WILLIAM SANCHEZ
INGENIERO ESTRUCTURAL

MEMORIA DE CÁLCULO E INFORME ESTRUCTURAL

INSTITUCIÓN EDUCATIVA RURAL PUERTO ARANGO — SEDE LA GAITANA
MÓDULO DE UN AULA ESCOLAR

Florencia, Caquetá

Dato	Información
Proyecto	Construcción de infraestructura educativa (un aula) en el establecimiento educativo oficial Institución Educativa Rural Puerto Arango, sede La Gaitana, del municipio de Florencia, Caquetá.
Sistema principal	Mampostería estructural reforzada - DMO
Cubierta	Estructura metálica liviana a dos aguas
Cimentación	Cimiento corrido de concreto ciclópeo con viga cinta de concreto reforzado para muros portantes.
Diseñador estructural	William Andrés Sánchez Montilla
Matrícula profesional	091037-0662871 CND
Fecha base del documento	19/10/2026
Cliente	Ing. Sebastian Ruiz
Versión	03 – Ajuste a módulo de un aula (reemplaza la versión 02 de dos aulas)

RESPONSABLE DEL DISEÑO ESTRUCTURAL



Firma: _____

William Andrés Sánchez Montilla
Ingeniero estructural
Matrícula Profesional No. **091037-0662871 CND**
Fecha: _____

Contenido

1. OBJETO Y ALCANCE....3
1.1 Objeto....3
1.2 Alcance....3
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO....3
3. INFORMACIÓN DE ENTRADA Y CRITERIOS DE DISEÑO....5
4. NORMATIVIDAD DE REFERENCIA....5
5. MATERIALES Y PROPIEDADES DE MODELACIÓN....6
5.1 Mampostería reforzada....6
5.2 Peso y espesor equivalente de mampostería parcialmente inyectada....7
5.3 Concreto, acero de refuerzo y acero estructural....8
6. ESTUDIO GEOTÉCNICO Y PARÁMETROS SÍSMICOS....8
6.1 Parámetros geotécnicos de diseño....8
6.2 Parámetros sísmicos....9
7. SISTEMA ESTRUCTURAL....10
7.1 Muros estructurales....10
7.2 Cubierta y coronación....10
7.3 Cimentación....10
8. AVALÚO DE CARGAS....11
8.1 Carga muerta D....11
8.2 Carga viva L / Lr....12
8.3 Viento W....12
8.4 Acción sísmica E....13
9. MODELACIÓN ESTRUCTURAL....14
9.1 Modelo estructural....14
9.2 Idealización de los muros de mampostería....15
9.3 Discretización y tipificación de muros....16
9.4 Condiciones de apoyo y fuente de masa....18
9.4.1 Condiciones de apoyo....18
9.4.2 Fuente de masa....18
9.5 Análisis Modal....18
10. ANÁLISIS SISMO RESISTENTE Y VERIFICACIONES GLOBALES....20
10.1 Método de análisis sísmico y cortante basal....20
10.2 Regularidad, torsión accidental y efectos direccionales....21
10.3 Verificación de derivas....21
10.4 Verificaciones globales del modelo....22
11. DISEÑO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADA....23
11.1 Propiedades y criterios de diseño....23
11.2 Tipificación y solicitaciones de diseño de los muros....23
11.3 Verificación a carga axial y esbeltez....26
11.4 Verificación Flexo-compresión....26
11.5 Verificación Cortante....27
11.6 Celdas inyectadas y refuerzo....27
11.7 Elementos de borde y zonas críticas....28
11.8 Tabla integral de verificación y diseño de muros....28
12. DISEÑO DE CIMENTACIÓN....30
12.1 Criterios de diseño....30
12.2 Geometría adoptada....31
12.3 Conclusión....31
13. DISEÑO DE CUBIERTA METÁLICA....31
13.1 Geometría y cargas de la memoria de correas....31
13.2 Verificación de correa 2P-150-16....32
13.3 Cerchas, arriostramientos y conexiones....32
14. ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS Y CONTROL DE CALIDAD....32
14.1 Mampostería....32
14.2 Concreto y acero de refuerzo....33
14.3 Estructura metálica....33
15. CONCLUSIONES....33
16. DOCUMENTOS DE REFERENCIA....34

1. OBJETO Y ALCANCE

1.1 Objeto

Presentar de manera ordenada y trazable las hipótesis, parámetros, cargas, procedimientos de análisis, resultados y verificaciones adoptadas para el diseño estructural de un (01) módulo de un (01) aula escolar de la Institución Educativa Rural Puerto Arango, sede La Gaitana, en Florencia, Caquetá. El sistema principal de resistencia corresponde a muros de mampostería estructural reforzada con capacidad moderada de disipación de energía (DMO), apoyados sobre cimentación superficial continua y con cubierta metálica liviana.

Este documento actualiza la memoria del módulo de dos aulas (versión 02), debido a que el proyecto aprobado corresponde a un solo módulo de un aula, equivalente a la mitad de la edificación inicialmente proyectada (tramo entre los ejes A y C). Se conservan los materiales, criterios de diseño, normativa y estudio geotécnico del proyecto original; se actualizan la geometría, las cargas, el análisis estructural, las solicitaciones, el refuerzo de los muros y la verificación de la cimentación.

1.2 Alcance

- Caracterización geométrica del módulo de un aula y definición del sistema resistente en ambas direcciones.
- Definición de materiales y propiedades mecánicas de mampostería, acero, concreto y elementos metálicos.
- Incorporación del estudio geotécnico real del sitio y de los parámetros sísmicos asociados.
- Avalúo de cargas permanentes, variables, sísmicas y de viento para el módulo de un aula.
- Modelación tridimensional por elementos finitos, con elementos de área para muros agrupados mediante etiquetas Pier y elementos lineales para las vigas de amarre.
- Verificación de periodos, participación modal, cortante basal, torsión accidental, desplazamientos y derivas.
- Diseño de muros a carga axial, flexo-compresión y cortante con fuerzas concurrentes Pu, Vu y Mu.
- Dimensionamiento de la cimentación a partir de las reacciones del modelo y de la capacidad portante del estudio de suelos.
- Integración de la estructura metálica de cubierta, correas, cercha, conexiones, anclajes y transferencia de cargas a la mampostería.
- Definición de requisitos de construcción, control de calidad y documentos de referencia.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto corresponde a una edificación educativa de un solo nivel, conformada por un módulo rectangular que contiene un aula escolar. La planta estructural corresponde a la mitad del módulo de dos aulas inicialmente proyectado, comprendida entre los ejes A y C, con una longitud global de 8.38 m y un ancho de 7.13 m, para un área construida cercana a 59.75 m². El muro del eje C, que en el proyecto original era el muro divisorio entre aulas, pasa a ser muro de fachada (culata) del módulo.

Los muros estructurales reciben las acciones gravitacionales y laterales y transmiten las reacciones a una cimentación corrida. La cubierta metálica liviana se apoya sobre elementos de coronación y debe garantizarse su anclaje frente a presión y succión de viento.

Parámetro	Valor adoptado / estado
Número de niveles	1
Número de módulos	1
Número de aulas	1
Uso	Institucional - educativo
Sistema resistente	Mampostería estructural reforzada - DMO
Área construida aproximada	59.75 m²
Dimensiones globales aproximadas	8.38 m x 7.13 m (ejes A–C y 1–2)

Parámetro	Valor adoptado / estado
Altura de muro / alero	2.70 m
Altura máxima / cumbrera	3.70 m
Cubierta	Metálica liviana a dos aguas
Cimentación	Cimiento corrido de concreto ciclópeo con viga cinta
Municipio / Departamento	Florencia / Caquetá
Planos arquitectónicos finales	LA GAITANA REVIT (módulo de un aula)

La geometría de vanos adoptada es la del modelo del proyecto original para el tramo A–C: en los ejes 1 y 2, machón de esquina de 0.57 m y ventana entre x = 0.57 m y x = 4.20 m con antepecho de 1.08 m de altura; en el eje 1, puerta entre x = 6.99 m y el eje C. Sobre todos los vanos continúa la viga de amarre. Las aberturas, machones, dinteles y tímpanos deben coincidir exactamente con la arquitectura final del módulo de un aula.

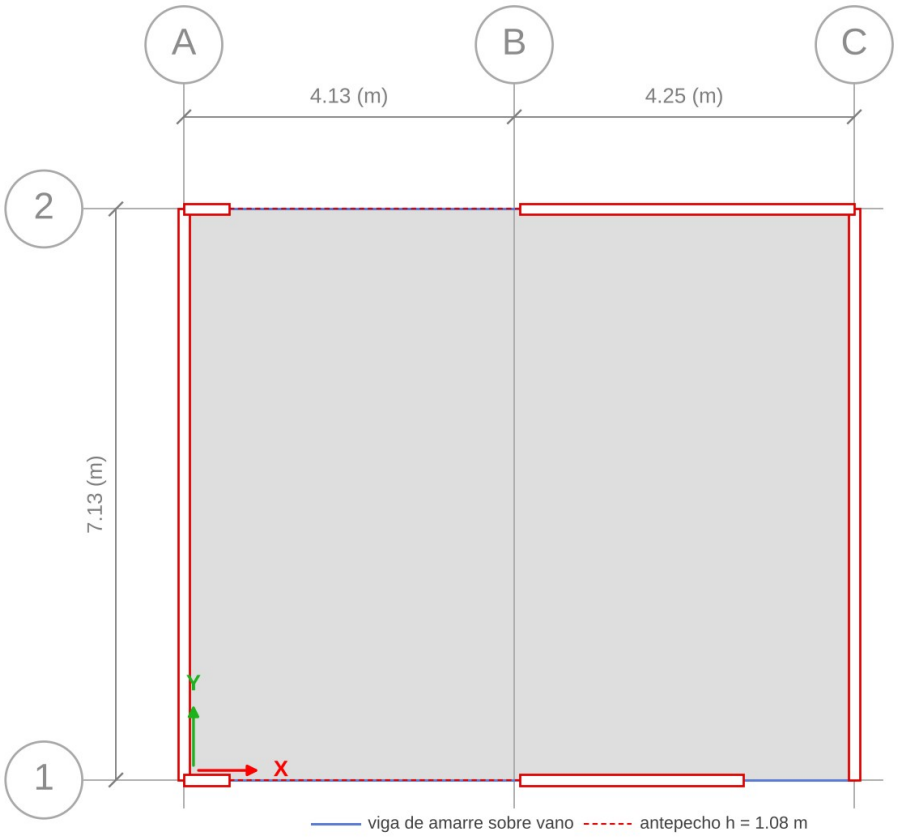


Ilustración 1 Planta estructural de referencia del módulo de un aula.

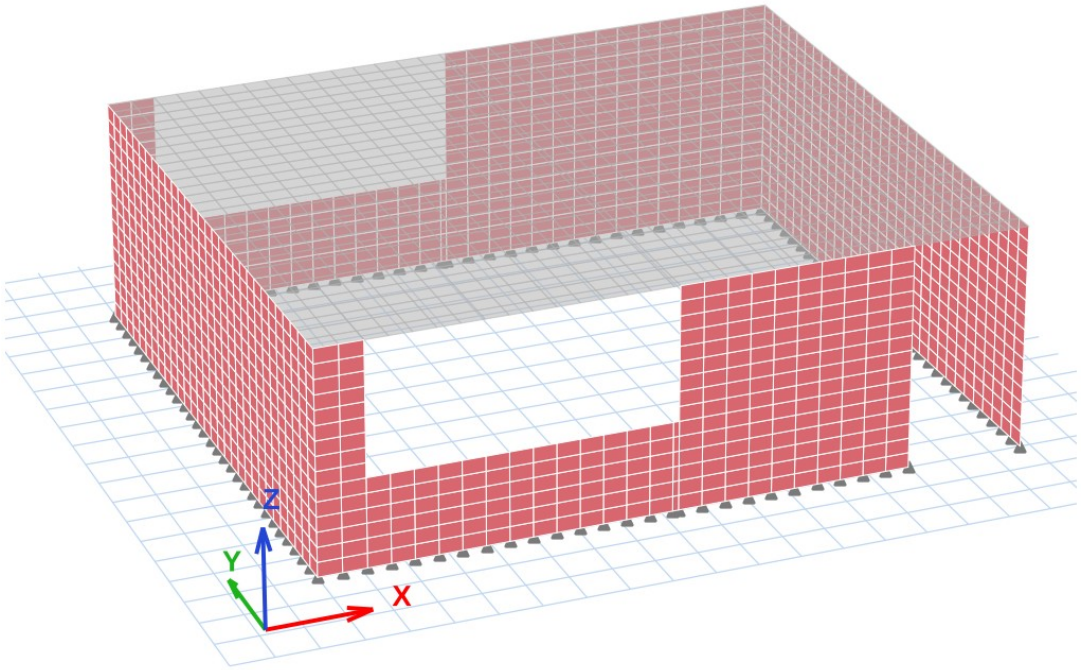


Ilustración 2 Modelo 3D módulo de un aula

3. INFORMACIÓN DE ENTRADA Y CRITERIOS DE DISEÑO

La trazabilidad del diseño se basa en cuatro fuentes: arquitectura, geotecnia, definición del sistema constructivo y modelo analítico. Cada cambio de geometría, abertura, ubicación de apoyo de cubierta o especificación de material obliga a revisar el modelo y las verificaciones asociadas.

