortante	2'	(t)	2.07	0.02	0.01	Aceptable ✓ ✓
			Flexión	3' - 3'	(t*m)	0.07	0.00	0.00	Aceptable ✓ ✓
			Cortante	3'	(t)	2.07	0.02	0.01	Aceptable ✓ ✓
			Flexión	2' - 2'	(t*m)	0.04	0.00	0.00	Aceptable ✓ ✓
			Flexotensión	Combinación D2					0.61

Tabla 64. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a los montantes de las armaduras.

Elemento			Esfuerzo	Eje local	Unidad	Capacidad	Demanda	Relación Demanda / Capacidad	Resultado
N°	Nombre	Sección							
2211	Montante	LI 1" x 1" x 1/8"	Tensión axial	1	(t)	6.89	0	0.00	Acceptable ✓ ✓
			Compresión axial	1	(t)	6.56	2.44	0.37	Acceptable ✓ ✓
			Cortante	2'	(t)	2.07	0.02	0.01	Acceptable ✓ ✓
			Flexión	3' - 3'	(t*m)	0.07	0.00	0.00	Acceptable ✓ ✓
			Cortante	3'	(t)	2.07	0.02	0.01	Acceptable ✓ ✓
			Flexión	2' - 2'	(t*m)	0.04	0.00	0.00	Acceptable ✓ ✓
			Flexotensión	Combinación D2					0.41

Tabla 65. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a los montenes.

Elemento			Esfuerzo	Eje local	Unidad	Capacidad	Demanda	Relación Demanda / Capacidad	Resultado
N°	Nombre	Sección							
1624	Monten	14 MT 16	Tensión axial	1	(t)	10.87	0.00	0.00	Acceptable ✓ ✓
			Compresión axial	1	(t)	2.68	0.02	0.01	Acceptable ✓ ✓
			Cortante	2'	(t)	2.58	0.34	0.13	Acceptable ✓ ✓
			Flexión	3' - 3'	(t*m)	0.26	0.20	0.77	Acceptable ✓ ✓
			Cortante	3'	(t)	2.33	0.02	0.01	Acceptable ✓ ✓
			Flexión	2' - 2'	(t*m)	0.13	0.01	0.08	Acceptable ✓ ✓
			Torsión	2' - 3'	(t*m)	0.00	0.00	0.00	Acceptable ✓ ✓
			Pandeo lateral	3'	(t)	0.37	0.00	0.00	Acceptable ✓ ✓
Flexotensión	Combinación D2					0.78	Acceptable ✓ ✓		

Tabla 66. Esfuerzos del elemento más demandado correspondiente a las columnas.

Elemento			Esfuerzo	Eje local	Unidad	Capacidad	Demanda	Relación Demanda / Capacidad	Resultado
N°	Nombre	Sección							
1006	Columna	PTR 4" x 4" x 3/16"	Tensión axial	1	(t)	53.7	0.00	0.00	Acceptable ✓ ✓
			Compresión axial	1	(t)	7.48	5.91	0.79	Acceptable ✓ ✓
			Cortante	2'	(t)	16.11	0.3	0.02	Acceptable ✓ ✓
			Flexión	3' - 3'	(t*m)	1.95	0.35	0.18	Acceptable ✓ ✓
			Cortante	3'	(t)	16.11	0.35	0.02	Acceptable ✓ ✓
			Flexión	2' - 2'	(t*m)	1.95	0.43	0.22	Acceptable ✓ ✓
			Torsión	2' - 3'	(t*m)	1.56	0.01	0.00	Acceptable ✓ ✓
Flexotensión	Combinación D11					0.87	Acceptable ✓ ✓		

7.1.2 Reacciones

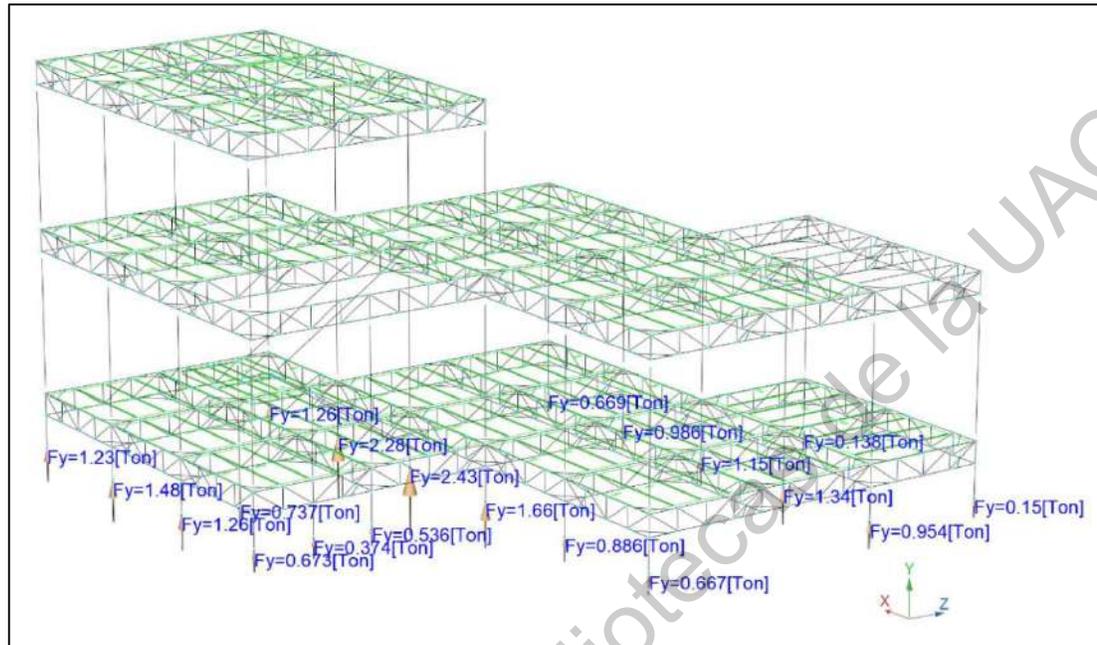


Figura 153. Reacciones en la base de la estructura con la condición de carga muerta.

Tabla 67. Reacciones en la base de la estructura con la condición de carga muerta.

Columna	Nodo en la base	Reacción (kgf)	Columna	Nodo en la base	Reacción (kgf)
1	642	1,230.78	11	1521	373.54
2	643	1,262.06	12	1545	536.08
3	528	1,483.59	13	362	1,662.99
4	529	2,278.06	14	756	1,153.62
5	894	668.79	15	1405	138.35
6	361	1,262.17	16	984	885.61
7	1520	737.15	17	1034	1,335.69
8	363	2,429.34	18	983	666.87
9	757	986.32	19	1033	954.49
10	360	627.80	20	1430	149.71
Total				20,823.01	

Se muestran las reacciones en la base (figura 153), donde la suma de las reacciones bajo la condición de carga muerta es de 204.27 kN (20,823.01 kgf) que resulta en un valor muy aproximado al peso total de la vivienda de (204.48 kN (20,844.24 kgf)). La diferencia de 208.27 N (21.23 kgf) pudiera ser resultado del redondeo del valor de algunas cargas al aplicarlas en el software, equivalente al 0.1% del peso total de la vivienda (tabla 67).

También se obtuvieron los valores de las reacciones bajo la condición más desfavorable para la estructura, la combinación de carga D11, en la cual intervienen acciones de sismo (figura 154).

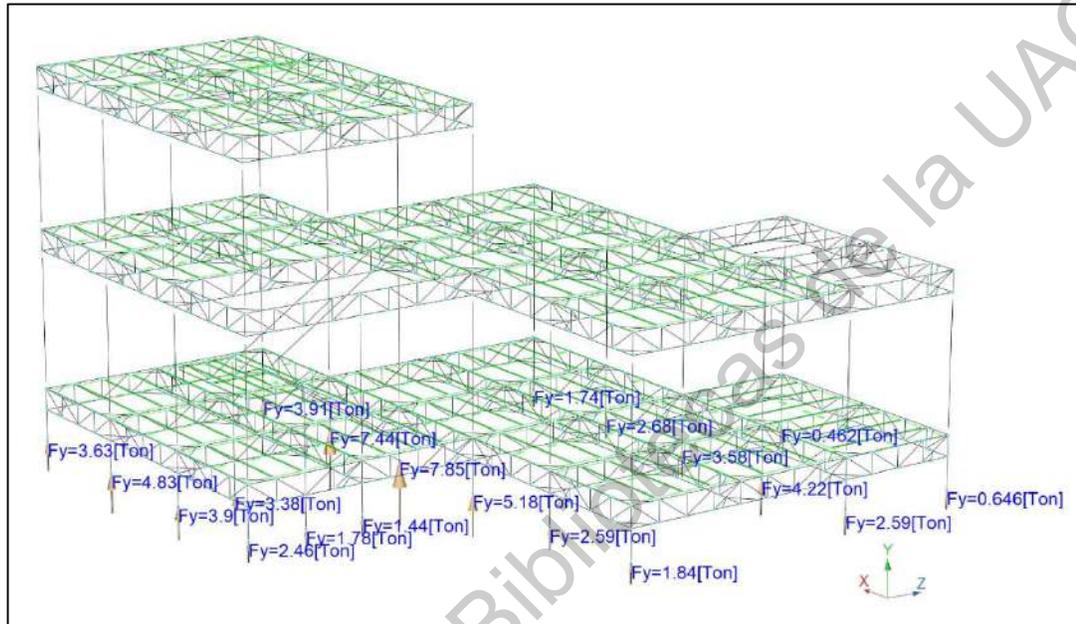


Figura 154. Reacciones en la base de la estructura bajo la combinación D11.

Tabla 68. Reacciones en la base de las columnas bajo la combinación D11.

Columna	Reacción (t)	Columna	Reacción (t)
1	3.63	11	1.78
2	3.91	12	1.44
3	4.83	13	5.18
4	7.44	14	2.68
5	1.74	15	0.46
6	3.9	16	2.59
7	3.38	17	4.22
8	7.85	18	1.84
9	2.68	19	2.59
10	2.46	20	0.65
		Total	65.25

La reacción en la base de las columnas bajo la combinación D11, de sismo, resultó de 640.01kN (65,250.00 kgf) (tabla 68).

7.1.3 Deflexiones

Las deflexiones en los elementos se analizaron bajo condiciones de servicio donde se revisó que la deflexión de sus miembros estuviera dentro del rango permisible (NTC, 2017). Se recopilaron las deflexiones en los elementos más demandados de cada tipo bajo su condición de servicio más desfavorable (figuras 155 - 157). Las cuerdas superiores e inferiores de las armaduras se componen por un conjunto de elementos que se analizaron tanto individualmente como en conjunto.

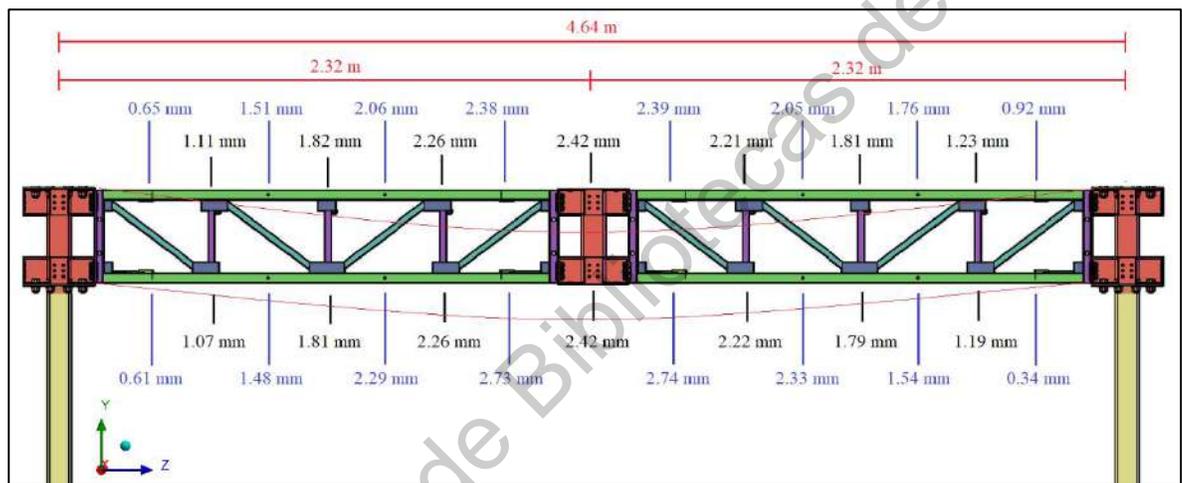


Figura 155. Deflexiones verticales en $-Y$ de una armadura con un claro entre columnas de 4.64 m, ubicada en la cubierta de segundo nivel bajo la combinación de carga de servicio S17, la más desfavorable.

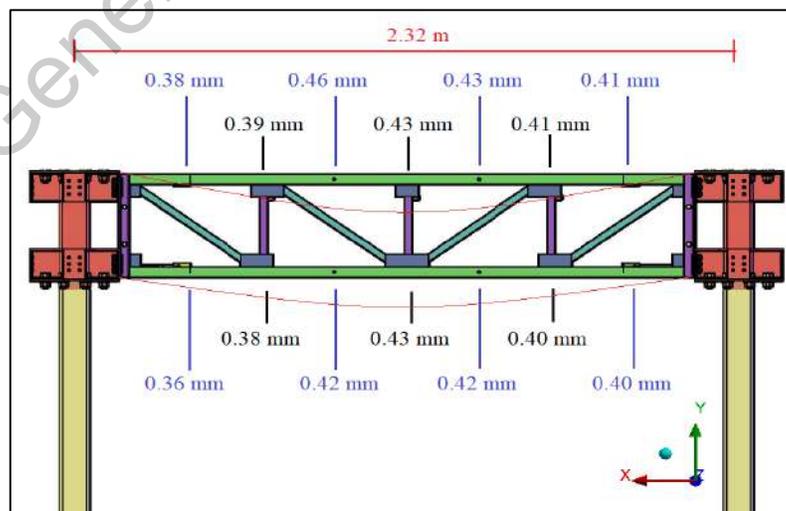


Figura 156. Deflexiones verticales en $-Y$ de una armadura con claro de 2.32 m, ubicada en el entrepiso de 2do nivel colindante con cubierta de 1er nivel bajo la combinación de servicio S17, la más desfavorable.

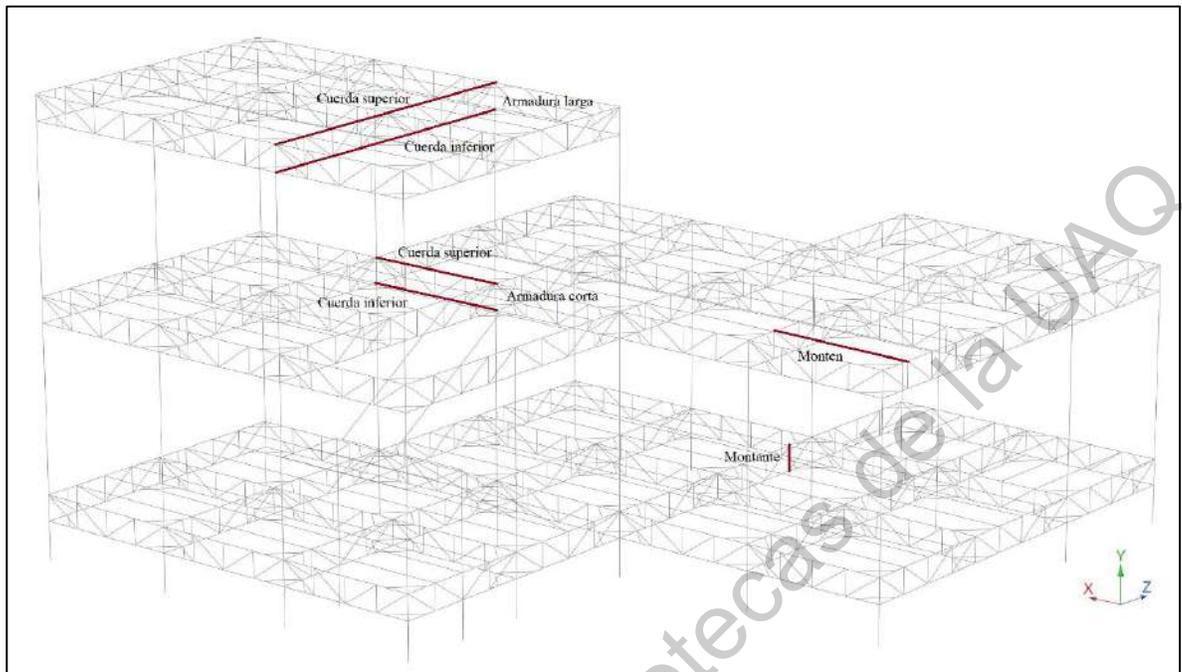


Figura 157. Ubicación de los elementos con las deflexiones analizadas.

Las deflexiones presentadas en los elementos se compararon con las deflexiones permisibles por las Normas Técnicas Complementarias (tabla 69). En este caso se encontraron 2 de los 4 posibles casos: donde la longitud del elemento es menor a 3.50 m y también donde es mayor que dicha longitud, ambos casos cuando afectan a elementos no-estructurales (NTC, 2017).

Tabla 69. Deflexiones permisibles (NTC, 2017).

Longitud del claro	Cuando se afectan elementos	
	Estructurales	No-estructurales
$L < 3.50 \text{ m}$	$\frac{L}{240}$	$\frac{L}{480}$
$L > 3.50 \text{ m}$	$\frac{L}{240} + 5 \text{ mm}$	$\frac{L}{480} + 3 \text{ mm}$

Se revisaron las deflexiones de algunos de los elementos más esforzados en la estructura bajo su combinación de carga de servicio más demandante (figura 157). Las deflexiones presentadas fueron comparadas con las permisibles del reglamento correspondiente, resultando dentro del rango aceptable, por lo tanto, el dimensionamiento de dichos elementos es el correcto (tabla 70).

Tabla 70. Deflexiones presentadas y permisibles de los elementos analizados bajo condiciones de servicio.

Elemento			Longitud del elemento (cm)	Comb.	Eje local	Sentido	Deflexión		R	Resultado
Nombre	Perfil	Número					Presentada (mm)	Permisible (mm)		
Armadura larga cuerda superior	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	2197, 2196, 2195, 2194, 2193, 2192, 2191, 2190	464	S17	2'	Vertical (-Y)	2.38	12.667	0.18	Acceptable ✓✓
	2T LI 1_1/2" x 1/8"			S17	3'	Lateral (X)	7.96	12.667	0.62	Acceptable ✓✓
Armadura larga cuerda inferior	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143	464	S17	2'	Vertical (-Y)	2.74	12.667	0.21	Acceptable ✓✓
	2T LI 1_1/2" x 1/8"			S17	3'	Lateral (X)	7.92	12.667	0.62	Acceptable ✓✓
Armadura corta cuerda superior	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	1026, 1025, 1024, 1023	232	S17	2'	Vertical (-Y)	0.46	4.833	0.09	Acceptable ✓✓
	2T LI 1_1/2" x 1/8"			S17	3'	Lateral (-Z)	3.47	4.833	0.71	Acceptable ✓✓
Armadura corta cuerda inferior	2T LI 1_1/2" x 1_1/2" x 1/8"	973, 974, 975, 976	232	S17	2'	Vertical (-Y)	2.74	4.833	0.56	Acceptable ✓✓
	2T LI 1_1/2" x 1/8"			S17	3'	Lateral (-Z)	3.49	4.833	0.72	Acceptable ✓✓
Monten	4 MT 16	1913	232	S2	2'	Vertical (-Y)	3.77	4.833	0.78	Acceptable ✓✓
				S19	3'	Lateral (-Z)	3.91	4.833	0.80	Acceptable ✓✓
Montante	2T LI 1" x 1" x 1/8"	1268	40	S6	2'	Lateral (Z)	0.79	0.833	0.94	Acceptable ✓✓
	2T LI 1" x 1" x 1/8"			S14	3'	Lateral (-X)	0.82	0.833	0.98	Acceptable ✓✓

7.1.4 Desplazamiento de los nodos

Se identificaron los desplazamientos nodales más importantes en la estructura bajo condiciones de servicio tanto en la dirección X como en la Z (figura 158), dichos desplazamientos se ubicaron en nodos de la cubierta de segundo nivel y fueron producto de las combinaciones de servicio S16 y S17 las cuales involucran acciones de sismo (tabla 71).

Tabla 71. Máximos desplazamientos nodales en la estructura bajo condiciones de servicio.

Nodo	Dirección	Combinación	Desplazamiento
			(mm)
1217	X	S16	11.32
1218			11.28
1296			11.27
1351	Z	S17	15.39
1354			15.17
1352			15.08

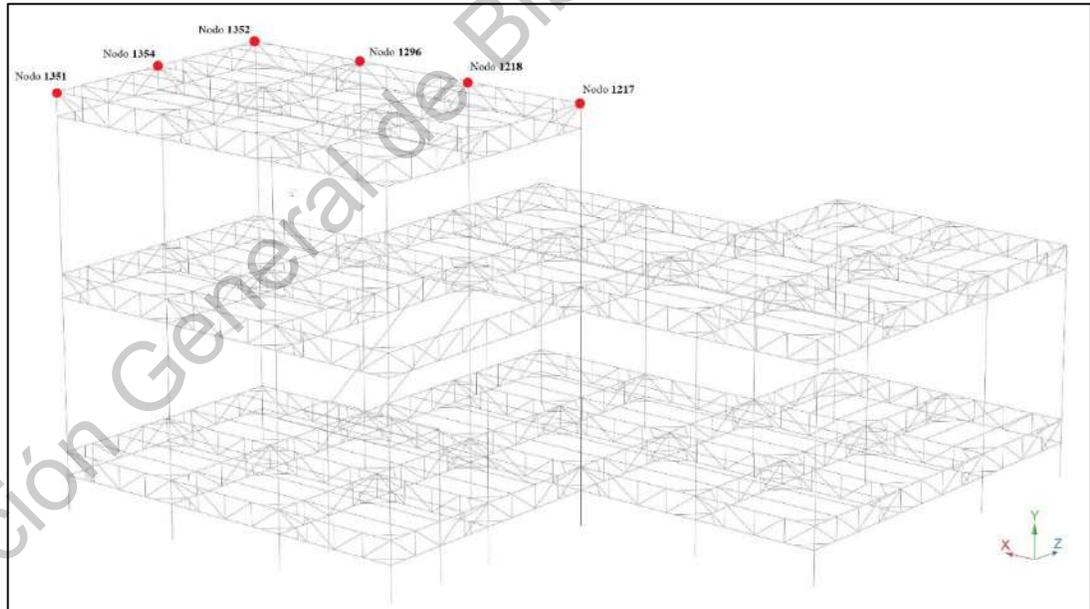


Figura 158. Ubicación de los nodos con los máximos desplazamientos laterales.

7.1.5 Distorsiones angulares

Las distorsiones angulares son un valor adimensional que relaciona el desplazamiento horizontal relativo entre dos nodos del mismo eje vertical con la distancia vertical que los separa (figura 159), dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Distorsión angular (D.A.)} = \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{h_i} \quad (76)$$

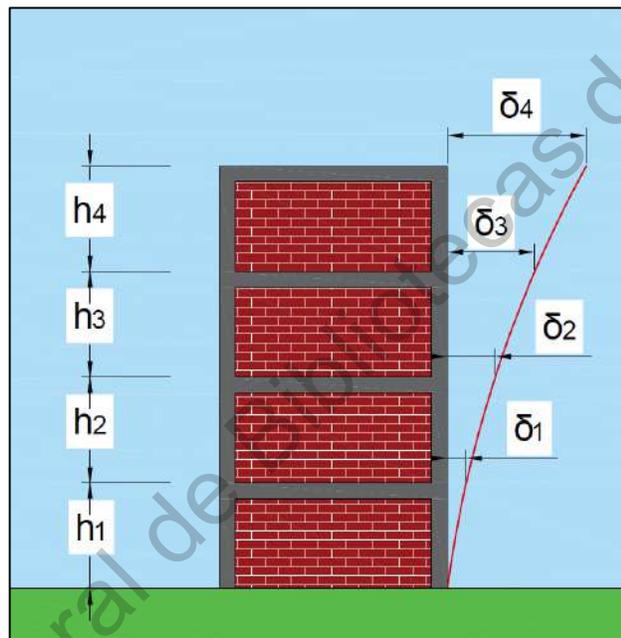


Figura 159. Representación de las distorsiones angulares por entrepiso en un edificio.

De acuerdo con el manual de diseño sísmico de la CFE (CFE-Sismo, 2015), así como con las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo (NTC-Sismo, 2020), la distorsión angular permisible para este tipo de estructura es de 0.015, con ductilidad $Q=2$.

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por viento (NTC-Viento, 2017), la distorsión angular permisible es de 0.005.

Se identificó la columna con mayor desplazamiento en condiciones de servicio cuando está bajo los efectos de sismo y otra cuando está bajo los efectos de viento (figura 160). Se calcularon las distorsiones angulares para cada caso, las cuales se compararon con las distorsiones permisibles de los reglamentos respectivos (tablas 72 y 73).

Tabla 72. Distorsiones angulares de los nodos de la columna 1, la más desplazada debido a cargas sísmicas bajo condiciones de servicio con la combinación S17 en sentido -Z.

Columna	Nodo	Altura total desde el suelo H (cm)	Altura entre nodo y nodo Δh_i (cm)	Desplazamiento		Distorsión angular			Resultado
				Total	Relativo	Calculada	Permisible	R	
				δ_i (cm)	$\delta_{i+1} - \delta_i$ (cm)				
1	642	0	0	0	-	-	-	-	
	646	100	100	0.0680	0.0680	0.000680	0.015	0.045	Aceptable ✓ ✓
	702	400	300	0.9235	0.8555	0.002852	0.015	0.190	Aceptable ✓ ✓
	1351	700	300	0.9349	0.0114	0.000038	0.015	0.003	Aceptable ✓ ✓

Tabla 73. Distorsiones angulares de los nodos de la columna 2, la más desplazada debido a cargas de viento bajo condiciones de servicio con la combinación S15 en sentido -Z.

Columna	Nodo	Altura total desde el suelo H (cm)	Altura entre nodo y nodo Δh_i (cm)	Desplazamiento		Distorsión angular			Resultado
				Total	Relativo	Calculada	Permisible	R	
				δ_i (cm)	$\delta_{i+1} - \delta_i$ (cm)				
2	643	0	0	0	-	-	-	-	
	647	100	100	0.3705	0.3705	0.003705	0.005	0.741	Aceptable ✓ ✓
	703	400	300	1.8693	1.4988	0.004996	0.005	0.999	Aceptable ✓ ✓
	1353	700	300	2.5446	0.6753	0.002251	0.005	0.450	Aceptable ✓ ✓

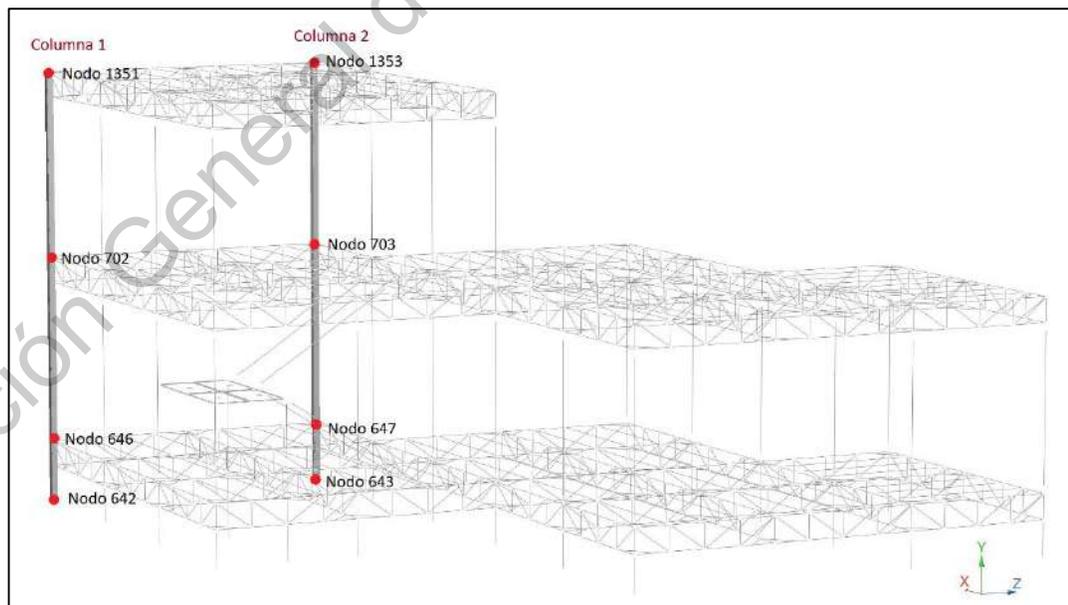


Figura 160. Ubicación de las columnas que se revisaron las distorsiones angulares, las cuales cuentan con los máximos desplazamientos nodales: la columna 1 sujeta a acciones sísmicas con la combinación S17 y la columna 2 con acciones de viento con la combinación S15, ambas bajo condiciones de servicio.

7.1.6 Análisis de vibraciones de entrepiso

7.1.6.1 Criterio por aceleración máxima permisible

La frecuencia natural del sistema de entrepiso del segundo nivel de la vivienda resultó con un valor de $f_n = 11.86$ Hz, lo cual resulta aceptable para el tipo de estructura, ya que valores de entre 2 y 6 Hz pudieran resultar armónicos con las actividades humanas, evitando que el sistema pudiera entrar en resonancia con el paso de las personas (NTC-Acero, 2020).

El valor de la aceleración debido a vibraciones en el entrepiso con una fuerza perturbadora de 60 kgf (588.40 N) (que simula el peso de una persona caminando) fue de $a_p = 0.491\%$ de la gravedad, g ; lo cual resulta aceptable, ya que para el tipo de uso de vivienda, el valor de la aceleración de las vibraciones debe resultar menor al 0.5% de g , para que la percepción de confort sea agradable, de acuerdo a los límites recomendables de vibración vertical para la caminata (Allen, 1993).

Cabe mencionar que el valor permisible de aceleración no se limita a 0.5% de g , sino que, de acuerdo a la gráfica de límites permisibles de aceleración, es según el tipo de uso de la estructura y en función de su frecuencia fundamental. En este caso en particular con un valor de eigenfrecuencia de $f_n=11.86$ Hz, el límite permisible es de 0.65% de g , por lo que es posible emplear una fuerza perturbadora más grande que la realizada en el cálculo (persona con peso de 60 kgf) sin afectar la percepción de confort de sus ocupantes.

Para este caso particular, el peso máximo que un individuo puede tener para que no se altere la percepción de confort en el entrepiso debido a la vibración causada por su caminar, está dado por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\left(\frac{a_o}{g}\right)(\beta)(w)}{(0.83)(R)[e^{(-0.35)(f_n)}]} \quad (77)$$

$$Q = \frac{(0.0065)(0.03)(2,658.11 \text{ kgf})}{(0.83)(0.5)[e^{(-0.35)(11.86)}]} = 79.33 \text{ kgf}$$

Por lo tanto, cualquier persona caminando sobre el entrepiso con un peso igual o menor de 79.33 kgf (777.96 N), no perturbaría la sensación de confort en la mayoría de los individuos debido a la vibración que ésta causaría por su movimiento (tabla 74).

Tabla 74. Resultados del análisis de vibraciones del entrepiso con el criterio de la aceleración.

Frecuencia natural del entrepiso.	11.86 Hz
Amortiguamiento del entrepiso.	3%
Peso del entrepiso.	2,658.91 kgf (26.08 kN)
Aceleración del entrepiso (con persona con 60 kgf de peso, con 3% de amortiguamiento y 2,658.11 kgf de peso del entrepiso).	0.491% de g
Límite permisible de aceleración en el entrepiso (11.86 Hz).	0.65% de g
Peso máximo de un individuo para no perder la sensación de confort al caminar con una aceleración máxima permisible de $a_0=0.65\%$ de g.	79.33 kgf (777.96 N)
frecuencia natural de la caminata de un individuo (NTC-Acero, 2020).	Entre 2 y 6 Hz
Resonancia en el entrepiso debido a caminata.	No

Los resultados de vibración con el criterio de la aceleración como porcentaje de la gravedad son aceptables bajo la condición que el peso de un individuo sea igual o menor que 79.33 kgf (777.96 N). En caso de que una persona supere un poco dicho peso, la sensación de confort no debiera afectarse en gran medida; recordando que dichos límites permisibles están basados en la percepción de la mayoría de las personas, pero la sensación particular entre cada individuo puede variar.

7.1.6.2 Criterio por el método de OS-RSM₉₀

Los resultados arrojan un valor de amortiguamiento del sistema de entrepiso del 3%, con una frecuencia de $f_n=11.86$ Hz y una la masa modal de 1,329.43 kgf (13.04 kN).

Los resultados con este criterio de OS-RSM₉₀ son adecuados, ya que indican que la sensación de vibración es aceptable para un entrepiso cuyo uso es vivienda, debido a que se obtuvo un resultado aproximado de OS-RMS=2.8 mm/s, clasificado como D, de acuerdo a la tabla de clasificación de las respuestas recomendables de entrepiso ante vibraciones (ISO-10137, 2007).

7.2 Modelación de la conexión universal en ANSYS

7.2.1 Esfuerzos

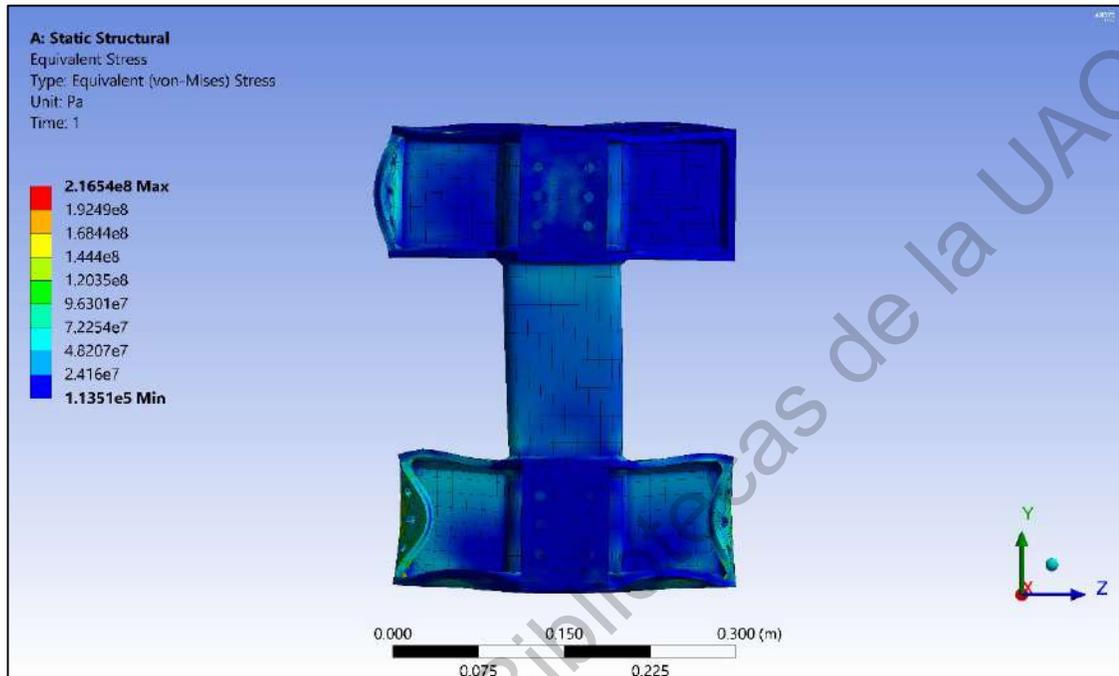


Figura 161. Modelación de los esfuerzos en la conexión universal H-1 en ANSYS. Vista lateral.

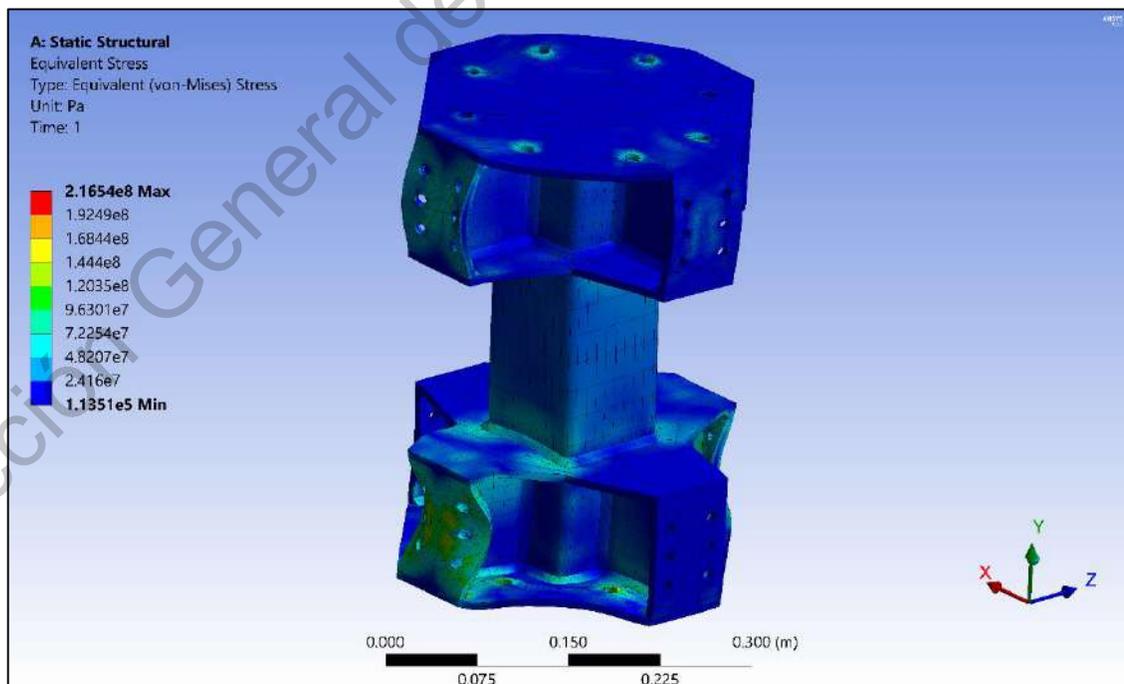


Figura 162. Modelación de los esfuerzos en la conexión universal H-1 en ANSYS. Vista isométrica.

Al modelo de la conexión universal H-1 en ANSYS se le sometió bajo 57 esfuerzos diferentes en distintas direcciones, sentidos y ángulos, se contemplaron fuerzas axiales, cortantes y momentos en dos direcciones, obtenidos del cálculo estructural de la vivienda en RAM Elements de la conexión más esforzada y bajo la combinación de carga de diseño más desfavorable para dichos elementos, y se colocaron las restricciones de movimiento correspondientes en los extremos verticales de la conexión (figuras 161 y 162).

