

Ing. Angel Navarro-Mora M.Sc.

Memoria descriptiva de cálculo estructural

Proyecto modelo

Tabla de contenidos

Pendientes	5
Notas para láminas	6
Notas para desarrollo de documento	7
Corto plazo	7
Largo plazo	7
Introducción	8
Objetivo	8
Alcance y limitaciones	8
Códigos y referencias	9
Simbología	9
Descripción de la estructura	12
Geometría	12
Sistema estructural	15
Sistema sismorresistente	15
Sistema de entrepiso	15
Materiales y sistemas	15
Análisis Estructural	16
Modelo estructural	16
Cargas	17
Combinaciones	21
Resultados	22
Tubos rectangulares	26
Diseño por tensión	26
Diseño por compresión	27
Diseño por flexión	28
Diseño por cortante	29
Diseño por fuerzas combinadas	30
Resumen tubos rectangulares	30
Referencias	32

Listado de Figuras

1	Planta estructural	13
2	Sección transversal	13
3	Sección longitudinal	14
4	Tubo 100x100x1.80mm	14
5	Sistema entrepiso metaldeck con 5 <i>cm</i>	15
6	Modelo tridimensional	16
7	Peso propio de los elementos considerado por el programa	17
8	Asignación de sobrecarga permanente	18
9	Asignación de carga temporal	18
10	Diagramas de fuerzas internas para la combinación de la Ecuación 7 (unidades: <i>kgf</i> , <i>m</i>)	23
11	Diagramas de fuerzas axiales y cortantes para la combinación de la Ecuación 7 (unidades: <i>kgf</i>)	24
12	Diagramas de momentos flectores para la combinación de la Ecuación 7 (unidades: <i>kgf</i> y <i>m</i>)	25

Listado de Tablas

1	Parámetros para análisis sísmico	19
2	Fuerza sísmica sobre cada pared de la vivienda	20
3	Resumen de capacidad nominal reducida para tubos rectangulares	31
4	Resumen de capacidad nominal reducida para tubos rectangulares	31
5	Resumen de solicitaciones máximas para tubos rectangulares	31
6	Resumen de solicitaciones máximas para tubos rectangulares	31
7	Resumen de relaciones demanda/capacidad críticas para tubos rectangulares	31
8	Resumen de relaciones demanda/capacidad críticas para tubos rectangulares	31

Sobre el documento

Responsabilidad profesional

Ing. Angel Navarro-Mora M.Sc.

Carné CFIA: ICO-27622

Especialista en Ingeniería Estructural del CFIA

Máster en Ingeniería Civil de la UCR

Licenciado en Ingeniería en Construcción del ITCR

Autoría y propiedad intelectual

Ing. Angel Navarro-Mora M.Sc.

orcid: [0000-0002-0539-7014](https://orcid.org/0000-0002-0539-7014)

©2024 ANM Ingeniería

Cartago, Costa Rica

Este documento tiene validez únicamente en su forma íntegra y original; no se permite la reproducción parcial sin la autorización previa de ANM Ingeniería.

Contacto

Ing. Angel Navarro-Mora M.Sc.

Tel. (+506) 8612 1742

email: ahnavarro@anmingeneria.com

Linkedin: www.linkedin.com/in/ahnavarro

Pendientes

Revisar fu del acero JIS G-3132 SPHT-2

Notas para láminas

Falta agregar las secciones de los elementos (bueno, solo el perfil 100x100x1.8mm) Falta una columna (en planta: abajo, izquierda) Falta etiquetar columnas Que se corrija la geometría. Ver la distribución de elementos en el esquema proporcionado por esteban, recordando que las distancias que rigen son las de la izquierda. En el modelo hay más elementos, la sección es más larga de lo requerido.

Notas para desarrollo de documento

Corto plazo

modificar los de tubo redondo para que se calcule la relación demanda capacidad

Largo plazo

Hay que agregar los perfiles tipo C o RT, y los perfiles Z.

Hay que reajustar los contenidos indicados en ChD4_StrSteel.qmd, porque no son congruentes en términos generales. Se están manejando dos perspectivas, pero la idea es que haya solo una. Se propone, que se siga manejando por la forma de la sección transversal de los elementos.

Corregir tensión para rectangular, de forma que se calcule la relación demanda capacidad

Introducción

El proyecto corresponde al diseño estructural de un techo de estacionamiento en el distrito de San Pedro del cantón de Poás en la provincia de Alajuela. La estructura se compone de acero laminado en frío con sistemas tipo marco en la dirección “x” y sistemas de marcos arriostrados en la dirección “y”. El proyecto tiene un área total aproximada de 616 m^2 .

Se realizó el análisis y diseño estructural, bajo los requerimientos de la normativa nacional de acatamiento obligatorio y la normativa internacional de referencia, buscando garantizar la compatibilidad en cuanto a la filosofía de diseño.

El presente diseño se realiza a solicitud de STENAT Ingeniería y Construcción. La estructura se diseña por resistencia con la filosofía LRFD, para resistir las cargas gravitacionales y laterales, de sismo y viento, cumpliendo con los límites de desplazamiento vertical y horizontal que correspondan, de acuerdo con el su uso y características.

Objetivo

Modelar y diseñar la estructura de un techo de estacionamiento de 616 m^2 mediante el análisis estructural con el método de elementos finitos (FEM), cumpliendo con los criterios normativos de análisis y diseño para obtener una estructura capaz de salvaguardar la vida para un sismo fuerte [1], mientras que se mantendrá completamente operativa para un nivel de demanda 'alto alta por viento [2].

Alcance y limitaciones

Para el proyecto no se cuenta con un estudio de suelos del lugar, por lo que se utiliza la capacidad mínima solicitada por el método del diseño simplificado para vivienada. Se deberán comprobar, durante el proceso constructivo, las características y propiedades mecánicas del suelo utilizadas en el diseño de las fundaciones. Estas características se muestran en la sección de materiales.