Entrada	Documento / dato	Estado
Arquitectura	Planos arquitectónicos Proyecto LA GAITANA – módulo de un aula (ejes A–C)	INCORPORADO
Geotecnia	Estudio de suelos S025-0726, IE Puerto Arango sede La Gaitana - C.S.P. Estudios y Diseños S.A.S. (julio 2026)	INCORPORADO
Mampostería	Diseño_Mamp LA GAITANA.xlsx (procedimiento), recalculado para un aula	ACTUALIZADO
Peso equivalente	Espesor equivalente.xlsx	INCORPORADO
Cubierta - correas	Correa LA GAITANA.pdf	INCORPORADO
Cubierta - cercha	Cargas Cercha.xlsx	INCORPORADO
Sismo / FHE	FHE del módulo de un aula (numeral 8.4)	ACTUALIZADO
Modelo	Modelo de elementos finitos del módulo de un aula, calibrado con LA GAITANA mamposteria.edb (numerales 9 y 10.4)	ACTUALIZADO

4. NORMATIVIDAD DE REFERENCIA

El diseño estructural se organiza con base en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y las normas de producto y ejecución que resulten aplicables a los materiales efectivamente suministrados.

- NSR-10, Título A: requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente.
- NSR-10, Título B: cargas.
- NSR-10, Título C: concreto estructural para cimentación, vigas de amarre, dinteles y elementos de concreto.
- NSR-10, Título D: mampostería estructural.

- NSR-10, Título F: estructuras metálicas.
- NSR-10, Título H: estudios geotécnicos y cimentaciones.
- NTC 2289 / ASTM A706, cuando corresponda, para acero de refuerzo.
- Normas ASTM aplicables a perfiles, láminas, pernos y anclajes del sistema metálico.
- AISC 360 y AWS como documentos complementarios para el diseño y ejecución de elementos y conexiones metálicas cuando apliquen.

5. MATERIALES Y PROPIEDADES DE MODELACIÓN

5.1 Mampostería reforzada

Propiedad	Valor / especificación
Resistencia especificada de la mampostería f'm	15 MPa
Módulo de elasticidad Em = 750 f'm	11,250 MPa
Módulo de cortante Gm = 0.4 Em (ν = 0.25)	4,500 MPa
Unidad de mampostería	30x15x8
Resistencia mínima de la unidad f'cu	40 MPa
Espesor de muro usado en hoja de diseño	125 mm
Mortero de pega	3000 psi
Mortero de relleno (grout)	21 MPa
Acero de refuerzo fy	420 MPa
Módulo del acero Es	200,000 MPa

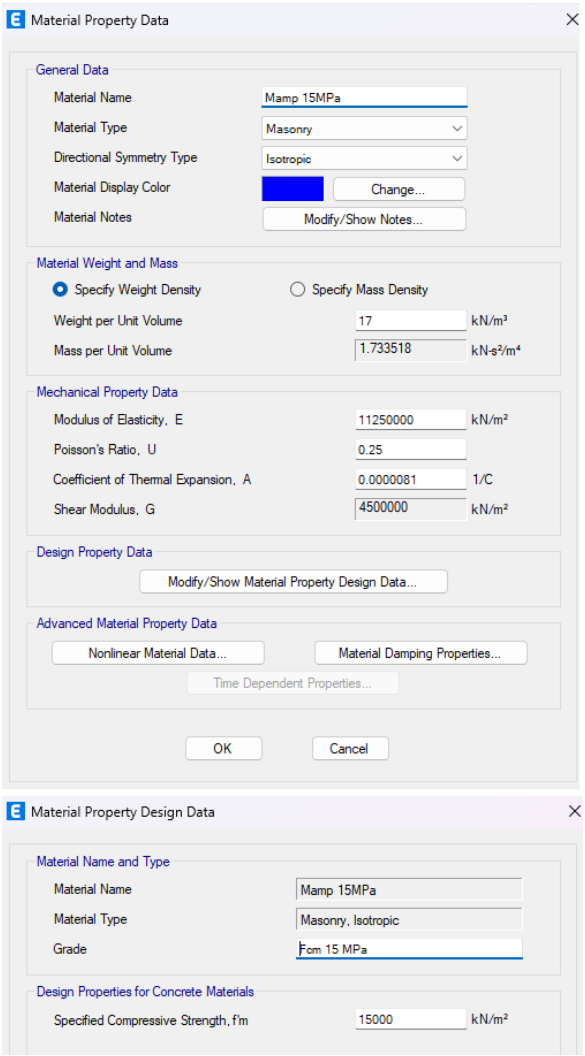


Ilustración 3 Propiedades de mampostería

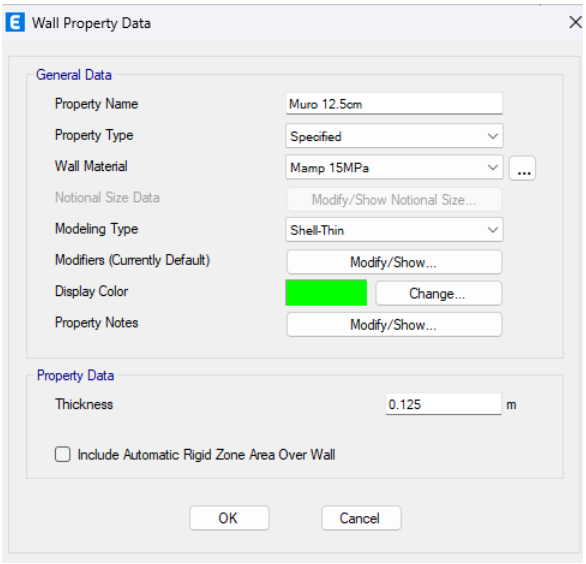


Ilustración 4 Propiedades de mampostería – espesor

5.2 Peso y espesor equivalente de mampostería parcialmente inyectada

El espesor equivalente estima una idealización para representar la masa y el peso de un muro parcialmente inyectado. Este cálculo no reemplaza el espesor resistente usado para la verificación de la mampostería.

Parámetro	Valor
Espesor nominal de muro tm	125 mm
Longitud módulo considerada	250 mm
Longitud libre	750 mm
Abertura de celda	60 mm
Número de celdas rellenas nr	2
Número total de celdas nt	6
Peso unitario mampostería ym	18 kN/m³
Peso unitario relleno yc	24 kN/m³
Espesor equivalente mampostería	89.00 mm
Espesor equivalente relleno	13.57 mm

Parámetro	Valor
Espesor equivalente total	102.57 mm
Peso unitario equivalente yeq	15.42 kN/m³

En el modelo estructural el peso propio de los muros se calcula con y = 17 kN/m³ sobre el espesor del modelo t = 0.125 m (2.13 kN/m²), valor que cubre el peso equivalente del muro parcialmente inyectado (yeq·teq = 15.42 × 0.10257 = 1.58 kN/m²) y que coincide con la definición del material en el modelo del proyecto (Ilustración 3).

5.3 Concreto, acero de refuerzo y acero estructural

Material	Propiedad	Valor
Concreto de cimentación	f'c	21 MPa
Vigas de amarre	f'c	21 MPa
Acero de refuerzo	fy	420 MPa
Correa 2P-150-16	Fy	2800 kg/cm²
Correa 2P-150-16	Fu	3650 kg/cm²
Cerchas	Fy	Según memoria de la cercha (pendiente de consignar)

6. ESTUDIO GEOTÉCNICO Y PARÁMETROS SÍSMICOS

6.1 Parámetros geotécnicos de diseño

El estudio geotécnico del proyecto corresponde al informe RG N.° S025-0726, “Estudio de suelos para la construcción de aula escolar en la IE Puerto Arango, sede La Gaitana - Resguardo Nasa Wexs Kiwe La Gaitana del municipio de Florencia, departamento del Caquetá”, elaborado por C.S.P. Estudios y Diseños S.A.S. bajo la dirección del Ing. Carlos Andrés Baéz Baéz, especialista en geotecnia vial y pavimentos (M.P. 15202147445 BYC), en julio de 2026. Se ejecutaron tres perforaciones con ensayos SPT (P-01 a P-03) y se definió un perfil de diseño único para cimentación, conformado por arcillas CL y CH hasta aproximadamente 1.70 m de profundidad sobre un macizo rocoso. No se registró nivel freático. Sus parámetros se adoptan sin modificación para el módulo de un aula, siempre que este se implante dentro del área explorada por el estudio; de lo contrario, debe confirmarse su aplicabilidad con el ingeniero geotecnista.

Parámetro	Valor adoptado / reporte
Perfil geotécnico	Arcillas CL y CH hasta ≈1.70 m sobre macizo rocoso; perfil sísmico C
Nivel freático	No se registró en las perforaciones
Peso unitario del suelo y	17.8 kN/m³ (0.00–1.70 m); 21.49 kN/m³ (> 1.70 m)
Cohesión C (0.00–0.90 m)	22.0 kPa
Módulo Es (0.00–0.90 m)	4,984 kPa
Cohesión C (0.90–1.70 m)	61.6 kPa
Módulo Es (0.90–1.70 m)	13,015 kPa
Profundidad de desplante del análisis geotécnico	0.50 m
Cimentación de referencia del estudio	Viga de cimentación de 0.30 m × 4.00 m
qadm a Df = 0.50 m	142.25 kPa
Factores de seguridad reportados	3.0 (D+L normal); 2.5 (D+L máxima); 1.5 (D+L+sismo)
Asentamiento total estimado a qadm	3.22 cm (< 15 cm admisible NSR-10)

Parámetro	Valor adoptado / reporte
Recomendaciones constructivas	Reemplazo granular ART-610 INVIAS compactado al 95 % del Proctor modificado bajo la placa y concreto de limpieza de 5 cm bajo la cimentación

6.2 Parámetros sísmicos

Parámetro	Valor
Zona de amenaza sísmica	Intermedia
Aa	0.20
Av	0.15
Ae	0.10
Ad	0.05
Perfil de suelo	C según estudio (D adoptado en el análisis)
Fa	1.20 según estudio (1.40 adoptado en el análisis)
Fv	1.65 según estudio (2.20 adoptado en el análisis)
Grupo de uso	III - Edificaciones de atención a la comunidad
Coeficiente de importancia I	1.25
Sistema de disipación	DMO
R0	2.50
Factores φp, φa, φr	1.0, 1.0, 1.0
R definitivo	2.50

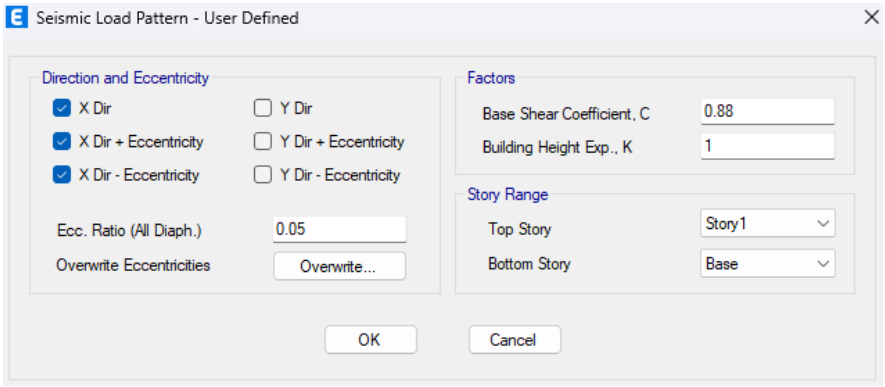


Ilustración 5 Patrón de carga sismo X (casos de deriva, C = 0.88)

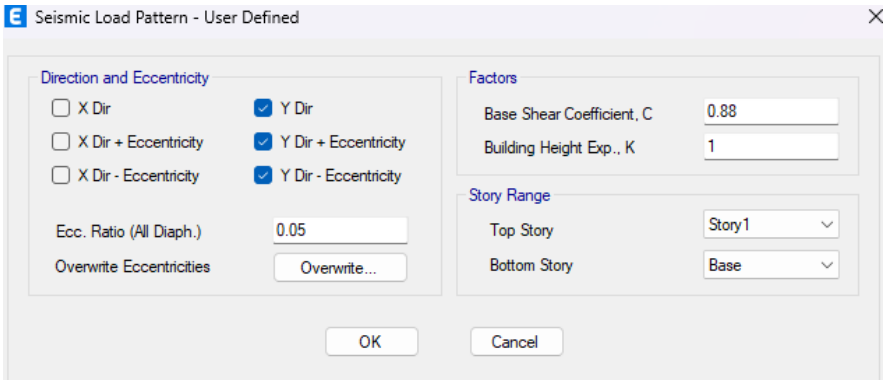


Ilustración 6 Patrón de carga sismo Y (casos de deriva, C = 0.88)

7. SISTEMA ESTRUCTURAL

El sistema principal está conformado por muros de mampostería reforzada distribuidos en las dos direcciones principales. Los muros se vinculan mediante vigas de amarre y se apoyan sobre zapatas corridas. Las cargas de la cubierta metálica se transfieren por correas a la cercha del eje B y a los muros culata de los ejes A y C, de estos a las vigas y muros, y finalmente a la cimentación y al suelo.

7.1 Muros estructurales

Los segmentos resistentes se identifican mediante etiquetas Pier. Para mantener la trazabilidad con el modelo del módulo de dos aulas se conserva la numeración original: **P1** (eje A), **P2** (eje C), **P4** (eje 1) y **P6** (eje 2). Los Pier P3 y P5 correspondían al aula que no se construye (eje E y tramo C–E del eje 1). Las longitudes de diseño son 7.130 m (P1 y P2), 6.988 m (P4) y 8.380 m (P6). Las aberturas, machones, dinteles y tímpanos deben coincidir exactamente con la arquitectura final.

