

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL, ENFOCADO EN
EL COSTO DE EDIFICACIONES EDUCATIVAS DE CONCRETO
ARMADO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA CIVIL**

AUTOR

John Elvis La Torre Esquivel

ASESOR:

Mg. Wilson Edgar Silva Berríos

Mayo, 2018

RESUMEN

Actualmente existen metodologías de optimización estructural que emplean algoritmos sofisticados, sin embargo éstas no son aplicadas en la mayoría de los proyectos de estructuras, debido a su complejidad así como la especialización y capacitación necesaria en temas específicos y avanzados de optimización aplicada, lo que no está suficientemente difundido entre los proyectistas de estructuras. Con el objetivo de contribuir al conocimiento sobre la optimización del diseño de estructuras de concreto armado, se ha desarrollado un procedimiento aproximado, basado en estrategias de minimización de la cantidad de variables activas, optimización de subestructuras, aplicación de criterios de optimización, procedimientos de construcción e inspección gráfica de los espacios de diseño. El procedimiento desarrollado, tiene como función objetivo a minimizar el Costo Directo de Estructuras, se ha aplicado en un número finito de casos para edificaciones de concreto armado, uso educativo, correspondientes a pabellones de aulas de entre dos y cinco niveles y de tres a cuatro aulas por nivel. Los resultados de la aplicación de la metodología llevan a la conclusión que el Costo Directo de Estructuras disminuye si se proyecta con: concretos premezclados de resistencias superiores a 21 MPa (210 kgf/cm²), losas aligeradas con bloques de poliestireno expandido (tecnopor), con dimensiones de la sección transversal de columnas, placas y vigas determinadas a través de la inspección gráfica del espacio de diseño, así también, si el proyecto considera la interacción entre los tabiques de albañilería y la estructura de concreto armado, donde los tabiques tienen altura completa y estén distribuidos en forma simétrica en referencia al centro de masa y acoplados a la deformación lateral de la estructura, para incrementar la rigidez lateral de ésta.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con mucho cariño a toda mi familia muy especialmente a mi hija Josefina Emily, mi papá Manuel, mi mamá Betsy, mi hermano Darwin, así como a mi abuelita Margarita, los que son mi soporte moral y parte de mi vida. Así también, lo dedico a los ángeles de mi familia en el cielo, quienes son mi hermano Yems, mi abuelita Visitación y mi abuelo Justo Luis.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar hoy lo que hace tanto fue un anhelo, así también agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Perú y a todos mis Docentes de la Maestría en Ing. Civil, muy especialmente a los Magísteres: Ing. Wilson Silva Berríos, Ing. Luis Zegarra Ciquero e Ing. Gianfranco Ottazzi Pasino, por su gran calidad docente, las enseñanzas recibidas, exigencia académica y asesoramiento.

Agradezco a mis padres y a mi hermano por darme su apoyo y ser un ejemplo a seguir.

Agradezco a la Beca Aristóteles de la PUCP por el apoyo brindado durante los años que cursé mis estudios de posgrado, así como a todas las personas y entidades que me apoyaron dándome trabajo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	8
2.1. OBJETIVO GENERAL	8
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL	9
3.1. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL	9
3.2. TIPOS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL	9
3.2.1. OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	9
3.2.2. OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA O GEOMETRÍA	9
3.2.3. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	9
3.3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA GENERAL DEL PROBLEMA	9
3.4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA ESPECÍFICA DEL PROBLEMA	10
3.5. FUNCIÓN OBJETIVO	11
3.6. ESPACIO DE DISEÑO	11
3.7. VARIABLES DE DISEÑO	11
3.7.1. VARIABLES CONTINUAS	11
3.7.2. VARIABLES DISCRETAS	11
3.7.3. VARIABLES ACTIVAS	12
3.7.4. VARIABLES PASIVAS	12
3.8. RESTRICCIONES	12
3.8.1. RESTRICCIONES EXPLÍCITAS	12
3.8.2. RESTRICCIONES IMPLÍCITAS	12
3.8.3. RESTRICCIONES DE COMPORTAMIENTO	12
3.8.4. RESTRICCIONES DE FRONTERA	12
3.8.5. RESTRICCIONES ACTIVAS	13
3.8.6. RESTRICCIONES PASIVAS	13
3.9. CAMPOS DE OPTIMIZACIÓN	13
3.9.1. OPTIMIZACIÓN SIN RESTRICCIONES	13
3.9.2. OPTIMIZACIÓN CON RESTRICCIONES	13
3.9.3. OPTIMIZACIÓN DE VARIABLE CONTINUA	13
3.9.4. OPTIMIZACIÓN DE VARIABLE DISCRETA	13
3.10. MÉTODOS PARA LA OPTIMIZACIÓN	14
3.10.1. MÉTODOS BASADOS EN PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA	14
3.10.2. MÉTODOS BASADOS EN CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN	15

4. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS Y ESTRUCTURALES VIGENTES EN EDIFICACIONES PERUANAS DE USO EDUCATIVO	17
4.1. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS	17
4.1.1. EL AULA	17
4.1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES PASILLOS, CIRCULACIÓN	18
4.1.3. REGLAMENTOS DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO	18
4.2. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES ACTUALES	19
4.3. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS Y ESTRUCTURALES DE LOS MODELOS A OPTIMIZAR	21
4.3.1. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS	21
4.3.2. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES	21
5. CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL	24
5.1. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL	24
5.1.1. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS PARA EL MODELADO DE LOS ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO	24
5.1.2. PROPIEDADES PARA EL MODELADO DE LOS TABIQUES DE ALBAÑILERÍA ESTRUCTURAL ACOPLADOS A LA DEFORMACIÓN LATERAL DE LA ESTRUCTURA	25
5.1.3. ESTRUCTURACIÓN Y PREDIMENSIONAMIENTO	25
5.1.4. MODELADO DE LAS ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN	28
5.1.5. MODELADO DE LA SUPERESTRUCTURA	28
5.1.6. MODELADO DEL SISTEMA DE ENTREPISO	28
5.1.7. CARGAS GRAVITACIONALES	28
5.1.8. CARGAS LATERALES DE SISMO	29
5.2. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL	30
5.2.1. MÉTODO DE DISEÑO PARA ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO	30
5.2.2. MÉTODO DE DISEÑO PARA LOS TABIQUES DE ALBAÑILERÍA (PUNTALES A COMPRESIÓN)	31
6. PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL Y RESULTADOS DE APLICACIÓN	33
6.1. PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL	33
6.2. COMENTARIOS RESPECTO AL PROCEDIMIENTO:	42
6.2.1. CRITERIOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL REFUERZO	42
6.2.2. DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN	46
6.3. OPTIMIZACIÓN PASO A PASO DEL EDIFICIO DE 3 PISOS Y 3 AULAS POR PISO	48
6.4. COMPARACIÓN DE LA ESTRUCTURACION VIGENTE PARA 3 AULAS POR PISO Y 2 PISOS (EDIFICIO 780 SISMORESISTENTE) CON MODELO CORRESPONDIENTE OPTIMIZADO:	56
6.5. RESUMEN DE RESULTADOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN	58
6.6. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CANTIDADES DE CONCRETO, ENCOFRADOS Y ACERO DE REFUERZO EN LOS MODELOS ÓPTIMIZADOS	91

7. CONCLUSIONES	95
8. FUENTES Y BIBLIOGRAFIA.....	97
9. ANEXOS	100



1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de Tesis, trata sobre la optimización de estructuras de Concreto Armado para uso educativo (ej. colegios, centros de educación superior). Es un tema de optimización aplicada a la ingeniería estructural.

Actualmente existen metodologías de optimización estructural que emplean algoritmos sofisticados, sin embargo éstas no son aplicadas en la mayoría de los proyectos de estructuras, debido a su complejidad así como la especialización y capacitación necesaria en temas específicos y avanzados de optimización aplicada, lo que no está suficientemente difundido entre los proyectistas de estructuras.

En el país existen algunos estudios e investigaciones en optimización estructural (Tesis de Maestría de la PUCP, UNI) que se han enfocado en optimizar la estructura teniendo como objetivo el peso de la estructura o su costo, sin embargo se han limitado a casos teóricos simples y siempre con el empleo de algoritmos computacionales complejos.

En el presente trabajo, la función objetivo a minimizarse es el costo directo de las estructuras. Las variables de diseño son las dimensiones de la sección transversal de columnas, vigas y muros estructurales, la resistencia del concreto estructural, el espesor efectivo de los tabiques de albañilería y el tipo de losa aligerada. El diseño óptimo, corresponderá a la selección de los valores de las variables de diseño que conduzcan a un menor costo directo de las estructuras, siempre que se cumpla con las restricciones y requisitos establecidos en el Reglamento Nacional de Edificaciones.

La importancia y aporte del presente trabajo, radica en presentar una metodología práctica, simple y aplicable por los ingenieros proyectistas lo que contribuirá a economizar la construcción de edificaciones dentro de los requisitos establecidos en el Reglamento Nacional de Edificaciones.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Contribuir al conocimiento sobre la optimización del diseño de estructuras de concreto armado, teniendo como función objetivo a minimizar: el costo directo de las estructuras de concreto armado, definiéndose éste como el costo de los insumos: materiales, mano de obra, equipos y herramientas de las partidas: acero de refuerzo, encofrado, concreto para columnas, placas, vigas y losas así como de las partidas de concreto y acero en la cimentación.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un procedimiento práctico, simple y aplicable para determinar el valor óptimo de las variables de diseño que conduzcan a minimizar Costo Directo de Estructuras, dentro de las restricciones establecidas.
- Aplicar el procedimiento en un número finito de casos que en este trabajo, corresponden a edificaciones de uso educativo (para bloques o pabellones de aulas), de entre dos y cinco niveles y con un número de aulas por piso de entre tres y cuatro.

3. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

3.1. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

La optimización estructural es un área del conocimiento humano que se encuentra en la intersección de otras dos áreas como son la Optimización aplicada y la Ingeniería Estructural.

La Optimización Estructural radica en la selección de los mejores valores para las variables de diseño relacionadas a propiedades como la geometría y/o sección transversal y/o topología de los elementos estructurales a efectos de minimizar una determinada función objetivo, dentro de rangos razonables para las variables de diseño y sujetas a las restricciones establecidas para el comportamiento estructural: resistencia, deformaciones y desplazamientos ([1], [2], [3], [4]).

Respecto a la función objetivo ésta puede ser por ejemplo: el costo, peso, volumen o tiempo de ejecución de las estructuras.

3.2. TIPOS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

En concordancia con [4], se tienen:

3.2.1. OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Cuando las variables del diseño son las dimensiones y la forma de la sección transversal de los elementos estructurales.

3.2.2. OPTIMIZACIÓN DE LA FORMA O GEOMETRÍA

Cuando las variables del diseño son por ejemplo las coordenadas de los nudos y ubicación de soportes.

3.2.3. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Cuando las variables del diseño son por ejemplo: la existencia o no de elementos estructurales y la forma como se conectan entre ellos, es decir si la conexión transmite momento, corte, etc.

3.3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA GENERAL DEL PROBLEMA

El diseño óptimo se satisface con la selección de los valores de X que minimizan $f(X)$, siendo $f(X)$, la función objetivo, donde X es un vector

de orden “n”, que contiene los valores de las “n” variables de diseño [23]:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad \dots(1)$$

Sujeta a las restricciones o condiciones:

$$g(X) \leq 0 \quad \dots(2)$$

Nótese que **g** es un vector de orden “m”, que contiene las “m” restricciones de diseño, que se deben satisfacer a efectos que el diseño sea aceptable:

$$g(X) \leq 0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} g_1(X) \leq 0 \\ g_2(X) \leq 0 \\ \vdots \\ g_m(X) \leq 0 \end{array} \right\} \quad \dots(3)$$

A su vez, cada variable de diseño tiene sus propios límites o restricciones, denominados restricciones de frontera, por ejemplo limitaciones prácticas o constructivas, respecto a los valores que puede tomar:

$$x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU} \quad \dots(4)$$

3.4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA ESPECÍFICA DEL PROBLEMA

Función objetivo: *Costo Directo de Estructuras (X)*

$$X = \{f'c, b_{vigas}, h_{vigas}, b_{columnas}, h_{columnas}, b_{placas}, h_{placas}, t_{tabiques}, \text{Tipo de aligerado}\} \quad \dots(5)$$

$$g(X) \leq 0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Resistencia(X) \leq 0 \Rightarrow R_u - \emptyset R_n \leq 0 \\ \vdots \\ Derivas de entrepiso(X) \leq 0 \Rightarrow \Delta_{calculado} - \Delta_{m\acute{a}x} \leq 0 \\ \vdots \end{array} \right\} \quad \dots(6)$$

A su vez, cada variable de diseño tiene sus propios límites o restricciones, denominados restricciones de frontera, por ejemplo limitaciones prácticas o constructivas, respecto a los valores que puede tomar:

$$(b, h)_{iL} \leq (b, h)_i \leq (b, h)_{iU} \quad \dots(7)$$

3.5. FUNCIÓN OBJETIVO

Es una función dependiente de las variables de diseño (vector \mathbf{X}) cuyo valor corresponde a la meta a minimizar en el problema de optimización (costo, peso, volumen, etc.). La función objetivo representa la propiedad más importante del problema de optimización, sin embargo, también representa una sumatoria ponderada de un determinado número de propiedades, todas dependientes de las variables de diseño [2].

3.6. ESPACIO DE DISEÑO

Es un espacio matemático “n” dimensional, con “n” ejes de referencia correspondientes a cada una de las variables de diseño. En este espacio se tiene los valores de la función objetivo correspondiente a un determinado diseño resultado de combinación específica de las variables de diseño (vector \mathbf{X}). Las restricciones del problema específico de optimización, dividen al el espacio de diseño en regiones aceptables e inaceptables. La función objetivo, define en el espacio de diseño contornos de valor constante. En cada contorno el valor corresponde a la meta a minimizar en el problema de optimización (costo, peso, volumen, etc.) [21].

3.7. VARIABLES DE DISEÑO

Son todas aquellas cantidades cuyo valor no está fijo o pre-asignado durante el proceso de optimización. Sin perjuicio de lo anterior, durante la estrategia de optimización es posible pre asignar valores a ciertas variables a efectos de simplificar el proceso de optimización, reduciendo el número de variables en el procedimiento ([1], [2] y [26]).

Luego, se tienen:

3.7.1. VARIABLES CONTINUAS

Son aquellas variables de diseño que dentro de un cierto rango (ej. $x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}$), pueden tomar cualquier valor, existiendo infinitas posibilidades.

3.7.2. VARIABLES DISCRETAS

Son aquellas variables de diseño que dentro de un cierto rango (ej. $x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}$), solo pueden tomar un número finito de valores o valores enteros por ejemplo.

3.7.3. VARIABLES ACTIVAS

Son aquellas variables cuyo valor óptimo o valor aproximado o cercano al óptimo, se determina como resultado del proceso de optimización.

3.7.4. VARIABLES PASIVAS

Son aquellas variables cuyo valor es pre fijado o establecido al inicio del proceso de optimización (como resultado de la activación de alguna restricción de frontera superior o inferior o aplicación de algún criterio) permaneciendo su valor constante dentro del procedimiento específico de optimización.

3.8. RESTRICCIONES

Son todas aquellas funciones de igualdad o desigualdad, que deben ser satisfechas a efectos de determinar una región de diseños aceptables ó factibles [2]. A su vez, en concordancia con [2], [21] y [26], las restricciones pueden clasificarse en:

3.8.1. RESTRICCIONES EXPLÍCITAS

Son las restricciones aplicadas o impuestas directamente a una o varias variables de diseño o a una cantidad dependiente de ésta(s) variable(s) que puede establecerse en forma explícita.

3.8.2. RESTRICCIONES IMPLÍCITAS

Son las restricciones aplicadas o impuestas a una o varias variables de diseño o sobre cantidades dependientes de éstas y cuya dependencia no es posible establecerse en forma explícita.

3.8.3. RESTRICCIONES DE COMPORTAMIENTO

Son las restricciones aplicadas o impuestas sobre magnitudes o cantidades correspondientes a un determinado comportamiento del diseño, como por ejemplo esfuerzos, desplazamientos, etc.

3.8.4. RESTRICCIONES DE FRONTERA

Son las restricciones aplicadas o impuestas directamente a una o varias variables de diseño, como por ejemplo los valores mínimos o máximos que pueden tomar, siempre son restricciones del tipo explícito.

3.8.5. RESTRICCIONES ACTIVAS

Son todas aquellas restricciones que se satisfacen exacta o aproximadamente muy cerca al valor óptimo de la función objetivo.

3.8.6. RESTRICCIONES PASIVAS

Son todas aquellas restricciones que no se satisfacen cerca al valor óptimo de la función objetivo, es decir se cumplen pero con cierta holgura, de tal manera que, su omisión no afecta el resultado obtenido.

3.9. CAMPOS DE OPTIMIZACIÓN

Se tienen los siguientes campos [1], [22]:

3.9.1. OPTIMIZACIÓN SIN RESTRICCIONES

Cuando en el problema de optimización, solo se tiene la función objetivo y las variables de diseño, no existiendo ningún tipo de restricciones.

3.9.2. OPTIMIZACIÓN CON RESTRICCIONES

Cuando en el problema de optimización, se tiene además de la función objetivo y las variables de diseño, restricciones, que pueden ser funciones de restricción (ej. $g(x)$) o restricciones de frontera para las variables de diseño (ej. $x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}$)

3.9.3. OPTIMIZACIÓN DE VARIABLE CONTINUA

Cuando en el problema de optimización, las variables de diseño dentro de un cierto rango (ej. $x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}$), pueden tomar cualquier valor, existiendo infinitas posibilidades, a estas variables se les denomina variables continuas.

3.9.4. OPTIMIZACIÓN DE VARIABLE DISCRETA

Cuando en el problema de optimización, las variables de diseño dentro de un cierto rango (ej. $x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}$), solo pueden tomar un número finito de valores o valores enteros por ejemplo, a estas variables se les denomina variables discretas.

3.10. MÉTODOS PARA LA OPTIMIZACIÓN

En concordancia con las referencias consultadas [1], [2], [21], [22], [23], [24] y [25] se tienen dos grandes grupos de métodos:



Figura n.º 3.1.- Esquema conceptual de los dos grandes grupos de métodos para optimización

A continuación se procede a mencionar las principales características y principales técnicas o metodologías de los referidos métodos:

3.10.1. MÉTODOS BASADOS EN PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

En estos, la función objetivo es minimizada directamente mediante la aplicación de algoritmos numéricos, buscándose la solución exacta general y pueden aplicarse para cualquier función objetivo y cualquier restricción, siempre que sea posible la programación de todo el procedimiento desde el ingreso y posterior modificación de las variables de diseño, hasta la evaluación de la función objetivo, la principal desventaja de estos métodos es que pueden converger en mínimos relativos. A su vez, se tienen las siguientes metodologías:

- Programación Lineal: Aplicable cuando la función objetivo varía linealmente con las variables de diseño. Dentro de este método están las siguientes técnicas:
 - Algoritmos de punto interior
 - Método Simplex para problemas de optimización no restringida y el denominado
 - Método Simplex Revisado para problemas de optimización restringida.
- Programación No Lineal: Para problemas en los que la función objetivo no varía linealmente con las variables de diseño. A su

vez comprende las siguientes métodos en función de la restricción del problema de optimización:

- Para problemas de optimización no restringida
 - Método del descenso de la mayor pendiente
 - Método de las direcciones conjugadas
 - Métodos Newtonianos o de tipo Newtoniano
 - Método del paso restringido
 - Método de suma de cuadrados
 - Método de minimización de la función a lo largo de una curva
 - Método de búsqueda directa
 - Método del gradiente
- Para problemas de optimización restringida
 - Método de la función de penalidad
 - Método de penalidad interior
 - Método de penalidad exterior
 - Método de direcciones confiables
 - Método de Programación Lineal Secuencial
 - Método de Programación Secuencial Cuadrática
 - Método de Ecuaciones Incrementales
 - Método de los planos cortados
 - Método generalizado de la gradiente reducida
- Métodos Meta-heurísticos:
 - Algoritmos genéticos
 - Estrategias evolutivas
 - Enjambre de partículas
 - Colonia de hormigas
- MÉTODO POR INSPECCION DEL ESPACIO DE DISEÑO - OPTIMIZACION GRAFICA.- Este método tiene la capacidad de resolver cualquier problema de optimización, siempre que se tengan solamente dos variables activas, la optimización se realiza a través de la inspección grafica del espacio de diseño, el que es posible de graficarse en el plano [27].

3.10.2. MÉTODOS BASADOS EN CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN

En éstos, se busca hallar el valor de las variables de diseño que minimicen la función objetivo hasta que se cumpla un determinado criterio, considerándose que se ha alcanzado el objetivo cuando el referido criterio se ha satisfecho y no necesariamente si se ha encontrado un mínimo absoluto. A su vez se tienen las siguientes metodologías:

- Métodos de Re análisis, a su vez puede ser:
 - Directo: A través de la aplicación de un algoritmo específico, da la solución cerrada y exacta a efecto de satisfacer un determinado criterio de optimización, aplicable a estructuras relativamente pequeñas determinadas o cuando solo una pequeña porción de una estructura relativamente grande es modificada.
 - Iterativos: Para apreciar como es la influencia de pequeñas modificaciones que se podrían aplicar en gran parte de la estructura.
 - Métodos aproximados: Cuando se requiere conocer solo un suficiente número de resultados dependientes de algunos valores de las variables de diseño a efectos de estimar un valor intermedio aplicable o cuando el resultado exacto no es indispensable.

- Diseño completamente esforzado
- Diseño de resistencia uniforme
- Diseño de falla simultanea
- Densidad uniforme de energía de deformación

- MÉTODOS INTUITIVOS.- Se les considera como extensión o modificación de los métodos de programación matemática y Criterios de optimización, algunos autores los clasifican dentro de los métodos basados en criterios de optimización. Su aplicación en problemas de optimización del tipo general es controversial, sin embargo, se reconoce su validez en la aplicación de problemas específicos en problemas de optimización del tipo restringido, en este caso los métodos intuitivos se basan en realizar supuestos o hipótesis “a priori” sobre cuáles son las variables y/o restricciones que condicionan el diseño óptimo, también sirven para tratar algunas variables de diseño como pasivas a efectos de limitar o minimizar el número de éstas.

- MÉTODOS BASADOS EN OPTIMIZACION DE SUB ESTRUCTURAS O ELEMENTOS.- Si en el proceso de optimización se parte por optimizar determinadas subestructuras con un procedimiento específico para éstas, entonces estos valores se tendrán pre definidos al inicio del procedimiento de optimización, dentro del cual tales valores permanecerán constantes, la ventaja es que en el procedimiento se tendrá menor cantidad de variables activas, simplificándose así el procedimiento de solución, luego, el valor de todas las variables que hacen óptimo el diseño, se obtendrá a través de un procedimiento iterativo. Esto equivale a sub dividir el vector \mathbf{X} en sub vectores $\mathbf{X} = \{ \{ \mathbf{X}_1 \}, \{ \mathbf{X}_2 \}, \dots \{ \mathbf{X}_s \} \}$ donde “s” representa el número de sub estructuras [2].

4. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS Y ESTRUCTURALES VIGENTES EN EDIFICACIONES PERUANAS DE USO EDUCATIVO

4.1. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS

En concordancia con [10], [11], [12], [13], [31] y [32], se tienen las siguientes características a considerarse en el proyecto:

4.1.1. EL AULA

- Nro. de alumnos entre 30 y 48 por aula.
- Forma de aulas: puede ser rectangular, recomendándose la cuadrada por la flexibilidad en su amueblamiento.
- Índice de ocupación: 1.30 y 1.40 m² / alumno
- Distancia máxima a la pizarra: 6.50 m.
- Longitud mínima de la pizarra: 3.00 m.
- Altura mínima: 2.50 m.
- Ventilación cruzada.

En el siguiente gráfico se aprecia una vista esquemática general del aula típica.



Figura n.º 4.1.- Esquema de aula común [11].

4.1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES PASILLOS, CIRCULACIÓN

- Mínima complejidad (Constructiva y Estructural)
- Ancho de pasillos: 1.80 m. hasta 4 aulas, 2.10 m. para 5 aulas.
- Área de circulación y muros: 30%

4.1.3. REGLAMENTOS DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO

- Reglamento Nacional de Edificaciones:
- Normas Técnicas para el Diseño de Locales Escolares de Primaria y Secundaria (Ministerio de Educación) [11].
- Normas Técnicas de la SUNEDU

4.2. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES ACTUALES

Conforme a las referencias [28], [33] y [35], se tienen las siguientes imágenes y características:



Figura n.º 4.2.- Imagen típica de un pabellón de aulas [33], que en el último nivel no tiene alero.



Figura n.º 4.3.- Imagen típica de un pabellón de aulas [35], que en el último nivel tiene alero.

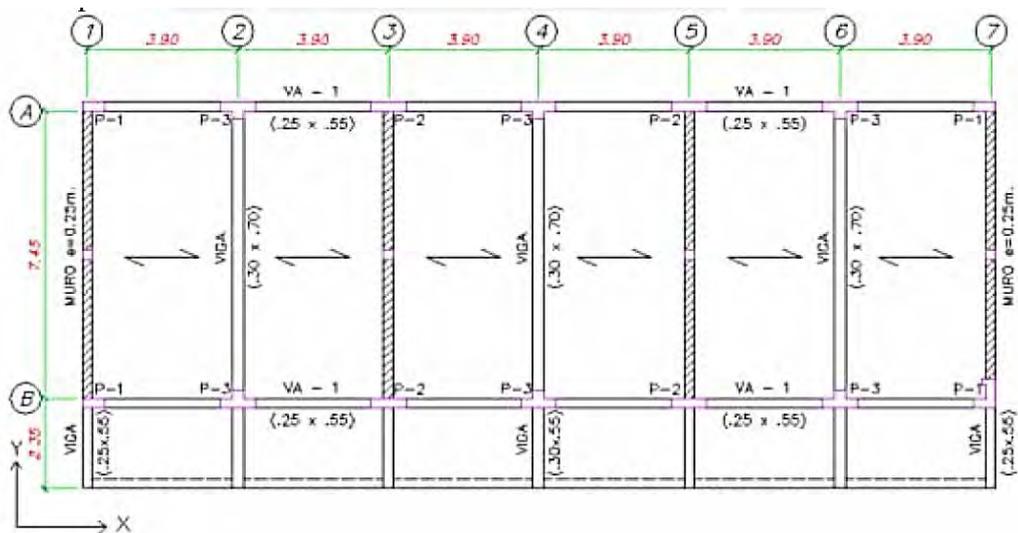


Figura n.º 4.4.- Planta típica edificio 780 actual [28].

Comentarios:

- Edificación denominada “780 actual”, “Colegio Sismo Resistente”, “Post NDSR 1997”. Existen también edificaciones “Pre NDSR 1997”, que se han reforzado sísmicamente, siguiendo los criterios del “780 actual”. El aligerado típico es de 20 cm. de espesor, con bloques de ladrillo y se apoya en las vigas y muros portantes del sentido corto.
- Respecto a las dimensiones, por ej. para un pabellón de 2 niveles y tres aulas por nivel, se tiene:

En el sentido largo:

- La distancia entre ejes de columnas / placas es de 3.90 m.
- El largo o peralte de la sección de las placas / columnas paralelo al eje X, de es de 90 cm. con ancho de 25 cm.; Se tienen placas en “T” en la ubicación donde no hay muros portantes (perpendiculares al eje X) de sección 90x45x25cm con ancho de 25 cm. y donde hay muros portantes, se tienen placas rectangulares sección 90x25cm.

En el sentido corto:

- La distancia entre ejes de columnas / placas en el sentido corto es 7.80 m.
- Espaciados a 7.80 m., se tienen muros portantes de albañilería confinada de aparejo cabeza ($t = 25$ cm.), con una columna de confinamiento de 25x25cm. en la mitad del muro portante. Sobre el muro portante se tiene una viga solera de sección 25x20cm. Luego, se tienen vigas peraltadas de sección 30x70cm. en los ejes donde no hay muros portantes. La sección de las vigas en voladizo es de 30x55cm. en el alineamiento de las vigas de 30x70cm. y de 25x55cm. en el alineamiento de los muros portantes.

4.3. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS Y ESTRUCTURALES DE LOS MODELOS A OPTIMIZAR

4.3.1. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS

Las características son:

- El módulo de aula típica es de 7.80 m. x 7.80 m.
- Nro. de pisos: de 2 a 5
- Nro. de aulas por piso: de 3 a 4
- Ancho del pasillo (en voladizo): 1.80 m., se tiene alero en el último piso.

4.3.2. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

La estructuración propuesta a optimizarse, se describe en los siguientes gráficos y párrafos, por ejemplo para un pabellón de aulas de 2 niveles y tres aulas por nivel:

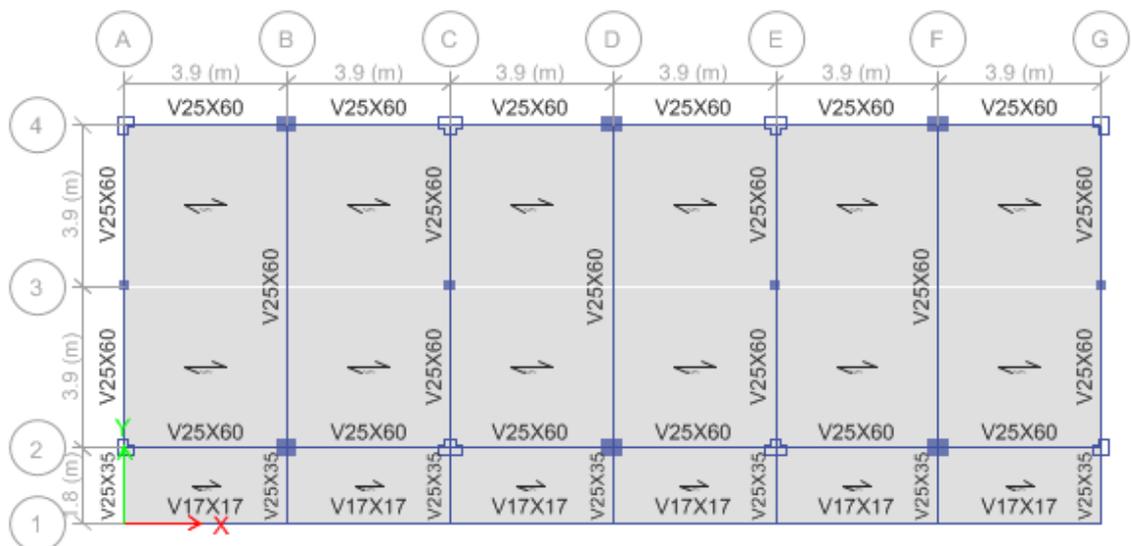


Figura n.º 4.5.- Planta típica - estructuración propuesta para optimizar.

- El aligerado propuesto es de 17 cm. de espesor que se apoya en las vigas paralelas al sentido corto.
En el sentido largo:
 - La distancia entre ejes de columnas / placas es de 3.90 m.
 - Las dimensiones paralelas al eje X de la sección transversal de las placas y columnas, se determinará más adelante con el procedimiento de optimización, sin

embargo las placas tienen ancho de 25 cm.; Las placas en "T" se ubican donde hay tabiques divisorios internos entre aulas. En los ejes donde no hay tabiques entre aulas se tienen columnas "robustas" con forma rectangular.

