

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

MEMORIA DE CÁLCULO ESTRUCTURAL NAVE EXISTENTE PARA NUEVA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE ADM

ADM

PET FOOD WET LINE - MORELOS

AYESA-ADM

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Carlos Melchor AYESA MÉXICO	Andrea Salgado AYESA MÉXICO	Eduardo Cabañas ADM

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Control de cambios

Versión:	Revisión:	Fecha:	Modificaciones:
0	A	15/04/2024	Emitido para revisión.

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

1	Datos generales del proyecto	8
2	Códigos y reglamentos	8
3	Combinaciones y factores de carga	9
4	Cargas	10
4.1	Cargas Permanentes.	10
4.2	Cargas Variables.....	11
4.3	Cargas accidentales	11
5	Materiales	11
5.1	Concreto.....	11
5.2	Acero de refuerzo	11
5.3	Acero estructural	11
6	Modelo de análisis estructural.....	12
7	Condiciones de regularidad	12
8	Análisis sísmico	12
8.1	Categoría, subcategoría y fracción de amortiguamiento	12
8.2	Coeficiente sísmico y sobre resistencia	13
8.3	Redundancia	13
8.4	Espectros de diseño	13
9	Análisis de viento	15
9.1	Velocidad básica de diseño.....	15

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

9.1.1	Velocidad Regional.....	15
9.1.2	Factor de exposición	15
9.1.3	Factor de topografía local.....	16
9.2	Análisis estático.....	16
9.2.1	Presión dinámica de base q_z	16
9.2.2	Presiones Interiores	17
9.2.3	Presiones exteriores.....	17
9.2.4	Dirección +X	17
9.2.5	Dirección -X	20
9.2.6	Dirección +Y	20
9.2.7	Dirección -Y	21
10	Granizo	22
10.1	Carga uniforme debido a granizo	22
10.2	Revisión de valles	22
11	Excentricidad accidental	23
12	Resultados del análisis	23
12.1	Verificación de cargas verticales.	23
12.2	Participación modal.....	24
12.3	Revisión de cortante basal	25

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	<p>Fecha: 15/04/2024</p>
	<p>Revisión: A</p>

12.4	Revisión de desplazamientos laterales	26
12.4.1	Seguridad contra colapso.....	26
12.4.2	Límite de servicio.....	27
13	Mecánica de suelos.....	29
14	Diseño de cimentación	29
14.1	Ancias	29
14.2	Placa Base	29
14.2.1	Placa base PL-1	29
14.2.2	Placa base PL-2	30
14.3	Zapatas.....	31
14.3.1	Zapata Z-1	31
14.3.2	Flexión	31
14.3.3	Cortante en una dirección	32
14.3.4	Cortante en dos direcciones	32
14.3.5	Acero por temperatura	33
15	Diseño de superestructura	33
15.1	Contravientos.....	33
15.1.1	CV-1(2LI6X6X3/8).....	33
15.1.2	CVR-1 (2OS $\varnothing=25.4$ mm)	35

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.2	Armadura	36
15.2.1	D-1 (L4X4X1/4).....	36
15.2.2	D-1 (L4X4X1/4 REFORZADO)	38
15.2.3	M-1 (L4X4X1/4)	39
15.2.4	M-1 (L4X4X1/4 REFORZADO)	39
15.2.5	C. Sup (TR 9x38).....	39
15.2.6	C. Inf (TR 9x38)	40
15.2.7	C. Inf (TR 9x38 REFORZADA)	41
15.3	Trabes.....	44
15.3.1	TM-1 (HSS10X10X1/4).....	44
15.3.2	TM-2 (12X19 CUBIERTA)	47
15.3.3	Trabe TMR-1 (2CF254X70X14)	48
15.4	Columnas	49
15.4.1	Celosía D-1 (2LI 4X4X1/4).....	49
15.4.2	Columna CM-1 (W12X50 Perfiles interiores)	52
15.4.3	Columna CM-1 (W12X50 Perfiles exteriores)	56
15.4.4	Columna CM-1 (W12X50 Perfiles interiores reforzados)	58
15.4.5	Columna CMR-1 (HSS 12X12X1/4).....	59
15.4.6	Columna DR-1 (HSS 8X8X1/4)	62

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.4.7	Columna CM-2 (W12X40 REFORZADA)	63
15.4.8	Columna CM-2 (W12X40)	66
15.4.9	Columna CM-3 (W12X19 REFROZADO)	68
15.4.10	Columna CM-3 (W12X19)	69
15.4.11	Columna CM-4 (2CF254X70X14).....	71

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

1 Datos generales del proyecto

El proyecto "ADM Animal Nutrition Yecapixtla" ubicado en Parque Industrial Burlington, Km. 2.5 Cuautla-Yecapixtla, Morelos, México es una estructura a base de marcos metálicos constituidos por columnas compuestas por dos perfiles IR unidos con celosía que, a su vez, consta de dos ángulos LI conectados al interior de los patines de los primeros perfiles mencionados. Para cubrir los claros de 60 metros presentes en la nave industrial se optó por colocar armaduras cuyo peralte mide 2.45 metros. Las cuerdas superior e inferior son perfiles TR y las cuerdas y montantes son también perfiles LI.

La altura de la estructura en el perímetro es de casi 13 metros; a nivel de la cumbrera es de 14.45 metros aproximadamente. Como se comentó en el párrafo anterior, la dimensión transversal de la estructura es de 60 metros, mientras que en la dirección ortogonal se tienen casi 108 metros. Se tienen 10 marcos de los cuales 8 son iguales y 2 diferentes; estos últimos son los que se ubican en los extremos de la nave.

Por otro lado, también se colocan contraventeos de cubierta y de fachada, así como elementos de apoyo más o menos al centro de los diferentes claros y diagonales que se apoyan en las columnas para reducir el claro libre de las armaduras ya descritas.

A su vez, las cargas se transmiten al suelo mediante zapatas aislada que cuentan con trabes de liga para soportar los momentos y los asentamientos diferenciales que se puedan presentar en la cimentación.

Para la acción de sismo y viento, la clasificación de la estructura se considerará con base en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE, en adelante MDOC, pues se ubica fuera de la CDMX. La estructura se encuentra en Morelos; sus coordenadas son: Longitud -98.8772 O y Latitud 18.8558 N. Para el primero se tomarán en cuenta las consideraciones para estructuras de tipo industrial, en el grupo B1; para el segundo, de acuerdo con su importancia será del grupo B y por su respuesta ante la acción del viento del tipo 1.

En cuanto a la revisión del estado límite de falla, se empleará la combinación para una estructura del grupo B. Se deja de lado la clasificación del subgrupo ya que este involucra la ubicación dentro de la CDMX y la ubicación de la estructura se encuentra fuera de la ciudad.

La ubicación de la estructura se muestra en la siguiente imagen; se obtuvo de la aplicación PRODISIS de la CFE.

2 Códigos y reglamentos

Para la revisión de las acciones dinámicas como el viento y sismo se emplearán las consideraciones establecidas en el MDOC de viento 2020 y sismo 2015; así mismo, para la revisión de los elementos estructurales se seguirá lo especificado en la Norma Técnica Complementaria correspondiente al material publicada en 2023. Finalmente, cabe mencionar que se aplicarán los lineamientos del Reglamento de Construcciones para el DF.

<p style="text-align: center;">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	<p>Fecha: 15/04/2024</p>
	<p>Revisión: A</p>

3 Combinaciones y factores de carga

Siguiendo lo establecido en la sección 3.4 de las NTC sobre criterios y acciones, las combinaciones que se aplicarán al modelo estructural son las siguientes.

Las combinaciones para revisar el estado límite de servicio son:

$CMT + CV$
 $CMT + CVI + S_x + 0.3 S_y$
 $CMT + CVI + S_x - 0.3 S_y$
 $CMT + CVI - S_x - 0.3 S_y$
 $CMT + CVI - S_x + 0.3 S_y$
 $CMT + CVI + S_y + 0.3 S_x$
 $CMT + CVI + S_y - 0.3 S_x$
 $CMT + CVI - S_y - 0.3 S_x$
 $CMT + CVI - S_y + 0.3 S_x$

Las combinaciones para revisar el estado límite de falla son:

$1.3 CMT + 1.5 CVM$
 $1.1 (CMT + CVI + S_x + 0.3 S_y)$
 $1.1 (CMT + CVI + S_x - 0.3 S_y)$
 $1.1 (CMT + CVI - S_x - 0.3 S_y)$
 $1.1 (CMT + CVI - S_x + 0.3 S_y)$
 $1.1 (CMT + CVI + S_y + 0.3 S_x)$
 $1.1 (CMT + CVI + S_y - 0.3 S_x)$
 $1.1 (CMT + CVI - S_y - 0.3 S_x)$
 $1.1 (CMT + CVI - S_y + 0.3 S_x)$
 $CMT + W_1$
 $CMT + W_2$
 $CMT - W_1$
 $CMT - W_2$
 $CMT + \text{Granizo}$

Donde:

CMT es la carga muerta total constituida por el peso propio (PP) y la sobre carga muerta (SCM).

CV es la carga viva media.

CVI es la carga viva instantánea.

CVM es la carga viva máxima.

S_x son las fuerzas inducidas por el sismo en dirección X.

S_y son las fuerzas inducidas por el sismo en dirección Y.

W₁ es la primera condición de viento.

W₂ es la segunda condición de viento.

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

4 Cargas

4.1 Cargas Permanentes.

Se considera como cargas permanentes a todas aquellas que varían muy poco en el tiempo o directamente no lo hacen. Ejemplo de estas son el peso propio de los elementos, los acabados, muros, instalaciones, rellenos, etc. A continuación, se presentan las cargas consideradas para cada zona de la estructura. El peso de los equipos de aire acondicionado se contempló con el propio del equipo más toda la longitud de los ductos que conducen el aire.

Tabla 1. Cargas permanentes para cubierta.

Tipo de carga	Magnitud	Unidades
Lámina KR-24	6.6	kgf/m ²
Colchoneta de fibra de vidrio	1	kgf/m ²
Total	7.6	kgf/m ²

Las cargas aplicadas debida a los equipos son las siguientes. Nótese que se presentan como cargas distribuidas debido a que el peso total será soportada por un perímetro más o menos de la dimensión del elemento correspondiente.

Tabla 2. Cargas consideradas para equipos de aire.

Equipo	Magnitud	Unidades
VE-30	44.39	kgf/m
VE-02	51.87	kgf/m
VE-01	53.21	kgf/m
VE-03	54.59	kgf/m
VE-36	181.75	kgf/m
VE-18	54.59	kgf/m
VE-19	50.29	kgf/m
VE-21	57.16	kgf/m
VE-22	82.15	kgf/m
VE-23	72.58	kgf/m
VE-24	82.18	kgf/m
VE-25	32.06	kgf/m
VE-26	31.14	kgf/m
VE-27	31	kgf/m
VE-28	30.81	kgf/m
VE-29	30.53	kgf/m
VE-08	51.96	kgf/m

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

VE-13	53.54	kgf/m
VE-09	55.32	kgf/m
VE-14	55.52	kgf/m
VE-15	54.03	kgf/m

4.2 Cargas Variables

En contra parte, las cargas variables se refieren a todas aquellas que no son constantes y varían en gran medida durante la vida útil de la estructura. Estas cargas son proporcionadas en la tabla 6.1.2.2 de las NTC sobre criterios y acciones. Para este caso sólo se tiene la cubierta de la nave cuya pendiente es apenas mayor que 5%. Las cargas consideradas se muestran en la tabla siguiente. Nótese que las cargas consideradas son las correspondientes a las NTC del año 2017.

Tabla 3. Carga viva para el uso de piso.

Destino de piso o cubierta	W (kgf/m ²)	Wa (kgf/m ²)	Wm (kgf/m ²)
Cubierta y azoteas: pendiente > %5	5	20	40

4.3 Cargas accidentales

Las acciones accidentales que se considerarán en el análisis son las cargas por viento, por sismo y por granizo. El análisis correspondiente para cada una de las acciones anteriores se desglosará más adelante.

5 Materiales

5.1 Concreto

Para estructura principal de concreto se considera uno de clase 1 con agregado grueso calizo cuyo peso volumétrico alcanza los 2400 kgf/m³; de acuerdo con las normas, su módulo de elasticidad se calcula con:

$$E_c = 14,000 \cdot \sqrt{f'_c}$$

Las resistencias a compresión son las siguientes.

Tabla 4. Esfuerzo a compresión y módulo de elasticidad para concreto.

Elemento	f' _c (kgf/cm ²)	E _c (kgf/cm ²)
Cimentación	250	221359

5.2 Acero de refuerzo

Se empleará un esfuerzo de fluencia común para las barras de refuerzo en los elementos de concreto de 4200 kgf/cm². Si se colocan elementos del #2.5, este será de 2500 kgf/cm².

5.3 Acero estructural

El acero empleado para cada tipo de perfil se muestra en la tabla que sigue.

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Tabla 5. Material para perfiles de acero.

Perfil	f_y (kgf/cm ²)	f_u (kgf/cm ²)	Acero
LI	2530	4080	ASTM A-36
TR	2530	4080	ASTM A-36
Placas	2530	4080	ASTM A-36
CE	2530	4080	ASTM A-36
IR	3515	4920	ASTM A-36
OR	3515	4920	ASTM A-50
Monten	3515	4080	ASTM A-36
Anclas	2530	4080	ASTM A-36

Finalmente, el módulo de elasticidad del acero se modelará con un valor de:

$$E_s = 2,039,000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

6 Modelo de análisis estructural

Para realizar el análisis de la estructura se empleará un análisis dinámico modal espectral con la finalidad de poder determinar las fuerzas de inercia originadas por sismo, además de observar el comportamiento de la estructura bajo dicha solicitación. Este análisis sólo abarca el comportamiento elástico lineal de la estructura mediante elementos barra conectados en tres direcciones. La realización de todo lo descrito anteriormente se logró empleando el software SAP2000.

7 Condiciones de regularidad

El MDOC de sismo establece en su sección 3.4.7 que la irregularidad para estructuras industriales ya está implícita en los factores de comportamiento sísmico por lo que no es necesario revisar estas condiciones para esta estructura en específico.

8 Análisis sísmico

8.1 Categoría, subcategoría y fracción de amortiguamiento

Los espectros destinados al diseño y a la revisión de servicio de la estructura se obtendrán de acuerdo con lo establecido en el MDOC de sismos de la CFE. Con este fin es necesario clasificar a la estructura de que se trata esta memoria en alguna de las categorías establecidas en el manual. Se piensa la más adecuada corresponde a “Estructuras Industriales”, sección 3.4 del Manual citado.

Dentro de esta categoría, la estructura se considera dentro de la subcategoría “Tipo industrial I” por ser una estructura alargada y cubrir grandes claros. Para seleccionar la fracción del amortiguamiento se considera que la estructura con uniones soldadas rígidas. Tomando en cuenta

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

la afirmación anterior y recurriendo a la tabla 4.1 del MDOC, el porcentaje de amortiguamiento es el siguiente.

$$\zeta_e = 4\%$$

8.2 Coeficiente sísmico y sobre resistencia

De la tabla 4.2 del Manual y considerando la siguiente relación se determina el factor de comportamiento sísmico y el factor reductor por sobre resistencia.

$$\frac{h}{b} = \frac{13 \text{ m}}{60 \text{ m}} = 0.22$$

Visto lo anterior, la estructura de acero se considera de baja altura por lo que:

$$Q = 2$$

$$R_0 = 1.8$$

8.3 Redundancia

Para la determinar el factor por redundancia se debe recurrir a la sección 3.3.1.4 del MDOC. Se considera que esta edificación cuenta con 10 marcos de 1 crujía en una dirección, mientras que en la dirección ortogonal sólo dos marcos con 9 crujías. De estas afirmaciones se puede concluir que el factor correspondiente será de:

$$\rho = 1$$

8.4 Espectros de diseño

En la siguiente tabla se enlistan todos los factores necesarios que se emplearon en la creación de los diferentes espectros. De acuerdo con el MDOC, para revisar el estado límite de prevención contra colapso deberá aplicarse el espectro modificado establecido en la sección 3.3.1.7 del manual. En cuanto a las distorsiones, para el estado límite de daños a elementos no estructurales, el espectro requerido es el mencionado en el apartado 3.3.1.8, mientras que para el estado límite de seguridad contra colapso se deberá multiplicar el espectro modificado por los factores especificados en la sección 3.4.12.2 del manual.