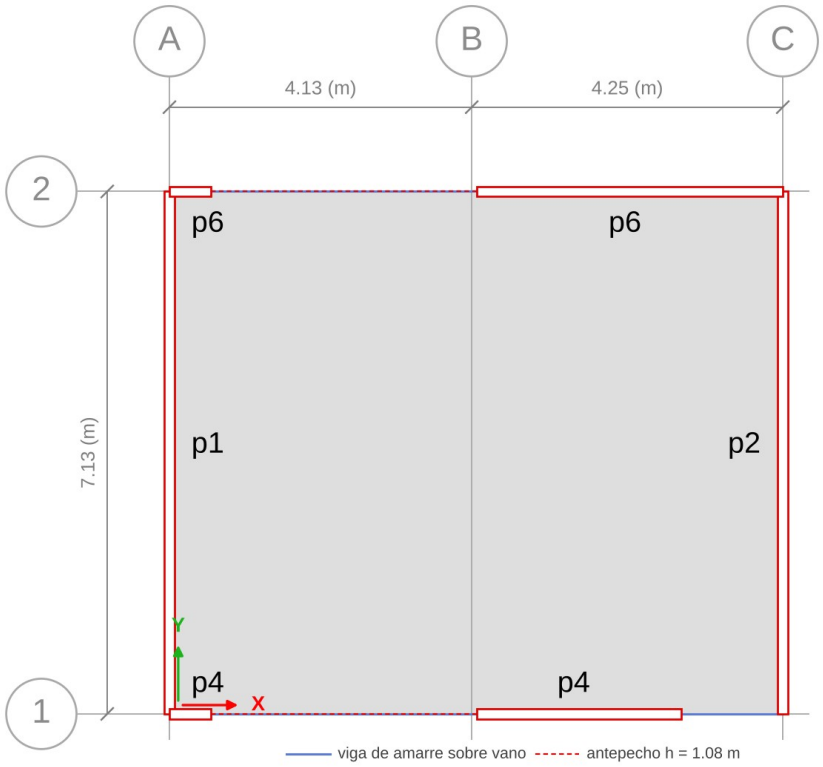


Ilustración 7 Distribución de muros (Piers P1, P2, P4 y P6)

7.2 Cubierta y coronación

La cubierta se resuelve mediante estructura metálica liviana a dos aguas. En el módulo de un aula la cubierta se apoya en una cercha ubicada en el eje B y en los muros culata de los ejes A y C. Las reacciones de presión, succión y peso propio deben distribuirse sobre zonas de mampostería capaces de recibirlas, mediante elementos de coronación diseñados.

7.3 Cimentación

El cimiento corrido de concreto ciclópeo se adopta con geometría trapezoidal, ancho inferior **B = 1.00 m**, ancho superior **b = 0.30 m** y altura **H = 0.60 m**. El ancho superior coincide con el ancho de la viga cinta de concreto reforzado de sección **0.30 × 0.30 m**. Debido a la geometría simétrica del elemento, el desarrollo horizontal de cada cara inclinada es **T = (B − b)/2 = 0.35 m**, correspondiente a una inclinación aproximada de **59.74°** respecto de la horizontal.

El ancho requerido exclusivamente por capacidad portante se obtiene mediante Breq = (N + Wc)/qadm, considerando un metro lineal de cimentación, donde N es la carga lineal transmitida por el muro y Wc el peso propio del cimiento y la viga cinta (10.74 kN/m). Para las cargas obtenidas en los muros P1, P2, P4 y P6 se obtienen anchos teóricos del orden de 0.18 m, muy inferiores al ancho adoptado por criterio constructivo y de distribución; en consecuencia, gobierna el ancho de 1.00 m. Para el muro crítico P1, con una carga de 14.28 kN/m, la presión de contacto resulta q = 25.02 kPa, inferior a la capacidad portante admisible qadm = 142.25 kPa establecida por el estudio geotécnico, por lo cual la dimensión adoptada satisface la verificación geotécnica por capacidad portante con amplio margen.

8. AVALÚO DE CARGAS

8.1 Carga muerta D

Componente	Dato / criterio
Muros de mampostería	Peso propio en el modelo: γ = 17 kN/m³ sobre t = 0.125 m (2.13 kN/m²); cubre el peso equivalente γeq = 15.42 kN/m³, teq = 102.57 mm
Correa / cubierta - peso muerto Corpasoft	12.3458 kg/m² ≈ 0.121 kN/m²
Master 1000, 0.36 mm	0.031 kN/m²
Cerchas, placas y tornillería	52.9 kN por cercha, dividida en 2 reacciones de 26.45 kN (una cercha, eje B)
Cielo raso / instalaciones adicionales / luminarias	0.3 kN/m²
Carga muerta de cubierta asignada al modelo (área CARGA)	1.0 kN/m² sobre 59.75 m² en planta, repartida a los muros perimetrales
Tímpanos (culatas de los ejes A y C)	1.3 kN/m sobre la coronación
Vigas de coronación / dinteles / cimentación	Peso propio según secciones reales

Patrón	Contenido	Total módulo de un aula
PP	Peso propio de muros y vigas de amarre (multiplicador 1.0)	167.33 kN
D	Cubierta 1.0 kN/m², cercha 2 × 26.45 kN, tímpanos 1.3 kN/m	131.19 kN
Live	Carga viva de cubierta 0.50 kN/m²	29.87 kN
PP + D	Peso sísmico (fuente de masa)	298.52 kN

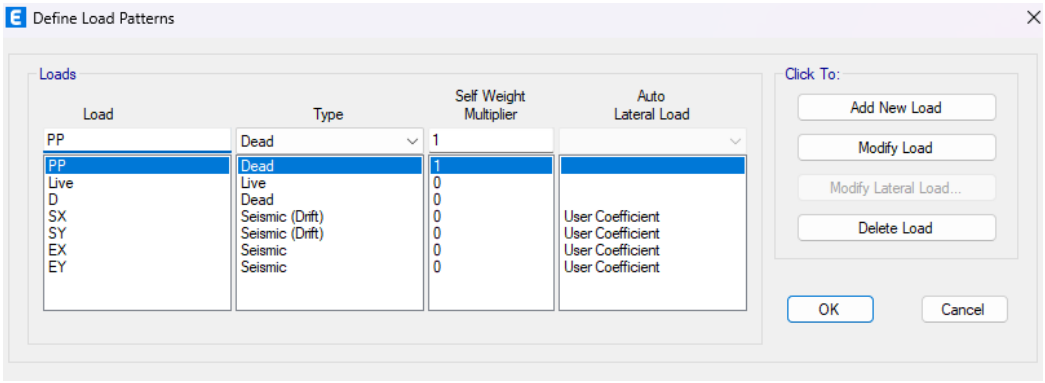


Ilustración 8 Load patterns del modelo

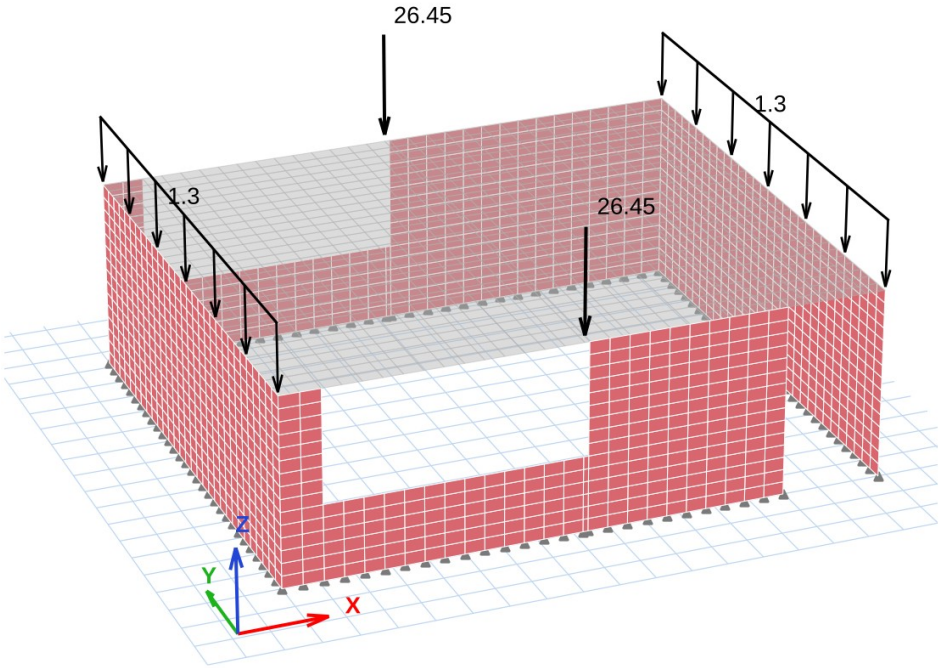


Ilustración 9 Asignación de cargas muertas en el modelo (cercha 26.45 kN; tímpanos 1.3 kN/m)

8.2 Carga viva L / Lr

Zona	Carga de diseño
Cubierta liviana	0.50 kN/m² (50 kg/m²)

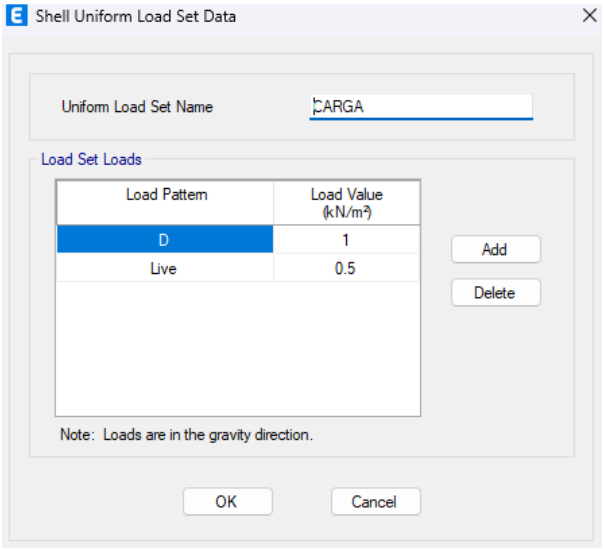


Ilustración 10 Asignación de cargas vivas en el modelo

8.3 Viento W

Parámetro	Valor / estado
Presión usada	+50 kg/m² ≈ +0.490 kPa
Succión usada	-50 kg/m² ≈ -0.490 kPa

Las presiones de viento intervienen en el diseño de correas, cercha y anclajes de cubierta (numeral 13); para los muros gobierna la acción sísmica.

8.4 Acción sísmica E

La acción sísmica se determinó con los parámetros correspondientes al municipio de Florencia, Caquetá, adoptando Aa = 0.20 y Av = 0.15. El estudio geotécnico S025-0726 clasifica el sitio como perfil de suelo tipo C, con Fa = 1.20 y Fv = 1.65, a partir de una velocidad de onda de corte promedio de 393 m/s. El análisis conservó los parámetros de perfil de suelo tipo D, Fa = 1.40 y Fv = 2.20, más exigentes que los del sitio: la aceleración espectral empleada resulta 14.3 % superior a la que corresponde al perfil C, por lo que las solicitaciones sísmicas reportadas en este informe quedan del lado de la seguridad. La edificación se clasifica dentro del Grupo de Uso III, con coeficiente de importancia I = 1.25.

La fuente de masa del modelo está conformada por el peso propio de los elementos modelados y las cargas muertas permanentes adicionales. Para el módulo de un aula se obtiene una masa total de:

M = 30.4406 t

equivalente a un peso sísmico:

W = 298.52 kN

El periodo fundamental del modelo (T = 0.154 s) supera el límite Cu·Ta = 0.140 s, por lo que se adopta T = 0.140 s, ubicado dentro de la zona de aceleración constante del espectro:

Sa(T) = 0.875

Por tanto, el cortante sísmico basal correspondiente al método de la Fuerza Horizontal Equivalente es:

Vs = Sa·W = 0.875 × 298.52 = 261.20 kN

Debido a que se trata de una estructura de un solo nivel, la totalidad del cortante basal se asigna al único nivel sísmico. En consecuencia:

VsX = VsY = 261.20 kN

Para el diseño de los elementos estructurales, los casos EX y EY incorporan el factor I/R = 1.25/2.50 = 0.50 sobre un coeficiente sísmico base C = 0.70, resultando un coeficiente efectivo de diseño de 0.35 (VE = 0.35·W = 104.48 kN). Para el control de derivas los casos SX y SY emplean C = 0.88 (Sa = 0.875 redondeado), sin reducción por R.