El proyecto tiene como entregables los planos constructivos y la presente memoria descriptiva de cálculo. Se generan recomendaciones constructivas en las notas estructurales, pero únicamente

cuando el proceso constructivo se considere indispensable para el adecuado desempeño de la estructura.

Códigos y referencias

Los códigos, especificaciones, normas y documentos utilizados como referencia para el diseño son los siguientes:

- Código Sísmico de Costa Rica 2010 Revisión 2014 [1]
- Comentarios al Código Sísmico de Costa Rica 2010 [3]
- Lineamientos para diseño por viento de edificaciones en Costa Rica [2]
- Código de cimentaciones de Costa Rica [4]
- Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318-19 [5]
- Especificación para construcciones de acero ANSI/AISC 360-22 [6]
- Provisiones para el diseño sísmico de edificios de acero estructural ANSI/AISC 341-22 [7]
- Especificación norteamericana para el diseño de miembros estructurales e acero laminado en frío AISI S100-16
- Requisitos de Reglamento para estructuras de mampostería TMS 602-13 / ACI 530.1-13 / ASCE 5-13 [5]
- Informe de suelos

Simbología

La simbología utilizada en el documento, se muestra a continuación:

General

En esta sección, se muestra la simbología que puede ser utilizada en múltiples apartados.

α : Factor de desplazamiento inelástico T7.1 [1]

ϕ : Factor de reducción de resistencia

A_g : Área de la sección bruta

A_e : Área de la sección efectiva

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

CFIA: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos

CP: Carga permanente

CS: Carga sísmica

CSCR: Código Sísmico de Costa Rica

CT: Carga temporal

CTt: Carga temporal en techo

CU_i : Combinación última i 6.2.1 [1]

E : Módulo de elasticidad

f_1 Factor de probabilidad de ocupación

FEM : Método de elementos finitos

$LDpV$: Lineamientos para el diseño por viento de edificaciones en Costa Rica

$LRFD$: Diseño por resistencia última

R : Razón demanda/capacidad

$R_{r,i}$: Combinación resistencia i 5.2 [2]

$(R_r)(r)$: Radio de giro reducido E2.1 [8]

S : Módulo de sección elástico

SCP : Sobrecarga permanente

$SCPt$: Sobrecarga permanente en techo

t : Espesor de pared

Concreto reforzado

En esta sección se muestra la simbología exclusiva de la sección de diseño de elementos de concreto reforzado.

Mampostería reforzada

En esta sección se muestra la simbología exclusiva de la sección de mampostería reforzada.

Acero estructural

En esta sección se muestra la simbología exclusiva de las secciones de acero estructural.

$AISC$: Instituto Americano de la Construcción con Acero

$AISI$: Instituto Americano del Hierro y del Acero

A_w : Área del alma para cortante

C : Coeficiente para pandeo en el alma

C_R : Coeficiente de flexión para pandeo en el alma

C_N : Coeficiente de longitud de apoyo para pandeo en el alma

C_h : Coeficiente de esbeltez para pandeo en el alma

D : Diámetro externo

f_u : Resistencia a la ruptura del acero

f_y : Resistencia a la fluencia del acero

h : longitud plana del alma para pandeo en el alma

N : Longitud de asiento

Pt : Resistencia nominal a la tensión

Pt_r : Resistencia nominal a la ruptura en tensión

Pt_y : Resistencia nominal a la fluencia en tensión

S : Módulo de sección elástico

S_y : Módulo de sección elástico alrededor del eje y

S_z : Módulo de sección elástico alrededor del eje z

TC : Tubo circular

U : Factor de cortante en la conexión

Z : Módulo de sección plástico

Z_y : Módulo de sección plástico alrededor del eje y

Z_z : Módulo de sección plástico alrededor del eje z

Madera estructural

Sistemas prefabricados

Descripción de la estructura

La estructura del entrepiso está compuesta por tubos verticales y horizontales, generando marcos en ambas direcciones, con restricción de desplazamiento lateral por medio de las paredes existentes. En esta sección se detallan los sistemas, elementos y materiales utilizados en el cálculo estructural.

Geometría

La estructura es de un nivel, con una altura a la parte inferior del entrepiso de $H = 2.4 \text{ m}$. En la Figura 1 se muestra la distribución de distribución de vigas y columnas.

En la Figura 2 y en la Figura 3 se muestra la sección transversal y la sección longitudinal, respectivamente.

Elementos estructurales

La estructura principal consiste en un conjunto de elementos tubulares 100x100x1.8 dispuestos vertical y horizontalmente, formando marcos rígidos en una dirección y marcos articulados con restricción lateral al desplazamiento, en la otra dirección. as dimensiones de estos elementos se muestran en la Figura 4.

El entrepiso está compuesto por elementos tubulares 100x100x1.8 @ 60 cm, utilizando el sistema de entrepiso metaldeck con una sobrelosa de 5 cm. Las dimensiones del sistema metaldeck se muestran en la Figura 4.