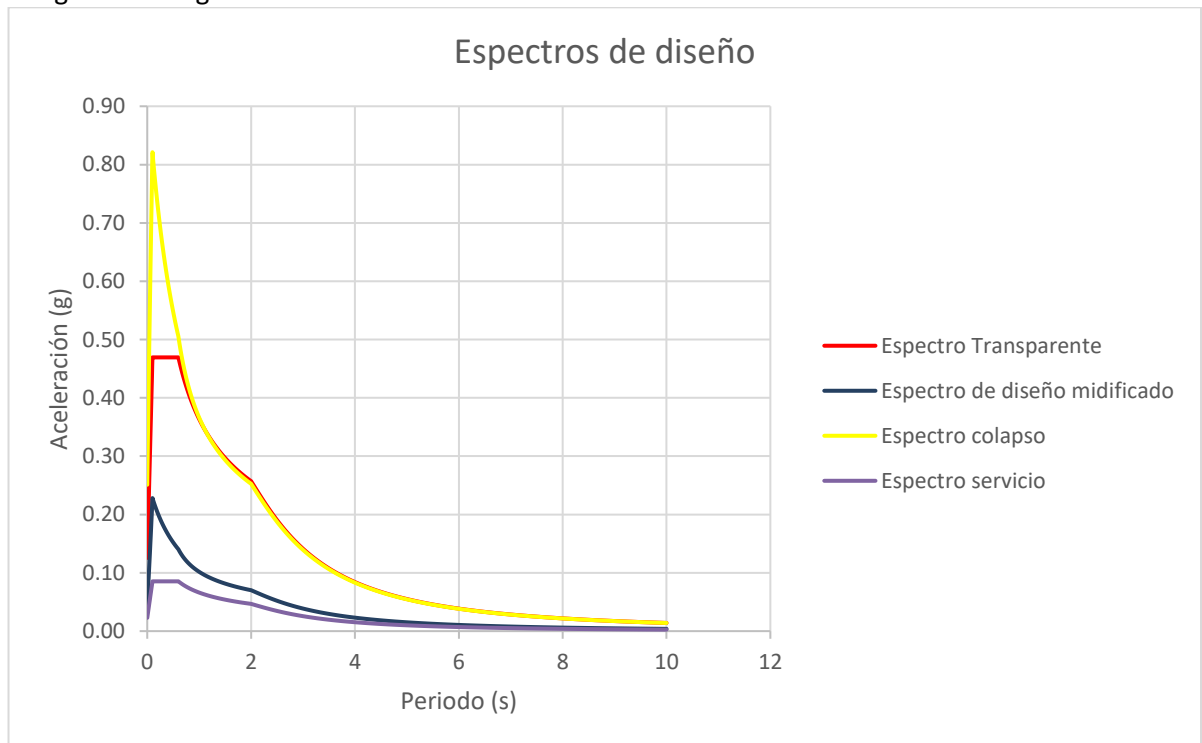
Tabla 6. Factores para determinar espectros de diseño.

Factor	Valor	Unidad
Zona	C	
Tipo de terreno	1	
$F_{sit} =$	1	
$a_{0r} =$	123.09	cm/s ²
$a_0 =$	123.09	cm/s ²
$F_{res} =$	3.38	
$c =$	416.33	cm/s ²
$F_{IE} =$	1	
$\zeta_e =$	4%	
$T_c =$	2	s

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha:	15/04/2024
	Revisión:	A

$T_a=$	0.1	s
$T_b=$	0.6	s
$k=$	1.5	
$r=$	0.5	
$Q=$	2	
$R_0=$	1.8	
$\rho=$	1	

Los espectros de diseño obtenidos para la ubicación dada y los factores anteriores se muestran en la siguiente imagen.



Nótese que las gráficas anteriores se obtuvieron de forma manual con una hoja de cálculo para poder obtener los tres necesarios. Se comparó el espectro transparente con el arrojado en PRODISIS para corroborar los resultados.

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	<p>Fecha: 15/04/2024</p>
	<p>Revisión: A</p>

9 Análisis de viento

9.1 Velocidad básica de diseño

Para determinar la velocidad de diseño se requiere determinar el factor de topografía local, el de exposición local y la velocidad regional de ráfaga para aplicar la siguiente expresión establecida en el MDOC de viento en la sección 2.

$$V_D = F_T \cdot F_{rz} \cdot V_R$$

La determinación de los factores anteriores se desarrolla más abajo; sin embargo, se emplearán ya en la expresión anterior para determinar la velocidad de diseño.

$$V_D := F_T \cdot F_{rz} \cdot V_R = 139.7 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

9.1.1 Velocidad Regional

La velocidad regional se obtuvo de la tabla C.1 del apéndice del MDOC para Cuautla, Morelos ya que es la ubicación más cercana a la estructura en dicha tabla; en la sección 2.2.1 del MDOC se menciona que las estructuras del grupo B deberán considerar un periodo de retorno de 50 años. Así pues, la velocidad regional es:

$$V_R = 111.01 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

Conservadoramente por las isoyetas de:

$$V_R = 120 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

9.1.2 Factor de exposición

Por otro lado, de acuerdo con la tabla 2.1 del MDOC y la siguiente figura, se considera que el terreno es categoría 1, pues en él se puede observar un terreno prácticamente plano.

Con el dato anterior se puede entrar a la tabla 2.2 del MDOC para seleccionar los valores de c , α y δ . Para un terreno de categoría 2 se tienen los siguientes valores.

$$c := 1.142 \quad \alpha := 0.061 \quad \delta := 280 \text{ m}$$

Con esta información es posible aplicar las expresiones 2.3, 2.4 y 2.4. Para ello se considerará que la altura de la estructura es de 13.688 metros.

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$F_{rz} := \begin{cases} \text{if } z \leq 10 \text{ m} & = 1.164 \\ \quad x := c \\ \text{else if } 10 \text{ m} < z < \delta & \\ \quad x := c \cdot \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha & \\ \text{else} & \\ \quad x := c \cdot \left(\frac{\delta}{10 \text{ m}} \right)^\alpha & \\ x & \end{cases}$$

9.1.3 Factor de topografía local

Para seleccionar este factor se considera que el sitio es uno normal, lo que nos lleva a concluir que este factor toma un valor igual 1 de la tabla 2.3.

$$F_T = 1$$

9.2 Análisis estático

Como se describió en los datos generales del proyecto, esta se considera una estructura de tipo 1 con base en su respuesta al viento, por lo que es factible emplear el análisis estático de viento; dicho procedimiento se muestra a continuación.

9.2.1 Presión dinámica de base q_z

La presión dinámica de base se calcula con la expresión 3.1.a del MDOC para viento la cual es la siguiente:

$$q_z = 0.0048 \cdot G \cdot V_D^2$$

A su vez, el valor de G se obtiene con la expresión 3.2 del mismo manual; para ello es necesario conocer la presión en milímetros de mercurio y el promedio de las temperaturas mínimas. Este último valor es de:

$$\tau = 20.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por otro lado, Atizapán se encuentra a una altura de 2,280 msnm. Si interpolamos la presión con la tabla 3.1 del Manual se tiene el siguiente resultado.

Tabla 7. Tabla 3.1 del MDOC para viento 2020. CFE.

Altitud h_m (msnm)	Presión barométrica Ω (mm de Hg)
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

3500	495
------	-----

$$\Omega = 629.4 \text{ mm de Hg}$$

El valor para G es el siguiente:

$$G = \frac{0.392 \cdot \Omega}{273 + \tau} = 0.8406$$

A su vez, la presión dinámica de base es la siguiente:

$$q_z = 0.0048 \cdot G \cdot V_D^2 = 78.74 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

9.2.2 Presiones Interiores

En la sección 3.5.1.2 del MDOC se establecen los criterios para determinar las presiones interiores en las estructuras. Aquí se presenta la expresión 3.6 con la que se deberá calcular el valor mencionado.

$$P_i := C_{pi} \cdot K_{ra} \cdot q_z$$

Para este caso en específico, se considerará una estructura eficientemente sellada por lo que de acuerdo con la tabla 3.8.a los coeficientes de presión interior son los dos siguientes.

$$C_{pi} := \begin{bmatrix} -0.2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Calculando la presión para ambos valores se tienen los siguientes dos resultados. Nótese que el factor K_{ra} es igual a la unidad, pues sólo aplica para recubrimientos.

$$P_i := C_{pi} \cdot q_z \cdot K_{ra} = \begin{bmatrix} -15.75 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

9.2.3 Presiones exteriores

Las presiones exteriores se calculan como se expone en la sección 3.5.1.1. La ecuación general es la siguiente:

$$P_e = C_{pe} \cdot K_A \cdot K_L \cdot K_{ra} \cdot q_z$$

Estas presiones dependen de la superficie de que se trate en la estructura, por lo que deberán ser varias en cada dirección.

9.2.4 Dirección +X

En la siguiente imagen se ilustra en qué dirección impacta el viento en la estructura, misma que se denominará +X.

9.2.4.1 Muro de Barlovento

De la tabla 3.2 del MDOC se tiene que, para muros de barlovento en cualquier condición, el coeficiente de presión exterior es:

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$C_{pe} := 0.8$$

Por otro lado, los factores K_L y K_{ra} no intervendrán en las cargas aplicadas a los elementos principales, por lo que serán igual a 1. Para el Factor K_A se piensa considerar el caso más desfavorable que de acuerdo con el manual es igual a 1.

$$K_A := 1 \quad K_L := 1 \quad K_{ra} := 1$$

Así pues, la presión en muro de barlovento es:

$$P_{e_MBY} := C_{pe_MBY} \cdot K_{A_MBY} \cdot K_{L_MBY} \cdot K_{ra_MBY} \cdot q_z = 62.9889 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Y las presiones netas:

$$P_{e_MBY} - P_i = \left[\begin{array}{c} 78.74 \\ 62.99 \end{array} \right] \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

De las dos anteriores, la presión más desfavorable es la siguiente.

$$P_n = 78.74 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

9.2.4.2 Muro de sotavento

La relación de “d” entre “b” como especifica el MDOC en la figura 3.2 es la siguiente para este caso.

$$d = 107.79 \text{ m} ; b = 59.582 \text{ m}$$

$$\frac{d}{b} = 1.8091$$

Interpolando en los valores de la tabla 3.2 se tiene el siguiente coeficiente de presión exterior.

$$C_{pe_MSY} := -0.34$$

Siguiendo las mismas consideraciones que para el muro de barlovento, la presión exterior para muro de sotavento es la siguiente.

$$P_{e_MSY} := C_{pe_MSY} \cdot K_{A_MSY} \cdot K_{L_MSY} \cdot K_{ra_MSY} \cdot q_z = -26.7703 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Y la neta alcanza los siguientes valores.

$$P_{e_MSY} - P_i = \left[\begin{array}{c} -11.02 \\ -26.77 \end{array} \right] \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Se puede concluir que se presenta succión con una magnitud de:

$$P_n = -26.77 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

9.2.4.3 Muros laterales

Para los muros laterales es necesario recurrir a la tabla 3.3 para obtener los coeficientes de presión exterior. Estos varían de acuerdo con la altura de la estructura, considerada de 15 metros por simplicidad. Así pues, los coeficientes correspondientes se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8. Coeficientes de presión exterior para muros laterales.

Distancia desde muro de barlovento	C _{pe}
0 a 15 metros	-0.65
15 a 30 metros	-0.5
30 a 45 metros	-0.3
Más de 45 metros	-0.2

Las presiones netas son las siguientes.

Tabla 9. Presiones netas para muro lateral (a).

Distancia desde muro de barlovento	P _n
0 a 15 metros	-35.43
15 a 30 metros	-23.62
30 a 45 metros	-7.87
Más de 45 metros	0

Tabla 10. Presiones netas para muro lateral (b).

Distancia desde muro de barlovento	P _n
0 a 15 metros	-51.18
15 a 30 metros	-39.37
30 a 45 metros	-23.62
Más de 45 metros	-15.75

Se considera que las presiones más desfavorables son las presentadas en la tabla 11; así pues, serán estas las aplicadas en el modelo analítico.

9.2.4.4 Cubiertas transversales

En cuanto a las cubiertas de este tipo, es necesario revisar la tabla 3.4 (b) del manual considerando la siguiente relación.

$$d = 107.79 \text{ m} ; \bar{h} = 13.69 \text{ m}$$

$$\frac{\bar{h}}{d} = 0.127$$

Como la relación anterior es menor que 0.5, los coeficientes de presiones exteriores son los siguientes.

Tabla 11. Coeficientes de presión exterior para cubiertas transversales.

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Distancia desde muro de barlovento	C _{pe1}	C _{pe2}
0 a 7.5 metros	-0.9	-0.4
7.5 a 15 metros	-0.9	-0.4
15 a 30 metros	-0.5	0
30 a 45 metros	-0.3	0.1
Más de 45 metros	-0.2	0.2

Las presiones netas para cada caso se muestran a continuación.

Tabla 12. Presiones netas para cubierta transversal (a).

Distancia desde muro de barlovento	P _{n1}	P _{n2}
0 a 7.5 metros	-55.12	-70.86
7.5 a 15 metros	-55.12	-70.86
15 a 30 metros	-23.62	-39.37
30 a 45 metros	-7.87	-23.62
Más de 45 metros	0	-15.75

Tabla 13. Presiones netas para cubierta transversal (b).

Distancia desde muro de barlovento	P _{n1}	P _{n2}
0 a 7.5 metros	-15.75	-31.49
7.5 a 15 metros	-15.75	-31.49
15 a 30 metros	15.75	0
30 a 45 metros	23.62	7.87
Más de 45 metros	31.49	15.75

De las cuatro presiones netas obtenidas previamente, se considera que las más desfavorables son las presiones netas de la tabla 13 para el caso 2.

9.2.5 Dirección -X

Las presiones externas serán las mismas que en el caso anterior; aunque ahora en el sentido contrario.

9.2.6 Dirección +Y

La dirección considerada +Y es la perpendicular a la cumbrera como se muestra a continuación.

9.2.6.1 Muro de barlovento

El coeficiente de presión exterior es el mismo que en la dirección x, por lo que la presión exterior también será:

$$P_n = 78.74 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

<p style="text-align: center;">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

9.2.6.2 Muro de sotavento

Es necesario conocer el ángulo de inclinación de la cubierta para poder obtener el factor de presión exterior para este caso. Considerando que la cubierta tendrá una pendiente del 5.1%, el ángulo de inclinación será”

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{5.1}{100} \right) = 2.92^\circ$$

Por otro lado, la relación entre el largo y ancho en esta dirección es la siguiente.

$$d = 59.58 \text{ m}; b = 107.79 \text{ m}$$

$$\frac{d}{b} = 0.55$$

De forma que para un ángulo menor que 10 grados y una relación menor que 1, el coeficiente de acuerdo con la tabla 3.2 es:

$$C_{pe} := -0.5$$

La presión exterior es la siguiente.

$$P_{e_MSX} := C_{pe_MSX} \cdot K_{A_MSX} \cdot K_{L_MSX} \cdot K_{ra_MSX} \cdot Q_z = -39.3681 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Y las netas:

$$P_{e_MSX} - P_i = \left[\begin{array}{c} -23.62 \\ -39.37 \end{array} \right] \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Visto lo anterior, la presión neta más desfavorable tiene el siguiente valor.

$$P_n = -39.37 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

9.2.6.3 Muros laterales

En cuanto a los muros laterales, los coeficientes no cambian por lo que la combinación más desfavorable se presenta en la tabla 11.

9.2.6.4 Cubierta de barlovento y sotavento

Como la cubierta tiene tan sólo 2.92 grados de inclinación, los coeficientes de presión exterior se obtendrán de la tabla 3.4(b). Para este caso, la altura nuevamente se considera de 13.69 metros, por lo que la relación es:

$$\frac{\bar{h}}{59.58 \text{ m}} = 0.23$$

Como el cociente no es mayor que 0.5, se considerarán las condiciones para este caso; como consecuencia, las presiones serán las mismas que para la cubierta transversal.