Tabla 1 Cálculo de la fuerza horizontal equivalente – módulo de un aula

Parámetro	Valor
Zona de amenaza sísmica (Florencia, Caquetá)	Intermedia
Coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva, Aa	0.20
Coeficiente de velocidad horizontal pico efectiva, Av	0.15
Tipo de perfil de suelo	C
Coeficiente de amplificación Fa / Fv	1.20 / 1.65
Grupo de uso / Coeficiente de importancia I	III / 1.25
Periodo corto TC = 0.48 Av Fv /(Aa Fa)	0.57 s
Periodo largo TL = 2.4 Fv	5.28 s
Valor máximo del espectro Sa,max = 2.5 Aa Fa I	0.875
Periodo aproximado Ta = Ct h^α (Ct = 0.049, α = 0.75, h = 2.70 m)	0.103 s
Coeficiente Cu = 1.75 − 1.2 Av Fv ≥ 1.2	1.354
Periodo máximo permisible Cu·Ta	0.140 s
Periodo fundamental del modelo (modo 1)	0.154 s
Periodo de diseño T = mín(T modelo, Cu·Ta)	0.140 s
Exponente k (T ≤ 0.5 s)	1.00

Parámetro	Valor
Valor del espectro de diseño Sa(T)	0.875
Peso sísmico total W (PP + D)	298.52 kN
Cortante sísmico en la base Vs = Sa·W	261.20 kN
Cortante para derivas (casos SX, SY; C = 0.88)	262.70 kN
Cortante de diseño (casos EX, EY; C = 0.35 = 0.70 × I/R)	104.48 kN

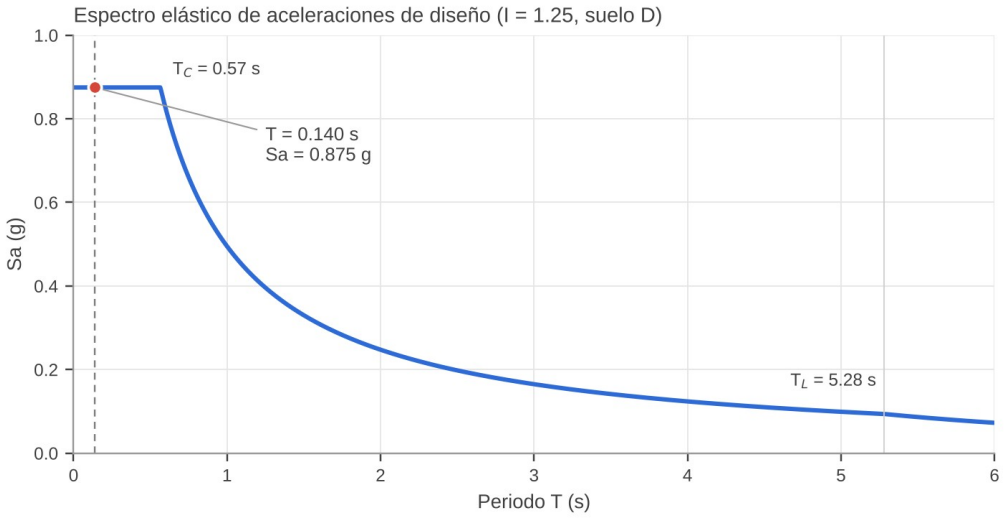


Ilustración 11 Acción sísmica E – espectro de diseño y periodo adoptado

9. MODELACIÓN ESTRUCTURAL

9.1 Modelo estructural

El análisis del módulo de un aula se realizó con un modelo tridimensional de elementos finitos implementado en OpenSees (versión 3.8), construido con la misma idealización del modelo ETABS del proyecto (LA GAITANA mamposteria.edb): materiales, secciones, patrones de carga, fuente de masa y condiciones de apoyo, recortado a la geometría de un aula (ejes A a C). Antes de usarlo, el modelo se calibró reproduciendo el módulo de dos aulas y comparando sus resultados con los del modelo ETABS de la versión 02 (numeral 10.4).

La edificación se representó como un único módulo estructural conformado por un salón de clase, con dimensiones generales de:

8.38 m × 7.13 m

Los muros estructurales tienen una altura efectiva de **2.70 m** y la cubierta alcanza una altura de **3.70 m** en la cumbrera. Las cuchillas o tímpanos triangulares comprendidos entre la coronación de los muros y la cumbrera no fueron modelados explícitamente mediante elementos de área; su peso se incorporó al modelo mediante cargas lineales distribuidas equivalentes de 1.3 kN/m.

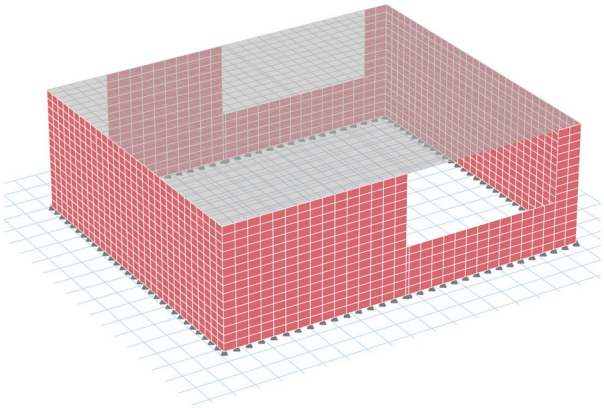


Ilustración 12 Vista tridimensional del modelo.



Ilustración 13 Planta general del modelo (área de carga de cubierta).

9.2 Idealización de los muros de mampostería

Los muros de mampostería se encuentran vinculados en su coronación mediante una viga de amarre continua de concreto reforzado de sección 0.15 × 0.20 m, modelada mediante elementos lineales tipo pórtico (Ec = 4700√f'c = 21,538 MPa) conectados nodalmente a los elementos de área que conforman los muros; la viga es continua también sobre ventanas y puerta. La continuidad entre el refuerzo vertical dispuesto en las celdas inyectadas y la viga de coronación garantiza el amarre superior de los paños y permite la transferencia de las acciones provenientes de la estructura metálica de cubierta.

f'm = 15 MPa

y módulo de elasticidad:

Em = 750 f'm = 11,250 MPa

El espesor nominal de la mampostería es de 0.15 m y para el modelo estructural se adoptó un espesor efectivo de:

t = 0.125 m

Los muros se representaron con elementos de cascarón delgado de cuatro nudos (formulación de placa delgada de Kirchhoff, equivalente a la opción Shell-Thin del modelo ETABS), con la propiedad "Muro 12.5 cm" asociada al material "Mamp 15 MPa".

Elemento	Idealización
Muros estructurales	WALL / SHELL-THIN (cascarón delgado de 4 nudos)
Espesor nominal	0.15 m
Espesor efectivo del modelo	0.125 m
f'm	15 MPa
Em	11,250 MPa
Dinteles – viga de amarre	15 cm x 20 cm
Cubierta metálica	Reacciones / cargas equivalentes provenientes del diseño independiente

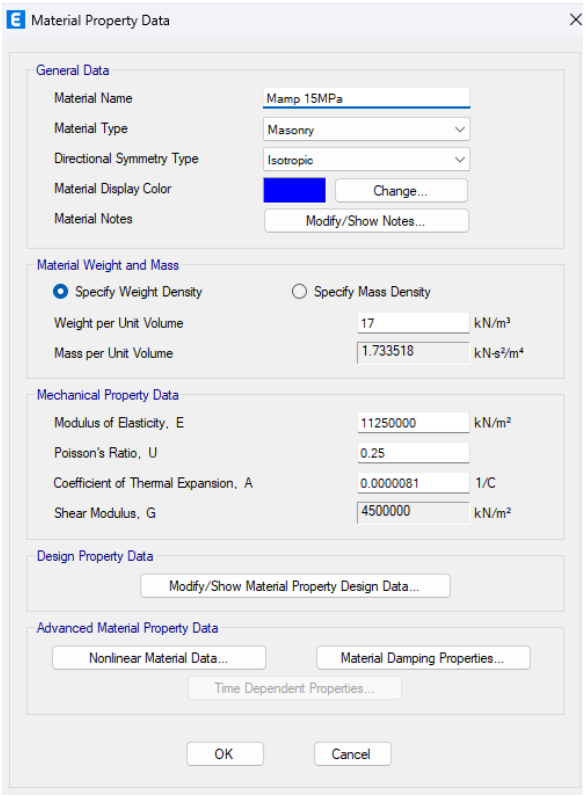


Ilustración 14 Propiedades mecánicas del material de mampostería definido en el modelo.

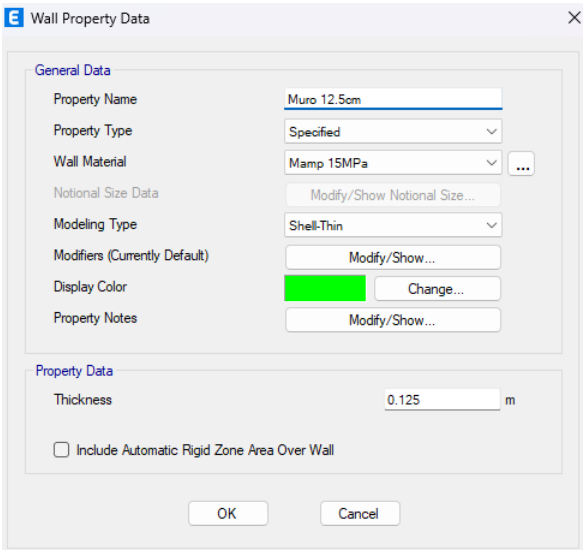


Ilustración 15 Propiedad de sección de muro adoptada en el modelo.

9.3 Discretización y tipificación de muros

Los muros fueron discretizados ajustando la malla a las intersecciones de muros y a la geometría de puertas y ventanas. En las zonas regulares la dimensión característica de los elementos es de aproximadamente:

0.24 m × 0.18 m (muros de los ejes A y C) y 0.28 m × 0.18 m (muros de los ejes 1 y 2)

Las dimensiones varían localmente alrededor de vanos y cambios geométricos para conservar la compatibilidad nodal. El modelo tiene 1503 elementos de muro, 122 elementos de viga de amarre y 930 elementos auxiliares de cubierta.

Los diferentes elementos finitos pertenecientes a cada muro se agruparon mediante etiquetas tipo Pier, definiéndose:

P1, P2, P4, P6

Estas etiquetas permiten obtener, por integración de las fuerzas de los elementos en cada sección, las resultantes:

Pu, Vu, Mu

utilizadas posteriormente en el diseño de cada muro.

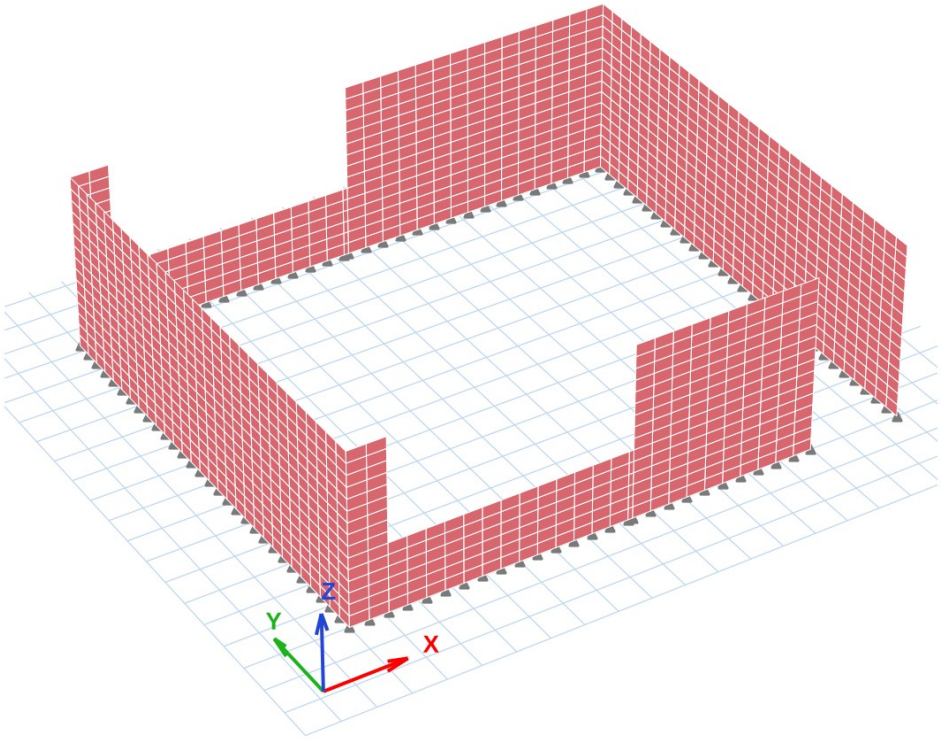


Ilustración 16 Malla de elementos finitos de los muros (vista sin cubierta).

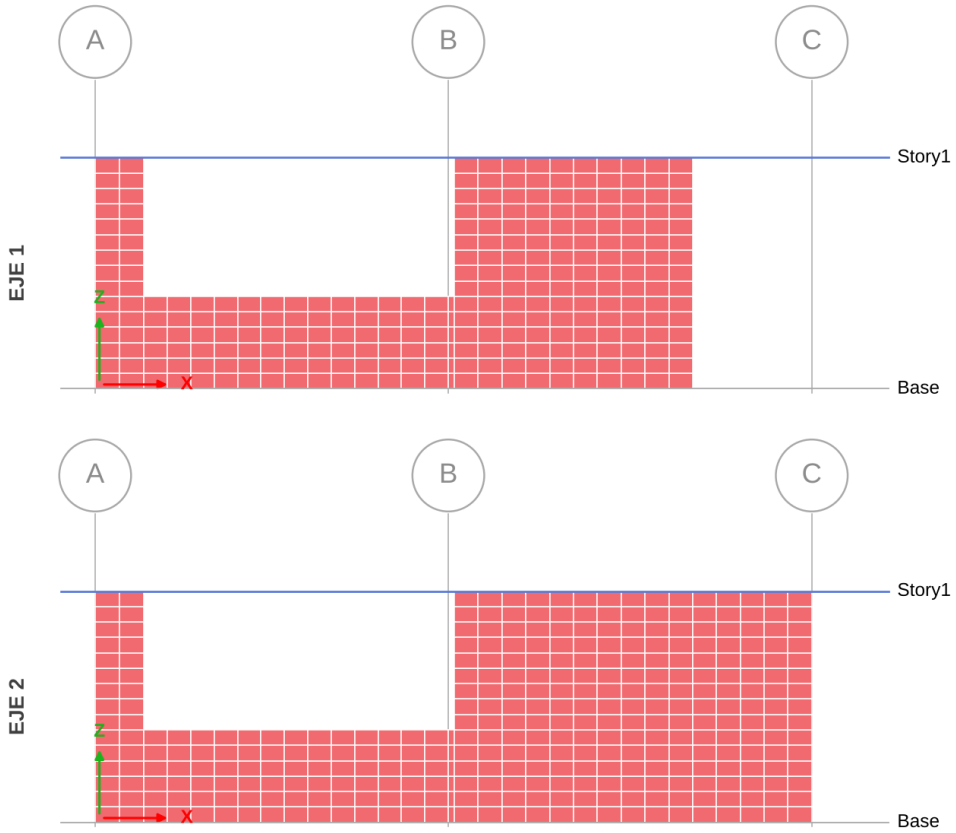


Ilustración 17 Discretización mediante elementos finitos de los muros de mampostería de los ejes 1 y 2.