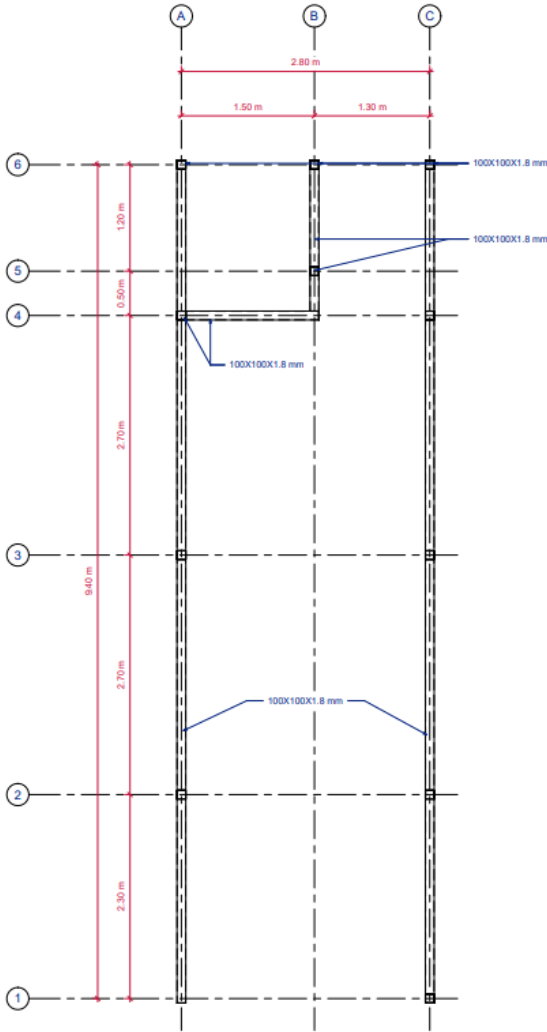


Figura 1: Planta estructural

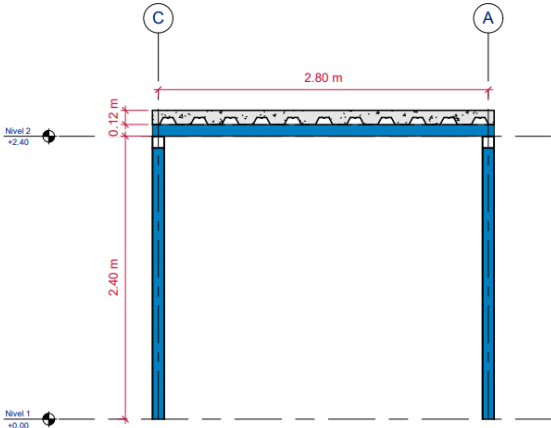


Figura 2: Sección transversal

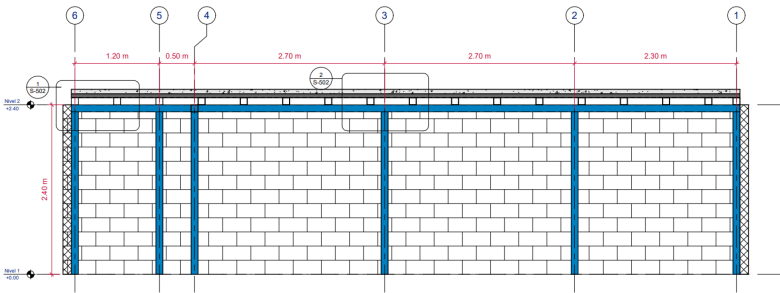


Figura 3: Sección longitudinal

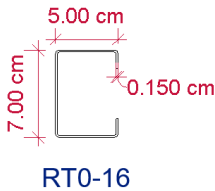


Figura 4: Tubo 100x100x1.80mm

Sistema estructural

Sistema sismorresistente

Sistema de entrepiso

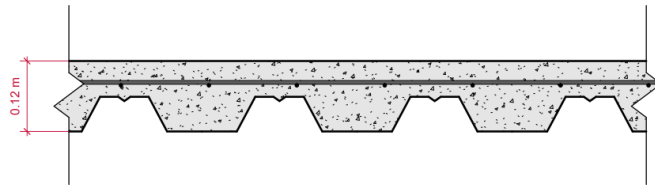


Figura 5: Sistema entrepiso metaldeck con 5 *cm*

Materiales y sistemas

Contemplando que se trata de un sistema sismorresistente de acero laminado en frío, en este apartado se describe el acero utilizado.

Acero estructural

Los perfiles RT deben ser fabricados con acero con un $f_{y,mn} = 2320 \text{ kgf/cm}^2$, $f_{u,mn} = 3470 \text{ kgf/cm}^2$ y $E_s = 2100000 \text{ kgf/cm}^2$.

Análisis Estructural

Con el objetivo de evaluar la capacidad del sistema sismorresistente de la vivienda, es necesario realizar el análisis estructural, utilizando las cargas y combinaciones indicadas por la normativa pertinente, así como los materiales y geometría previamente descritos en este documento.

Modelo estructural

Para el análisis estructural, se generó un modelo tridimensional elástico lineal de la estructura mostrada en la sección de geometría. Una imagen representativa del modelo se muestra en la Figura 6.

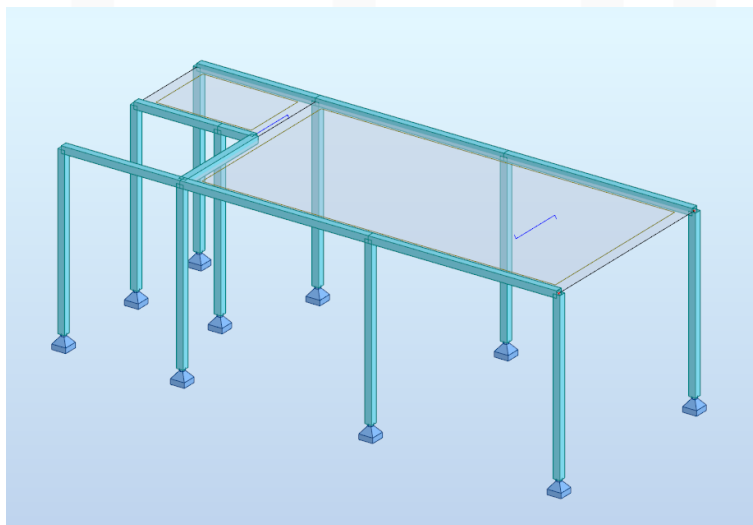


Figura 6: Modelo tridimensional

En el modelo estructural se incluyen los elementos como elementos tipo barra y el sistema de entrepiso con elementos tipo área contemplando un sistema equivalente.