9.2.7 Dirección -Y

Las condiciones de carga para esta dirección serán las mismas que para +Y, pero en sentido contrario.

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

10 Granizo

10.1 Carga uniforme debido a granizo

Para determinar las cargas por graniza se recurre a las NTC sobre acciones y criterios. La primera condición de carga es la uniforme en toda la cubierta; dicha carga se obtiene con la expresión 7.3.2.1 la cual se presenta a continuación.

$$W_g := 900 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \cdot H_s \cdot C_s$$

La altura acumulada por granizo H_s se determina con la tabla 7.3.2.2. En este caso, para una estructura del grupo B es:

$$H_s := 0.125 \text{ m}$$

Por otro lado, el factor de pendiente C_s se determina, a su vez, con la tabla 7.3.2.3. Como el ángulo de la pendiente es igual que 5.03 grados, se tiene:

$$C_s := 1 - \frac{5.03 - 5}{65} = 0.9995$$

Finalmente, la carga uniforme por granizo es la siguiente:

$$W_g := 900 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \cdot H_s \cdot C_s = 112.4481 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

10.2 Revisión de valles

Para considerar la acumulación del granizo en los valles de las cubiertas es necesario determinar la proyección horizontal de estas, en este caso se tiene que es igual que:

$$L_{ph} := 29.791 \text{ m}$$

Por otro lado, la carga lineal de granizo en la longitud que posteriormente se calculará en los valles es la siguiente:

$$W_p := 900 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \cdot H_s \cdot (1 - C_s) \cdot L_{ph} = 1.5468 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Como se puede observar, realmente es una carga muy pequeña, despreciable ya que el techo es poco inclinado. La longitud sobre la que obraría dicha carga es:

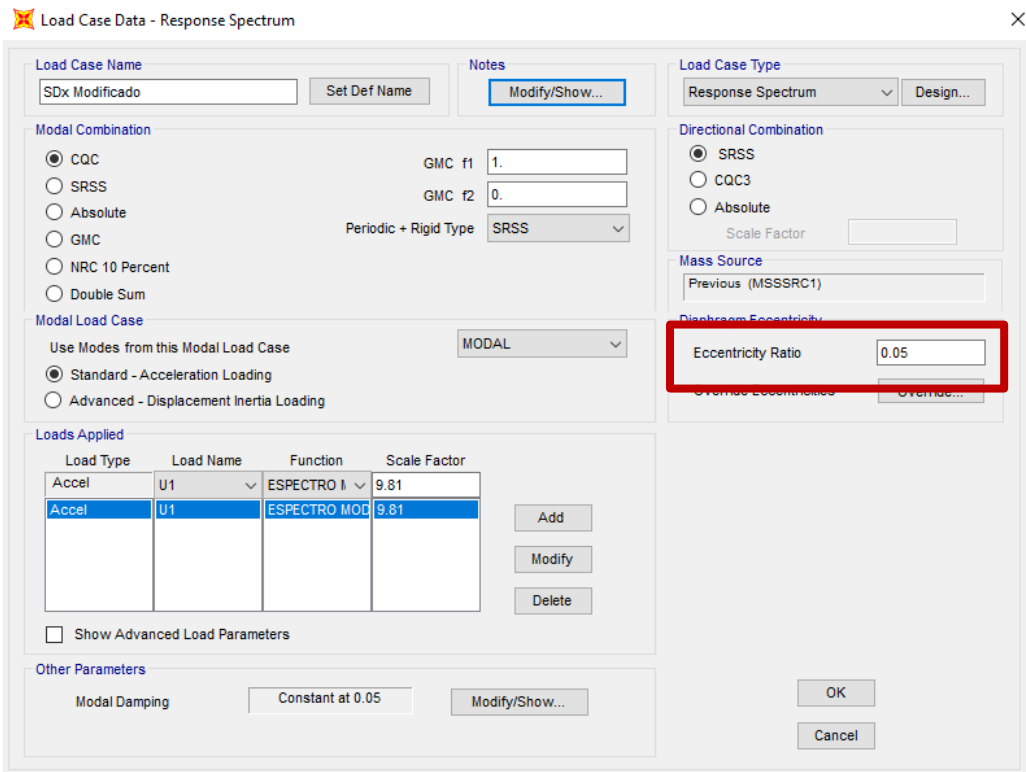
$$b_p := \sqrt{\frac{\frac{W_p}{450 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}}}{\tan(5.03^\circ)}} = 0.1976 \text{ m}$$

Dado que se trata de una carga apenas mayor que 2 kilogramos por metro en una longitud de 20 centímetros se piensa es aceptable despreciar esta acción accidental.

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

11 Excentricidad accidental

En el MDOC para sismo no se especifica un valor para la excentricidad accidental aplicable a las estructuras industriales; se tomarán en cuenta las consideraciones para estructuras normales en el apartado 3.3.5.3. Se menciona que la excentricidad se deberá incrementar 0.05. A continuación se muestra la asignación de dicho valor en la definición de los espectros de diseño; al ser un procedimiento repetitivo sólo se mostrará una vez.



The screenshot shows the 'Load Case Data - Response Spectrum' dialog box. The 'Load Case Name' is 'SDx Modificado'. The 'Modal Combination' is set to 'CQC'. The 'Modal Load Case' is 'MODAL'. The 'Loads Applied' table shows two entries: 'Accel' with 'U1' and 'ESPECTRO II' at a scale factor of 9.81, and 'Accel' with 'U1' and 'ESPECTRO MOD' at a scale factor of 9.81. The 'Eccentricity Ratio' field is highlighted with a red box and set to 0.05. The 'Other Parameters' section shows 'Modal Damping' set to 'Constant at 0.05'.

Ilustración 2. Consideración de excentricidad accidental.

12 Resultados del análisis

12.1 Verificación de cargas verticales.

Para corroborar que las cargas se están transmitiendo de forma adecuada es necesario obtener la resultante de las cargas aplicadas a la estructura de forma manual para posteriormente compararlas con las arrojadas por el software. Las cargas totales aplicadas son las siguientes.

Tabla 14. Cálculo manual de cargas.

Nivel	Área (m ²)	SCM (kgf/m ²)	SCM (kgf)	CVM (kgf/m ²)	CVI (kgf/m ²)	CV (kgf/m ²)	SCM (tonf)	CVM (tonf)	CVI (tonf)	CV (tonf)
-------	---------------------------	------------------------------	--------------	------------------------------	------------------------------	-----------------------------	---------------	---------------	---------------	--------------

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Cubierta	6429.77	7.6	3316.9	40	20	5	52.18	257.19	128.6	32.15
----------	---------	-----	--------	----	----	---	-------	--------	-------	-------

La suma de todas las reacciones en la base de la estructura que arroja el programa son las siguientes.

Tabla 15. Reacciones obtenidas del modelo.

SCM (tonf)	CVM (tonf)	CVI (tonf)	CV (tonf)
54	255.98	127.99	32

Como es posible observar, las cargas son prácticamente las mismas, por lo que se puede concluir que las cargas se distribuyen de manera adecuada a través de la estructura.

12.2 Participación modal

La sumatoria de la participación modal deberá alcanzar por lo menos el 90% como lo establecen las NTC de diseño por sismo en cada dirección horizontal; para lograrlo, el modelo cuenta con 20 modos de vibrar obtenidos con vectores Ritz. La participación en cada dirección son las siguientes.

Tabla 16. Periodos y participación modal.

Foma modal	Periodo	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
1	0.84	0.0164	0.0000	0.0000	0.02	0.00	0.00
2	0.78	0.0611	0.0000	0.0000	0.08	0.00	0.00
3	0.77	0.0019	0.0000	0.0003	0.08	0.00	0.00
4	0.76	0.0234	0.0000	0.0001	0.10	0.00	0.00
5	0.73	0.0205	0.0000	0.0000	0.12	0.00	0.00
6	0.65	0.0065	0.0001	0.0000	0.13	0.00	0.00
7	0.62	0.4953	0.0000	0.0036	0.63	0.00	0.00
8	0.60	0.0043	0.0000	0.0053	0.63	0.00	0.01
9	0.52	0.0271	0.0756	0.0150	0.66	0.08	0.02
10	0.51	0.0069	0.4833	0.0030	0.66	0.56	0.03
11	0.49	0.0206	0.0000	0.0152	0.68	0.56	0.04
12	0.46	0.0015	0.1473	0.0012	0.69	0.71	0.04
13	0.42	0.0009	0.0706	0.0038	0.69	0.78	0.05
14	0.39	0.0030	0.0031	0.0321	0.69	0.78	0.08
15	0.30	0.0855	0.0000	0.0410	0.77	0.78	0.12
16	0.27	0.0017	0.0010	0.1099	0.78	0.78	0.23
17	0.25	0.0001	0.0227	0.0051	0.78	0.80	0.24
18	0.15	0.1381	0.0000	0.0468	0.91	0.80	0.28
19	0.14	0.0287	0.0001	0.3117	0.94	0.80	0.59
20	0.10	0.0000	0.1431	0.0003	0.94	0.95	0.59

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Se puede observar que para la forma modal 20 se alcanza más del 90% en las direcciones X y Y; es factible decir que el modelo es adecuado.

12.3 Revisión de cortante basal

Para la revisión el cortante basal primero es necesario determinar el peso total de la edificación; para esto se consideraron los casos de carga del peso propio, sobrecarga muerta y carga viva instantánea. El peso de la estructura es el siguiente:

Tabla 17. Peso de la estructura para cortante basal.

OutputCase	GlobalFZ
PP	281.779
SCM	54.0024
CVI	127.991
Total	463.77

Por otro lado, el cortante en la base para cada dirección se muestra a continuación. Nótese que el espectro considerado es el de seguridad contra colapso; es decir, el modificado.

Tabla 18. Cortantes en la base de la estructura.

OutputCase	GlobalFX	GlobalFY
SDx Modificado	41.02	1.01
SDy Modificado	1.58	50.33

En el MDOC para sismo se establece que la reacción entre el cortante basal y el peso total de la estructura no deberá ser menor que el 70% de la ordenada normalizada del espectro modificado correspondiente al periodo de la estructura. En la siguiente tabla se muestran diversos datos, entre ellos el periodo, la ordenada mencionada, el peso total y los cortantes considerados en ambas direcciones, así como la ordenada del espectro modificado para el tiempo 0, pues tampoco puede ser menor que este.

Tabla 19. Comprobación de cortante basal.

$T_e =$	0.84	s
$S_{a \text{ reducido}} =$	0.11	g
$0.7 * S_a =$	0.08	g
$W_t =$	463.77	tonnef
$V_{0x} =$	41.02	tonnef
$V_{0x}/W_t =$	0.09	
$V_{0y} =$	50.33	tonnef
$V_{0y}/W_t =$	0.11	

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Sa(0s)	0.04	g
---------------	------	---

Como se puede observar, el cortante basal para ambas direcciones cumplen con los requisitos necesarios, de forma que no es necesario corregir el cortante basal.

12.4 Revisión de desplazamientos laterales

12.4.1 Seguridad contra colapso

En el apartado de los espectros de diseño ya se ha especificado con qué ordenadas se deberá revisar este estado límite. En la siguiente tabla se muestran los desplazamientos del nivel de interés. El límite para la distorsión máxima será el correspondiente para marcos de acero, pues la estructura principal es de este material.

Tabla 20. Distorsiones para seguridad contra colapso.

Nudo superior	δ_x (m)	δ_y (m)	H (m)	Δx	Δy
E1-1	0.0043	0.0046	12.96	0.0003	0.0004
E1-2	0.0045	0.0298	13.25	0.0003	0.0023
E1-3	0.0045	0.0221	13.42	0.0003	0.0016
E1-4	0.0046	0.0545	13.81	0.0003	0.0039
E1-5	0.0047	0.0336	13.96	0.0003	0.0024
E1-6	0.0047	0.0372	14.35	0.0003	0.0026
E1-7	0.0043	0.0558	13.82	0.0003	0.0040
E1-8	0.0040	0.0315	13.5	0.0003	0.0023
E1-9	0.0039	0.0241	13.35	0.0003	0.0018
E1-10	0.0037	0.0048	12.96	0.0003	0.0004
E2-1	0.0486	0.0046	12.96	0.0038	0.0004
E2-2	0.0499	0.0046	12.96	0.0039	0.0004
E2-3	0.0501	0.0348	11.96	0.0042	0.0029
E3-1	0.0490	0.0045	12.96	0.0038	0.0003
E3-2	0.0498	0.0045	12.96	0.0038	0.0003
E3-3	0.0502	0.0319	11.96	0.0042	0.0027
E4-1	0.0489	0.0045	12.96	0.0038	0.0003
E4-2	0.0493	0.0045	12.96	0.0038	0.0004
E4-3	0.0506	0.0265	11.96	0.0042	0.0022
E5-1	0.0489	0.0045	12.96	0.0038	0.0003
E5-2	0.0495	0.0045	12.96	0.0038	0.0003
E5-3	0.0506	0.0263	11.96	0.0042	0.0022
E6-1	0.0468	0.0045	12.96	0.0036	0.0003
E6-2	0.0471	0.0045	12.96	0.0036	0.0003

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

E6-3	0.0484	0.0264	11.96	0.0041	0.0022
E7-1	0.0448	0.0046	12.96	0.0035	0.0004
E7-2	0.0463	0.0045	12.96	0.0036	0.0003
E7-3	0.0457	0.0307	11.96	0.0038	0.0026
E8-1	0.0432	0.0045	12.96	0.0033	0.0004
E8-2	0.0419	0.0045	12.96	0.0032	0.0003
E8-3	0.0429	0.0293	11.96	0.0036	0.0025
E9-1	0.0436	0.0045	12.96	0.0034	0.0003
E9-2	0.0426	0.0045	12.96	0.0033	0.0004
E9-3	0.0439	0.0329	11.96	0.0037	0.0027
E10-1	0.0034	0.0046	12.96	0.0003	0.0004
E10-2	0.0037	0.0224	13.43	0.0003	0.0017
E10-3	0.0041	0.0336	13.96	0.0003	0.0024
E10-4	0.0042	0.0414	14.35	0.0003	0.0029
E10-5	0.0042	0.0561	13.82	0.0003	0.0041
E10-6	0.0039	0.0245	13.36	0.0003	0.0018
E10-7	0.0037	0.0047	12.96	0.0003	0.0004

El límite según la tabla 4.3 es de 0.015; se concluye que las distorsiones para seguridad contra colapso cumplen adecuadamente.

12.4.2 Límite de servicio

Siguiendo la misma metodología que para la condición de colapso, los desplazamientos son los siguientes.

Tabla 21. Distorsiones para límite de servicio.