La figura muestra la malla de elementos tipo SHELL-THIN utilizada para representar los muros estructurales. La discretización se realizó de manera compatible con los bordes de puertas y ventanas, las intersecciones entre muros y los elementos lineales asociados, con el fin de garantizar continuidad nodal y una adecuada transferencia de esfuerzos.

9.4 Condiciones de apoyo y fuente de masa

9.4.1 Condiciones de apoyo

Para el análisis global de la superestructura, los nudos ubicados en la base de los muros estructurales se idealizaron mediante **apoyos empotrados**, restringiendo los seis grados de libertad:

$$UX = UY = UZ = RX = RY = RZ = 0$$

Esta condición representa la continuidad entre los muros de mampostería reforzada, la viga cinta de cimentación y el sistema de cimentación adoptado. El refuerzo vertical dispuesto en las celdas inyectadas de los muros deberá quedar debidamente desarrollado y anclado en la viga de cimentación, garantizando la transferencia de las acciones verticales y horizontales hacia el terreno.

En el modelo global no se incorporó explícitamente la flexibilidad del suelo mediante resortes. Las reacciones obtenidas en la base del modelo se utilizan posteriormente para la verificación independiente del sistema de cimentación de acuerdo con los parámetros del estudio geotécnico.

9.4.2 Fuente de masa

La fuente de masa sísmica del modelo se definió considerando los patrones de carga permanente **PP** y **D**. El patrón **PP** corresponde al peso propio de los elementos estructurales modelados (multiplicador de peso propio 1.00) y el patrón **D** contiene las cargas muertas permanentes adicionales que no se encuentran representadas por el peso propio de los elementos: cargas permanentes de la cubierta metálica, correas, reacciones gravitacionales de la cercha, cielo raso, luminarias, instalaciones y tímpanos (multiplicador 0.00). Por consiguiente:

$$\mathbf{M = PP + D}$$

evitando la duplicación del peso propio de los elementos estructurales. La masa se asigna en las dos direcciones horizontales (masa lateral) en cada nudo de la malla.

Los elementos de área auxiliares empleados para distribuir las cargas de cubierta no representan una losa estructural real. En consecuencia, se les asignó **masa y peso propio nulos** y una **rigidez de membrana reducida**, $E{\cdot}t = 1.0 \times 10^4$ kN/m, del orden de la rigidez a cortante de una cubierta liviana de lámina, con la cual el modelo reproduce la respuesta del modelo ETABS del proyecto (numeral 10.4). Con esta rigidez la cubierta no constituye un diafragma rígido. Las cargas de cubierta se transfieren a los bordes del área mediante distribución en dos direcciones (líneas a 45°).

La masa sísmica total en las direcciones horizontales es:

$$\mathbf{MX = MY = 30.4406\ t}$$

El peso sísmico correspondiente es:

$$\mathbf{W = M{\cdot}g = 30.4406 \times 9.80665 = 298.52\ kN}$$

La igualdad entre las masas en las direcciones X y Y confirma que la misma fuente de masa es utilizada para el análisis sísmico en ambas direcciones principales.

9.5 Análisis Modal

El comportamiento dinámico de la estructura se evaluó mediante un análisis modal con extracción de vectores propios (Eigen) y la fuente de masa definida para el modelo estructural. Se consideró un número suficiente de modos de vibración hasta alcanzar la participación acumulada de masa requerida en las dos direcciones horizontales principales.

El modo 1 (T = 0.154 s) es traslacional en la dirección Y, con 36.02 % de participación de masa, y el modo 3 (T = 0.090 s) es traslacional en la dirección X, con 31.89 %. Los demás modos corresponden principalmente a

deformaciones locales de los paños de mampostería, de los vanos y de la cubierta, consistentes con la idealización adoptada, en la cual la cubierta **no se considera un diafragma rígido**.

Como la masa de los muros está distribuida en todos los nudos de la malla, una fracción importante de ella (la parte inferior de los muros, muy rígida) participa únicamente en modos de muy alta frecuencia. Por esta razón se requieren 150 modos para superar el 90 % de participación en ambas direcciones; el modelo se configuró con 200 modos. En el modo 150:

ΣUX = 90.37 % ΣUY = 91.30 %

y con los 200 modos se alcanza ΣUX = 94.31 % y ΣUY = 95.63 %. Los primeros periodos obtenidos son T1 = 0.154 s, T2 = 0.127 s y T3 = 0.090 s. Dado que el análisis sísmico se realiza por el método de la fuerza horizontal equivalente, el análisis modal se usa para caracterizar la respuesta dinámica y verificar el periodo.

Parámetro	Resultado
Método de extracción modal	Eigen
Fuente de masa	PP + D (masa lateral)
Número máximo de modos considerado	200
Periodo del modo 1	0.154 s
Participación acumulada X en modo 150	90.37 %
Participación acumulada Y en modo 150	91.30 %
Número mínimo de modos requerido para superar 90 % en X e Y	150
Verificación de participación modal	CUMPLE

Tabla 2 Participación de masa modal (modos 1 a 20, modos en que se supera el 90 % y último modo)

Modo	Periodo (s)	UX	UY	ΣUX	ΣUY	RZ	ΣRZ
1	0.1538	0.0000	0.3602	0.0000	0.3602	0.0000	0.0000
2	0.1265	0.0000	0.0001	0.0000	0.3603	0.0000	0.0000
3	0.0901	0.3189	0.0000	0.3190	0.3603	0.0005	0.0005
4	0.0775	0.0000	0.0000	0.3190	0.3603	0.0000	0.0005
5	0.0545	0.0001	0.0101	0.3191	0.3704	0.0969	0.0974
6	0.0512	0.0000	0.0068	0.3191	0.3771	0.0104	0.1079
7	0.0500	0.0020	0.0000	0.3211	0.3772	0.0010	0.1089
8	0.0473	0.0004	0.0078	0.3215	0.3850	0.0036	0.1125
9	0.0422	0.0000	0.0304	0.3215	0.4154	0.0001	0.1126
10	0.0410	0.0000	0.0008	0.3215	0.4162	0.0000	0.1126
11	0.0343	0.1456	0.0000	0.4671	0.4163	0.0088	0.1214
12	0.0327	0.0003	0.0000	0.4674	0.4163	0.0002	0.1216
13	0.0285	0.0660	0.0001	0.5335	0.4164	0.1384	0.2600
14	0.0274	0.0063	0.0003	0.5397	0.4167	0.0001	0.2601
15	0.0271	0.0008	0.0126	0.5406	0.4294	0.0011	0.2612
16	0.0265	0.0156	0.0006	0.5562	0.4300	0.0079	0.2691
17	0.0264	0.0003	0.0011	0.5565	0.4310	0.0049	0.2740
18	0.0260	0.0040	0.0038	0.5605	0.4349	0.0199	0.2940
19	0.0250	0.0010	0.0072	0.5615	0.4421	0.0024	0.2964
20	0.0241	0.0046	0.0000	0.5661	0.4421	0.0002	0.2966
137	0.0037	0.0013	0.0004	0.8968	0.9002	0.0009	0.8602
150	0.0034	0.0047	0.0007	0.9037	0.9130	0.0010	0.8685
200	0.0026	0.0002	0.0000	0.9431	0.9563	0.0000	0.9390

10. ANÁLISIS SISMO RESISTENTE Y VERIFICACIONES GLOBALES

10.1 Método de análisis sísmico y cortante basal

El análisis sísmico de la estructura se realizó mediante el **método de la Fuerza Horizontal Equivalente (FHE)**, considerando independientemente las direcciones principales X e Y de la edificación. Los casos sísmicos de diseño EX y EY se definieron como casos estáticos lineales, con fuerzas inerciales nodales proporcionales a la masa de cada nudo, e incorporan la torsión accidental mediante una excentricidad del 5 %.

El coeficiente sísmico base adoptado en los patrones EX y EY es C = 0.70, correspondiente al espectro calculado con I = 1.0. Para las fuerzas de diseño se aplica un factor I/R = 1.25/2.50 = 0.50, obteniéndose un coeficiente efectivo:

$$\mathbf{CE = 0.70\ (0.50) = 0.35}$$

Con un peso sísmico de:

$$\mathbf{W = 298.52\ kN}$$

el cortante basal elástico de referencia es:

$$\mathbf{Vs = 0.875\ W = 261.20\ kN}$$

mientras que el cortante correspondiente a las fuerzas sísmicas reducidas de diseño es:

$$\mathbf{VE = 0.35\ W = 104.48\ kN}$$

Las fuerzas laterales se escalaron para que la reacción en la base sea exactamente 0.35·W, incluida la fracción de masa asignada a los nudos de apoyo (5.67 kN de peso). La resultante de las fuerzas inerciales se ubica a 2.04 m sobre la base. Las reacciones en la base del modelo para los tres pasos de cada caso (1: sin excentricidad, 2: +e, 3: −e) se presentan en la Tabla 3; momentos respecto al origen de coordenadas (eje A – eje 1).

Tabla 3 Cortante basal del modelo – reacciones en la base, casos EX y EY

Caso	Paso	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kN·m)	MY (kN·m)	MZ (kN·m)
EX	1	-104.48	0.00	0.00	0.00	-212.91	382.30
EX	2	-104.48	0.00	0.00	0.00	-212.65	419.55
EX	3	-104.48	0.00	0.00	0.00	-213.17	345.05
EY	1	0.00	-104.48	0.00	212.91	0.00	-443.12
EY	2	0.00	-104.48	0.00	213.04	0.00	-486.90
EY	3	0.00	-104.48	0.00	212.78	0.00	-399.34

10.2 Regularidad, torsión accidental y efectos direccionales

La configuración estructural fue revisada respecto a las irregularidades en planta y altura aplicables a una edificación de un nivel. Debido a que la edificación presenta un único nivel, varias irregularidades verticales definidas para edificaciones de varios pisos no resultan aplicables; no obstante, se revisan la distribución de rigidez, discontinuidades de los muros, concentración de masa y posibles efectos torsionales en planta.

Como la cubierta no constituye un diafragma rígido, la torsión accidental se representó desplazando el centro de masa ±5 % de la dimensión perpendicular a la dirección de análisis (±0.357 m para EX, sobre yCM = 3.659 m; ±0.419 m para EY, sobre xCM = 4.241 m), mediante una variación lineal de las fuerzas inerciales nodales que conserva el cortante total. Su efecto se aprecia en el momento torsor MZ de las reacciones (Tabla 3), y las combinaciones de diseño incluyen los tres pasos de cada caso.

10.3 Verificación de derivas

La verificación de desplazamientos laterales se realizó mediante los casos sísmicos **SX** y **SY**, definidos específicamente para el control de derivas, utilizando el coeficiente sísmico correspondiente sin reducción por el coeficiente de capacidad de disipación de energía R, e incluyendo los mismos tres pasos de excentricidad.

La estructura corresponde a una edificación de **un solo nivel**, con altura estructural aproximada de:

h = 2.70 m

De acuerdo con los resultados obtenidos, las máximas relaciones de deriva son:

ΔX = 0.000954 = 0.0954 %

para la dirección X, y:

ΔY = 0.002237 = 0.2237 %

para la dirección Y. Ambos valores corresponden al máximo desplazamiento de cualquier nudo de la coronación: en X se presenta en la mitad del muro del eje A (flexión fuera de su plano) y en Y en la viga de amarre del eje 1, en el eje B, sobre el vano de la ventana y en el apoyo de la cercha (desplazamiento fuera del plano del eje 1). El desplazamiento de los muros en su propio plano es menor.

Los desplazamientos relativos equivalentes son aproximadamente:

δX = (0.000954)(2.70) ≈ 2.58 mm CUMPLE
δY = (0.002237)(2.70) ≈ 6.04 mm CUMPLE

El numeral A.6.4.1.5 de la NSR-10 establece que **no se imponen límites de deriva a edificaciones de un piso**, siempre que los muros, particiones interiores y exteriores y los cielorrasos sean diseñados y detallados para acomodar las deformaciones correspondientes.

No obstante, como control adicional de comportamiento, las derivas obtenidas son inferiores incluso al límite más restrictivo de 0.005hp establecido por la NSR-10 para ciertos sistemas de mampostería gobernados por cortante, por lo que los desplazamientos laterales obtenidos son reducidos. En consecuencia, el comportamiento global de la estructura frente a desplazamientos laterales se considera satisfactorio, debiéndose garantizar constructivamente que los elementos no estructurales, acabados, cielorrasos y conexiones de cubierta sean capaces de acomodar los desplazamientos calculados.