Derivado de la aplicación de dichas acciones, se realizó el cálculo computacional en ANSYS, de esta manera se obtuvieron los esfuerzos internos que la conexión universal está sometida, de éstos, en la tabla se muestran los esfuerzos máximos focalizados en puntos específicos, así como la relación demanda/capacidad de los mismos (tabla 75).

Cabe señalar que los esfuerzos máximos a los cuales los elementos de la conexión universal están sometidos (tabla 75) son únicamente en puntos muy focalizados, es decir, que esos esfuerzos no están presentes en todo el elemento, sino en una pequeña área; por lo que en la mayor parte de los elementos se presentan esfuerzos que van desde 0.1351 MPa (1.38 kgf/cm²), hasta llegar a los 45 MPa (459 kgf/cm²), contando principalmente con esfuerzos con bajos valores.

Tabla 75. Resultados sobre los máximos esfuerzos focalizados de la conexión universal H-1.

Elemento de la conexión universal H-1	Ubicación focalizada del máximo esfuerzo	Esfuerzo de fluencia		Esfuerzo máximo sometido de la conexión universal H-1		Relación demanda / capacidad	Diseño
		(MPa)	(kgf/cm ²)	(MPa)	(kgf/cm ²)	(%)	
PTR 4"x4"x3/16"	Cerca de placas diafragma	315	3,235	50	510	15.8	Aceptable ✓✓
Placas diafragma	Cerca de PTR	250	2,530	70	714	28.2	Aceptable ✓✓
Placas interiores	Cerca de placas laterales (agujereadas)	250	2,530	60	612	24.2	Aceptable ✓✓
Placas laterales (agujereadas)	En el centro de la placa, cerca de agujeros	250	2,530	150	1,530	60.5	Aceptable ✓✓
Placas tapa	Alrededor de agujeros	250	2,530	216	2,200	87.0	Aceptable ✓✓
Soldaduras	Cerca de placa tapa	480	4,920	85	867	17.6	Aceptable ✓✓

El perfil tipo PTR al tener un acero A500 Grado B que cuenta con un esfuerzo de fluencia de 315 MPa (3,235 kgf/cm²) y al estar sometido a un esfuerzo máximo de 50 MPa (510 kgf/cm²), trabaja en su punto más esforzado al 15.8% de su capacidad en el rango elástico.

Las placas diafragma al tener un acero A-36 que cuentan con un esfuerzo de fluencia de 250 MPa (2,530 kgf/cm²) y al estar sometidas a un esfuerzo máximo de 70 MPa (714 kgf/cm²), trabajan en su punto más esforzado al 28.2% de su capacidad en el rango elástico.

Las placas interiores al tener un acero A-36 que cuentan con un esfuerzo de fluencia de 250 MPa (2,530 kgf/cm²) y al estar sometidas a un esfuerzo máximo de 60 MPa (612 kgf/cm²), trabajan en su punto más esforzado al 24.2% de su capacidad en el rango elástico.

Las placas laterales agujereadas al tener un acero A-36 que cuentan con un esfuerzo de fluencia de 250 MPa (2,530 kgf/cm²) y al estar sometidas a un esfuerzo máximo de 150 MPa (1,530 kgf/cm²), trabajan en su punto más esforzado al 60.5% de su capacidad en el rango elástico.

Las placas tapa al tener un acero A-36 que cuentan con un esfuerzo de fluencia de 250 MPa (2,530 kgf/cm²) y al estar sometidas a un esfuerzo máximo de 216 MPa (2,200 kgf/cm²), trabajan en su punto más esforzado al 87.0% de su capacidad en el rango elástico.

Las soldaduras al tener un acero cuyo electrodo es E_7018 que cuentan con un esfuerzo de fluencia de 480 MPa (4,920 kgf/cm²) y al estar sometidas a un esfuerzo máximo de 85 MPa (867 kgf/cm²), trabajan en su punto más esforzado al 17.6% de su capacidad en el rango elástico.

Resulta que la conexión universal H-1 está bien diseñada estructuralmente, ya que ninguno de los esfuerzos máximos focalizados es capaz de superar el límite elástico del material, incluso en la condición más desfavorable de la estructura que es la combinación de carga de diseño D11 (que es de sismo) y en la conexión universal más esforzada de las 57 conexiones de la estructura de la vivienda.

7.2.2 Deformaciones

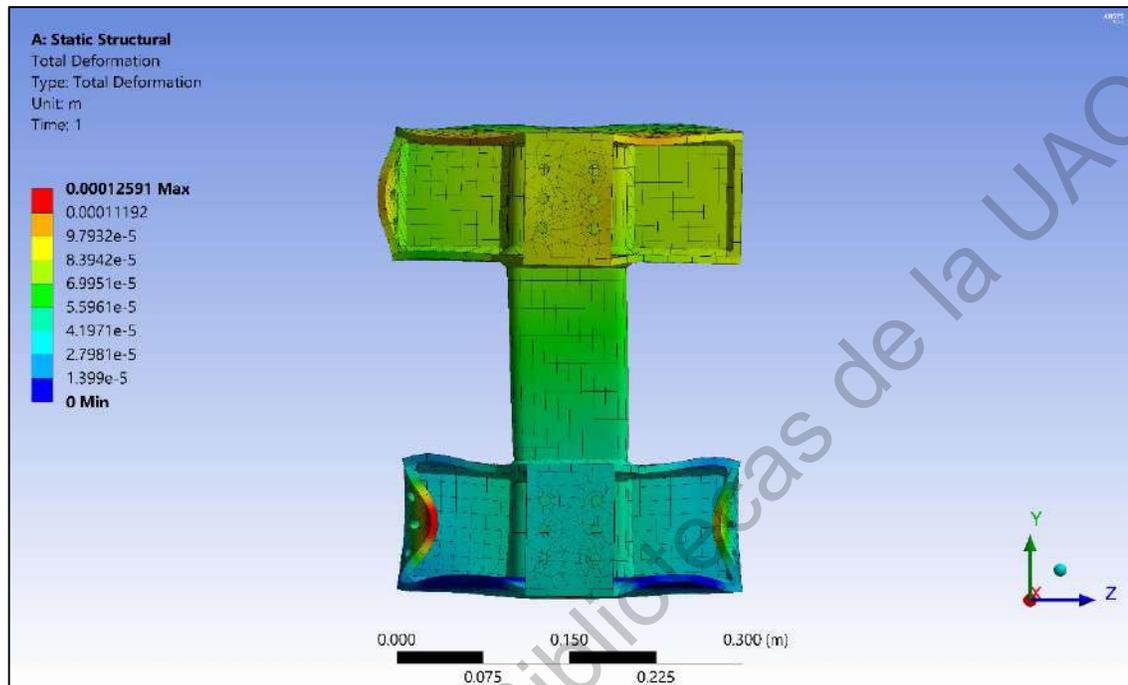


Figura 163. Modelación de deformaciones en la conexión universal H-1 en ANSYS. Vista lateral.

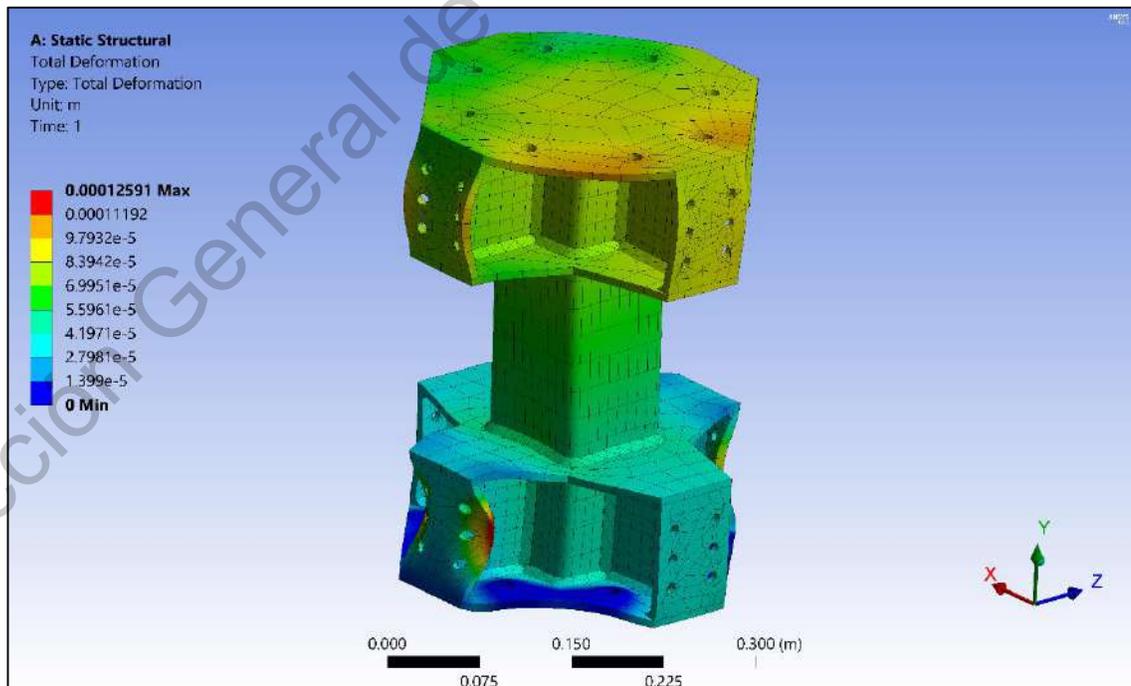


Figura 164. Modelación de deformaciones en la conexión universal H-1 en ANSYS. Vista isométrica.

Las deformaciones en la conexión universal H-1 son muy bajas ya que se presentan en un rango de entre 0.01399 mm y 0.12591 mm, lo cual significa que la conexión se mantiene casi indeformable, y siempre se encuentra en el rango elástico.

Debido a que los esfuerzos en la conexión están en el rango elástico, el comportamiento de sus deformaciones es lineal, de esta manera los elementos de la conexión pueden reconfigurarse para regresar a su forma y ubicación original una vez que se deja de transmitir esfuerzos de otros elementos hacia la conexión.

La deformación en conexión universal en el plano Z-Y, se puede apreciar claramente que las placas agujereadas laterales del lado izquierdo presentan una importante deformación relativa respecto a otras zonas de la conexión, esto debido al valor del momento que transfiere la armadura a dichas placas, el cual es mayor que en las otras armaduras. Se aprecia que la placa inferior se deforma hacia el interior de la conexión con una tendencia hacia arriba, y la placa superior se deforma hacia el exterior con una tendencia hacia abajo. Tal movimiento de placas es el esperado, ya que, si una armadura está conectada a dos placas separadas, se esperaría que ambas se deformaran en direcciones opuestas (figuras 163 y 164).

Se aprecia que la placa diafragma superior sí cumple con la función de transmitir esfuerzos las otras placas de la conexión, principalmente momentos; así como rigidizar los extremos de las placas laterales para que éstas no presenten deformaciones importantes. En cuanto al perfil PTR sus deformaciones más grandes es en la zona superior de la misma, ya que es la que está más expuesta a los esfuerzos de la columna superior.

La placa tapa superior que colinda con columna recibe grandes esfuerzos comparados con las placas laterales ya que sobre ella inciden los esfuerzos de carga axial, cortantes y momentos de la columna superior. Dichos esfuerzos provocan que ésta se deforme principalmente alrededor de los orificios.

La deformación en la conexión universal es adecuada y la esperada, ya que no representa con deformaciones importantes, puesto que los valores de los esfuerzos máximos están dentro del rango elástico, y no afecta a otros elementos de la estructura.

7.3 Alcances

7.3.1 Conexión universal H-1

7.3.1.1 Dimensionamiento de la conexión universal H-1

La conexión universal H-1 se diseñó con las dimensiones necesarias para resistir las capacidades demandadas de diseño y servicio bajo la configuración de la «*Casa Solar Experimental*» aplicando el sistema modular M-10, contando con una capacidad sobrada para resistir sus cargas; mas no excluye la posibilidad de robustecer los elementos que la componen dado el caso que se requiera mayor capacidad para resistir esfuerzos con otra configuración geométrica de la vivienda que le pudiera resultar más desfavorable.

Por lo que, en la medida que se requiera y bajo un previo cálculo y diseño estructural, los espesores del perfil PTR y las placas que componen a la conexión universal, pueden incrementarse y la dimensión de la garganta efectiva de las soldaduras aumentarse, así como optar por tornillos con un mayor grado de resistencia.

7.3.1.2 Configuraciones y adaptabilidad

La conexión universal H-1 tiene una gran capacidad adaptativa según la disposición de módulos que se conecten a ésta; ya que, bajo una configuración básica, puede acoplarse en 63 combinaciones diferentes (con 2 columnas y 4 sistemas de armaduras dobles).

A la vez, la conexión universal H-1 puede adaptarse bajo configuraciones compuestas de conexiones universales; éstas pudieran ser, por ejemplo, columnas dobles o columnas cuádruples, las cuales se conectan de esta manera bajo el requerimiento de soportar mayores esfuerzos tanto verticales como horizontales. El empleo de configuraciones compuestas de la conexión universal H-1 pudiera ser recomendable para estructuras de varios niveles o para aquellas que en su caso se requieran rigidizar más la estructura.

7.3.2 Sistema modular M-10

7.3.2.1 Dimensionamiento de los elementos del sistema modular M-10

El dimensionamiento de los elementos del sistema modular M-10 presentado en este trabajo, son propios del caso de estudio; pero no es excluyente de la posibilidad de robustecerlo en caso de ser necesario bajo una posible mayor intensidad de esfuerzos que le demanden mayor capacidad a la estructura. Estos casos pudieran ser cuando:

- La presión de viento sea mayor que la usada en este estudio.
- La aceleración del terreno sea mayor que la usada en este estudio.
- Un uso distinto a vivienda que le demanden mayor capacidad de carga a los elementos.
- Bajo una configuración de módulos en particular que le sea desfavorable, como una geometría alargada o geometría atípica.

7.3.2.2 Configuraciones geométricas del sistema modular M-10

Las configuraciones en que un módulo puede ser acoplado en conjunto con otros módulos utilizando el sistema modular M-10 son muy variadas debido a su gran versatilidad y capacidad adaptativa.

Por lo tanto, su alcance para configurar geoméricamente una edificación, es casi ilimitado, sólo restringiéndose a la capacidad de los elementos dado por el dimensionamiento de los mismos. Es decir, en caso que las condiciones no sean favorables para la estructura, no es preciso cambiar el diseño del sistema modular M-10, sino sólo cambiar el calibre de los elementos que sean necesarios, bajo un previo cálculo y análisis estructural que lo avale.

7.3.3 Caso de estudio: Vivienda modular prefabricada basada en la Casa Solar Experimental.

Si bien el sistema modular M-10 con la integración de conexiones universales H-1 puede implementarse ampliamente en diversas configuraciones de estructuras, el caso de estudio específico de este trabajo está basado con las características de la «Casa Solar

Experimental», por lo que tanto el cálculo estructural, como el diseño estructural realizado y sus resultados, sólo corresponden a dicha vivienda bajo sus condiciones específicas.

Los resultados de este trabajo no se pueden generalizar a otras estructuras, ya que la «*Casa Solar Experimental*» cuenta con una configuración geométrica única en el número de niveles y una distribución de sus módulos específica; también debido a que en su ubicación geográfica existen condiciones meteorológicas específicas en las que se basó el diseño por viento; así como también, condiciones geológicas propias de la región, en las cuales se basó el diseño por sismo.

Dadas estas condiciones únicas, el dimensionamiento de los elementos del sistema modular M-10 y las conexiones universales H-1 implementadas y basadas en la «*Casa Solar Experimental*», no puede ser aplicado ampliamente bajo otras condiciones desfavorables; con excepción en las que las condiciones geológicas y meteorológicas de su ubicación y geométricas de su configuración, fuesen más favorables que en este caso de estudio; es decir, que la presión del viento y la aceleración del terreno sean menores; cualquier otro caso que resultara desfavorable, tendría que ser estudiado bajo las condiciones propias del mismo y determinarse si las mismas dimensiones de los elementos empleados en la CSE son aplicables a dicho caso.

Es recomendable instalar la vivienda en un terreno plano con superficie de concreto o asfalto. No es recomendable instalarla en un terreno natural debido a que éste pudiera presentar humedad, ya que la humedad puede disminuir la capacidad al esfuerzo cortante del suelo, de esta manera no se garantiza una estabilidad de la estructura; aunque podría instalarse en terreno seco con capacidad de carga mayor que 10 t/m².

La «*Casa Solar Experimental*» fue diseñada para el «*Solar Decathlon*», y siguiendo ese mismo enfoque y con la aspiración de participar en dicha competencia internacional, se propone una vivienda temporal con las mismas características geométricas y de diseño arquitectónico, pero con un mejorado sistema estructural, a través de un sistema modular M-10 multi-adaptable con la integración de conexiones universales H-1, lo que le da a la vivienda la capacidad de ser construida y desmontada de manera práctica y rápida.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Sistema modular M-10

El sistema modular M-10 sí cumple con la característica de ser multi-adaptable, puesto que se pueden incorporar módulos en diversas disposiciones, creando configuraciones geométricas casi ilimitadas para una edificación.

El sistema modular M-10 no sólo se puede aplicar a viviendas, sino también a otras estructuras con diversos tipos de usos, con diferentes configuraciones geométricas.

Este sistema modular tiene la capacidad de transformar un espacio bajo una disposición geométrica a otra diferente en cualquier momento que se desee, ya que no requiere mano de obra especializada para su instalación, puesto que sus componentes son ligeros, armables y desarmables de manera atornillada.

Puede ser montado de 3 maneras distintas: pieza por pieza, módulo por módulo o entrepiso por entrepiso; siendo muy versátil la manera en que puede ser construido y además en un tiempo muy rápido.

El sistema modular M-10 —que cuenta con la incorporación de conexiones universales H-1— representa un parteaguas mundial para los sistemas modulares multi-adaptables debido a sus características en comparación con otros, puesto que sus módulos enteros se pueden incorporar o desacoplar de manera vertical e independiente, sin afectar a sus módulos contiguos, con la característica particular de no incorporar más columnas en sus vértices, algo que no había sido logrado con otros sistemas modulares similares.

Este sistema modular es muy práctico de usar debido a que sus componentes son desarmables y ligeros para transportar, además, al no contar con una cimentación enterrada es capaz de adaptarse a diversas superficies, las cuales se recomienda sean planas como alguna explanada de concreto o asfalto.

8.2 Conexión universal H-1

La conexión universal H-1 es multi-adaptable, puede conectarse con diversos miembros bajo 63 configuraciones básicas, cumpliendo la hipótesis, por lo que al implementarla en el sistema modular M-10, su montaje y desmontaje es muy rápido y práctico.

Dicha conexión es eficiente desde la perspectiva geométrica, ya que no interfiere físicamente con la incorporación de otros elementos, como muros, ventanas, puertas, instalaciones o sistemas de entrepiso o techumbre, por lo que la convierte en un elemento muy versátil con dimensiones prácticas.

La conexión universal H-1 diseñada es segura estructuralmente, ya que los esfuerzos que ésta soporta bajo las condiciones más desfavorables se encuentran dentro del rango elástico de los materiales, por lo tanto, las deformaciones que presenta —que son despreciables— vuelven a su lugar de origen después de la aplicación de la carga. La conexión no presenta falla y puede soportar esfuerzos mayores que las del caso de estudio.

Una única conexión para los nodos columna-trabe hace que la fabricación de dichas piezas sea más práctica y rápida que si se hubiesen considerado distintos tipos de conexión.

Las dimensiones de la conexión universal H-1 no se limitan al caso de estudio, pueden tener medidas más robustas, pero siempre respetando el mismo diseño y configuración.

Posteriormente se pudieran realizar ensayos físicos de laboratorio a la conexión universal H-1 para someterla a los máximos esfuerzos de su capacidad.

También se podría generar la construcción de una estructura física experimental con la cual se puedan valorar sus capacidades de multi-adaptabilidad y rapidez en su instalación.

La conexión universal H-1 tiene mucho futuro ya que trabajando junto con el sistema modular M-10, pueden crear edificaciones que se construyan en tiempos muy cortos, para uso de habitacional, de oficina, comercio o instalaciones de servicios de salud urgentes, etc.

9 REFERENCIAS

- Adfer Dezne. 2015. VIMO: Casas Modulares Prefabricadas. Is-ARQuitectura. <https://blog.is-arquitectura.es/2015/11/27/vimob-casas-modulares-prefabricadas/>.
- Allen, D.E. y Murray T.M. 1993. Design Criterion for Vibrations Due to Walking. Engineering Journal. American Institute of Steel Constructions.
- AISC. 2016. Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago, United States of America.
- AISC-SDG-11. 2016. Steel Design Guide: Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity. American Institute of Steel Construction.
- Álvarez Sánchez Pedro Antonio. 2017. Diseño de un Sistema Estructural Ligero, Prefabricable, Modulable y Desmontable para el Soporte de una Vivienda Sustentable. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
- Alter Lloyd. 2013. A Closer Look at Broad's Hotels that were Built in Days, no months. Treehugger. Available from: <https://www.treehugger.com/green-architecture/close-look-broad-sustainable-buildings-prefab-hotels.html>.
- ArcelorMittal. 2008. Design Guide for Floor Vibrations. ArcelorMittal Europe - Long Products Sections and Merchant Bars.
- ASCE. 2017. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers. Structural Engineering Institute Virginia, United States of America. ISBN 9780784414248.
- BSB. 2012. BSB Technology. Broad Sustainable Building. Available from: <http://en.broad.com/ProductShow-6.aspx>.

- CFE-Viento. 2008. Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento. Comisión Federal de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Ciudad de México, México.
- CFE-Sismo. 2015. Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo. Comisión Federal de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Ciudad de México, México.
- Escalante Valdivia Jorge Armando. 2017. Diseño de Estructuras de Acero Ligeras, Prefabricadas, Desmontables y Modulares en Casa Habitación. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
- García Zamora Germán. 2017. Análisis y Diseño de Conexiones para una Estructura de Acero tipo Vivienda Sustentable, Prefabricable, Modular y Desmontable. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
- García-Badell Guillermo. 2017 Habitat 67: El Regreso al Futuro (de la Arquitectura). The New York Times Style Magazine: Spain. Montreal, Canada. Available from: <https://www.tmagazine.es/disenio/habitat-67/>.
- Gorgolewski M. T, Grubb. P. J, and Lawson R. M. 2001. Modular Construction Using Light Steel Framing. The Steel Construction Institute. Londres, Inglaterra. ISBN 1 85942 122 9.
- Gunawardena Tharaka. 2016. Behavior of Prefabricated Modular Buildings Subjected to Loads. The University of Melbourne. Melbourne, Australia. ORCID: 0000-00016958-1470.
- Hernández Barrios Hugo. 2015. Vibración Vertical de Tableros de Losa de Entrepiso Comunmente Empleadas en México. XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Acapulco, Gro., México.

- Hilgers Lauren. 2012. Meet the Man Who Built a 30-Story Building in 15 Days. The Structural Engineering: An Art. Available from: <https://ztwocents.wordpress.com/2012/10/02/meet-the-man-who-built-a-30-story-building-in-15-days/>.
- HIVOSS. 2008. Guideline: Vibration Design of Floors. Human Induced Vibrations of Steel Structures.
- IMCA. 2014. Manual de Construcción en Acero. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero. 5ta Edición. Editorial Limusa.
- ISO-10137. 2007. Bases for Design of Structures - Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations. International Standard Organization.
- Kelsey Thomas. 2015. The Solar Decathlon Village. Solar Decathlon at the Orange Country Great Park. U.S. Department of Energy. California, United States of America. Available from: <https://www.solardecathlon.gov/2015/photos-daily.html>.
- Kyung-Suk Choi and 2015. An Analytical Study on Rotational Capacity of Beam-Column Joints in Unit Modular Frames. World Academy of Science Engineering and Technology. International Journal of Structural and Construction Engineering. Vol:9, No:2. 100-103. ISNI: 0000000091950263.
- Lawson. 2006. Hybrid System in Light Steel and Modular Construction. International Conference on Adaptable Buildings Structures 2006. Eindhoven, The Netherlands.
- Lee Jason. 2012. Meet the Man Who Built a 30-Story Building in 15 Days. The Structural Engineering: An Art. Available from: <https://ztwocents.wordpress.com/2012/10/02/meet-the-man-who-built-a-30-story-building-in-15-days/>.
- McCormac Jack. C and Csernak Stephen F. 2013. Diseño de Estructuras de Acero. Editorial Alfaomega. Quinta Edición.

- NSM-1. 2016. Vestuarios Ciudad Deportiva Tafalla. Nuevo Sistema Modular. Publicado en:
<https://www.nuevosistemamodular.com/vestuarios-ciudad-deportiva-tafalla>.
- NSM-2. 2016. NSM: 6 Edificios en 2 Meses. Nuevo Sistema Modular. Publicado en:
<https://www.nuevosistemamodular.com/nsm-6-edificios-en-2-meses>.
- NTA. 2019. Portable Iron Houses. National Trust of Australia. Available from:
<https://www.nationaltrust.org.au/places/portable-iron-houses/>.
- NTC-Acero. 2020. Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Acero con Comentarios, de la Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. No. 381 Bis.
- NTC-RSEE. 2017. Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones, de la Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. No. 220 Bis.
- NTC-Sismo. 2020. Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo con Comentarios, de la Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. No. 361 Bis.
- NTC-Viento. 2017. Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo, de la Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. No. 220 Bis.
- OEPM, Ohnherser Oliver. 2018. Elemento Estructural Portador de un Suelo para una Armadura Metálica de Estacionamiento de Vehículos Evolutiva. Oficina Española de Patentes y Marcas. España. Patente: 2 683 888.
- Ovando. 2015. Criterios Técnicos del Proyecto con Módulos Tridimensionales Ligeros: las Casas del Solar Decathlon 2005 y 2007. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

RCMQ. 2004. Reglamento de Construcción del Municipio de Querétaro. La Sombra de Arteaga. Querétaro, México.

Rodríguez Abelardo 2019. Colegio de Ingenieros Devela Escultura Didáctica que Muestra Elementos Estructurales. Códice Informativo Querétaro, México. Publicado en: <https://codiceinformativo.com/2019/01/colegio-de-ingenieros-devela-escultura-didactica-que-muestra-elementos-estructurales/>.

Ruiz Sandoval Hernández Manuel, de los Cobos Vasconcelos Gabriel, Hidalgo Sánchez Jovvani Javier y Oseguera Ramírez Ulises. 2009. Diseño y Construcción de una Armadura Tridimensional para Docencia. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Puebla, México.

Saidi Ibrahim. 2012. Development of a Viscoelastic Tuned Mass Damper to Reduce Walking Induced Vibrations in Building Floors. Faculty of Engineering and Industrial Sciences. Swinburne University of Technology.

Schroeder Dennis. 2017. Swiss Team: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, School of Engineering and Architecture Fribourg, Geneva University of Art and Design, and the University of Fribourg. U.S. Department of Energy. Denver, United States of America. Available from: <https://www.solardecathlon.gov/2017/photos-gallery-switzerland.html>.

Sheldon Noah. 2012. Changsha. Noahsheldon. Available from: <http://www.noahsheldon.com/feb/tag/Changsha>.

Smith Rayan E. 2009. History of Prefabrication: A Cultural Survey. Proceedings of the Third International Congress on Construction History. Cottbus, Germany.

Speaman Jerry. 1967. Habitat 67: El Regreso al Futuro (de la Arquitectura). The New York Times Style Magazine: Spain. Montreal, Canada. Available from: <https://www.tmagazine.es/disenio/habitat-67/>.

- USDE 2019. Solar Decathlon. Competition Guide 2019-2020. U.S. Department of Energy.
- USPTO, Charles S Ogsbury and Don. C. Witte. 1972. Connector Unit Having Radial Arms for Straight or Angular Connections. United States Patent and Trademark Office. Patent No: US003648404.
- USPTO, Ernest G Alken. 1999. Geodesic Domes and Improved Joints Therefor. United States Patent and Trademark Office. Patent No: US005996288.
- USPTO, Giancarlo Pofferi. 1975. Demountable Structural Joint. United States Patent and Trademark Office. Patent No: US003912410.
- USPTO, Glenn A. Reynolds, Dean R. Hackbarth and Gary N. Curtis. 2009. Connection Node for a Universal Truss Joint and Double Layer Grid. United States Patent and Trademark Office. Patent No: US007530201B2.
- USPTO, Herbert H, Moss. 1930. Joint for Structural Shapes and Method of Making the Same. United States Patent and Trademark Office. Patent No: US001760955.
- USPTO, Robert. J. Simmons. 2011. Halo/Spider, Full-Moment, Column/Beam Connection in a Building Frame. United States Patent and Trademark Office. Patent No: US007941985B2.
- USPTO, Teruo Matsuzawa and Yohei Yokosuka. 2014. Universal Joint and Variable Structure. United States Patent and Trademark Office. Patent No: US20140348572A1.
- Wadel Gerardo. 2009. La Sostenibilidad en la Arquitectura Industrializada. La Construcción Modular Ligera Aplicada a la Vivienda. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España. 115-142.
- Wood Antony. 2012. T-30 Hotel. Skyscrapercenter. Global Tall Building Database of the CTBUH. Available from: <http://www.skyscrapercenter.cn/building/t30-hotel/14432>.

X.C. Lui, S.H. Pu, A.L. Zhang, A.X. Xu, Z. Ni, Y. Sun and L. Ma. 2015. Static and Seismic Experiment for Bolted-Welded Joint in Modularized Prefabricated Steel Structure. Journal of Constructional Steel Research. Editorial Elsevier. doi: 10.1016/j.jcsr.2015.08.036.

X.C. Lui, Z.W. Yang, H.X. Wang, A.L. Zhang, S.H. Pu, S.T. Chai and L. Wu. 2017. Seismic Performance of H-Section Beam to HSS Column Connection in Prefabricated Structures. Journal of Constructional Steel Research. Editorial Elsevier. doi: 10.1016/j.jcsr.2017.06.029.

Xuechun Lui, Xiaoxiong Cui, Zhiwei Yang and Xinxin Zhan. 2017. Analysis of the Seismic Performance of Sited-Bolted Beam to Column Connections in Modularized Prefabricated Steel Structures. Hindawi. Advance in Materials Science and Engineering. Article ID: 1932730. Doi: 10.1155/2017/1932730.

Zhihua Chen, Jiadi Lui and Yujie Yu. 2017. Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings. Engineering Structures. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.06.002.

데반이네. 2018. Habitat 67. Available from: https://www.google.com.mx/maps/uv?hl=es-419&pb=!1s0x4cc91af0fd0507f5%3A0x54874884e30cae4a!3m1!7e115!4shttps%3A%2F%2Flh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipO3PkMGAtl8DfGq8gCgSdov0b-pm1X6DLs4IUeh%3Dw305-h160-k-no!5sel%20habitat%20montreal%20canada%201976%20-%20Buscar%20con%20Google!15sCgIgaQ&imagekey=!e10!2sAF1QipOEekJLlSbV_Whoh7eS1_7bRJeGIs-YVOP5mVim&sa=X&ved=2ahUKEwiHhL3__eHpAhWLBs0KHVr9AaoQoiowE3oECB0QBg.

APÉNDICE I

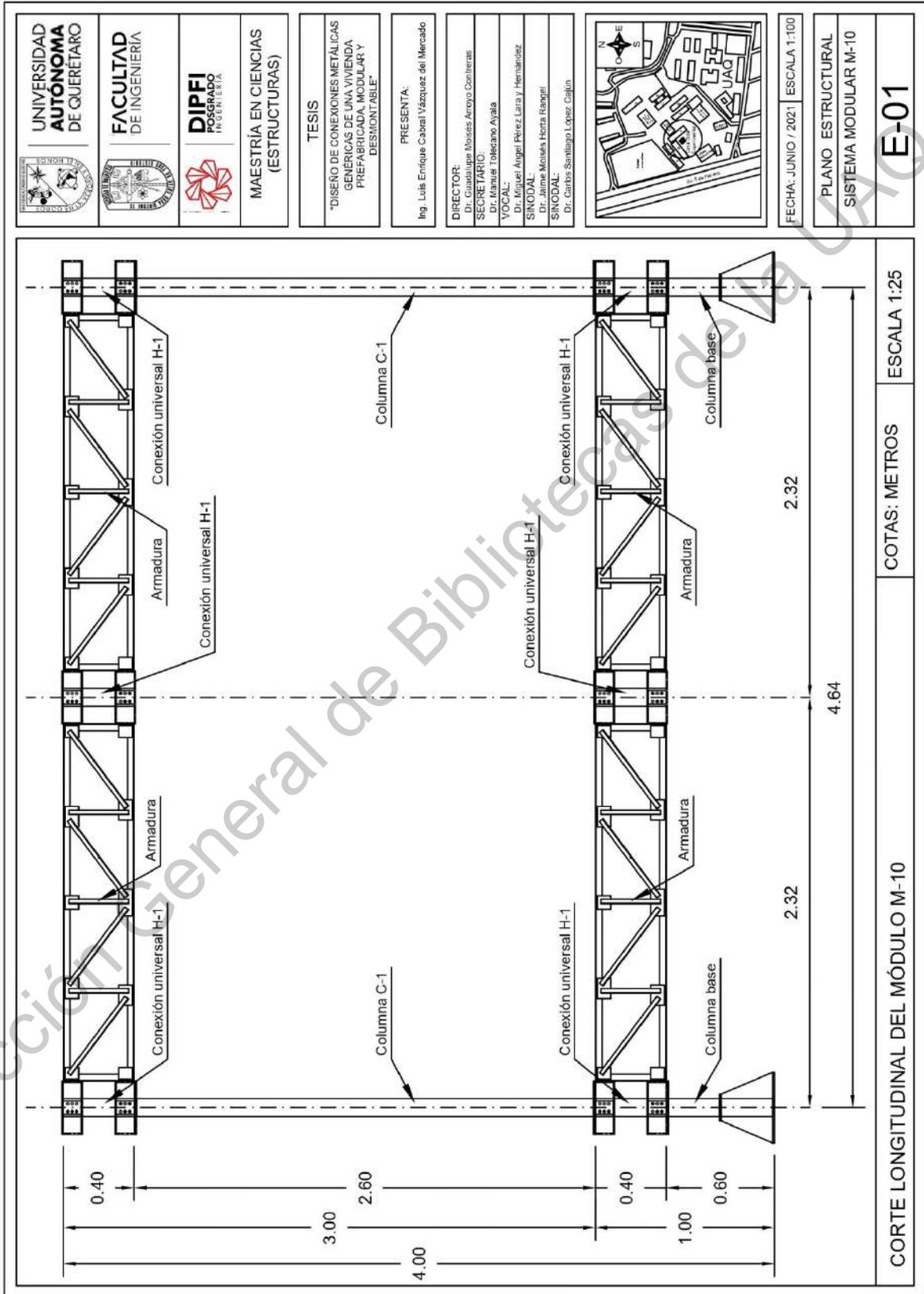
PLANOS ESTRUCTURALES

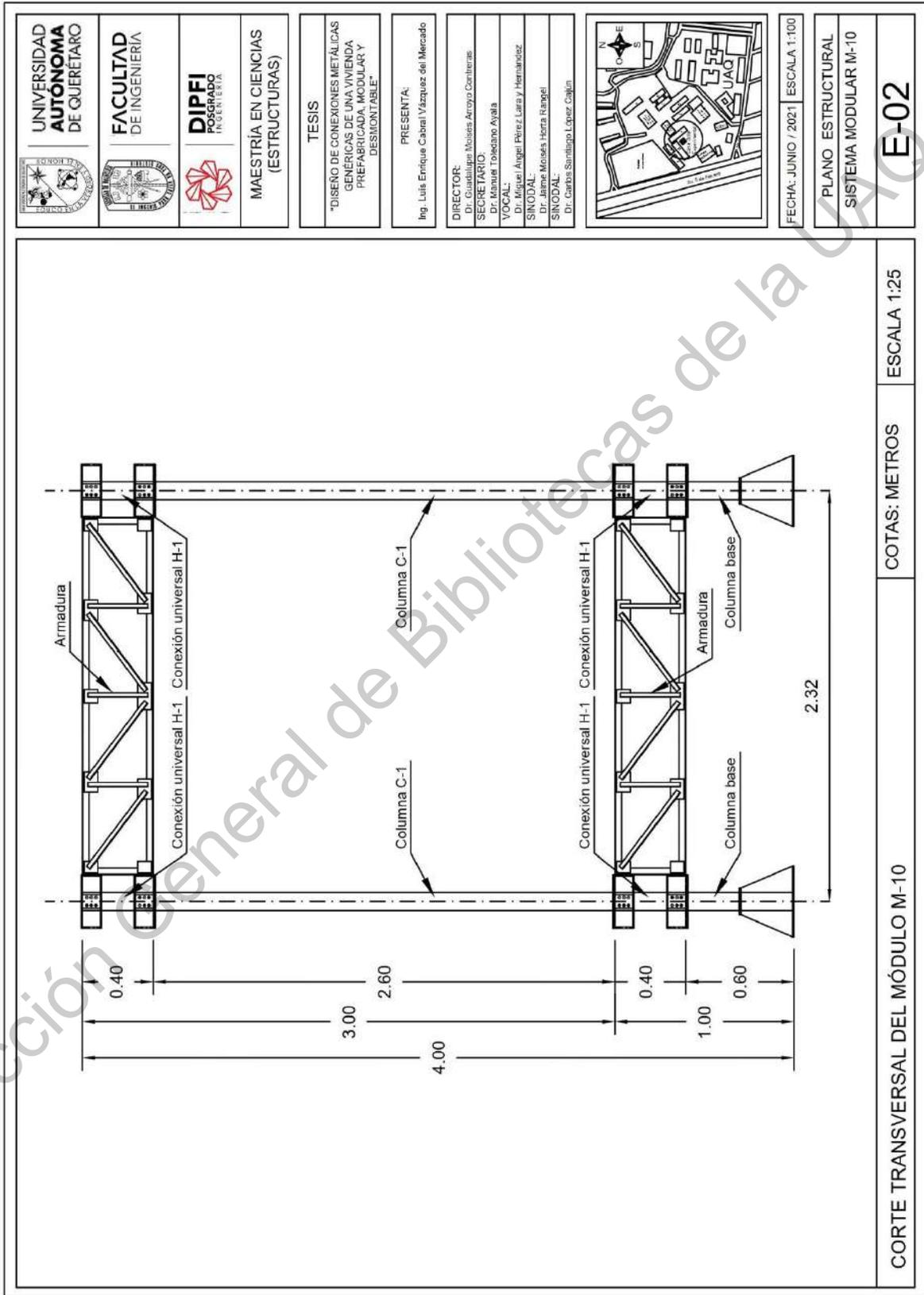
CONEXIÓN UNIVERSAL H-1 Y SISTEMA MODULAR M-10 INCORPORADOS
A UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE, BAJO LA
CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE LA «CASA SOLAR EXPERIMENTAL».