Nudo superior	δ_x (m)	δ_y (m)	H (m)	Δx	Δy
E1-1	0.0005	0.0007	12.96	0.00004	0.0001
E1-2	0.0005	0.0045	13.25	0.00004	0.0003
E1-3	0.0005	0.0035	13.42	0.00004	0.0003
E1-4	0.0005	0.0088	13.81	0.00004	0.0006
E1-5	0.0005	0.0054	13.96	0.00004	0.0004
E1-6	0.0006	0.0059	14.35	0.00004	0.0004
E1-7	0.0005	0.0092	13.82	0.00004	0.0007
E1-8	0.0005	0.0050	13.5	0.00003	0.0004
E1-9	0.0004	0.0037	13.35	0.00003	0.0003
E1-10	0.0004	0.0009	12.96	0.00003	0.0001
E2-1	0.0141	0.0008	12.96	0.00109	0.0001

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

E2-2	0.0155	0.0008	12.96	0.00119	0.0001
E2-3	0.0154	0.0054	11.96	0.00129	0.0005
E3-1	0.0144	0.0007	12.96	0.00111	0.0001
E3-2	0.0153	0.0007	12.96	0.00118	0.0001
E3-3	0.0154	0.0051	11.96	0.00129	0.0004
E4-1	0.0195	0.0007	12.96	0.00150	0.0001
E4-2	0.0200	0.0008	12.96	0.00155	0.0001
E4-3	0.0209	0.0042	11.96	0.00175	0.0004
E5-1	0.0195	0.0008	12.96	0.00150	0.0001
E5-2	0.0201	0.0007	12.96	0.00155	0.0001
E5-3	0.0209	0.0041	11.96	0.00175	0.0003
E6-1	0.0131	0.0008	12.96	0.00101	0.0001
E6-2	0.0137	0.0007	12.96	0.00106	0.0001
E6-3	0.0145	0.0042	11.96	0.00121	0.0003
E7-1	0.0115	0.0008	12.96	0.00089	0.0001
E7-2	0.0127	0.0008	12.96	0.00098	0.0001
E7-3	0.0120	0.0056	11.96	0.00101	0.0005
E8-1	0.0107	0.0008	12.96	0.00083	0.0001
E8-2	0.0094	0.0007	12.96	0.00073	0.0001
E8-3	0.0102	0.0049	11.96	0.00085	0.0004
E9-1	0.0112	0.0007	12.96	0.00086	0.0001
E9-2	0.0101	0.0007	12.96	0.00078	0.0001
E9-3	0.0112	0.0053	11.96	0.00094	0.0004
E10-1	0.0005	0.0007	12.96	0.00004	0.0001
E10-2	0.0006	0.0036	13.43	0.00004	0.0003
E10-3	0.0006	0.0055	13.96	0.00004	0.0004
E10-4	0.0005	0.0066	14.35	0.00004	0.0005
E10-5	0.0006	0.0093	13.82	0.00005	0.0007
E10-6	0.0006	0.0040	13.36	0.00005	0.0003
E10-7	0.0006	0.0008	12.96	0.00004	0.0001

Considerando que existen elementos que puedan sufrir daños se tiene un límite de distorsión para estado límite de servicio igual que 0.002. Como se puede observar se cumple satisfactoriamente.

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	<p>Fecha: 15/04/2024</p>
	<p>Revisión: A</p>

13 Mecánica de suelos

La cimentación sugerida está constituida por zapatas aisladas a 70 centímetros de profundidad. La capacidad de suelo considerada será de $16 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$.

14 Diseño de cimentación

14.1 Anclas

Para las anclas se tienen los siguientes cortantes en dos direcciones.

$$V_x = 0.5 \text{ tonf}$$

$$V_y = 0.1 \text{ tonf}$$

Sacando la resultante se tiene el siguiente cortante de diseño.

$$V_u = 0.6 \text{ tonf}$$

Considerando que el cortante está dentro del plano de la rosca, la fuerza cortante resistente de las anclas es:

$$d_A = 1.6 \text{ mm}$$

$$A_A = 2.01 \text{ cm}^2$$

$$R_v = 0.75 \cdot A_A \cdot 0.4 \cdot F_u$$

$$R_v = 2.5 \text{ tonf}$$

Las anclas son adecuadas para resistir el cortante.

14.2 Placa Base

14.2.1 Placa base PL-1

Las dimensiones de la placa base son:

$$N = 50 \text{ cm}; B = 50 \text{ cm}$$

El área de la placa base:

$$A_1 = 2500 \text{ cm}^2$$

Dado que no se colocará dado de concreto, el área de concreto considerada será el del concreto. Zapata tiene las siguientes dimensiones.

$$L = 200 \text{ cm}; B = 200 \text{ cm}$$

$$A_2 = 40000 \text{ cm}^2$$

Comprobando primero, de acuerdo con las normas de acero si:

$$A_2 \geq 4A_1$$

$$4 \cdot A_1 = 10000 \text{ cm}^2$$

Como se cumple la desigualdad anterior, el área requerida de la placa para evitar el aplastamiento del concreto es la siguiente.

$$A_{pl\ req} = \frac{P_u}{F_R (0.85 f'_c)}$$

$$A_{pl\ req} = 459 \text{ cm}^2$$

Dado que se tiene un área mucho mayor, se considera que el concreto no presenta aplastamiento. El esfuerzo último por compresión es:

$$P_u = 58.5 \text{ tonf}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$f_{pu} = \frac{P_u}{B \cdot N} = 23.4 \frac{kgf}{cm^2}$$

Para determinar el momento último que deberá resistir la placa se requiere el brazo de palanca con las siguientes expresiones.

$$m = 0.5(N - 0.95d)$$

$$m = 10.51 \text{ cm}$$

$$n' = 0.25\sqrt{db_p}$$

$$n' = 7.6 \text{ cm}$$

El valor más grande es m, por lo que:

$$l = 10.51 \text{ cm}$$

Ya con estos datos, el momento último es:

$$M_u = f_{pu} \frac{l^2}{2}$$

$$M_u = 1293 \text{ kgf} \cdot \frac{cm}{cm}$$

Y el espesor:

$$t_p = \sqrt{\frac{4M_u}{F_R F_{yP}}}$$

$$t_p = 15.1 \text{ mm}$$

Usar un espesor de 16 mm.

14.2.2 Placa base PL-2

Siguiendo el mismo procedimiento, se tiene lo siguiente para la placa base PL-2.

Tabla 22. Resultados para placa base PL-2.

$A_1=$	2250	cm ²
$A_2=$	40000	cm ²
$A_{pl \text{ req}}=$	435	cm ²
$f_{pu}=$	24.6	kgf/cm ²
$m=$	10.5	cm
$n=$	10.3	cm
$n'=$	7.6	cm
$l=$	10.5	
$M_u=$	1360.5	kgf-cm/cm
$t_p=$	1.55	cm

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

14.3 Zapatas

14.3.1 Zapata Z-1

Las solicitaciones más desfavorables para las zapatas Z-1 son las siguientes.

$$P_u = 58.5 \text{ tonf}; V_{uB} = 0 \text{ tonf}; V_{uL} = 0 \text{ tonf}$$

Los cortantes se despreciarán debido a que son muy pequeños. Como no se presenta momento, el escenario más desfavorable será considerando sólo carga axial. La carga última aplicada al suelo es la siguiente.

$$L = 2 \text{ m}; B = 2 \text{ m}$$

$$q_u = \frac{58500}{2^2} = 14625 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

La carga admisible del suelo es de $16000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ por lo que su capacidad efectiva es:

$$h = 0.5 \text{ m}$$

$$H_d = 0.5 \text{ m}$$

$$\gamma_c = 2400 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$q_a = 16000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$q_e = 16000 - 2400 \cdot 0.5 = 14800 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Como la exigencia última del suelo es menor que la capacidad efectiva se concluye que el suelo resiste la carga axial.

14.3.2 Flexión

El momento se obtendrá en el paño del dado. El momento alrededor de cada eje se calcula a continuación.

$$d = 50 \text{ cm} - 5 \text{ cm} = 45 \text{ cm}$$

$$c_1 = 50 \text{ cm}$$

$$M_{uL} = q_u \cdot \frac{\left(\frac{B}{2} - \frac{c_1}{2}\right)^2}{2} = 4113.28 \text{ kgf} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

$$c_2 = 50 \text{ cm}$$

$$M_{uB} = q_u \cdot \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{c_2}{2}\right)^2}{2} = 4113.28 \text{ kgf} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

El acero de refuerzo por tensión se calculará como se hizo con las zapatas corridas.

$$A_s = b \cdot d \cdot \frac{f_c''}{f_y} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_u}{F_R \cdot b \cdot d^2 \cdot f_c''}}\right) = 2.4 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

En cuanto al acero mínimo se tienen el siguiente límite.

$$A_{smin} = \min\left(\frac{0.8 \cdot \sqrt{f_c'}}{f_y} \cdot b \cdot d, \quad \frac{14}{f_y} \cdot b \cdot d\right)$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$A_{s\text{mín}} = 15 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Se propone emplear varillas del #6@20 cm. Con esta consideración se tienen la siguiente área de acero en un metro.

$$A_s = \frac{100 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} \cdot 2.85 \text{ cm}^2 = 14.25 \text{ cm}^2$$

Se considera que el acero es prácticamente el mínimo, por lo que se colocará este refuerzo en ambas direcciones.

14.3.3 Cortante en una dirección

El cortante a un peralte efectivo es:

$$V_{uL} = \frac{B}{2} - d - \frac{c_1}{2} \cdot q_u = 4387.5 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

$$V_{uB} = \frac{L}{2} - d - \frac{c_2}{2} \cdot q_u = 4387.5 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

La resistencia de la zapata obtenida como se ha conseguido anteriormente es la siguiente.

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0.04(15)}} = 0.85$$

$$\rho = \frac{14.25}{45 \cdot 100} = 0.0032$$

$$V_{CR} = 0.75 \cdot \left(2 \cdot 1 \cdot 0.85 \cdot (0.0032)^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{250} \right) \cdot 100 \cdot 45 = 13246 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Dado que la cuantía de acero es la misma en ambas direcciones, el cortante resistente será el mismo. De forma que el cortante en una dirección se cubre satisfactoriamente.

14.3.4 Cortante en dos direcciones

El cortante en dos direcciones se calcula a medio peralte efectivo del paño del dado y se emplea la siguiente expresión.

$$V_{u2D} = P_u - q_u \cdot (c_1 + d) \cdot (c_2 + d) = 45301 \text{ kgf}$$

La resistencia del concreto para cortante en dos direcciones se puede calcular con las expresiones de la tabla 5.6.2.1.1 de las normas correspondientes. Antes de pasar a ellas se calculan valores importantes como el perímetro de la sección crítica y la relación L/B.

$$\beta = \frac{2}{2} = 1$$

$$b_0 = 2 \cdot (c_1 + d) + 2 \cdot (c_2 + d) = 3.8 \text{ cm}$$

Como es una columna central en la zapata:

$$\alpha_s = 40$$

Las expresiones son las siguientes.

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Tabla 5.6.2.1.1 – Esfuerzos resistentes de diseño v_{cR} para cortante en dos direcciones sin presfuerzo y sin refuerzo para cortante

	v_{cR}	
El menor de a), b) y c)	$F_R 0.33 \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c}$ $\left(F_R 1.0 \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c} \right)$	a)
	$F_R 0.17 \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c}$ $\left(F_R 0.50 \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c} \right)$	b)
	$F_R 0.083 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o} \right) \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c}$ $\left(F_R 0.27 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o} \right) \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c} \right)$	c)

λ_s es el factor de efecto de tamaño (ec. 5.5.3.2.1 b).

λ es el factor de reducción si se usa concreto de peso ligero que se tomará de 2.3.3.2.

β es la relación del lado largo al lado corto de la columna, carga concentrada o área de reacción.

$\alpha_s = 40$ para columnas interiores, 30 para columnas de borde y 20 para columnas de esquina.

Si se sustituyen valores, los cortantes resistente de la zapata son los siguientes.

$$v_{cR1} = 148530 \text{ kgf}$$

$$v_{cR2} = 222795 \text{ kgf}$$

$$v_{cR3} = 270169 \text{ kgf}$$

Como todos son mayores que V_{u2D} , la zapata cumple con este estado límite.

14.3.5 Acero por temperatura

Considerando la zapata como una losa que trabaja en una dirección, el acero por temperatura según la norma es:

$$A_{stempB} = A_{stempL} = 0.0018 \cdot 100 \cdot h = 3.6 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Colocar varillas #6@20 cm en ambos sentidos de la zapata.

15 Diseño de superestructura

15.1 Contravientos

15.1.1 CV-1(2LI6X6X3/8)

15.1.1.1 Tensión

Revisando el estado límite de fluencia en la sección total con la expresión 5.3.1.a de las normas.

$$R_t = F_R \cdot f_y \cdot A$$

El área considerada a tensión será la correspondiente a la suma de los dos perfiles. Cada perfil tiene un área de 28.3 cm^2 , por lo que el área total es de:

$$A = 56.6 \text{ cm}^2$$

La resistencia a tensión de la sección es:

$$R_t = 128.88 \text{ tonf}$$

La tensión última presente en los elementos es:

$$T_u = 9 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es de:

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$\frac{T_u}{R_t} = 7\%$$

15.1.1.2 Compresión

La resistencia a compresión de los ángulos dobles se calcula a continuación. Primero es necesario determinar la relación de esbeltes de los perfiles de forma individual. De acuerdo con la tabla 2.2.1.2.6.a de las NTC para estructuras de acero el límite para elementos esbeltos es:

$$\lambda = 0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} 12.77$$

La relación del ancho entre el espesor de los ángulos es:

$$b = 152 \text{ mm}; t = 10 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{t} = 15.2$$

Como el perfil es esbelto es necesario determinar el área efectiva como se establece en la sección 2.2.5 de las normas.

Es necesario determinar el siguiente valor:

$$\lambda_a = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{f}{E}}$$

Donde k es igual a 0.43 y f se calcula a continuación.

$$\chi = [1 + \lambda_c^{2n}]^{-1/n} = \left[1 + \left(\frac{F_y}{F_e} \right)^n \right]^{-1/n}$$

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

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

Según la norma, el valor de n es:

$$n = 1.4$$

Para los elementos se tienen los siguientes valores:

$$r_x := 4.76 \text{ cm} \quad r_y := 6.3 \text{ cm} \quad K := 1$$

$$L_x := 9.2 \text{ m} \quad L_y := 9.2 \text{ m} \quad P_u := 8.51 \text{ tonnef}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_x}{r_x} \right)^2} = 538.71 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 943.67 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_{cx} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ex}}} = 2.17$$

$$\lambda_{cy} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ey}}} = 1.64$$

$$\chi_x := \left(1 + \lambda_{cx}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.2$$

$$\chi_y := \left(1 + \lambda_{cy}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.32$$

El valor de f es igual que F_n calculado con la siguiente expresión.

$$F_n := \text{Min}(\chi_x, \chi_y) \cdot f_y = 498.51 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Así pues, λ_a es igual a:

$$\lambda_a := \frac{1.052}{\sqrt{k}} \cdot \left(\frac{b}{t} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.3813$$

Como $\lambda_a < 0.673$ el ancho efectivo del elemento será:

$$b_e = b$$

Con esto, el área efectiva es la siguiente.

$$A_e = 56.6 \text{ cm}^2$$

Con esta área se determinará la resistencia a compresión de la sección. De acuerdo con la sección 6.3.1 de las NTC se tiene el siguiente valor.

$$R_c = F_R \cdot F_y \cdot A = F_R \cdot F_n \cdot A$$

$$R_c := \phi_c \cdot F_n \cdot A = 25.39 \text{ tonnef}$$

El porcentaje de esfuerzo es:

$$\%P := \frac{P_u}{R_c} = 33.51 \%$$

15.1.2 CVR-1 (20S Ø=25.4 mm)

15.1.2.1 Tensión

Revisando el estado límite de fluencia en la sección total con la expresión 5.3.1.a de las normas.

$$R_t = F_R \cdot f_y \cdot A$$

El área transversal efectiva de los elementos OS es de

$$A = 3.63 \text{ cm}^2$$

El área de los dos elementos es:

$$A = 7.26 \text{ cm}^2$$

La resistencia a tensión de la sección es:

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$R_t = 16.5 \text{ tonf}$$

La tensión última presente en los elementos es:

$$T_u = 8 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es de:

$$\frac{T_u}{R_t} = 48\%$$

15.2 Armadura

15.2.1 D-1 (L4X4X1/4)

15.2.1.1 Tensión

Revisando el estado límite de fluencia en la sección total con la expresión 5.3.1.a de las normas.

$$R_t = F_R \cdot f_y \cdot A$$

El área considerada a tensión será la correspondiente a la suma de los dos perfiles. Cada perfil tiene un área de 12.5 cm^2 , por lo que el área total es de:

$$A = 25 \text{ cm}^2$$

La resistencia a tensión de la sección es:

$$R_t = 56.95 \text{ tonf}$$

La tensión última presente en los elementos es:

$$T_u = 36 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es de:

$$\frac{T_u}{R_t} = 63\%$$

15.2.1.2 Compresión

La resistencia a compresión de los ángulos dobles se calcula a continuación. Primero es necesario determinar la relación de esbeltes de los perfiles de forma individual. De acuerdo con la tabla 2.2.1.2.6.a de las NTC para estructuras de acero el límite para elementos esbeltos es:

$$\lambda = 0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} 12.77$$

La relación del ancho entre el espesor de los ángulos es:

$$b = 102 \text{ mm}; t = 6 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{t} = 17$$

Como el perfil es esbelto es necesario determinar el área efectiva como se establece en la sección 2.2.5 de las normas.