En el sentido corto:

- o La distancia entre ejes de columnas / placas en el sentido corto es 7.80 m.
- o Espaciados a 7.80 m., se tienen tabiques estructurales no portantes ante cargas gravitacionales, arriostrados, acoplados a la deformación lateral de la estructura, de albañilería de aparejo soga ($t = 13$ cm.), con una columna de amarre de 25x25 cm. en la mitad del tabique.

Las vigas son de sección 25x60 cm. en X e Y, excepto en el voladizo.

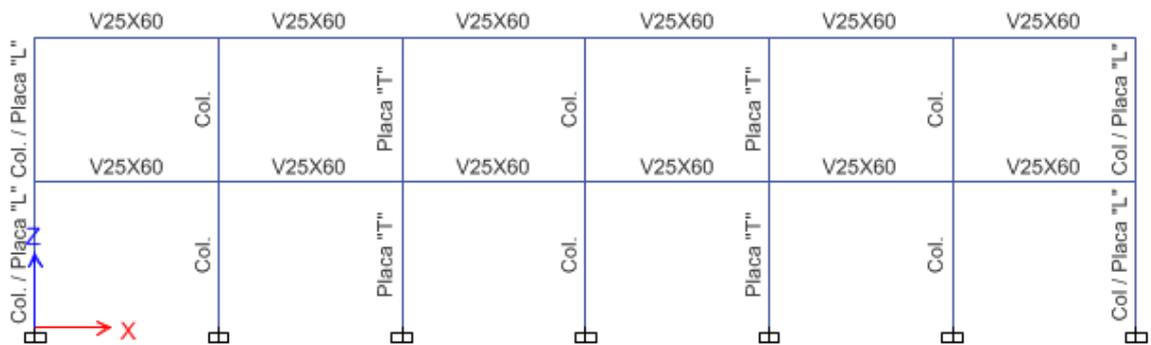


Figura n.º 4.6.- Elevación típica (ejes 2 y 4).

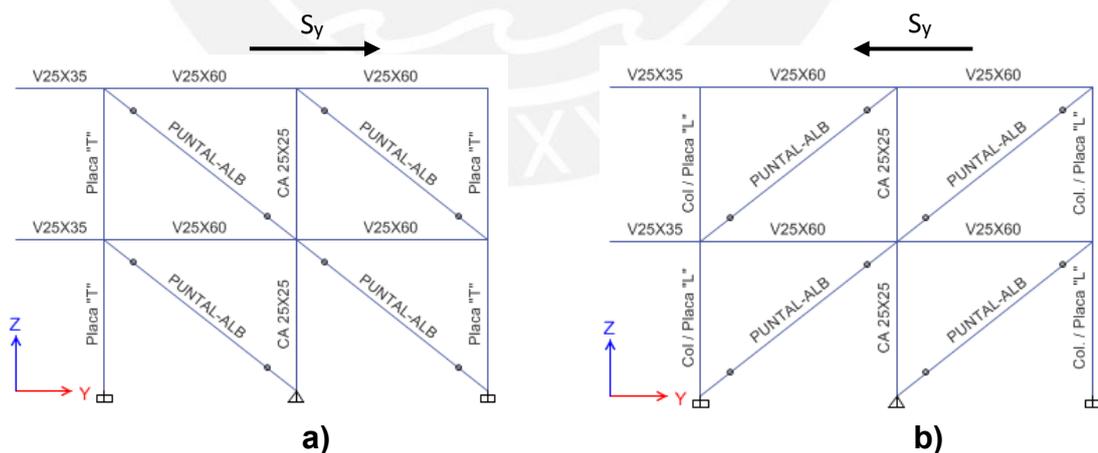


Figura n.º 4.7.- Elevación típica (ejes A, C, E, G) y modelamiento de los tabiques a compresión: Caso a) Modelo estructural cuando el sismo viene en dirección Y, sentido positivo. Caso b) Modelo estructural cuando el sismo viene en dirección Y, sentido negativo.



Figura n.º 4.8.- Elevación típica (ejes B, D, F).

Comentarios:

- La ubicación de la placa en “T” donde se tiene división entre aulas permite aplicar la estructuración a edificaciones de mayor número de niveles (ej. 5 pisos) sin que el incremento de las dimensiones de la sección de la placa en “T” genere obstrucciones internas que puedan afectar el funcionamiento del aula.
- La elección del sistema donde los tabiques son no portantes pero si acoplados a la deformación lateral de la estructura, tiene las siguientes ventajas:
 - Constructivamente, se elimina una restricción en la velocidad de construcción. En este caso no sería necesario construir primero los tabiques o muros y después las columnas, placas y vigas. Sin embargo, es necesario arriostrar el tabique, para evitar su volcamiento fuera del plano de muro, sobre los sistemas de arriostres existen soluciones e investigación suficiente [29]. Es importante hacer notar que las vigas que están sobre los tabiques son peraltadas (25x60cm) y no se apoyan en los tabiques sino que se apoyan y transmiten las cargas y fuerzas internas a las columnas y/o placas.
 - Desde el punto de vista de aplicación de la normativa en edificaciones, no sería aplicable la restricción de la altura máxima de la edificación (ej. 5 pisos ó 15 m. de altura según RNE E.070), por lo que “teóricamente” el sistema propuesto podría emplearse para número de pisos mayor a 5.

5. CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL

5.1. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

- Para poder analizar una estructura es necesario crear un modelo idealizado de ella [15].

5.1.1. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS PARA EL MODELADO DE LOS ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO

- Respecto a las propiedades elásticas: El módulo de Elasticidad es proporcional a la raíz cuadrada de $f'c$, [15]; así tenemos para distintos valores de $f'c$:

Tabla n.º 5.1: Valores del Módulo de Elasticidad en función de $f'c$

$f'c$ (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)
210	217400
280	251000
350	280600

- El módulo de Poisson se suele tomar como $\mu=0.15$, [15].
- En la idealización del modelo se consideran las siguientes suposiciones:
 - Las propiedades de rigidez de los elementos, están concentradas a lo largo de sus ejes principales centroidales.
 - Los elementos (vigas, columnas, placas), se consideran unidimensionales.
 - Se trabaja con el momento de inercia de la sección bruta de concreto, ignorando la presencia del acero de refuerzo.
 - Se ignora el efecto que tiene la fisuración del concreto y el flujo plástico.
 - Las solicitaciones o acciones exteriores se aplican sobre el modelo idealizado.

5.1.2. PROPIEDADES PARA EL MODELADO DE LOS TABIQUES DE ALBAÑILERÍA ESTRUCTURAL ACOPLADOS A LA DEFORMACIÓN LATERAL DE LA ESTRUCTURA

- Los tabiques se consideran como barras articuladas o bielas que trabajan a compresión (tal como se observa en la figura 4.7), de dimensiones $W_o \times t$, donde W_o es el ancho del puntal equivalente a $\frac{1}{4}$ de la longitud diagonal del tabique y t es el espesor efectivo de la albañilería.
- Para unidades de arcilla industriales los valores de f'_b , f'_m así como las propiedades se tienen en la siguiente tabla:

Tabla n.º 5.2: Propiedades de los muros de albañilería

f'_b (kgf/cm ²)	f'_m (kgf/cm ²)	v'_m (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)	ν (Mód. Poisson)
145	65	8.1	32500	0.25

5.1.3. ESTRUCTURACIÓN Y PREDIMENSIONAMIENTO

- Para el pre dimensionamiento de vigas, se toma como base el procedimiento según [16].
- Para el pre dimensionamiento de columnas, se toma como base el procedimiento según [16] y [34].
- Para el pre dimensionamiento de placas o muros de corte, se toma como base los conceptos de según [32] y el procedimiento descrito en [34].

Pre dimensionamiento de Vigas:

El pre dimensionamiento está en función del área tributaria, la carga última y la luz libre de la viga:

$$h = \frac{L_n}{\left(\frac{16}{\sqrt{w_u \cdot B/b}}\right)} \dots (8)$$

Donde:

h : Peralte de la viga (cm.)

L_n : Luz libre de la viga en unidades de longitud (cm.)

w_u : Carga última repartida por unidad de área (kgf/cm²)

B : Ancho tributario (cm.)

b : Ancho de la viga (cm.)

La deducción de esta expresión se ha realizado según [16]:

En cualquier sección de la viga, el momento flector último, puede expresarse como:

$$Mu = \frac{w_u \cdot B \cdot L_n^2}{\alpha} \dots(9)$$

Para una sección rectangular con acero solo en tracción, por equilibrio se tiene:

$$\frac{Mu}{\phi} = f'c \cdot b \cdot d^2 \cdot \omega(1 - 0.59\omega) \dots(10)$$

Donde: $\omega = \rho \cdot fy/f'c$

Luego de (9) y (10):

$$d = L_n \cdot \sqrt{\frac{w_u \cdot B}{\alpha \cdot \phi \cdot f'c \cdot b \cdot \omega(1 - 0.59\omega)}} \dots(11)$$

Asumiendo los siguientes valores:

$d = h/1.1$; $\alpha = 11$ (para Momento negativo máx.);
 $\phi = 0.9$; $b = 25$ cm.

$$f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2; f'c = 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}; \rho = 0.007 \Rightarrow \omega = 0.14$$

Tenemos:

$$h = \frac{L_n}{\frac{\sqrt{\alpha \cdot \phi \cdot f'c \cdot \omega(1 - 0.59\omega)}}{\sqrt{w_u \cdot B/b}}} = \frac{L_n}{\frac{16.34}{\sqrt{w_u \cdot B/b}}} \dots(11)$$

Y finalmente redondeando:

$$h = \frac{L_n}{\left(\frac{16}{\sqrt{w_u \cdot B/b}}\right)} \dots(8)$$

Aplicando la ecuación n.º 8, tenemos:

Tabla n.º 5.3: Pre dimensionamiento de vigas.

Caso	WD (kgf/m ²)	WL (kgf/m ²)	WU (kgf/m ²)	wu (kgf/cm ²)	b (cm)	B (cm)	Ln (cm)	h (cm)
Losa aligerada h=17cm, con bloques poliestireno expandido	316	250	867	0.09	25	390	740	54
Losa aligerada h=17cm, con bloques de arcilla	380	250	957	0.10	25	390	740	57

Pre dimensionamiento de Columnas:

Para el pre dimensionamiento de columnas se realizará en función, de la carga vertical estimada sin amplificar, que soporta cada columna. Se pre dimensionará las columnas del primer nivel y las secciones se repetirán para los pisos superiores.

Se empleara la siguiente expresión [34]:

$$A_g \geq \frac{P}{0.45 \cdot f'_c} \dots(13)$$

Donde:

P: Carga axial de compresión en las columnas

Ag: Área bruta de las columnas

f'c: Resistencia de diseño de concreto estructural

Luego, por ejemplo para las columnas más cargadas con f'c=210 kgf/cm² y número de pisos de 2 a 5, tenemos:

Tabla n.º 5.4: Pre dimensionamiento de columnas.

Nro. de pisos	P=At x w (kgf)	Ag (cm ²)	Dimensiones redondeadas (cm x cm)
2	88920.00	941	25x40 ó 30 x 35
3	133380.00	1411	25x55 ó 30 x 50
4	177840.00	1882	25x75 ó 30 x 65
5	222300.00	2352	25x95 ó 30 x 80

Pre dimensionamiento de Placas:

En concordancia a los criterios establecidos en [32] y el procedimiento descrito en [34], se ha deducido la siguiente expresión:

$$\sum L_i \cdot b_i \geq \%VP \frac{CS \cdot P}{\emptyset \cdot 0.53 \cdot \sqrt{f'_c}} \dots(14)$$

Donde:

$\sum L_i \cdot b_i$: Sumatoria del largo (L_i) multiplicado por el espesor (b_i) de cada

Placa donde L_i y b_i deben estar en cm.

%VP : Porcentaje del cortante basal que reciben las placas (Varía de 0.2 a 0.7 para sistemas duales y entre 0.7 a 1 para sistemas de muros estructurales)

CS : Coeficiente Sísmico = ZUCS/R según RNE E.030

P : Peso sísmico (kgf) = Carga permanente total + % carga viva según RNE E.030.

ϕ : Coeficiente de reducción de resistencia por corte ($\phi=0.85$)
 $f'c$: Resistencia de diseño del concreto estructural

5.1.4. MODELADO DE LAS ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN

Se modelarán como empotramientos en la base de las columnas.

5.1.5. MODELADO DE LA SUPERESTRUCTURA

Se consideran pórticos de concreto armado y placas o muros estructurales.

Se consideran vigas principales en las que se apoyan las losas aligeradas (armada en una sola dirección) y en el otro sentido vigas con responsabilidad sísmica.

Se consideran vigas en voladizo para soportar las losas de los pasillos y aleros de las áreas de circulación horizontal.

5.1.6. MODELADO DEL SISTEMA DE ENTREPISO

Para cargas verticales se considera losas aligeradas, armadas en un sentido (paralelo al eje X), apoyadas en las vigas paralelas a la dirección corta (eje Y). Se considera la losa como diafragma rígido en su propio plano.

5.1.7. CARGAS GRAVITACIONALES

Se consideran las cargas de acuerdo al RNE E.020

Carga viva: 250 Kgf/m² (aulas)

Carga viva: 400 Kgf/m² (pasillo y/o corredores)

Carga viva: 100 Kgf/m² (azotea)

Carga muerta (Piso terminado): 100 Kgf/m²

Carga muerta (peso losa aligerada $h=0.17m$, con bloques de arcilla): 280 Kgf/m²

Carga muerta (peso losa aligerada $h=0.17m$, con bloques de poliestireno expandido (tecnopor)): 216 Kgf/m².

Carga muerta (muros $h= 2.50m$): 675 Kgf/m (ejes con muros soga acoplados lateralmente, ladrillo sólido, número de pisos de 2).

Carga muerta (muros h= 2.50m): 1125 Kgf/m (ejes con tabiques de aparejo cabeza, acoplados lateralmente, ladrillo sólido, para número de pisos de 3 a 5).

Carga muerta (muros h= 2.00m): 405 Kgf/m (ejes con ventanas altas, ladrillo hueco).

Carga muerta (parapetos h= 1.00m): 205 Kgf/m (ejes con ventanas de media altura y pasadizos, ladrillo hueco).

Para el cálculo del peso propio de placas, columnas y vigas, se calculará mediante el programa ETABS con el volumen correspondiente multiplicado por el peso unitario del concreto armado con agregado grueso de grava, siendo éste: 2400 kgf/m³.

5.1.8. CARGAS LATERALES DE SISMO

Para cuantificar las cargas de sismo, se ha seguido lo establecido en la Norma RNE E.030 vigente, los parámetros y la expresión para el cálculo del Cortante Basal Sísmico (V_B), es $V_B = ZUSC / R \times P_s$, (con P_s = Peso sísmico) son $Z=0.45$, $U=1.5$, $TP=0.6$, $TL=2$, $la=1$, $lp=1$, teniéndose:

$$V_B = 0.295 P_s$$

(Corresponde a estructuración de muros estructurales con $R=6$)

De forma similar se calcula el CS para $R=7$, que corresponde a estructuración Dual:

$$V_B = 0.253 P_s$$

En los modelos estructurales, se ha identificado que los periodos fundamentales, son:

Tabla n.º 5.5: Rango de periodos de los modelos estructurales

Nro. pisos	Modelo menos rígido Periodo "T_{máx}" (seg.)	Modelo más rígido Periodo "T_{mín}" (seg.)	Periodo promedio "T_{prom}" (seg.)
2	0.323	0.182	0.253
3	0.459	0.250	0.355
4	0.456	0.282	0.369
5	0.517	0.317	0.417

Luego, el gráfico correspondiente de la pseudo-aceleración espectral, para R=6 y R=7, es:

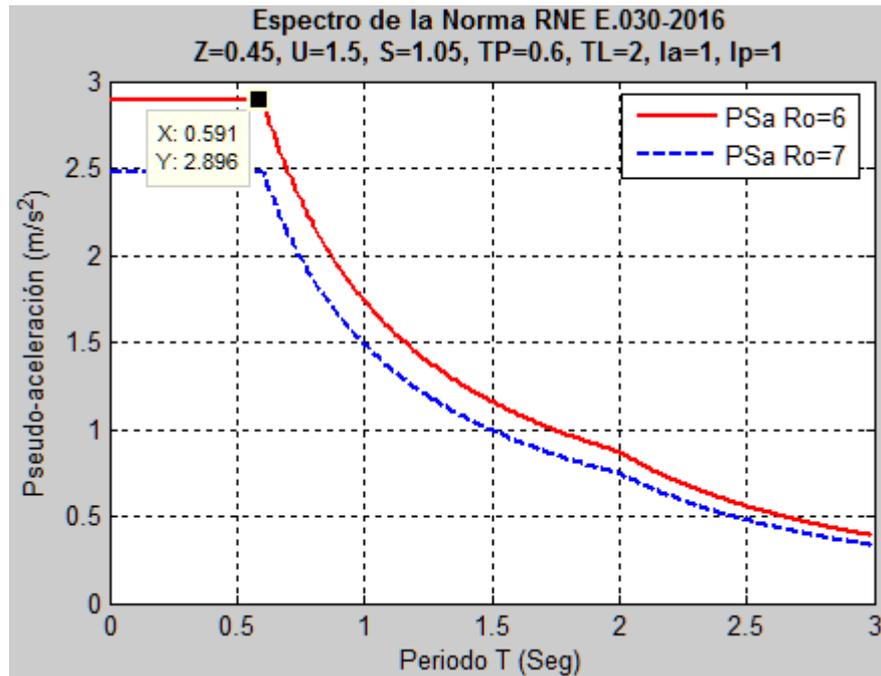


Figura n.º 5.1.- Gráfico del espectro de pseudo-aceleraciones.

Se observa que en todos los casos, la pseudo-aceleración correspondiente está en la zona plana del espectro.

5.2. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

5.2.1. MÉTODO DE DISEÑO PARA ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO

Se considera el método de Diseño por Resistencia, y se realiza según la norma E.060.

Matemáticamente el método de diseño por resistencia se establece como sigue:

$$R_u \leq \phi R_n \dots(15)$$

Donde: R_u : Resistencia demandada al elemento estructural
 R_n : Resistencia nominal del elemento estructural
 ϕ : Factor de reducción de Resistencia (ver tabla 5.4)

Tabla n.º 5.6: Valor del factor de reducción de Resistencia (ϕ), [15]:

Solicitud	ϕ
Flexión	0.90
Tracción y Flexo-tracción	0.90
Cortante y/o Torsión	0.85
Compresión y Flexo-compresión:	
-Confinamiento con espirales	0.75
-Confinamiento con estribos	0.70
Aplastamiento en el concreto	0.70
Concreto simple (sin refuerzo)	0.65

Las combinaciones de carga que se han tomado de [32], E.060 para el análisis y diseño estructural, son:

$$U = 1,4 \text{ CM} + 1,7 \text{ CV} \quad \dots(16)$$

$$U = 1,25 (\text{CM} + \text{CV}) \pm \text{CS} \quad \dots(17)$$

$$U = 0,9 \text{ CM} \pm \text{CS} \quad \dots(18)$$

Donde:

- U : Carga última de diseño
- CM : Carga Muerta
- CV : Carga Viva
- CS : Carga de Sismo

5.2.2. MÉTODO DE DISEÑO PARA LOS TABIQUES DE ALBAÑILERÍA (PUNTALES A COMPRESIÓN)

Según [29] y [32], los tabiques, no portantes a cargas gravitacionales pero si acoplados a la deformación lateral de la estructura, es decir no aislados en caso de sismo, pueden incrementar sustancialmente la rigidez lateral del pórtico (lo que se ha considerado en el presente caso), luego el método de diseño es por resistencia, debiéndose cumplir la siguiente inecuación:

$$F_{act.} < \text{mín}(R_c, R_t, R_s) \quad \dots(19)$$

Donde:

$$R_c = 0.12 \cdot f'_m \cdot D \cdot t \quad \dots(20) \quad \dots \text{Falla por aplastamiento}$$

$$R_t = 0.85 \cdot \sqrt{f'_m} \cdot D \cdot t \quad \dots(21) \quad \dots \text{Falla por tracción diagonal}$$

$$R_s = \frac{f_s \cdot D \cdot t}{1 - 0.4 \frac{h}{L}} \quad \dots(22) \quad \dots \text{Falla por cizalle}$$

$\text{mín}(R_c, R_t, R_s)$: Fuerza resistente a compresión del tabique.

En las expresiones anteriores:

$F_{act.}$: Fuerza de compresión actuante en el puntal (kgf), calculada en el análisis sísmico elástico para $R=3$ (Nota: en el presente caso se ha hallado este valor a partir del análisis sísmico elástico, multiplicando por 2 el valor fue obtenido del análisis con $R=6$ y por 2.33 si el valor fue obtenido del análisis con $R=7$)

f'_m : Resistencia característica a compresión axial de la albañilería en (kg/cm²)

L : Longitud horizontal del tabique (cm.)

h : Altura vertical del tabique (cm.)

t : Espesor estructural efectivo del tabique (cm.)

D : Longitud diagonal del tabique $D = \sqrt{L^2 + h^2}$ (cm.)

f_s : Resistencia última a cizalle de la albañilería = 4 kgf/cm²



6. PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL Y RESULTADOS DE APLICACIÓN

6.1. PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

Conforme a lo expuesto y presentado en el numeral 3.10 se aplicará el siguiente procedimiento:

- **Paso n.º1:** Se comienza por definir el valor de las variables de diseño $f'c$, t (espesor de los tabiques), tipo de losa aligerada (con bloques de ladrillo o con bloques de tecnopor) así como los valores de f_y , $f'm$, q_{adm} (capacidad portante admisible del suelo). Se tendrá el valor de éstos parámetros como constantes durante el resto del procedimiento.
- **Paso n.º2:** Se define el número de pisos, aulas, la estructuración, pre dimensionamiento de la sección transversal de columnas, placas, vigas y losas, asignándose la geometría y cargas correspondientes, elaborándose el modelo físico matemático en ETABS. Es importante precisar que en el sentido corto (Y), se comienza por definir el ancho de placas y columnas (dimensión paralela al eje Y) en función del ancho mínimo, considerándose para ello la longitud mínima de anclaje del refuerzo de vigas (ej. acero corrugado de 5/8" con gancho doblado a 90°).
- **Paso n.º3:** Se realiza un primer análisis estructural a efectos de cuantificar las fuerzas internas para la optimización de la sección transversal de las vigas (tanto en el sentido corto "Y" como en el sentido largo "X").
- **Paso n.º4:** Con los valores del diagrama de Momento flector obtenidos en el primer análisis estructural, se optimiza en forma gráfica la sección transversal de las vigas, lo que se hace tanto para las vigas en el sentido corto "Y" como en el sentido largo "X". Para la construcción grafica del espacio de diseño, se grafican los valores de la función objetivo y restricciones para varios valores discretos del ancho y peralte de las vigas, para ello se utiliza el código "Opt_viga_CA.m" (ver anexos). Al final de este paso se tendrán las dimensiones óptimas para la sección transversal de las vigas. Es decir se habrá realizado una optimización de las sub estructuras correspondientes a las vigas.

Una vez obtenido el espacio de diseño, el procedimiento de inspección gráfica y determinación de los valores de las variables activas que minimizan la función objetivo, de acuerdo con [1], [2], [27] y adaptado a los casos tratados en este trabajo, es el siguiente:

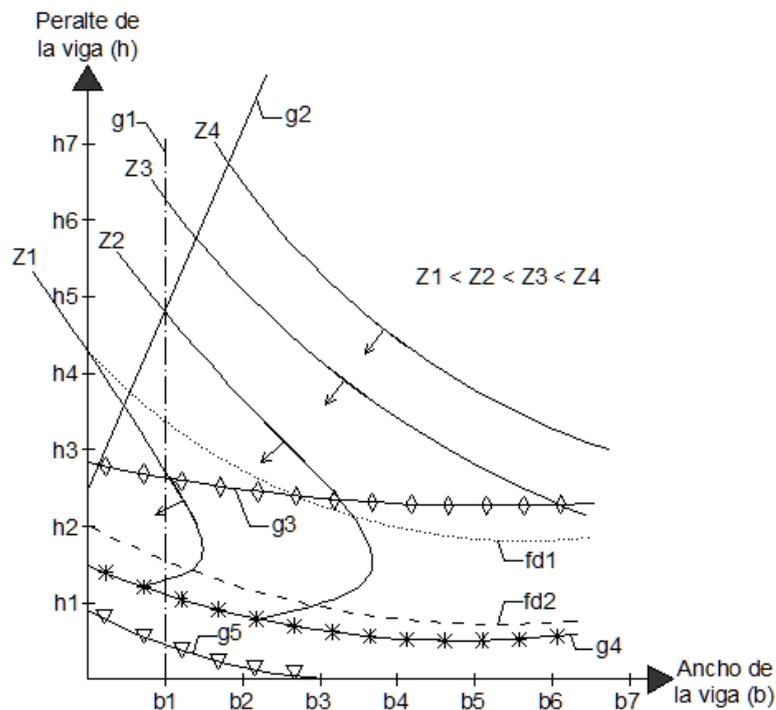


Figura n.º 6.1.- Espacio de diseño para la optimización de la sección transversal de vigas de Concreto Armado.

Tabla n.º 6.1: Descripción de los componentes del espacio de diseño

Etiqueta	Símbolo	Descripción y comentarios
Z_i (familia de curvas acotadas)		Gráfico de la Función objetivo, las curvas representan los puntos (b _i , h _i) correspondientes a diseños de igual costo. Toda la familia o conjunto de curvas (que son proyección de una superficie) corresponden a un mismo o constante $\phi M_n \geq M_{u\text{máx}}$, donde $M_{u\text{máx}}$ es el valor máximo en valor absoluto de la envolvente del Diagrama de Momento Flector de la viga.
g1		Función de restricción de frontera, referido al ancho mínimo de las vigas (ej. 25 cm)
g2		Función de restricción, por relación de aspecto y estabilidad lateral de la viga donde la relación $h/b \leq 4$
g3		Función de restricción, delimita el peralte mínimo que debería tener la viga, para que las deflexiones por flexión sean menores o iguales que las admisibles.

g4		Función de restricción, delimita el peralte mínimo que debería tener la viga, para que conjuntamente que el refuerzo, tenga una resistencia $\phi M_n \geq M_{u_{m\acute{a}x}}$.
g5		Función de restricción, delimita el peralte mínimo que debería tener la viga, para que el concreto resista la fuerza cortante.
fd1		Función de comportamiento de la viga por ductilidad, no es restricción si para peraltes mayores que los delimitados, se coloca acero mínimo por tracción mayor al acero calculado por resistencia, para prevenir falla frágil.
fd2		Función de comportamiento de la viga por ductilidad, no es restricción si para peraltes menores que los delimitados, se coloca acero en compresión para equilibrar el acero en tensión mayor que el correspondiente a la cuantía máxima, para prevenir falla frágil o en este caso sobre reforzada.

Inspección del espacio de diseño: Se parte por identificar la tendencia hacia donde se minimiza la función objetivo "Z", en este caso se minimiza según el sentido que marcan las flechas de gradiente, luego se identifica cuáles son las restricciones activas, en este caso son las funciones de restricción g1, g2 y g3, no hay otra función de restricción que las ubique en la zona de valores no factibles. A efectos de identificar de mejor manera las restricciones en el procedimiento, en la figura 6.2 se ha achurado la región de diseños factibles, representada por las combinaciones posibles de (bi, hi) que satisfacen las restricciones, sin embargo dentro de esta región se observa que la función objetivo tiene diferentes valores siguiendo la tendencia $Z_1 < Z_2 < Z_3 < Z_4$.

Es importante precisar que si bien en la figura 6.2 se ha realizado el achurado de la región de diseños factibles, no es imprescindible realizar esta acción, puesto que para determinar el óptimo es necesario solamente el gráfico de la función objetivo y la determinación de las funciones de restricción activas.

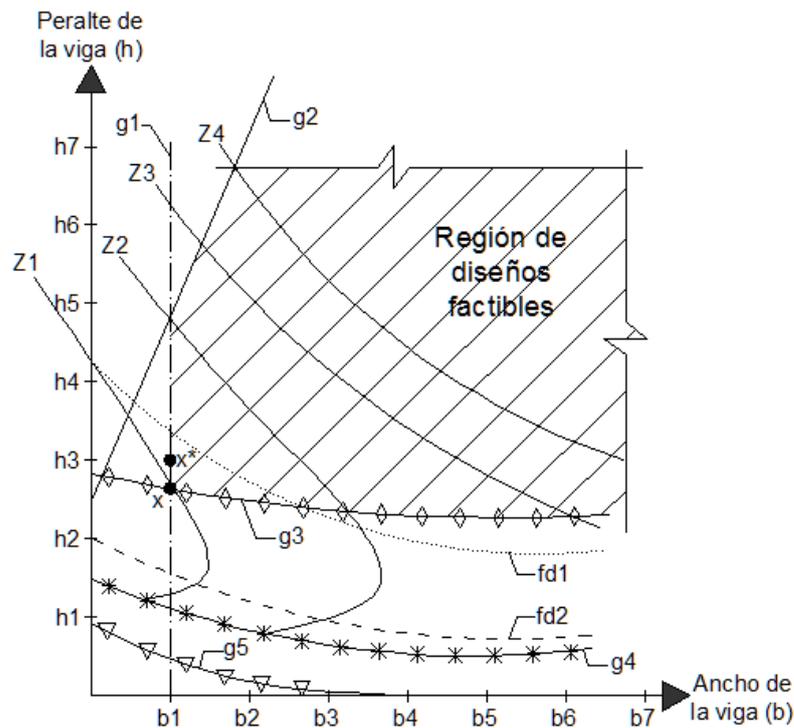


Figura n.º 6.2.- Espacio de diseño con achurado de la región de diseños factibles (delimitada por las restricciones activas).

Determinación del punto óptimo: Por inspección se observa que teóricamente el óptimo se encuentra en la ubicación del punto x , donde se intersectan el menor valor elegible de la función objetivo y las curvas que corresponden a las restricciones g_1 y g_3 (ver figura 6.2), sin embargo los valores de b y h correspondientes al punto x no son enteros, por lo que por criterios prácticos constructivas el punto óptimo se elige en la ubicación x^* que es cercano al punto teórico x , pero que corresponden a valores enteros y prácticos para las variables b y h .

- **Paso n.º5:** Con las dimensiones optimizadas de la sección transversal de las vigas, se modifica el modelo físico matemático y se realiza un nuevo análisis estructural, esta vez a efecto de calcular las derivas en el sentido corto "Y", así como la relación $F_{act.} / F_{Res.}$ en los tabiques de albañilería (modelados como puntales a compresión, en la interacción tabique-pórtico).
- **Paso n.º6:** Se verifica que la relación $F_{act.} / F_{Res.} < 1$ y si la deriva de entrepiso máxima en el sentido corto "Y" es menor al límite de 0.005. En caso que $F_{act.} / F_{Res.} > 1$ y/o la deriva máxima de entrepiso en el sentido corto "Y" sea mayor al valor permisible, se comienza primero por incrementar el espesor de los muros de albañilería (ej. cambiamos el espesor de los muros de sogá a cabeza), se vuelve a analizar estructuralmente y verificamos si la relación $F_{act.} / F_{Res.} < 1$, así como la deriva máxima de entrepiso, en caso los límites sean nuevamente superados y ya

se haya alcanzado el espesor práctico máximo de los tabiques, se incrementa el espesor de las placas en el sentido corto a razón de incrementar 5 a 10 cm. en cada paso hasta obtener que el valor de la relación $F_{act.} / F_{Res.} < 1$ y que la deriva máxima de entrepiso sea inferior al valor límite máximo.