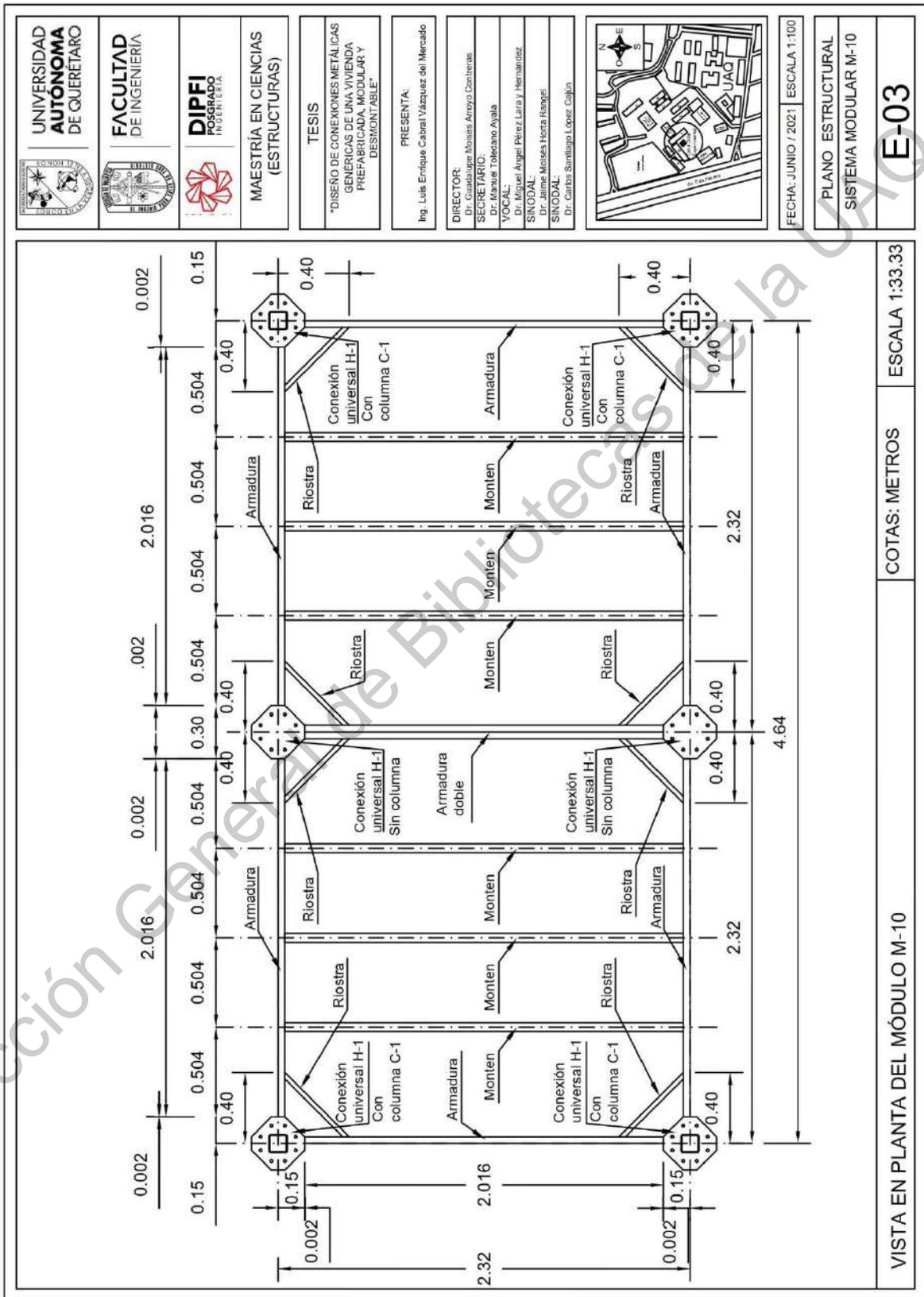
ÍNDICE DE PLANOS ESTRUCTURALES

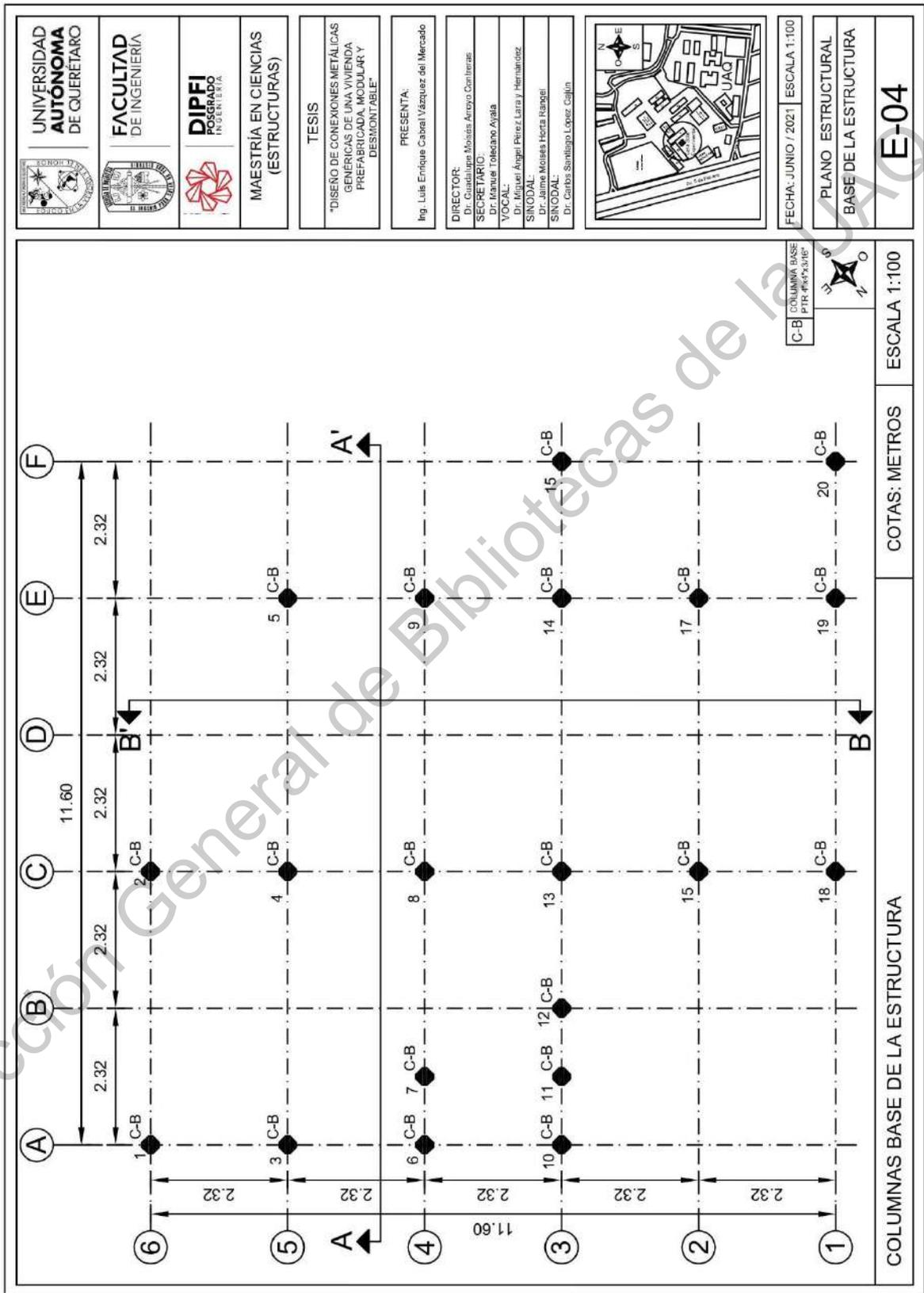
E - 01	Sistema modular M-10:	Corte longitudinal del módulo M-10.
E - 02	Sistema modular M-10:	Corte transversal del módulo M-10.
E - 03	Sistema modular M-10:	Vista en planta del módulo M-10.
E - 04	Base de la estructura:	Columnas base de la estructura.
E - 05	Primer entrepiso:	Estructura, primer entrepiso.
E - 06	Primer entrepiso:	Estructura, primer entrepiso.
E - 07	Segundo entrepiso:	Estructura, segundo entrepiso y cubierta de primer nivel.
E - 08	Segundo entrepiso:	Estructura, segundo entrepiso y cubierta de primer nivel.
E - 09	Cubierta segundo nivel:	Estructura, cubierta de segundo nivel.
E - 10	Cubierta segundo nivel:	Estructura, cubierta de segundo nivel.
E - 11	Corte longitudinal A - A':	Estructura, corte longitudinal A - A'.
E - 12	Corte longitudinal B - B':	Estructura, corte longitudinal B - B'.
E - 13	Corte longitudinal C - C':	Estructura, corte longitudinal C - C'.
E - 14	Módulo de escaleras:	Módulo de escaleras en planta (primer entrepiso).
E - 15	Módulo de escaleras:	Módulo de escaleras en planta (1er hasta el 2do entrepiso).
E - 16	Módulo de escaleras:	Módulo de escaleras (segundo entrepiso).
E - 17	Plantas de muros:	Muros en la base, primer entrepiso.
E - 18	Plantas de muros:	Muros primer entrepiso.
E - 19	Plantas de muros:	Muros segundo entrepiso y pretilos cubierta primer nivel.
E - 20	Plantas de muros:	Muros pretilos cubierta de segundo nivel.
E - 21	Conexión Universal H-1:	Corte lateral Conexión Universal H-1.
E - 22	Conexión Universal H-1:	Placas tapa, Conexión Universal H-1.
E - 23	Conexión Universal H-1:	Placas diafragma, Conexión Universal H-1.
E - 24	Conexión Universal H-1:	Placa lateral e interna, Conexión Universal H-1.
E - 25	Conexión Universal H-1:	Placas internas, Conexión Universal H-1.
E - 26	Armadura A-1:	Corte longitudinal interno (L-1), armaduras (A-1). Lado 1.
E - 27	Armadura A-1:	Corte longitudinal externo (L-1), armaduras (A-1). Lado 1.
E - 28	Armadura A-1:	Corte longitudinal interno (L-2), armaduras (A-1). Lado 2.
E - 29	Armadura A-1:	Corte longitudinal externo (L-2), armaduras (A-1). Lado 2.
E - 30	Conexiones CO-01 y CO-02. Armadura A-1:	Corte longitudinal (lado 1), CO-01 y CO-02.
E - 31	Conexiones CO-03 y CO-04. Armadura A-1:	Corte longitudinal (lado 1), CO-03 y CO-04.
E - 32	Conexiones CO-05 y CO-06. Armadura A-1:	Corte longitudinal (lado 1), CO-05 y CO-06.
E - 33	Conexiones CO-07 y CO-08. Armadura A-1:	Corte longitudinal (lado 1), CO-07 y CO-08.

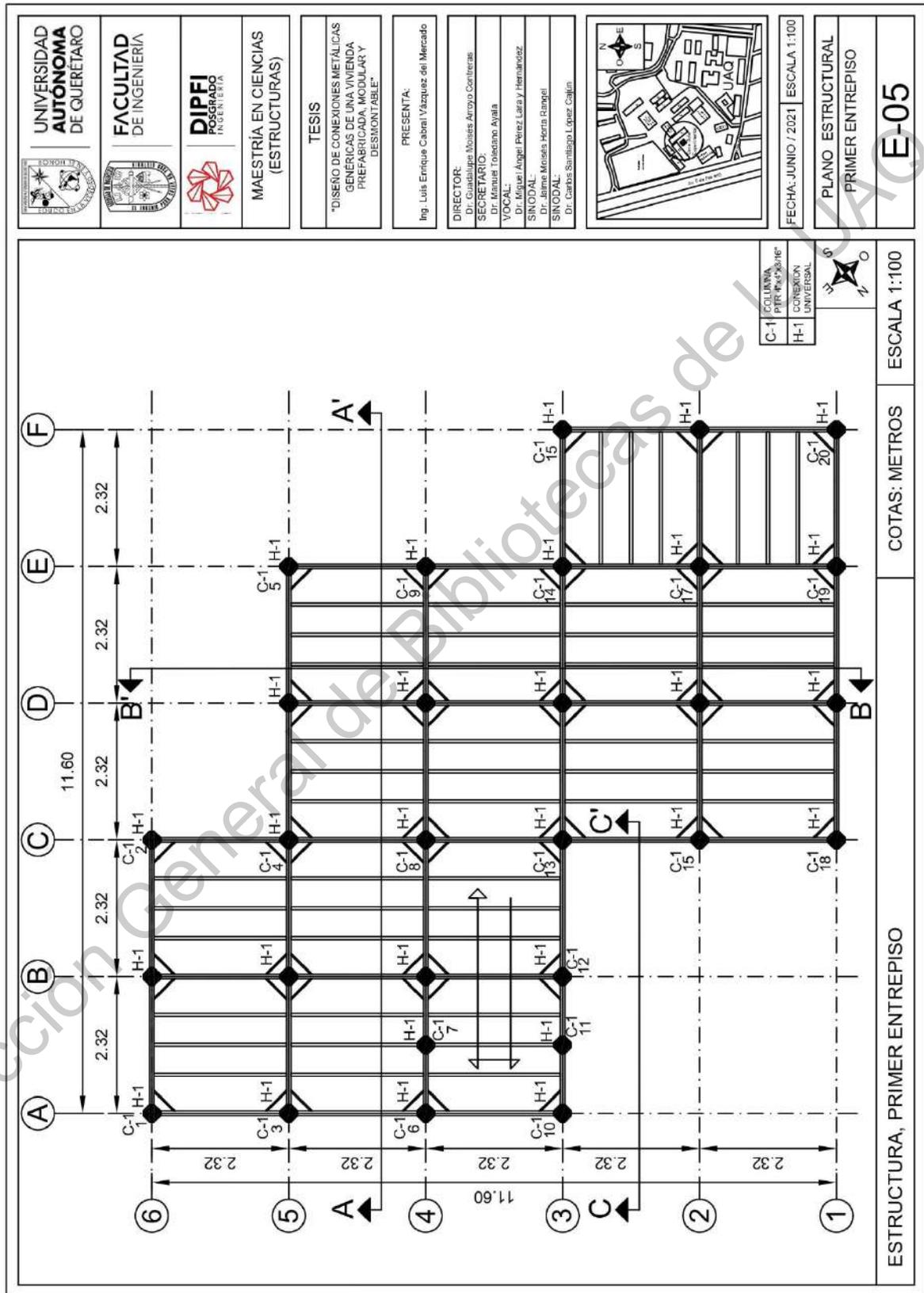
E - 34	Conexiones CO-09 y CO-10. Armadura A-1:	Corte longitudinal (lado 1), CO-09 y CO-10.
E - 35	Conexiones CO-11, CO-12 y CO-13. Armadura A-1:	Corte longitudinal (lado 2), CO-11. Corte longitudinal (lado 2), CO-12. Corte longitudinal (lado 2), CO-13.
E - 36	Armadura A-2:	Corte longitudinal interno (lado 1). Corte longitudinal externo (lado 1).
E - 37	Armadura A-2:	Corte longitudinal interno (lado 2). Corte longitudinal externo (lado 2).
E - 38	Conexiones CO-14 y CO-15. Armadura A-2:	Corte longitudinal (lado 1), CO-14 y CO-15.
E - 39	Conexiones CO-16 y CO-17. Armadura A-2:	Corte longitudinal (lado 1), CO-16 y CO-17.
E - 40	Conexiones CO-18 y CO-19. Armadura A-2:	Corte longitudinal (lado 1), CO-18 y CO-19.
E - 41	Conexión CO-20. Armadura A-2:	Corte longitudinal (lado 1), CO-20.
E - 42	Armaduras A-1 y A2:	Vistas de extremos de las armaduras A-1 y A-2.
E - 43	Conector H-2. Conexión CO-21:	Corte longitudinal, conexión CO-21 (conector H-2).
E - 44	Conector H-2. Conexión CO-21:	Corte transversal, conexión CO-21 (conector H-2).
E - 45	Conector H-2. Conexión CO-21:	Detalles de la conexión CO-21 (conector H-2).
E - 46	Conector H-3. Conexión CO-22:	Corte longitudinal, conexión CO-22 (conector H-3).
E - 47	Conector H-3. Conexión CO-22:	Corte transversal, conexión CO-22 (conector H-3).
E - 48	Conector H-3. Conexión CO-22:	Detalles de la conexión CO-22 (conector H-3).
E - 49	Armadura y monten. Conexión CO-23:	Planta, conexión montenes con armaduras.
E - 50	Armadura y monten. Conexión CO-23:	Corte transversal, conexión montenes con armaduras.
E - 51	Conexión CO-24. Escaleras:	Detalles de la conexión CO-24 (escaleras).
E - 52	Conexión CO-25. Escaleras:	Detalles de la conexión CO-25 (escaleras).
E - 53	Conexión CO-26. Escaleras:	Detalles de la conexión CO-26 (escaleras).
E - 54	Conexión CO-27. Escaleras:	Detalles de la conexión CO-27 (escaleras).
E - 55	Conexión CO-28. Escaleras:	Detalles de la conexión CO-28 (escaleras).
E - 56	Conexión CO-29. Escaleras:	Detalles de la conexión CO-29 (escaleras).
E - 57	Conexión CO-30. Escaleras:	Detalles de la conexión CO-30 (escaleras).
E - 58	Conexión CO-31. Escaleras:	Detalles de la conexión CO-31 (escaleras).
E - 59	Columna base CB-100:	Detalles de la columna base CB-100.
E - 60	Perfiles y materiales:	Detalles de los perfiles y materiales.
E - 61	Conexión Universal H-1:	Vista isométrica, Conexión Universal H-1. Vista en planta, Conexión Universal H-1. Vista lateral, Conexión Universal H-1.

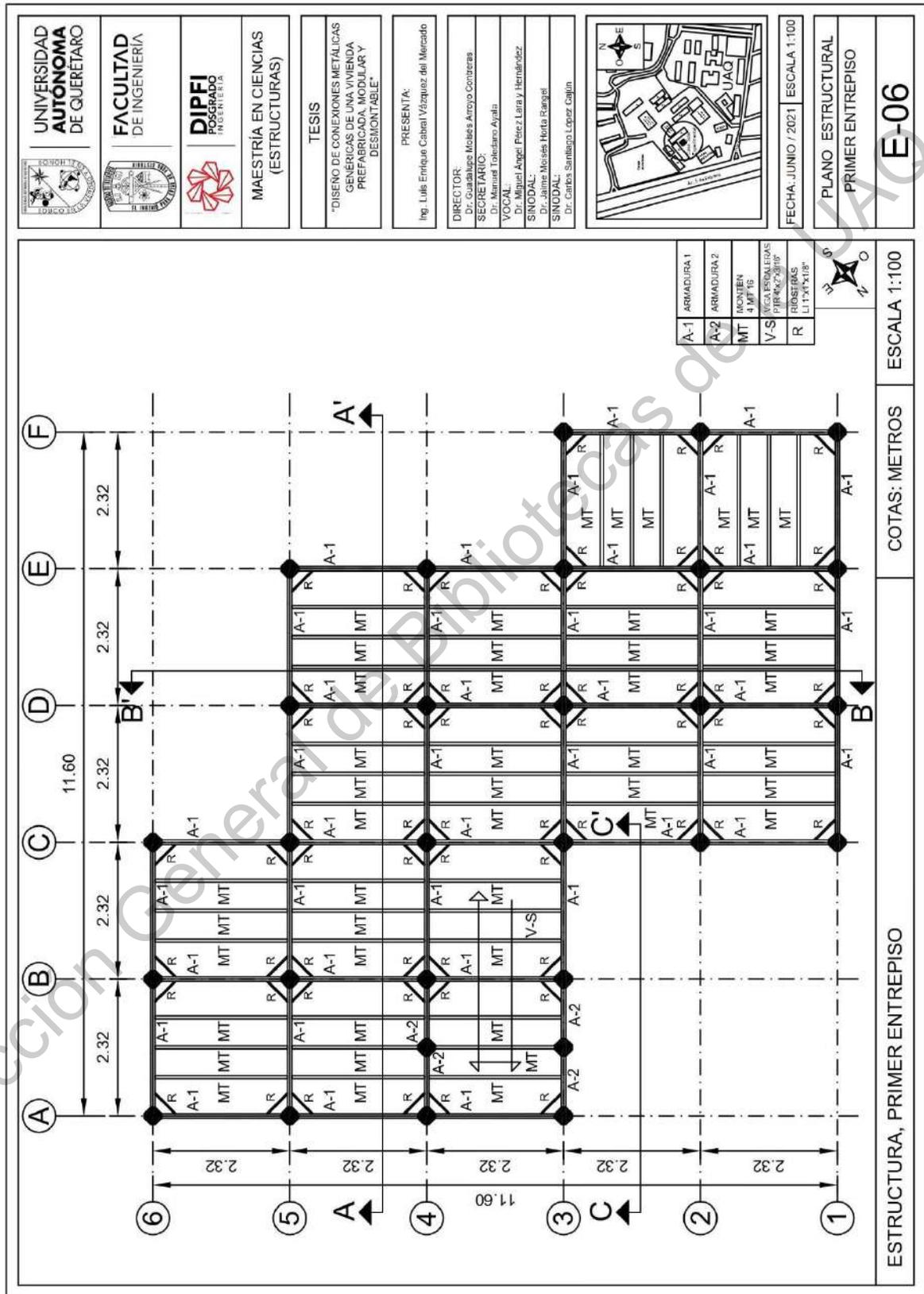


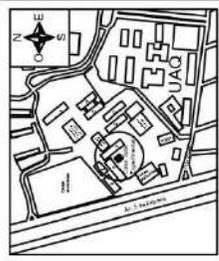


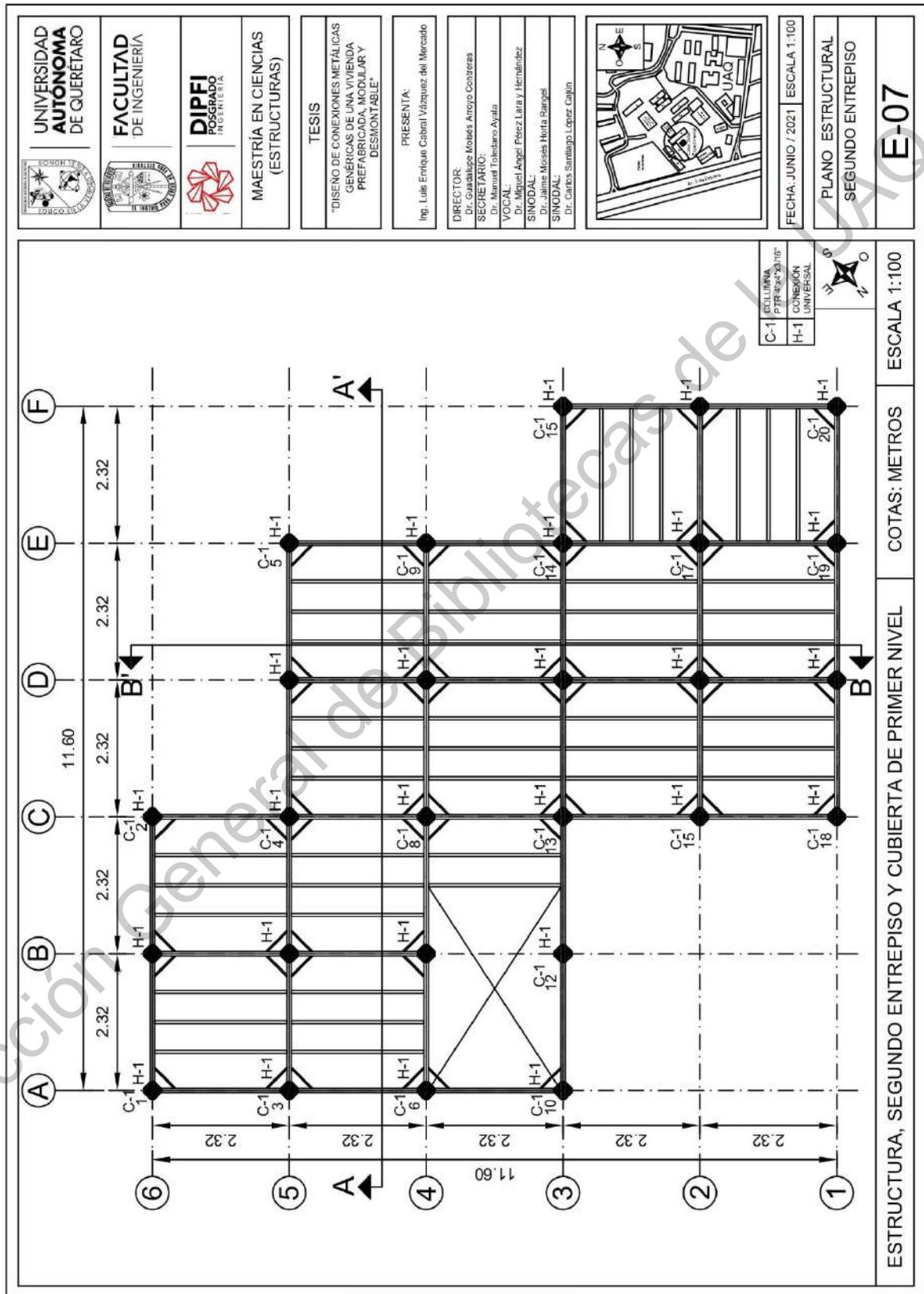


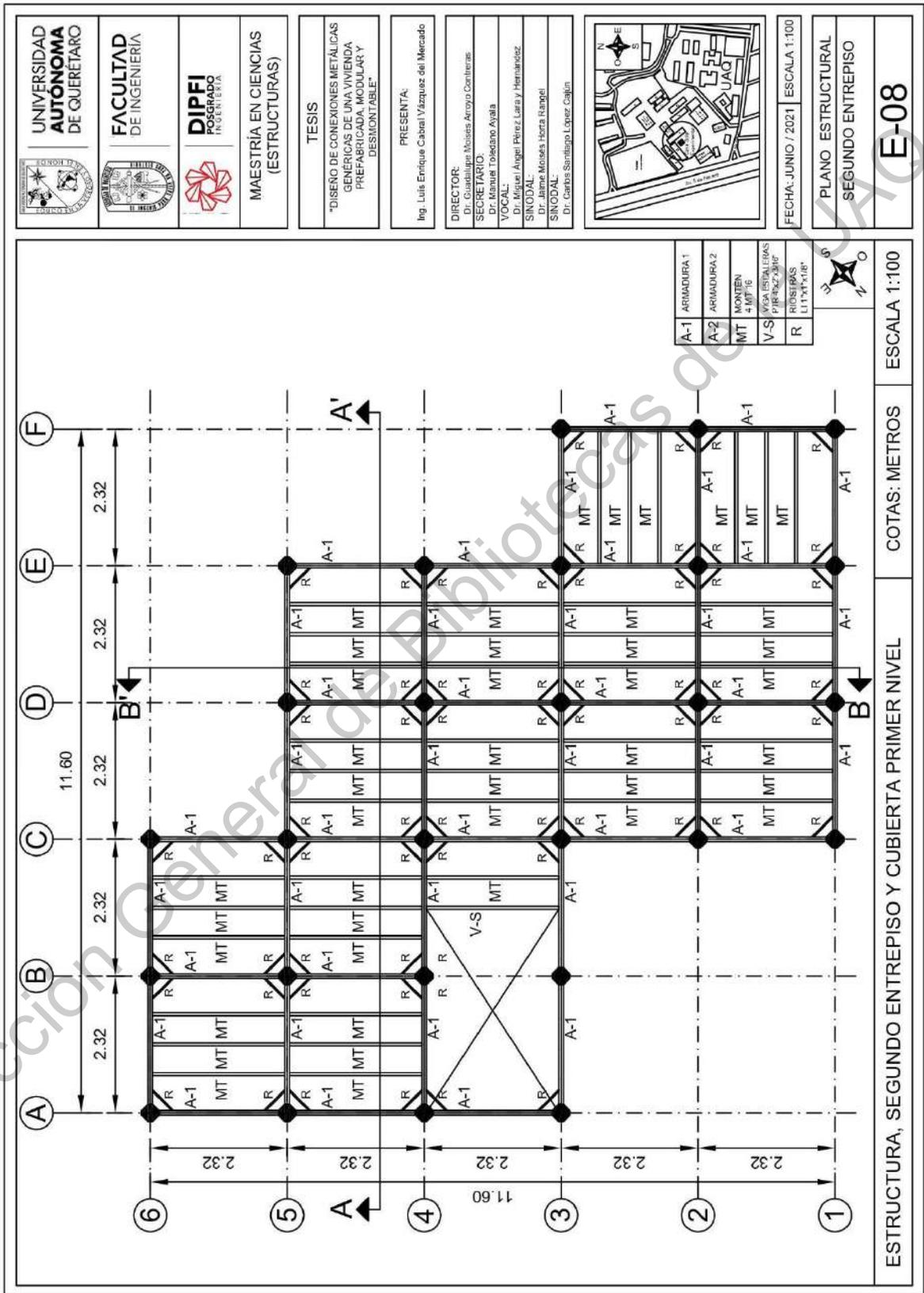


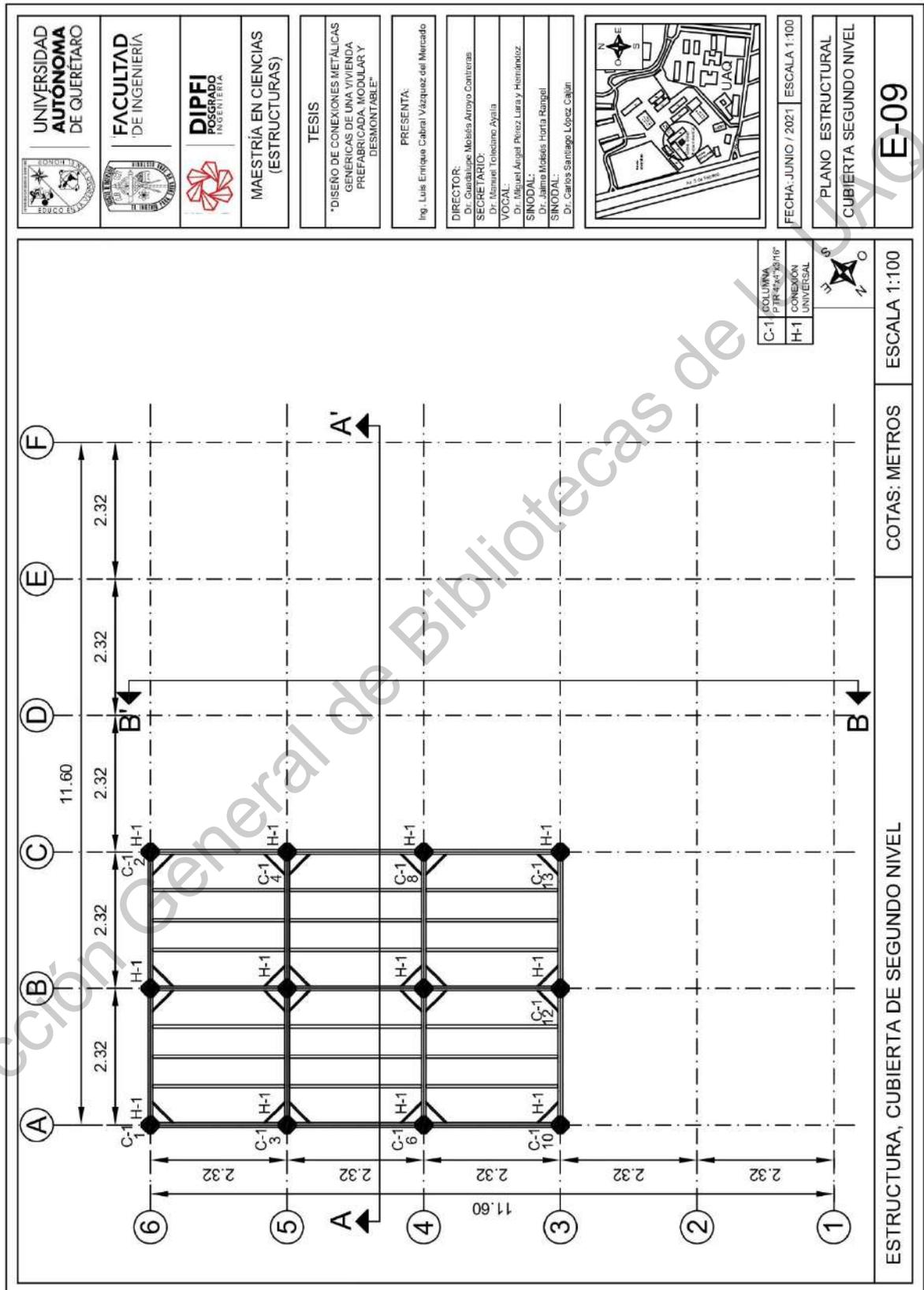


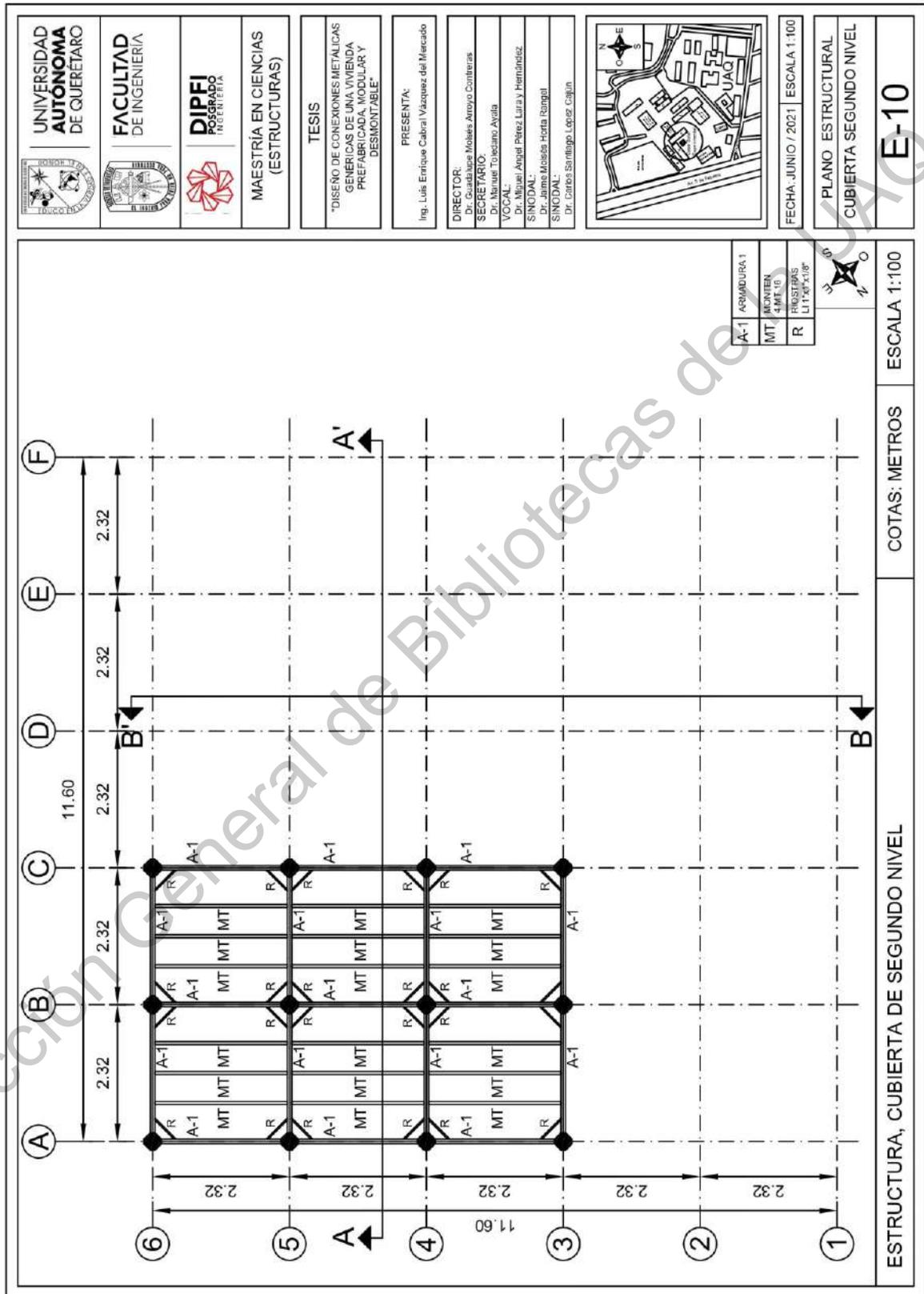


	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
	FACULTAD DE INGENIERÍA
	DIPFI POSGRADO INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)	
TESIS	
"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"	
PRESENTA:	
Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado	
DIRECTOR:	
Dr. Guadalupe Motos Arroyo Contreras	
SECRETARIO:	
Dr. Manuel Tolciano Ayala	
VOCAL:	
Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández	
SINDICAL:	
Dra. Mercedes Hortis Sangal	
SINDICAL:	
Dr. Carlos Santiago López Colijn	
	
FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100	
PLANO ESTRUCTURAL PRIMER ENTREPISO	
E-06	