Cargas

En este apartado se muestran las cargas y combinaciones utilizadas en el análisis estructural, requerido para verificar que la capacidad de los elementos es suficiente para resistir las fuerzas.

Cargas permanentes

Las cargas permanentes incluyen el peso propio de los elementos estructurales, estimado con el programa computacional, es de 6630 *kgf*, mientras que la sobrecarga permanente estimada 2520 *kgf*, las cuales se combinan utilizando la Ecuación 1. Para el proyecto la carga permanente total es de 9150 *kgf*. En la Figura 7 se muestran los elementos resaltados con rojo, lo que representa que el programa está calculando el peso de dichos elementos de forma automática.

$$CP = PP + SCP \quad (1)$$

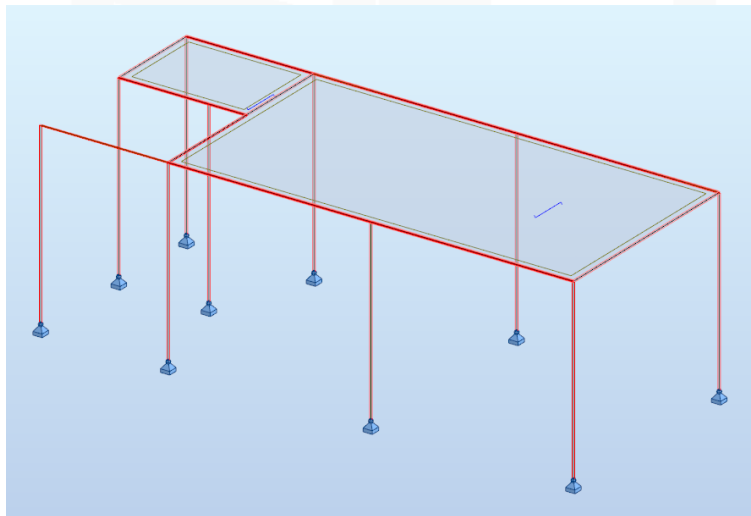


Figura 7: Peso propio de los elementos considerado por el programa

La sobrecarga permanente se aproximó como 60 *kgf/m²*, en el techo, en la cual se incluye el peso de elementos adheridos a la estructura de forma permanente. Estos elementos no han sido modelados, se debe considerar su aporte en peso y masa, pero se puede omitir su rigidez. El peso total de la sobrecarga permanente es 2520 *kgf* y su asignación en el modelo estructural se muestra en la Figura 8.

Cargas temporales

La carga temporal se seleccionó de los mínimos establecidos en la tabla T.6.1 [1] para techos y tiene una magnitud de 40 *kgf/m²* y en la Figura 9 se muestra asignada en el modelo estructural. La carga temporal resultante es de 1680 *kgf*

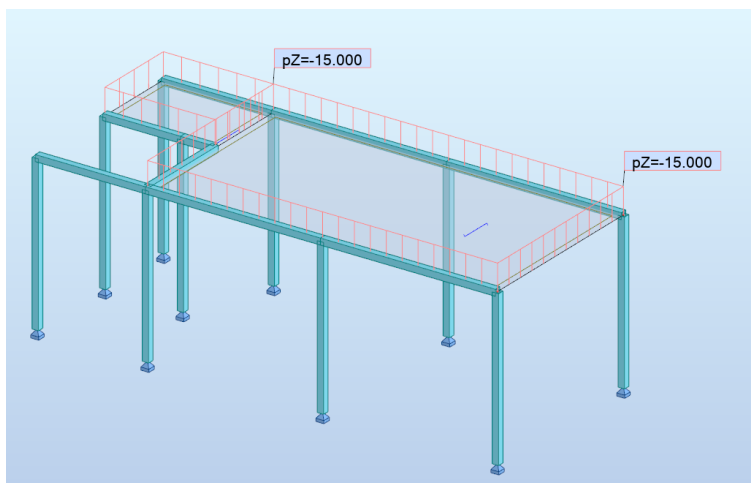


Figura 8: Asignación de sobrecarga permanente

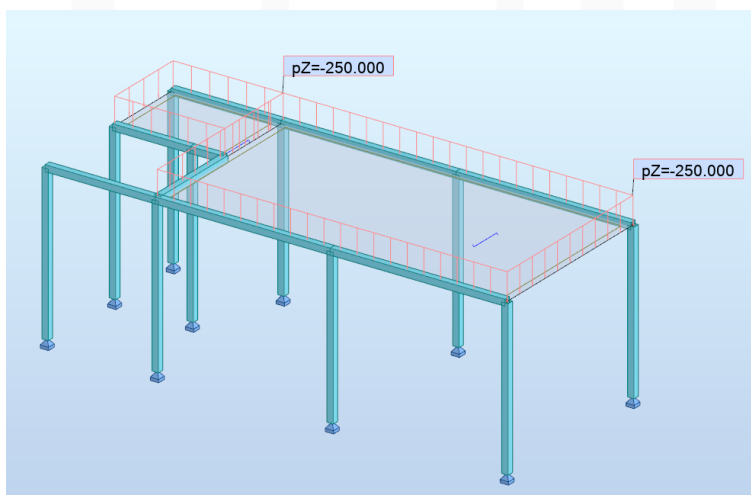


Figura 9: Asignación de carga temporal

Cargas de viento

Considerando la altura de la edificación, se identifica que la presión de viento de diseño es la mínima establecida en la sección 4.4.1.7. de [2], en la cual se indica que el sistema principal resistente a la fuerza de viento de un edificio no debe ser menor que $80kgf/m^2$ en un plano vertical normal a la dirección el viento.