- **Paso n.º7:** Una vez que en el sentido corto “Y” se ha obtenido los valores del ancho de placas, columnas y espesor de los muros de albañilería que satisfagan los criterios de rigidez lateral (derivas inelásticas de entrepiso) y resistencia en los muros de albañilería, corresponde hallar los valores del largo de placas y peralte de columnas paralelas al sentido largo “X”, a efectos de identificar los valores óptimos por inspección gráfica, se eligen valores discretos: tres valores para el largo de placas y tres valores para el peralte de columnas, todos en la cercanía de las restricciones activas (derivas en “X” y límite entre Sistema Dual y Pórticos)
- **Paso n.º8:** Para cada combinación de valores (9 en total) se necesita: modificar el modelo físico matemático, analizar y realizar el diseño estructural con ETABS, luego exportar en MS EXCEL y grabar los archivos correspondientes (habrá un total de 9 archivos en formato *.xls).
- **Paso n.º9:** Se grafica el espacio de diseño con los valores de la función objetivo (Costo Directo de Estructuras) así como las funciones de restricción, teniendo en el eje horizontal los valores del largo de las placas (paralelas al sentido largo de la edificación) y en el eje vertical los valores del peralte de las columnas (paralelas al sentido largo de la edificación), para ello empleamos el código “Opt_edificio_CA.m” (ver anexos).

El espacio de diseño (todavía sin achurado de la región de diseños factibles), es el siguiente: (ver figura 6.3):

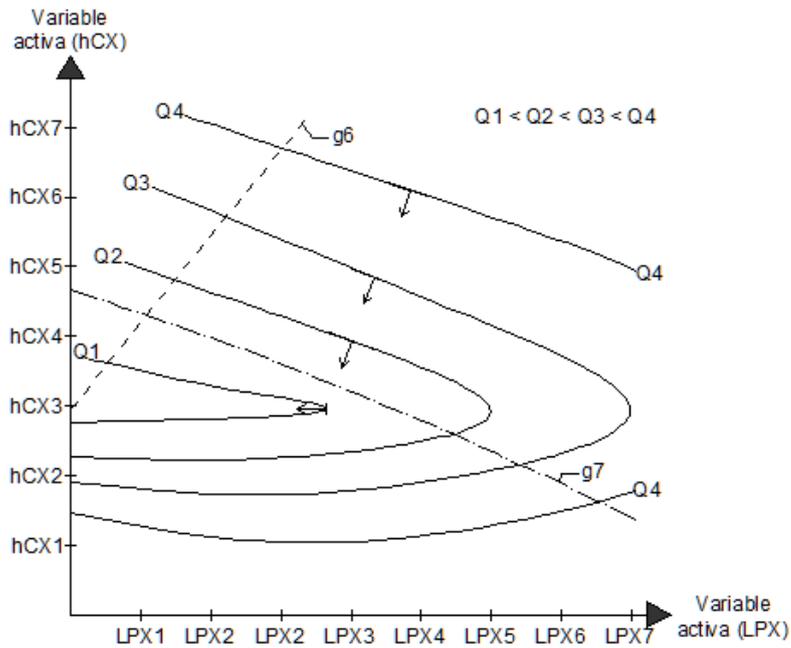


Figura n.º 6.3.- Espacio de diseño para optimización de sección transversal de columnas y placas.

Tabla n.º 6.2: Descripción de los componentes del espacio de diseño

Etiqueta	Símbolo	Descripción y comentarios
Qi (familia de curvas acotadas)		Gráfico de la Función objetivo, las curvas representan los puntos (bi, hi) correspondientes a diseños de igual costo.
g6	- - - -	Función de restricción por sistema estructural (eje X). Para edificaciones de uso educativo, define el límite entre diseños factibles con sistema estructural Dual y diseños no elegibles con sistema estructural de pórticos. Los diseños elegibles están en el lado inferior hacia abajo de la curva.
g7	- · - -	Función de restricción por rigidez lateral en el sentido largo, define el límite entre diseños factibles con deriva inelástica menor a 0.007 y diseños no elegibles con deriva inelástica mayor a 0.007. Los diseños elegibles están en el lado superior hacia arriba de la curva.

Luego, el espacio de diseño, con la región de diseños factibles achurada y delimitada por las funciones de restricción activas, es:

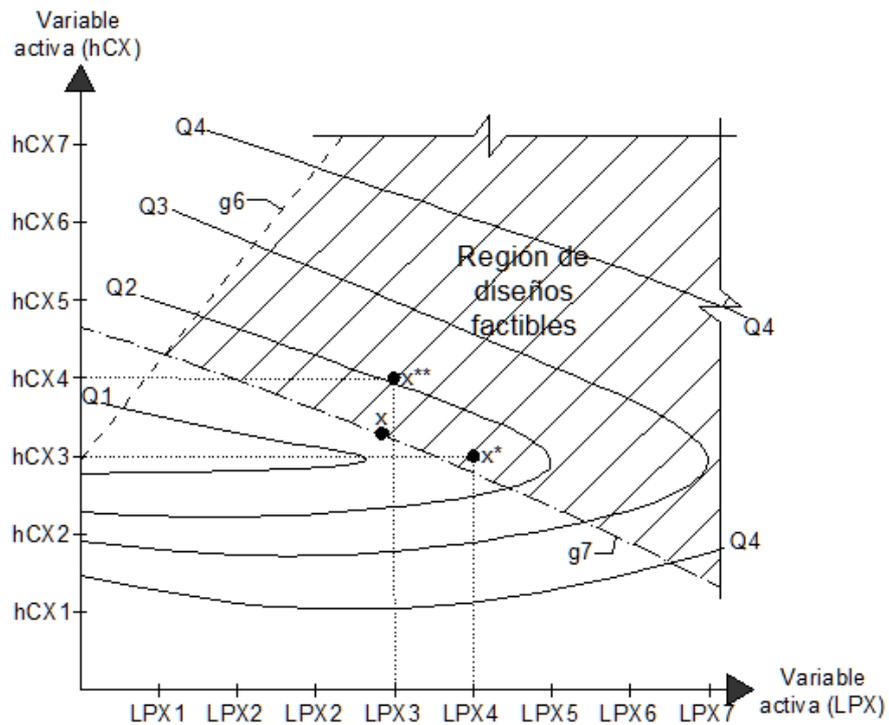


Figura n.º 6.4.- Espacio de diseño con achurado de la región de diseños factibles (delimitada por las restricciones activas).

- **Paso n.º10:** Por inspección gráfica del espacio de diseño (figura 6.4), se obtiene la combinación óptima de valores que minimicen el valor de la función objetivo.

Al respecto:

Determinación del punto óptimo: Por inspección se observa que teóricamente el óptimo se encuentra en la ubicación del punto x , donde se intersectan el menor valor elegible de la función objetivo y la curva que corresponde a la restricción $g7$ (ver figura 6.4), sin embargo los valores de LPX y hCX correspondientes al punto x no son enteros, por lo que por criterios prácticos constructivas el punto óptimo se podría elegir en la ubicación x^* ó x^{**} que son cercanos al punto teórico x , luego, comparando los puntos x^* y x^{**} , el óptimo se determina en la ubicación de x^* , que corresponde a valores enteros y prácticos desde el punto de vista constructivo de las variables LPX y hCX y con el menor valor de la función objetivo.

- **Paso n.º11:** Se modifica el modelo físico matemático en ETABS con los valores correspondientes a la combinación óptima (peralte de placas y columnas) y se vuelve a realizar el análisis estructural.
- **Paso n.º12:** Con los valores de los últimos diagramas de momento flector obtenidos en el último análisis estructural (del paso 10), se vuelve a realizar la optimización de la sección

transversal de las vigas. para ello se utiliza el código "Opt_viga_CA.m" (ver anexos)

- **Paso n.º13:** Se comparan las dimensiones obtenidas en la optimización inicial (Paso 4) y final (Paso 11) de la sección transversal de las vigas, teniéndose dos casos:
 - Si los valores son diferentes, se necesitaría regresar al Paso 5 refinándose el valor de la sección transversal de las vigas en función a los valores obtenidos en el Paso 11
 - En caso los referidos valores sean iguales, entonces el procedimiento habría concluido satisfactoriamente.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del procedimiento:



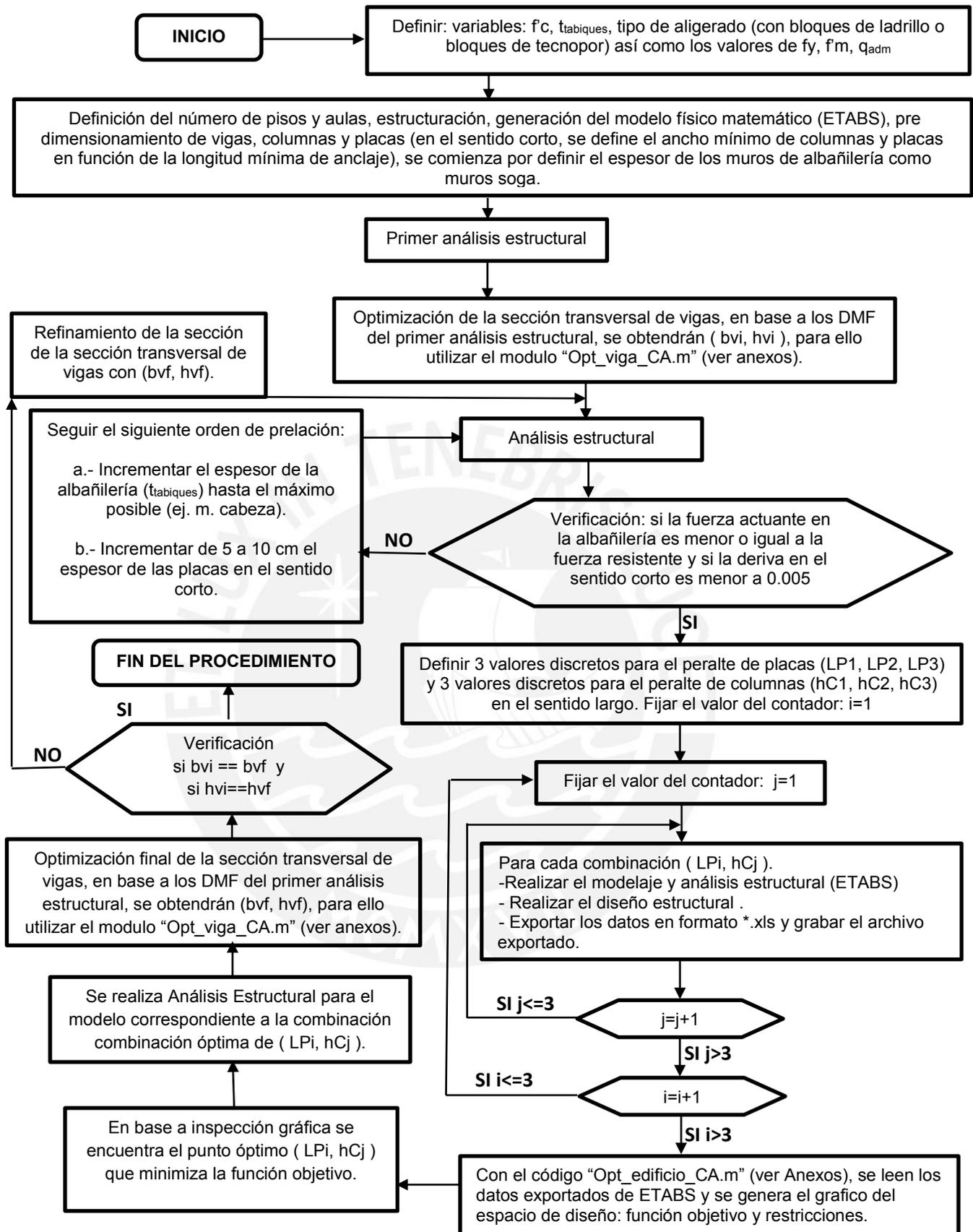


Figura n.º 6.5: Diagrama de flujo del procedimiento de optimización estructural aplicado.

6.2. COMENTARIOS RESPECTO AL PROCEDIMIENTO:

- La metodología se basa en la construcción y posterior inspección gráfica del espacio de diseño en la que se obtiene un “óptimo relativo” correspondiente a los valores de las variables pasivas y activas. Luego, por comparación de varios “óptimos relativos” correspondientes a otros valores de las variables activas y pasivas, se obtendrá el “óptimo general”, precisándose que el procedimiento dentro de la teoría de optimización se clasifica como un método basado en criterios.
- Es importante precisar que para poder comparar los diferentes diseños correspondientes a la variación de las variables, la meta es obtener una cuantificación económica a nivel de costo directo de estructuras, para ello no es necesario llegar a diseños y planos definitivos sino a estimaciones con criterios técnicamente razonables, para ello se ha considerado:

6.2.1. CRITERIOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL REFUERZO

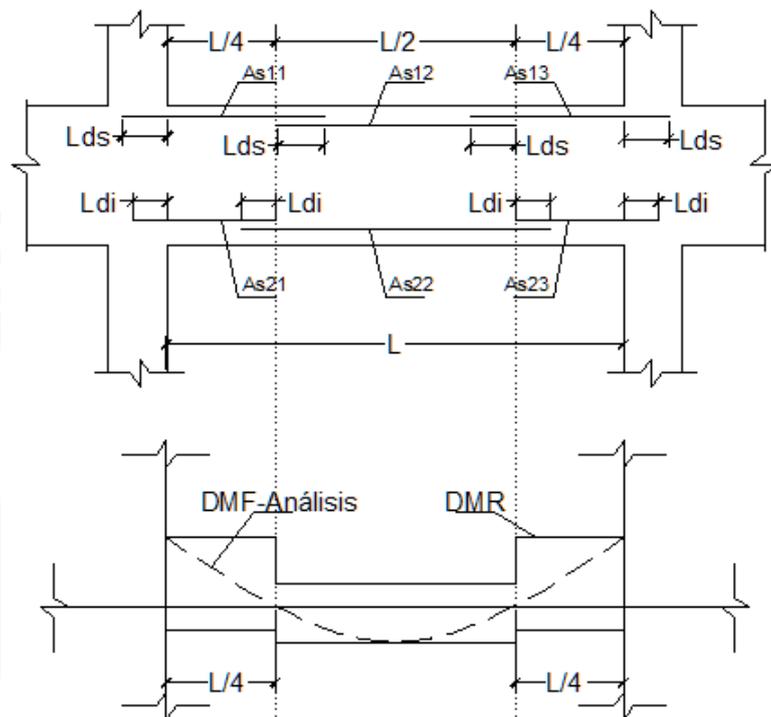
Los criterios asumidos para poder cuantificar el refuerzo en columnas, placas y vigas no corresponden a cómo deberían realizarse los planos o diseños definitivos, pues no es el objetivo, sino a simplificaciones asumidas para fines de estimar las longitudes del refuerzo y así terminar las cantidades del componente correspondiente a acero de refuerzo en el costo directo. Se han tomado los siguientes criterios:

Vigas:

En el caso de las vigas, el ETABS arroja seis valores correspondientes a las áreas de acero en cada ubicación (superior, inferior y a la izquierda, centrada y a la derecha), luego para cuantificar el refuerzo es necesario estimar la longitud de las varillas, las estimaciones se han realizado según las figuras 6.6, 6.7 y 6.8. Se puede observar que los criterios asumidos tienen carácter conservador, con errores por exceso, que tienen por meta compensar errores por defecto implícitos (ej. se han tomado las áreas provenientes del ETABS sin redondear a diámetros comerciales, se ha considerado en todos los casos longitudes de anclaje correspondientes a varillas de $\varnothing 5/8$ ”), sin embargo, no se afecta el resultado de la comparación entre los diversos modelos para la determinación de los óptimos relativos, porque el criterio ha sido uniforme para todos los modelos en comparación.

CASO 1: VIGAS PRINCIPALES

$$\begin{array}{c} \text{As11} \geq \text{As12} \leq \text{As13} \\ \text{As21} \leq \text{As22} \geq \text{As23} \end{array}$$



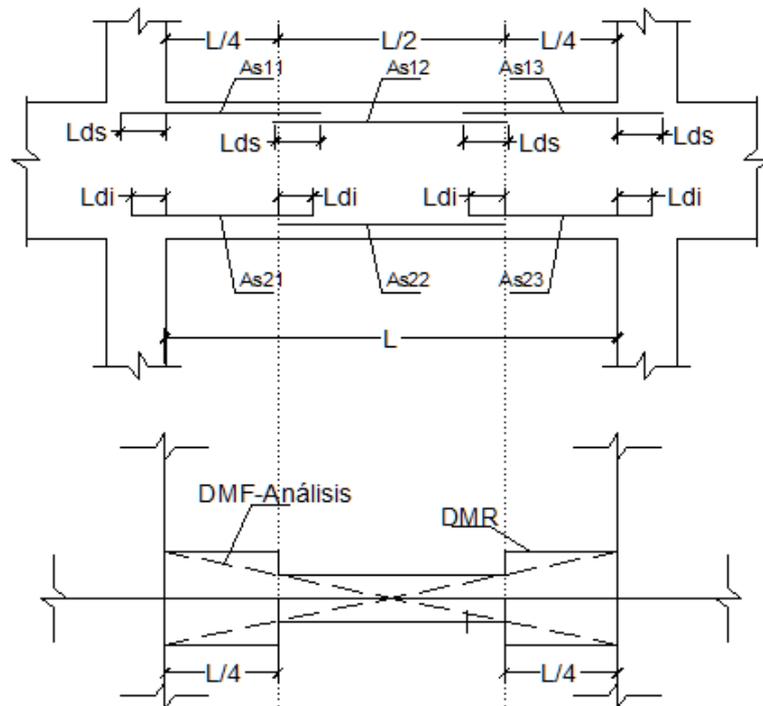
$$L_{11} = \frac{L}{4} + 2 \cdot Lds; \quad L_{12} = \frac{L}{2}; \quad L_{13} = \frac{L}{4} + 2 \cdot Lds$$

$$L_{21} = \frac{L}{4} + Ldi; \quad L_{22} = \frac{L}{2} + 2 \cdot Ldi; \quad L_{23} = \frac{L}{4} + Ldi$$

Figura n.º 6.6: Criterio para estimar las longitudes del refuerzo en vigas principales ante cargas gravitacionales. Dónde: L_{ij} =Longitud de la barra con área de acero As_{ij} , L =Luz libre de la viga, Lds : longitud de anclaje para barras superiores, Ldi : longitud de anclaje para barras inferiores, DMF-Análisis = Envolvente última del diagrama del momento flector proveniente del análisis, DMR: Diagrama del momento resistente nominal.

CASO 2: VIGAS CON RESPONSABILIDAD SÍSMICA

$$\begin{array}{c} As_{11} \geq As_{12} \leq As_{13} \\ As_{21} \geq As_{22} \leq As_{23} \end{array}$$



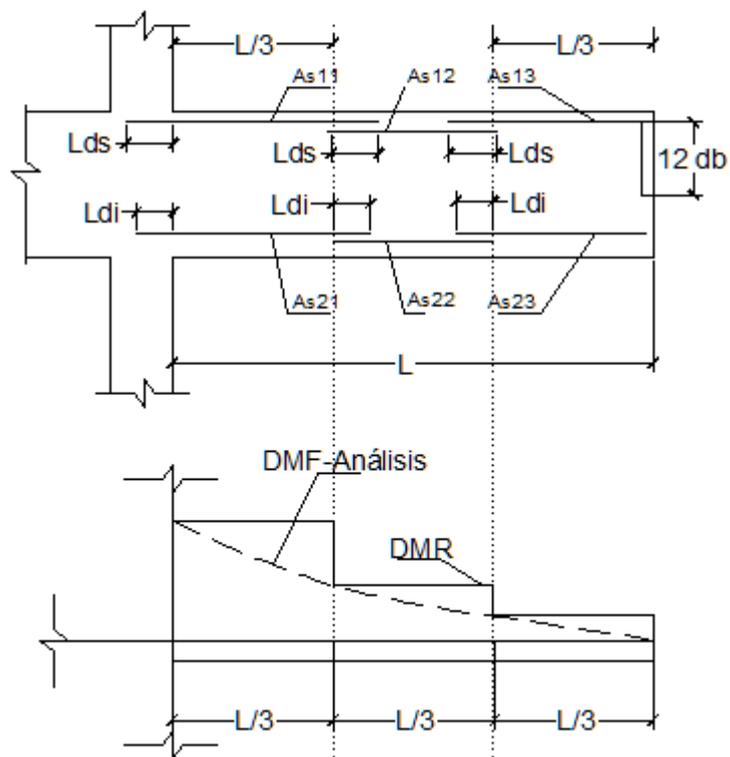
$$L_{11} = \frac{L}{4} + 2 \cdot L_{ds}; \quad L_{12} = \frac{L}{2}; \quad L_{13} = \frac{L}{4} + 2 \cdot L_{ds}$$

$$L_{21} = \frac{L}{4} + 2 \cdot L_{di}; \quad L_{22} = \frac{L}{2}; \quad L_{23} = \frac{L}{4} + 2 \cdot L_{di}$$

Figura n.º 6.7: Criterio para estimar las longitudes del refuerzo en vigas con responsabilidad sísmica. Dónde: L_{ij} =Longitud de la barra con área de acero As_{ij} , L =Luz libre de la viga, L_{ds} : longitud de anclaje para barras superiores, L_{di} : longitud de anclaje para barras inferiores, DMF-Análisis = Envoltura última del diagrama del momento flector proveniente del análisis, DMR: Diagrama del momento resistente nominal.

CASO 3: VIGAS EN VOLADIZO

$$\begin{array}{c} \text{As11} \geq \text{As12} \geq \text{As13} \\ \text{As21} \geq \text{As22} \geq \text{As23} \end{array}$$



$$L_{11} = \frac{L}{3} + 2 \cdot Lds; \quad L_{21} = \frac{L}{3}; \quad L_{23} = \frac{L}{3} + 12 \cdot db$$

$$L_{21} = \frac{L}{3} + 2 \cdot Ldi; \quad L_{22} = \frac{L}{3}; \quad L_{23} = \frac{L}{3} + Ldi$$

Figura n.º 6.8: Criterio para estimar las longitudes del refuerzo en vigas en voladizo. Dónde: L_{ij} =Longitud de la barra con área de acero As_{ij} , L =Luz libre de la viga, Lds : longitud de anclaje para barras superiores, Ldi : longitud de anclaje para barras inferiores, db : Diámetro de la varilla, DMF-Análisis = Envolvente última del diagrama del momento flector proveniente del análisis, DMR: Diagrama del momento resistente nominal.

COLUMNAS Y PLACAS:

Para cada columna o placa, el ETABS arroja para el refuerzo longitudinal, un único valor correspondiente al área de acero de la sección transversal, luego el refuerzo longitudinal se considera anclado en el nudo superior e inferior. Para cuantificar el refuerzo se ha estimado que tiene una longitud igual a la longitud libre de la columna o placa más las longitudes de anclaje correspondientes a tracción.

6.2.2. DIMENSIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN

Cimientos de columnas y placas:

En concordancia con el modelado de la estructura (ver 5.1.4), la cimentación está sometida en general a esfuerzos combinados de compresión y flexión biaxial. Luego, en el presente caso se han considerado zapatas aisladas. Las zapatas, se dimensionarán en planta por esfuerzos admisibles y debiéndose considerar en las ecuaciones de equilibrio, que el suelo de fundación no resiste esfuerzos de tracción, luego, en este caso:

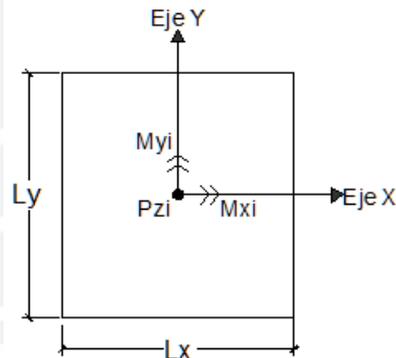


Figura n.º 6.9.- Esquema de fuerzas actuantes sobre una zapata aislada.

Luego, en el gráfico: P_{zi} (Carga axial), M_{xi} (Momento flector en el eje X), M_{yi} (Momento flector en el eje Y), L_x (Largo de la zapata paralelo al eje X), L_y (Largo de la zapata paralelo al eje Y), el subíndice "i" depende del caso de carga de análisis, lo que se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla n.º 6.3: Casos de carga en la cimentación.

Fuerza	Caso $i = DL$	Caso $i = DLS$
P_{zi}	$P_L + P_D$	$P_L + P_D \pm 0.8P_s$
M_{xi}	$M_{xL} + M_{xD}$	$M_{xL} + M_{xD} \pm 0.8M_{xS}$
M_{yi}	$M_{yL} + M_{yD}$	$M_{yL} + M_{yD} \pm 0.8M_{yS}$

En la tabla: D = Carga muerta,
L = Carga viva,
S = Carga de sismo.

Luego, en concordancia con [16] y RNE E.060, las dimensiones de la zapata y las cargas aplicadas, deben cumplir las siguientes inecuaciones:

$$\frac{P_{ZDL}}{L_x \cdot L_y} + \frac{6 \cdot M_{xDL}}{L_x \cdot L_y^2} + \frac{6 \cdot M_{yDL}}{L_y \cdot L_x^2} < q_{adm} \dots(23)$$

$$\frac{P_{ZDLS}}{L_x \cdot L_y} + \frac{6 \cdot M_{xDLS}}{L_x \cdot L_y^2} + \frac{6 \cdot M_{yDLS}}{L_y \cdot L_x^2} < 1.3 \cdot q_{adm} \dots(24)$$

Donde:

q_{adm} : Capacidad de carga admisible en el suelo

Cimientos de tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura:

Considerando que se han modelado como muros no portantes (puntales en compresión), se considera que deberían tener solamente cimientos corridos, pero que sin embargo, éstos deben estar apoyados directamente sobre las zapatas de las columnas en el borde de los tabiques. Alternativamente los tabiques podrían apoyarse sobre vigas de conexión entre zapatas. Cabe precisar que en el presente trabajo no se han modelado la cimentación propiamente dicha de los tabiques porque éstos se han considerado como puntales en compresión conectados en la base de las columnas en concordancia con RNE E.070. Así también es importante precisar que el costo de los cimientos de corridos se consideraría constante en todos los modelos en comparación por lo que no se afecta el proceso de identificación de los diseños óptimos relativos.

6.3. OPTIMIZACIÓN PASO A PASO DEL EDIFICIO DE 3 PISOS Y 3 AULAS POR PISO

Se seguirá el procedimiento descrito en 6.1:

- **Paso n.º1:** Se definen:

Variables de diseño generales:

$f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (mezclado en obra)

$t = 23 \text{ cm.}$ (espesor efectivo de los tabiques de albañilería)

Aligerado $e=17 \text{ cm.}$ (con bloques de tecnopor)

Así también, se tienen los siguientes parámetros:

$f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$

$f'm = 65 \text{ kg/cm}^2$

$q_{adm} = 2.00 \text{ kgf/cm}^2$ (capacidad portante admisible del suelo)

- **Paso n.º2:** Se define el número de pisos, aulas, la estructuración, pre dimensionamiento de la sección transversal de columnas, placas, vigas y losas:

Tabla n.º 6.4: Características iniciales del modelo a optimizar

Descripción	Valor
Número de pisos	3
Número de aulas por piso	3
Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor muros de albañilería	23 cm.
Espesor losa aligerada (aligerado con bloques de tecnopor)	17 cm.
Sección de vigas (b x h)	25x60 cm. (excepto en el voladizo)
Columnas "L" de esquina	40x40x25 cm.
Columnas ejes B, D, F	40x40 cm.
Placas T ejes C, E	50x40x25 cm.

Planta típica:



Figura n.º 6.10.- Estructuración en Planta.

- **Paso n.º3:** Las fuerzas internas en las vigas, correspondientes al primer análisis estructural es:

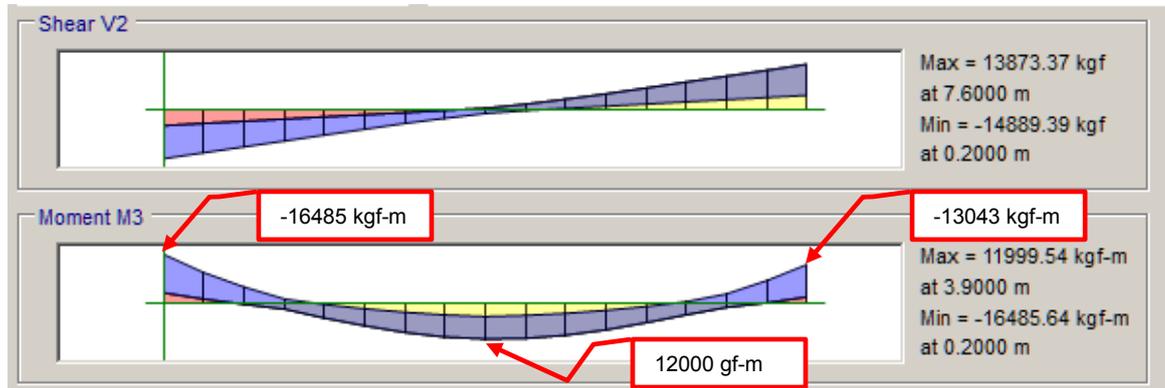


Figura n.º 6.11.- DFC y DMF vigas ejes B, D, F (en el sentido corto "Y")

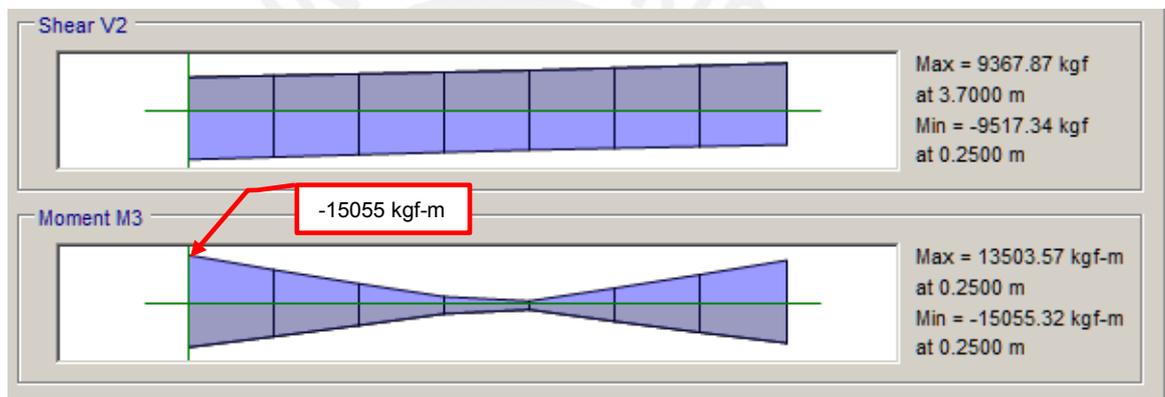


Figura n.º 6.12.- DFC y DMF vigas ejes 2, 4 (en el sentido largo "X")

- **Paso n.º4:** Se genera el espacio de diseño para la optimización de la sección transversal de las vigas:

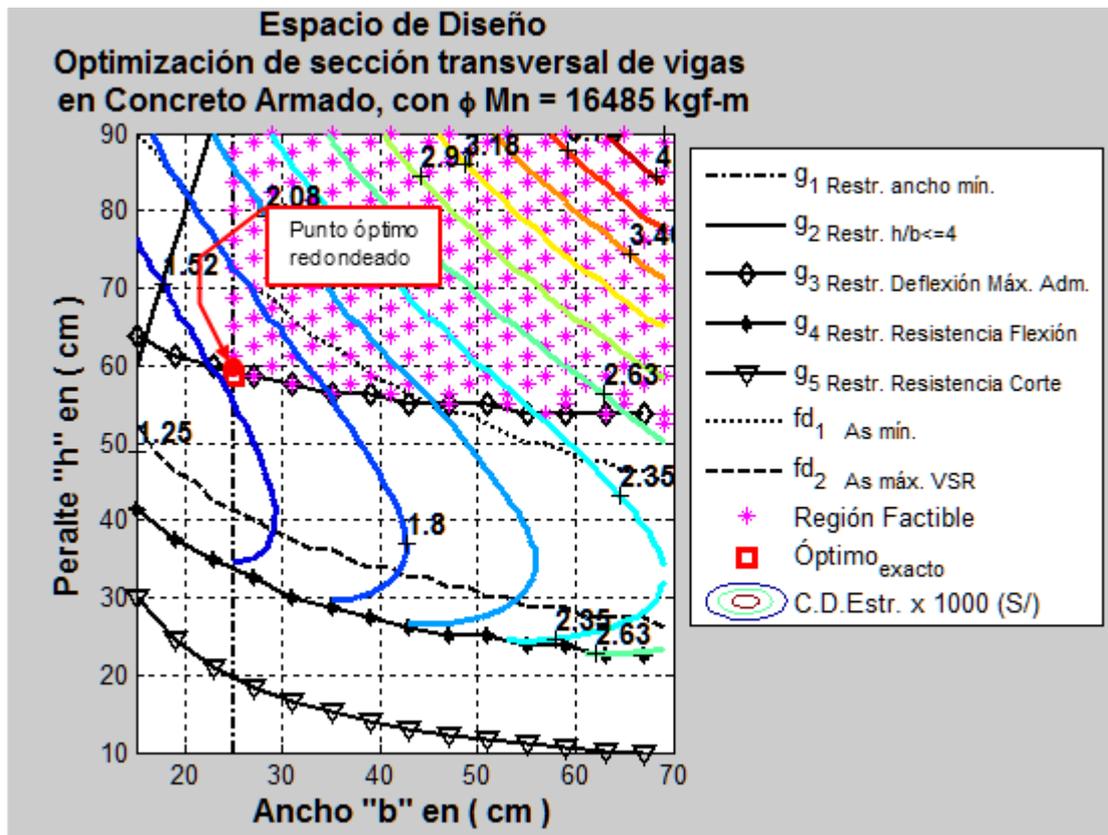


Figura n.º 6.13.- Espacio de diseño para optimización de sección transversal de las vigas. De la inspección se identifica la sección de 25x60 cm. (b x h) y se verifica el pre dimensionamiento inicial.