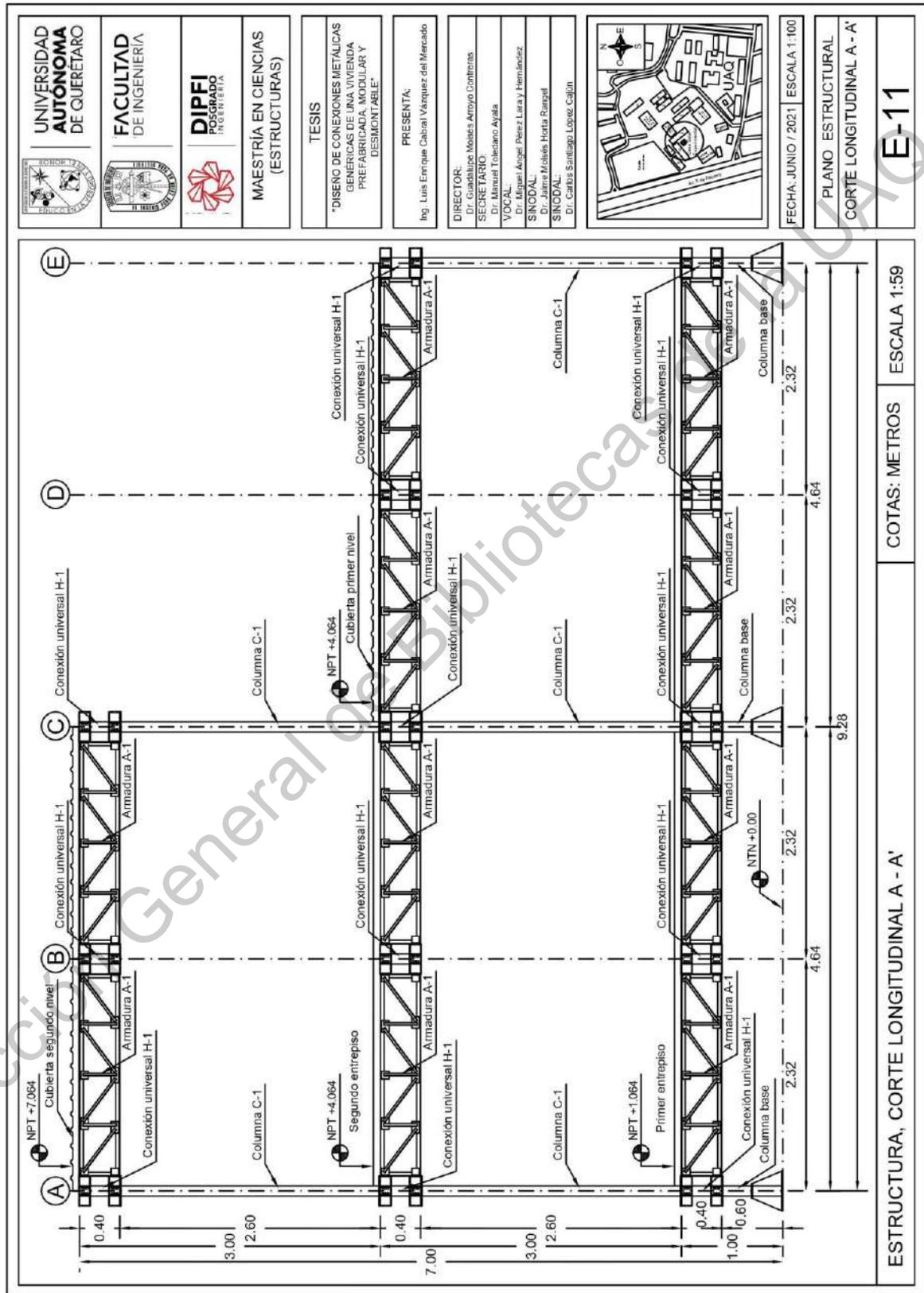


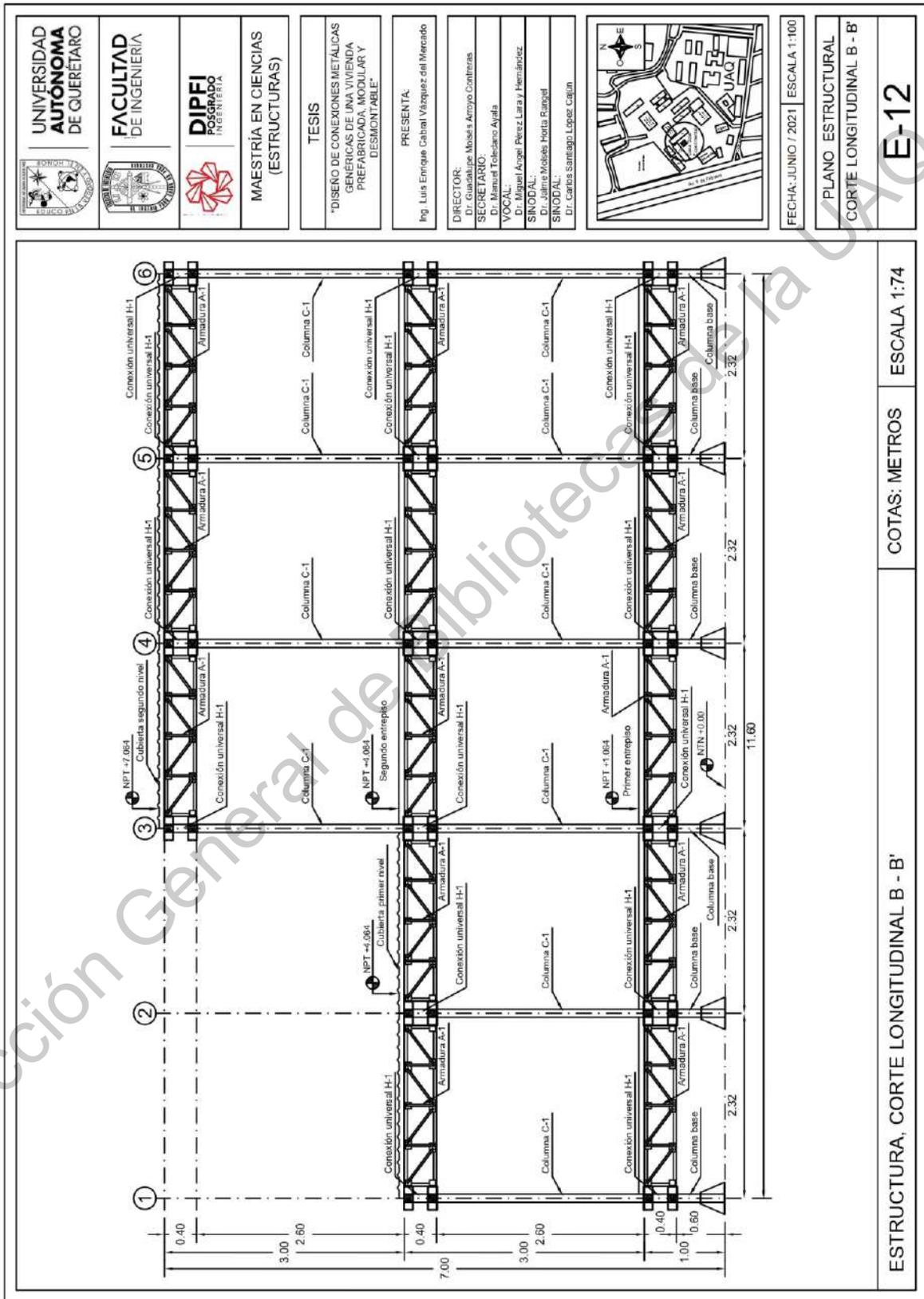


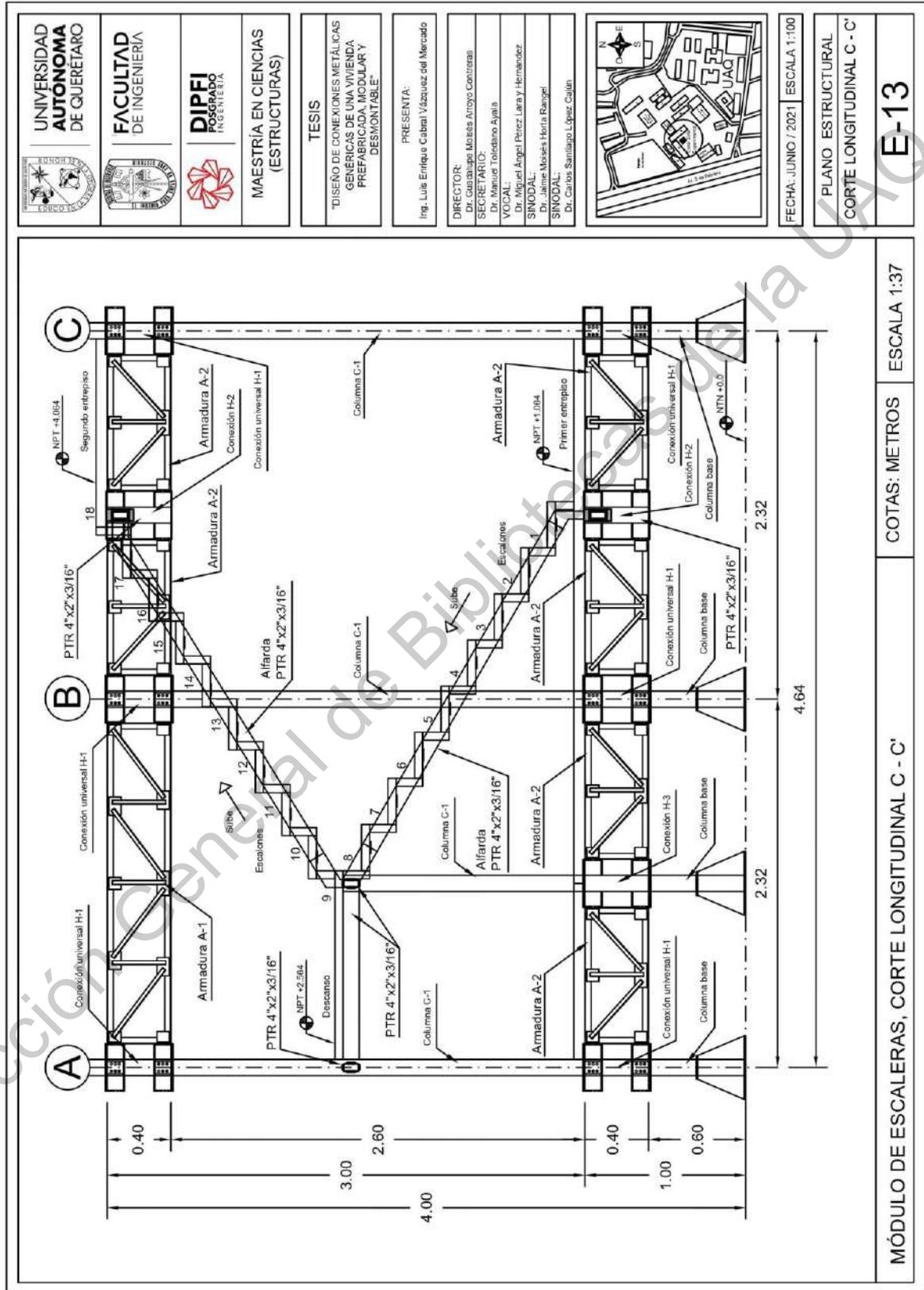


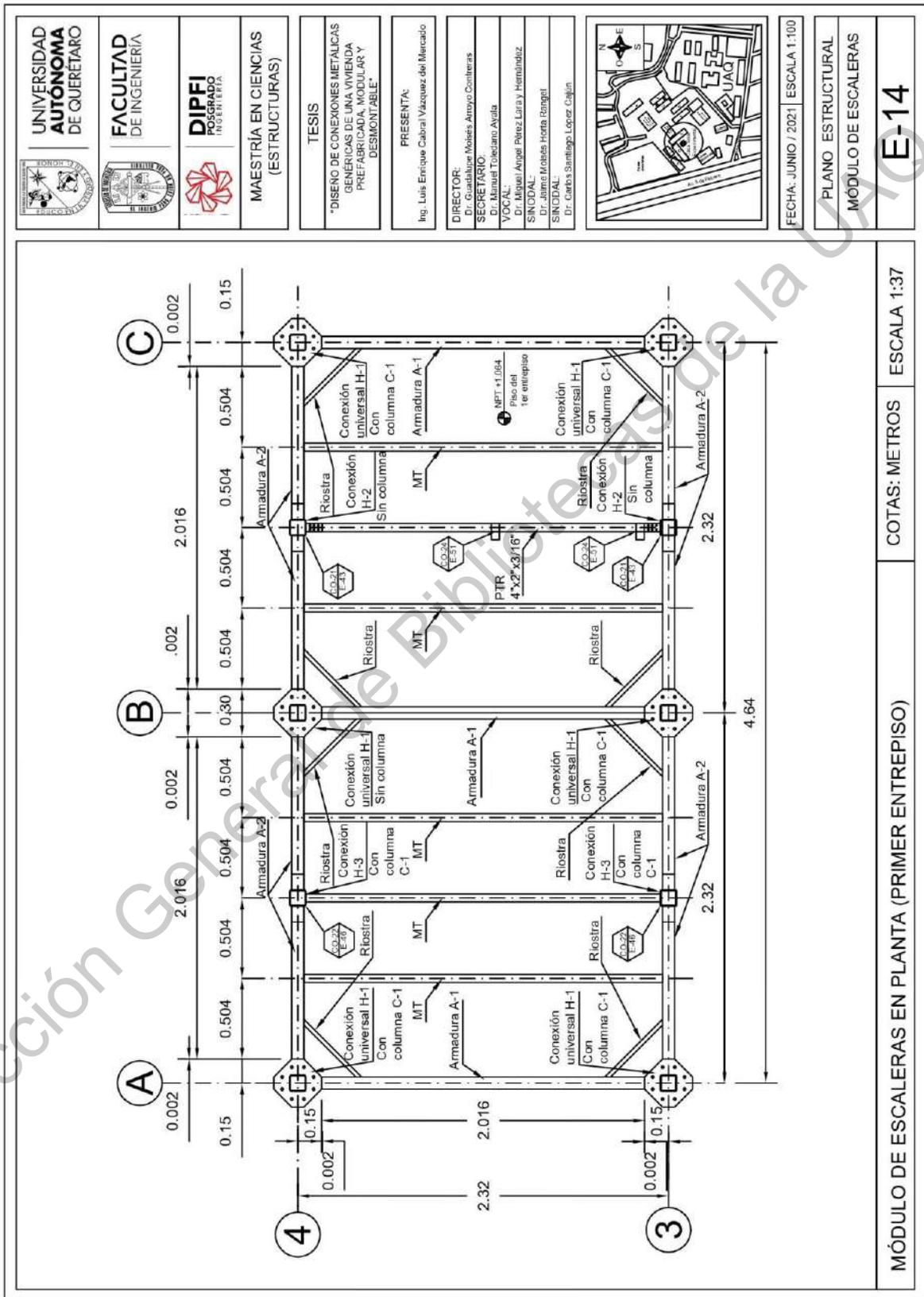


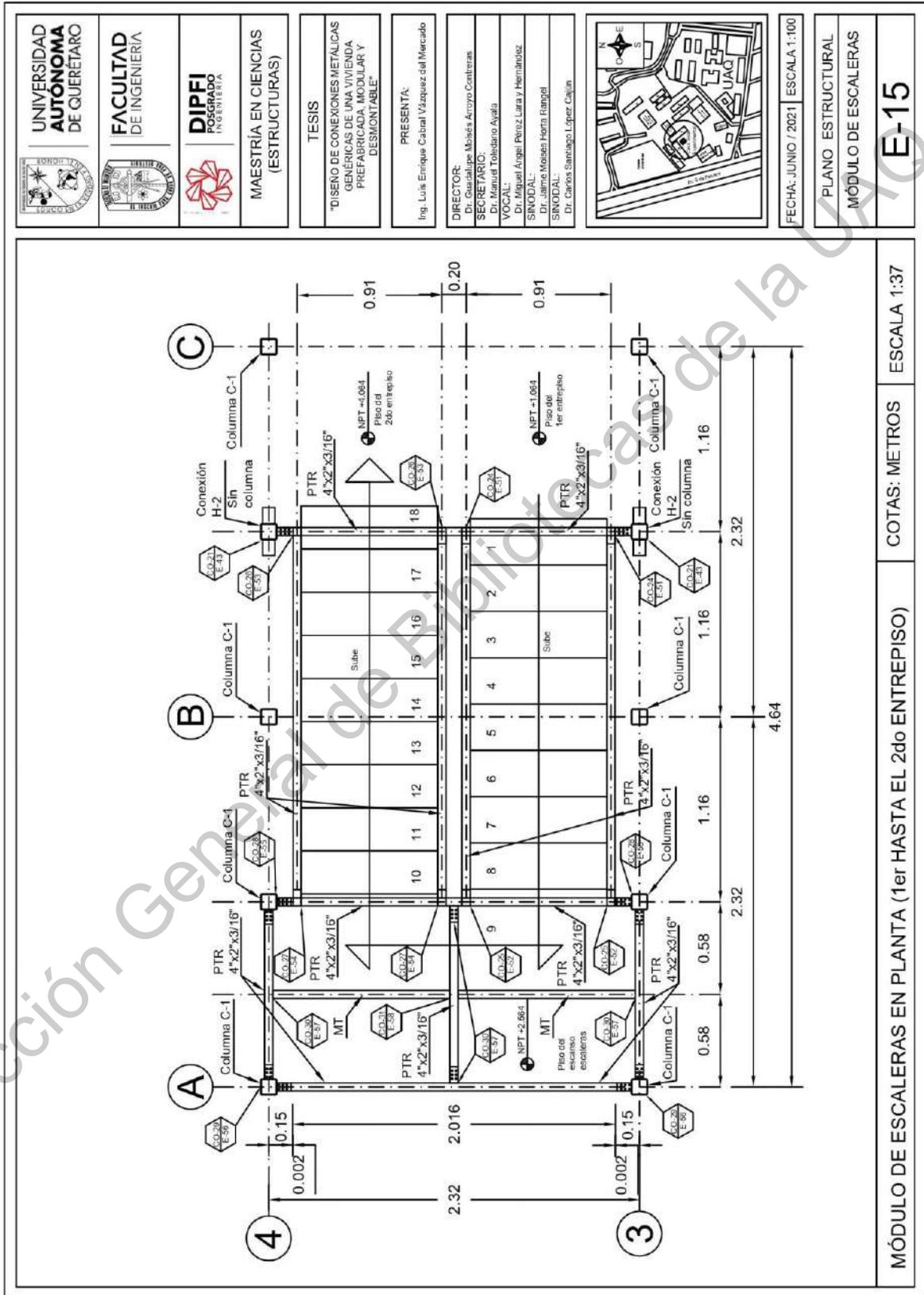
	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
	FACULTAD DE INGENIERIA
	DIFI POSGRADO INGENIERIA
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)	
TESIS	
"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"	
PRESENTA:	
Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado	
DIRECTOR:	
Ing. Felipe Moleto Arroyo Contreras	
SECRETARIO:	
Ing. Jorge Toledano Ayala	
VOCAL:	
Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández	
SINDICAL:	
Dr. James Mateo Horta Romo	
SINDICAL:	
Dr. Carlos Santiago Lopez Cajun	
FECHA: JUNIO / 2021	ESCALA 1:100
PLANO ESTRUCTURAL	
CUBIERTA SEGUNDO NIVEL	
E-10	