Es necesario determinar el siguiente valor:

$$\lambda_s = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{f}{E}}$$

Donde k es igual a 0.43 y f se calcula a continuación.

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$\chi = [1 + \lambda_c^{2n}]^{-1/n} = \left[1 + \left(\frac{F_y}{F_e} \right)^n \right]^{-1/n}$$

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

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

Según la norma, el valor de n es:

$$n = 1.4$$

Para los elementos se tienen los siguientes valores:

$$K = 1; L = 252 \text{ cm}; r_{min} = 3.17 \text{ cm}$$

$$F_e = 3184.4 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_c = 0.89$$

$$\chi = 0.68$$

El valor de f es igual que F_n calculado con la siguiente expresión.

$$f = F_n = \chi \cdot f_y = 1714.2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Así pues, λ_a es igual a:

$$\lambda_a = 0.79$$

Como $\lambda_a > 0.673$ el ancho efectivo del elemento será:

$$b_e = b \cdot \rho$$

Ahora se calcula el valor de ρ con la expresión 2.2.5.1.1.c de las normas.

$$\rho = (1 - 0.22 / \lambda_a) / \lambda_a$$

$$\rho = 0.912$$

Finalmente, b_e es igual a:

$$b_e = \rho \cdot b = 93.1 \text{ mm}$$

Con esto, el área efectiva es la siguiente.

$$A_e = 22.86 \text{ cm}^2$$

Con esta área se determinará la resistencia a compresión de la sección. De acuerdo con la sección 6.3.1 de las NTC se tiene el siguiente valor.

$$R_c = F_y \chi F_e A = F_n F_e A$$

$$R_c = 35.27 \text{ tonf}$$

Dado que la carga axial máxima en compresión es de:

$$P_u = 21.4 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es:

$$\frac{P_u}{R_c} = 61\%$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.2.2 D-1 (L4X4X1/4 REFORZADO)

15.2.2.1 Tensión

Revisando el estado límite de fluencia de la misma manera que con las diagonales no reforzadas.

$$R_t = F_R \cdot f_y \cdot A$$

$$A = 50 \text{ cm}^2$$

La resistencia a tensión de la sección es:

$$R_t = 113.85 \text{ tonf}$$

La tensión última presente en los elementos es:

$$T_u = 33 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es de:

$$\frac{T_u}{R_t} = 30\%$$

15.2.2.2 Compresión

Dada la sección en cajón mostrada en la siguiente imagen es necesario aplicar la tabla 2.2.1.2.6.a.

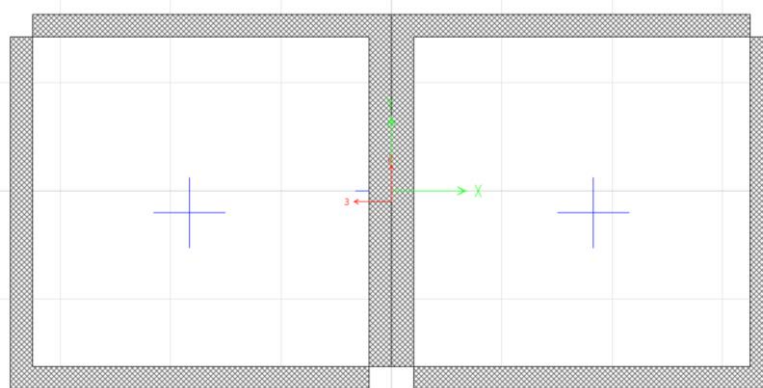


Ilustración 3. Sección transversal de diagonales reforzadas.

Para revisar la relación de esbeltez se considerarán elementos atiesados, específicamente el caso que menciona “Todos los elementos atiesados restantes”. Así pues, el límite es el siguiente.

$$1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 42.3$$

Las distancias consideradas para comprobar el límite anterior serán el espesor de las alas del perfil LI y el ancho b del elemento menos un espesor, pues es la longitud libre.

$$b = 102 \text{ mm} - 6 \text{ mm} = 96 \text{ mm}; t = 6 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{t} = 16$$

Como no se rebasa el límite para elementos esbeltos a compresión, la sección es compacta y no se requiere determinar el área efectiva. Siguiendo el mismo procedimiento que para los elementos sin reforzar se tienen los siguientes resultados.

$$r_x = 4.12 \text{ cm}; r_y = 6.79 \text{ cm}; n = 1.4; L = 2.7 \text{ m}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$F_e = 4685.8 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\lambda_c = 0.735$$

$$\chi = 0.777$$

$$F_n = 1967.5 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$R_c = 88.54 \text{ tonf}$$

La fuerza última presente en el elemento a compresión es la siguiente.

$$P_u = 42 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es el siguiente.

$$\frac{P_u}{R_c} = 48 \%$$

15.2.3 M-1 (L4X4X1/4)

Dado que es el mismo elemento que para las diagonales no reforzadas, la resistencia de los montantes se muestra en la siguiente tabla. No se realiza el procedimiento ya que resultaría repetitivo.

Tabla 23. Resistencia de montantes M-1.

L (m)	Tipo de sección	A (cm ²)	R _c (tonf)	R _t (tonf)	P _u (tonf)	T _u (tonf)	%P	%T
2.45	Esbelta	22.71	35.85	56.95	22.18	9	62%	15%

15.2.4 M-1 (L4X4X1/4 REFORZADO)

De la misma manera, los resultados para el perfil son los siguientes.

Tabla 24. Resistencia de montantes M-1 reforzados.

L (m)	Tipo de sección	A (cm ²)	R _c (tonf)	R _t (tonf)	P _u (tonf)	T _u (tonf)	%P	%T
2.45	Compacta	50.00	93.30	113.8	50.2	15	54%	13%

15.2.5 C. Sup (TR 9x38)

15.2.5.1 Tensión

Revisando el estado límite de fluencia de la misma manera que con las diagonales no reforzadas.

$$R_t = F_R \cdot f_y \cdot A$$

$$A = 72.3 \text{ cm}^2$$

La resistencia a tensión de la sección es:

$$R_t = 164.6 \text{ tonf}$$

La tensión última presente en los elementos es:

$$T_u = 72 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es de:

$$\frac{T_u}{R_t} = 44\%$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.2.5.2 Compresión

El límite para secciones esbeltas en la relación ancho espesor para los perfiles TR de acuerdo con las NTC para estructuras de acero es el siguiente.

$$\text{Patines } 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 15.9$$

$$\text{Alma } 0.75 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 21.29$$

Para el patín se tiene la siguiente relación.

$$b_f = 280 \text{ mm}; t_f = 17.3 \text{ mm}$$

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{280}{2 \cdot 17.3} = 8.09$$

Para el alma:

$$d = 231 \text{ mm}; t_w = 10.8 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{231}{10.8} = 21.39$$

Como se puede observar, el alma de la sección es esbelta. Siguiendo el procedimiento llevado a cabo anteriormente, el cálculo del peralte efectivo se muestra a continuación.

$$k = 0.43$$

$$r_x = 6.45 \text{ cm}; r_y = 6.63 \text{ cm}; n = 1.4; L = 1.53 \text{ m}$$

$$F_e = 35764.6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_c = 0.266$$

$$\chi = 0.983$$

$$F_n = 2486.6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_a = 1.2$$

$$\rho = 0.68$$

$$d_e = \rho \cdot d = 157.38 \text{ mm}$$

El área efectiva es la siguiente:

$$A = 72.3 \text{ cm}^2$$

$$A_e = A - (d - d_e) \cdot t_w = 64.35 \text{ cm}^2$$

Con esta área se determina la resistencia a compresión.

$$R_c = 144 \text{ tonf}$$

La carga de compresión última es la siguiente:

$$P_u = 91 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo en la sección es:

$$\%P = \frac{91 \text{ tonf}}{144 \text{ tonf}} = 63\%$$

15.2.6 C. Inf (TR 9x38)

Dado que el procedimiento es exactamente el mismo, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Tabla 25. Resistencia de cuerda inferior.

L (m)	Tipo de sección	A (cm ²)	R _c (tonf)	R _t (tonf)	P _u (tonf)	T _u (tonf)	%P	%T
1.53	Esbelta	64.35	144.01	164.6	81.2	80	56%	49%

15.2.7 C. Inf (TR 9x38 REFORZADA)

15.2.7.1 Tensión

Revisando el estado límite de fluencia de la misma manera que con las diagonales no reforzadas.

$$R_t = F_R \cdot f_y \cdot A$$

$$A = 137.59 \text{ cm}^2$$

La resistencia a tensión de la sección es:

$$R_t = 313.3 \text{ tonf}$$

La tensión última presente en los elementos es:

$$T_u = 23 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es de:

$$\frac{T_u}{R_t} = 7\%$$

15.2.7.2 Compresión

La sección reforzada tiene la siguiente forma.

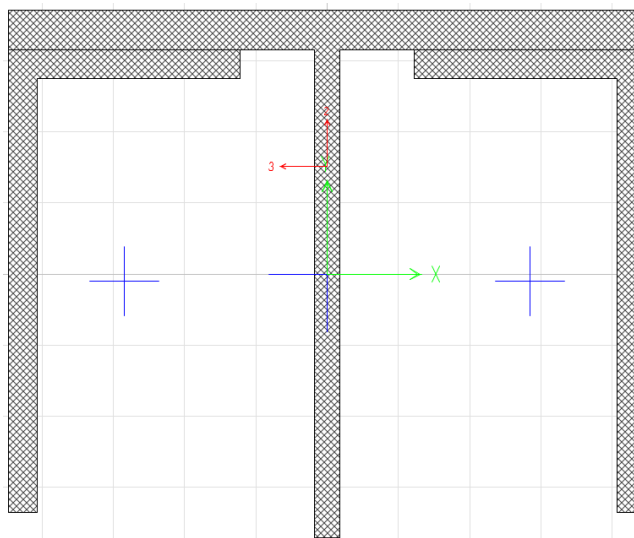


Ilustración 4. Sección transversal para cuerda inferior reforzada.

Para comprobar la relación ancho espesor se considerará el alma del elemento TR y las alas de los perfiles LD. Como se ha visto con anterioridad, el alma es sección esbelta; las alas de los ángulos se compararán con el límite para el segundo caso de la tabla 2.2.1.2.6.a de las NTC considerando que se unen a los patines.

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$k_c = \frac{4}{\left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)} = 0.49$$

$$\lambda_r = 0.64 \sqrt{\frac{k_c \cdot E}{f_y}} = 12.77$$

Las dimensiones del ala correspondiente del ángulo son las siguientes:

$$b = 203 \text{ mm}; t = 12.7 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{t} = 15.98$$

Visto lo anterior, tanto el alma de la sección TR y las Alas del LD son esbeltas y es necesario determinar el área efectiva. Dado que el procedimiento es el mismo que el realizado con anterioridad sólo se muestran los resultados a continuación.

$$A_e = 133.51 \text{ tonf}$$

$$L = 1.53 \text{ m}$$

$$R_c = 299.62 \text{ tonf}$$

La carga axial máxima es la siguiente.

$$P_u = 84.7 \text{ tonf}$$

Y el porcentaje de esfuerzos.

$$\%P = \frac{P_u}{R_c} = 29\%$$

15.2.7.3 Flexión

Hasta ahora, el diseño de los elementos ha sido completamente por compresión y tensión; sin embargo, en algunos elementos de la cuerda inferior el momento presente deja de ser despreciable por lo que es necesario reforzar la sección. Estos elementos mecánicos tan grandes se deben a las nuevas columnas colocadas al centro de la nave aproximadamente. Así pues, adicional a las revisiones que se han llevado a cabo se integrará la de flexión.

Para comprobar la relación ancho espesor se recurre a la tabla 2.2.1.2.6.b. Se considerará que el perfil principal es el TR, por lo que se usarán las expresiones correspondientes para este perfil.

Patines

$$b_f = 280 \text{ mm}; t_f = 17.3 \text{ mm}$$

$$\lambda_{pl} = 0.3 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 8.52$$

$$\lambda_p = 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 10.79$$

$$\lambda_r = 1 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 28.39$$

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = 8.09$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$\begin{aligned}
 &\text{Alma} \\
 d &= 231 \text{ mm}; t_w = 10.8 \text{ mm} \\
 \lambda_{pl} &= 0.3 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 8.52 \\
 \lambda_p &= 0.84 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 23.85 \\
 \lambda_r &= 1.52 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 43.15 \\
 \frac{d}{t_w} &= 21.39
 \end{aligned}$$

Como se puede observar, la sección es tipo 2 debido a el alma; sin embargo, esto representa que es sección compacta y sólo es necesario revisar el estado límite de fluencia y de pandeo lateral flexo torsión.

El apartado correspondiente para el primer estado de falla se encuentra en la sección 7.9.2. Es necesario notar que el momento que se presenta en el elemento más desfavorable somete a tensión el alma del perfil TR, por lo que el momento nominal en este caso es:

$$\begin{aligned}
 Z_x &= 664.3 \text{ cm}^3; S_x = 422.7 \text{ cm}^3 \\
 M_y &= S_x \cdot f_y = 10.69 \text{ tonf} \cdot \text{m} \\
 M_p &= Z_x \cdot f_y \leq 1.6 \cdot M_y \\
 M_p &= 16.81 \leq 17.104 \\
 M_p &= 16.81 \text{ tonf} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

Para la segunda revisión, se emplean las expresiones de la sección 7.9.3 en donde se expone que primero es necesario determinar el siguiente coeficiente "B".

$$J = 205.99 \text{ cm}^4; I_y = 14013.7 \text{ cm}^4; d = 231 \text{ mm}; L = 1.53 \text{ m}$$

$$B = 2.3 \left(\frac{d}{L} \right) \sqrt{\frac{I_y}{J}} = 2.86$$

Y el momento nominal se obtiene con la expresión 7.9.3.a.

$$\begin{aligned}
 G &= 78400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \\
 M_n &= \pi \cdot \frac{\sqrt{E \cdot I_y \cdot G \cdot J}}{L} \left[B + \sqrt{1 + B^2} \right] = 2601.5 \text{ tonf} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

Evidentemente se deberá considerar el primer valor obtenido para el momento resistente.

Aplicando factor de reducción, el momento resistente de la sección es el siguiente.

$$\phi_b M_n = 15.1 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

El momento último que se presenta en estos elementos es de:

$$M_u = 8.7 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

El porcentaje de esfuerzos es:

$$\%M = \frac{M_u}{\phi_b M_n} = 58\%$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Se concluye que la sección es adecuada para resistir las solicitaciones.

15.3 Trabes

15.3.1 TM-1 (HSS10X10X1/4)

15.3.1.1 Compresión

Dado que en estos elementos se presentan fuerzas de compresión considerables, se revisará como elemento flexo comprimido. Así pues, es necesario determinar su resistencia ante la compresión pura. Las propiedades de la sección son las siguientes.

$$\begin{aligned}
 d &:= 254 \text{ mm} & t &:= 0.59 \text{ cm} & A &:= 57.81 \text{ cm}^2 \\
 r &:= 10.08 \text{ cm} & K &:= 1 & n &:= 1.4 & L_x &:= 12 \text{ m} & L_y &:= 12 \text{ m} & P_u &:= 4.1 \text{ tonnef}
 \end{aligned}$$

El límite de la relación ancho espesor para compresión es:

$$\lambda_r := 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.72$$

Y la relación ancho/espesor:

$$b := d - 3 \cdot t = 236.3 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{t} = 40.05$$

Como se puede observar, la sección es esbelta, por lo que es necesario determinar el área efectiva de la sección. Nótese que las longitudes no arriostradas y los radios de giro son iguales, por lo que no es necesario revisar ambas direcciones.

Calculando el esfuerzo F_n primero.