Carga sísmica

Estimando la carga sísmica con el método estático equivalente, utilizando el espectro de diseño de [1]. Este procedimiento se realizó en conformidad con lo establecido en la sección 7.4. [1]. Los parámetros de la Tabla 1 fueron utilizados para estimar el cortante en la base.

Tabla 1: Parámetros para análisis sísmico

Parámetro	Valor	Justificación
Sitio de cimentación	Suelo S3	Suposición recomendada [1] (pp. 2/6-2/7)
Importancia I	1.0	T4.1 [1]
Importancia I_p	1.25	T4.1 [1]
Sistema estructural	Voladizo	Principalmente columnas empotradas en la base [1] (pp. 4/4-4/5)
Zona sísmica	Zona IV	[1] (pp. 2/1-2/6)
Regularidad en planta	Irregular moderado	Diafragma flexible [1] (pp. 4/6-4/8)
Regularidad en altura	Regular	Un nivel [1] (p. 4/6)
Ductilidad global asignada (μ)	1.0	Figura 5.7 [1] (pp. 5/9)
Aceleración pico efectiva de diseño (a_{ef})	0.44	De acuerdo con el sitio de cimentación y la zona sísmica [1] (pp. 2/8, 5/1)
Sobrerresistencia (SR)	1.2	De acuerdo con [1] (p. 5/1)
Factor espectral dinámico en dirección x (FED_x)	2.5	Figura 5.7 [1] (pp. 5/9)
Factor espectral dinámico en dirección y (FED_y)	2.5	Figura 5.7 [1] (pp. 5/9)
Factor de desplazamiento inelástico (α)	1.0	Figura T7.1 [1] (pp. 7/10)

El coeficiente sísmico se calcula con la 6-1 del CSCR 2010/14 Ecuación 2.

$$C_s = \frac{a_{ef} \cdot I \cdot FED}{SR} \quad (2)$$

Resultando que $c_{s,x} = 0.92$ para la dirección X y $c_{s,y} = 0.92$ para la dirección Y.

El peso sísmico (en representación de la masa sísmica) se calcula de acuerdo con la Ecuación 3 en conformidad con la sección 2.6.2 [1]. En este caso particular, como la carga temporal está aplicada sobre un techo, la probabilidad de que el espacio esté ocupado durante un evento sísmico es prácticamente nula, por lo tanto: $f_{CT} = 0$. La resultante de CP y CT se encuentra en las secciones de cargas permanentes y cargas temporales, respectivamente.

$$W_s = CP + f_{CT} \cdot CT \quad (3)$$

Por lo tanto, el peso sísmico total es 9150 kgf . Con este, es posible estimar el cortante en la base por medio de la Ecuación 4, dando como resultado que la magnitud fuerza sísmica equivalente es de 8391 kgf .

$$V_{base} = C_s W_s \quad (4)$$

Como el techo tiene un comportamiento de diafragma flexible, la distribución de la carga sísmica se realizó por medio de la masa que tributa a cada “sistema” sismorresistente, utilizando el área tributaria A_{trib} como representación de dicha masa y el área total del nivel A_{nivel} en representación de la masa total. Esto se realizó utilizando la Ecuación 5. Otro detalle importante es que la edificación tiene únicamente un nivel, por lo que no existe necesidad de realizar una distribución en altura del sismo, considerando como premisa que toda la masa sísmica de la edificación se concentra en la parte superior de las paredes del primer nivel.

$$V_{u,i} = V_{base} \frac{A_{trib}}{A_{nivel}} \quad (5)$$

Tabla 2: Fuerza sísmica sobre cada pared de la vivienda

Pared	$A_{trib} (m^2)$	$V_{u,i}$
Eje A	11.1	2218
Eje B	12.0	2397
Eje C	12.0	2397
Eje D	12.6	2517
Eje 1	14.7	2937

Pared	$A_{trib} (m^2)$	$V_{u,i}$
Eje 2	21.0	4195
Eje 3	14.7	2937

Combinaciones

Para el diseño estructural de la vivienda, se requieren combinar las acciones mostradas en la sección de cargas. Estas combinaciones están establecidas en las normas de diseño.

Diseño sísmico

De acuerdo con la sección 6.2 [1], la estructura de la edificación debe diseñarse para cumplir con las demandas de la Ecuación 6, Ecuación 7, Ecuación 8 y Ecuación 9:

$$CU_1 = 1.4 \cdot CP \quad (6)$$

$$CU_2 = 1.2 \cdot CP + 1.6 \cdot CT \quad (7)$$

$$CU_3 = 1.05 \cdot CP + f_1 \cdot CT \pm CS \quad (8)$$

$$CU_4 = 0.95 \cdot CP \pm CS \quad (9)$$

Diseño por viento

De acuerdo con la sección 5.2 [2], cada estructura, elemento, componente y unión de la edificación debe tener capacidad para resistir las combinaciones de la Ecuación 10, Ecuación 11, Ecuación 12 y Ecuación 13.

$$R_{r,1} = 1.2 \cdot CP + 1.6 \cdot CTt + f_1 \cdot CT \quad (10)$$

$$R_{r,2} = 1.2 \cdot CP + 1.6 \cdot CTt + 0.5 \cdot CV \quad (11)$$

$$R_{r,3} = 1.2 \cdot CP + f_1 \cdot CT \pm CT \quad (12)$$

$$R_{r,4} = 1.05 \cdot CP + f_1 \cdot CT \pm CS \quad (13)$$

Condiciones de servicio

De acuerdo con la sección 5.3 [2], para verificar los estados límite de servicio, cada estructura, elemento, componente y unión debe tener la capacidad de resistir la combinación de la Ecuación 14.

$$R_{r,s} = CP + 0.5 \cdot CT \pm CV \quad (14)$$

Adicionalmente, se revisan las deflexiones en condiciones de servicio, asumiendo que está cargada en su máxima capacidad, pero únicamente por carga gravitacional. Las cargas se combinan con la Ecuación 15.

$$CU_s = CP + CT \quad (15)$$

Resultados

A partir del análisis estructural, se obtienen las deformaciones y fuerzas internas requeridas para el diseño de la estructura. En esta sección se muestran resultados representativos.