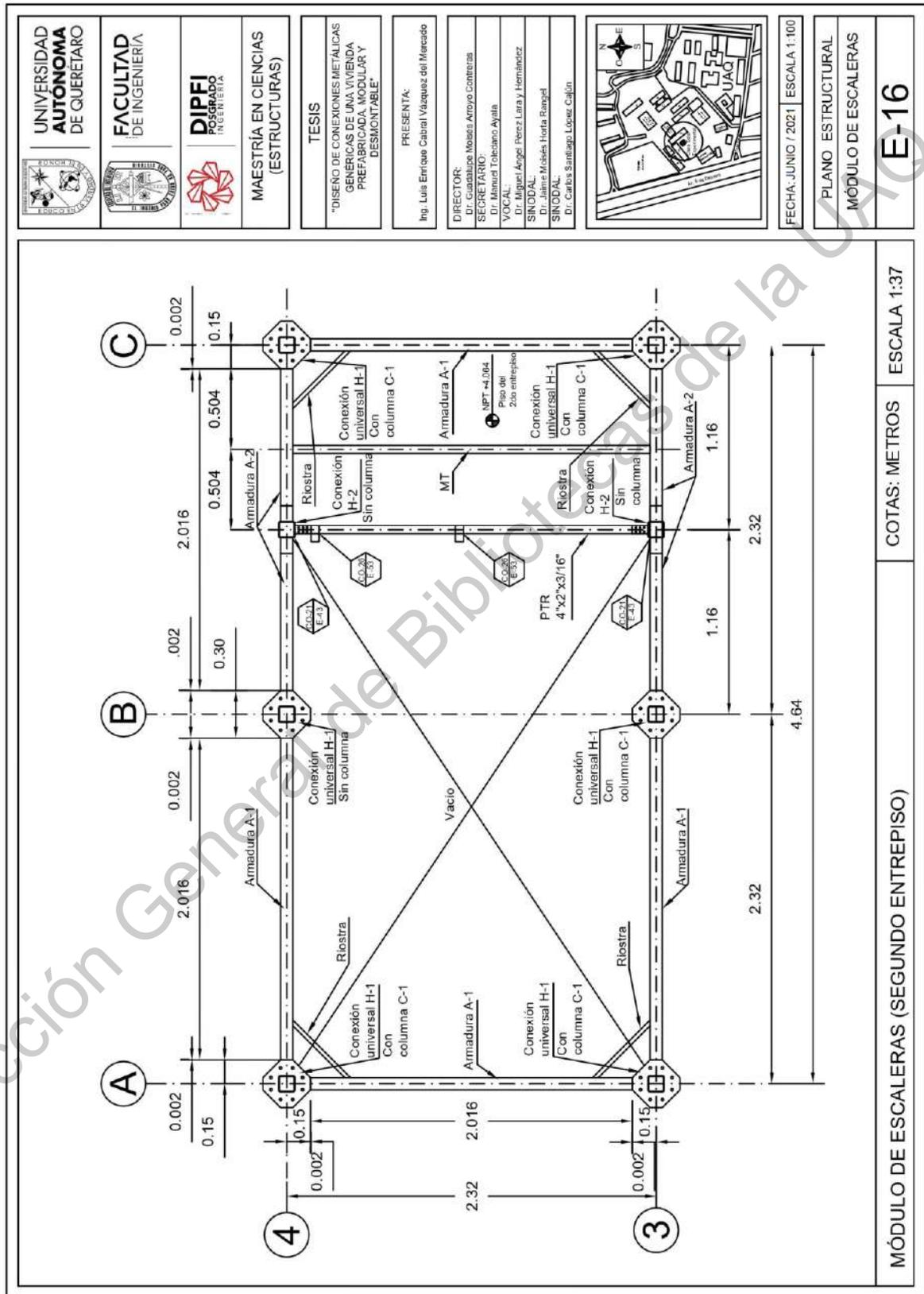


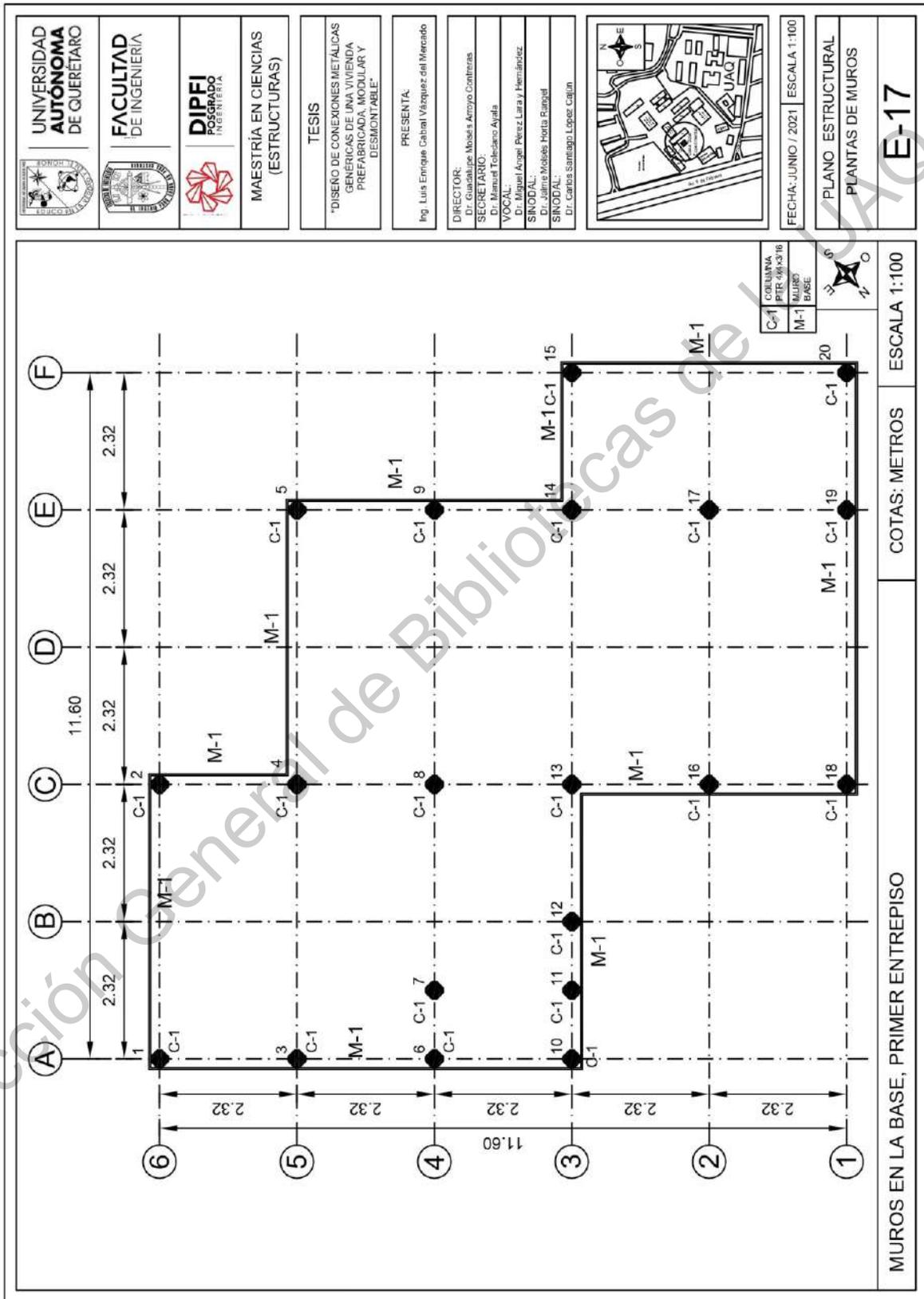


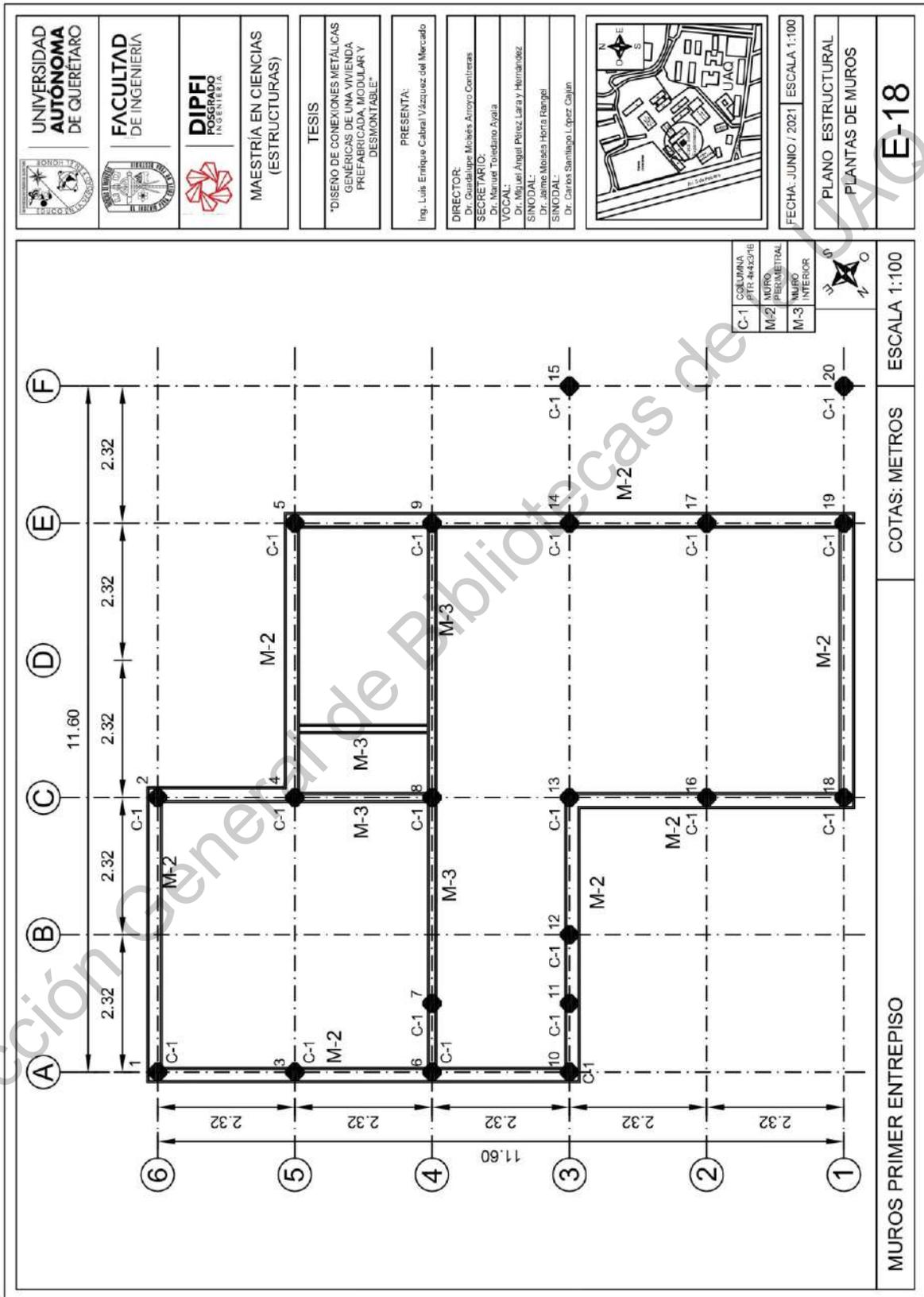


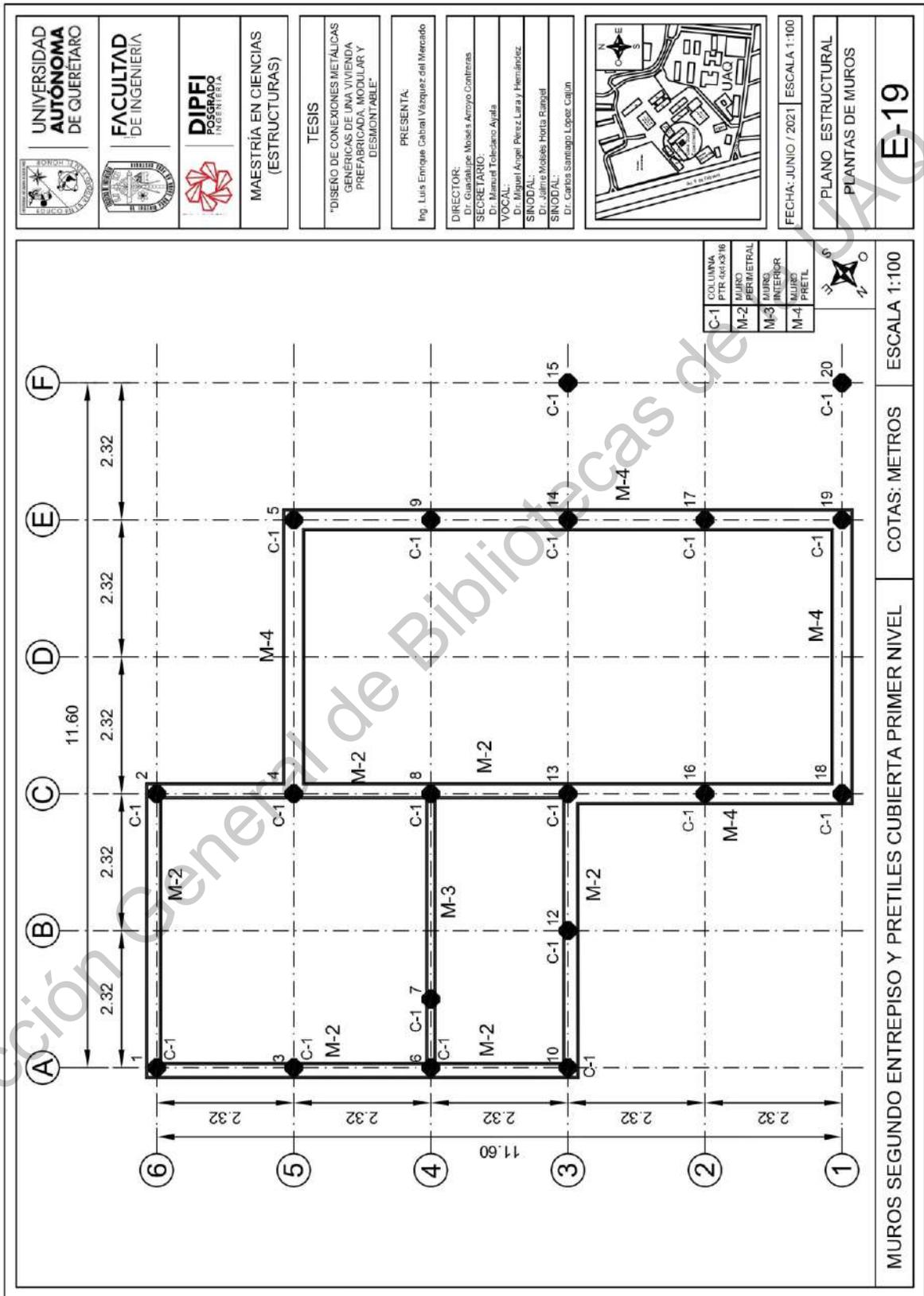


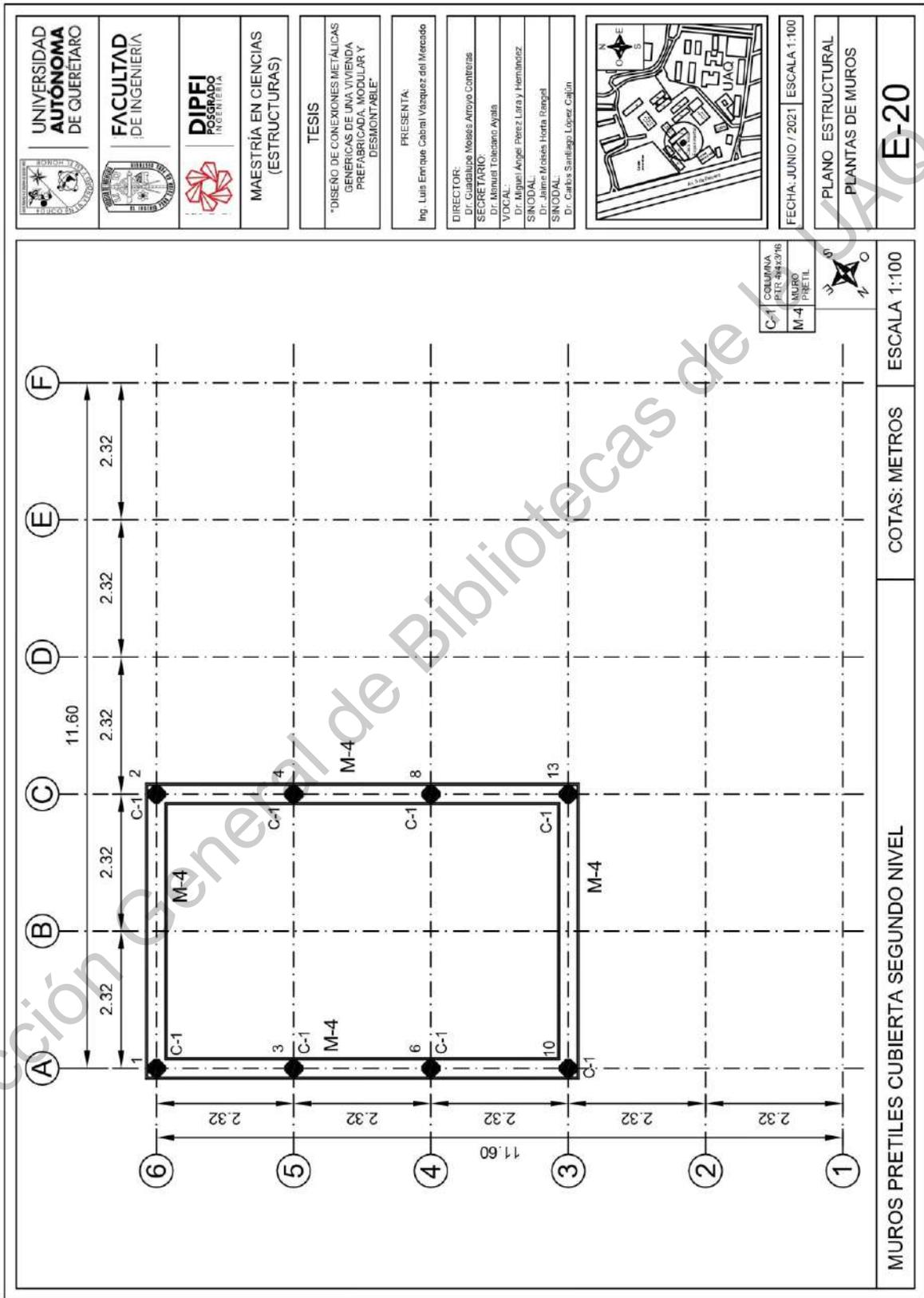


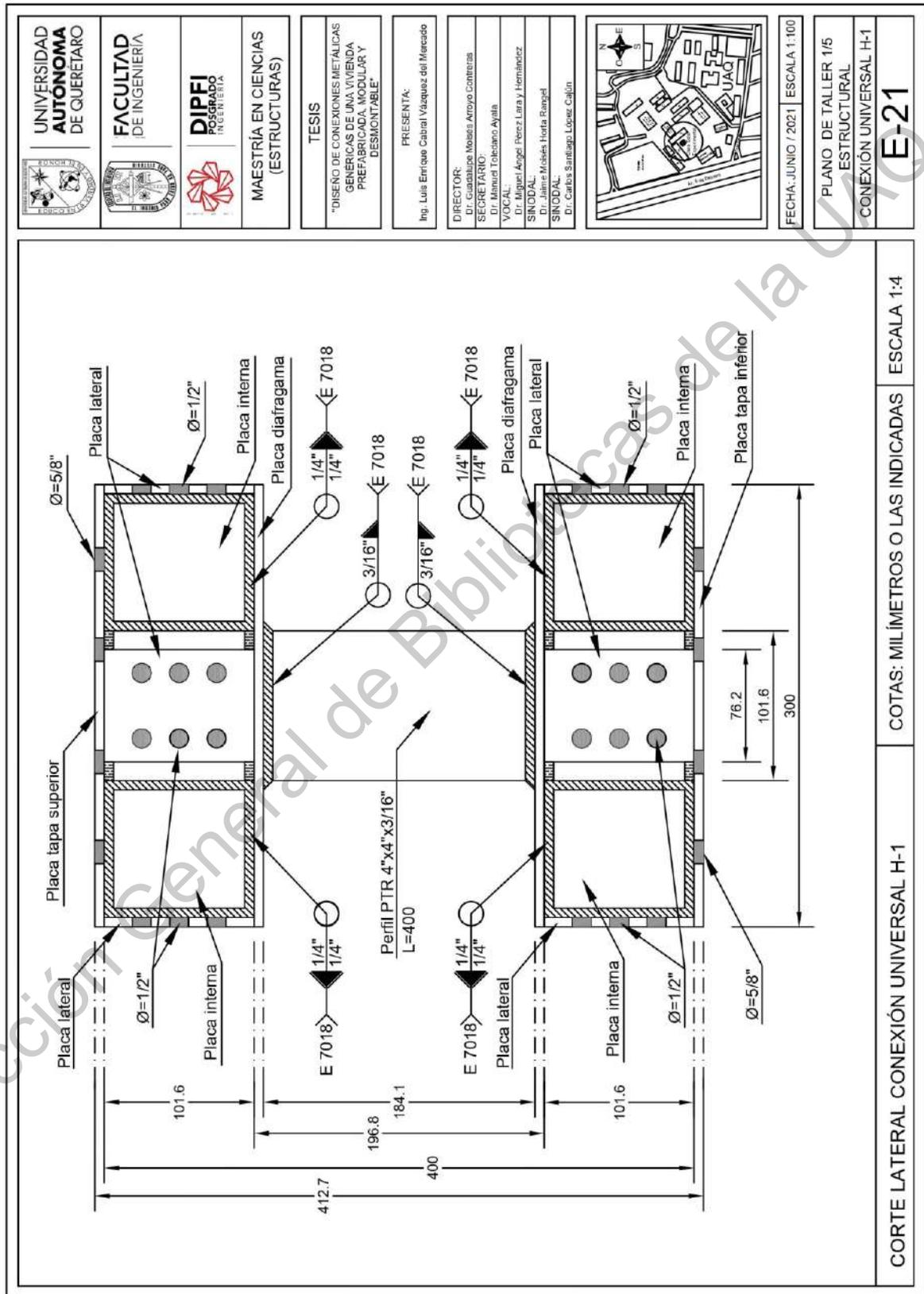


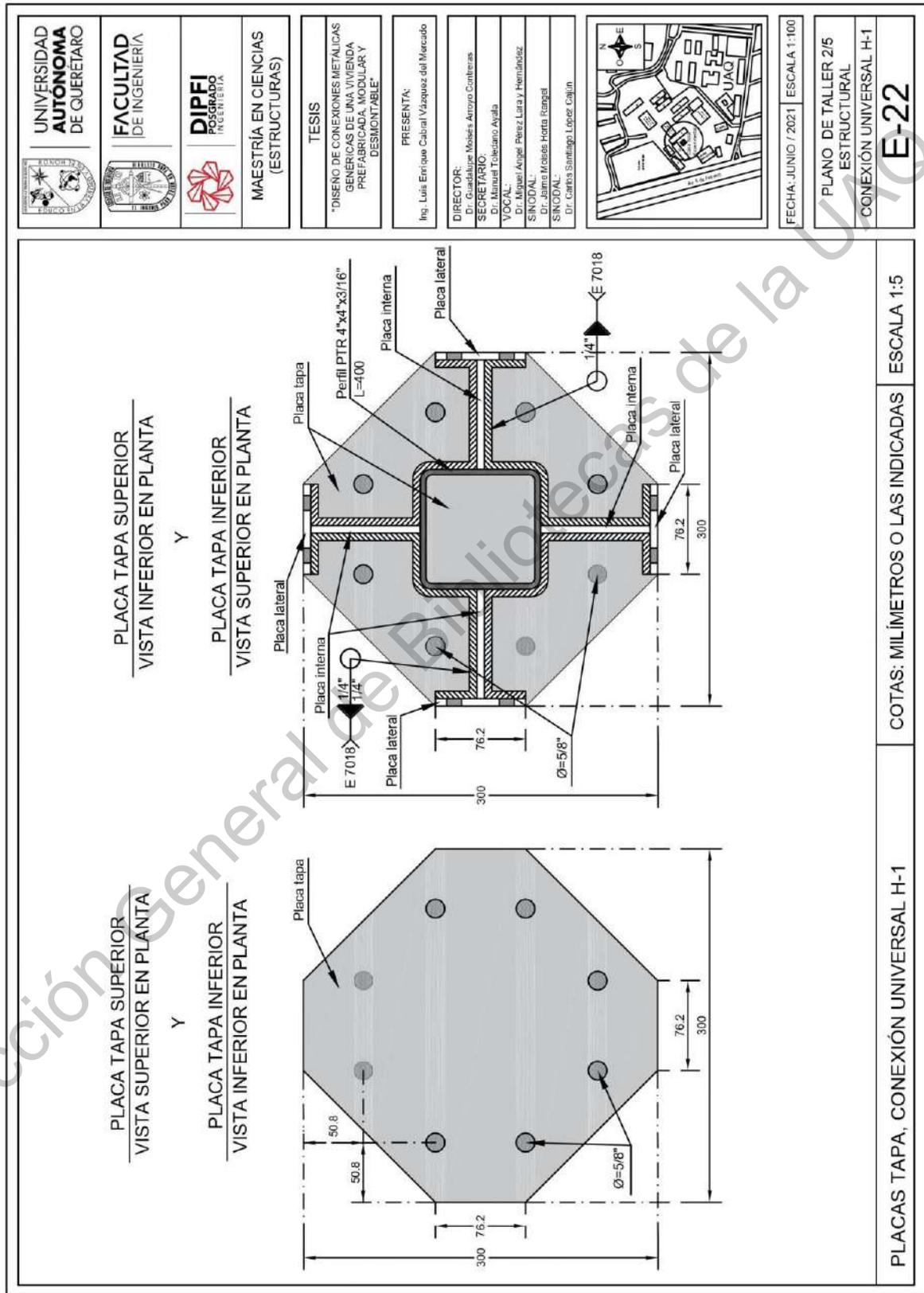


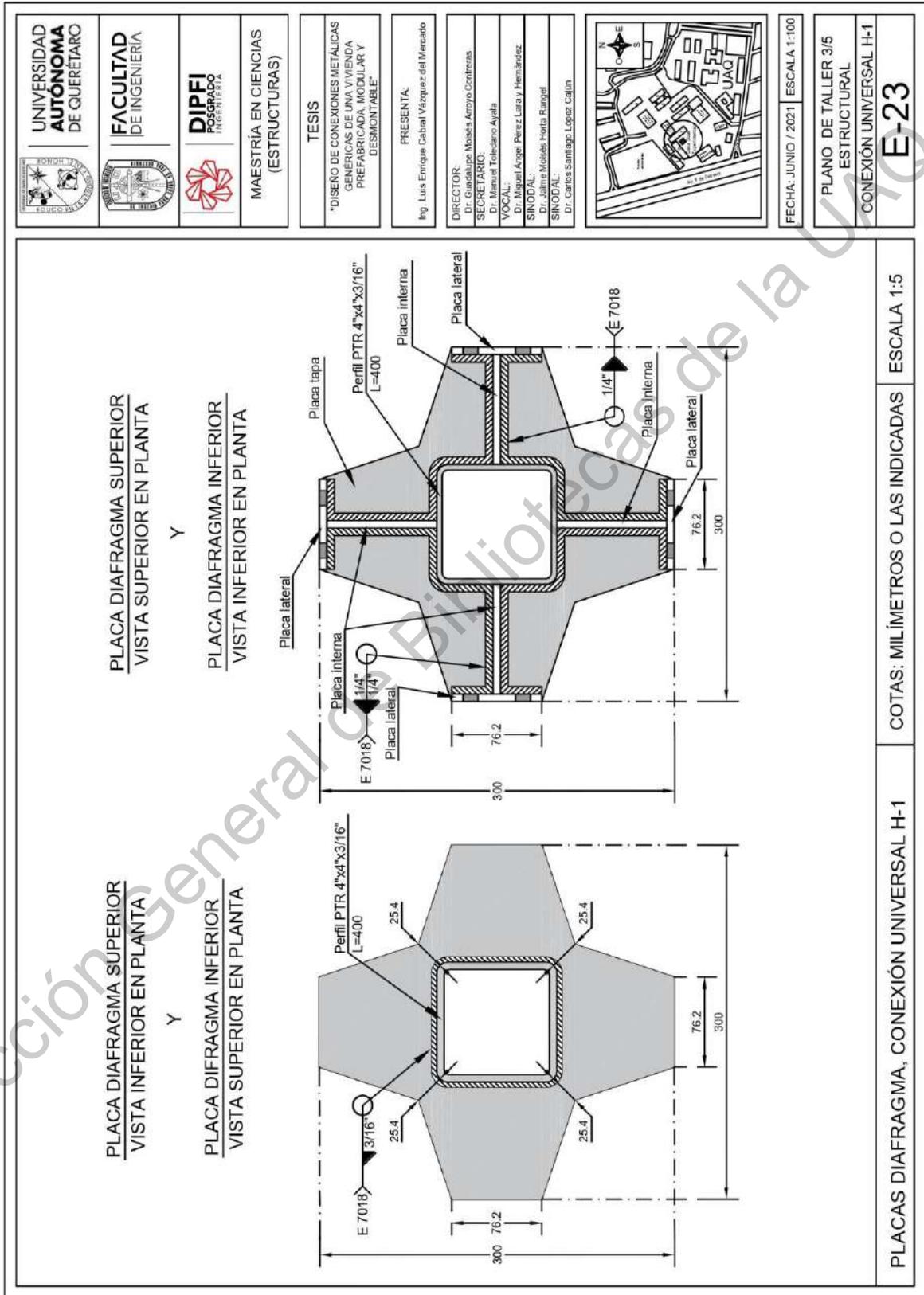


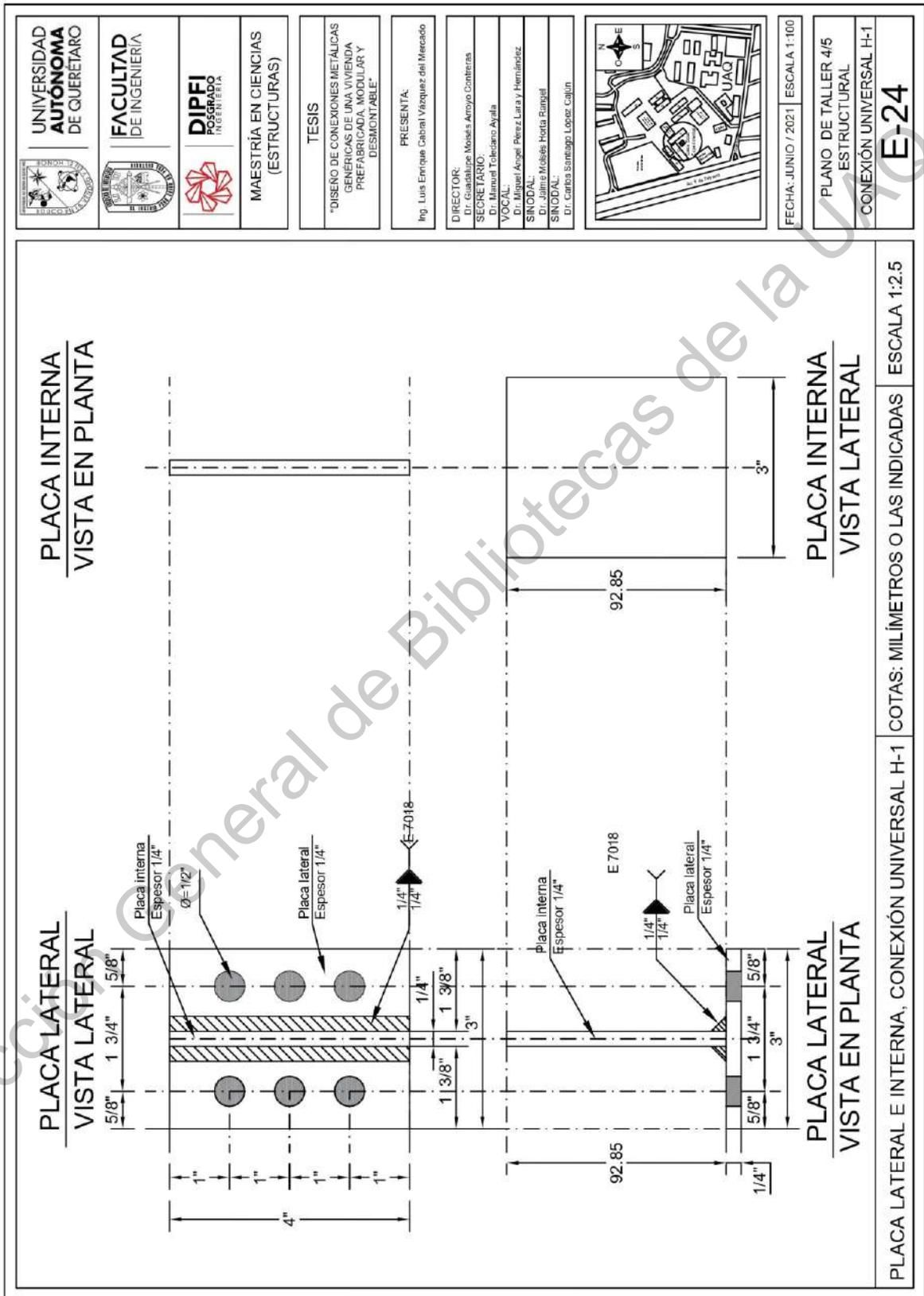










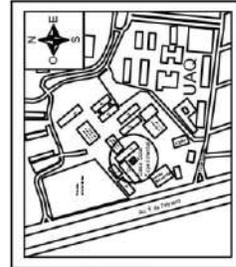


MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)

TESIS
 "DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"

PRESENTA:
 Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado

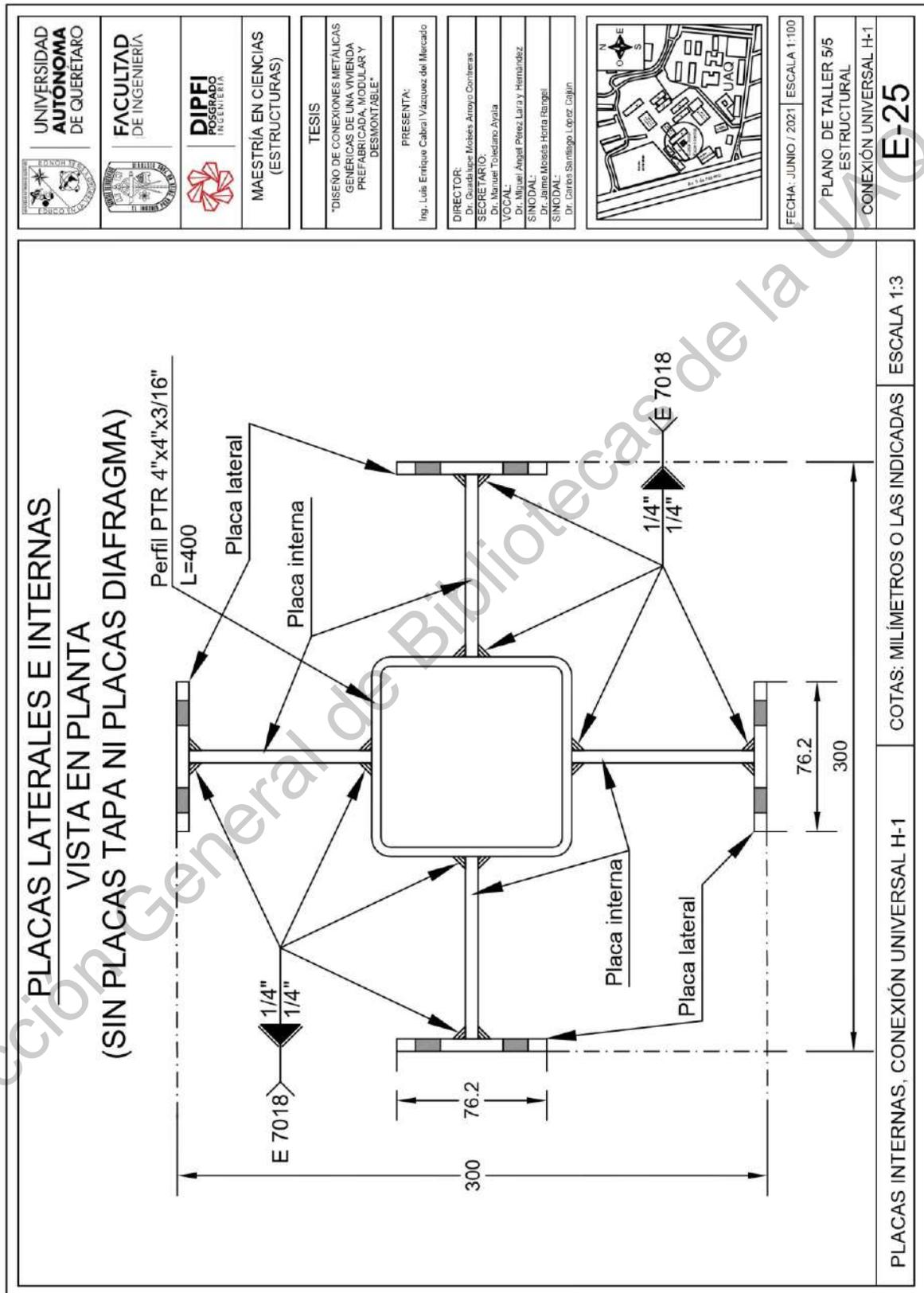
DIRECTOR:
 Dr. Guadalupe Morales Arroyo Contreras
 SECRETARIO:
 Dr. Manuel Tolentino Aguilar
 VOCAL:
 Dr. Manuel Ángel Pérez Lara y Hernández
 Dr. Jaime Moisés Horta Ramírez
 SINDICAL:
 Dr. Carlos Santiago López Cajón



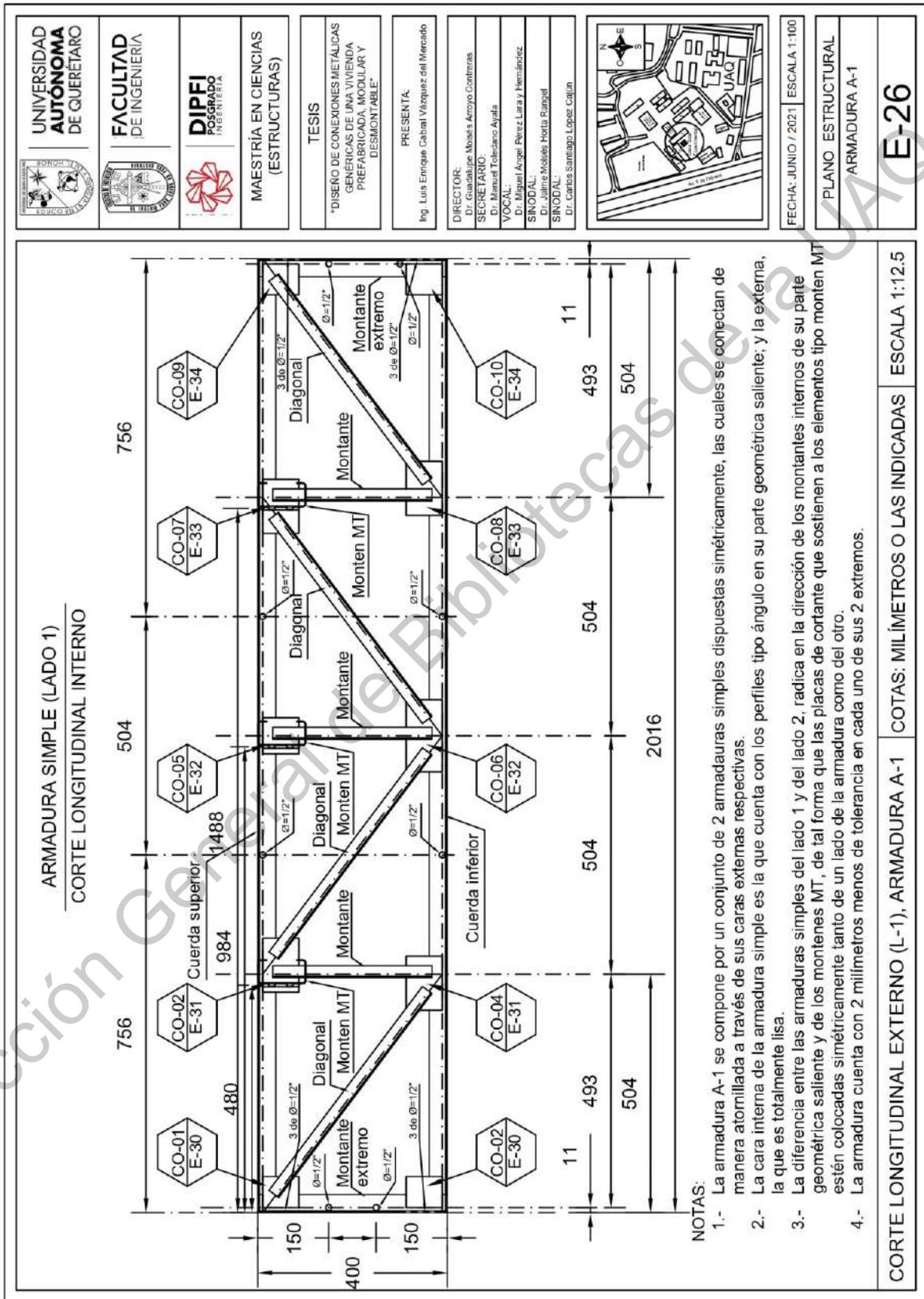
FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100

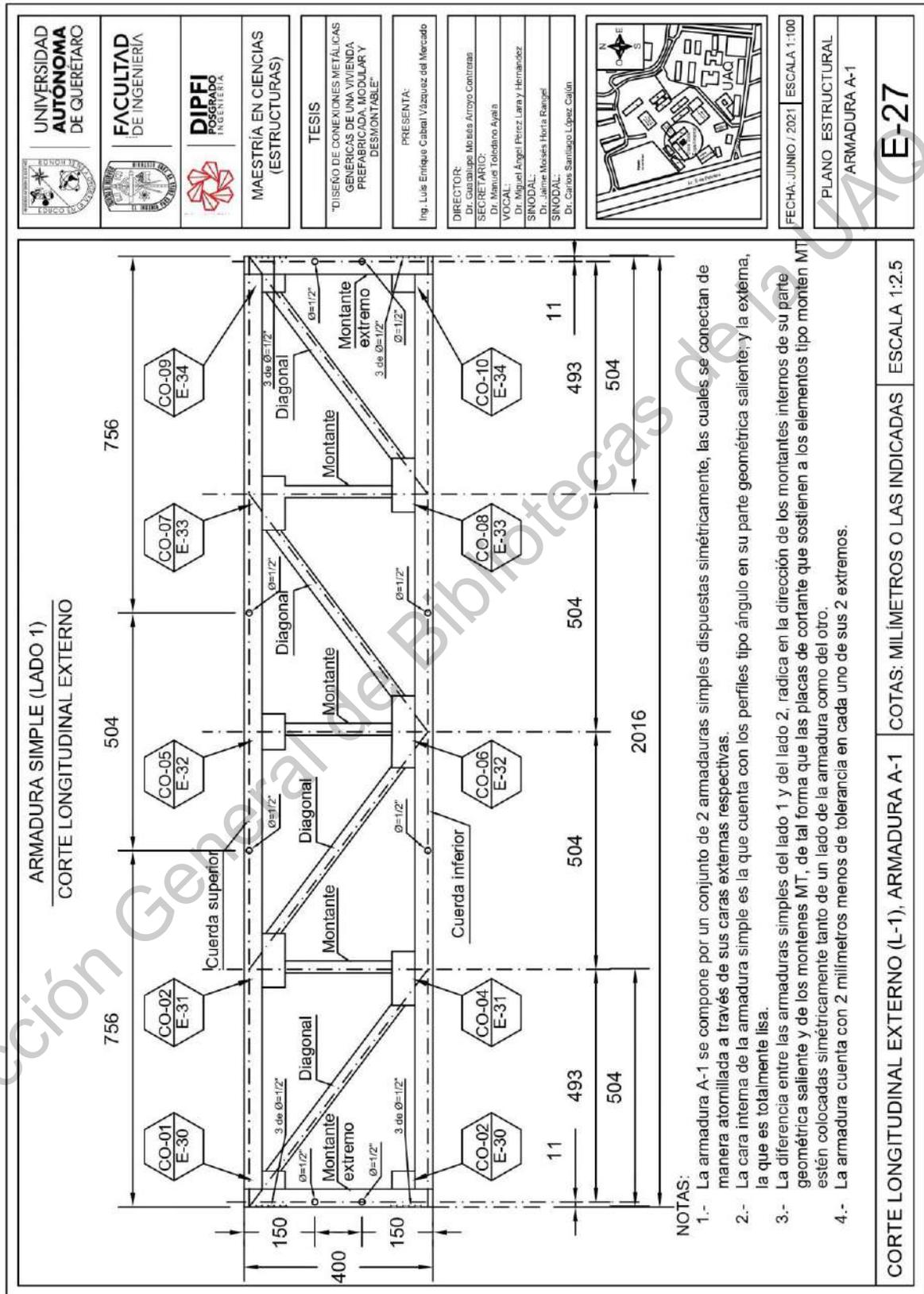
PLANO DE TALLER 4/5 ESTRUCTURAL
 CONEXIÓN UNIVERSAL H-1

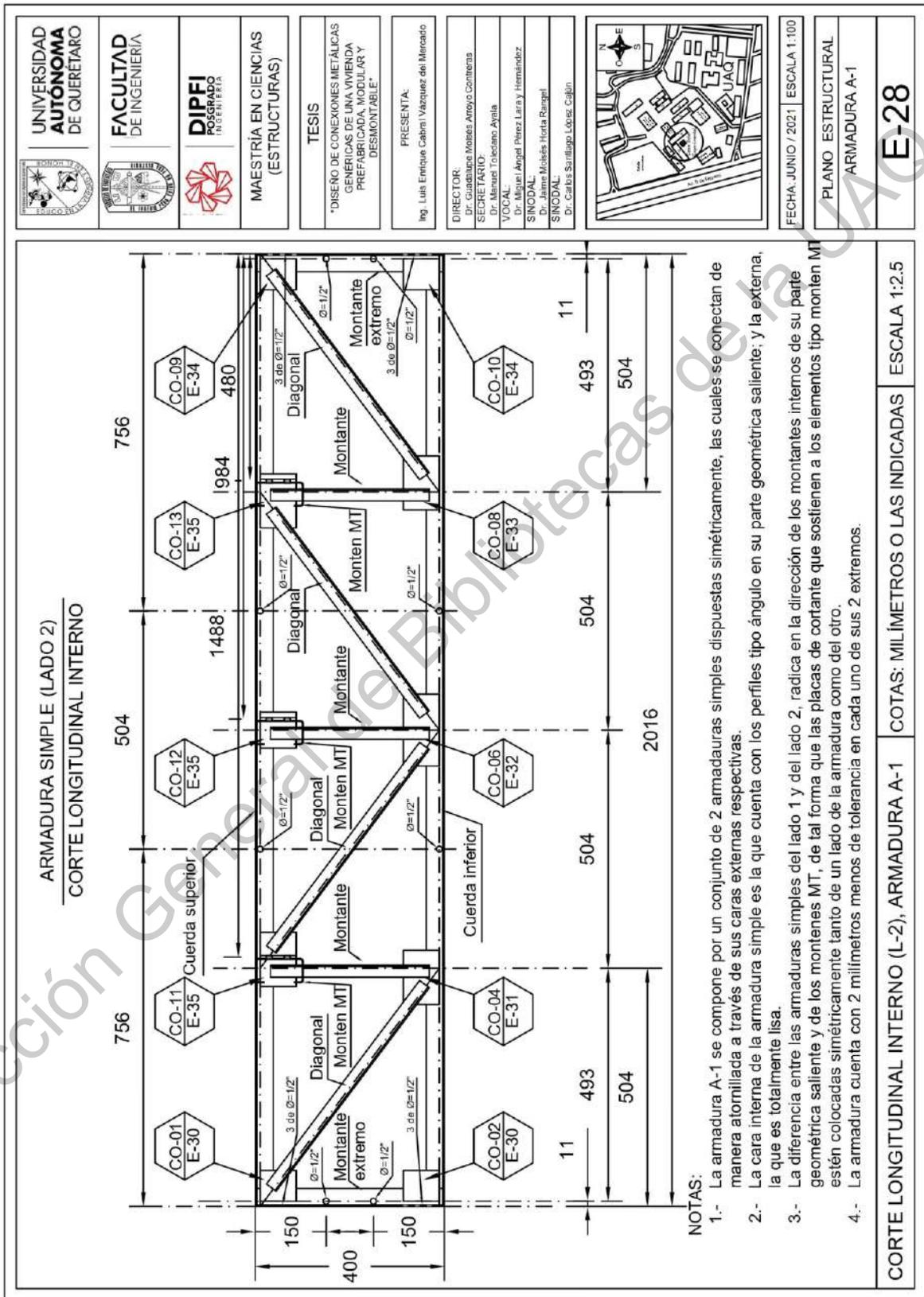
E-24

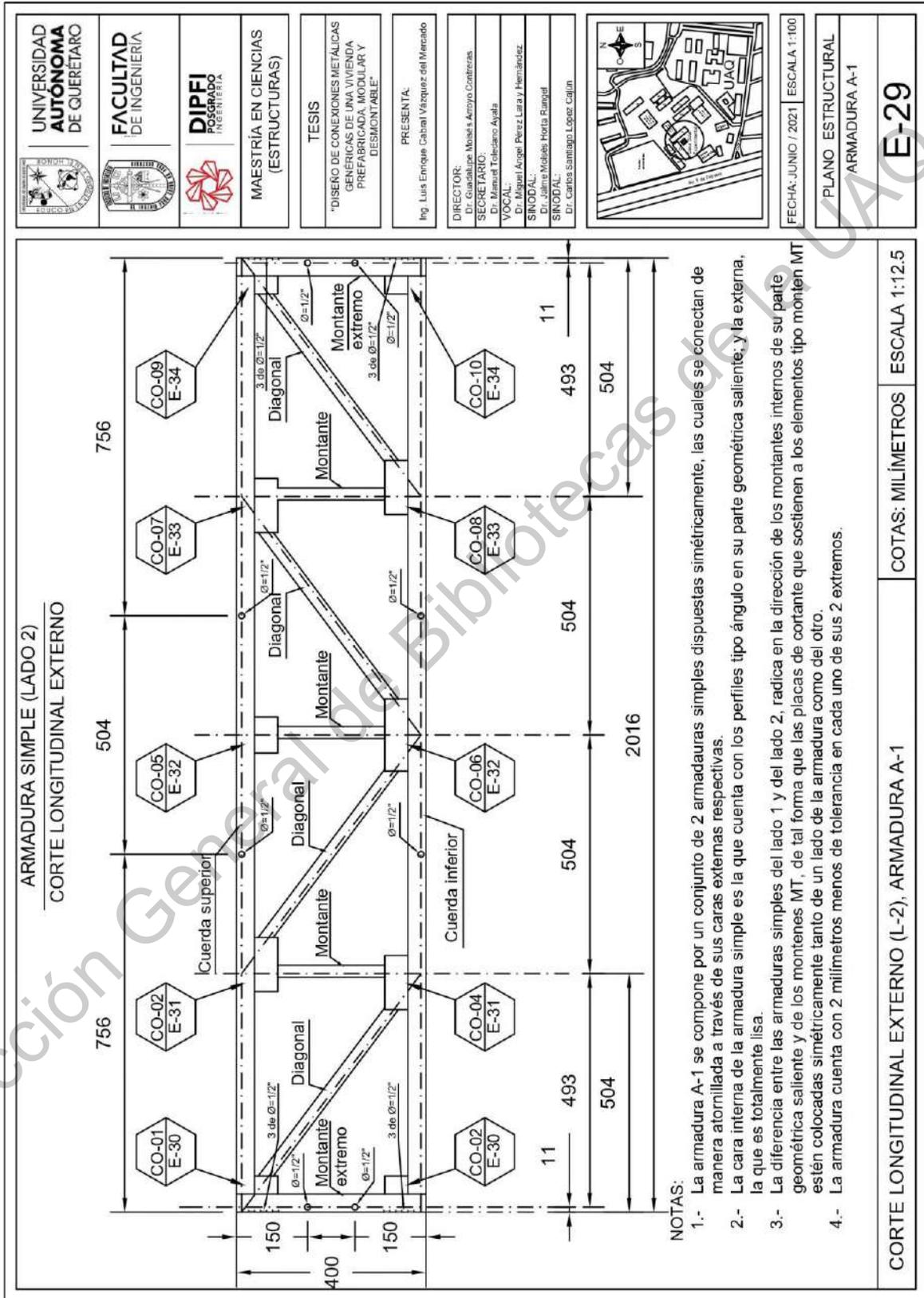


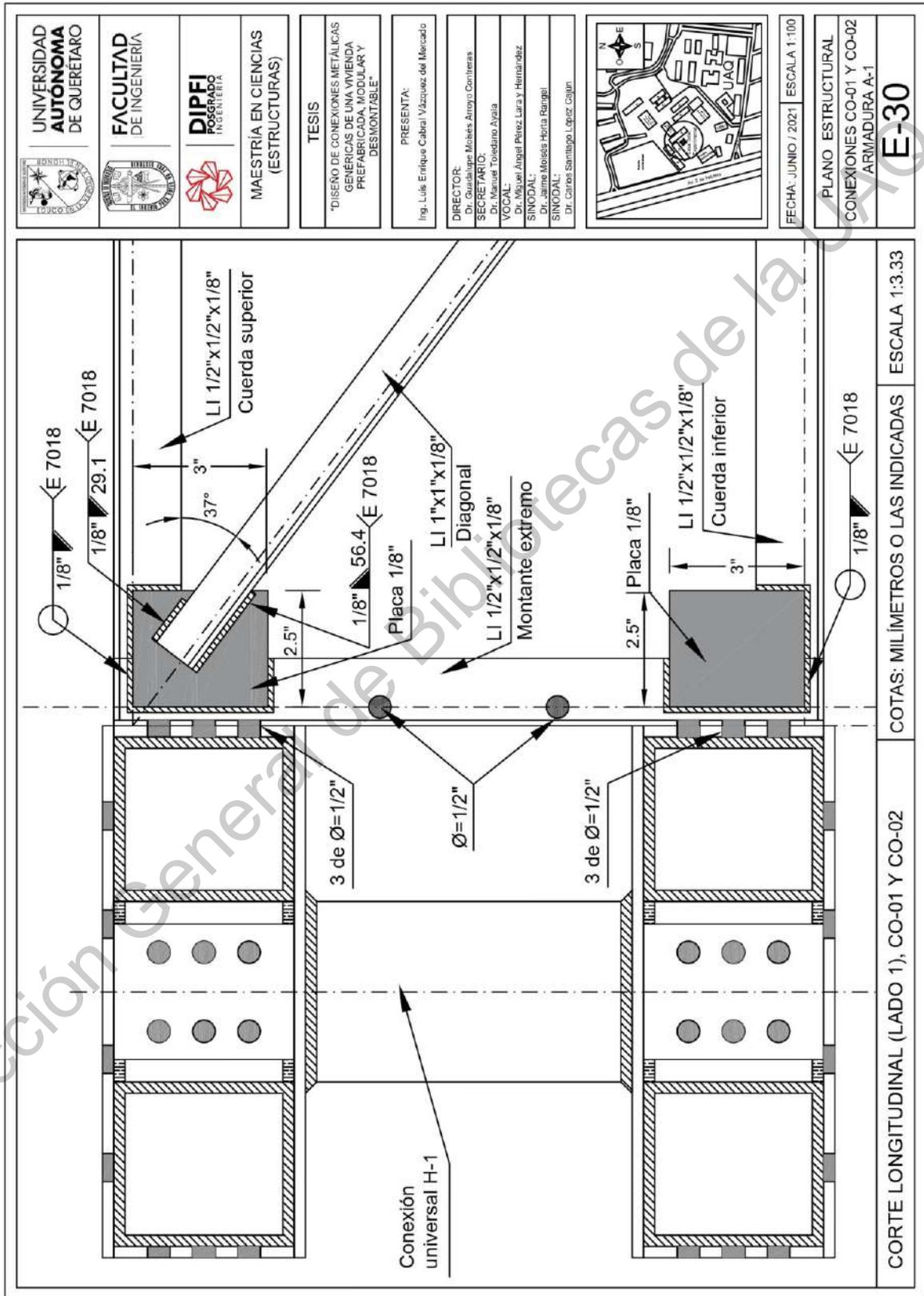
	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
	FACULTAD DE INGENIERÍA
	DIPFI POSGRADO INGENIERÍA
	MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)
	TESIS
	"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"
	PRESENTA: Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado
	DIRECTOR: Dr. Gerardo López Anaya Contreras
	SECRETARIO: Dr. Manuel Teófilo Anaya
	COORDINADOR: Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
	SINODAL: Dr. Carlos Moisés Horta Ramírez
	SINODAL: Dr. Carlos Santiago López Cajón
	FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100
	PLANO DE TALLER 5/5 ESTRUCTURAL CONEXIÓN UNIVERSAL H-1
	E-25