- **Paso n.º5:** Se analiza estructuralmente con las dimensiones optimizadas de las vigas y se calcula la relación del esfuerzo en los muros de albañilería y la deriva en el sentido corto "Y"

Tabla n.º 6.5: Verificación de esfuerzos en los tabiques de albañilería y derivas en el sentido corto

Descripción	Valor
Relación Fuerza actuante / Fuerza resistente en los tabiques de albañilería	0.742
Deriva máxima en "Y"	0.0032

- **Paso n.º6:** Se verifica si el esfuerzo en la albañilería es menor al admisible y si la deriva de entrepiso máxima en el sentido corto "Y" es menor al límite de 0.005.
- **Paso n.º7:** Se eligen los siguientes valores discretos del peralte de placas y columnas en el sentido largo "X":

Valores para el largo de las placas en X : 50, 70 y 90 cm.
 Valores para el peralte de las columnas en X: 40, 65 y 90 cm.

Luego para cada pareja de valores de calcula el valor de la función objetivo y restricciones.

- **Paso n.º8:** Para cada combinación de valores (9 en total) se necesita: modificar el modelo físico matemático, analizar estructuralmente con el ETABS, realizar el diseño estructural con el ETABS, exportar en MS EXCEL, y grabar los archivos correspondientes (habrá un total de 9 archivos en formato *.xls).
- **Paso n.º9:** Con ayuda del código Opt_edificio_CA.m (ver anexos), se grafica el espacio de diseño, para ello, se tiene:

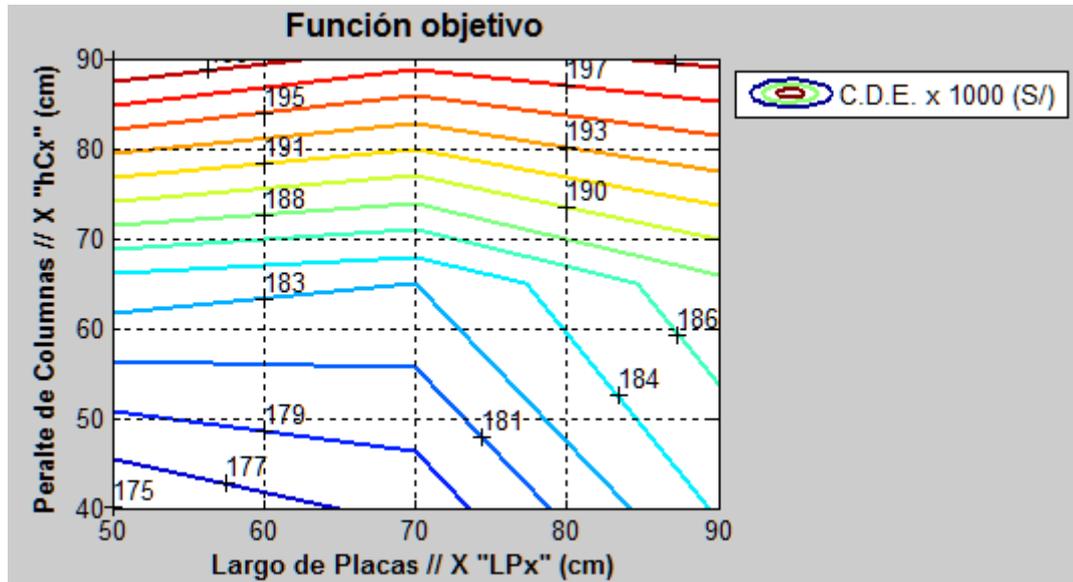


Figura n.º 6.14.- Gráfico de la función objetivo

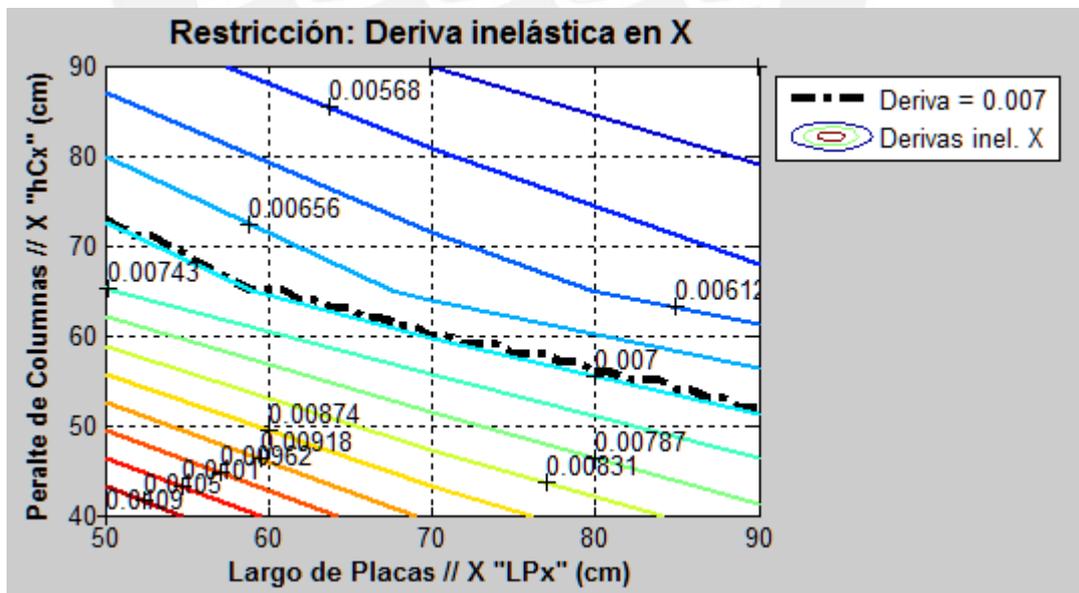


Figura n.º 6.15.- Gráfico de la función de restricción: Deriva inelástica de entresuelo en "X"

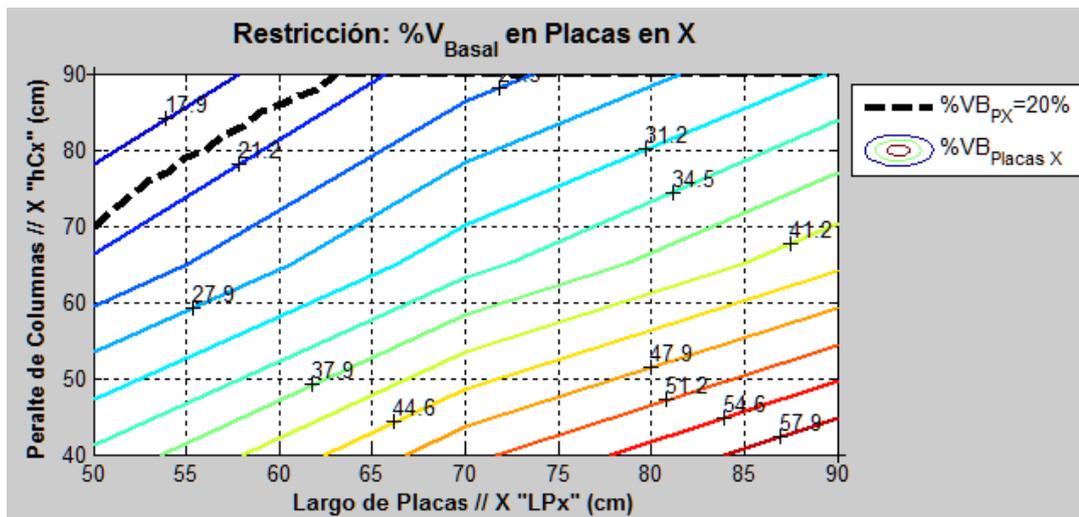


Figura n.º 6.16.- Gráfico de la función de restricción: relación de cortante que reciben las placas respecto al Cortante Total.

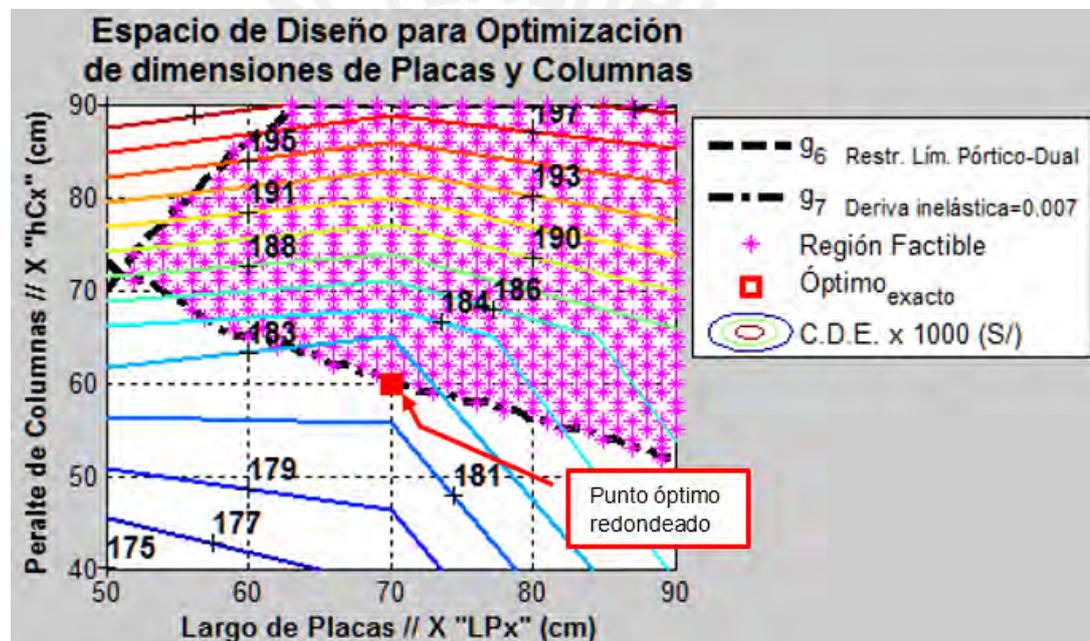


Figura n.º 6.17.- Gráfico del espacio de diseño completo (por superposición del gráfico de la función objetivo y de la función límite de restricción)

- **Paso n.º10:** Por inspección gráfica, se identifica el punto $L_{px}=70$ cm y $h_{Cx}=60$ cm, como el punto óptimo que minimiza la función objetivo (considerando dimensiones redondeadas múltiplos de 5 cm).
- **Paso n.º11:** Se modifica el modelo físico matemático en ETABS con los valores correspondientes a la combinación óptima (peralte de placas y columnas) y se vuelve a realizar el análisis estructural, para obtener los valores del DMF finales de las vigas.

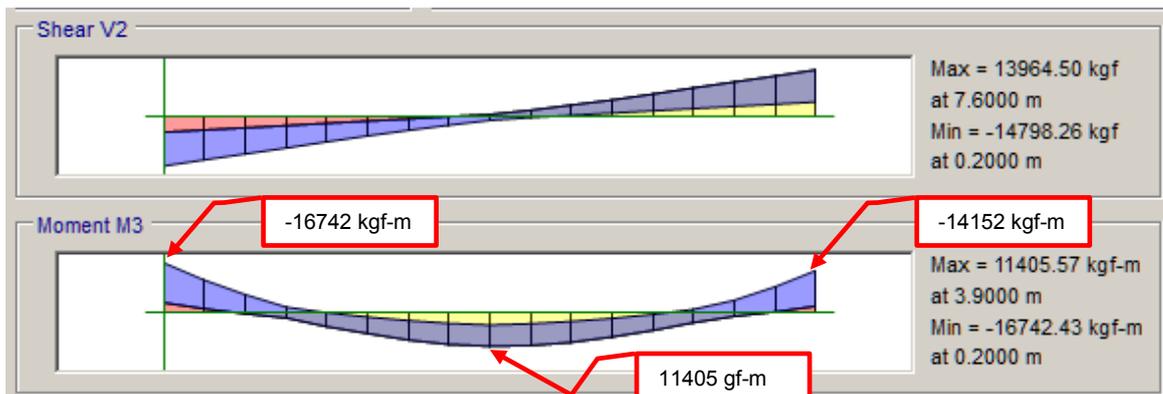


Figura n.º 6.18.- DFC y DMF vigas ejes B, D, F (en el sentido corto “Y”). Se observa una diferencia máxima de alrededor de 257 kgf-m respecto al primer DMF para el momento máximo, obtenido en el Paso 3.

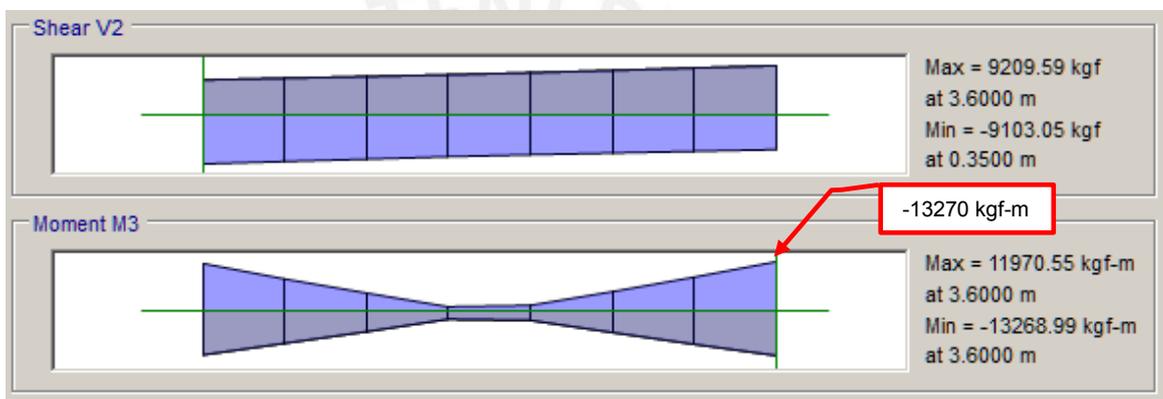


Figura n.º 6.19.- DFC y DMF vigas ejes 2, 4 (en el sentido largo “X”). Se observa una diferencia máxima de alrededor de 1785 kgf-m respecto al primer DMF obtenido en el Paso 3, pero sin embargo este valor es inferior a 16742 kfg-m, de las vigas principales, el cual controlaría el diseño.

- **Paso n.º12:** Se vuelve a realizar la optimización de la sección transversal de las vigas.

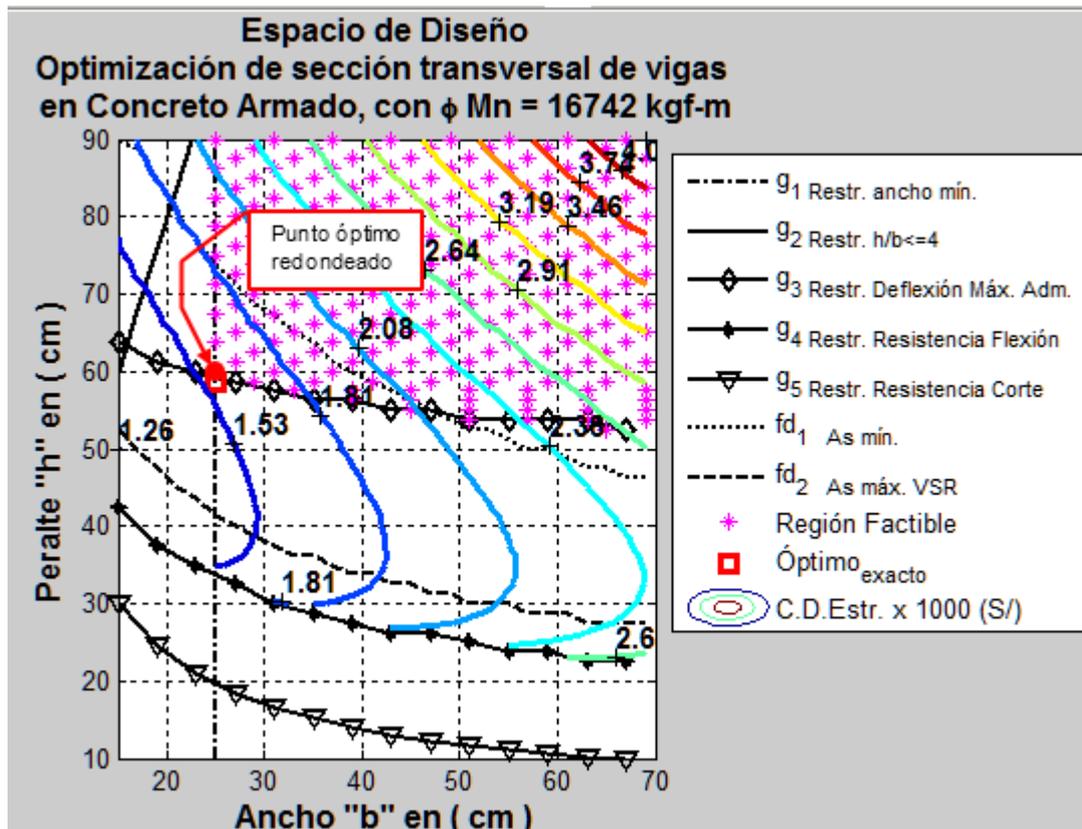


Figura n.º 6.20.- Espacio de diseño para optimización final de la sección transversal de las vigas. De la inspección se confirma la sección de 25x60 cm.

- **Paso n.º13:** Se comparan las dimensiones obtenidas en la optimización inicial (Paso 4) y final (Paso 11) de la sección transversal de las vigas, teniéndose:

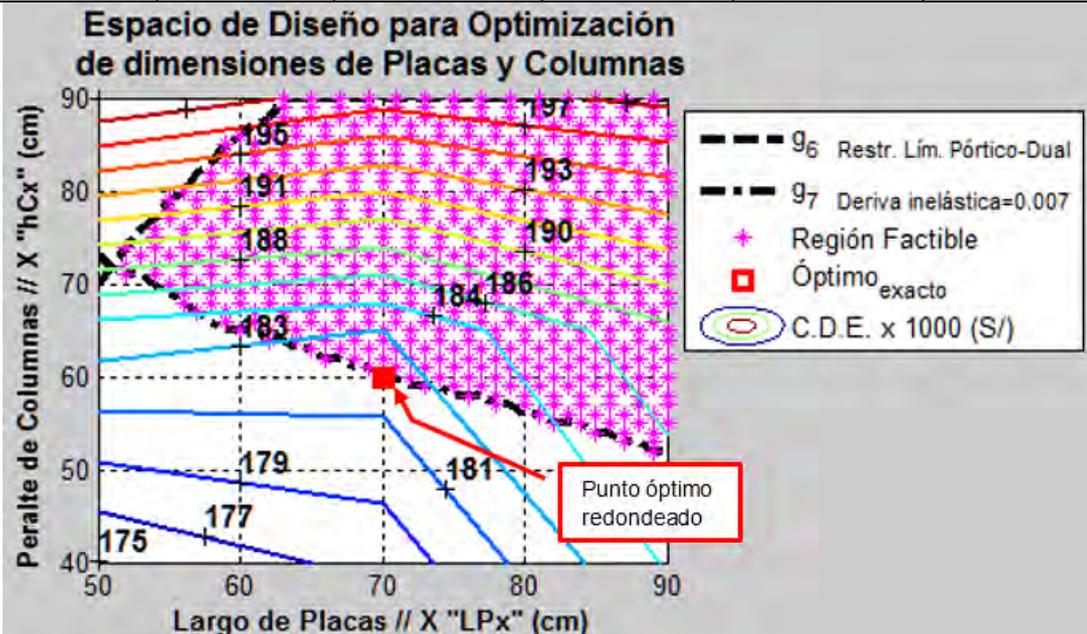
Tabla n.º 6.6: Control de resultados de optimización de vigas.

Sección de vigas	Valor (b x h)
Primera optimización de sección transversal de vigas (Paso 4)	25 x 60 cm.
Segunda optimización de sección transversal de vigas (Paso 11)	25 x 60 cm.

Los valores son iguales, entonces el procedimiento ha concluido satisfactoriamente. Los datos del modelo optimizado son:

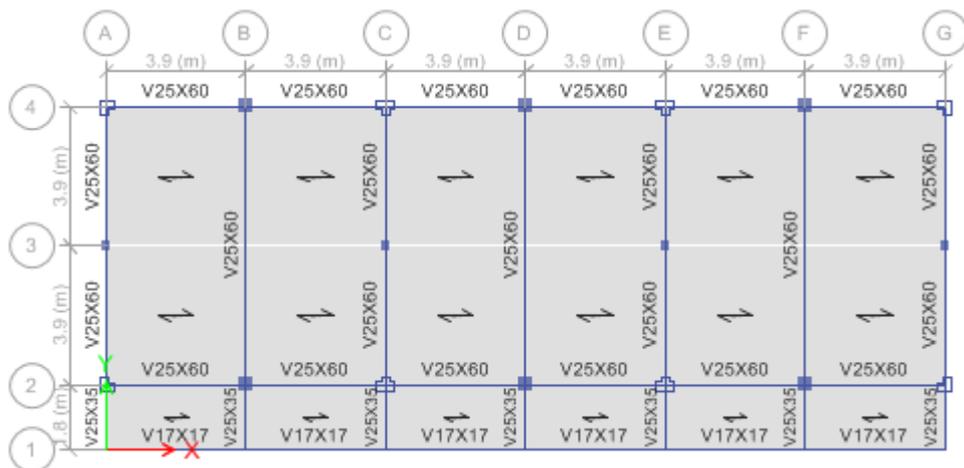
TABLA N.º 6.7: características del modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, optimizados, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², mezclado en obra, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00244



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G 	$h_x = 40$ cm. $h_y = 40$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F 	$h_{Cx} = 60$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E 	$LP_x = 70$ cm. $LP_y = 40$ cm. $t_p = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.742	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 182,000.00		

Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

6.4. COMPARACIÓN DE LA ESTRUCTURACION VIGENTE PARA 3 AULAS POR PISO Y 2 PISOS (EDIFICIO 780 SISMORESISTENTE) CON MODELO CORRESPONDIENTE OPTIMIZADO:

A efectos de comparar los resultados de optimización, se ha procedido a optimizar el modelo para 3 aulas por piso y 3 pisos para f'c 210 kgf/cm² hecho en obra y aligerado de 17 cm con tecnopor (ver Tabla 6.10), luego se ha tomado como parámetro de comparación la estructuración y dimensiones del edificio 780 actual – sismo-resistente, siendo las características de éste último:

Tabla n.º 6.8: Características del Edificio 780 S.R. actual

Descripción	Valor
Número de pisos	2
Número de aulas por piso	3
Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada (aligerado con bloques de arcilla)	20 cm.
Espesor muros de albañilería (muros de relleno acoplados al pórtico, en los ejes A, C, E, G)	23 cm.
Vigas (b x h)	30x70 cm. 25x55 cm. y 25x40 cm. (ver esquema referencial en figura 6.22)
Columnas de esquina	60x25 cm.
Placas "T" ejes B, D, F	90x45x30 cm.
Placas ejes C, E	90x25 cm.
Área construida total	449 m ²
Deriva de entrepiso máxima en X	0.0032
Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0016
Costo Directo de Estructuras	S/ 121,690.00



Figura n.º 6.22: Planta típica del edificio 780 sismo resistente actual.

En la siguiente tabla procedemos a comparar los resultados:

Tabla n.º 6.9: Comparación entre los edificios 780 SR actual VS 780 SR Optimizado con 2 pisos y 3 aulas por piso

	Comparación de resultados entre modelos	
	Edificio 780 SR Concreto $f'_c=210$ kgf/cm ² mezclado en obra	Edificio 780 Optimizado Concreto $f'_c=210$ kgf/cm ² mezclado en obra
Área construida total	449 m ²	449 m ²
Número de pisos	2	2
Deriva máx. X	0.0032	0.0069
Deriva máx. Y	0.0016	0.0024
Ratio D/C muros albañilería	0.54	0.71
C.D. Estructuras	S/ 121,690.00	S/ 117,500.00

Comentarios:

La diferencia entre Cosos Directos es de S/ 4,190.00 que representa una disminución del Costo Directo de Estructuras de 3.44 %

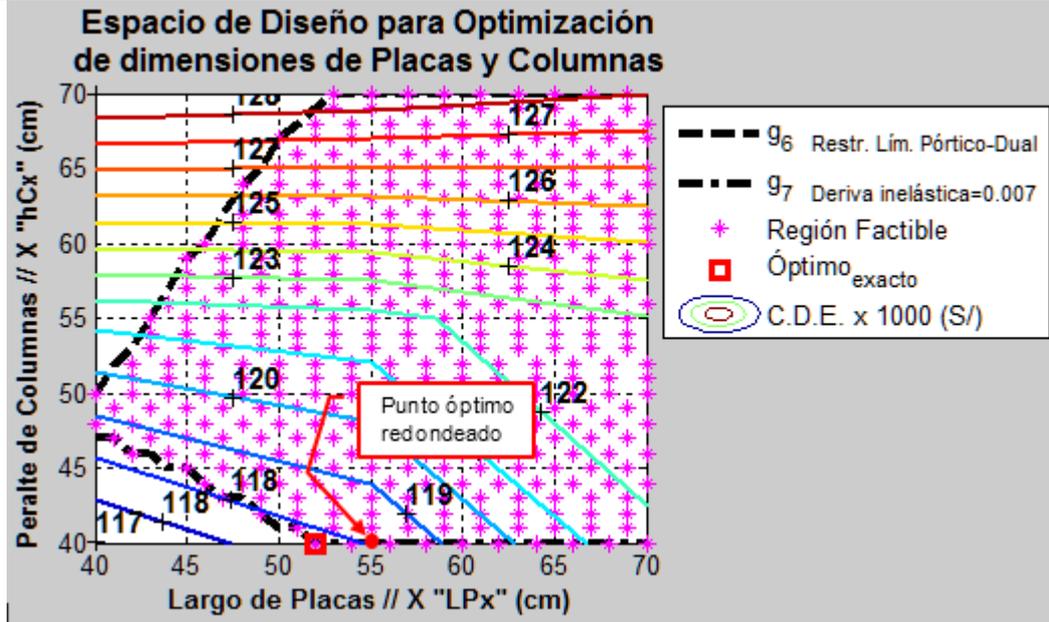
Ambas estructuras cumplen con las restricciones establecidas en el RNE.