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_x}{r} \right)^2} = 1419.96 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_{cx} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ex}}} = 1.57$$

$$\chi_x := \left(1 + \lambda_{cx}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.34$$

$$F_n := \text{Min}(\chi_x, \chi_y) \cdot f_y = 1189.67 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Determinando el ancho efectivo de los elementos.

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$k := 4$$

$$\lambda_a := \frac{1.052}{\sqrt{k}} \cdot \left(\frac{b}{t} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.5089$$

$$\rho := \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda_a} \right)}{\lambda_a} = 1.1156$$

$$b_e := \begin{cases} \text{if } \lambda_a \leq 0.673 = 236.3 \text{ mm} \\ b \\ \text{else} \\ b \cdot \rho \end{cases}$$

Calculando el área efectiva.

$$A := A - 4 \cdot t \cdot (b - b_e) = 57.81 \text{ cm}^2$$

Y la resistencia a compresión axial es:

$$R_c := \phi_c \cdot F_n \cdot A = 61.9 \text{ tonnef}$$

El porcentaje de esfuerzos es:

$$\%P := \frac{P_u}{R_c} = 6.62 \%$$

15.3.1.2 Flexión

Para la flexión, los límites para la relación ancho espesor son:

$$\lambda_{pl_patin} := 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.98$$

$$\lambda_{pl_alma} := 0 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0$$

$$\lambda_{p_patin} := 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.98$$

$$\lambda_{p_alma} := 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 58.29$$

$$\lambda_{r_patin} := 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.72$$

$$\lambda_{r_alma} := 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 137.28$$

Considerando la misma relación que para compresión se tiene que las almas son compactas y los patines son esbeltas, por lo que el momento nominal será el correspondiente al pandeo local del patín comprimido expuesto en la sección 7.7.4.

Calculando el módulo de sección relacionado al ancho efectivo.

$$b_e := \text{Min} \left(1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \cdot \left(1 - \frac{0.38}{\left(\frac{b}{t} \right)} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right), b \right) = 210.49 \text{ mm}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$I_{ex} := 2 \cdot \left(\frac{t \cdot b^3}{12} \right) + 2 \cdot \left(\frac{b_e \cdot t^3}{12} + b \cdot t \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right) = 5795.488 \text{ cm}^4$$

$$S_{ec} := \frac{I_{ex}}{\frac{d}{2}} = 456.3376 \text{ cm}^3$$

$$M_{n2_patin} := \begin{cases} \text{if } \frac{b}{t} \leq \lambda_{pl_patin} & = 16.04 \text{ tonnef m} \\ \text{"NO ALICA"} \\ \text{else if } \lambda_{pl_patin} < \frac{b}{t} \leq \lambda_{p_patin} & \\ \text{"NO ALICA"} \\ \text{else if } \lambda_{p_patin} < \frac{b}{t} \leq \lambda_{r_patin} & \\ \text{Min} \left(M_p - (M_p - f_y \cdot S) \cdot \left(3.57 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} - 4 \right), M_p \right) \\ \text{else} & \\ f_y \cdot S_{ec} & \end{cases}$$

Y el momento resistente:

$$\phi M_{nx} := \phi_b \cdot M_{nx} = 14.44 \text{ tonnef m}$$

El porcentaje de esfuerzo por flexión es:

$$M_{ux} := 3.3 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_x := \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} = 22.86 \%$$

El momento resistente en el otro sentido es el mismo al ser una sección cuadrada, por lo que:

$$\phi M_{ny} := \phi_b \cdot M_{ny} = 14.44 \text{ tonnef m}$$

$$M_{uy} := 1.5 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_y := \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} = 10.39 \%$$

15.3.1.3 Cargas Combinadas

Para la comprobación de la resistencia a flexo compresión se considerarán los momentos actuantes sobre el elemento que presenta la carga última considerada en compresión pura. Además, los momentos en los extremos corresponden a los momentos máximos de todo el elemento, por lo que:

$$M_{uox} := 2.3 \text{ tonnef m}$$

$$M_{uoy} := 0.3 \text{ tonnef m}$$

$$M_{uoxa} := 2.3 \text{ tonnef m}$$

$$M_{uoya} := 0.3 \text{ tonnef m}$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Empleando las ecuaciones de interacción para secciones no compactas, es decir, sección tipo 3 o 4 como es este caso.

$$P_y := A \cdot f_y = 203.2 \text{ tonnef}$$

En los extremos:

$$\frac{P_u}{\phi_{cb} \cdot P_y} + \frac{M_{uox}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uoy}}{\phi M_{ny}} = 34.11 \%$$

En toda la columna:

$$\frac{P_u}{R_c} + \frac{M_{uoxa}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uoya}}{\phi M_{ny}} = 38.49 \%$$

Se puede concluir que la trabe TM-1 es capaz de resistir todas las solicitaciones.

15.3.2 TM-2 (12X19 CUBIERTA)

15.3.2.1 Flexión

Comprobando el ancho/espesor.

$$b_f := 102 \text{ mm} \quad t_p := 8.9 \text{ mm} \quad h := 276 \text{ mm} \quad t_a := 6 \text{ mm}$$

$$\lambda_{pl_patin} := 0.3 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 7.23$$

$$\lambda_{pl_alma} := 2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 59.01$$

$$\lambda_{pl_patin} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 9.15$$

$$\lambda_{pl_alma} := 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 90.56$$

$$\lambda_{pl_patin} := 1 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 24.08$$

$$\lambda_{pl_alma} := 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 137.28$$

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_p} = 5.7303$$

$$\frac{h}{t_a} = 46$$

Como se puede observar, la sección es compacta y es posible aplicar la sección 7.3 de las normas. La longitud no arriostrada del elemento es la siguiente:

$$L_y := 1.52 \text{ m}$$

Se consideró que los elementos secundarios de la cubierta son capaces de arriostrar la trabe. Calculando las longitudes para pandeo elástico e inelástico.

$$M_P := Z_x \cdot f_y = 14.24 \text{ tonnef m}$$

$$X_r := \frac{4}{3} \cdot \frac{Z_x \cdot f_y}{C_b \cdot G \cdot J} \cdot \sqrt{\frac{C_a}{I_y}} = 5.18$$

$$X_u := 3.22 \cdot X_r = 16.67$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$L_r := \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{X_r} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot C_a}{G \cdot J}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_r^2}} = 2.46 \text{ m}$$

$$L_u := \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{X_u} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot C_a}{G \cdot J}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_u^2}} = 1.28 \text{ m}$$

Cómo la longitud L_u es apenas mayor que la longitud no arriostrada, el momento nominal será el momento plástico. Así pues, el momento resistente es:

$$\phi M_{nx} := \phi_b \cdot M_{nx} = 12.09 \text{ tonnef m}$$

Considerando el momento último, se tiene el siguiente porcentaje de esfuerzos.

$$M_{ux} := 8.34 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_x := \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} = 68.97 \%$$

15.3.3 Trabe TMR-1 (2CF254X70X14)

15.3.3.1 Compresión

Dado que se trata de elementos CF, es evidente que la sección es esbelta; sin embargo, se empleará el área proporcionada por el manual para determinar la resistencia a compresión. El área para cada perfil individual es de:

$$A_e = 4.2 \text{ cm}^2$$

Así pues, el área será:

$$A := 8.4 \text{ cm}^2$$

Los datos para determinar la resistencia a compresión son:

$$r_x := 9.51 \text{ cm} \quad r_y := 6 \text{ cm} \quad K := 1 \quad n := 1.4 \quad L_x := 12 \text{ m} \quad L_y := 12 \text{ m} \quad P_u := 2.4 \text{ tonnef}$$

Realizando el procedimiento que exponen las normas nuevamente.

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_x}{r_x} \right)^2} = 1263.91 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 503.1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_{cx} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ex}}} = 1.67$$

$$\lambda_{cy} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ey}}} = 2.64$$

$$\chi_x := \left(1 + \lambda_{cx}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.31$$

$$\chi_y := \left(1 + \lambda_{cy}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.14$$

$$F_n := \text{Min}(\chi_x, \chi_y) \cdot f_y = 480.73 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$R_c := \phi_c \cdot F_n \cdot A = 3.63 \text{ tonnef}$$

La relación de esfuerzos es:

$$\%P := \frac{P_u}{R_c} = 66.04 \%$$

15.3.3.2 Flexión

Para determinar el momento resistente de los elementos se empleará el módulo de sección efectivo dado en las tablas del manual del IMCA; dado que se trata de dos elementos se considerará este número para determinar el momento total.

$$S_{xe} := 51.64 \text{ cm}^3 \quad S_{ye} := 8.77 \text{ cm}^3$$

Los momentos resistentes en ambas direcciones son:

$$\phi M_{nx} := 2 \cdot \phi_b \cdot S_{xe} \cdot f_y = 3.2673 \text{ tonnef m}$$

$$\phi M_{ny} := 2 \cdot \phi_b \cdot S_{ye} \cdot f_y = 0.5549 \text{ tonnef m}$$

El porcentaje de esfuerzos es:

$$M_{ux} := 0.27 \text{ tonnef m} \quad M_{uy} := 0 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_x := \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} = 8 \% \quad \%M_y := \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} = 0 \%$$

15.3.3.3 Cargas combinadas

Dado que se trata de elementos esbeltos y que los momentos en los extremos son despreciables la revisión a flexo compresión se llevará a cabo con la siguiente expresión para la columna completa.

$$P_u = 2.4 \text{ tonnef} \quad M_{uoxa} := 0.8 \text{ tonnef m} \quad M_{uoya} := 0 \text{ tonnef m}$$

$$\frac{P_u}{R_c} + \frac{M_{uoxa}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uoya}}{\phi M_{ny}} = 90.52 \%$$

15.4 Columnas

15.4.1 Celosía D-1 (2LI 4X4X1/4)

15.4.1.1 Tensión

Revisando el estado límite de fluencia en la sección total con la expresión 5.3.1.a de las normas.

$$R_t = F_R \cdot f_y \cdot A$$

El área considerada a tensión será:

$$A = 25 \text{ cm}^2$$

La resistencia a tensión de la sección es:

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$R_t = 57 \text{ tonf}$$

La tensión última presente en los elementos es:

$$T_u = 27 \text{ tonf}$$

El porcentaje de esfuerzo es de:

$$\frac{T_u}{R_t} = 47\%$$

15.4.1.2 Compresión

La resistencia a compresión de los ángulos dobles se calcula a continuación. Primero es necesario determinar la relación de esbeltes de los perfiles de forma individual. De acuerdo con la tabla 2.2.1.2.6.a de las NTC para estructuras de acero el límite para elementos esbeltos es:

$$\lambda = 0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} 12.77$$

La relación del ancho entre el espesor de los ángulos es:

$$b = 102 \text{ mm}; t = 6 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{t} = 17$$

Como el perfil es esbelto es necesario determinar el área efectiva como se establece en la sección 2.2.5 de las normas.

Es necesario determinar el siguiente valor:

$$\lambda_a = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{f}{E}}$$

Donde k es igual a 0.43 y f se calcula a continuación.

$$\chi = [1 + \lambda_c^{2n}]^{-1/n} = \left[1 + \left(\frac{F_y}{F_e} \right)^n \right]^{-1/n}$$

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

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

Según la norma, el valor de n es:

$$n = 1.4$$

Para los elementos se tienen los siguientes valores:

$$r_x := 3.18 \text{ cm} \quad r_y := 11.52 \text{ cm} \quad K := 1$$

$$L_x := 1.3 \text{ m} \quad L_y := 1.3 \text{ m} \quad P_u := 20.2 \text{ tonnef}$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_x}{r_x} \right)^2} = 12041.61 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 158028.43 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_{cx} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ex}}} = 0.46$$

$$\lambda_{cy} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ey}}} = 0.13$$

$$\chi_x := \left(1 + \lambda_{cx}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.93$$

$$\chi_y := \left(1 + \lambda_{cy}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 1$$

El valor de f es igual que F_n calculado con la siguiente expresión.

$$F_n := \text{Min}(\chi_x, \chi_y) \cdot f_y = 2344.39 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Así pues, λ_a es igual a:

$$\lambda_a := \frac{1.052}{\sqrt{k}} \cdot \left(\frac{b}{t} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.9248$$

Como $\lambda_a > 0.673$ el ancho efectivo del elemento será:

$$\rho := \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda_a} \right)}{\lambda_a} = 0.8241$$

$$b_e := \begin{cases} \text{if } \lambda_a \leq 0.673 & = 84.0578 \text{ mm} \\ b \\ \text{else} \\ b \cdot \rho \end{cases}$$

Con esto, el área efectiva es la siguiente.

$$A := A - 4 \cdot t \cdot (b - b_e) = 20.69 \text{ cm}^2$$

Con esta área se determinará la resistencia a compresión de la sección. De acuerdo con la sección 6.3.1 de las NTC se tiene el siguiente valor.

$$R_c = F_{Rk} / F_y \cdot A = F_{Rn} \cdot A$$

$$R_c := \phi_c \cdot F_n \cdot A = 43.66 \text{ tonnef}$$

El porcentaje de esfuerzo es:

$$\%P := \frac{P_u}{R_c} = 46.26 \%$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.4.2 Columna CM-1 (W12X50 Perfiles interiores)

15.4.2.1 Compresión

Del par de columnas principales IR se revisarán primero las interiores. La sollicitación para estos elementos no reforzados es:

$$P_u = 88.6 \text{ tonf}$$

Comprobando la relación ancho espesor para compresión como se ha comprobado anteriormente. Las propiedades de la sección son las siguientes.

$$b_f := 206 \text{ mm} \quad t_p := 16.3 \text{ mm} \quad h := 252 \text{ mm} \quad t_a := 9.4 \text{ mm}$$

Para un perfil IR los límites de esbeltez son los siguientes.

$$\lambda_{r_patin} := 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 13.49 \quad \lambda_{r_alma} := 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 35.89$$

Y la relación ancho/espesor.

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_p} = 6.319 \quad \frac{h}{t_a} = 26.8085$$

Como se puede observar, la sección es compacta y no es necesario determinar el área efectiva. La determinación de la resistencia a compresión del elemento será igual que como se ha hecho hasta ahora en otros elementos. Es importante mencionar que las longitudes no arriostradas para la dirección "x" y "y" son diferentes y son las siguientes.

$$A := 94.2 \text{ cm}^2$$

$$r_x := 13.2 \text{ cm} \quad r_y := 5 \text{ cm} \quad K := 1 \quad n := 1.4 \quad L_x := 13 \text{ m} \quad L_y := 1 \text{ m}$$

Evidentemente, la resistencia menor se obtendrá con la mayor longitud no arriostrada. Los resultados son los siguientes.