Combinación gravitacional

Los diagramas de fuerza axial se muestran en la Figura 11a, los diagramas de fuerza cortante F_z en la Figura 11c y los diagramas de momento flector M_y en la Figura 12b.

Combinación carga lateral

Los diagramas de fuerzas axiales se muestran en la Figura 11a, los diagramas de fuerzas cortantes F_z en la Figura 11c y los diagramas de momento flector M_y en la Figura 12b.

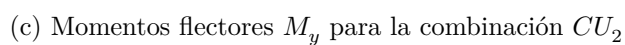
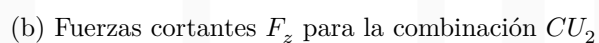
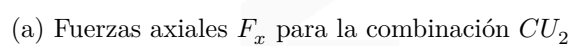


Figura 10: Diagramas de fuerzas internas para la combinación de la Ecuación 7 (unidades: kgf, m)

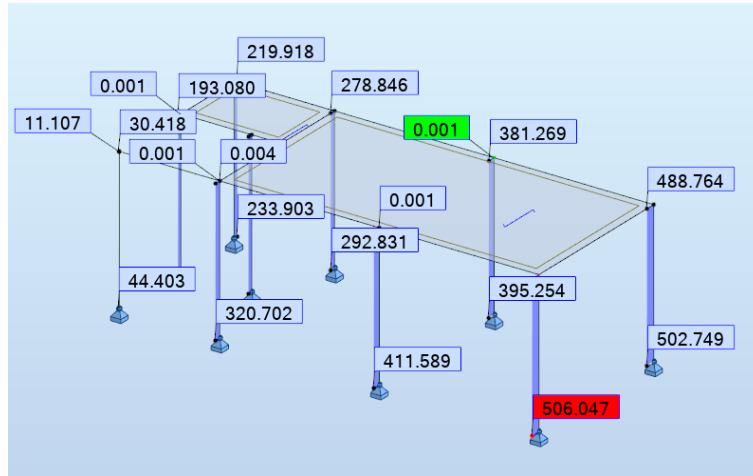
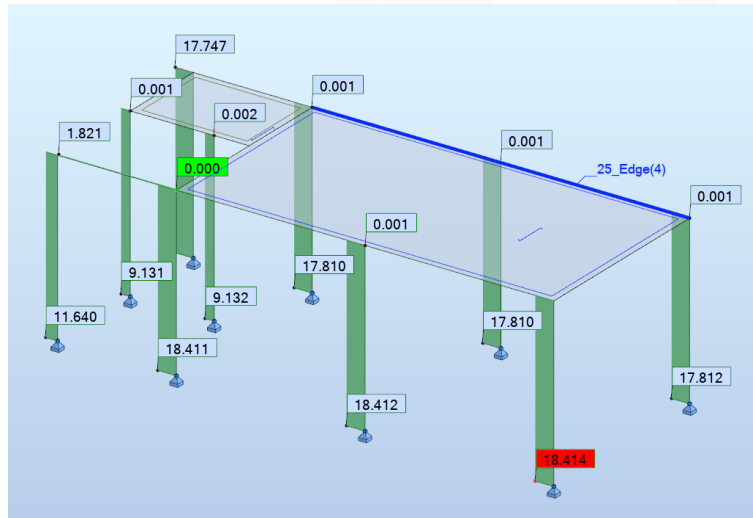
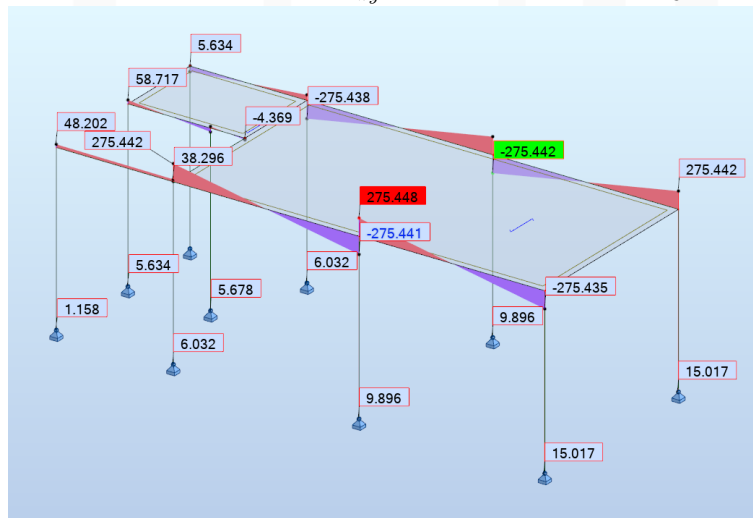
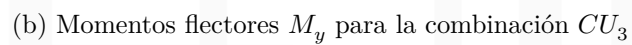
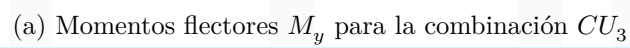
(a) Fuerzas axiales F_x para la combinación CU_3 (b) Fuerzas cortantes F_{zy} para la combinación CU_3 (c) Fuerzas cortantes F_z para la combinación CU_3

Figura 11: Diagramas de fuerzas axiales y cortantes para la combinación de la Ecuación 7 (unidades: kgf)



25

Tubos rectangulares

El cálculo de los tubos rectangulares se ejemplifica con el tubo 100x100x1.80 *mm*. Sin embargo, al final de la sección se muestra un resumen del cálculo para todos los elementos, considerando los mismos principios de diseño utilizados para el ejemplo.