6.5. RESUMEN DE RESULTADOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE OPTIMIZACIÓN

TABLA N.º 6.10: Modelo de 3 aulas por piso, 2 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm ² , mezclado en obra, losa aligerada con bloques de tecnopor.					
Número de pisos	2	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Esesor losa aligerada	17 cm.	Esesor muros de albañilería (*)	13 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	449 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00689	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00235
<p style="text-align: center;">Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas</p> <p> g_6 Restr. Lím. Pórtico-Dual g_7 Deriva inelástica=0.007 * Región Factible Óptimo exacto C.D.E. x 1000 (S/) </p>					
Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	hx = 40 cm. hy = 40 cm. tc = 25 cm.	Columnas ejes B, D, F	hCx = 40 cm. hCy = 40 cm.	Placas "T" ejes C, E	LPx = 50 cm. LPy = 40 cm. tp = 25 cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.71	Costo Directo de Estructuras (C.D.E)	S/ 117,500.00		
Planta de referencia:					
<p>(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.</p>					

TABLA N.º 6.11: Modelo de 3 aulas por piso, 2 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², mezclado en obra, losa aligerada con bloques de ladrillo

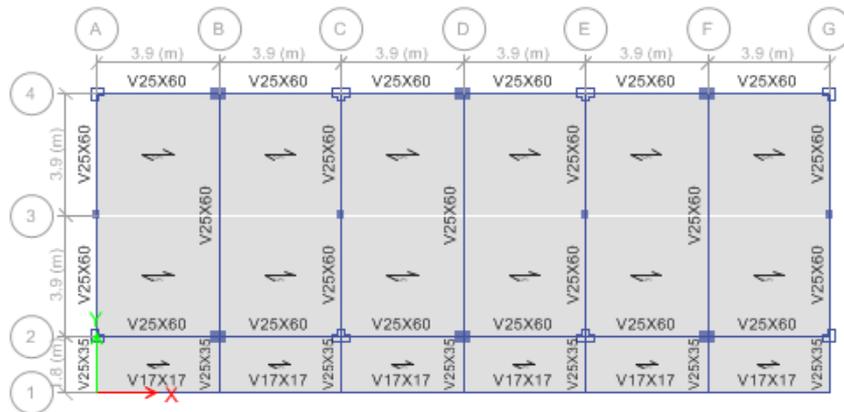
Número de pisos	2	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	13 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	449 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0065	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00254



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G 	$h_x = 40$ cm. $h_y = 40$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F 	$h_{Cx} = 40$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E 	$LP_x = 55$ cm. $LP_y = 40$ cm. $t_p = 25$ cm.
--	--	---------------------------	--	--------------------------	--

Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.77	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 118,000.00
---	------	---------------------------------------	---------------

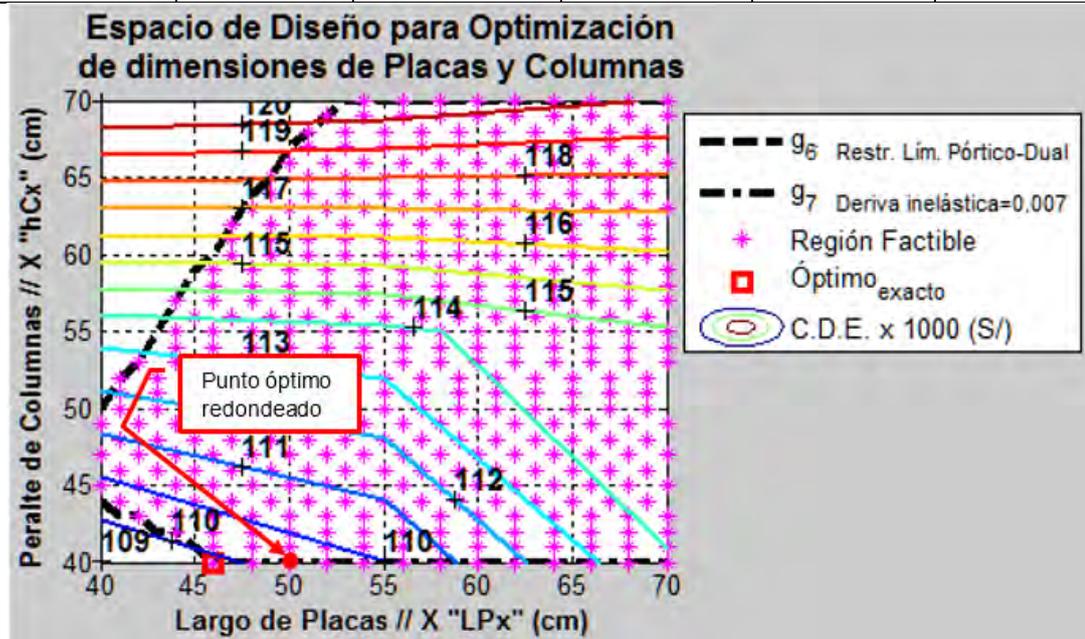
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

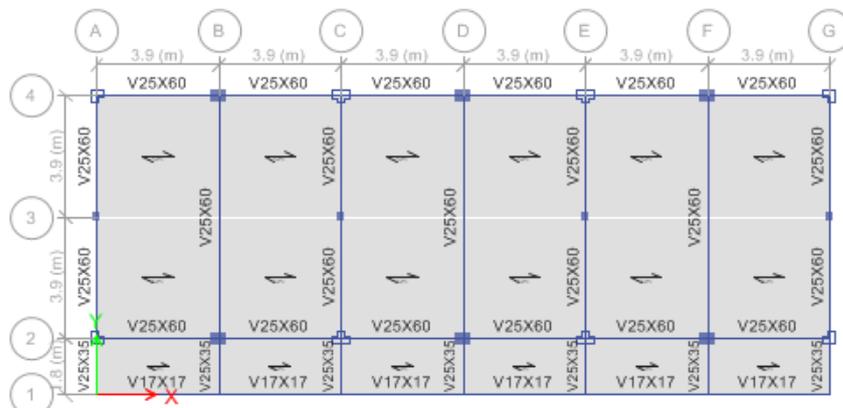
TABLA N.º 6.12: Modelo de 3 aulas por piso, 2 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	2	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	13 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	449 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00689	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00235



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	$h_x = 40$ cm. $h_y = 40$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F	$h_{Cx} = 40$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E	$LP_x = 50$ cm. $LP_y = 40$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.71	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 110,000.00		

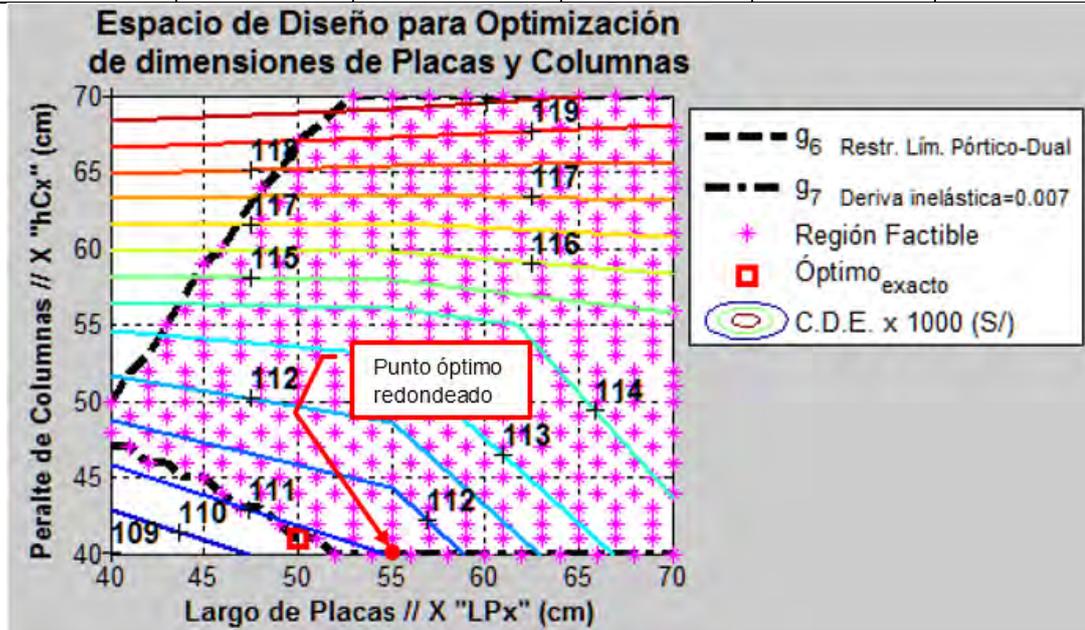
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

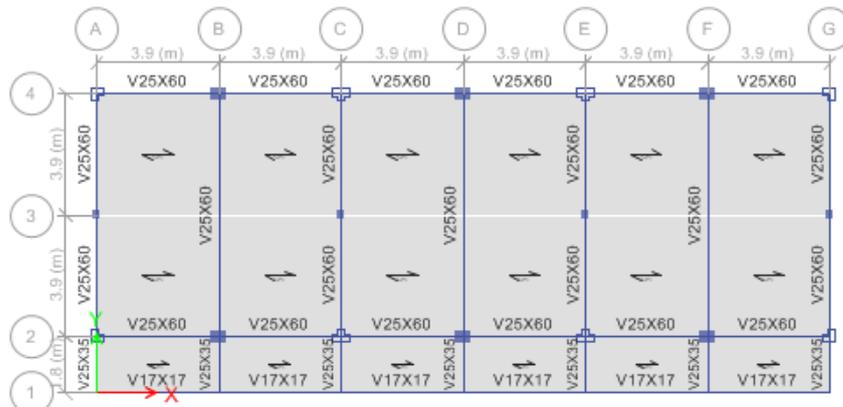
TABLA N.º 6.13: Modelo de 3 aulas por piso, 2 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	2	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	13 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	449 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0065	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0025



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G 	$h_x = 40$ cm. $h_y = 40$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F 	$h_{Cx} = 40$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E 	$LP_x = 55$ cm. $LP_y = 40$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.77	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 111,000.00		

Planta de referencia:

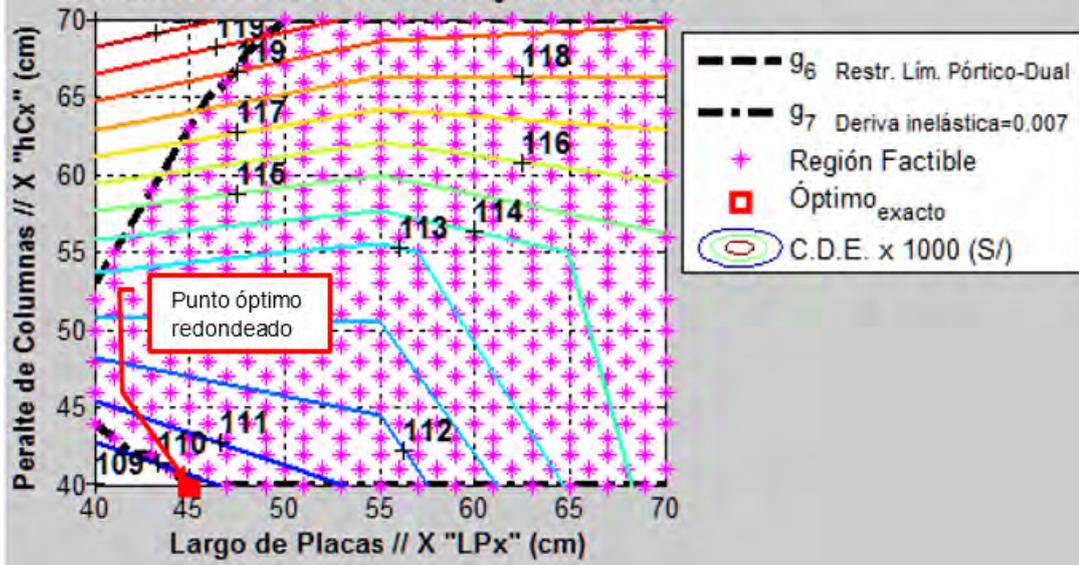


(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

TABLA N.º 6.14: Modelo de 3 aulas por piso, 2 pisos, concreto $f'_c=280$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

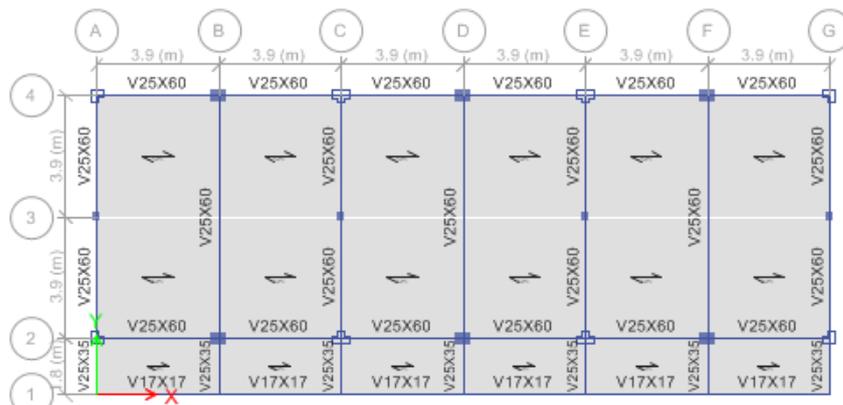
Número de pisos	2	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	13 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	449 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0069	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0024

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G 	hx = 35 cm. hy = 35 cm. tc = 25 cm.	Columnas ejes B, D, F 	hCx = 40 cm. hCy = 35 cm.	Placas "T" ejes C, E 	LPx = 45 cm. LPy = 35 cm. tp = 25 cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.73		Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 110,000.00	

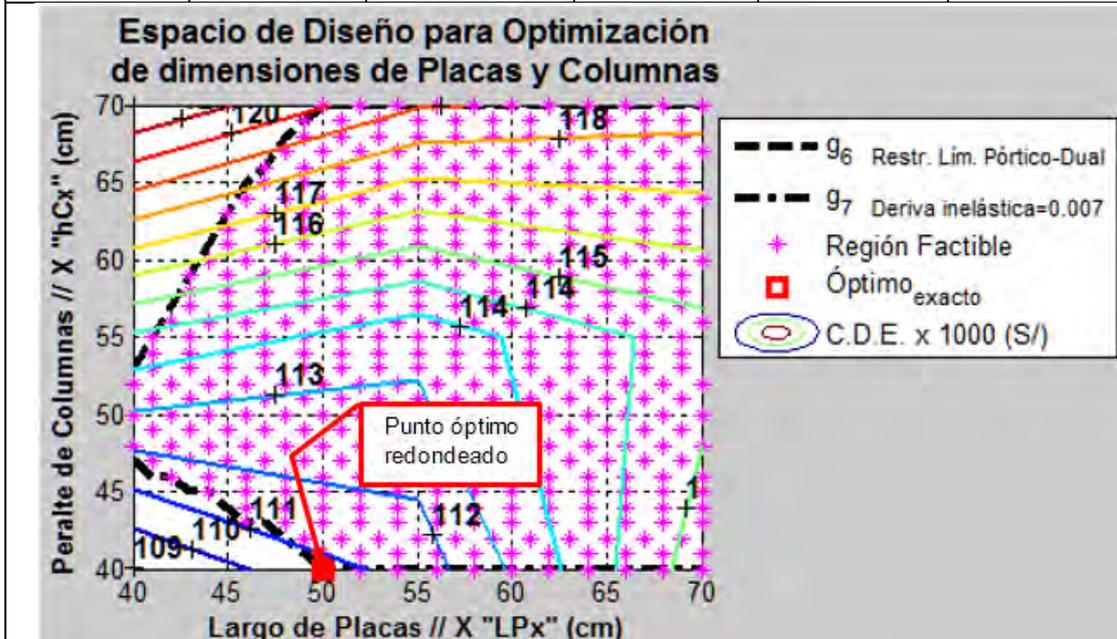
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

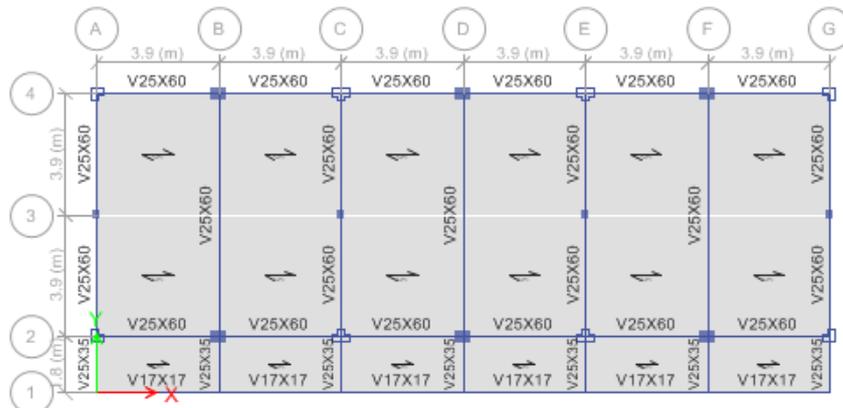
TABLA N.º 6.15: Modelo de 3 aulas por piso, 2 pisos, concreto $f'_c=280$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	2	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	13 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	449 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0069	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0026



<p>Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G</p>	<p>$h_x = 35$ cm. $h_y = 35$ cm. $t_c = 25$ cm.</p>	<p>Columnas ejes B, D, F</p>	<p>$h_{Cx} = 40$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm.</p>	<p>Placas "T" ejes C, E</p>	<p>$LP_x = 50$ cm. $LP_y = 35$ cm. $t_p = 25$ cm.</p>
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.795	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 111,000.00		

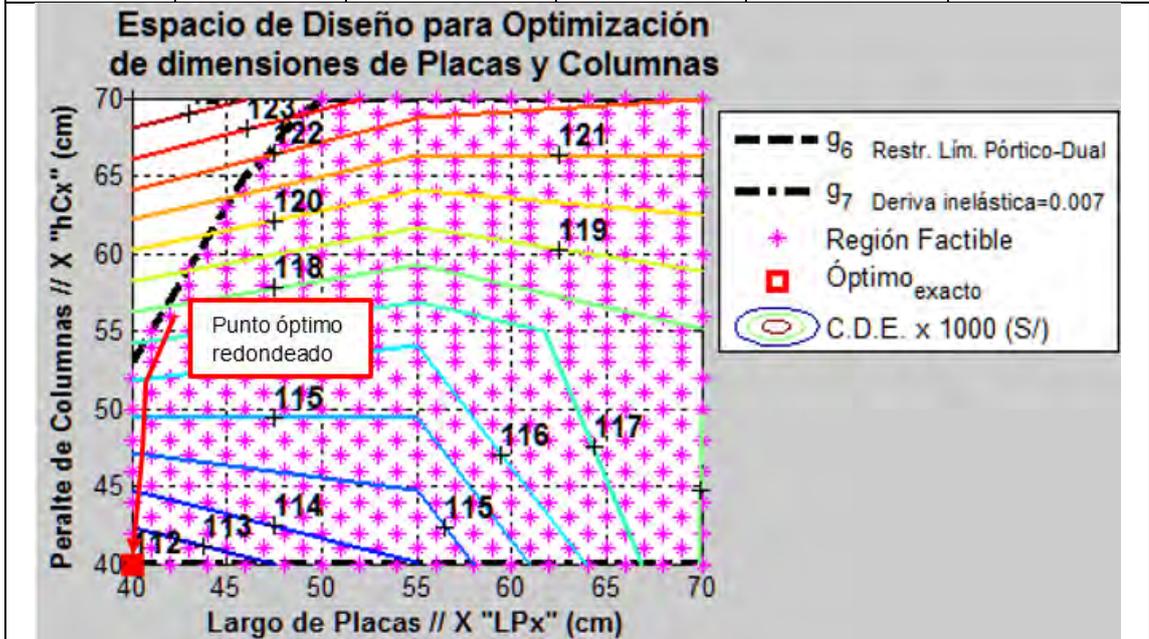
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

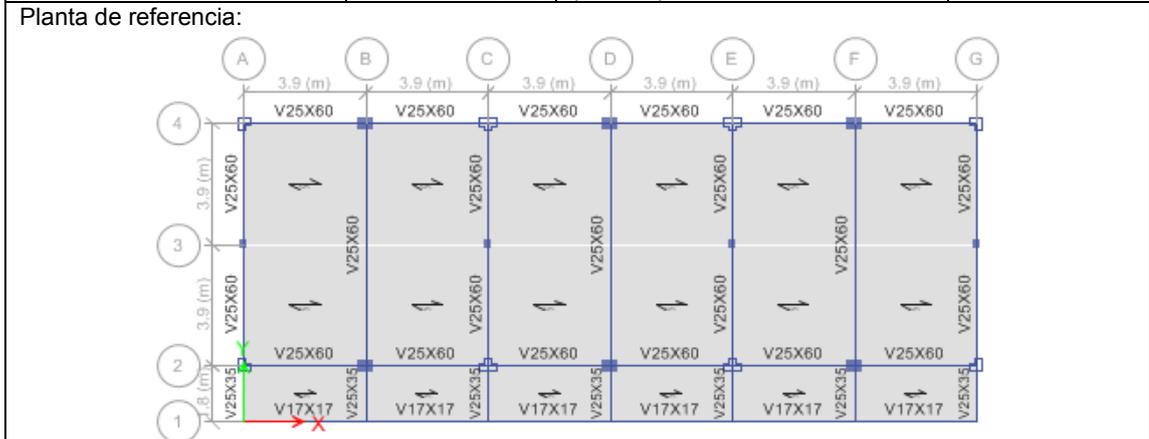
TABLA N.º 6.16: Modelo de 3 aulas por piso, 2 pisos, concreto $f'_c=350$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	2	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	13 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	449 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00676	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00237



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	$h_x = 35$ cm. $h_y = 35$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F	$h_{Cx} = 40$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm.	Placas ejes C, E	Placas "T" $LP_x = 40$ cm. $LP_y = 35$ cm. $tp = 25$ cm.
--	--	-----------------------	--	------------------	---

Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.716	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 112,000.00
---	-------	---------------------------------------	---------------

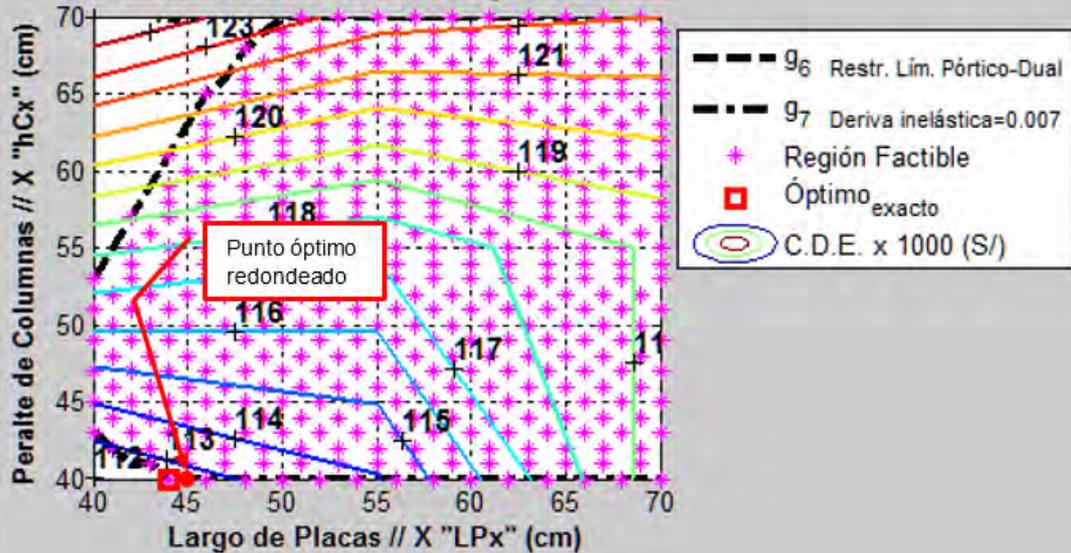


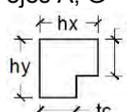
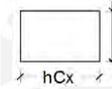
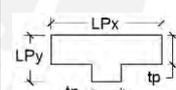
(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

TABLA N.º 6.17: Modelo de 3 aulas por piso, 2 pisos, concreto $f'_c=350$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

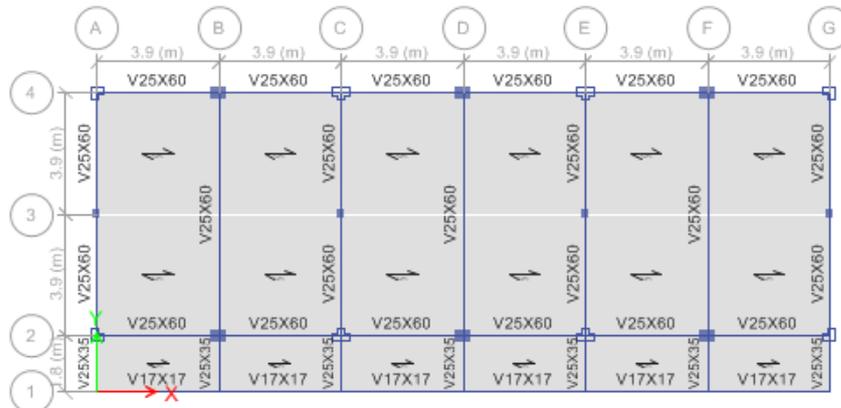
Número de pisos	2	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	13 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	449 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00668	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00257

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	$h_x = 35$ cm. $h_y = 35$ cm. $t_c = 25$ cm. 	Columnas ejes B, D, F	$h_{Cx} = 40$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm. 	Placas "T" ejes C, E	$LP_x = 45$ cm. $LP_y = 35$ cm. $tp = 25$ cm. 
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.776	Costo Directo de Estructuras	S/ 113,000.00		

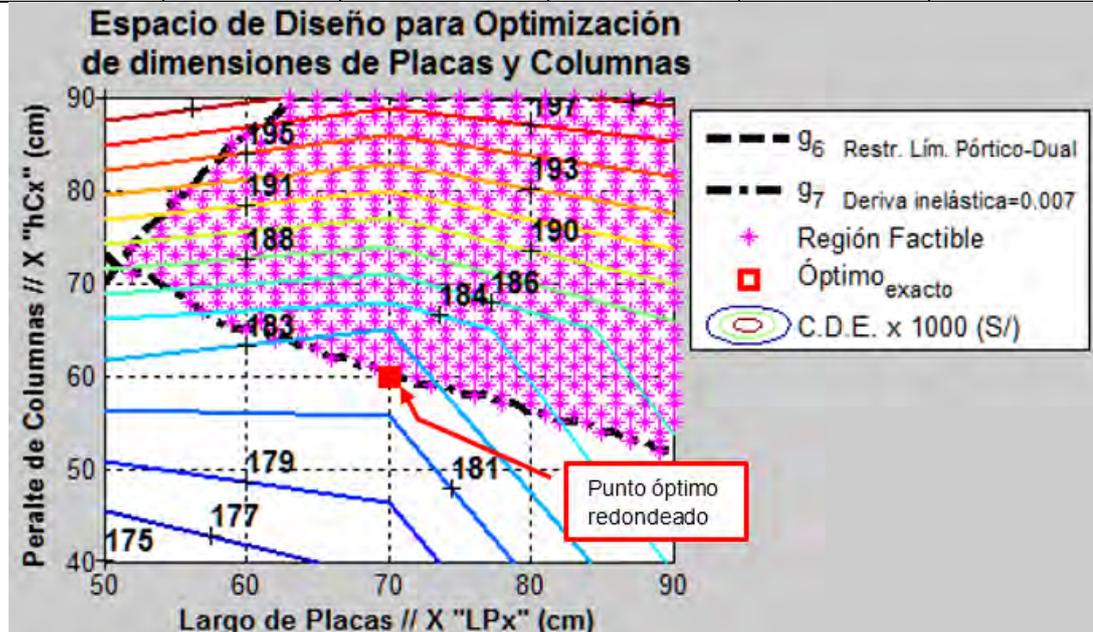
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

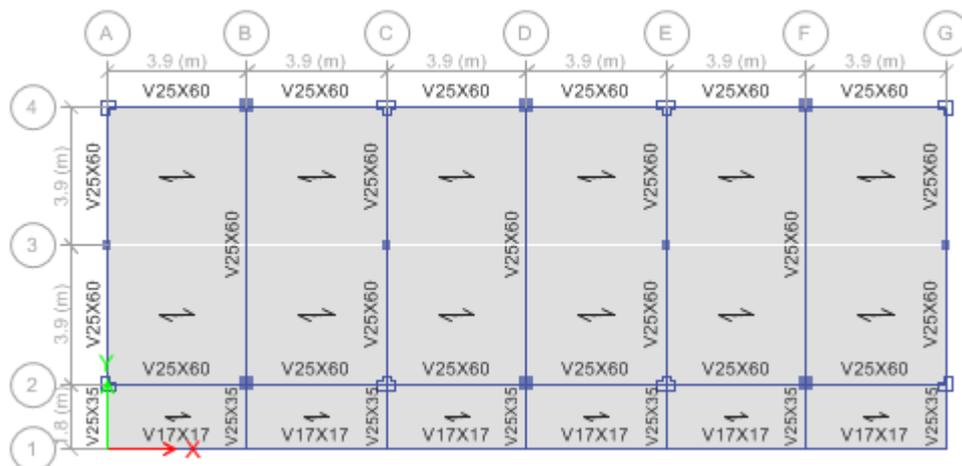
TABLA N.º 6.18: Modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², mezclado en obra, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00244



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G 	$h_x = 40$ cm. $h_y = 40$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F 	$h_{Cx} = 60$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E 	$LP_x = 70$ cm. $LP_y = 40$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.742	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 182,000.00		

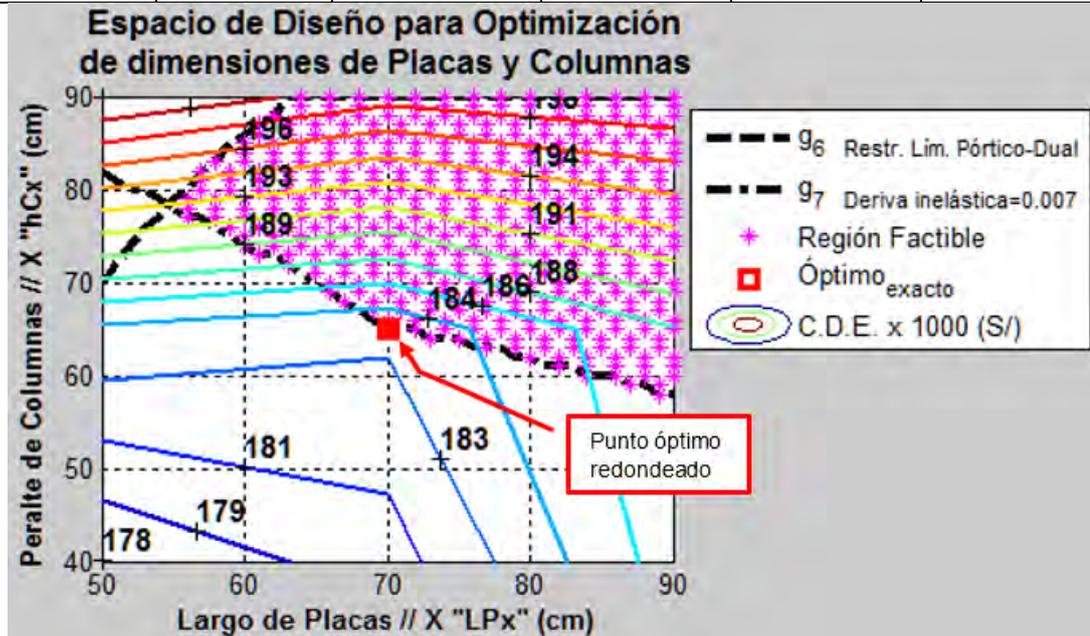
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

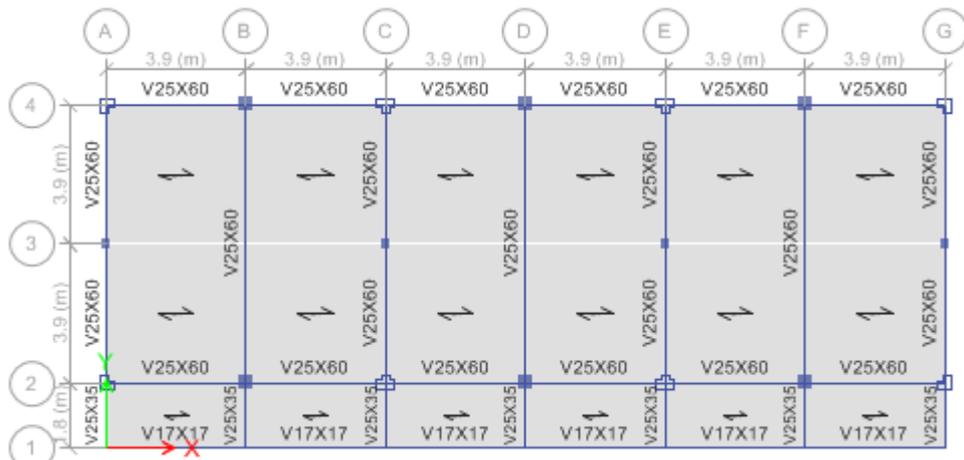
TABLA N.º 6.19: Modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², mezclado en obra, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00262



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G 	$h_x = 40$ cm. $h_y = 40$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F 	$h_{Cx} = 65$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E 	$LP_x = 70$ cm. $LP_y = 40$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.796	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 183,500.00		