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_x}{r_x} \right)^2} = 2074.81 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_{cx} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ex}}} = 1.3$$

$$\chi_x := \left(1 + \lambda_{cx}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.45$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$F_n := \text{Min}(\chi_x, \chi_y) \cdot f_y = 1569.54 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$R_c := \phi_c \cdot F_n \cdot A = 133.07 \text{ tonnef}$$

El porcentaje de esfuerzos en la sección es:

$$\%P := \frac{P_u}{R_c} = 66.58 \%$$

15.4.2.2 Flexión

La relación de ancho espesor tiene los siguientes límites.

$$\lambda_{pl_patin} := 0.3 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 7.23$$

$$\lambda_{pl_alma} := 2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 59.01$$

$$\lambda_{pl_patin} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 9.15$$

$$\lambda_{pl_alma} := 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 90.56$$

$$\lambda_{pl_patin} := 1 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 24.08$$

$$\lambda_{pl_alma} := 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 137.28$$

De las relaciones obtenidas para compresión se puede concluir que la sección es compacta; el apartado 7.3 de las NTC corresponde a este caso. Las propiedades para determinar la resistencia a flexión son las siguientes.

$$G := 784000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \phi_b := 0.9$$

$$C_b := 1$$

$$Z_x := 1179 \text{ cm}^3 \quad Z_y := 349 \text{ cm}^3 \quad S_y := 228 \text{ cm}^3 \quad J := 71 \text{ cm}^4 \quad C_a := 504847 \text{ cm}^6 \quad I_y := 2343 \text{ cm}^4$$

Primero calculando el momento plástico.

$$M_P := Z_x \cdot f_y = 41.44 \text{ tonnef m}$$

Aplicando las expresiones de la sección 7.3.2.5 para determinar los límites del pandeo elástico e inelástico.

$$X_r := \frac{4}{3} \cdot \frac{Z_x \cdot f_y}{C_b \cdot G \cdot J} \cdot \sqrt{\frac{C_a}{I_y}} = 1.46$$

$$X_u := 3.22 \cdot X_r = 4.69$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$L_r := \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{X_r} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot C_a}{G \cdot J}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_r^2}} = 6.9 \text{ m}$$

$$L_u := \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{X_u} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot C_a}{G \cdot J}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_u^2}} = 3.1 \text{ m}$$

Dado que la longitud considerada para el pandeo lateral es de 1 metro, esta es menor que L_u ; el momento nominal es el momento plástico.

$$M_{nx} := \begin{cases} \text{if } L_y \leq L_u & = 41.44 \text{ tonnef m} \\ M_p \\ \text{else if } L_u < L_y \leq L_r & \\ \text{Min}(M_{Lu}, M_p) \\ \text{else} & \\ M_e \end{cases}$$

El porcentaje de esfuerzos para este momento se muestra a continuación.

$$M_{ux} := 0.4 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_x := \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} = 1.07 \%$$

Por otro lado, el momento resistente alrededor del eje débil se obtiene con el apartado 7.6 de las normas. Como la sección es compacta, la única expresión que se deberá aplicar es la 7.6.2; corresponde al estado límite de fluencia.

$$M_{ny} := \text{Min}(M_{py}, 1.6 \cdot f_y \cdot S_y) = 12.27 \text{ tonnef m}$$

$$\phi M_{ny} := \phi_b \cdot M_{ny} = 11.04 \text{ tonnef m}$$

El porcentaje de esfuerzos es:

$$M_{uy} := 1.8 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_y := \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} = 16.3 \%$$

15.4.2.3 Cargas Combinadas

Para comprobar las condiciones combinadas de carga axial y momento se considerarán las siguientes solicitaciones. Prime, para carga axial:

$$P_u := 88.6 \text{ tonnef}$$

Para los extremos de las columnas:

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$M_{uox} := 0.1 \text{ tonnef m}$$

$$M_{uoy} := 0.15 \text{ tonnef m}$$

Para la columna completa:

$$M_{uoxa} := M_{ux} = 0.4 \text{ tonnef m}$$

$$M_{uoya} := M_{uy} = 1.8 \text{ tonnef m}$$

Las especificaciones para determinar la resistencia en los extremos de las columnas se exponen en la sección 9.1.6.1 y se muestran a continuación.

$$M_{py} = 12.27 \text{ tonnef m}$$

$$P_y := A \cdot f_y = 331.11 \text{ tonnef}$$

$$p := \frac{P_u}{\phi_{cb} \cdot P_y} = 0.3$$

$$M_{pcx} := \text{Min} \left(1.18 \cdot \phi_{cb} \cdot M_p \cdot (1 - p), M_p \cdot \phi_{cb} \right) = 30.93 \text{ tonnef m}$$

$$M_{pcy} := \text{Min} \left(1.67 \cdot \phi_{cb} \cdot M_{py} \cdot (1 - p), M_{py} \cdot \phi_{cb} \right) = 11.04 \text{ tonnef m}$$

El valor de Alpha se calcula de acuerdo con la tabla 9.1.6.1.4 de las normas.

$$\alpha := \begin{cases} \text{if } \frac{b_f}{d} < 0.5 & = 1.72 \\ 1 & \\ \text{else if } 0.5 \leq \frac{b_f}{d} < 1 & \\ 1.6 - \frac{p}{2 \cdot \ln(p)} & \\ \text{else} & \\ \text{"Invertir dimensiones"} & \end{cases}$$

Aplicando la ecuación de interacción 9.1.6.1 se tiene lo siguiente.

$$\left(\frac{M_{uox}}{M_{pcx}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{uoy}}{M_{pcy}} \right)^\alpha = 0 \%$$

Se puede observar que la columna no presenta ningún problema por los momentos en los extremos. Para revisar la sección completa es necesario recurrir a la sección 9.1.6.2 de las NTC. Los valores para calcular la ecuación de interacción son los siguientes.

$$\lambda_{cx} := \frac{K \cdot L_x}{r_x} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{2 \cdot \pi \cdot E}} = 1.3$$

$$\lambda_{cy} := \frac{K \cdot L_y}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{2 \cdot \pi \cdot E}} = 0.26$$

$$P_{ex} := \frac{A \cdot f_y}{\lambda_{cx}^2} = 195.45 \text{ tonnef}$$

$$P_{ey} := \frac{A \cdot f_y}{\lambda_{cy}^2} = 4739.23 \text{ tonnef}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$M_{ucx} := \phi M_{nx} \cdot \left(1 - \frac{P_u}{R_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{P_u}{P_{ex}}\right) = 6.81 \text{ tonnef m}$$

$$M_{ucy} := \phi_{cb} \cdot M_{py} \cdot \left(1 - \frac{P_u}{R_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{P_u}{P_{ey}}\right) = 3.62 \text{ tonnef m}$$

Beta se calcula con la tabla 9.1.6.2.1.

$$\beta := \begin{cases} \text{if } \frac{b_f}{d} < 0.3 & = 1.36 \\ 1 & \\ \text{else if } 0.3 \leq \frac{b_f}{d} < 1 & \\ 0.4 + p + \frac{b_f}{d} & \\ \text{else} & \\ \text{"Invertir dimensiones"} & \end{cases}$$

Evaluando la expresión 9.1.6.2.a.

$$\left(\frac{M_{uoxa}}{M_{ucx}}\right)^{\beta} + \left(\frac{M_{uoya}}{M_{ucy}}\right)^{\beta} = 41 \%$$

Se puede concluir que la sección es adecuada. Nótese que la sección es compacta y se aplican las expresiones correspondientes.

15.4.3 Columna CM-1 (W12X50 Perfiles exteriores)

15.4.3.1 Compresión

La revisión de las columnas CM-1 exteriores conlleva el mismo procedimiento para las columnas interiores, por lo que no es óptimo repetir todo el procedimiento. A continuación, se presentan los resultados a compresión.

Tabla 26. Resistencia a compresión de columna CM-1. Perfiles interiores.

Compresión		
Sección	Compacta	
A _e =	94.2	cm ²
L _x =	7	m
L _y =	1	m
F _n =	2807	kgf/cm ²
R _c =	238	tonf

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$P_u=$	97.16	tonf
$\%P$	41%	

15.4.3.2 Flexión

La resistencia a flexión se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 27. Resistencia a flexión de columna CM-1. Perfiles interiores.

Flexión		
Sección	Compacta	
$M_p=$	41.44	tonf-m
$L_u=$	3.1	m
$L_r=$	6.9	m
$L=$	1	m
$\phi M_{nx}=$	37.3	tonf-m
$M_{ux}=$	0.66	tonf-m
$\%M_x=$	2%	
$\phi M_{ny}=$	11.04	tonf-m
$M_{uy}=$	1.42	tonf-m
$\%M_y=$	13%	

15.4.3.3 Cargas Combinadas

Finalmente, la comprobación de la resistencia a flexo compresión se presenta a continuación.

Tabla 28. Resistencia a flexo compresión de columna CM-1. Perfiles interiores.

Flexo compresión		
Sección	Compacta	
$M_{py}=$	12.27	tonf-m
$P_y=$	331.11	tonf-m
$p=$	0.33	
$M_{pcx}=$	29.66	tonf-m
$M_{pcy}=$	11.04	tonf-m
$\alpha=$	1.75	
$M_{uox}=$	0.66	tonf-m
$M_{uoy}=$	1.42	tonf-m
Interacción extremos	3%	
$P_{ex}=$	674	tonf

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$P_{ey} =$	4739	tonf
$M_{ucx} =$	18.89	tonf-m
$M_{ucy} =$	6.4	tonf-m
$\beta =$	1.39	
Interacción completa	13%	

15.4.4 Columna CM-1 (W12X50 Perfiles interiores reforzados)

15.4.4.1 Compresión

La revisión de las columnas CM-1 exteriores conlleva el mismo procedimiento para las columnas interiores, por lo que no es óptimo repetir todo el procedimiento. A continuación, se presentan los resultados a compresión.

Tabla 29. Resistencia a compresión de columna CM-1. Perfiles interiores reforzados.

Compresión		
Sección	Compacta	
$A_e =$	153	cm ²
$L_x =$	7.2	m
$L_y =$	1	m
$F_n =$	2559	kgf/cm ²
$R_c =$	352	tonf
$P_u =$	124.96	tonf
%P	36%	

15.4.4.2 Flexión

La resistencia a flexión se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 30. Resistencia a flexión de columna CM-1. Perfiles interiores reforzados.

Flexión		
Sección	Compacta	
$M_p =$	56.82	tonf-m
$L_u =$	23.54	m
$L_r =$	75.8	m
$L =$	1	m
$\phi M_{nx} =$	56.8	tonf-m
$M_{ux} =$	0.2	tonf-m
%M _x	0%	

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$\phi M_{ny} =$	24	tonf-m
$M_{uy} =$	3.7	tonf-m
$\%M_y =$	15%	

15.4.4.3 Cargas Combinadas

Finalmente, la comprobación de la resistencia a flexo compresión se presenta a continuación.

Tabla 31. Resistencia a flexo compresión de columna CM-1. Perfiles interiores reforzados.

Compresión		
Sección	Compacta	
$M_{py} =$	32.33	tonf-m
$P_y =$	537.79	tonf-m
$p =$	0.26	
$M_{pcx} =$	44.76	tonf-m
$M_{pcy} =$	29.09	tonf-m
$\alpha =$	1.7	
$M_{uox} =$	0.2	tonf-m
$M_{uoy} =$	3.7	tonf-m
Interacción extremos	3%	
$P_{ex} =$	814.44	tonf
$P_{ey} =$	13904.23	tonf
$M_{ucx} =$	27.94	tonf-m
$M_{ucy} =$	18.61	tonf-m
$\beta =$	1.32	
Interacción completa	13%	

15.4.5 Columna CMR-1 (HSS 12X12X1/4)

15.4.5.1 Compresión

La siguiente revisión es igual que la realizada para las trabes TM-1; sin embargo, se presentan los detalles de la determinación de la resistencia. Determinando la relación ancho/espesor del elemento.

$$d := 305 \text{ mm} \quad t := 1.18 \text{ cm}$$

$$\lambda_x := 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.72$$

$$b := d - 3 \cdot t = 269.6 \text{ mm}$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$\frac{b}{t} = 22.85$$

Como se puede observar, el elemento es compacto a compresión y no es necesario determinar el área efectiva. Las longitudes no soportadas son las siguientes.

$$L_x := 12 \text{ m} \quad L_y := 12 \text{ m}$$

Como la sección tiene las mismas propiedades en ambas direcciones, sólo se tomará una de ellas.

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_x}{r} \right)^2} = 1975.69 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_{cx} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ex}}} = 1.33$$

$$\chi_x := \left(1 + \lambda_{cx}^2 \cdot n \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.43$$

$$F_n := \text{Min}(\chi_x, \chi_y) \cdot f_y = 1517.85 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

La resistencia a compresión es la siguiente.

$$R_c := \phi_c \cdot F_n \cdot A = 184.2 \text{ tonnef}$$

La carga última y el porcentaje de esfuerzos se muestra a continuación.

$$P_u := 58.24 \text{ tonnef}$$

$$\%P := \frac{P_u}{R_c} = 31.62 \%$$

15.4.5.2 Flexión

Revisando la relación ancho espesor.

$$\lambda_{pl_patin} := 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.98$$

$$\lambda_{pl_alma} := 0 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0$$

$$\lambda_{p_patin} := 1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.98$$

$$\lambda_{p_alma} := 2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 58.29$$

$$\lambda_{r_patin} := 1.4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.72$$

$$\lambda_{r_alma} := 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 137.28$$

$$\frac{b}{t} = 22.8475$$

$$\frac{b}{t} = 22.8475$$

La sección es compacta a flexo compresión por lo que sólo aplica el estado límite de fluencia en la sección completa. En este caso será igual que el momento plástico.

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$M_P := Z \cdot f_y = 51.61 \text{ tonnef m}$$

$$\phi M_{nx} := \phi_b \cdot M_{nx} = 46.45 \text{ tonnef m}$$

El momento último y el porcentaje de esfuerzos es:

$$M_{ux} := 5.8 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_x := \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} = 12.49 \%$$

Para el sentido ortogonal se tiene lo siguiente.

$$M_{uy} := 0.64 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_y := \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} = 1.38 \%$$

Nótese que el momento resistente para esta segunda dirección es el mismo que para la otra, pues la sección es cuadrada.

15.4.5.3 Cargas combinadas

Para la revisión por flexo compresión se tiene lo siguiente.

$$d = 305 \text{ mm} \quad \phi_{cb} := 0.9$$

$$M_{uox} := 5.8 \text{ tonnef m} \quad M_{uoy} := 0.64 \text{ tonnef m}$$

$$M_{uoxa} := 5.8 \text{ tonnef m} \quad M_{uoya} := 0.64 \text{ tonnef m}$$

Se puede observar que los momentos en los extremos son los máximos en toda la columna por lo que la revisión se realizará con los mismos valores para ambas condiciones.

Primero, para los extremos:

$$M_{py} := Z \cdot f_y = 51.61 \text{ tonnef m}$$

$$P_y := A \cdot f_y = 473.96 \text{ tonnef}$$

$$p := \frac{P_u}{\phi_{cb} \cdot P_y} = 0.14$$

$$M_{pcx} := \text{Min} \left(1.18 \cdot \phi_{cb} \cdot M_P \cdot (1-p), M_P \cdot \phi_{cb} \right) = 46.45 \text{ tonnef m}$$

$$M_{pcy} := \text{Min} \left(1.18 \cdot \phi_{cb} \cdot M_{py} \cdot (1-p), M_{py} \cdot \phi_{cb} \right) = 46.45 \text{ tonnef m}$$

$$\alpha := 1.7 - \frac{p}{2 \cdot \ln(p)} = 1.73$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$\left(\frac{M_{uox}}{M_{pcx}} \right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{uoy}}{M_{pcy}} \right)^{\alpha} = 3 \%$$

Nótese que la sección es compacta y por esos se empleó la ecuación de interacción anterior. Para la columna se obtuvo lo siguiente.

$$\lambda_{cx} := \frac{K \cdot L_x}{r} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{2 \cdot E}} = 1.33$$

$$P_{ex} := \frac{A \cdot f_y}{\lambda_{cx}^2} = 266.4 \text{ tonnef}$$

$$M_{ucx} := \phi M_{nx} \cdot \left(1 - \frac{P_u}{R_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{P_u}{P_{ex}} \right) = 24.82 \text{ tonnef m}$$

$$M_{ucy} := \phi M_{py} \cdot \left(1 - \frac{P_u}{R_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{P_u}{P_{ey}} \right) = 24.82 \text{ tonnef m}$$

$$\beta_x := \text{Max} \left(1.3 + \frac{1000 \cdot P}{\left(\frac{L_x}{r} \right)^2}, 1.4 \right) = 1.4$$

$$\left(\frac{M_{uoxa}}{M_{ucx}} \right)^{\text{Max}(\beta_x, \beta_y)} + \left(\frac{M_{uoya}}{M_{ucy}} \right)^{\text{Max}(\beta_x, \beta_y)} = 14 \%$$

Se puede concluir que el elemento satisface las solicitaciones últimas.

15.4.6 Columna DR-1 (HSS 8X8X1/4)

15.4.6.1 Compresión

Siguiendo el mismo procedimiento anterior.

Tabla 32. Resistencia a compresión de columna DR-1.

Compresión		
Sección	Compacta	
A _e =	45.81	cm ²
L _x =	6.85	m
L _y =	3.5	m
F _n =	1873.15	kgf/cm ²
R _c =	77.23	tonf
P _u =	45.8	tonf
%P=	59%	

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.4.6.2 Flexión

La resistencia a flexión se presenta a continuación.