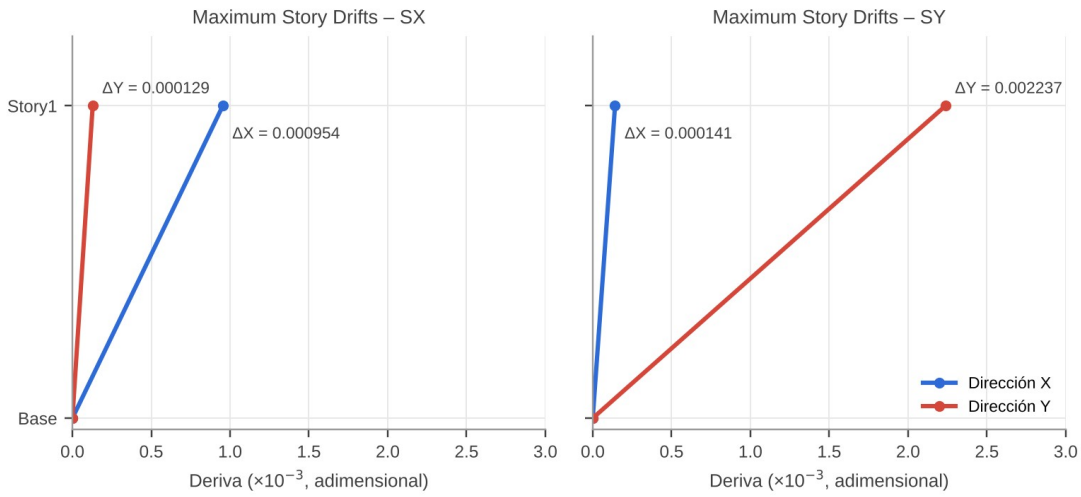


Ilustración 18 Story Drifts para SX y SY

10.4 Verificaciones globales del modelo

Como control global del modelo se verificaron la participación modal, el equilibrio de fuerzas (la suma de reacciones verticales iguala las cargas aplicadas en cada patrón), las condiciones de apoyo, la fuente de masa, la estabilidad general y la compatibilidad entre la idealización estructural y el sistema construido.

Adicionalmente, el mismo modelo se construyó con la geometría completa de dos aulas y se comparó con los resultados del modelo ETABS de la versión 02, aplicando las cargas de la misma forma que en ese modelo (Tabla 4). El peso sísmico y el cortante basal coinciden (diferencias menores de 0.1 %), las cargas axiales en los muros

difieren menos de 4 % y los cortantes y momentos de los Pier P2 a P6 difieren entre −9 % y +16 %. La diferencia en P1 obedece a que en el modelo original los muros P1 y P3, simétricos, presentan solicitaciones distintas (Vu = 10.15 kN y 37.93 kN), mientras que el modelo de verificación da valores simétricos. Con esta concordancia el modelo se considera representativo de la idealización del proyecto y se usa para el módulo de un aula.

Tabla 4 Calibración: modelo ETABS v02 (dos aulas) frente al modelo de elementos finitos con la misma geometría

Parámetro	ETABS v02	Modelo FE	Diferencia
Peso sísmico W (kN)	539.73	539.80	0.0 %
Cortante basal EX (kN)	185.42	185.44	0.0 %
Deriva máxima X (SX)	0.000961	0.000916	-4.7 %
Deriva máxima Y (SY)	0.001834	0.002192	+19.5 %
P1 – Pu máx. (kN)	109.40	112.65	+3 %
P1 – Vu máx. (kN)	10.15	40.48	+299 %
P1 – Mu máx. (kN·m)	35.40	63.37	+79 %
P2 – Pu máx. (kN)	125.28	123.73	-1 %
P2 – Vu máx. (kN)	69.68	67.72	-3 %
P2 – Mu máx. (kN·m)	127.31	121.99	-4 %
P3 – Pu máx. (kN)	121.91	118.20	-3 %
P3 – Vu máx. (kN)	37.93	40.53	+7 %
P3 – Mu máx. (kN·m)	59.17	64.64	+9 %
P4 – Pu máx. (kN)	98.61	98.35	0 %
P4 – Vu máx. (kN)	40.18	46.76	+16 %
P4 – Mu máx. (kN·m)	182.33	166.52	-9 %
P5 – Pu máx. (kN)	95.49	95.25	0 %
P5 – Vu máx. (kN)	43.65	43.91	+1 %
P5 – Mu máx. (kN·m)	169.79	164.31	-3 %
P6 – Pu máx. (kN)	232.36	231.29	0 %
P6 – Vu máx. (kN)	81.29	82.15	+1 %
P6 – Mu máx. (kN·m)	121.55	121.76	0 %

11. DISEÑO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADA

11.1 Propiedades y criterios de diseño

Los muros estructurales P1, P2, P4 y P6 se diseñan como mampostería reforzada con capacidad moderada de disipación de energía (DMO), utilizando las solicitaciones obtenidas del modelo estructural del módulo de un aula. Para el diseño se adoptan:

Parámetro	Valor
f′m	15 MPa
Em	11,250 MPa
fy	420 MPa
Es	200,000 MPa
Altura libre de diseño h′	2,700 mm
Espesor tw	125 mm

Las celdas que contienen el refuerzo vertical y aquellas adicionales requeridas por resistencia, anclajes o concentración de cargas se inyectarán con mortero de relleno de resistencia especificada de 21 MPa.

11.2 Tipificación y solicitaciones de diseño de los muros

Los muros estructurales de mampostería fueron agrupados en el modelo mediante etiquetas tipo **Pier**, de manera que los esfuerzos correspondientes a los diferentes elementos finitos que conforman cada paño se integren y puedan ser utilizados directamente para su diseño. De acuerdo con la distribución estructural en planta, se definieron cuatro muros resistentes principales:

P1, P2, P4, P6

Los Piers **P1 y P2** corresponden a los muros orientados en la dirección "Y" (ejes A y C), mientras que **P4 y P6** corresponden al sistema resistente en la dirección perpendicular "X" (ejes 1 y 2). La identificación adoptada permite relacionar directamente cada muro del modelo con las verificaciones posteriores de carga axial, flexo-compresión y cortante. Las longitudes asociadas a la tipificación utilizada en la hoja de diseño son:

Pier	Eje	Longitud Lw
P1	A	7.130 m
P2	C	7.130 m
P4	1	6.988 m
P6	2	8.380 m

Solicitaciones obtenidas del modelo

Las fuerzas internas se obtuvieron por integración de las fuerzas de los elementos de cada Pier, evaluando las resultantes en la base de cada muro, dado que esta sección representa la zona de mayor interés para las verificaciones de carga axial, cortante y flexión. Para la convención local adoptada se utilizarán:

P = Pu V2 = Vu M3 = Mu

Las combinaciones de resistencia consideradas (NSR-10, B.2.4), con D = PP + D y L = carga viva de cubierta, son: RU1 = 1.4D; RU2 = 1.2D + 1.6L; RU4.1 a RU4.4 = 1.2D + 1.0L ± EX / ± EY; RU5.1 a RU5.4 = 0.9D ± EX / ± EY. Cada combinación sísmica se evalúa con los tres pasos de excentricidad. A partir de la envolvente de estas combinaciones se obtienen los siguientes valores máximos absolutos en la base:

Tabla solicitaciones envolvente

Pier	Pu máx. compresión	Vu máx.	Mu máx.
P1	114.88 kN	46.39 kN	71.32 kN·m
P2	94.13 kN	48.22 kN	103.94 kN·m
P4	98.60 kN	46.11 kN	162.29 kN·m
P6	117.67 kN	49.05 kN	114.97 kN·m

Los valores anteriores corresponden a envolventes máximas utilizadas para identificar las solicitaciones críticas. Para la verificación a flexo-compresión no se combinará el máximo Pu con el máximo Mu cuando provengan de diferentes combinaciones de carga. La resistencia flexional de cada Pier se evalúa utilizando el par concurrente Pu−Mu correspondiente a la combinación que produce la condición crítica, conservando simultáneamente la carga axial de la misma combinación; la verificación a carga axial usa el Pu máximo de la envolvente.

La mayor demanda flexional corresponde al Pier P4, con Mu = 162.29 kN·m. El Pier P1 presenta la mayor carga axial concurrente, con Pu = 101.82 kN, y el Pier P6 la mayor carga axial de la envolvente, con Pu = 117.67 kN. Estos valores se utilizan en las verificaciones desarrolladas posteriormente.

Tabla definitiva de pares Pu−Mu concurrentes

Pier	Combinación crítica	Ubicación	Pu concurrente (kN)	Mu (kN·m)
P1	RU4.4	Bottom	101.82	71.32
P2	RU4.4	Bottom	89.37	103.94
P4	RU4.1	Bottom	98.60	162.29
P6	RU4.1	Bottom	100.94	114.97

Tabla 5 Fuerzas internas envolventes obtenidas en los Piers P1, P2, P4 y P6 (Story1, ENV)

Pier	Ubicación	Envolvente	P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kN·m)	M2 (kN·m)	M3 (kN·m)
P1	Top	Max	-21.36	29.29	3.59	1.17	0.12	5.76
P1	Top	Min	-38.11	-29.21	-0.63	-1.34	-0.32	-5.57
P1	Bottom	Max	-56.40	46.39	8.78	2.16	7.50	71.32
P1	Bottom	Min	-114.88	-46.28	-9.92	-2.14	-8.28	-67.95
P2	Top	Max	-24.94	30.95	2.51	3.71	0.26	7.12
P2	Top	Min	-44.99	-31.05	-2.79	-3.17	-0.26	-0.20
P2	Bottom	Max	-45.01	47.65	10.48	2.33	8.32	103.94
P2	Bottom	Min	-94.13	-48.22	-10.38	-3.05	-8.60	-67.70
P4	Top	Max	-45.39	33.08	0.22	3.55	0.49	-29.86
P4	Top	Min	-76.22	-34.35	-0.46	-2.35	-0.56	-56.73
P4	Bottom	Max	-54.98	46.11	8.83	5.05	8.88	162.29
P4	Bottom	Min	-98.60	-45.36	-9.37	-3.25	-8.75	-18.67
P6	Top	Max	-45.71	32.50	0.53	3.50	0.45	-67.27
P6	Top	Min	-77.84	-33.92	-0.27	-5.05	-0.35	-119.55
P6	Bottom	Max	-63.20	49.05	11.70	4.93	9.87	114.97
P6	Bottom	Min	-117.67	-48.76	-10.71	-5.22	-10.12	15.41

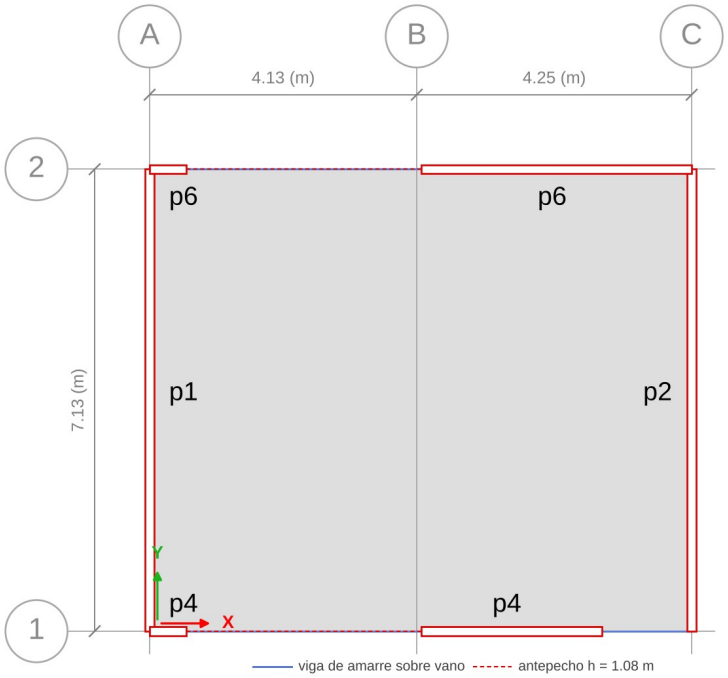


Ilustración 19 Tipificación e identificación de los muros estructurales P1, P2, P4 y P6.

11.3 Verificación a carga axial y esbeltez

La verificación a carga axial de los muros estructurales se realiza considerando las propiedades geométricas y mecánicas de la mampostería reforzada, las condiciones reales de apoyo lateral y las solicitaciones obtenidas del modelo estructural.

Para cada muro se verifica la relación de esbeltez, definida a partir de la altura efectiva y el espesor efectivo del elemento. La altura efectiva utilizada debe ser consistente con las condiciones de restricción existentes en la base y en la coronación del muro, teniendo en cuenta la continuidad proporcionada por la cimentación y la viga de amarre superior. La resistencia axial se determina considerando el área efectiva de mampostería, el refuerzo vertical dispuesto en las celdas inyectadas, la resistencia especificada de la mampostería f'm, la resistencia del acero fy y la reducción de capacidad correspondiente a la esbeltez del muro.

Para la aceptación de cada Pier deberán verificarse, como mínimo, los siguientes aspectos:

- que la relación entre la altura efectiva y el espesor efectivo se encuentre dentro de los límites reglamentarios aplicables;
- que la altura efectiva adoptada sea coherente con las condiciones reales de apoyo lateral del muro;
- que el área efectiva resistente corresponda a la geometría real del paño, considerando la presencia de vanos y la disposición de las celdas inyectadas;
- que el refuerzo vertical considerado en la capacidad axial coincida con el refuerzo efectivamente especificado en planos;
- que se incorpore en la resistencia la reducción asociada a los efectos de esbeltez;
- que la resistencia axial de diseño del muro sea superior a la solicitación axial última obtenida del modelo:

$$\mathbf{Pu \leq \varphi Pn}$$

- y que el resultado sea posteriormente compatible con la verificación combinada de flexo-compresión, dado que la carga axial actúa simultáneamente con los momentos producidos por las acciones laterales.