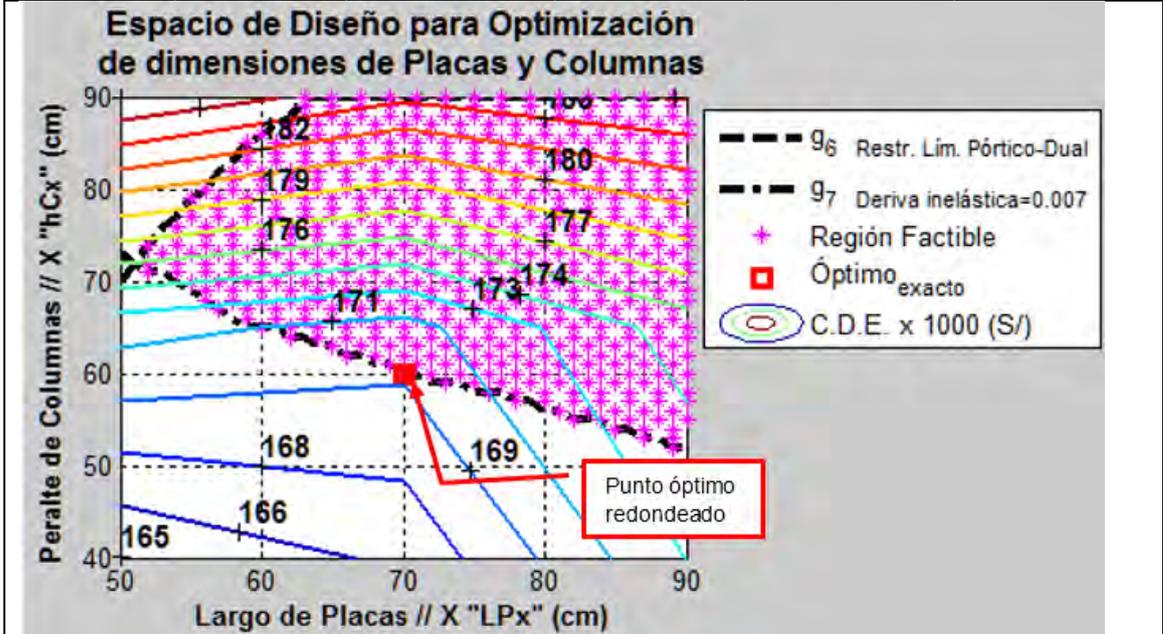
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

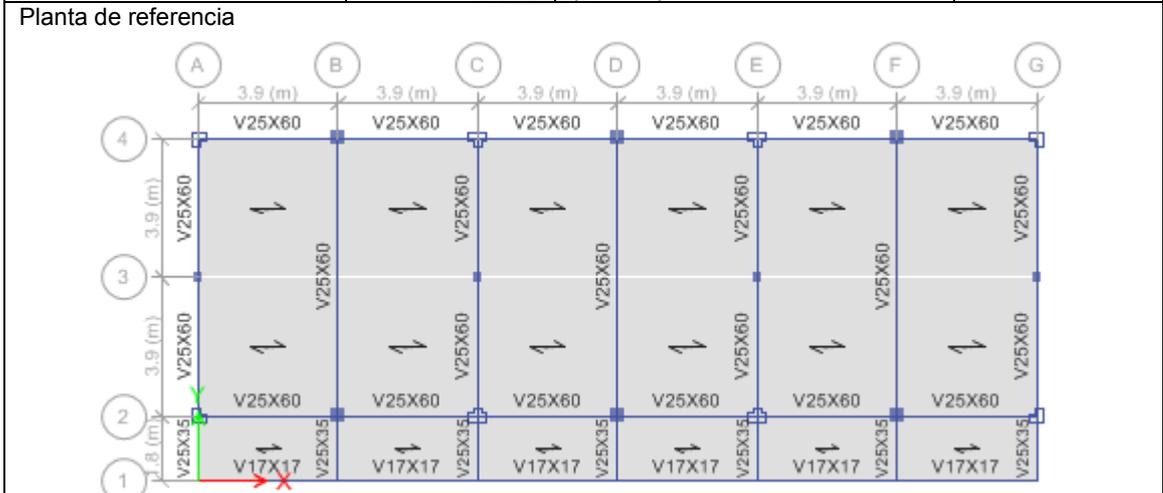
TABLA N.º 6.20: Modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00244



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G 	$h_x = 40$ cm. $h_y = 40$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F 	$h_{Cx} = 60$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E 	$LP_x = 70$ cm. $LP_y = 40$ cm. $tp = 25$ cm.
--	--	---------------------------	--	--------------------------	---

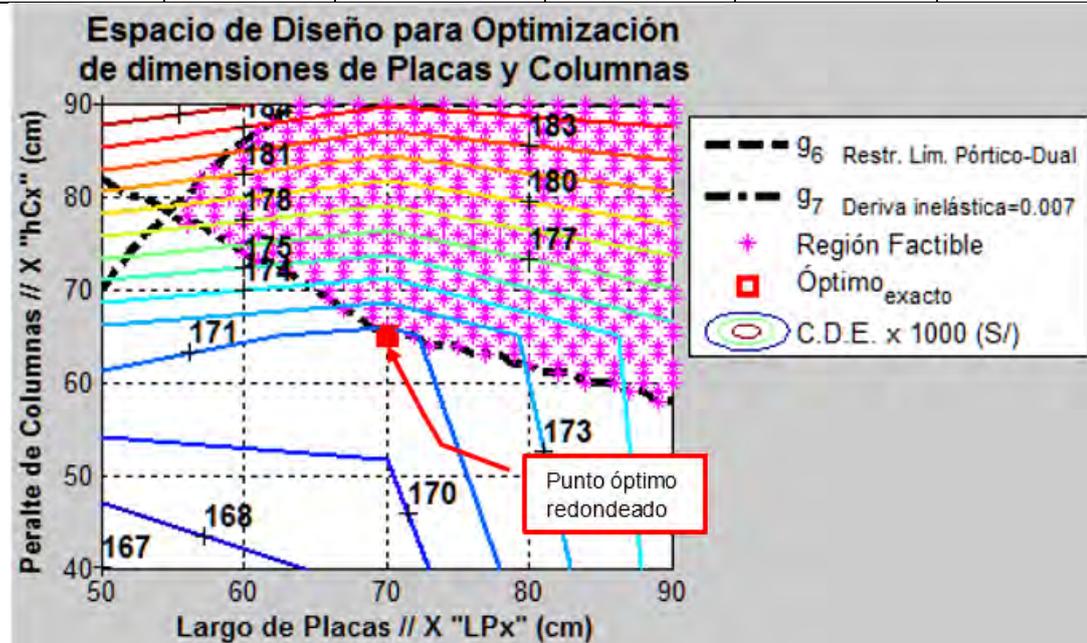
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.742	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 169,000.00
---	-------	---------------------------------------	---------------



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

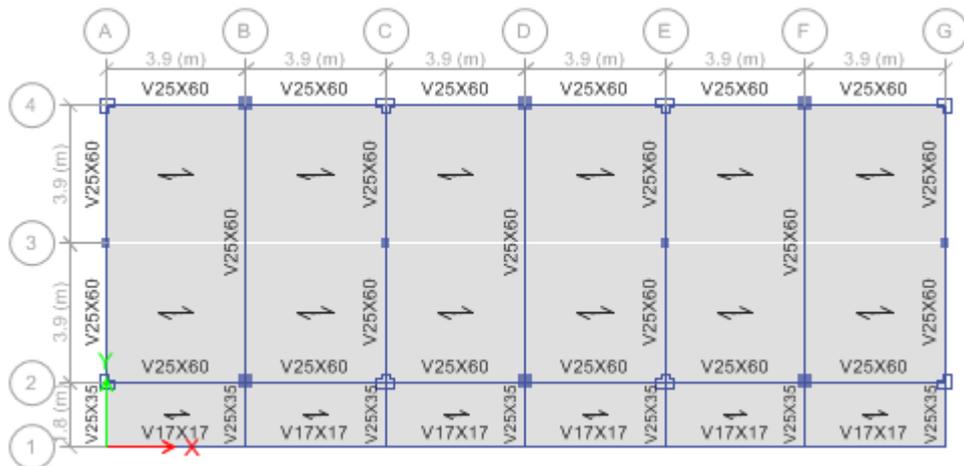
TABLA N.º 6.21: Modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00262



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	$h_x = 40$ cm. $h_y = 40$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F	$h_{Cx} = 65$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas ejes C, E	"T" $LP_x = 70$ cm. $LP_y = 40$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.797		Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 171,000.00	

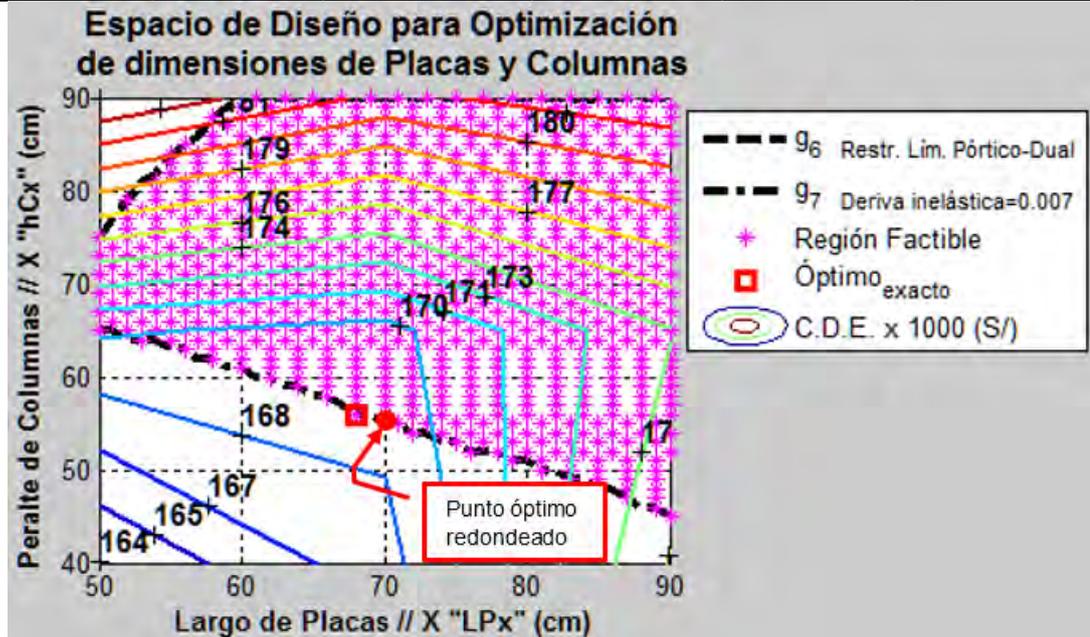
Planta de referencia

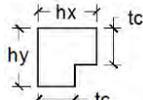
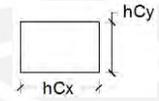
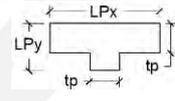


(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

TABLA N.º 6.22: Modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, concreto $f'_c=280 \text{ kgf/cm}^2$, premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

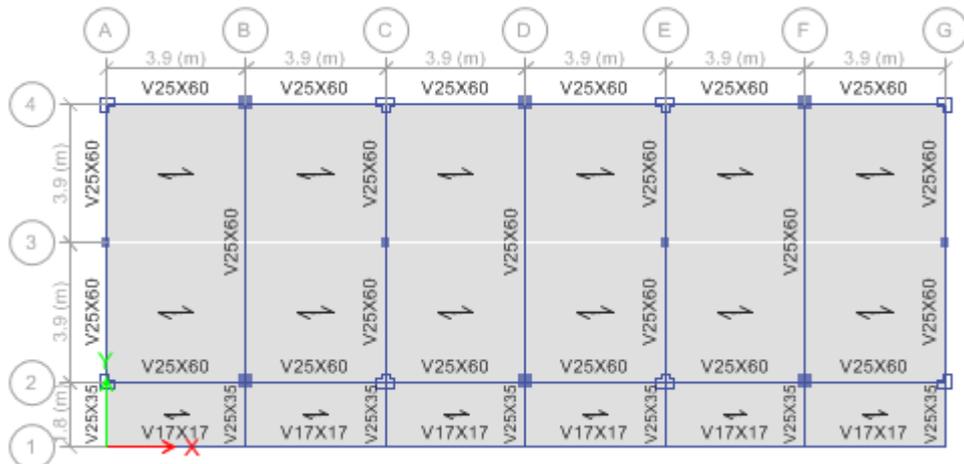
Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00248



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	$h_x = 35 \text{ cm.}$ $h_y = 35 \text{ cm.}$ $t_c = 25 \text{ cm.}$ 	Columnas ejes B, D, F	$h_{Cx} = 55 \text{ cm.}$ $h_{Cy} = 35 \text{ cm.}$ 	Placas "T" ejes C, E	$LP_x = 70 \text{ cm.}$ $LP_y = 35 \text{ cm.}$ $tp = 25 \text{ cm.}$ 
--	--	-----------------------	--	----------------------	---

Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.753	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 169,000.00
---	-------	---------------------------------------	---------------

Planta de referencia:

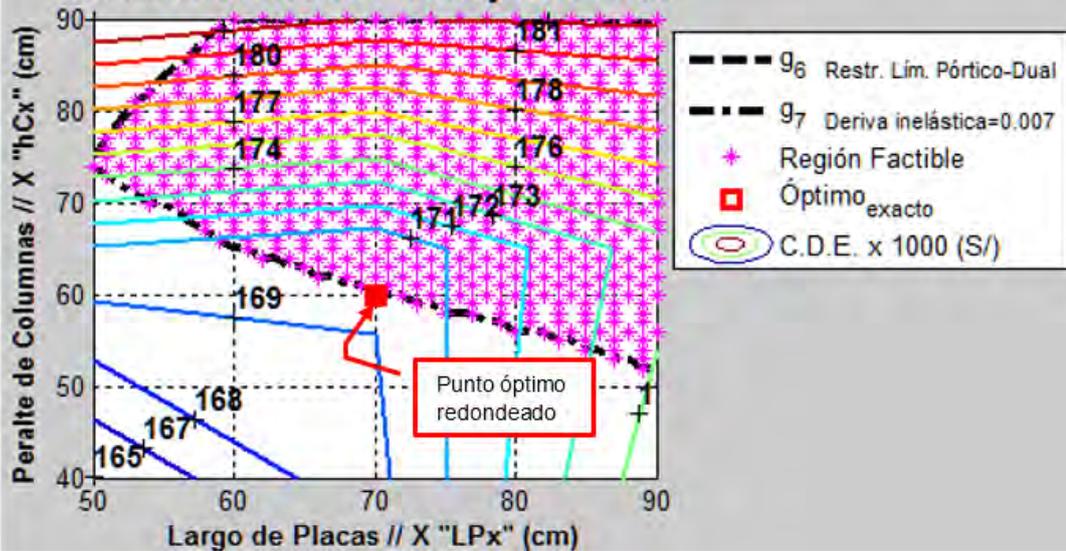


(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

TABLA N.º 6.23: Modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, concreto $f'_c=280$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

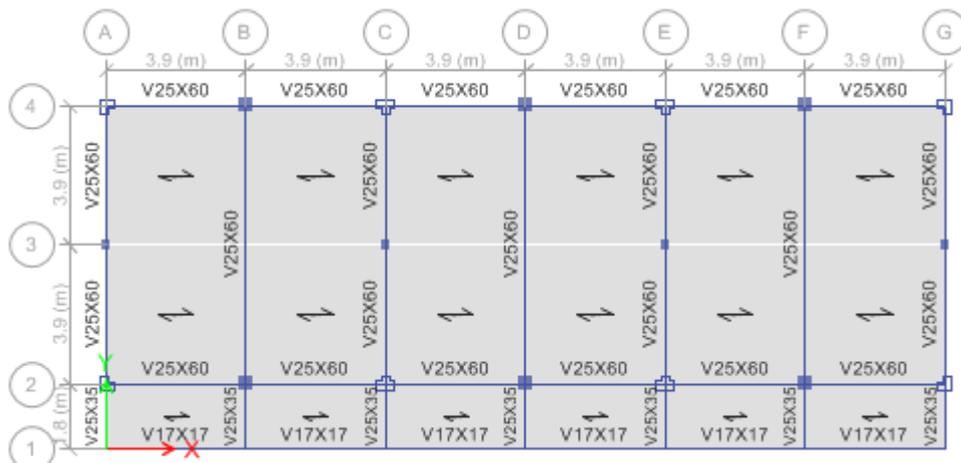
Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00267

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	$h_x = 35$ cm. $h_y = 35$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F	$h_{Cx} = 60$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm.	Placas "T" ejes C, E	$LP_x = 70$ cm. $LP_y = 35$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.809	Costo Directo de Estructuras	S/ 169,500.00		

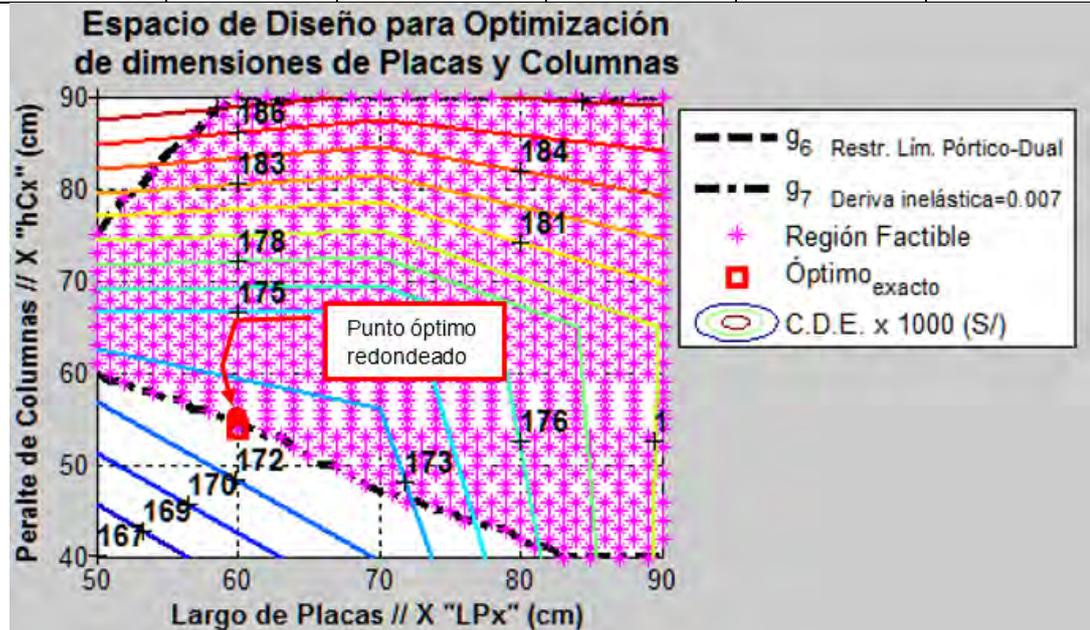
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

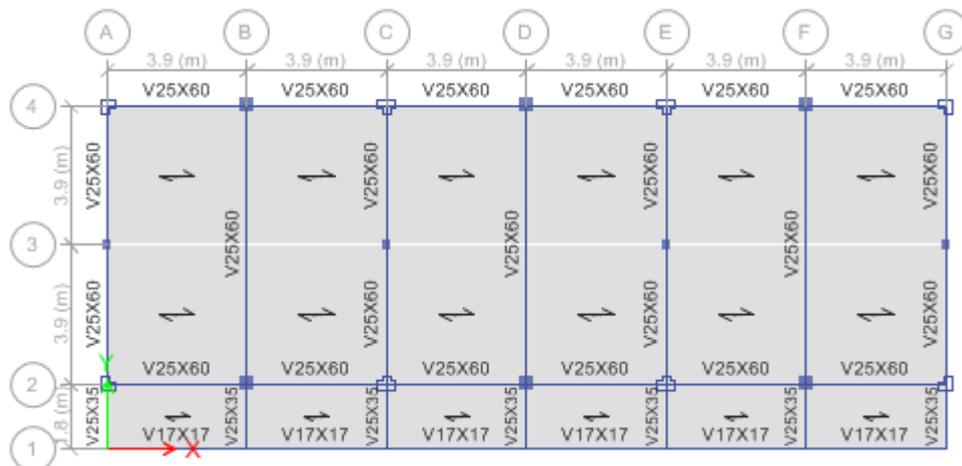
TABLA N.º 6.24: Modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, concreto $f'_c=350$ kgf/cm², premezclado, losa aligerado con bloques de tecnopor

Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0067	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00244



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	$h_x = 35$ cm. $h_y = 35$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F	$h_{Cx} = 55$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm.	Placas "T" ejes C, E	$LP_x = 60$ cm. $LP_y = 35$ cm. $t_p = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.741	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 172,500.00		

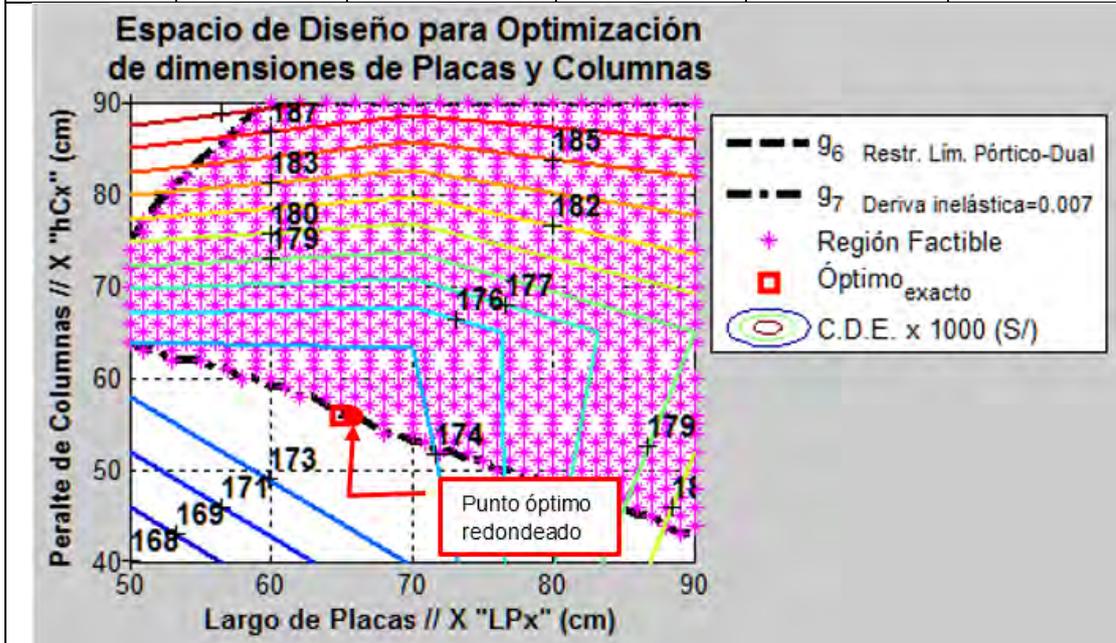
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

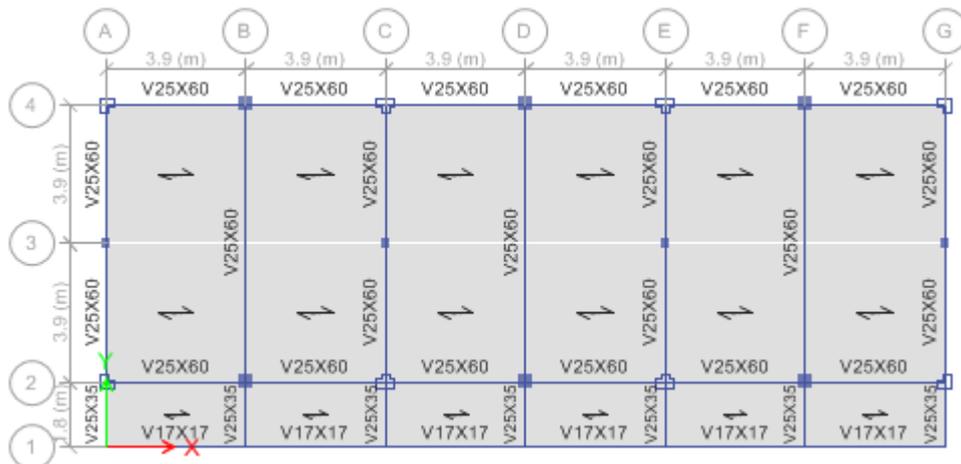
TABLA N.º 6.25: Modelo de 3 aulas por piso, 3 pisos, concreto $f'_c=350$ kgf/cm², premezclado, losa aligerado con bloques de ladrillo

Número de pisos	3	Número de aulas por piso	3	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	674 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00262



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, G	$h_x = 35$ cm. $h_y = 35$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F	$h_{Cx} = 55$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm.	Placas "T" ejes C, E	$LP_x = 65$ cm. $LP_y = 35$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.796	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 173,500.00		

Planta de referencia:

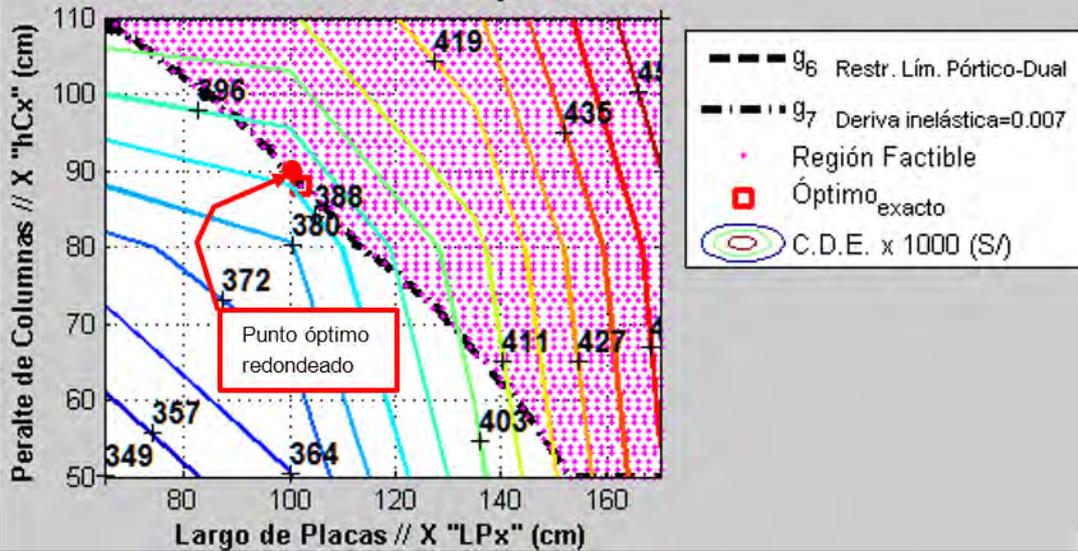


(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

TABLA N.º 6.26: Modelo de 4 aulas por piso, 4 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², mezclado en obra, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	4	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1198 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00328

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I	$h_x = 40$ cm. $h_y = 100$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F, H	$h_{Cx} = 90$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E, G	$LP_x = 100$ cm. $LP_y = 100$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.914		Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 388,000.00	

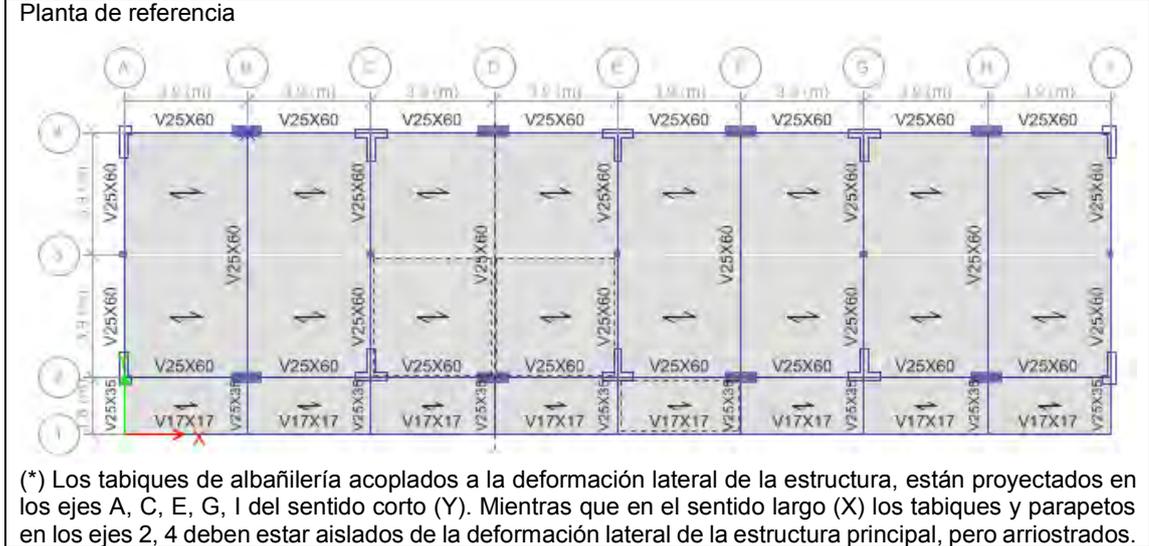
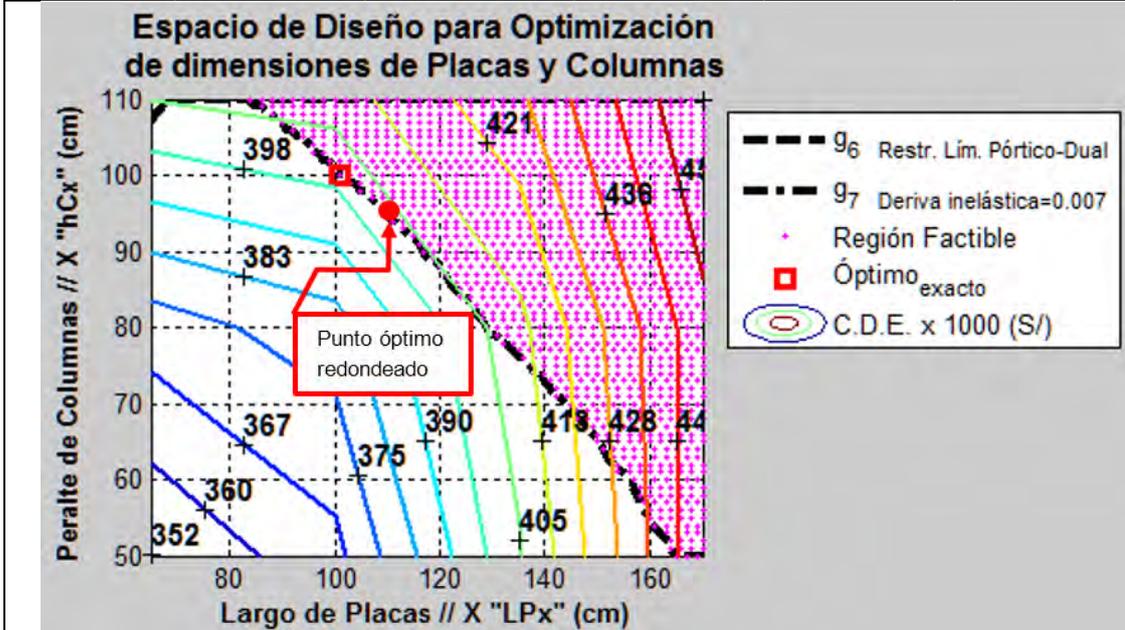
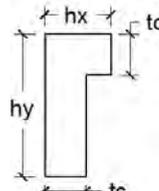
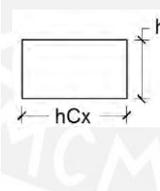
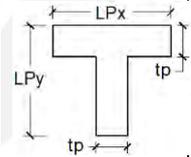