Tabla 33. Resistencia a flexión de columna DR-1.

Flexión.		
Sección	No compacta	
$\phi M_{nx}=$	9.81	tonf-m
$M_{ux}=$	1.2	tonf-m
$\%M_x=$	13%	
$\phi M_{ny}=$	10.2	tonf-m
$M_{uy}=$	0.22	tonf-m
$\%M_y=$	2.4%	

15.4.6.3 Cargas combinadas

Finalmente, el porcentaje de esfuerzo para flexo compresión se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 34. Resistencia a flexo compresión de columna DR-1.

Flexo compresión		
Sección	No compacta	
$P_y=$	161.02	tonf
$M_{uoxa}=$	1.2	tonf-m
$M_{uoya}=$	0.22	tonf-m
Interacción extremos	58%	
$M_{uoxa}=$	1.2	tonf-m
$M_{uoya}=$	0.22	tonf-m
Interacción	85.5%	

15.4.7 Columna CM-2 (W12X40 REFORZADA)

15.4.7.1 Compresión

Dado que el perfil existente es el W12X40, se considerarán las expresiones a este tipo de perfil con las propiedades de la sección compuesta. Nuevamente, la relación ancho espesor para el IR es:

$$b_f := 204 \text{ mm} \quad t_p := 13.1 \text{ mm} \quad h := 251 \text{ mm} \quad t_a := 7.5 \text{ mm}$$

$$\lambda_{r_patin} := 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 13.49 \quad \lambda_{r_alma} := 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 35.89$$

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_p} = 7.7863$$

$$\frac{h}{t_a} = 33.4667$$

La sección es compacta para compresión. Las propiedades consideradas son las siguientes.

$$r_x := 16.73 \text{ cm} \quad r_y := 6.35 \text{ cm} \quad K := 1 \quad n := 1.4 \quad L_x := 14.35 \text{ m} \quad L_y := 14.35 \text{ m} \quad P_u := 11 \text{ tonnef}$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$A := 120.71 \text{ cm}^2$$

La resistencia a la compresión se calcula a continuación.

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_x}{r_x} \right)^2} = 2735.3 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 394.06 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_{cx} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ex}}} = 1.13$$

$$\lambda_{cy} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ey}}} = 2.99$$

$$\chi_x := \left(1 + \lambda_{cx}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.53$$

$$\chi_y := \left(1 + \lambda_{cy}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.11$$

$$F_n := \text{Min}(\chi_x, \chi_y) \cdot f_y = 381.41 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$R_c := \phi_c \cdot F_n \cdot A = 41.44 \text{ tonnef}$$

El porcentaje de esfuerzos es:

$$\%P := \frac{P_u}{R_c} = 26.55 \%$$

15.4.7.2 Flexión

La relación ancho espesor es:

$$\lambda_{pl_patin} := 0.3 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 7.23$$

$$\lambda_{pl_alma} := 2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 59.01$$

$$\lambda_{pl_patin} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 9.15$$

$$\lambda_{pl_alma} := 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 90.56$$

$$\lambda_{pl_patin} := 1 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 24.08$$

$$\lambda_{pl_alma} := 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 137.28$$

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_p} = 7.7863$$

$$\frac{h}{t_a} = 33.4667$$

Es sección compacta. Calculando las longitudes de pandeo.

$$M_P := Z_x \cdot f_y = 55.67 \text{ tonnef m}$$

$$X_r := \frac{4}{3} \cdot \frac{Z_x \cdot f_y}{C_b \cdot G \cdot J} \cdot \sqrt{\frac{C_a}{I_y}} = 0.01$$

<p align="center">P21-0385 PET FOOD WET LINE</p>	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$X_u := 3.22 \cdot X_r = 0.05$$

$$L_r := \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{X_r} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot C_a}{G \cdot J}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_r^2}} = 57.68 \text{ m}$$

$$L_u := \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{X_u} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot C_a}{G \cdot J}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_u^2}} = 17.92 \text{ m}$$

Como las longitudes arriostradas son mucho menores, el momento nominal será el plástico.

$$M_{nx} := \begin{cases} \text{if } L_y \leq L_u & = 55.67 \text{ tonnef m} \\ M_p \\ \text{else if } L_u < L_y \leq L_r & \\ \text{Min}(M_{Lu}, M_p) \\ \text{else} & \\ M_e \end{cases}$$

Y el resistente:

$$M_{ux} := 18.16 \text{ tonnef m}$$

$$\phi M_{nx} := \phi_b \cdot M_{nx} = 50.11 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_x := \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} = 36.24 \%$$

Para el momento alrededor del eje débil se tiene lo siguiente.

$$M_{uy} := 2.7 \text{ tonnef m}$$

$$M_{py} := Z_y \cdot f_y = 21.82 \text{ tonnef m}$$

$$M_{ny} := \text{Min}(M_{py}, 1.6 \cdot f_y \cdot S_y) = 21.82 \text{ tonnef m}$$

$$\phi M_{ny} := \phi_b \cdot M_{ny} = 19.64 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_y := \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} = 13.75 \%$$

15.4.7.3 Cargas Combinadas

Para la revisión por flexo compresión se despreciarán los momentos en los extremos de la columna, pues son prácticamente 0. Sólo se revisará la sección completa.

$$d := 303 \text{ mm}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$$P_u := 11 \text{ tonnef}$$

$$M_{uoxa} := M_{ux} = 18.16 \text{ tonnef m} \quad M_{uoya} := M_{uy} = 2.7 \text{ tonnef m}$$

$$\lambda_{cx} := \frac{K \cdot L_x}{r_x} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} = 1.13 \quad \lambda_{cy} := \frac{K \cdot L_y}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\pi^2 \cdot E}} = 2.99$$

$$P_{ex} := \frac{A \cdot f_y}{\lambda_{cx}^2} = 330.18 \text{ tonnef} \quad P_{ey} := \frac{A \cdot f_y}{\lambda_{cy}^2} = 47.57 \text{ tonnef}$$

$$M_{ucx} := \phi M_{nx} \cdot \left(1 - \frac{P_u}{R_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{P_u}{P_{ex}}\right) = 35.58 \text{ tonnef m}$$

$$M_{ucy} := \phi_{cb} \cdot M_{py} \cdot \left(1 - \frac{P_u}{R_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{P_u}{P_{ey}}\right) = 11.09 \text{ tonnef m}$$

$$\beta := \begin{cases} \text{if } \frac{b_f}{d} < 0.3 & = 1.1 \\ 1 & \\ \text{else if } 0.3 \leq \frac{b_f}{d} < 1 & \\ 0.4 + p + \frac{b_f}{d} & \\ \text{else} & \\ \text{"Invertir dimensiones"} & \end{cases}$$

$$\left(\frac{M_{uoxa}}{M_{ucx}}\right)^\beta + \left(\frac{M_{uoya}}{M_{ucy}}\right)^\beta = 69 \%$$

La columna es adecuada para cumplir con las solicitaciones.

15.4.8 Columna CM-2 (W12X40)

15.4.8.1 Compresión

El procedimiento para revisar la resistencia del elemento es el mismo que para el que se acaba de revisar. Así pues, se presentan sólo los resultados obtenidos.

Tabla 35. Resistencia a compresión de columna CM-2.

Compresión		
Sección	Compacta	
A _e =	75.5	cm ²
L _x =	6	m
L _y =	12.96	m
F _n =	281.65	kgf/cm ²

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

$R_c=$	19.14	tonf
$P_u=$	4.53	tonf
$\%P=$	24%	

15.4.8.2 Flexión

En la siguiente tabla se observan los resultados para flexión.

Tabla 36. Resistencia a flexión de columna CM-2.

Flexión.		
Sección	Compacta	
$L_u=$	2.96	m
$L_r=$	6.2	m
$L=$	12.96	m
$\phi M_{nx}=$	7.83	tonf-m
$M_{ux}=$	4.34	tonf-m
$\%M_x=$	55%	
$\phi M_{ny}=$	8.7	tonf-m
$M_{uy}=$	1.26	tonf-m
$\%M_y=$	14%	

15.4.8.3 Cargas combinadas

Y finalmente, la comprobación de las ecuaciones de interacción para flexo compresión.

Tabla 37. Resistencia a flexo compresión de columna CM-2.

Flexo compresión		
Sección	Compacta	
$M_{py}=$	9.67	tonf-m
$P_y=$	265.38	tonf
$p=$	0.02	
$M_{pcx}=$	29.58	tonf-m
$M_{pcy}=$	8.7	tonf-m
$\alpha=$	1.6	
$M_{uoxa}=$	4.34	tonf-m
$M_{uoya}=$	1.26	tonf-m
Interacción extremos	9%	
$\lambda_{cx}=$	0.61	
$\lambda_{cy}=$	3.5	
$P_{ex}=$	713.26	tonf
$P_{ey}=$	21.72	tonf
$M_{ucx}=$	5.94	tonf-m

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

Mucy=	5.25	tonf-m
β =	1.09	
Muoxa=	4.34	tonf-m
Muoya=	1.26	tonf-m
Interacción	92%	

15.4.9 Columna CM-3 (W12X19 REFROZADO)

15.4.9.1 Compresión

Dado que el perfil y se ha revisado para flexión y el procedimiento para compresión es el mismo que para las demás columnas; a continuación, sólo se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 38. Resistencia a compresión de columna CM-3. Reforzado.

Compresión		
Sección	Esbelta	
A_e =	58.19	cm ²
L_x =	13.25	m
L_y =	6	m
F_n =	462.81	kgf/cm ²
R_c =	24.24	tonf
P_u =	3.7	tonf
%P=	16%	

15.4.9.2 Flexión

Los resultados de la flexión son los siguientes.

Tabla 39. Resistencia a flexión de columna CM-3. Reforzado.

Flexión.		
Sección	Compacta	
L_u =	4.72	m
L_r =	15.15	m
L =	6	m
ϕM_{nx} =	20.07	tonf-m
M_{ux} =	5.52	tonf-m
%Mx=	27%	
ϕM_{ny} =	4.12	tonf-m
M_{uy} =	1.79	tonf-m
%My=	43%	

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.4.9.3 Cargas combinadas

Para la revisión a flexo compresión del elemento se consideró la carga axial más desfavorable sin importar la combinación en la que se presente; no así con los momentos, pues corresponden a la mismo. Es por esto por lo que se pueden observar dos revisiones para la columna completa. Los extremos de la columna no se revisaron ya que los momentos son despreciables.

Tabla 40. Resistencia a flexo compresión de columna CM-3. Reforzado.

Flexo compresión		
Sección	Compacta	
$M_{py}=$	4.57	tonf-m
$\lambda_{cx}=$	1.24	
$\lambda_{cy}=$	2.7	
$P_{ex}=$	132.42	tonf
$P_{ey}=$	28.12	tonf
$M_{ucx}=$	16.53	tonf-m
$M_{ucy}=$	3.03	tonf-m
$\beta=$	0.75	
$M_{uoxa}=$	0.1	tonf-m
$M_{uoya}=$	1.79	tonf-m
Interacción	70%	
$M_{uoxa}=$	5.52	tonf-m
$M_{uoya}=$	0.1	tonf-m
Interacción	52%	

15.4.10 Columna CM-3 (W12X19)

15.4.10.1 Compresión

Los resultados a compresión son los siguientes.

Tabla 41. Resistencia a compresión de columna CM-3.

Compresión		
Sección	Esbelta	
$A_e=$	36	cm ²
$L_x=$	6	m
$L_y=$	3	m
$F_n=$	882.16	kgf/cm ²
$R_c=$	28.58	tonf
$P_u=$	0.6	tonf
%P=	2%	

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.4.10.2 Flexión

La resistencia a flexión de la columna se presenta a continuación.

Tabla 42. Resistencia a flexión de columna CM-3.

Flexión.		
Sección	Compacta	
$L_u=$	1.28	m
$L_r=$	2.46	m
$L=$	3	m
$\phi M_{nx}=$	6.85	tonf-m
$M_{ux}=$	3.1	tonf-m
$\%M_x=$	50%	
$\phi M_{ny}=$	1.55	tonf-m
$M_{uy}=$	0	tonf-m
$\%M_y=$	0%	

15.4.10.3 Cargas combinadas

Finalmente, el porcentaje de esfuerzo para flexo compresión se muestra en la siguiente tabla. De igual manera, no se revisaron los extremos de la columna pues los momentos son muy pequeños.

Tabla 43. Resistencia a flexo compresión de columna CM-3.

Flexo compresión		
Sección	Compacta	
$M_{py}=$	1.72	tonf-m
$\lambda_{cx}=$	0.65	
$\lambda_{cy}=$	1.89	
$P_{ex}=$	299.53	tonf
$P_{ey}=$	35.5	tonf
$M_{ucx}=$	6.02	tonf-m
$M_{ucy}=$	1.49	tonf-m
$\beta=$	0.73	
$M_{uoxa}=$	3.1	tonf-m
$M_{uoya}=$	0	tonf-m
Interacción	61%	

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

15.4.11 Columna CM-4 (2CF254X70X14)

15.4.11.1 Compresión

Dado que se trata de elementos CF, es evidente que la sección es esbelta; sin embargo, se empleará el área proporcionada por el manual para determinar la resistencia a compresión. El área para cada perfil individual es de:

$$A_e = 4.2 \text{ cm}^2$$

Así pues, el área será:

$$A := 8.4 \text{ cm}^2$$

Los datos para determinar la resistencia a compresión son:

$$r_x := 9.51 \text{ cm} \quad r_y := 6 \text{ cm} \quad K := 1 \quad n := 1.4 \quad L_x := 6 \text{ m} \quad L_y := 6 \text{ m} \quad P_u := 0.4 \text{ tonnef}$$

Realizando el procedimiento que exponen las normas nuevamente.

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_x}{r_x} \right)^2} = 5055.63 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_y}{r_y} \right)^2} = 2012.41 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\lambda_{cx} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ex}}} = 0.83$$

$$\lambda_{cy} := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ey}}} = 1.32$$

$$\chi_x := \left(1 + \lambda_{cx}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.71$$

$$\chi_y := \left(1 + \lambda_{cy}^{2 \cdot n} \right)^{\left(-\frac{1}{n} \right)} = 0.44$$

$$F_n := \text{Min}(\chi_x, \chi_y) \cdot f_y = 1537.23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$R_c := \phi_c \cdot F_n \cdot A = 11.62 \text{ tonnef}$$

La relación de esfuerzos es:

$$\%P := \frac{P_u}{R_c} = 3.44 \%$$

15.4.11.2 Flexión

Para determinar el momento resistente de los elementos se empleará el módulo de sección efectivo dado en las tablas del manual del IMCA; dado que se trata de dos elementos se considerará este número para determinar el momento total.

$$S_{xe} := 51.64 \text{ cm}^3 \quad S_{ye} := 8.77 \text{ cm}^3$$

Los momentos resistentes en ambas direcciones son:

$$\phi M_{nx} := 2 \cdot \phi_b \cdot S_{xe} \cdot f_y = 3.2673 \text{ tonnef m}$$

$$\phi M_{ny} := 2 \cdot \phi_b \cdot S_{ye} \cdot f_y = 0.5549 \text{ tonnef m}$$

P21-0385 PET FOOD WET LINE	Fecha: 15/04/2024
	Revisión: A

El porcentaje de esfuerzos es:

$$M_{ux} := 0.8 \text{ tonnef m} \quad M_{uy} := 0.1 \text{ tonnef m}$$

$$\%M_x := \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} = 24 \% \quad \%M_y := \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} = 18 \%$$

15.4.11.3 Cargas combinadas

Dado que se trata de elementos esbeltos y que los momentos en los extremos son despreciables la revisión a flexo compresión se llevará a cabo con la siguiente expresión para la columna completa.

$$P_u = 0.4 \text{ tonnef} \quad M_{uoxa} := 0.8 \text{ tonnef m} \quad M_{uoya} := 0.1 \text{ tonnef m}$$

$$\frac{P_u}{R_c} + \frac{M_{uoxa}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uoya}}{\phi M_{ny}} = 45.95 \%$$