Los resultados numéricos de estas verificaciones se presentan en la tabla integral de diseño (numeral 11.8). La aceptación de la resistencia axial no exime de las verificaciones de flexo-compresión, cortante, cuantías mínimas de refuerzo y detalle de celdas inyectadas, las cuales deben cumplirse simultáneamente para definir el refuerzo final de cada muro.

11.4 Verificación Flexo-compresión

La verificación a flexo-compresión se realiza considerando la acción simultánea de la **fuerza axial Pu** y del **momento flector Mu** obtenidos del modelo estructural. Para cada Pier se utiliza el par concurrente Pu−Mu correspondiente a una misma combinación de carga, evitando asociar artificialmente el máximo axial de una combinación con el máximo momento proveniente de otra. En la verificación se consideran la geometría efectiva del muro, la resistencia especificada de la mampostería, el refuerzo vertical dispuesto en las celdas inyectadas, la resistencia del acero y los factores de reducción de resistencia correspondientes.

Para la aceptación de cada muro deberán comprobarse, como mínimo, los siguientes aspectos:

- que el Pu y el Mu utilizados correspondan a la **misma combinación crítica**;
- que el área de refuerzo vertical considerada en el cálculo coincida con el refuerzo especificado en planos;
- que la distribución del refuerzo vertical sea compatible con la modulación de las unidades y con las celdas disponibles para inyección;
- que se consideren adecuadamente las barras concentradas en extremos cuando sean requeridas;
- que la resistencia flexional disponible se determine para la carga axial concurrente correspondiente;
- y que se satisfaga la condición general:

$$Mu \leq \varphi Mn \text{ para el } Pu \text{ concurrente}$$

En el Pier P6 la sección superior (machón de esquina y tramo continuo de 4.18 m entre x = 4.20 m y el eje C) presenta un momento de 119.55 kN·m, ligeramente mayor que el de la base, por el efecto de la reacción de la cercha en el borde del tramo. Con el refuerzo que corresponde a ese tramo (10 #3, 710 mm²) y la menor compresión

concurrente (45.71 kN), la capacidad es φMn = 580.4 kN·m (relación 0.206), por lo que la sección superior también cumple.

Los resultados de la verificación de flexo-compresión se presentan en la tabla integral de diseño incluida al final del presente capítulo.

11.5 Verificación Cortante

La resistencia a cortante de los muros se verifica empleando las solicitaciones Vu obtenidas del modelo estructural para las combinaciones de resistencia. La capacidad se evalúa con la contribución resistente de la mampostería, Vm, que incluye el efecto favorable de la carga axial concurrente (0.25 Pu); el aporte del **refuerzo horizontal** se omite en la capacidad, del lado de la seguridad, aunque se dispone el refuerzo horizontal mínimo, compatible con la modulación de las unidades, las juntas de pega y la solución constructiva especificada.

Para cada muro deberán verificarse, como mínimo:

- que el cortante de diseño corresponda a la solicitación crítica obtenida del modelo;
- que la resistencia disponible de la mampostería sea determinada con las propiedades efectivamente especificadas para el proyecto;
- que el refuerzo horizontal satisfaga las cuantías mínimas aplicables;
- que el espaciamiento del refuerzo horizontal sea compatible con la altura modular de las unidades;
- que el refuerzo pueda desarrollarse y anclarse adecuadamente en los extremos e intersecciones de los muros;
- que las zonas próximas a vanos, cambios de sección y concentraciones de carga sean debidamente detalladas;
- y que se satisfaga:

$$\mathbf{Vu \leq \varphi Vn}$$

Los resultados numéricos se presentan conjuntamente en la tabla integral de diseño de muros.

11.6 Celdas inyectadas y refuerzo

El refuerzo vertical y horizontal de los muros se define a partir de las solicitaciones de diseño y de las **cuantías mínimas aplicables al sistema de mampostería reforzada DMO**. El refuerzo finalmente especificado deberá satisfacer simultáneamente los requerimientos mínimos y las áreas de acero obtenidas de las verificaciones a flexo-compresión y cortante.

Para cada Pier deberá comprobarse que:

- el área de **refuerzo vertical suministrado** sea igual o superior al mínimo requerido y al necesario por resistencia;
- la separación de las barras verticales sea compatible con la modulación y ubicación de las celdas de las unidades de mampostería;
- el refuerzo horizontal cumpla la cuantía mínima correspondiente y su separación sea compatible con las juntas, hiladas y solución constructiva utilizada;
- las barras verticales presenten continuidad desde la cimentación hasta la viga de coronación, mediante longitudes de desarrollo, empalmes y anclajes adecuados;
- el refuerzo horizontal se encuentre debidamente anclado en extremos, intersecciones y encuentros entre muros;
- se disponga refuerzo adicional cuando sea requerido en bordes de aberturas, apoyos de dinteles, intersecciones o zonas de concentración de esfuerzos.

Las **celdas que contienen refuerzo vertical deberán ser inyectadas con mortero de relleno**, al igual que aquellas celdas adicionales que resulten necesarias por resistencia, anclaje, bordes de muros, proximidad de vanos o concentración de cargas. Para el presente proyecto se adopta una resistencia especificada del mortero de relleno de:

$$\mathbf{f'cr = 21\ MPa}$$

La distribución final de celdas inyectadas deberá quedar expresamente representada en los **planos estructurales**, evitando que la disposición constructiva dependa únicamente de la interpretación en obra. En dichos planos se deberán identificar, como mínimo, las barras verticales, las celdas rellenas, los empalmes, la continuidad hacia la cimentación y la conexión con la viga de coronación.

Criterio de aceptación

Para cada muro deberá cumplirse:

$$A_{sv,\,suministrado} \geq A_{sv,\,requerido} \quad y \quad A_{sh,\,suministrado} \geq A_{sh,\,requerido}$$

manteniendo adicionalmente los límites reglamentarios de separación y disposición del refuerzo. Los resultados numéricos de cuantías, áreas de acero, número de barras y separación del refuerzo se presentan en la **tabla integral de diseño de muros** incluida en el numeral 11.8.

11.7 Elementos de borde y zonas críticas

La necesidad de elementos de borde en los muros de mampostería reforzada se verifica a partir del esfuerzo máximo de compresión desarrollado en sus extremos, considerando las combinaciones mayoradas de diseño. Para el proyecto se adopta como límite de control:

$$\sigma_b \leq 0.20\, f'_m = 0.20 \times 15\ \text{MPa} = 3.00\ \text{MPa}$$

Cuando $\sigma_b \leq 3.00$ MPa se considera que **no se requiere elemento de borde especial por este criterio**. Complementariamente se verifica que la profundidad del eje neutro cumpla $c/L_w \leq 1/(600\,\delta_u/h_w)$, con δ_u/h_w no menor que 0.0035. En caso contrario, deberá realizarse el detallado correspondiente conforme a las disposiciones aplicables del Título D de la NSR-10, que remite a los requisitos específicos de D.5.8.5 cuando resultan necesarios.

11.8 Tabla integral de verificación y diseño de muros

En las tablas siguientes se consolidan las verificaciones realizadas para los muros estructurales P1, P2, P4 y P6, incluyendo geometría, solicitaciones de diseño, carga axial y esbeltez, flexo-compresión, cortante, cuantías de refuerzo vertical y horizontal y elementos de borde. Se aplica el mismo procedimiento de la hoja de diseño del proyecto (Diseño_Mamp LA GAITANA.xlsx), con las expresiones:

- Carga axial: $\varphi P_n = 0.60 \times 0.80\, P_o\, R_e$, con $P_o = 0.80\, f'_m\,(A_e - A_{sV}) + f_y\, A_{sV}$ y $R_e = 1 - (h'/42t)^2$.
- Flexo-compresión (Cárdenas–Magura): $c/L_w = (\omega + \alpha)/(2\omega + 0.85\beta_1)$, con $\omega = \rho_V f_y/f'_m$, $\alpha = P_u/(\varphi\, L_w\, t_w\, f'_m)$, $\beta_1 = 0.85$; $\varphi M_n = \varphi \cdot 0.5 \cdot A_{sV} \cdot f_y \cdot L_w \cdot (1 + P_u/(\varphi\, A_{sV}\, f_y)) \cdot (1 - c/L_w)$; $\varphi = 0.85 - 2P_u/(f'_m \cdot A_{e,n})$, con $A_{e,n} = 89\ \text{mm} \cdot L_w$ (área neta de mampostería, numeral 5.2).
- Cortante: $\varphi V_n = 0.60\, V_m$, con $V_m = C_d\, A_{mv} \sqrt{f'_m} + 0.25\, P_u$, $C_d = 0.30$ para $M_u/(V_u\, d) \leq 0.25$ y $C_d = 0.20$ para $M_u/(V_u\, d) \geq 1.00$ (interpolación lineal); el aporte del refuerzo horizontal (V_s) no se incluye.
- Cuantías: $\rho_H \geq 0.0007$; $\rho_V \geq 0.0013$ ($\rho_H + \rho_V \geq 0.002$), barras #3 (71 mm²).

Tabla 6 Cuadro integral 1 – geometría, solicitaciones y refuerzo de los muros P1, P2, P4 y P6

Concepto	Unidad	P1	P2	P4	P6
Eje / dirección	—	A / Y	C / Y	1 / X	2 / X
Combinación crítica (flexión)	—	RU4.4	RU4.4	RU4.1	RU4.1
Pu máx. (axial)	kN	114.9	94.1	98.6	117.7
Pu concurrente (flexión)	kN	101.8	89.4	98.6	100.9
Vu	kN	46.4	48.2	46.1	49.0
Mu	kN·m	71.3	103.9	162.3	115.0
δu	mm	6.04	6.04	2.58	2.58
Lw	mm	7,130	7,130	6,988	8,380
h'	mm	2,700	2,700	2,700	2,700
tw = b = bv	mm	125	125	125	125
d = 0.9 Lw	mm	6,417	6,417	6,289	7,542
Ae = tw·Lw	mm²	891,250	891,250	873,500	1,047,500

Concepto	Unidad	P1	P2	P4	P6
ρH,min	—	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
AsH,min	mm²/m	87.5	87.5	87.5	87.5
Refuerzo horizontal (escalerilla)	—	2Ø4.5 c/240	2Ø4.5 c/240	2Ø4.5 c/240	2Ø4.5 c/240
AsH	mm²/m	132.5	132.5	132.5	132.5
ρH	—	0.00106	0.00106	0.00106	0.00106
ρV,min	—	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013
AsV,min = ρV,min·tw·Lw	mm²	1,159	1,159	1,136	1,362
Refuerzo vertical	—	17 #3	17 #3	16 #3	20 #3
AsV	mm²	1,207	1,207	1,136	1,420
ρV	—	0.00135	0.00135	0.00130	0.00136
ab = 0.5 d	mm	3,208	3,208	3,145	3,771
PLim = 0.09 f'm Ae	kN	1,203	1,203	1,179	1,414

Tabla 7 Cuadro integral 2 – verificación de los muros P1, P2, P4 y P6

Verificación	Unidad	P1	P2	P4	P6
Re = 1 − (h'/42t)²	—	0.736	0.736	0.736	0.736
Po = 0.80 f'm (Ae − AsV) + fy AsV	kN	11,187	11,187	10,945	13,149
φPn = 0.60 × 0.80 Po Re	kN	3,950	3,950	3,864	4,642
Pu máx. / φPn	—	0.029	0.024	0.026	0.025
Verificación carga axial	—	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.
φ flexo-compresión	—	0.829	0.831	0.829	0.832
c / Lw	—	0.059	0.058	0.057	0.057
φMn	kN·m	1,751	1,716	1,628	2,359
Mu / φMn	—	0.041	0.061	0.100	0.049
Verificación flexo-compresión	—	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.
Mu / (Vu d)	—	0.240	0.336	0.560	0.311
Cd	—	0.300	0.289	0.259	0.292
Amv = tw·Lw	mm²	891,250	891,250	873,500	1,047,500
Vm = Cd Amv √f'm + 0.25 Pu	kN	1,061.0	1,018.4	899.9	1,209.4
φVn = 0.60 Vm	kN	636.6	611.0	539.9	725.7
Vu / φVn	—	0.073	0.079	0.085	0.068
Verificación cortante	—	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.
σb = Pu/Ae + 6Mu/(tw Lw²)	MPa	0.18	0.20	0.27	0.17
Límite 0.20 f'm	MPa	3.00	3.00	3.00	3.00
δu/hw (≥ 0.0035)	—	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035
Límite c/Lw = 1/(600 δu/hw)	—	0.476	0.476	0.476	0.476
Elementos de borde especiales	—	No requeridos	No requeridos	No requeridos	No requeridos

12. DISEÑO DE CIMENTACIÓN

La cimentación de los muros estructurales se resuelve mediante un cimiento corrido de concreto ciclópeo de sección trapezoidal, complementado en su parte superior con una viga cinta de concreto reforzado, encargada del amarre de la cimentación y del anclaje del refuerzo vertical de los muros.