Diseño por tensión

Para el diseño por tensión se aplica lo dispuesto en el capítulo D del AISI S100-16 [8]. En este caso, no se define de forma obligatoria una relación de esbeltez máxima L_c/r para miembros en tensión, pero [6] aconseja que no exceda el valor de 300. La relación de esbeltez máxima de los elementos es 70. En cuanto al cálculo de la capacidad se deben evaluar los estados límite resistencia por tensión de fluencia Ecuación 16, con $\phi = 0.90$, y por tensión de ruptura Ecuación 17, con $\phi = 0.75$.

$$\phi P t_y = \phi f_y A_g \quad (16)$$

$$\phi P t_r = \phi f_u A_e \quad (17)$$

La sección bruta A_g corresponde al área de toda la sección transversal, mientras que el área neta efectiva A_e se calcula por medio de la Ecuación 18.

$$A_e = U A_g \quad (18)$$

La resistencia de diseño a la tensión $P t_n$ es la menor entre la obtenida con la Ecuación 16 y con la Ecuación 17, dando como resultado para la sección 100x100x1.80 *mm*:

Resistencia a la tensión

$$\phi P t_n = 14410 \text{ kgf} \quad P t_u = 44 \text{ kgf} \quad R_{Pt} = 0.003$$

Diseño por compresión

Para el diseño por compresión se aplica lo indicado en el capítulo E del AISI S100-16 [8]. En [6] se indica que la relación de esbeltez L_c/r no exceda el valor de 200 y en este caso la máxima es de 70, siendo inferior al límite recomendado, por lo tanto aceptable.

La resistencia nominal a la compresión por fluencia y pandeo global se calcula con la Ecuación 19, mientras que la resistencia de diseño con un valor de $\phi = 0.85$ se obtiene mediante la Ecuación 20.

$$Pc_{ne} = F_n A_g \quad (19)$$

$$\phi Pc_{ne} = \phi \cdot Pc_{ne} \quad (20)$$

El esfuerzo de pandeo lateral F_{cr} , se determina como sigue:

(a) Cuando $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) f_y \quad (21)$$

(b) Cuando $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) f_y \quad (22)$$

Mientras que el esfuerzo de pandeo elástico, F_{cre} , se determina de acuerdo con la Ecuación 23.

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (23)$$

Adicionalmente, se debe considerar un radio de giro reducido $(R_r)(r)$ cuando el valor de la longitud efectiva KL es menor que $1.1L_0$, donde L_0 se calcula con la Ecuación 24, mientras que R_r se calcula con la Ecuación 25.

$$L_0 = \pi r \sqrt{\frac{E}{F_{crl}}} \quad (24)$$

$$R_r = 0.65 + \frac{0.35(KL)}{1.1L_0} \quad (25)$$

Por el método de resistencia directa, con $\lambda_l = \sqrt{Pc_{ne}/Pc_{crl}}$, la capacidad a la compresión Pc_n se

obtiene de la siguiente manera:

(a) Cuando $\lambda_l \leq 0.776$

$$P_{c_n} = P_{c_{ne}} \quad (26)$$

(b) Cuando $\lambda_l > 0.776$

$$P_{c_n} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{c_{ne}}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{c_{ne}}} \right)^{0.4} \cdot P_{c_{ne}} \quad (27)$$

Por lo tanto, la resistencia de diseño a la compresión se obtiene con la Ecuación 19 y, la Ecuación 26 o la Ecuación 27, según corresponda. Para la sección 100x100x1.80 mm, el resultado es:

Resistencia a la compresión

$$\phi P_{c_n} = 10962 \text{kgf} \quad P_{c_u} = 1324 \text{kgf} \quad R_{P_c} = 0.121$$

Diseño por flexión

La resistencia de flexión nominal M_n , utilizando un $\phi = 0.90$, se calcula por medio de la Ecuación 28 y deben considerarse los estados límite de plastificación y de pandeo local, tomando en cuenta lo mostrado de la eq-F2_1_4_1_rect a la Ecuación 33.

$$\phi M_n = \phi F_n Z \quad (28)$$

Para el estado límite de pandeo local, se requiere calcular L_u y F_{cre} , por medio de la Ecuación 29 y la Ecuación 30, respectivamente.

$$L_u = \frac{0.36 C_b \pi}{f_y \cdot S} \sqrt{E G J I_y} \quad (29)$$

$$F_{cre} = \frac{C_b \pi}{K_y L_y S} \sqrt{E G J I_y} \quad (30)$$

Ahora, para estimar F_n , cuando $F_{cre} \leq 0.56 f_y$:

$$F_n = F_{cre} \quad (31)$$

Mientras que, sí $0.56f_y \leq F_{cre} < 2.78f_y$:

$$F_n = \frac{10}{9}f_y \left(1 - \frac{10f_y}{36F_{cre}}\right) \quad (32)$$

Y, finalmente, sí $2.78f_y \leq F_{cre}$:

$$F_n = f_y \quad (33)$$

Evalutando la sección $100 \times 100 \times 1.80 \text{ mm}$, se obtiene que:

Resistencia a la flexión

$$\phi M_{ny} = 458 \text{ kgf} \cdot \text{m} \quad M_{uy} = 180 \text{ kgf} \cdot \text{m} \quad R_{my} = 0.393$$

$$\phi M_{nz} = 458 \text{ kgf} \cdot \text{m} \quad M_{uz} = 83 \text{ kgf} \cdot \text{m} \quad R_{mz} = 0.182$$