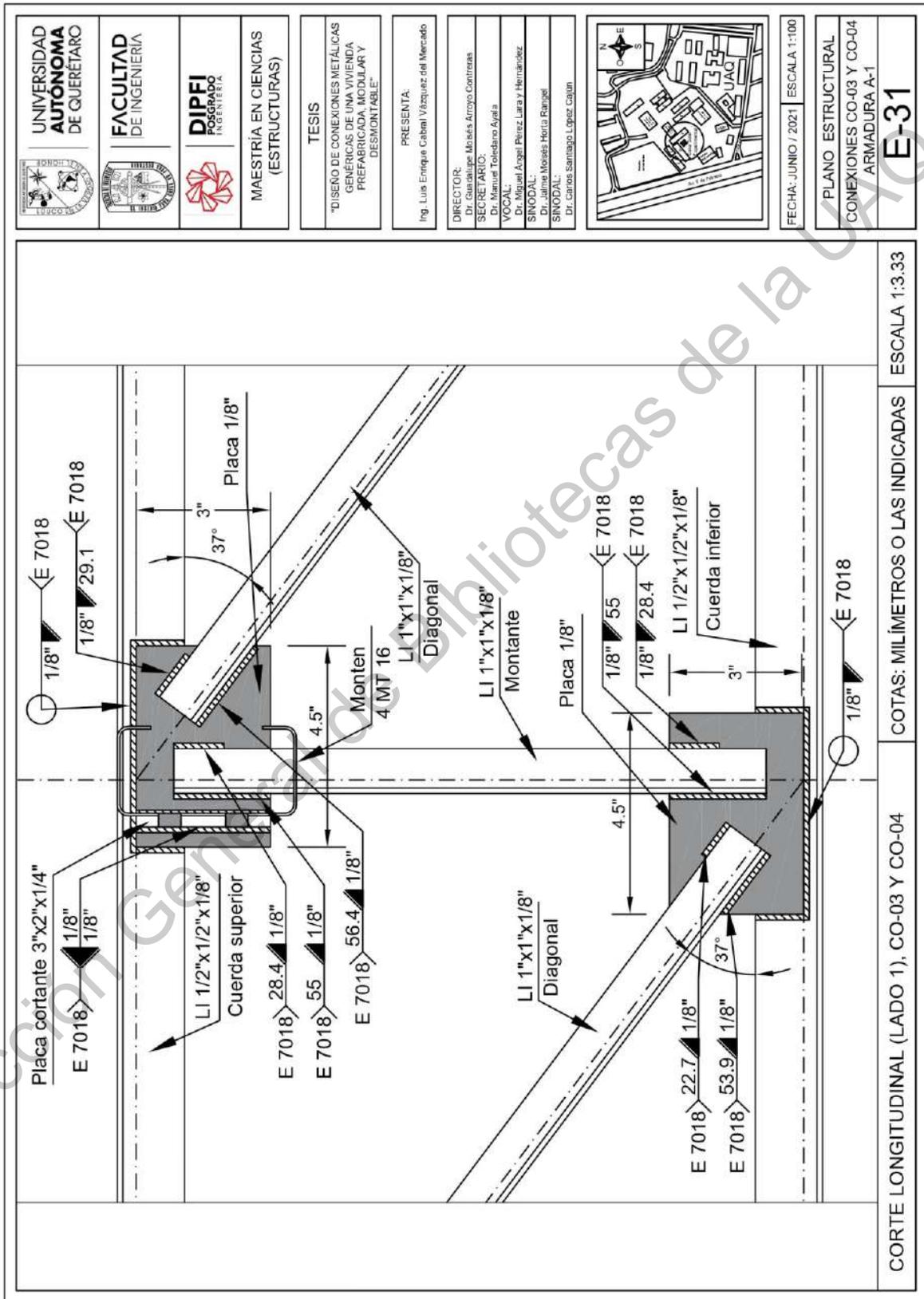


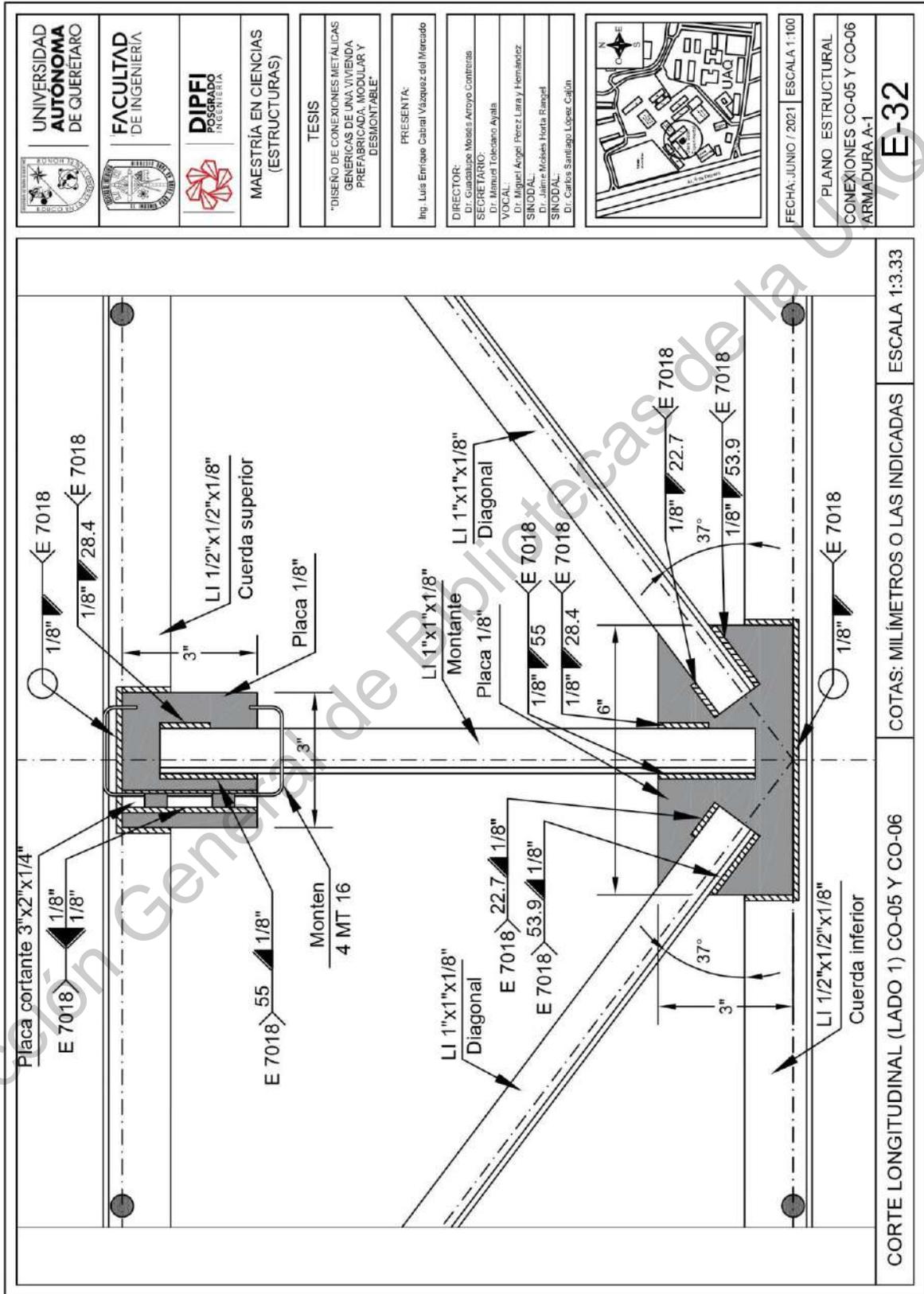


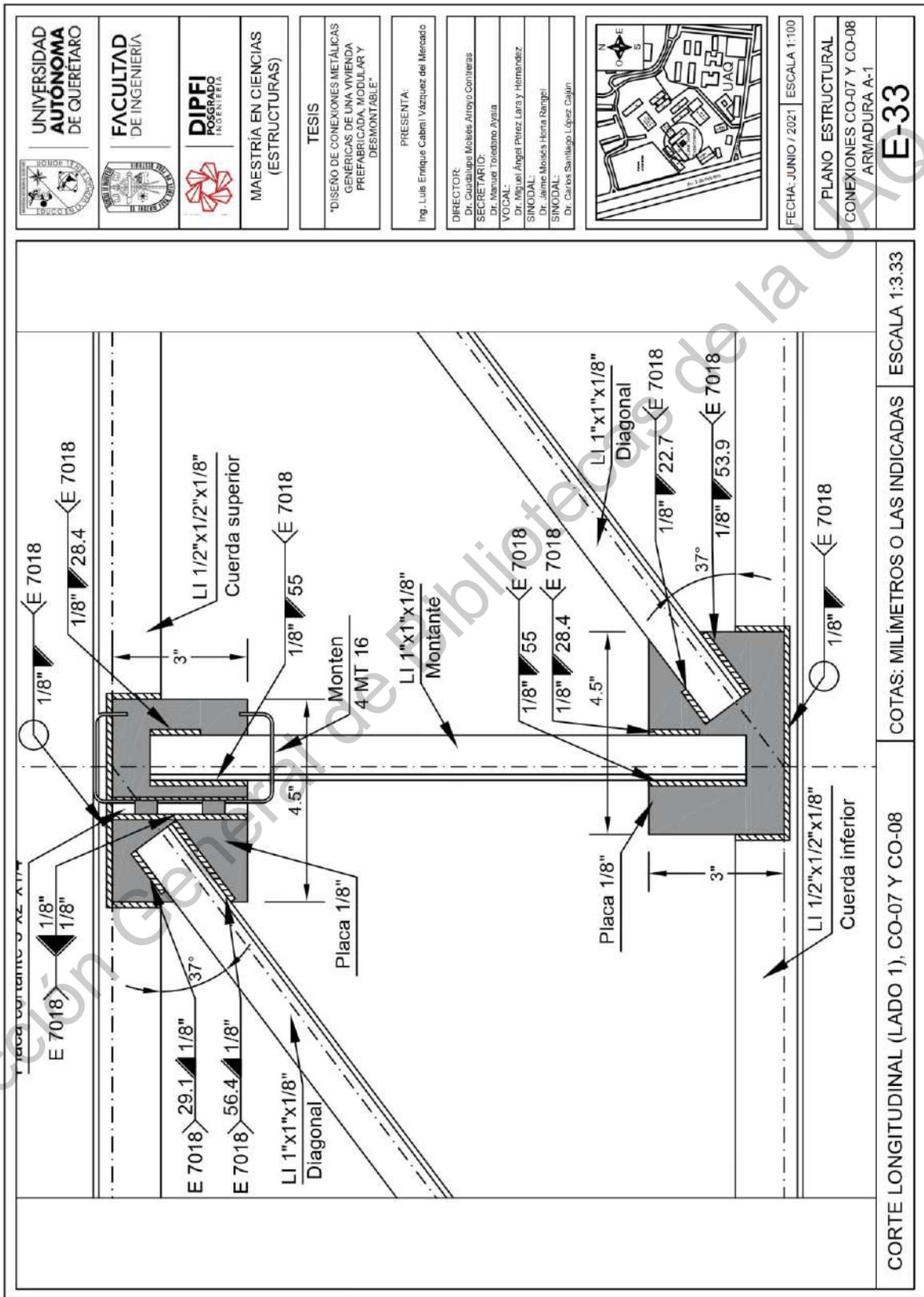


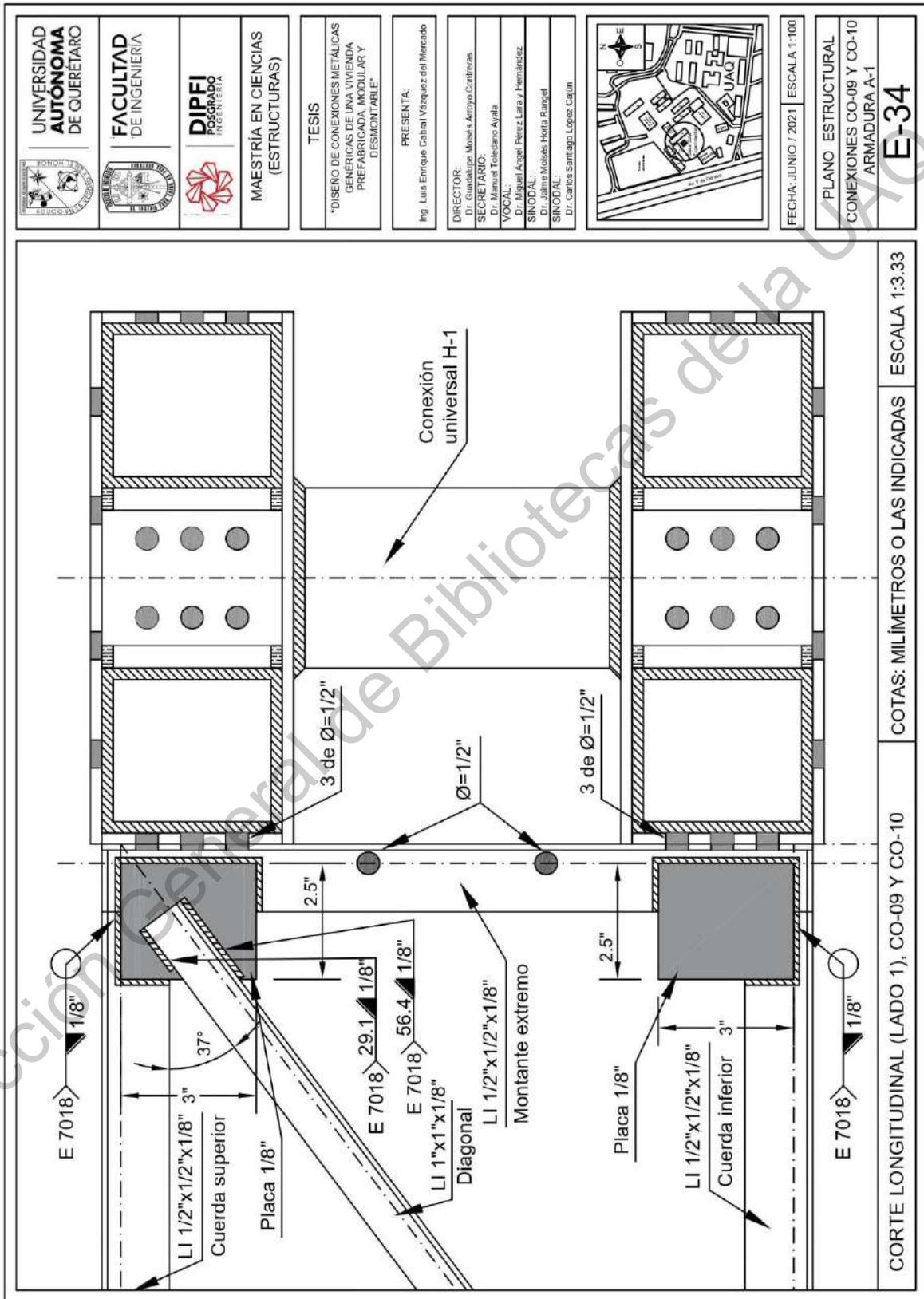


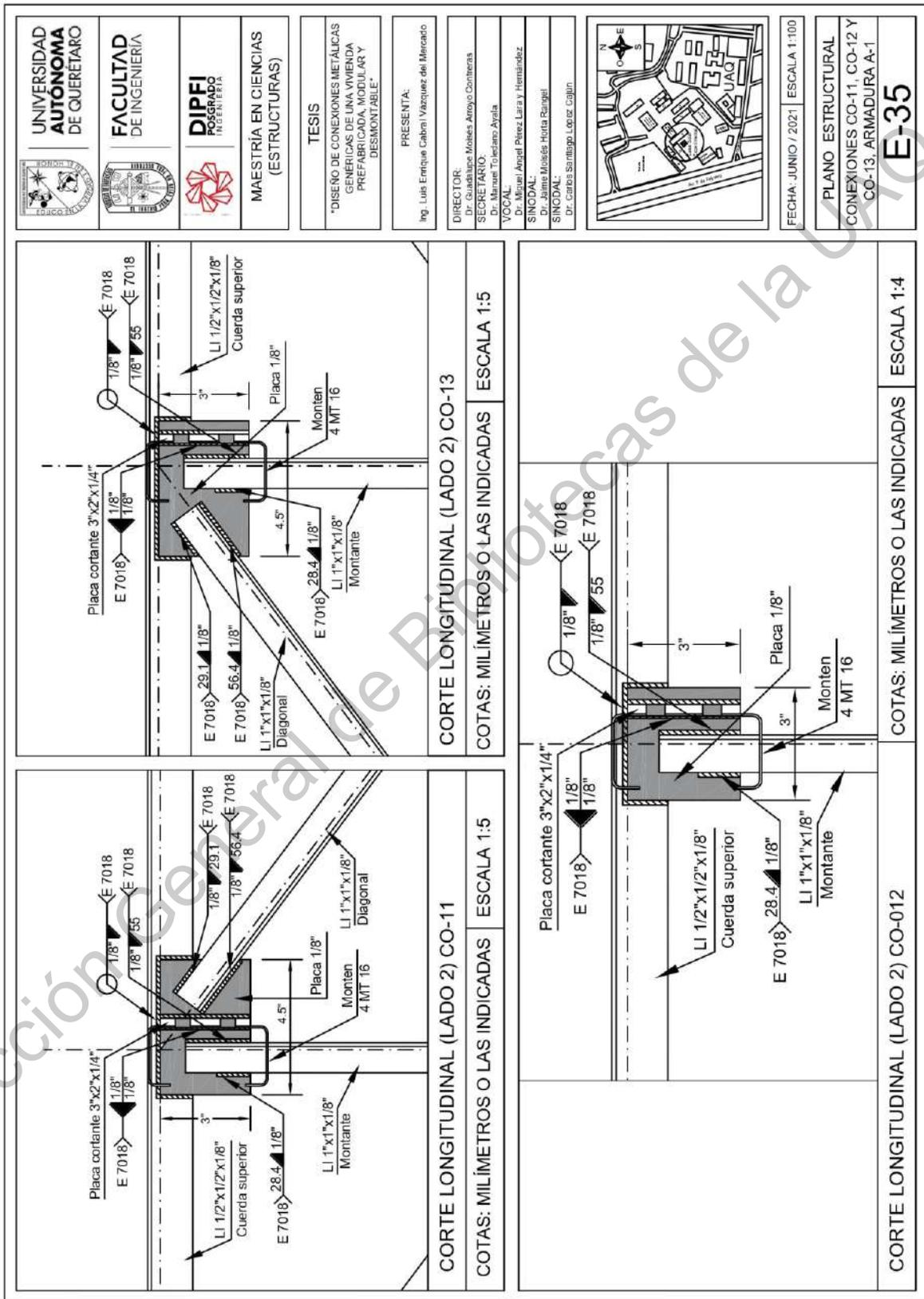


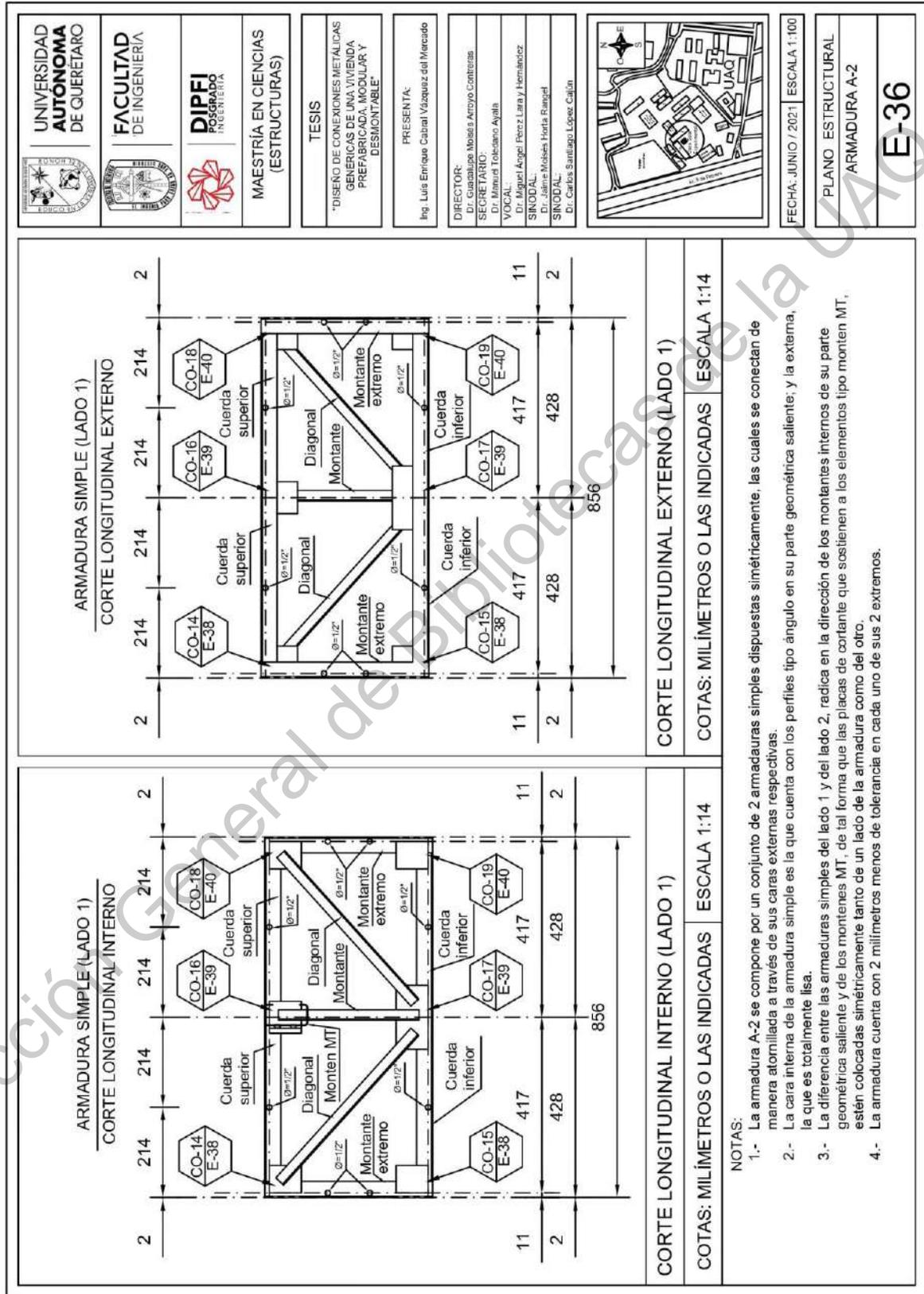


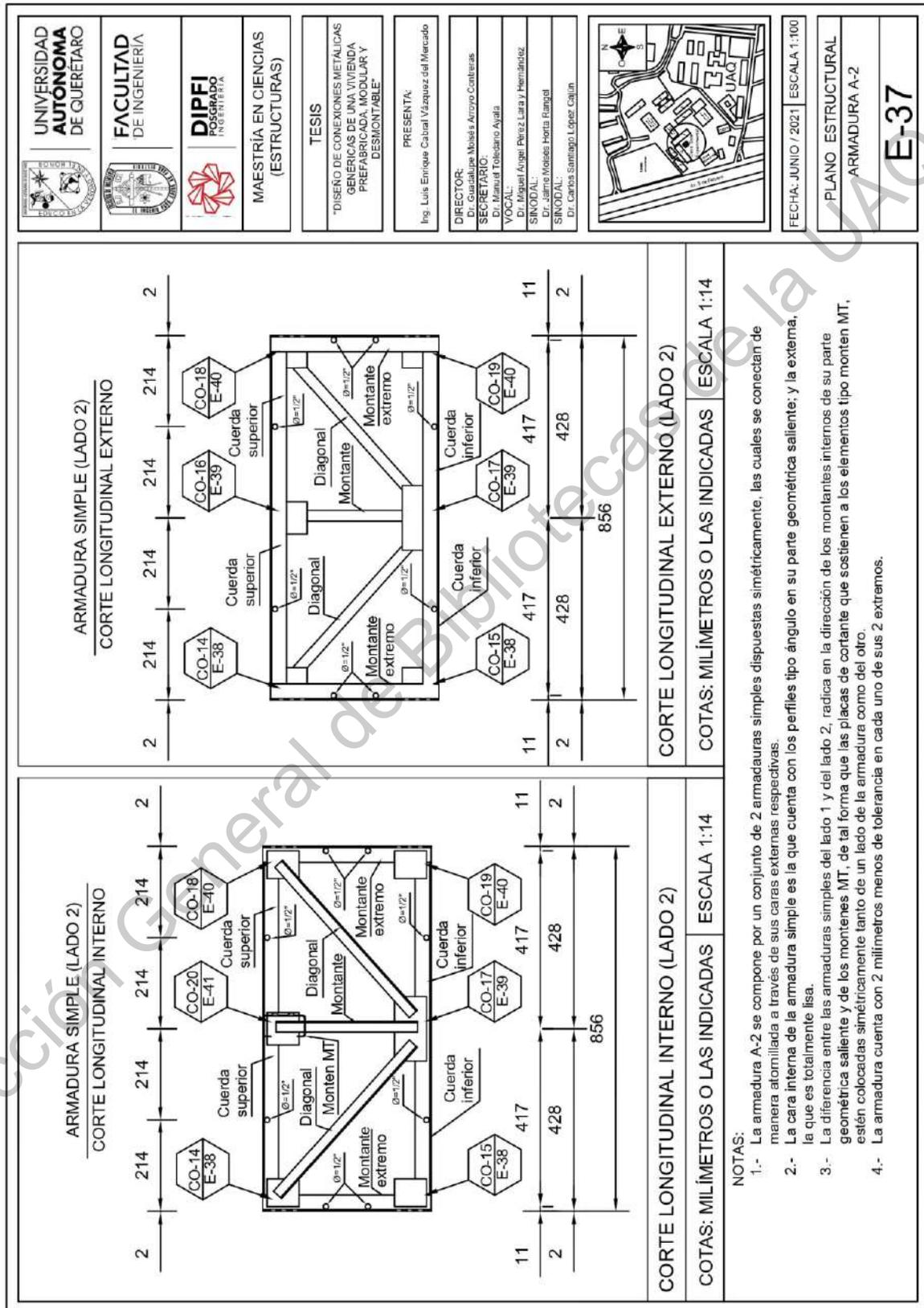


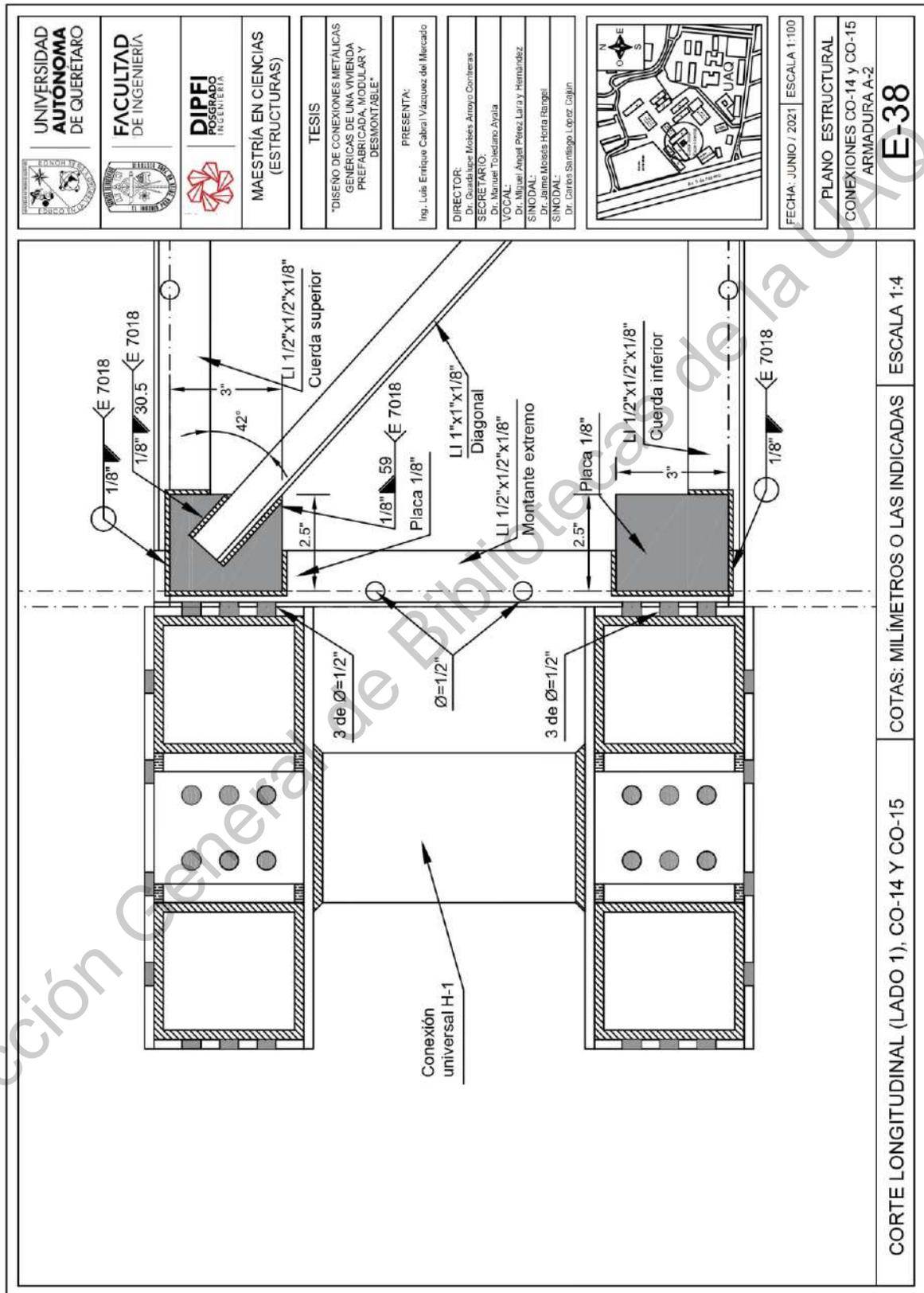


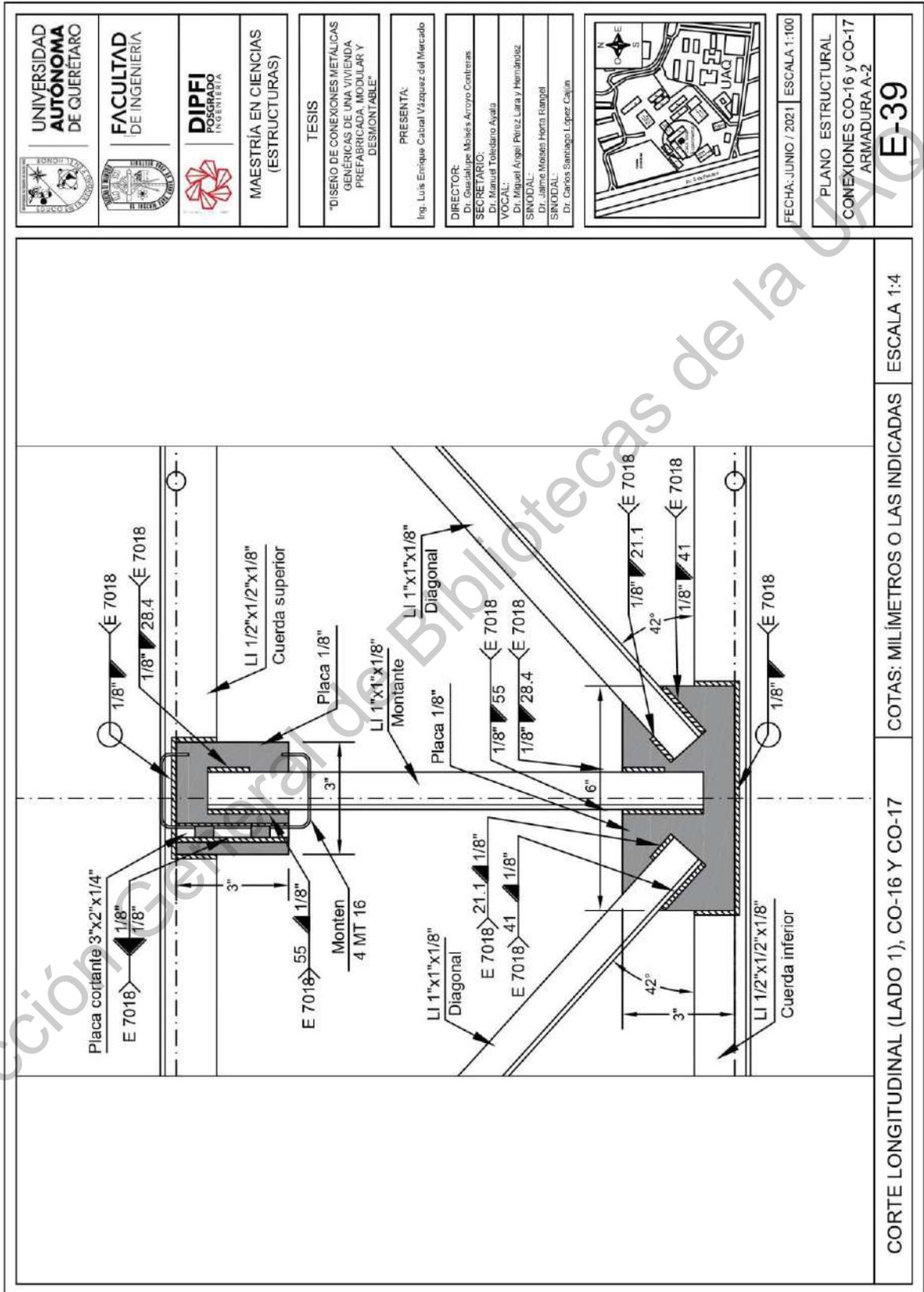


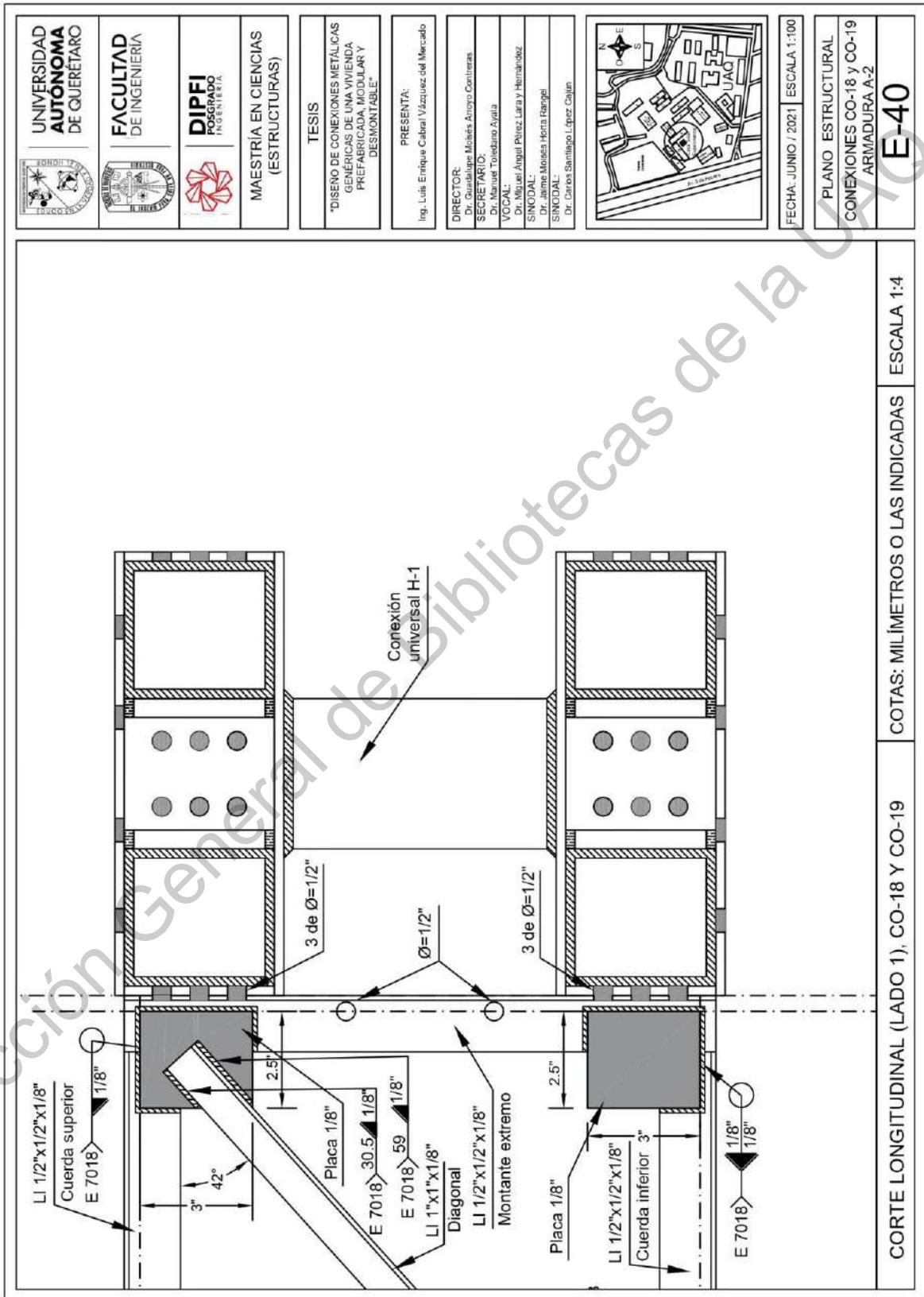


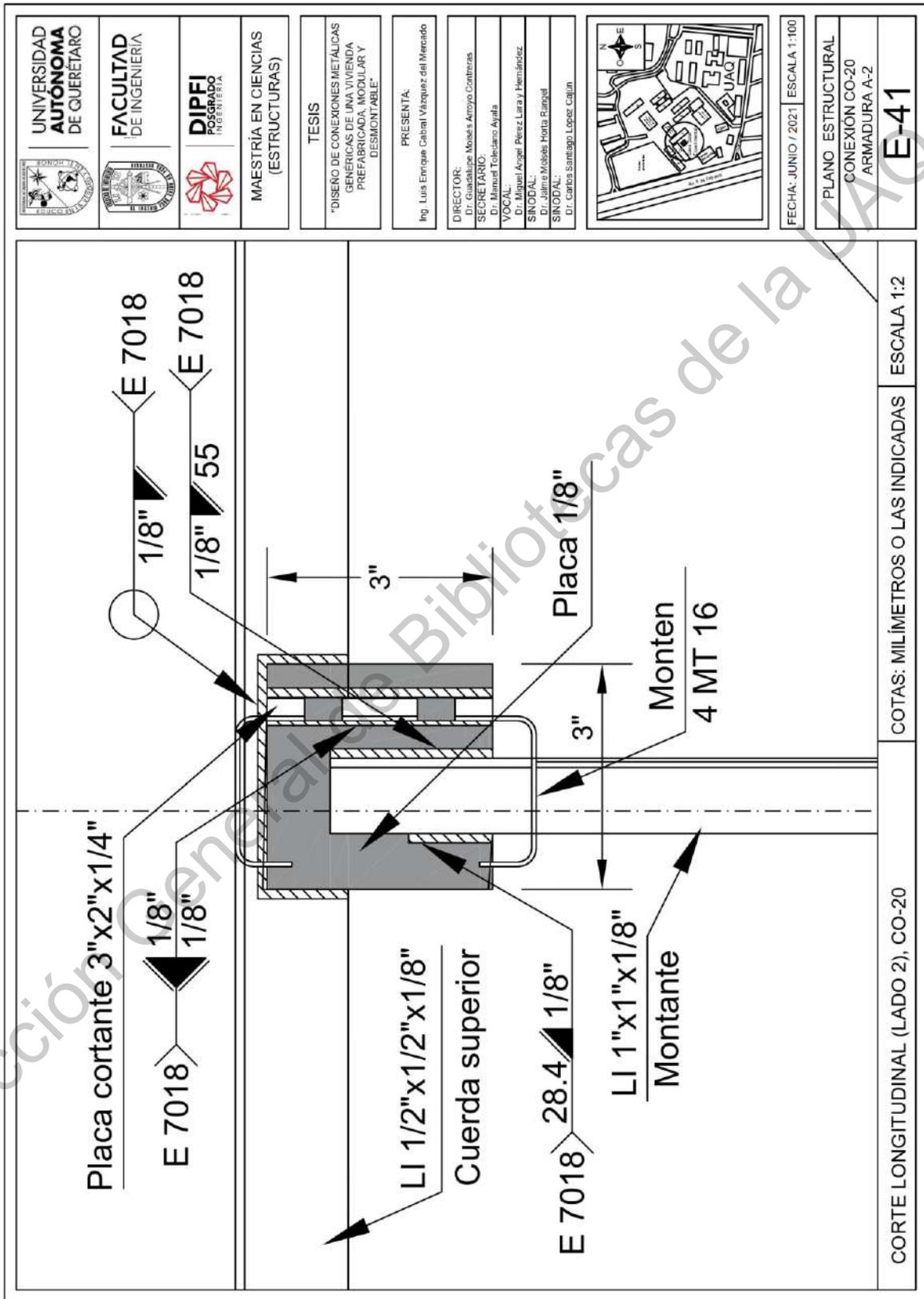










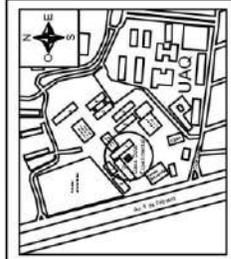


MAESTRÍA EN CIENCIAS
(ESTRUCTURAS)