Tabla 8 Cuadro integral de diseño de cimentación

Muro	Carga N (kN/m)	Wc (kN/m)	qadm (kPa)	B req. (m)	B (m)	b (m)	T (m)	H (m)	Ángulo (°)	q act (kPa)	q máx. D+L+0.7E (kPa)	Cumple
P1	14.28	10.74	142.25	0.176	1.00	0.30	0.35	0.60	59.74	25.02	28.77	O.K.
P2	12.53	10.74	142.25	0.164	1.00	0.30	0.35	0.60	59.74	23.27	29.44	O.K.
P4	14.11	10.74	142.25	0.175	1.00	0.30	0.35	0.60	59.74	24.85	37.32	O.K.
P6	12.05	10.74	142.25	0.160	1.00	0.30	0.35	0.60	59.74	22.79	29.34	O.K.

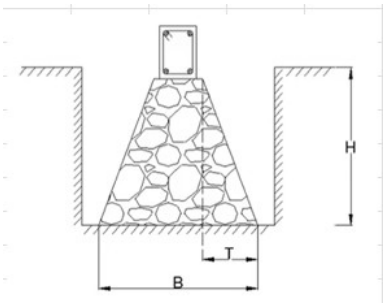


Ilustración 20 Sección típica del cimiento corrido de concreto ciclópeo con viga cinta.

12.1 Criterios de diseño

El dimensionamiento se realiza con base en las cargas lineales transmitidas por los muros y la capacidad portante admisible establecida para el terreno:

$$q_{adm} = 142.25 \text{ kPa}$$

Para cada tramo de cimentación se verifica que la presión actuante sea inferior a la capacidad admisible:

$$q_{act} = (N + W_c)/B \leq q_{adm}$$

donde N corresponde a la carga lineal transmitida por el muro (se toma, del lado de la seguridad, la carga mayorada concurrente Pu/Lw, como en la versión 02), Wc al peso propio del cimiento ciclópeo y la viga cinta (0.390 m² × 22 kN/m³ + 0.09 m² × 24 kN/m³ = 10.74 kN/m) y B al ancho de cimentación adoptado. Como control adicional, se verificó la presión máxima en el extremo de cada muro para la combinación de servicio D + L + 0.7E, qmáx = (N + Wc)/B + 6M/(B Lw²), cuyo valor máximo es 37.32 kPa, también inferior a qadm.

12.2 Geometría adoptada

Aunque el ancho requerido por capacidad portante es inferior a 0.25 m, se adopta conservadoramente y de acuerdo con el criterio geotécnico un ancho de B = 1.00 m. La sección típica del cimiento corrido queda definida por:

$$B = 1.00 \text{ m}; \quad b = 0.30 \text{ m}; \quad T = 0.35 \text{ m}; \quad H = 0.60 \text{ m}$$

con una inclinación lateral aproximada de 59.74°. Sobre el cimiento ciclópeo se dispone la viga cinta de concreto reforzado correspondiente.

12.3 Conclusión

De acuerdo con las cargas transmitidas por los muros P1, P2, P4 y P6 y las condiciones establecidas por el estudio geotécnico, se adopta un cimiento corrido de concreto ciclópeo de 1.00 m de ancho inferior, 0.30 m de ancho superior y 0.60 m de altura. Las presiones actuantes obtenidas son inferiores a la capacidad portante admisible del terreno, verificándose satisfactoriamente la condición qact < qadm. La ejecución deberá garantizar el apoyo sobre terreno competente, el adecuado manejo de aguas y la continuidad de la viga cinta y de los arranques del refuerzo vertical de los muros.

13. DISEÑO DE CUBIERTA METÁLICA

13.1 Geometría y cargas de la memoria de correas

Parámetro	Valor
Sistema	Cubierta metálica liviana a dos aguas
Pendiente	17.6 %
Correas	Sección cajón 2P-150-16
Separación entre correas	1.55 m
Luz principal de correa	4.25 m
Voladizo mostrado	0.55 m
Tensores	Sin tensores
Teja	Arquitectónica, 4.32 kg/m²
Luminarias	4 kg/m²
Carga viva de cubierta	50 kg/m²
Viento presión / succión	+50 / -50 kg/m²
Granizo	0 kg/m²

En el módulo de un aula las correas conservan la separación, las cargas y las luces del proyecto original (tramos A–B de 4.13 m y B–C de 4.25 m, con voladizo de 0.55 m sobre las culatas), por lo que la verificación de la memoria de correas sigue siendo aplicable.

13.2 Verificación de correa 2P-150-16

Concepto	Demanda / dato	Capacidad / límite	Resultado
Mux	458 kg·m ≈ 4.49 kN·m	φMnx = 993.46 kg·m ≈ 9.74 kN·m	Cumple
Muy	58 kg·m ≈ 0.57 kN·m	φMny = 459.8 kg·m ≈ 4.51 kN·m	Cumple
Vux	445 kg ≈ 4.36 kN	Vnx = 4313 kg ≈ 42.30 kN	Cumple
Interacción flexión	0.59	<= 1.00	Cumple
Interacción flexión + corte	0.22	<= 1.00	Cumple
Deflexión por carga viva	0.571 cm	L/240 = 1.771 cm	Cumple
Deflexión total	0.707 cm	L/180 = 2.361 cm	Cumple
Deflexión voladizo - CV	0.239 cm	L/180 = 0.306 cm	Cumple
Deflexión voladizo - total	0.293 cm	L/120 = 0.458 cm	Cumple

La selección 2P-150-16 reportada por Corpasoft cumple las verificaciones de resistencia e inercia/deflexión indicadas en la memoria aportada.

13.3 Cerchas, arriostramientos y conexiones

El módulo de un aula requiere una cercha metálica, ubicada en el eje B, con una luz aproximada de 9.60 m y una altura estructural de 0.90 m. El cordón inferior está constituido por perfil tubular rectangular de 120×60×3.0 mm, mientras que el cordón superior se conforma mediante perfil tubular rectangular de 100×50×2.0 mm. Los elementos de alma, correspondientes a diagonales y montantes, están constituidos por perfiles tubulares rectangulares de 90×50×1.5 mm.

Las cargas provenientes de las correas y de la cubierta se transmiten al cordón superior de la cercha y posteriormente, mediante los elementos diagonales y verticales, hacia los apoyos extremos sobre la coronación de los muros de los ejes 1 y 2 (reacción de 26.45 kN por apoyo); en los ejes A y C las correas apoyan directamente

sobre los elementos de coronación de los muros culata. Los anclajes de la cercha y de las correas a la viga de amarre deberán resistir las reacciones de succión de viento.

14. ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS Y CONTROL DE CALIDAD

14.1 Mampostería

- Usar unidades estructurales certificadas y compatibles con el f′m adoptado.
- Controlar la dosificación, resistencia y consistencia del mortero de pega y del grout.
- Garantizar limpieza y continuidad de las celdas antes de inyección.
- Ubicar el refuerzo vertical y horizontal conforme a planos, con separaciones, empalmes y anclajes especificados.
- No realizar perforaciones o cortes posteriores que interrumpan barras o celdas reforzadas.
- Coordinar instalaciones antes de ejecutar los muros estructurales.
- Ejecutar dinteles, vigas de amarre y coronación con continuidad al refuerzo de muro.
- Registrar ensayos y certificados de materiales que respalden f′m = 15 MPa.

14.2 Concreto y acero de refuerzo

- Verificar f′c mediante control de producción y ensayos.
- Cumplir recubrimientos y tolerancias de colocación.
- No modificar diámetros, cantidad o espaciamiento sin aprobación del diseñador.
- Asegurar anclajes de barras verticales desde cimentación hacia los muros y coronación.

14.3 Estructura metálica

- Verificar certificados de material y espesores reales.
- Ejecutar soldadura conforme a procedimiento y con personal calificado.
- Controlar diámetro, clase y apriete de pernos.

15. CONCLUSIONES

1. El proyecto estructural corresponde a un **módulo de un nivel conformado por un aula**, con dimensiones en planta de **8.38 m × 7.13 m** (59.75 m²), equivalente a la mitad (ejes A–C) del módulo de dos aulas de la versión 02, con altura estructural de muros de **2.70 m** y cubierta metálica liviana a dos aguas. El sistema resistente principal se encuentra constituido por **muros de mampostería estructural reforzada con capacidad moderada de disipación de energía (DMO)**.
2. El análisis estructural se desarrolló mediante un **modelo tridimensional de elementos finitos**, calibrado con los resultados del modelo ETABS del proyecto, representando los muros mediante elementos de cascarón delgado agrupados en las etiquetas **Pier P1, P2, P4 y P6**, con el propósito de obtener las fuerzas integradas necesarias para las verificaciones de carga axial, flexo-compresión y cortante. Este procedimiento mantiene la trazabilidad entre el modelo estructural y el diseño individual de los muros.
3. Para el análisis sísmico se adoptaron los parámetros de localización del proyecto en Florencia, Caquetá, con Aa = 0.20, Av = 0.15, Grupo de Uso III e I = 1.25. El estudio geotécnico clasifica el sitio como perfil de suelo tipo C (Fa = 1.20, Fv = 1.65); el análisis conservó los parámetros de perfil tipo D (Fa = 1.40, Fv = 2.20), 14.3 % más exigentes, de modo que los resultados quedan del lado de la seguridad. El peso sísmico del módulo de un aula es W = 298.52 kN, con cortante basal Vs = 261.20 kN y cortante de diseño VE = 104.48 kN. El análisis modal consideró 200 modos, alcanzándose una participación acumulada del 90 % en ambas direcciones.
4. Las derivas máximas obtenidas fueron 0.0954 % en X y 0.2237 % en Y, equivalentes a desplazamientos relativos de **2.58 mm y 6.04 mm**, respectivamente, para la altura estructural de 2.70 m. Los resultados muestran un comportamiento lateral suficientemente rígido para la configuración estructural analizada.

5. Los muros de mampostería se diseñaron con f′m = 15 MPa y las solicitaciones del modelo, conservando los pares concurrentes Pu−Mu. El **Pier P4 presenta la mayor demanda flexional**, con Mu = 162.29 kN·m (Mu/φMn = 0.10), y la mayor relación demanda/capacidad de los muros es 0.10. El refuerzo requerido corresponde al mínimo: P1 y P2, **17 #3** cada uno; P4, **16 #3**; P6, **20 #3**; refuerzo horizontal 2Ø4.5 c/240 (escalerilla) en todos los muros. El diseño debe conservar el refuerzo vertical, horizontal y las celdas inyectadas consignadas en el cuadro integral.
6. Las verificaciones de los muros comprenden **carga axial y esbeltez, flexo-compresión, cortante, cuantías mínimas de refuerzo y disposición de celdas inyectadas**. Las celdas que contienen refuerzo vertical y aquellas adicionales requeridas por resistencia, anclaje o concentración de esfuerzos se especifican con mortero de relleno de resistencia f′cr = 21 MPa. El detalle de barras, celdas inyectadas, empalmes y continuidad entre cimentación, muro y coronación deberá coincidir estrictamente con los planos estructurales.
7. La revisión de **elementos de borde** se efectuó con las disposiciones aplicables del **Título D de la NSR-10**, adoptando como control del esfuerzo extremo de compresión el valor 0.20 f′m = 3.00 MPa; ningún muro requiere elementos de borde especiales.
8. El estudio geotécnico S025-0726 establece una capacidad portante admisible qadm = 142.25 kPa para una profundidad de desplante de 0.50 m, con asentamiento total estimado de 3.22 cm, inferior al máximo de 15 cm admitido por la NSR-10. El estudio clasifica el sitio como perfil sísmico C y no reporta nivel freático en las perforaciones realizadas. La cota de desplante del cimiento corrido no debe ser inferior a 0.50 m medida desde el nivel de terreno terminado.
9. La cimentación se resuelve mediante **cimiento corrido de concreto ciclópeo de sección trapezoidal**, con B = 1.00 m, b = 0.30 m, H = 0.60 m y proyección lateral T = 0.35 m, complementado en su parte superior mediante una **viga cinta de concreto reforzado de 0.30 × 0.30 m**; la presión actuante máxima es de 25.02 kPa.
10. La viga cinta de 30 × 30 cm debe garantizar la continuidad longitudinal de la cimentación, el amarre entre muros y el adecuado anclaje de las barras verticales de mampostería. Su detallado definitivo deberá conservar los requisitos de recubrimiento para elemento enterrado, continuidad del acero, refuerzo transversal y anclajes establecidos en los planos estructurales.
11. Respecto de la versión 02 se eliminan los muros P3 y P5 del aula que no se construye, el muro P2 del eje C pasa a ser muro culata exterior, el muro P6 del eje 2 se reduce a 8.38 m (20 #3) y la cubierta queda con una sola cercha en el eje B. Los planos estructurales deben actualizarse en concordancia.
12. La seguridad del sistema estructural depende de que durante la construcción se respeten las resistencias de materiales, dimensiones, refuerzos, celdas inyectadas, anclajes, recubrimientos y detalles definidos en planos. No deberán realizarse modificaciones de diámetros, separación de barras, dimensiones de elementos, ubicación de vanos ni geometría de la cubierta sin revisión y aprobación previa del diseñador estructural.

16. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y modificaciones aplicables.
- Estudio de suelos RG N.° S025-0726 - IE Puerto Arango, sede La Gaitana - Resguardo Nasa Wexs Kiwe, Florencia (Caquetá). C.S.P. Estudios y Diseños S.A.S., Ing. Carlos Andrés Baéz Baéz, julio de 2026.
- Correa LA GAITANA.pdf - Corpasoft 3, 16/08/2026.
- Memoria de cálculo e informe estructural, módulo de dos aulas, versión 02 (fecha base 21/08/2026) y su modelo ETABS (LA GAITANA mamposteria.edb).
- Modelo de elementos finitos del módulo de un aula (OpenSees 3.8) y reporte de resultados.
- Planos estructurales finales del módulo de un aula.