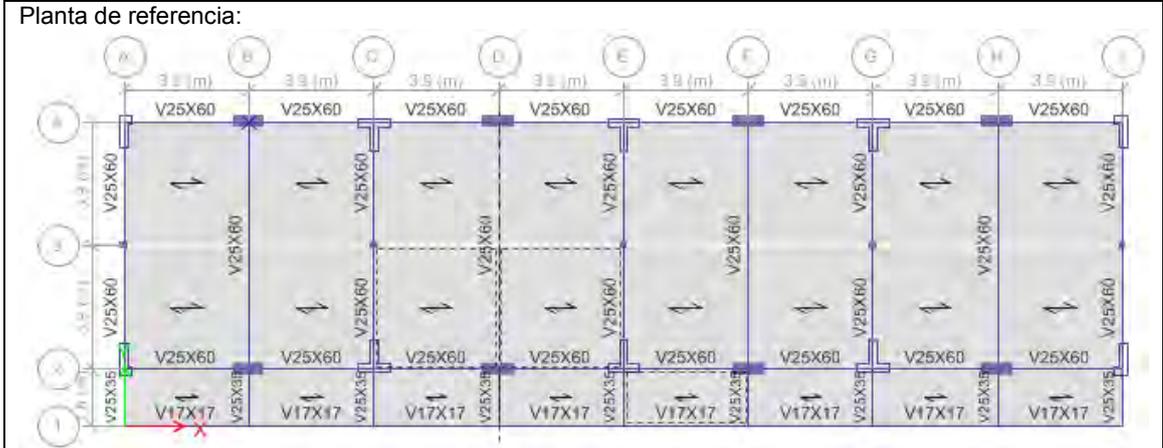
TABLA N.º 6.27: Modelo de 4 aulas por piso, 4 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², mezclado en obra, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	4	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1198 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00353



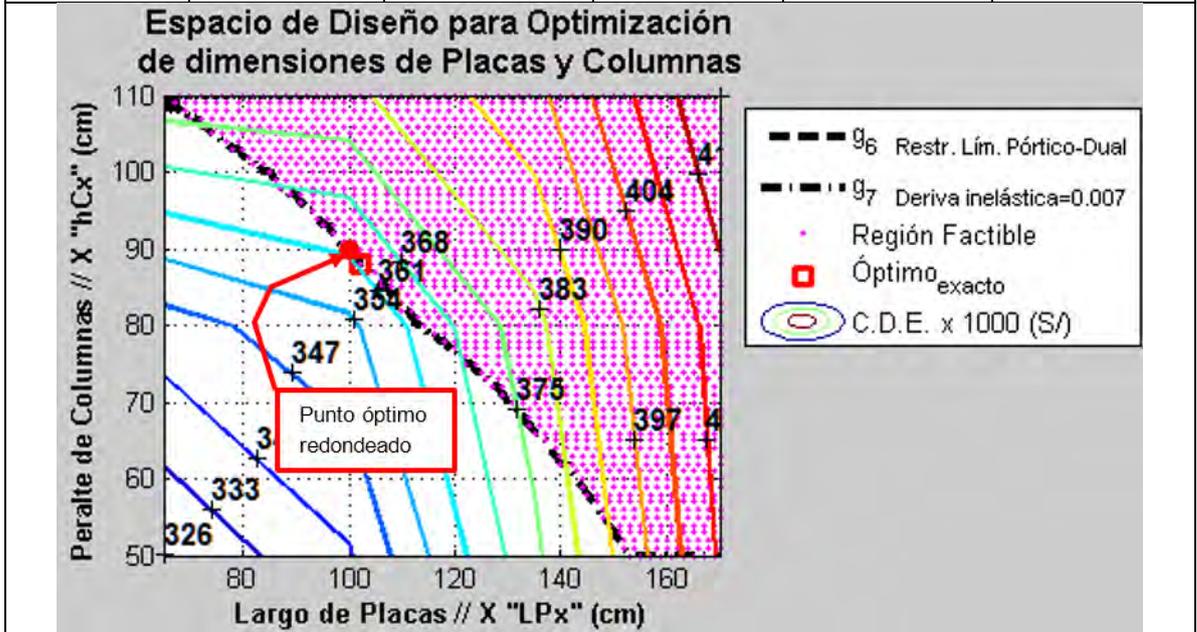
Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I 	hx = 40 cm. hy = 100 cm. tc = 25 cm.	Columnas ejes B, D, F, H 	hCx = 95 cm. hCy = 40 cm.	Placas "T" ejes C, E, G 	LPx = 110 cm. LPy = 100 cm. tp = 25 cm.
---	--	---	------------------------------	--	---

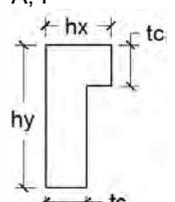
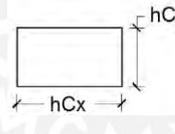
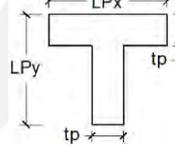
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.981	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 404,000.00
---	-------	---------------------------------------	---------------



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

TABLA N.º 6.28: Modelo de 4 aulas por piso, 4 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm ² , premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor					
Número de pisos	4	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1198 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00329



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I 	hx = 40 cm. hy = 100 cm. tc = 25 cm.	Columnas ejes B, D, F, H 	hCx = 90 cm. hCy = 40 cm.	Placas "T" ejes C, E, G 	LPx = 100 cm. LPy = 100 cm. tp = 25 cm.
---	--	---	------------------------------	--	---

Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.914	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 361,000.00
---	-------	---------------------------------------	---------------

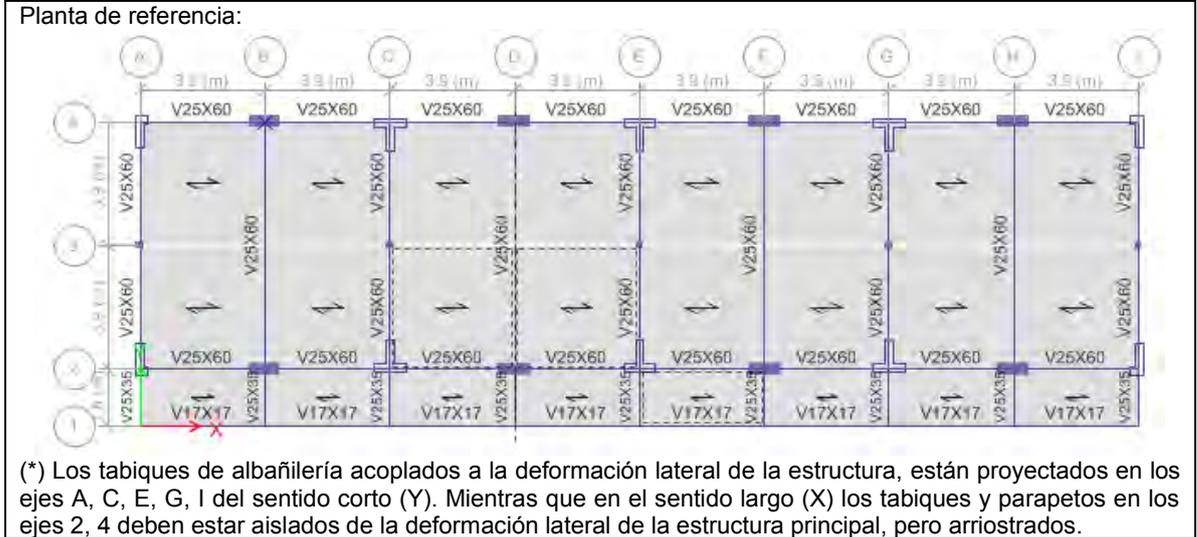
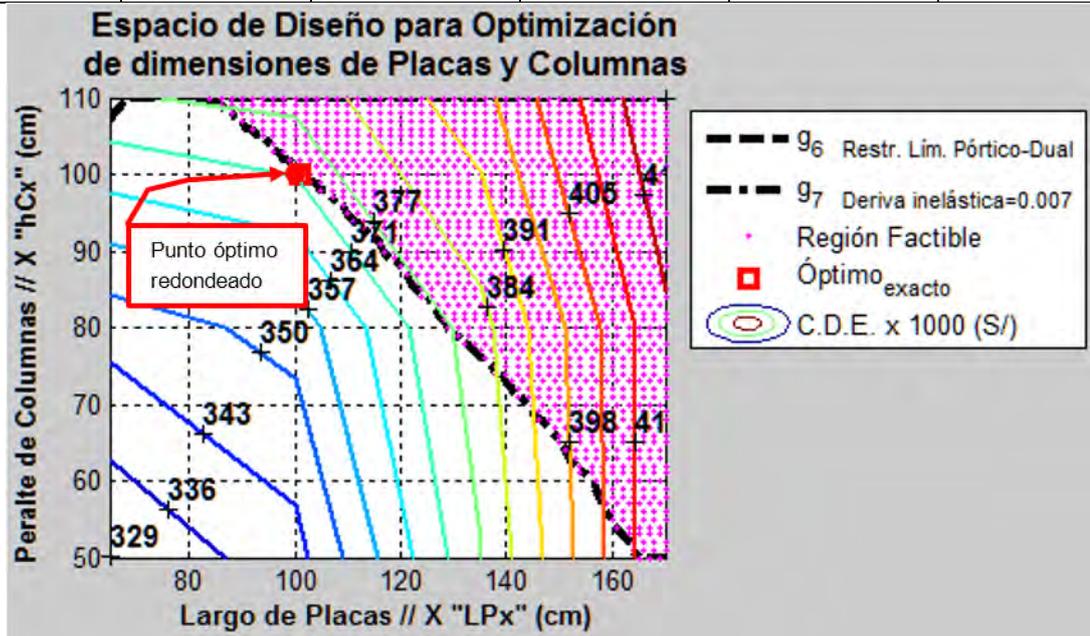


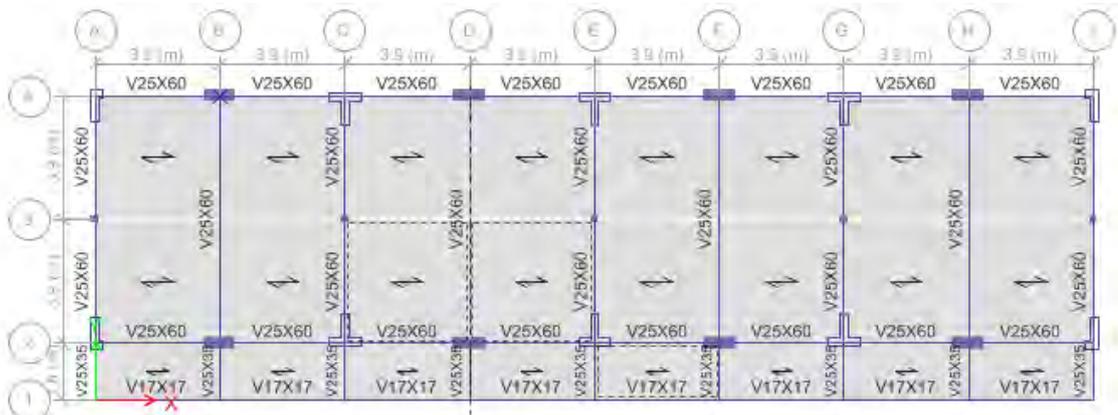
TABLA N.º 6.29: Modelo de 4 aulas por piso, 4 pisos, concreto f'c 210 kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	4	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1198 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00354



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I	$h_x = 40$ cm. $h_y = 100$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F, H	$h_{Cx} = 100$ cm. $h_{Cy} = 40$ cm.	Placas "T" ejes C, E, G	$LP_x = 100$ cm. $LP_y = 100$ cm. $tp = 25$ cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.983	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 372,000.00		

Planta de referencia:

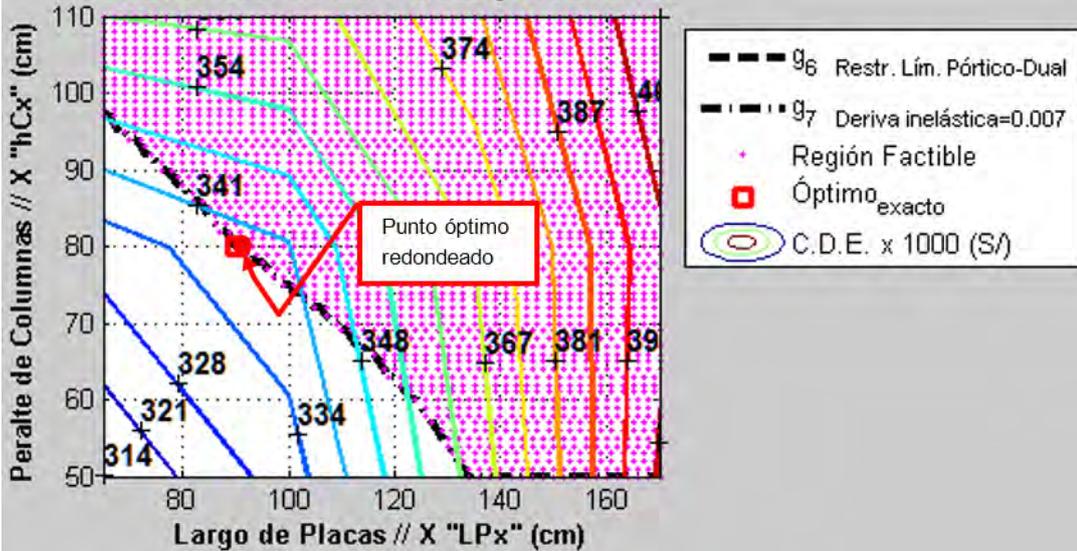


(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados.

TABLA N.º 6.30: Modelo de 4 aulas por piso, 4 pisos, concreto $f'_c=280$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	4	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1198 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00694	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00335

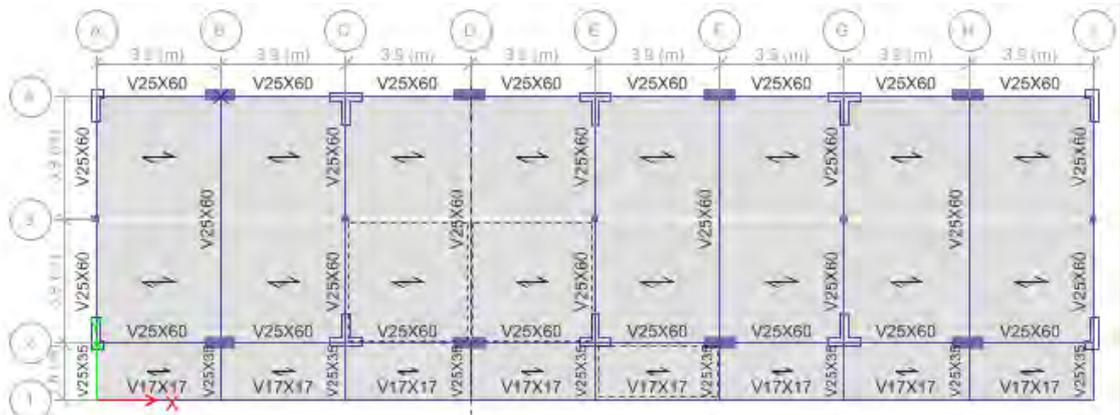
Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I	$h_x = 35$ cm. $h_y = 90$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F, H	$h_{Cx} = 80$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm.	Placas "T" ejes C, E, G	$LP_x = 85$ cm. $LP_y = 90$ cm. $tp = 25$ cm.
--	--	--------------------------	--	-------------------------	---

Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.924	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 339,000.00
---	-------	---------------------------------------	---------------

Planta de referencia:

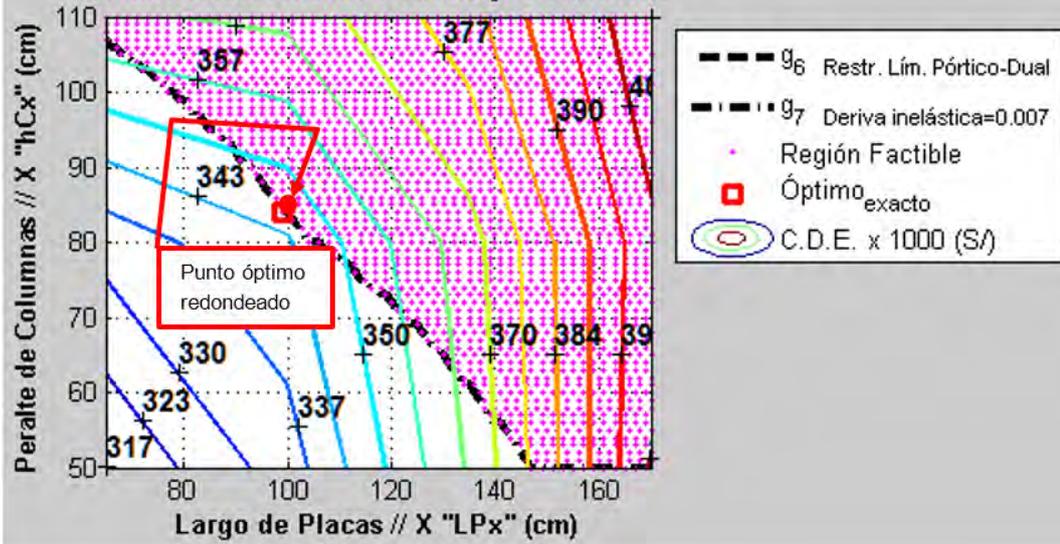


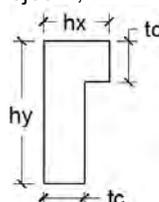
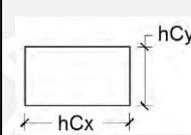
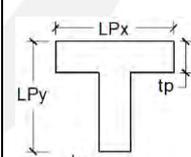
(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

TABLA N.º 6.31: Modelo de 4 aulas por piso, 4 pisos, concreto $f'_c=280$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

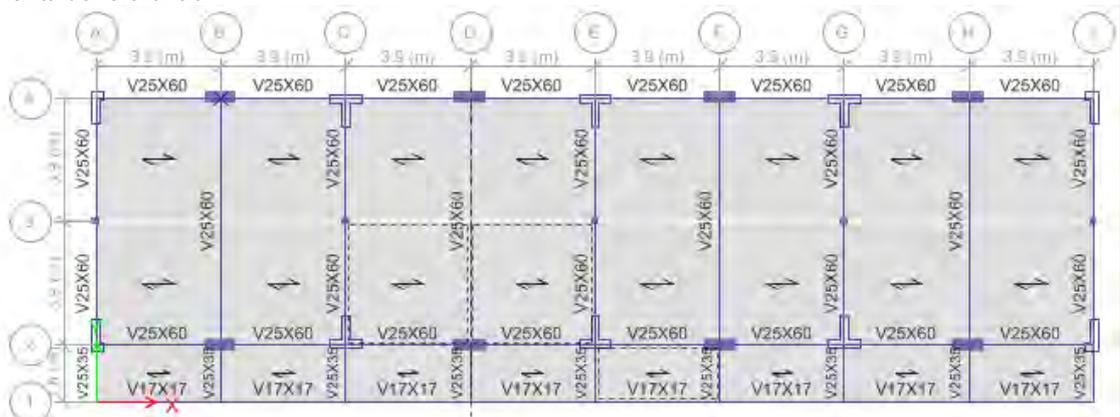
Número de pisos	4	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1198 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00697	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0036

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I 	hx = 35 cm. hy = 90 cm. tc = 25 cm.	Columnas ejes B, D, F, H 	hCx = 85 cm. hCy = 35 cm.	Placas "T" ejes C, E, G 	LPx = 100 cm. LPy = 90 cm. tp = 25 cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.993	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 346,000.00		

Planta de referencia:

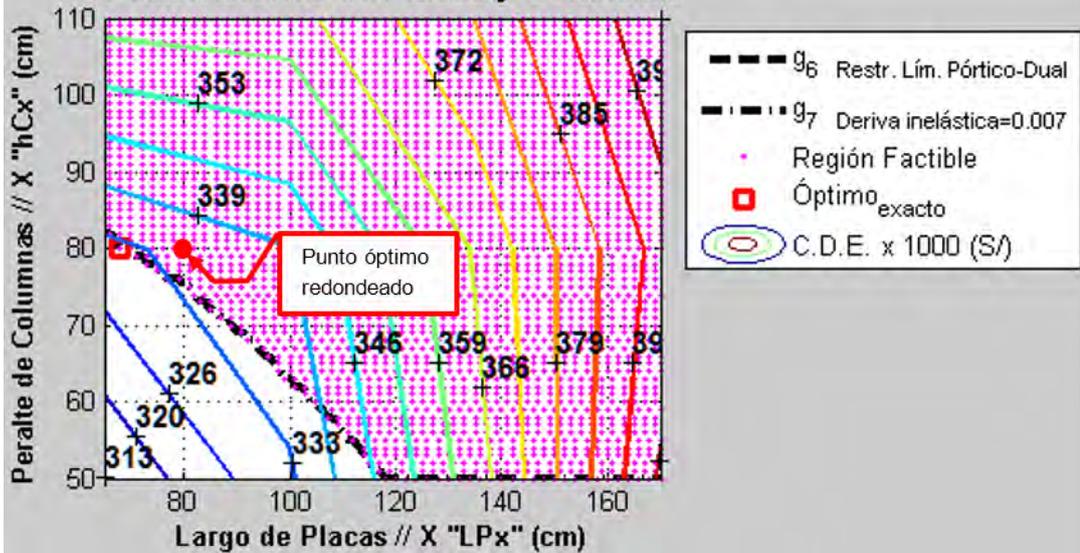


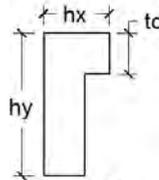
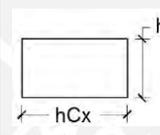
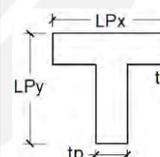
(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

TABLA N.º 6.32: Modelo de 4 aulas por piso, 4 pisos, concreto $f'_c=350$ kgf/cm², premezclado, losa aligerado con bloques de tecnopor

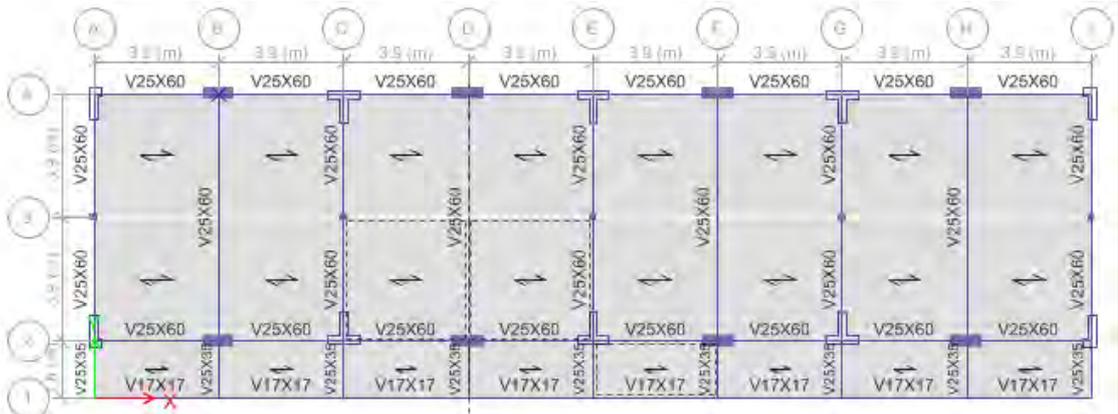
Número de pisos	4	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1198 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00661	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00336

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I 	Columnas ejes B, D, F, H 	Placas "T" ejes C, E, G 	
$h_x = 35$ cm. $h_y = 65$ cm. $t_c = 25$ cm.	$h_{Cx} = 80$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm.	$LP_x = 80$ cm. $LP_y = 65$ cm. $tp = 25$ cm.	
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.922	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 335,500.00

Planta de referencia:

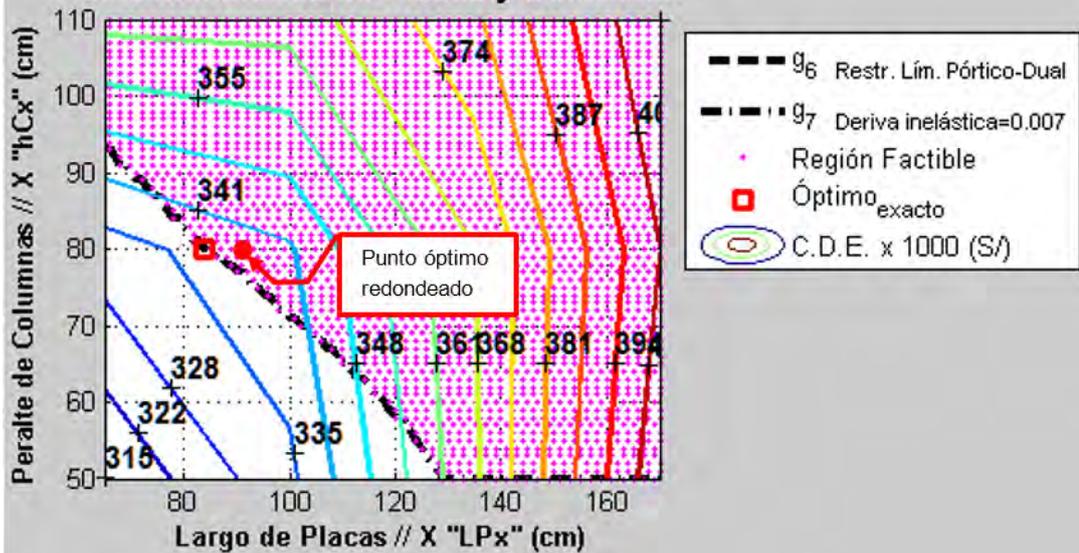


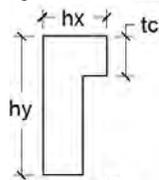
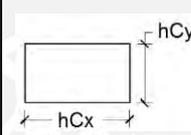
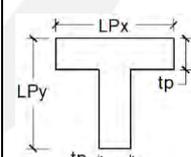
(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

TABLA N.º 6.33: Modelo de 4 aulas por piso, 4 pisos, concreto $f'_c=350$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

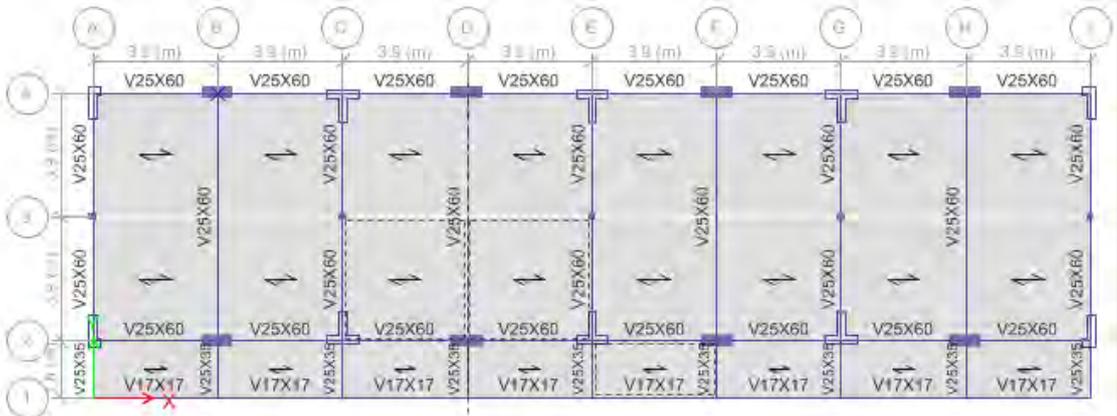
Número de pisos	4	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1198 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00667	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00361

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



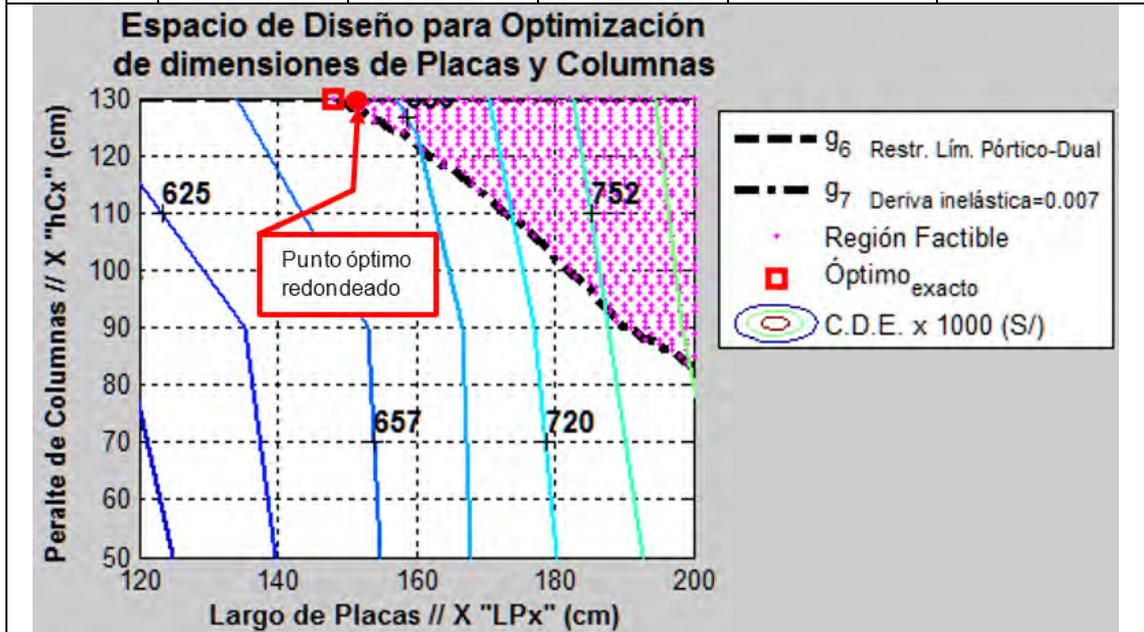
Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I 	hx = 35 cm. hy = 65 cm. tc = 25 cm.	Columnas ejes B, D, F, H 	hCx = 80 cm. hCy = 35 cm.	Placas "T" ejes C, E, G 	LPx = 85 cm. LPy = 65 cm. tp = 25 cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.992	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 339,000.00		

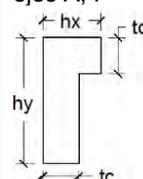
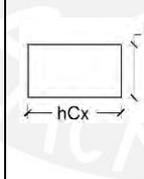
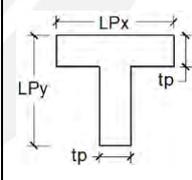
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I del sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

TABLA N.º 6.34: Modelo de 4 aulas por piso, 5 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm ² , mezclado en obra, losa aligerada con bloques de tecnopor					
Número de pisos	5	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1498 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00351



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I 	hx = 40 cm. hy = 165 cm. tc = 25 cm.	Columnas ejes B, D, F, H 	hCx=130 cm. hCy = 40 cm.	Placas "T" ejes C, E, G 	LPx = 150 cm. LPy = 165 cm. tp = 25 cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.98	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 674,000.00		

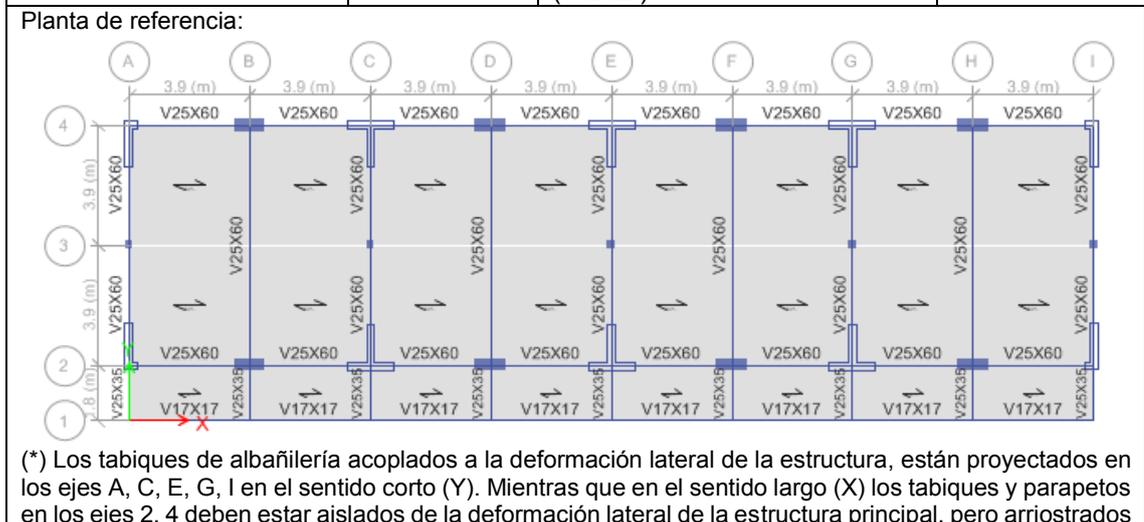
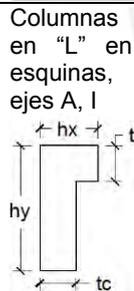
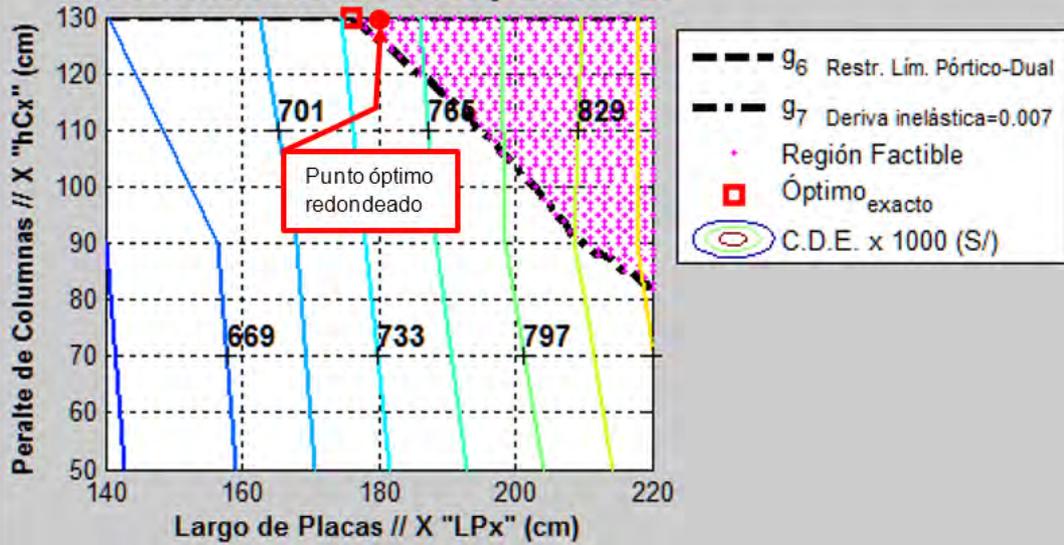


TABLA N.º 6.35: Modelo de 4 aulas por piso, 5 pisos, concreto f'c 210 kgf/cm², mezclado en obra, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	5	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1498 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00699	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0037

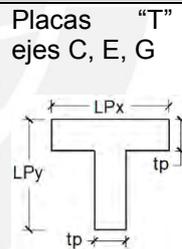
Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



hx = 40 cm.
hy = 165 cm.
tc = 25 cm.