TESIS
"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS
GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA
PREFABRICADA, MODULAR Y
DESMONTABLE"

PRESENTA:
Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado

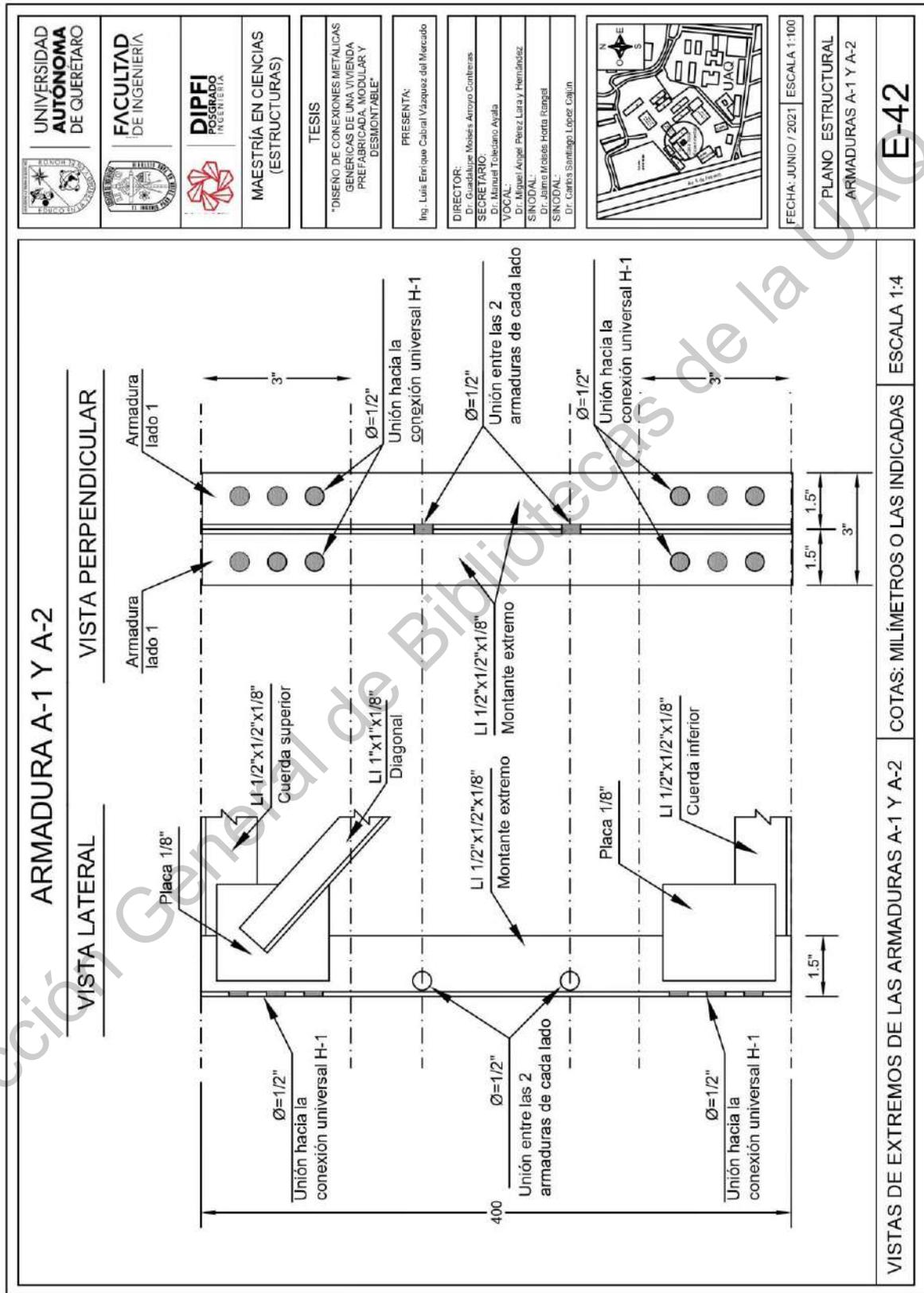
DIRECTOR:
Dr. Carlos José Morales Arroyo Contreras
SECRETARIO:
Dr. Manuel Tolibiano Ayala
VOCAL:
Dr. Manuel Ángel Pérez Laray Hernández
SINDICAL:
Dr. Jairo Mésida Horta Rangel
SINDICAL:
Dr. Carlos Santiago López Cajun

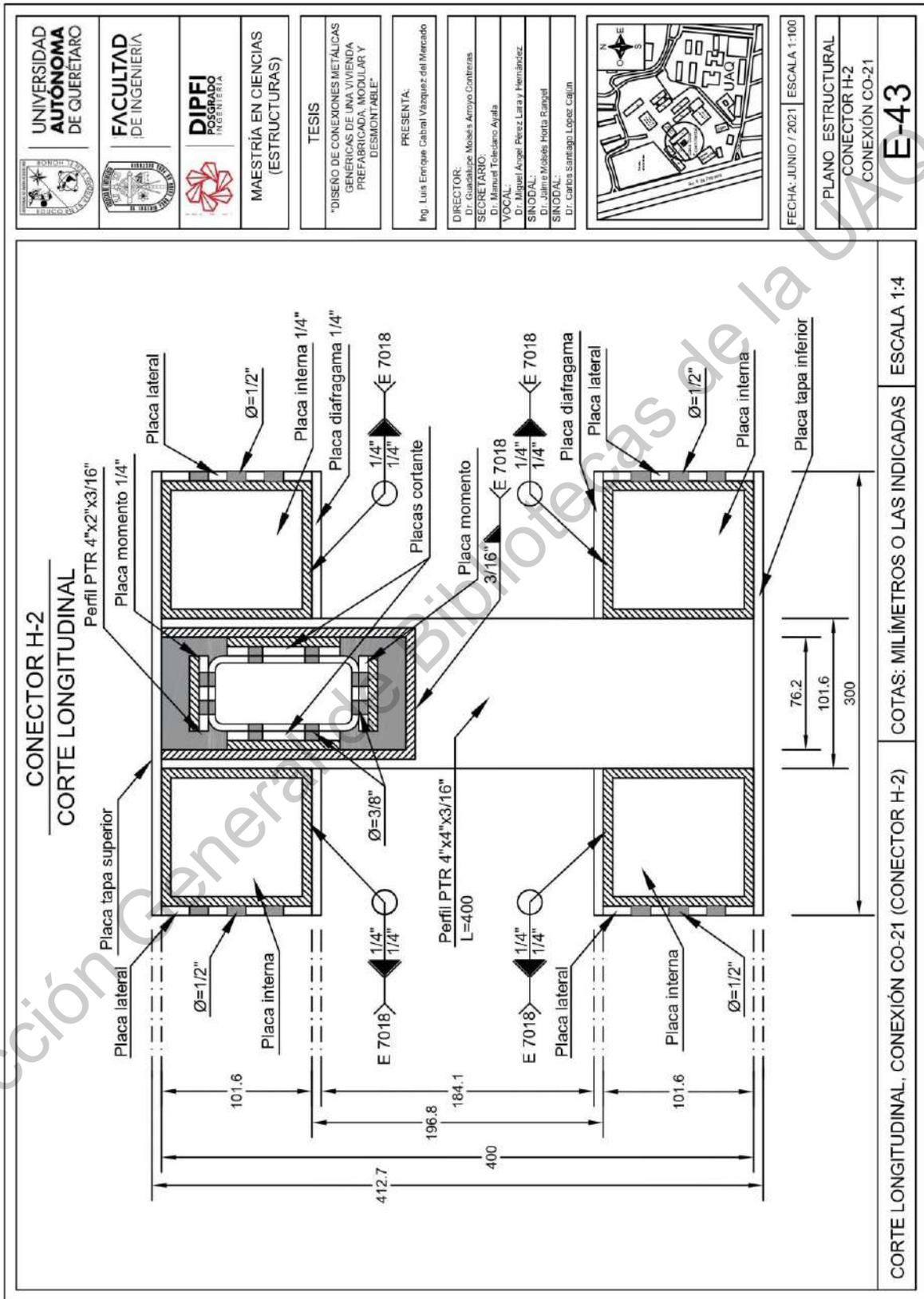


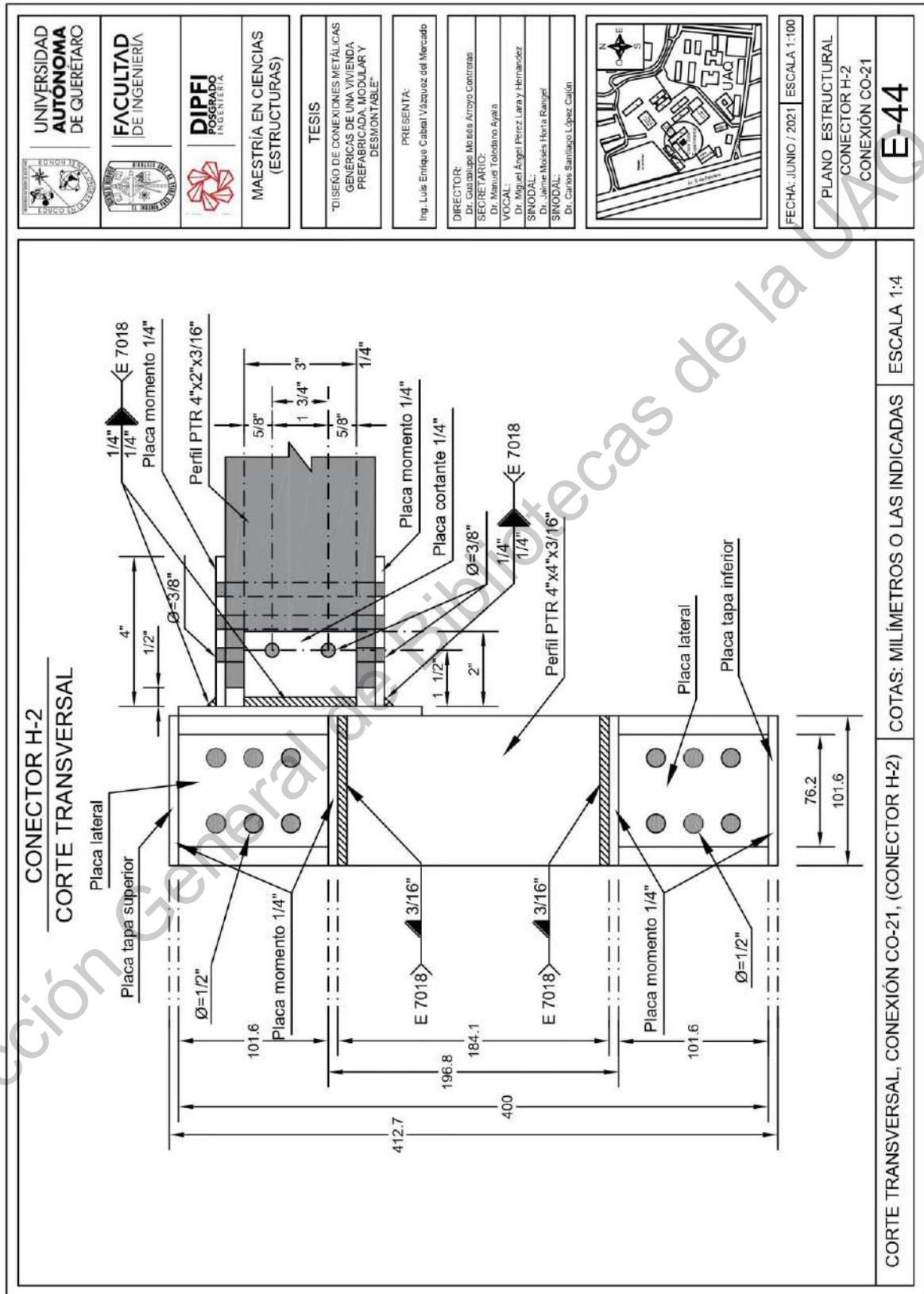
FECHA: JUNIO / 2021 | ESCALA 1:100

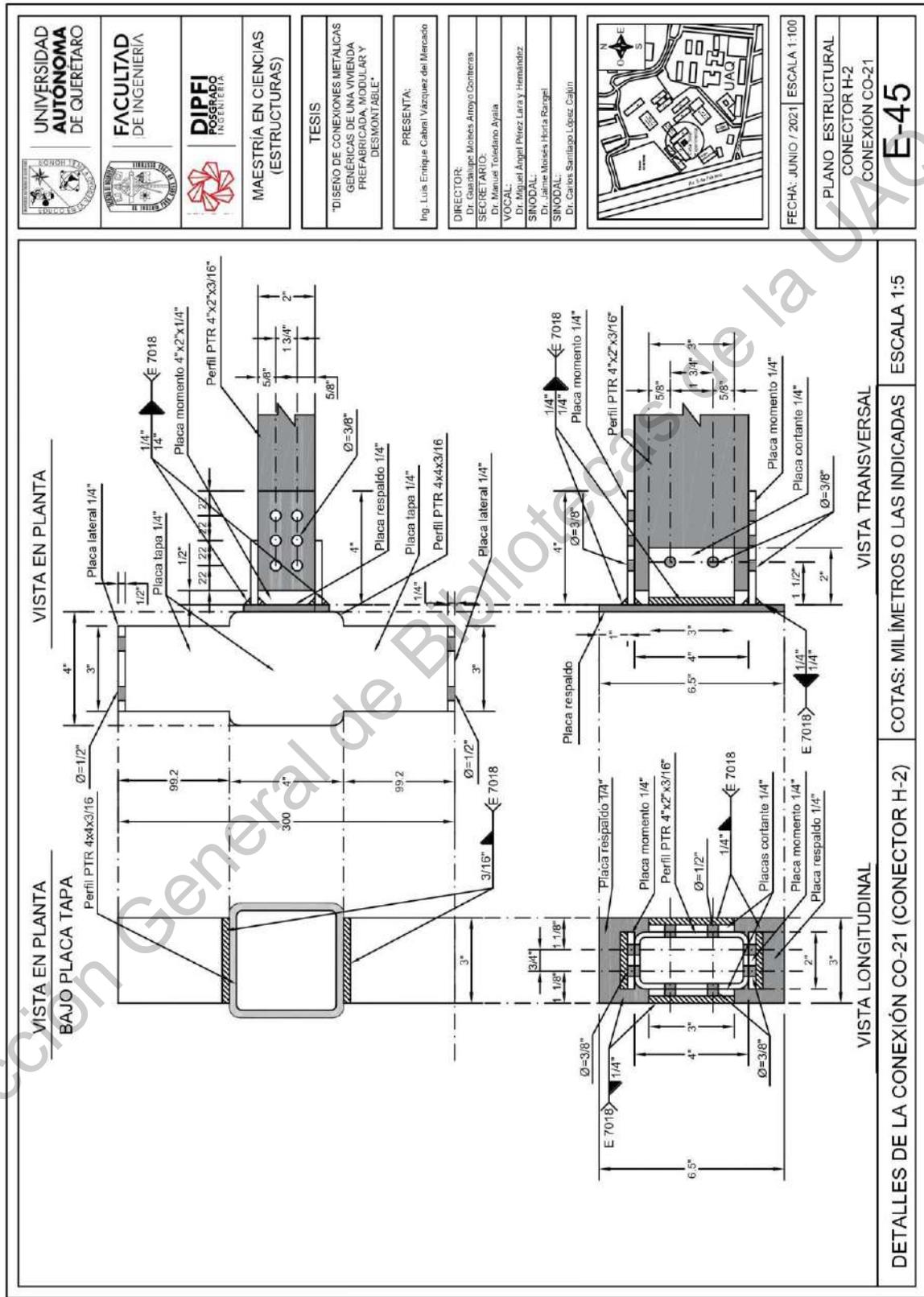
PLANO ESTRUCTURAL
CONEXIÓN CO-20
ARMADURA A-2

E-41





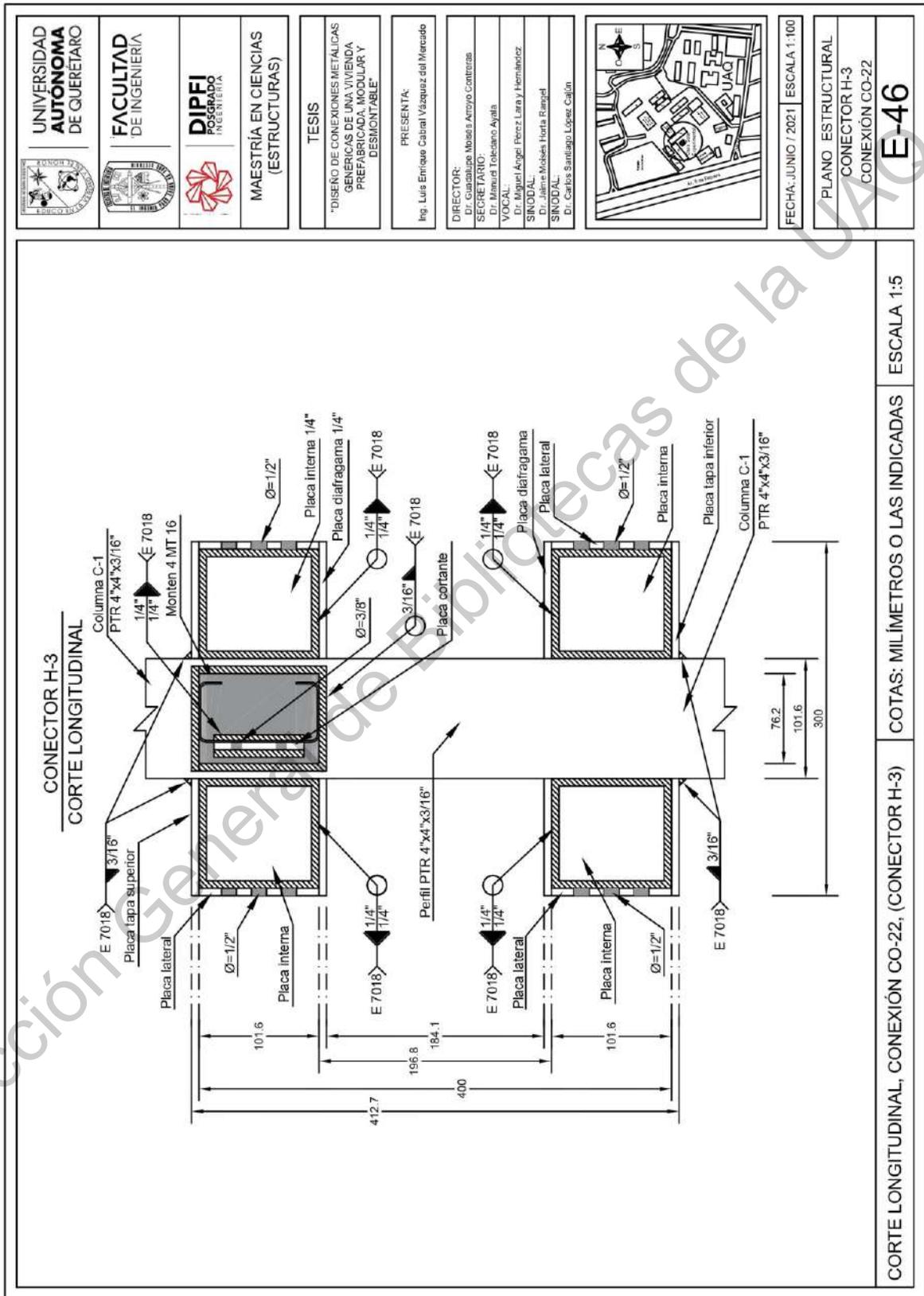




	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
	FACULTAD DE INGENIERÍA
	DIPFI POSGRADO INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)	
TESIS	
"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"	
PRESENTA:	
Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado	
DIRECTOR:	Dr. Gabriel Mejía Arroyo Contreras
SECRETARIO:	Dr. Manuel Toledano Ayala
VOCAL:	Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
SINODAL:	Dr. Jaime Meléndez Horta Rangel
SINODAL:	Dr. Carlos Sanllago López Cajón
FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100	
PLANO ESTRUCTURAL	
CONECTOR H-2	
E-45	

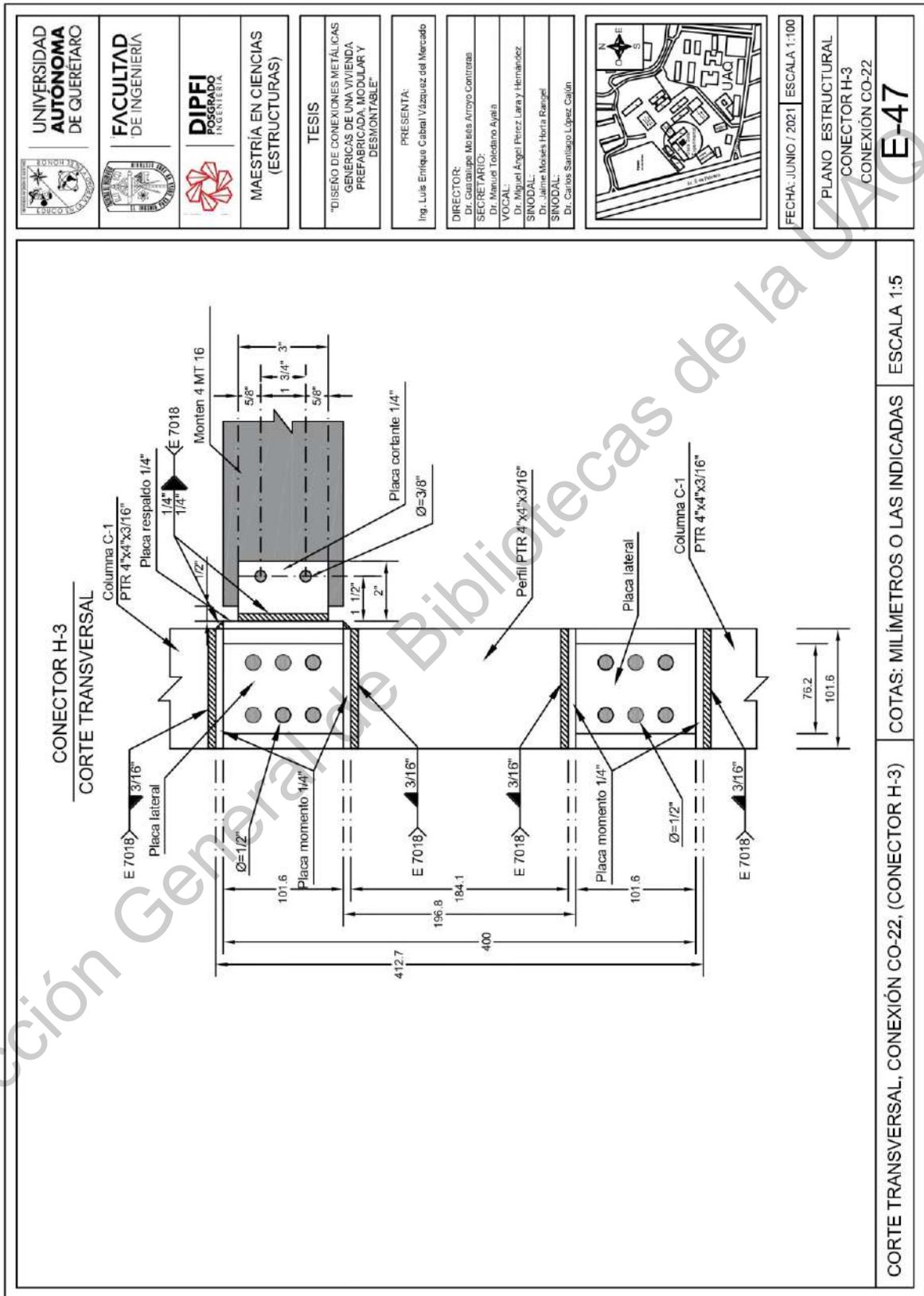
Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

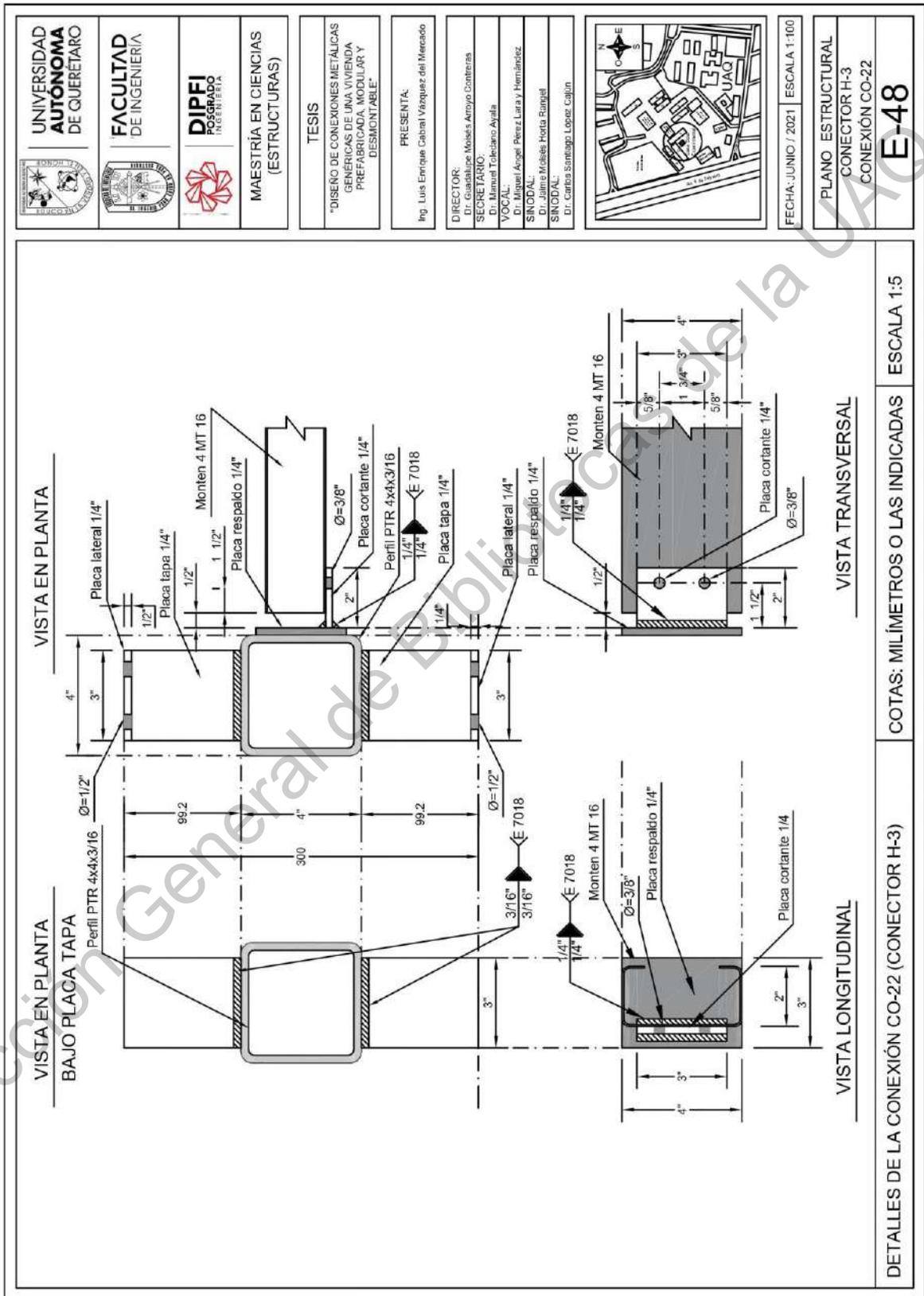
DETALLES DE LA CONEXIÓN CO-21 (CONECTOR H-2) COTAS: MILÍMETROS O LAS INDICADAS ESCALA 1:5



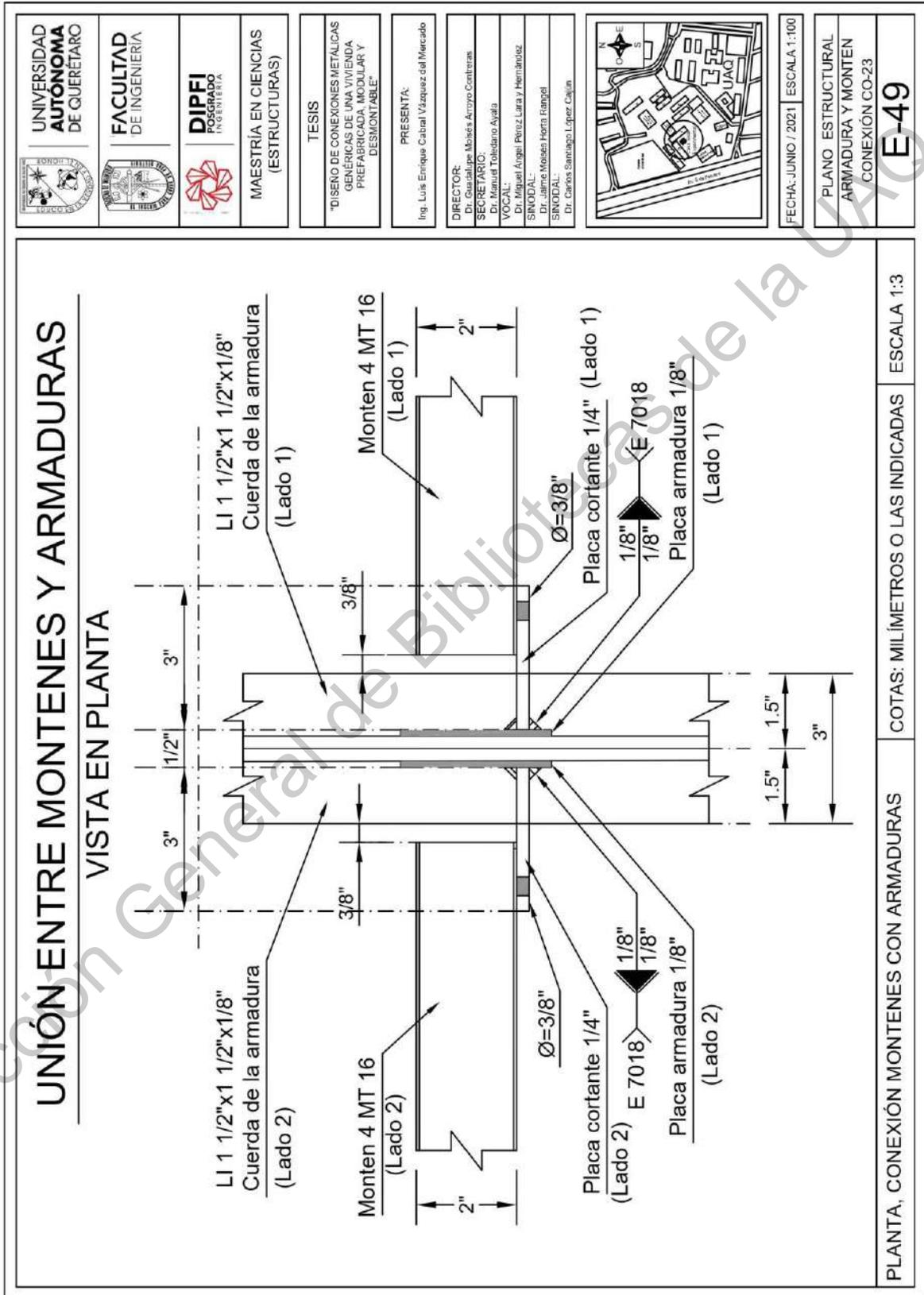
CORTE LONGITUDINAL, CONEXIÓN CO-22, (CONECTOR H-3) COTAS: MILIMETROS O LAS INDICADAS ESCALA 1:5

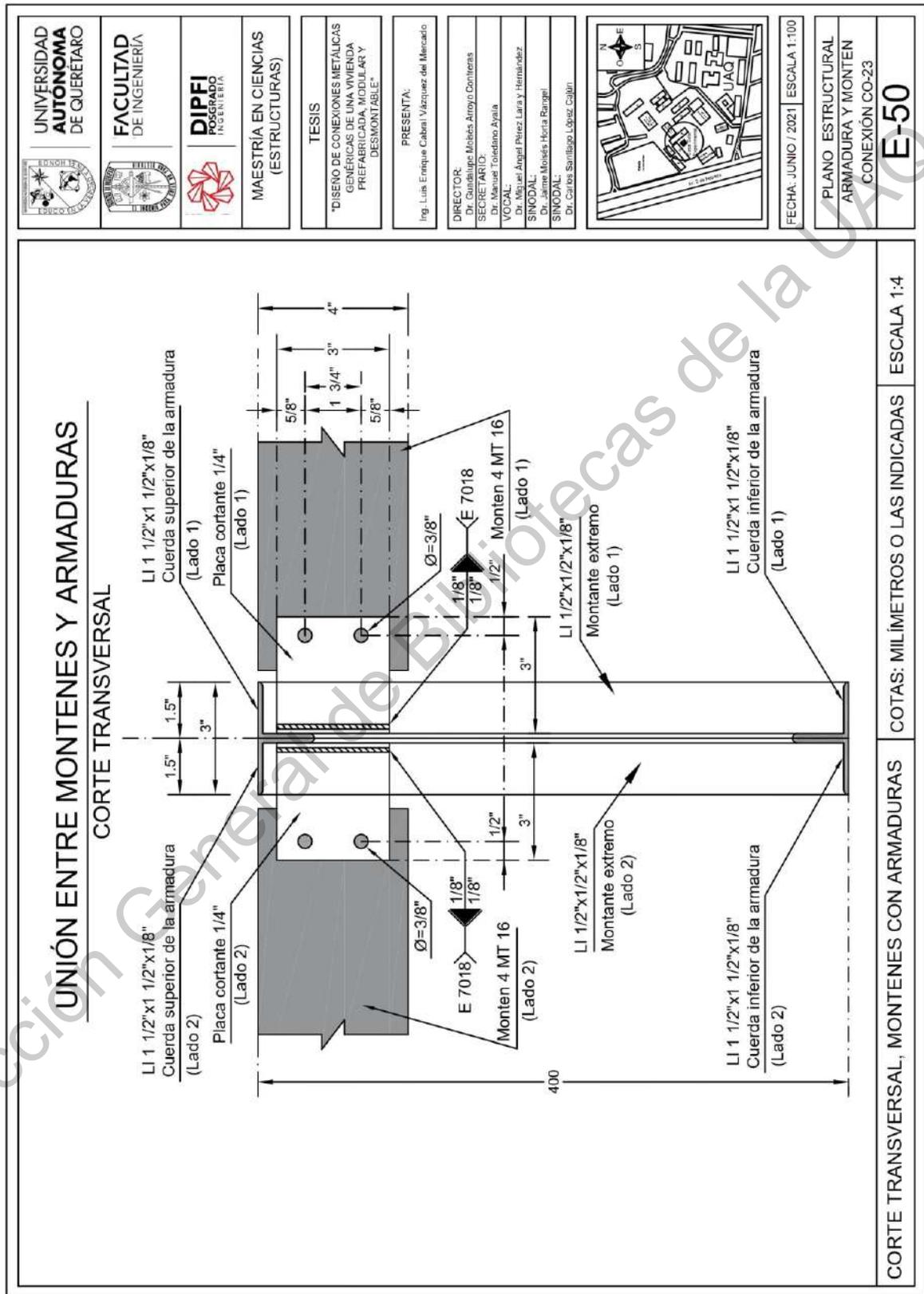
	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
	FACULTAD DE INGENIERÍA
	DIPFI POSGRADO INGENIERÍA
	MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)
	TESIS
	"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"
	PRESENTA: Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado
	DIRECTOR: Dr. Gabriel Moisés Arroyo Contreras
	SECRETARIO: Dr. Manuel Toboacano Ayala
	VOCAL: Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
	SINDICAL: Dr. Moisés Horta Rangel
	SINDICAL: Dr. Carlos Santiago López Cajón
	FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100
	PLANO ESTRUCTURAL CONECTOR H-3 CONEXIÓN CO-22
	E-46





	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
	FACULTAD DE INGENIERÍA
	DIPFI POSGRADO INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)	
TESIS "DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"	
PRESENTA: Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado	
DIRECTOR: Dr. Guadalupe Morales Arroyo Contreras	
SECRETARIO: Dr. Manuel Tolciano Aguilar	
VOCAL: Dr. Manuel Ángel Pérez Lara y Hernández	
SINDICAL: Dr. Jaime Morales Horta Romáez	
SINDICAL: Dr. Carlos Santiago López Cajón	
FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100	
PLANO ESTRUCTURAL CONECTOR H-3 CONEXIÓN CO-22	
E-48	





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO



FACULTAD DE INGENIERÍA



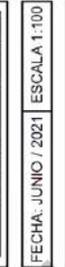
DIPFI POSGRADO INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)

TESIS
 "DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"