Diseño por cortante

La resistencia al corte nominal v_n , utilizando un $\phi = 0.95$, debe calcularse de acuerdo con la Ecuación 34 y, la Ecuación 35 o la Ecuación 36, según corresponda, contemplando la magnitud de $\lambda = \lambda_v = \sqrt{V_y/V_{cr}}$. Para $\lambda_v \leq 0.815$:

$$V_n = V_y \quad (34)$$

Mientras que para $0.815 < \lambda_v \leq 1.227$:

$$V_n = 0.815 \sqrt{V_{cr} V_y} \quad (35)$$

Y para $\lambda_v > 1.227$:

$$V_n = V_{cr} \quad (36)$$

La fuerza de pandeo elástico por cortante se calcula con la Ecuación 37.

$$V_{cr} = k_v \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(h/t)^2} A_w \quad (37)$$

La resistencia nominal al pandeo en el alma P_{nwc} , utilizando un $\phi = 0.85$, debe calcularse de acuerdo con la Ecuación 38. Para los coeficientes C , C_R , C_N , C_h se toman los valores de 10, 0.11, 0.21 y 0.02, respectivamente.

$$\phi P_{nwc} = C \cdot t^2 f_y \sin(\theta) \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \left(1 - C_N \sqrt{\frac{N}{t}} \right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) \quad (38)$$

Evalutando la resistencia al cortante y al pandeo en el alma, para la sección 100x100x1.80 mm, se obtiene:

Resistencia al cortante

$$\phi V_{ny} = 4740 \text{kgf} \quad V_{uy} = 35 \text{kgf} \quad R_{vy} = 0.007$$

$$\phi V_{nz} = 4740 \text{kgf} \quad V_{uz} = 801 \text{kgf} \quad R_{vz} = 0.169$$

$$\phi P_{nwcy} = 1828 \text{kgf} \quad P_{uwy} = 35 \text{kgf} \quad R_{wy} = 0.019$$

$$\phi P_{nwcz} = 1828 \text{kgf} \quad P_{uwz} = 801 \text{kgf} \quad R_{wz} = 0.438$$

Diseño por fuerzas combinadas

El elemento debe ser capaz de resistir la combinación de las fuerzas axiales (tensión o compresión) que interactúan con los momentos flectores. La revisión se realiza mediante la ecuación de interacción que se muestra en la Ecuación 39.

$$R_T = \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} + \frac{M_{uz}}{\phi M_{nz}} \leq 1.0 \quad (39)$$

Evalutando para la sección 100x100x1.80 mm, el resultado es:

Interacción de todas las fuerzas

$$R_T = 0.786$$

Resumen tubos rectangulares

En la estructura se utilizaron múltiples tamaños de tubo, cuyas características están en el capítulo de Geometría. En esta sección se resumen los resultados obtenidos del proceso de revisión de todos los elementos tubulares con sección rectangular o cuadrada.

La capacidad de los elementos se muestra en la Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3: Resumen de capacidad nominal reducida para tubos rectangulares

Tubo	$\phi P t_n$	$\phi P c_n$	ϕM_{ny}	ϕM_{nz}
100x100x1.80	14410kgf	10962kgf	458kgf m	458kgf m

Tabla 4: Resumen de capacidad nominal reducida para tubos rectangulares

Tubo	ϕV_{ny}	ϕV_{nz}	ϕP_{nwy}	ϕP_{nwc}
100x100x1.80	4740kgf	4740kgf	1828kgf	1828kgf

Tabla 5: Resumen de solicitaciones máximas para tubos rectangulares

Tubo	$P t_u$	$P c_u$	M_{uy}	M_{uz}
100x100x1.80	44kgf	1324kgf	180kgf m	83kgf m

Tabla 6: Resumen de solicitaciones máximas para tubos rectangulares

Tubo	V_{uy}	V_{uz}	P_{uwy}	P_{uwc}
100x100x1.80	35kgf	801kgf	35kgf	801kgf

Para las interacciones, se evalúan todos los elementos, en distintas secciones y para todos los casos de carga, para posteriormente seleccionar el resultado de la interacción más crítica. En la Tabla 7 y la Tabla 8 se resumen las relaciones demanda capacidad máximas.

Tabla 7: Resumen de relaciones demanda/capacidad críticas para tubos rectangulares

Tubo	R_{Pt}	R_{Pc}	R_{My}	R_{Mz}	R_T
100x100x1.80	0.0	0.12	0.39	0.18	0.79

Tabla 8: Resumen de relaciones demanda/capacidad críticas para tubos rectangulares

Tubo	R_{Vy}	R_{Vz}	R_{pwy}	R_{pwc}
100x100x1.80	0.01	0.17	0.02	0.44

Referencias

- [1] Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, *Código Sísmico de Costa Rica 2010 Revisión 2014*, 5ta ed. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2016.
- [2] Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, *Lineamientos para el diseño por viento de edificaciones en Costa Rica*, 1era ed. San José, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2023.
- [3] Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, *Comentarios al Código Sísmico de Costa Rica 2010*, 1ed ed. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2013.
- [4] Asociación Costarricense de Geotecnia, *Código de cimentaciones de Costa Rica*, 2da ed. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2009.
- [5] American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary on Building Code requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)* . Farmington Hills, MI, 2019.
- [6] American Institute of Steel Construction, *ANSI/AISC 360-22 Specification for Structural Steel Buildings*. United States of America, 2022.
- [7] American Institute of Steel Construction, *ANSI/AISC 341-22 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. United States of America, 2022.
- [8] American Iron and Steel Institute, *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, 1era ed. San José, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2016.