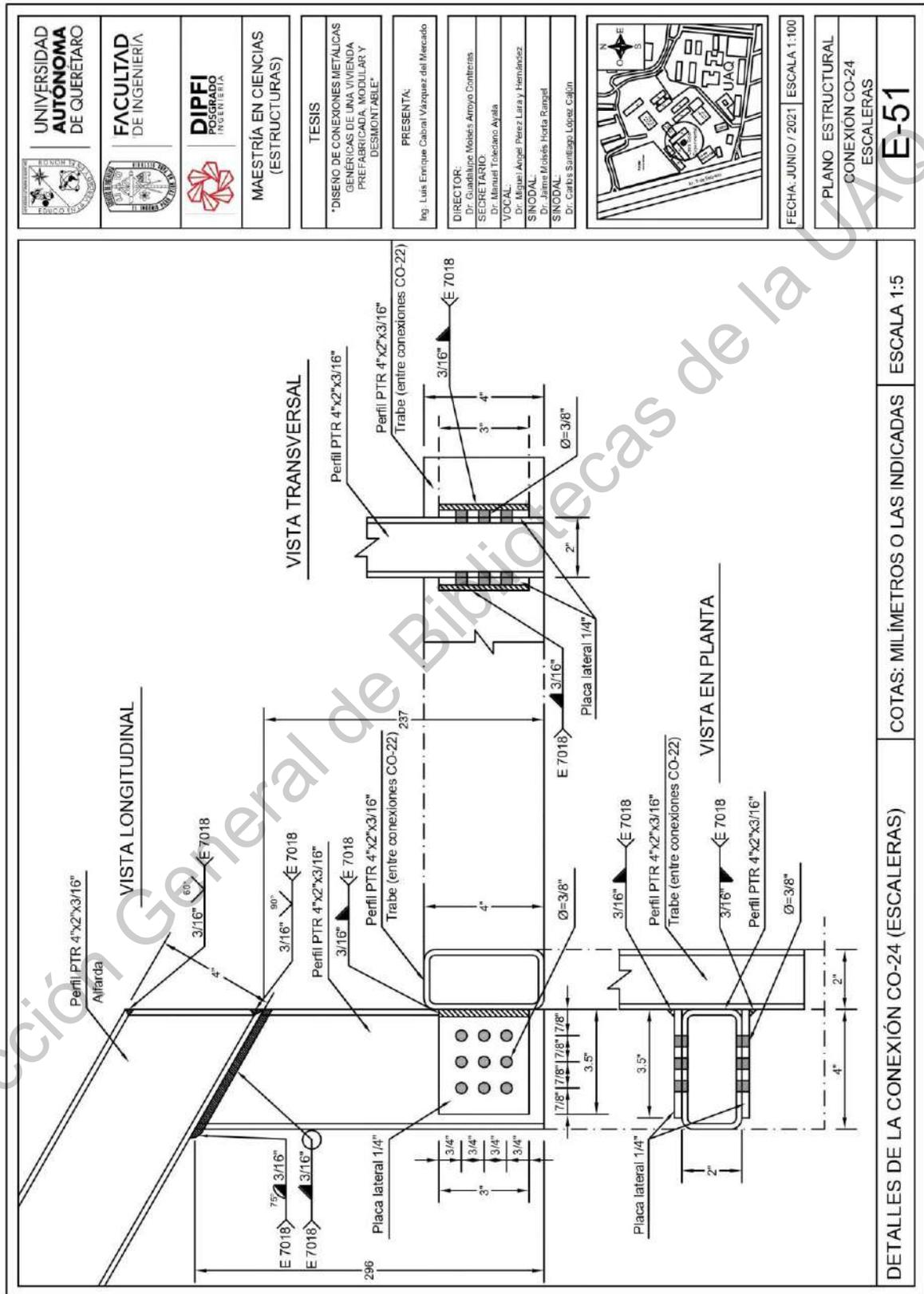
PRESENTA:
 Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado

DIRECTOR:
 Dr. Lourdes Meléndez Arroyo Contreras
 SECRETARIO:
 Dr. Manuel Tolentino Ayala
 VOCAL:
 Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
 SINDICAL:
 Dr. Jaime Moisés Horta Reátegui
 SINDICAL:
 Dr. Carlos Santiago López Cajón



FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100

PLANO ESTRUCTURAL ARMADURA Y MONTEN CONEXIÓN CO-23
E-50



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

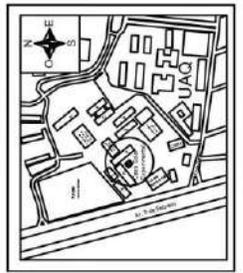


DIPFI POSGRADO INGENIERÍA
 MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)

TESIS
 DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE

PRESENTA:
 Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado

DIRECTOR:
 Ing. José Moisés Arroyo Contreras
 SECRETRARIO:
 Dr. Manuel Tristán Ayala
 VOCAL:
 Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
 SINDICAL:
 Dr. Jaime Miralés Horta Rangel
 SINDICAL:
 Dr. Carlos Santiago López Cajón

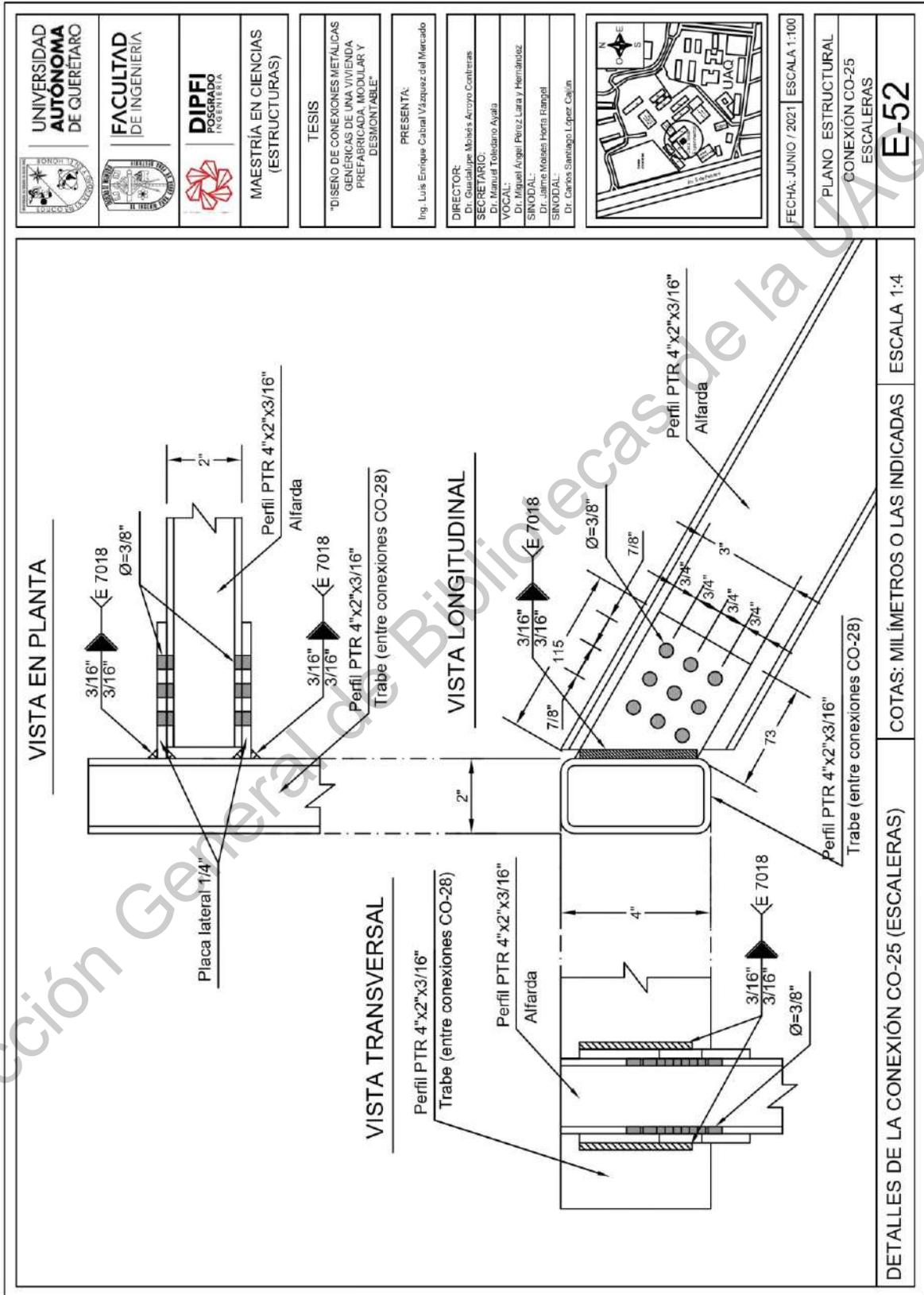


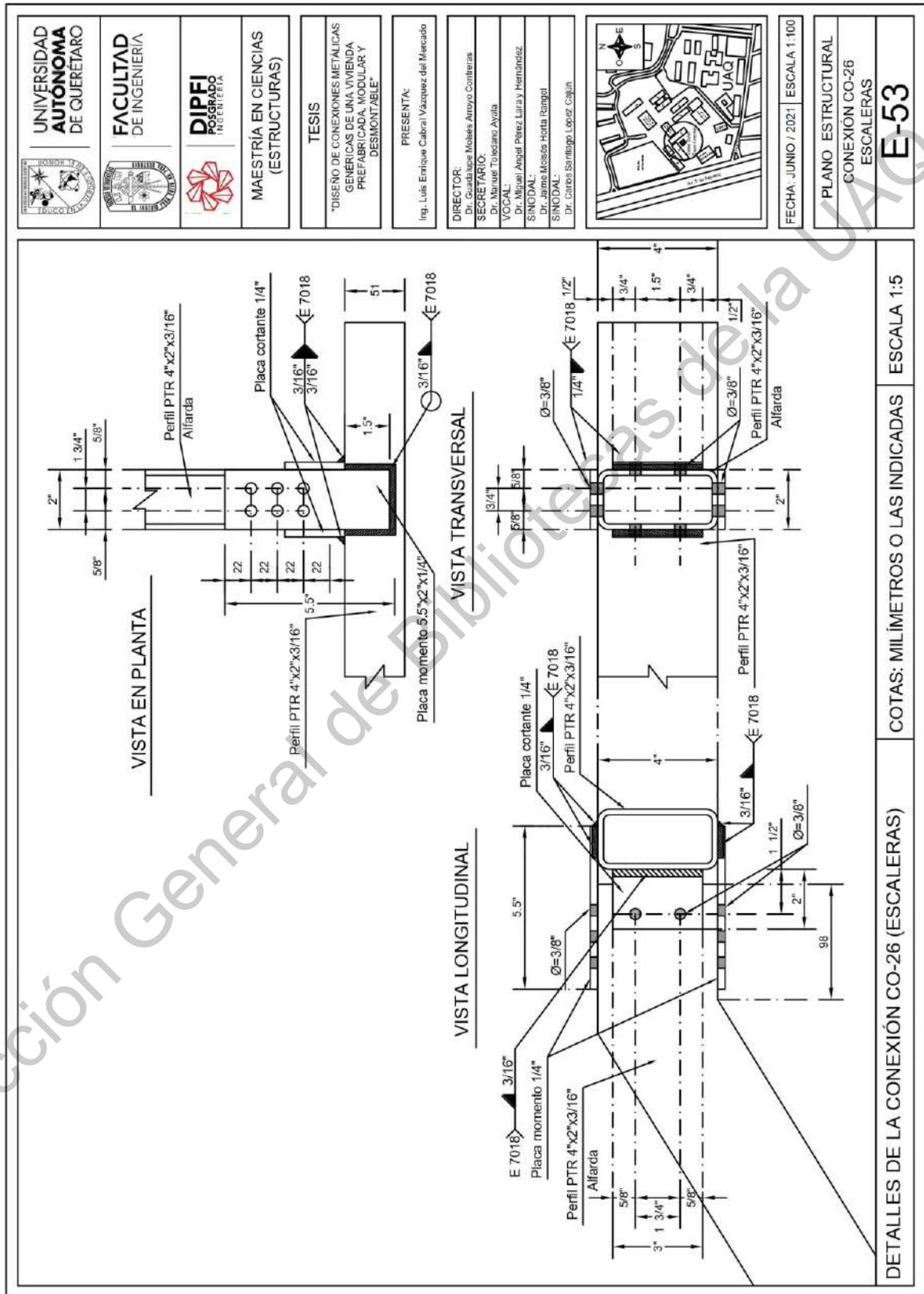
FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100

PLANO ESTRUCTURAL
 CONEXIÓN CO-24
 ESCALERAS

E-51

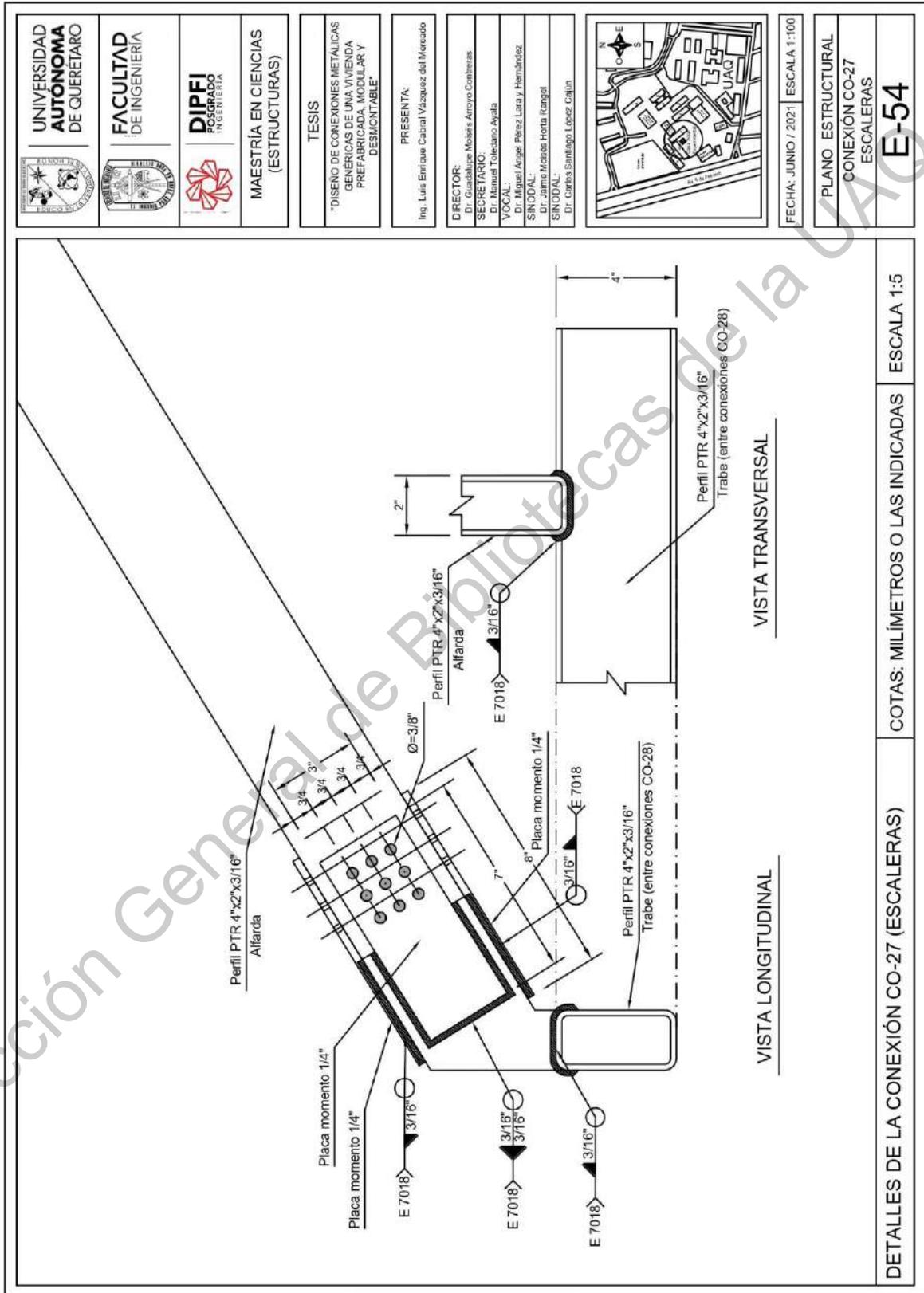
DETALLES DE LA CONEXIÓN CO-24 (ESCALERAS) COTAS: MILÍMETROS O LAS INDICADAS ESCALA 1:5

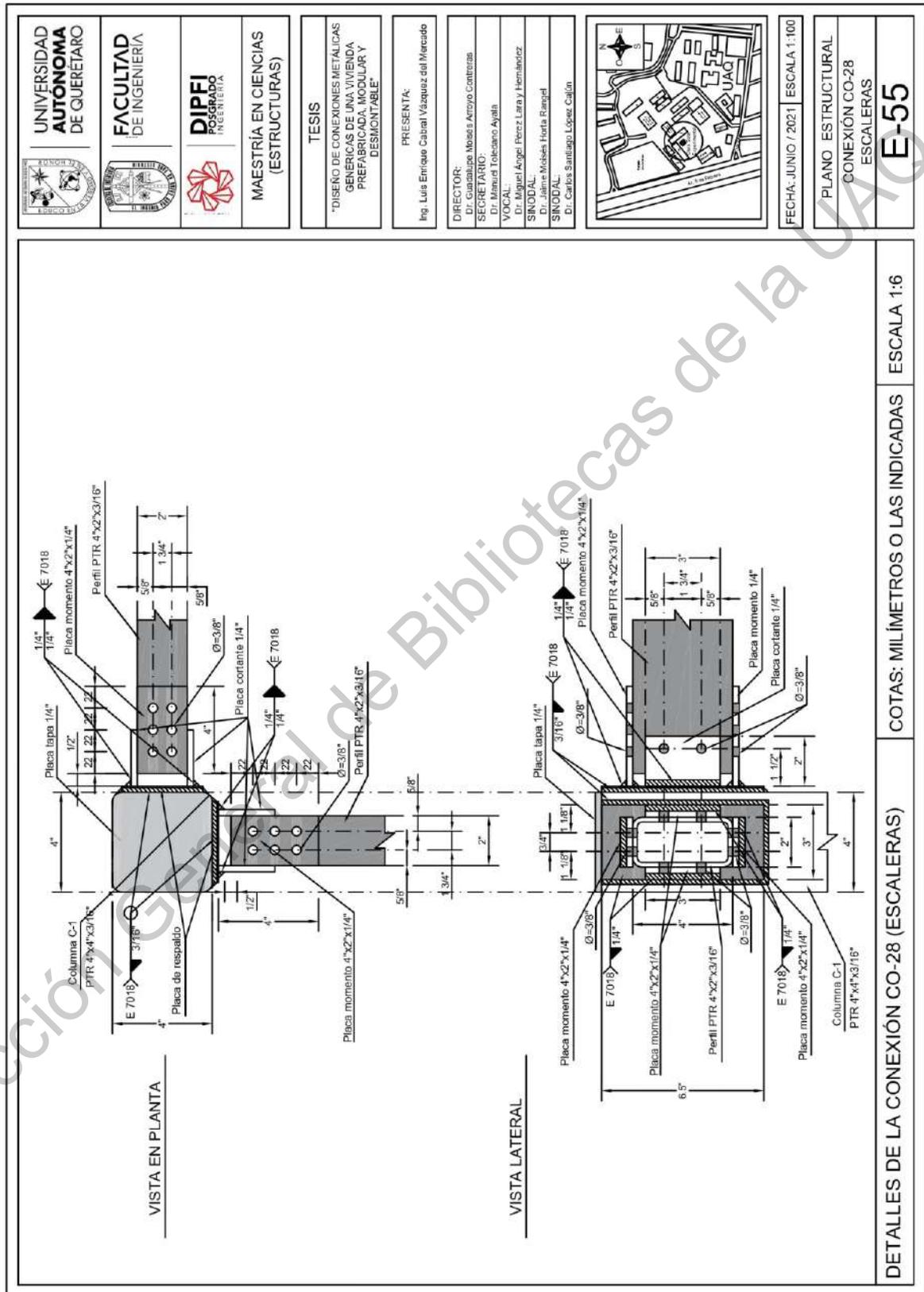




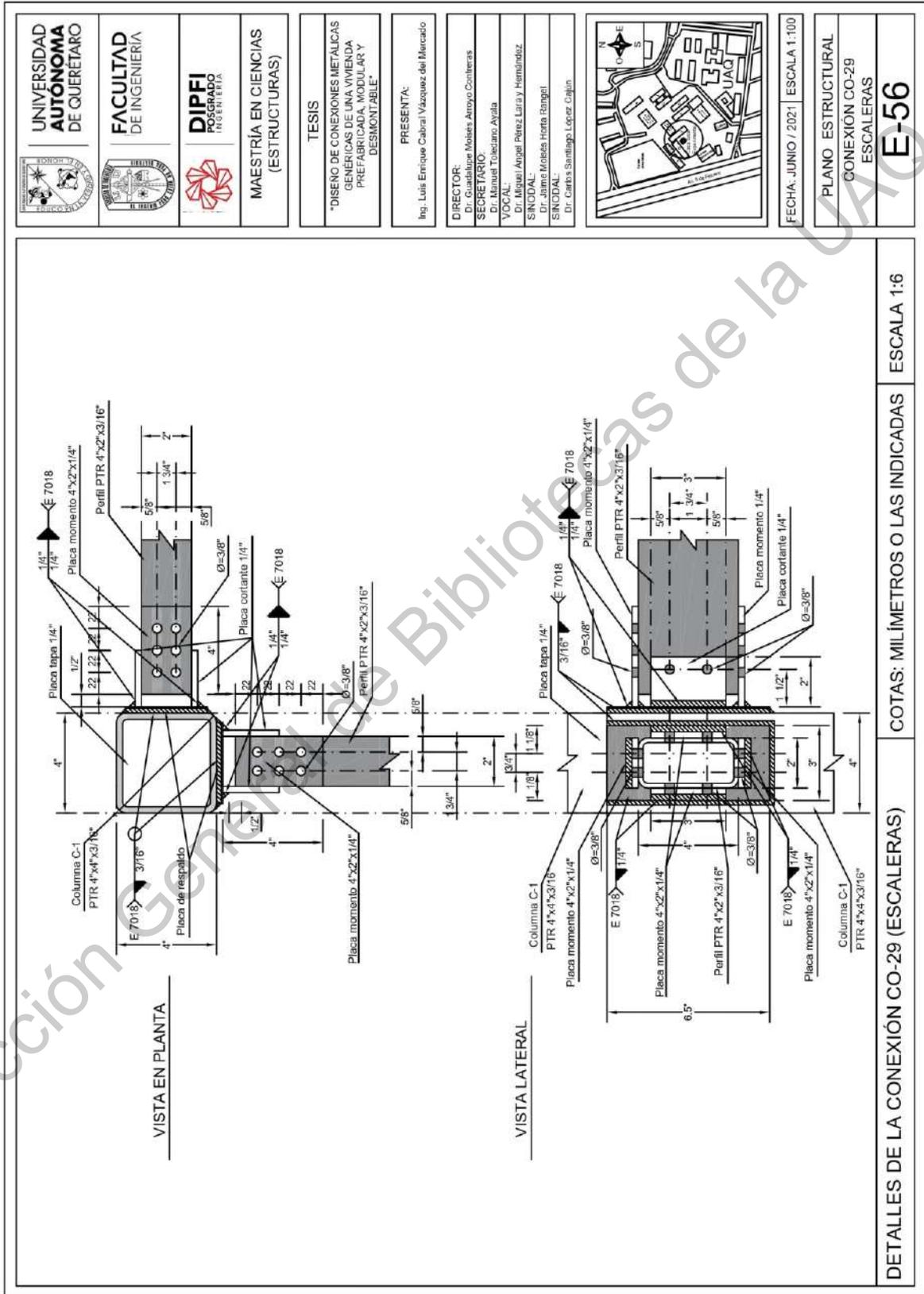
	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
	FACULTAD DE INGENIERÍA
	DIFI POSGRADO INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)	
TESIS	
"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"	
PRESENTA: Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado	
DIRECTOR: Ing. Felipe Morales Arroyo Contreras	
SECRETARIO: Ing. Jorge Tobarcano Ayala	
VOCAL: Dr. Miguel Ángel Pérez Laray Hernández	
SINDICAL: Dr. James Moisés Horta Román	
SINDICAL: Dr. Carlos Santiago López Cajón	
FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100	
PLANO ESTRUCTURAL	
CONEXIÓN CO-26	
ESCALERAS	
E-53	

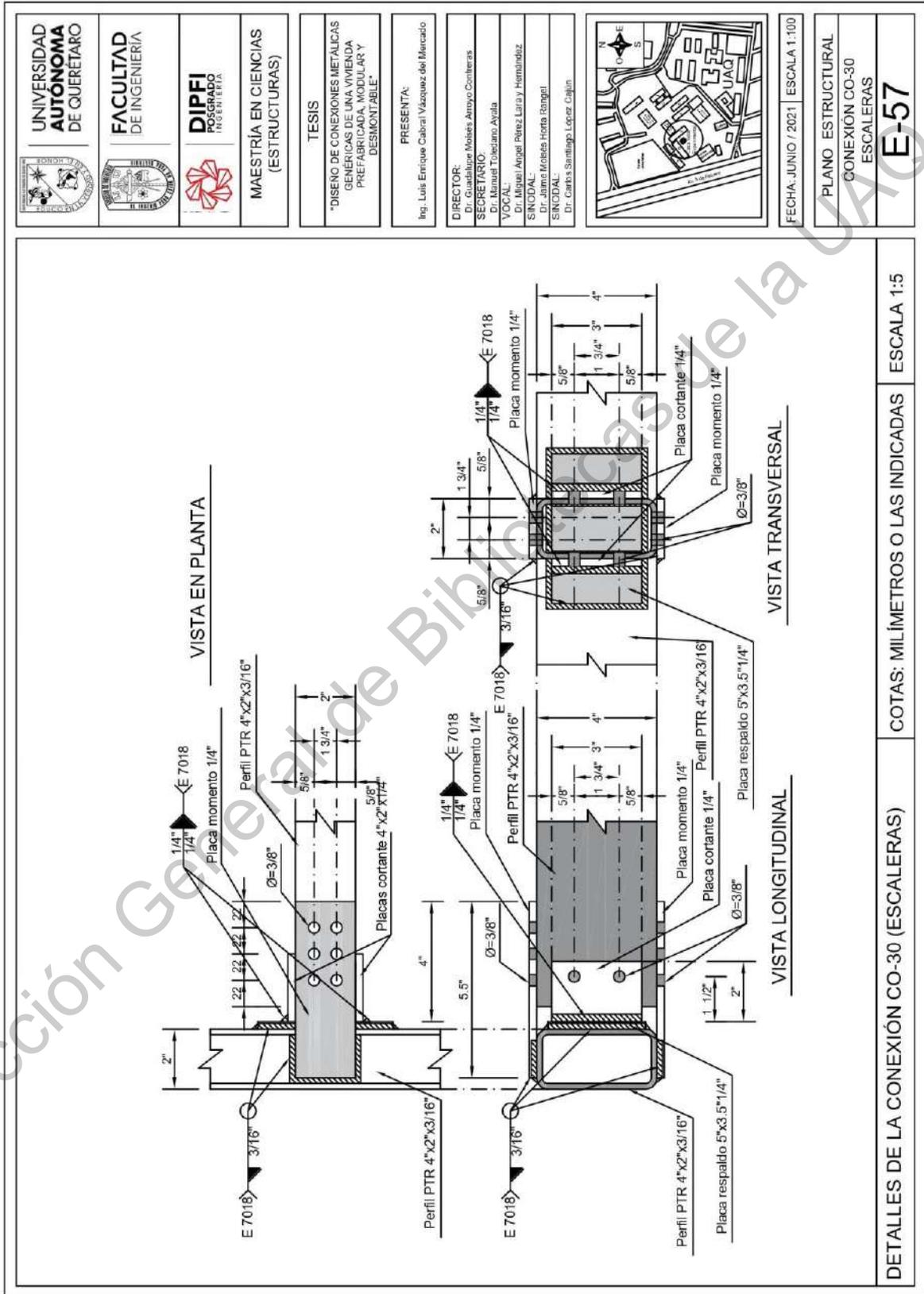
DETALLES DE LA CONEXIÓN CO-26 (ESCALERAS) COTAS: MILÍMETROS O LAS INDICADAS ESCALA 1:5

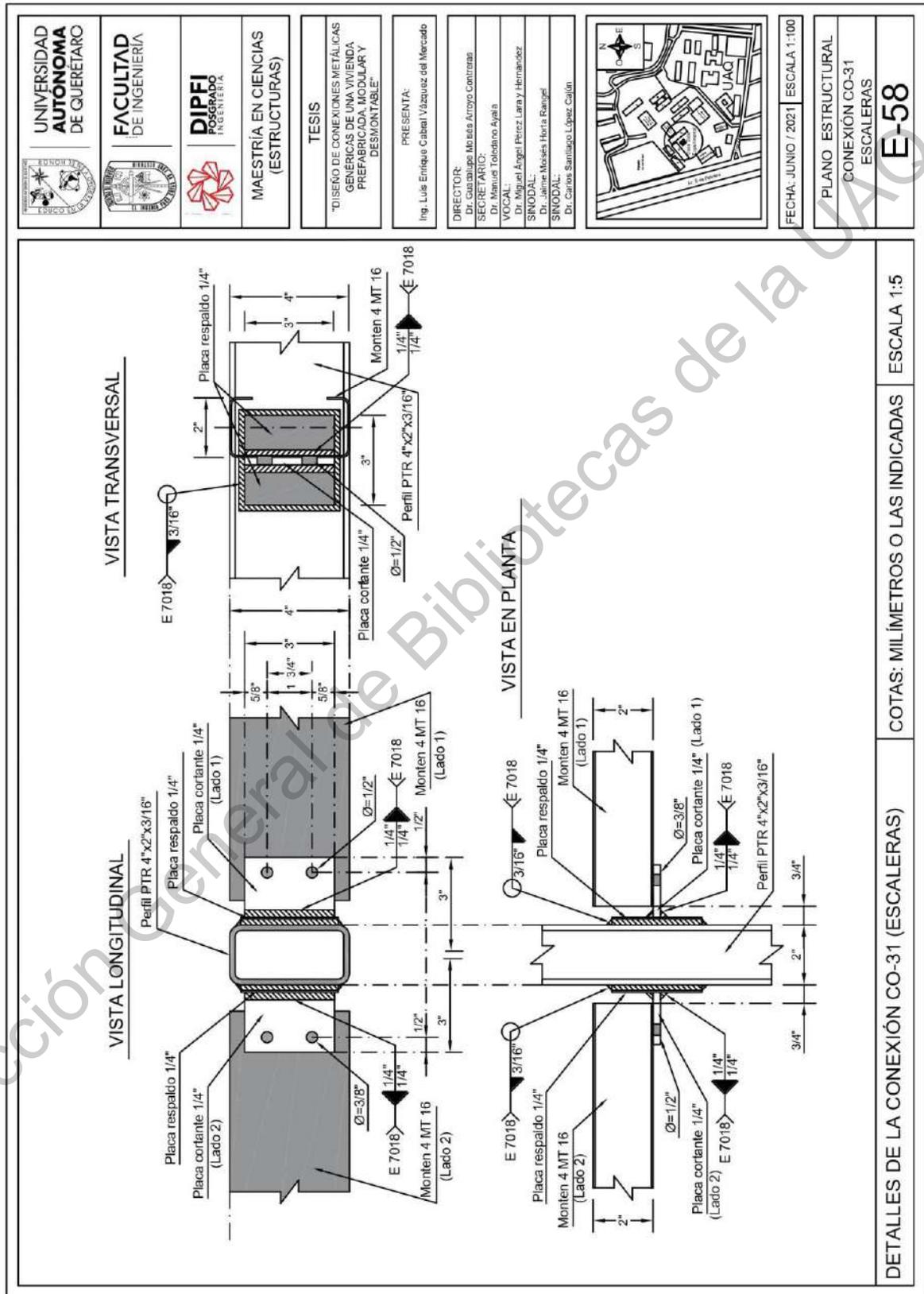




	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
	FACULTAD DE INGENIERÍA
	DIFI POSGRADO INGENIERÍA
	MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)
TESIS	
	"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"
	PRESENTA:
	Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado
	DIRECTOR:
	Dr. Gabriel Moisés Arroyo Contreras
	SECRETARIO:
	Dr. Minerva Toboacano Ayala
	VOCAL:
	Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
	SINDICAL:
	Dr. Irene Morales Horta Rangil
	SINDICAL:
	Dr. Carlos Santiago López Calón
	FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100
	PLANO ESTRUCTURAL
	CONEXIÓN CO-28
	ESCALERAS
	E-55





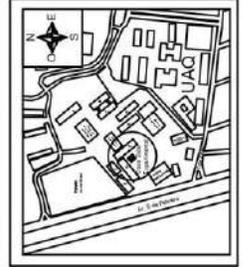


MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)

TESIS
 "DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"

PRESENTA:
 Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado

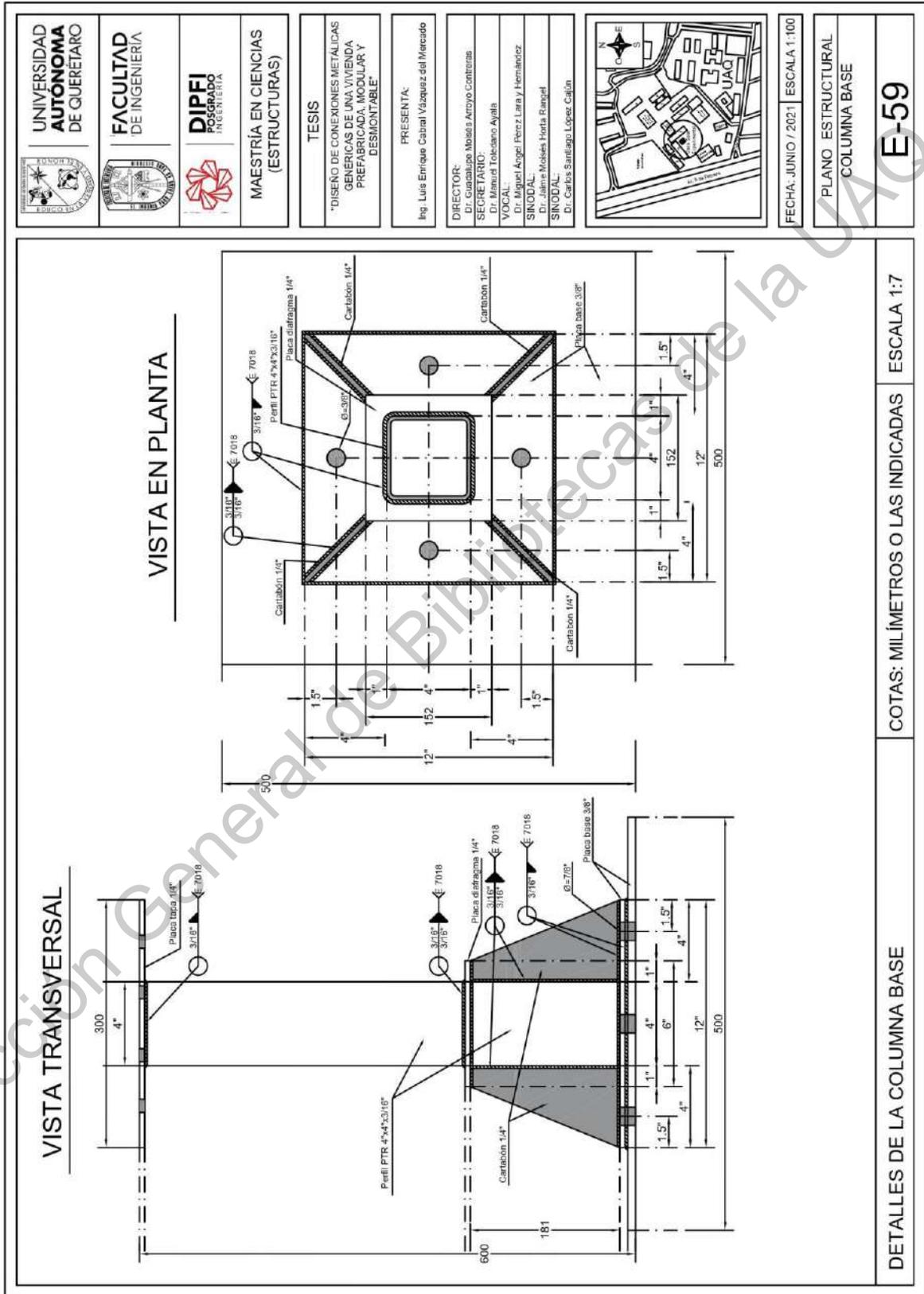
DIRECTOR:
 Dr. Gabriel Moisés Arroyo Contreras
 SECRETARIO:
 Dr. Manuel Tolentino Ayala
 VOCAL:
 Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
 SINDICAL:
 Dr. Moisés Horta Rangel
 SINDICAL:
 Dr. Carlos Santiago López Colón



FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100

PLANO ESTRUCTURAL
 CONEXIÓN CO-31
 ESCALERAS

E-58



		<p>UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>DIPFI POSGRADO INGENIERÍA</p>	
<p>MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)</p>		<p>TESIS</p> <p>"DISEÑO DE CONEXIONES METÁLICAS GENÉRICAS DE UNA VIVIENDA PREFABRICADA, MODULAR Y DESMONTABLE"</p>	
<p>PRESENTA:</p> <p>Ing. Luis Enrique Cabral Vázquez del Mercado</p>		<p>DIRECTOR:</p> <p>Dr. Calixtino Meléndez Atreya Contreras</p> <p>SECRETARIO:</p> <p>Dr. Manuel Toledano Ayala</p> <p>VOCALES:</p> <p>Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández</p> <p>SINDICAL:</p> <p>Dr. Irene Mercedes Herrera Rangel</p> <p>SINDICAL:</p> <p>Dr. Carlos Santiago López Cajón</p>	
		<p>FECHA: JUNIO / 2021 ESCALA 1:100</p> <p>PLANO ESTRUCTURAL PERFILES Y MATERIALES</p> <p>E-60</p>	
<p>PTR 4"x4"x3/16"</p> <p>A500 Grado B Rectangular Columnas C-1</p>	<p>4 MT 16</p> <p>A570 Grado 50 Cold Form Vigas secundarias</p>	<p>PTR 4"x2"x3/16"</p> <p>A500 Grado B Rectangular Alfardas</p>	<p>PLACA</p> <p>A-36</p> <p>Diversas dimensiones Diversas conexiones Diversos espesores 1/8", 1/4" y 3/8"</p>
<p>2 LI 1.5"x1.5"x1/8"</p> <p>A-36</p> <p>Armaduras A-1 y A-2: - Cuerda superior - Cuerda inferior - Montantes extremos</p>	<p>LI 1"x1"x1/8"</p> <p>A-36</p> <p>Armaduras A-1 y A-2 - Riostras</p>	<p>2 LI 1"x1"x1/8"</p> <p>A-36</p> <p>Armaduras A-1 y A-2: - Montantes - Diagonales</p>	<p>Tornillos</p> <p>A-307 Grado A</p> <p>Diversas longitudes Diversos diámetros 5/16", 3/8" y 1/2"</p>
<p>DETALLES DE LOS PERFILES Y MATERIALES</p>		<p>COTAS: MILIMETROS O LAS INDICADAS ESCALA 1:4</p>	