Columnas ejes B, D, F, H

hCx=130 cm.
hCy = 40 cm.



LPx = 180 cm.
LPy = 165 cm.
tp = 25 cm.

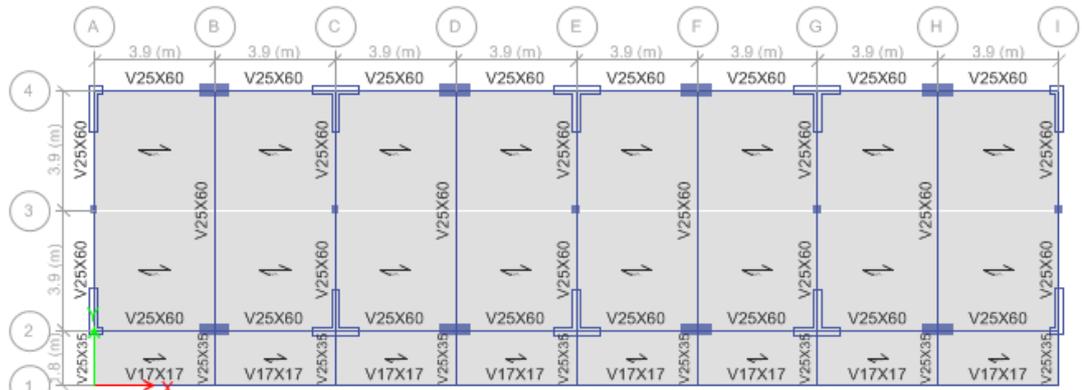
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería

0.99

Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)

S/ 748,000.00

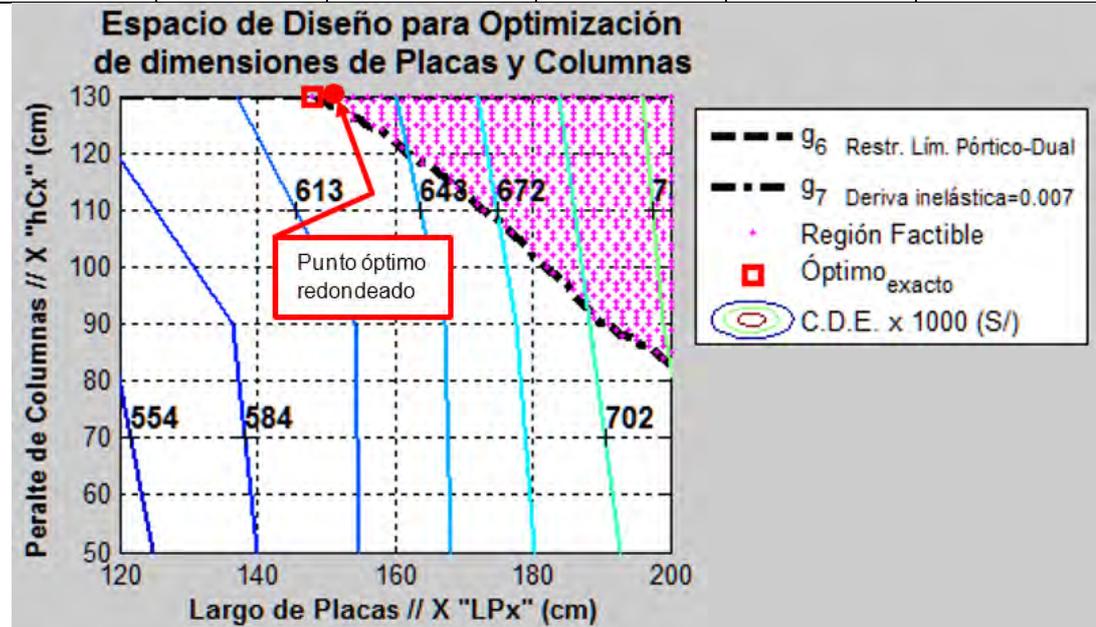
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I en el sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

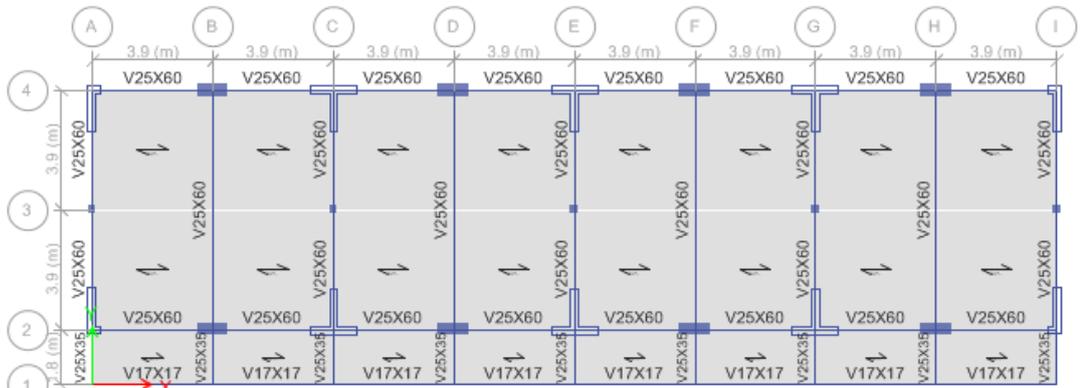
TABLA N.º 6.36: Modelo de 4 aulas por piso, 5 pisos, concreto $f'_c=210$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	5	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1498 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0069	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0035



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I	hx = 40 cm. hy = 165 cm. tc = 25 cm.	Columnas ejes B, D, F, H	hCx = 130 cm. hCy = 40 cm.	Placas "T" ejes C, E, G	LPx = 150 cm. LPy = 165 cm. tp = 25 cm.
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.98	Costo Directo de Estructuras	S/ 633,000.00		

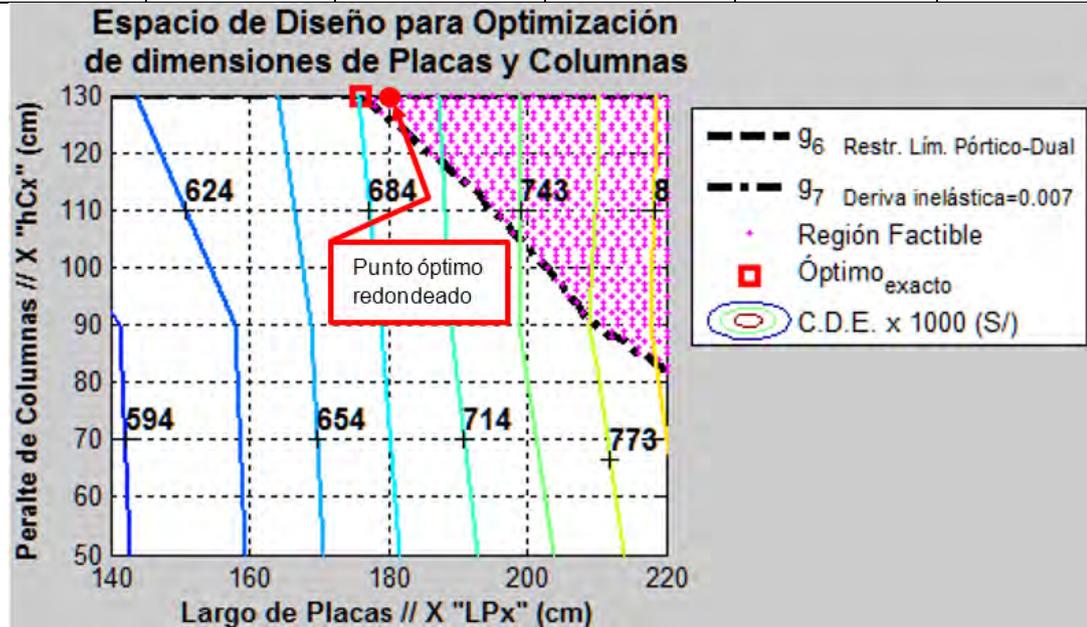
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I en el sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

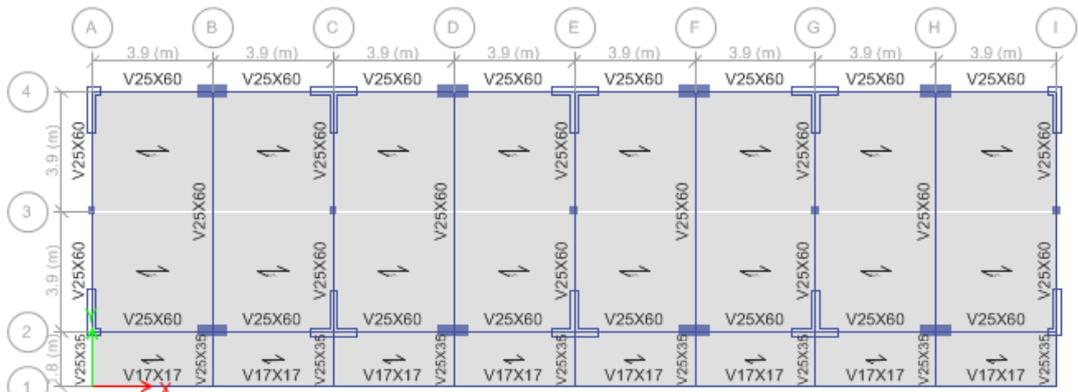
TABLA N.º 6.37: Modelo de 4 aulas por piso, 5 pisos, concreto $f'_c=210 \text{ kgf/cm}^2$, premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	5	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1498 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0069	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0037



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I	$h_x = 40 \text{ cm.}$ $h_y = 165 \text{ cm.}$ $t_c = 25 \text{ cm.}$	Columnas ejes B, D, F, H	$h_{Cx} = 130 \text{ cm.}$ $h_{Cy} = 40 \text{ cm.}$	Placas "T" ejes C, E, G	$LP_x = 180 \text{ cm.}$ $LP_y = 165 \text{ cm.}$ $tp = 25 \text{ cm.}$
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.99	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 696,000.00		

Planta de referencia:

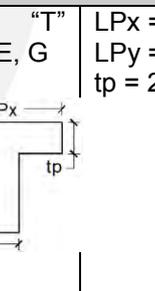
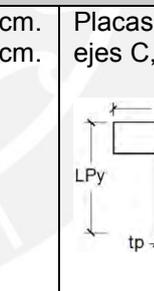
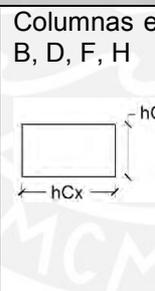
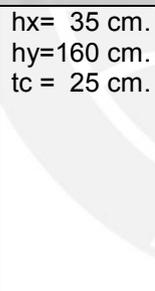
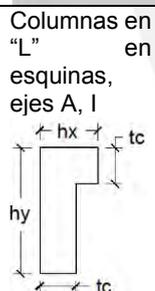
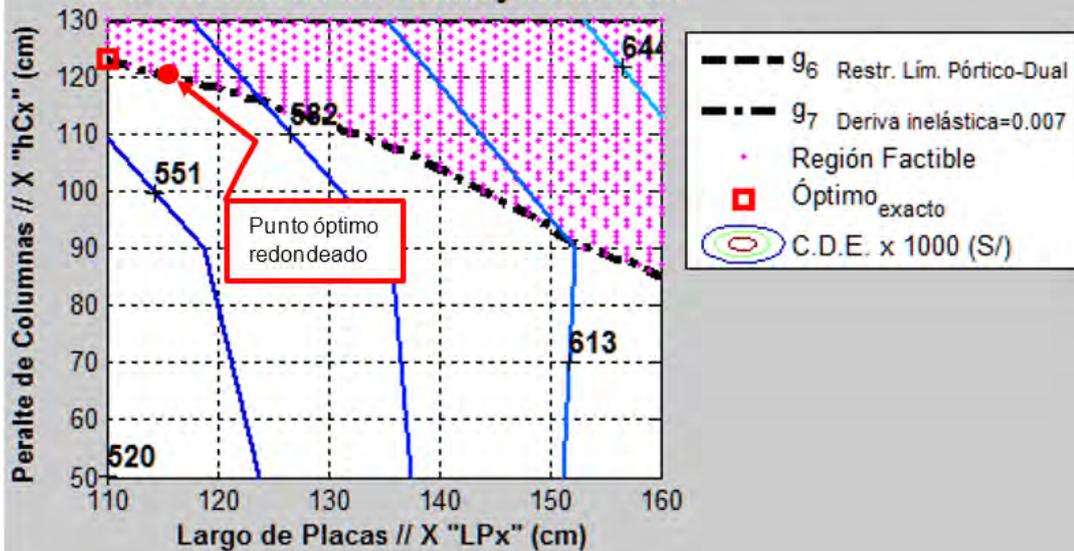


(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I en el sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

TABLA N.º 6.38: Modelo de 4 aulas por piso, 5 pisos, concreto $f'_c=280$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	5	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1498 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0069	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00323

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



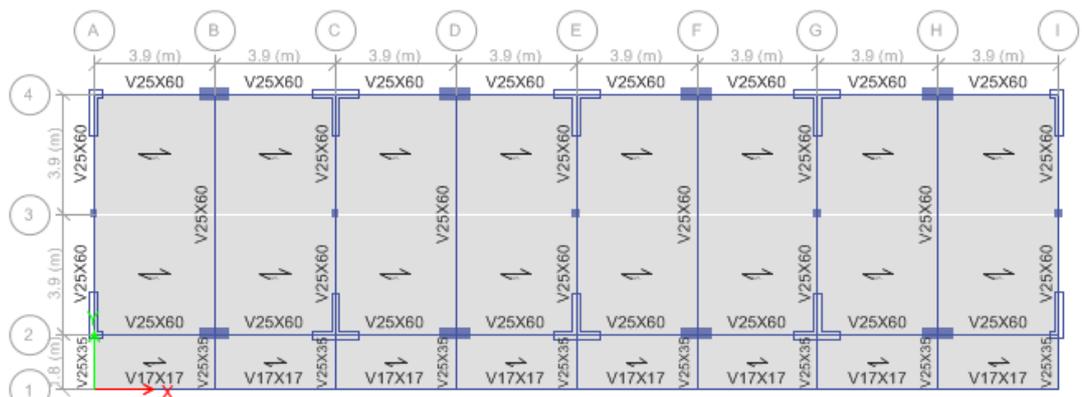
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería

0.91

Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)

S/ 570,000.00

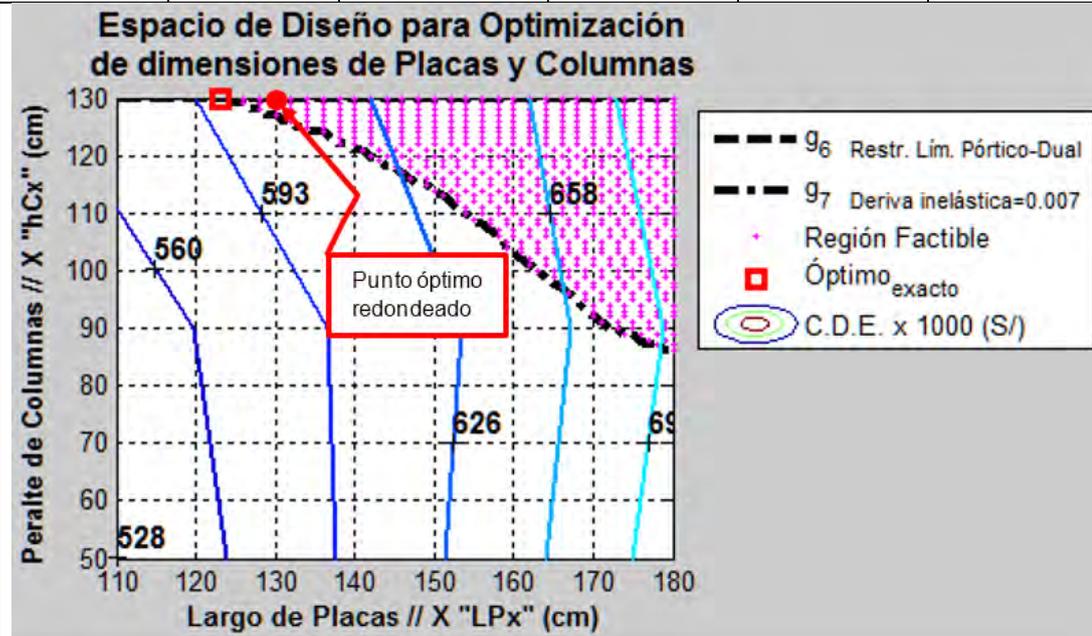
Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I en el sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

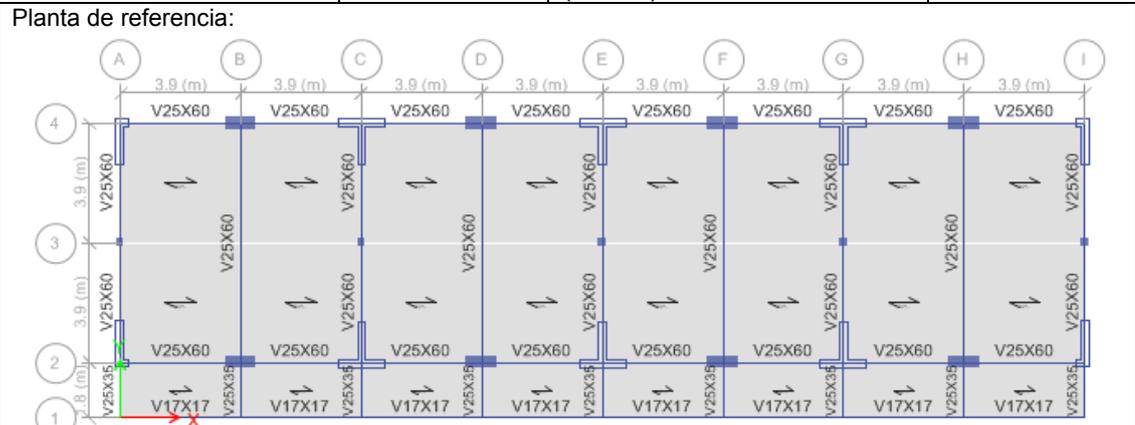
TABLA N.º 6.39: Modelo de 4 aulas por piso, 5 pisos, concreto $f'_c=280 \text{ kgf/cm}^2$, premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	5	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1498 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.0068	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.0035



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I	$h_x = 35 \text{ cm.}$ $h_y = 160 \text{ cm.}$ $t_c = 25 \text{ cm.}$	Columnas ejes B, D, F, H	$h_{Cx} = 130 \text{ cm.}$ $h_{Cy} = 35 \text{ cm.}$	Placas "T" ejes C, E, G	$LP_x = 130 \text{ cm.}$ $LP_y = 160 \text{ cm.}$ $tp = 25 \text{ cm.}$
--	---	--------------------------	---	-------------------------	---

Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.984	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 608,000.00
---	-------	---------------------------------------	---------------

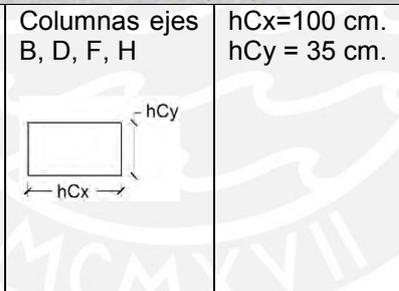
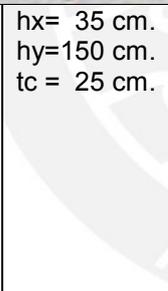
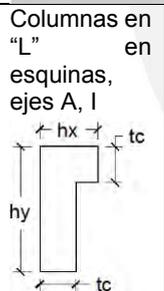
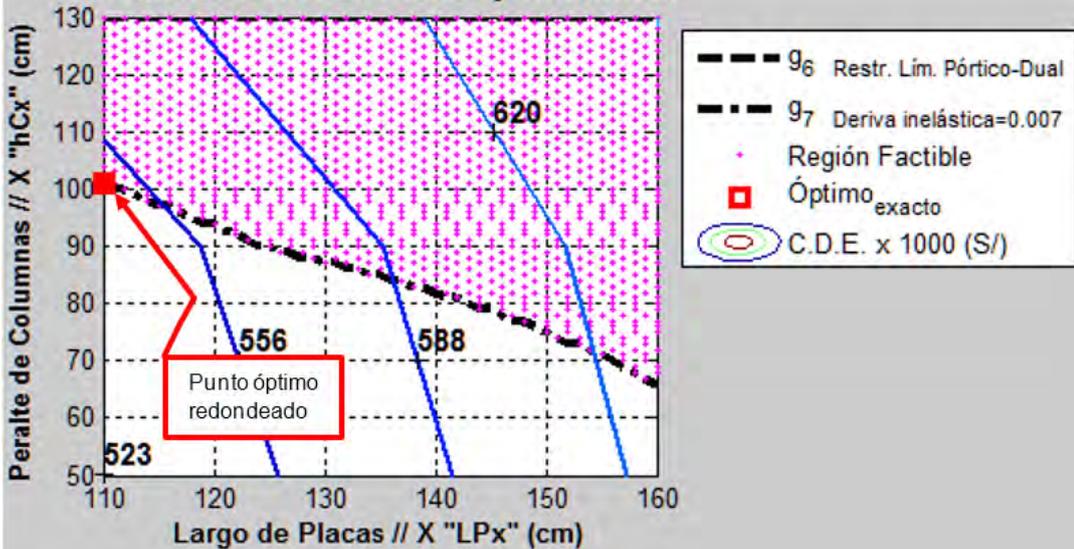


(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I en el sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

TABLA N.º 6.40: Modelo de 4 aulas por piso, 5 pisos, concreto $f'_c=350$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de tecnopor

Número de pisos	5	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1498 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00695	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00307

Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I
 $h_x = 35$ cm.
 $h_y = 150$ cm.
 $t_c = 25$ cm.

Columnas ejes B, D, F, H
 $h_{Cx} = 100$ cm.
 $h_{Cy} = 35$ cm.

Placas "T" ejes C, E, G
 $LP_x = 110$ cm.
 $LP_y = 150$ cm.
 $t_p = 25$ cm.

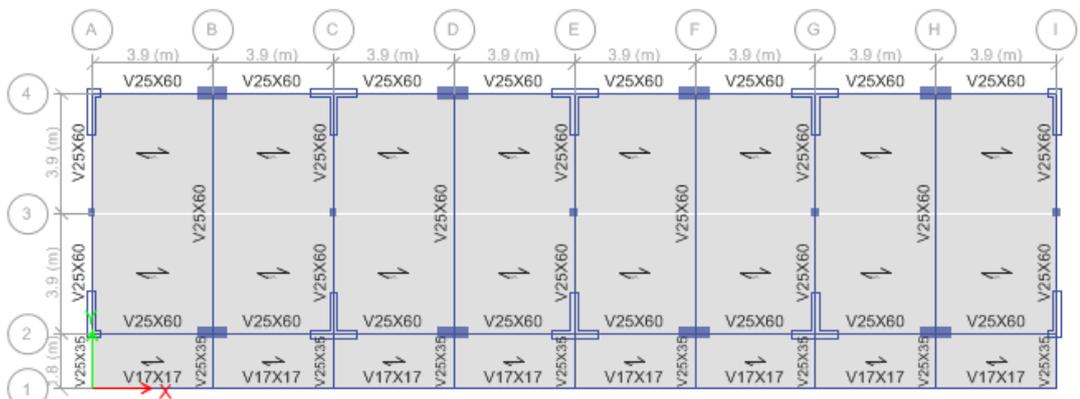
Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería

0.863

Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)

S/ 550,000.00

Planta de referencia:

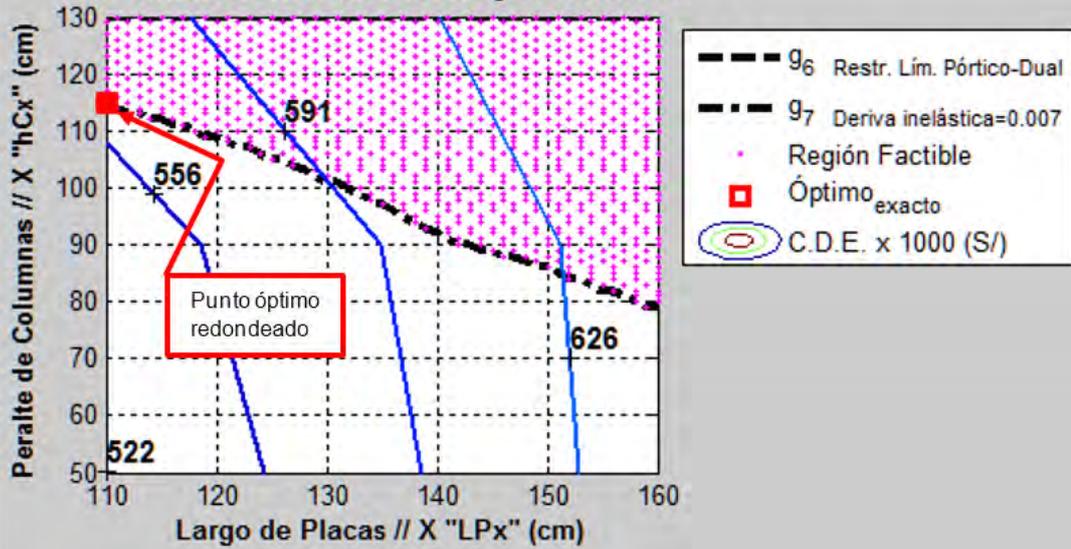


(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I en el sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

TABLA N.º 6.41: Modelo de 4 aulas por piso, 5 pisos, concreto $f'_c=350$ kgf/cm², premezclado, losa aligerada con bloques de ladrillo

Número de pisos	5	Número de aulas por piso	4	Alto libre entrepiso	2.5 m.
Espesor losa aligerada	17 cm.	Espesor muros de albañilería (*)	23 cm.	Dimensiones de las Vigas (b x h)	25x60 cm. (Excepto en el voladizo, según planta)
Área construida total	1498 m ²	Deriva de entrepiso máxima en X	0.00695	Deriva de entrepiso máxima en Y	0.00334

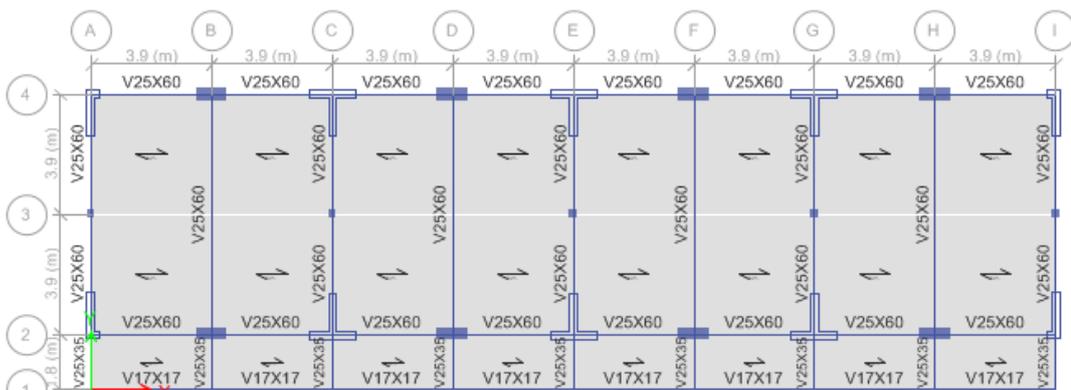
Espacio de Diseño para Optimización de dimensiones de Placas y Columnas



Columnas en "L" en esquinas, ejes A, I	$h_x = 35$ cm. $h_y = 150$ cm. $t_c = 25$ cm.	Columnas ejes B, D, F, H	$h_{Cx} = 115$ cm. $h_{Cy} = 35$ cm.	Placas "T" ejes C, E, G	$LP_x = 110$ cm. $LP_y = 150$ cm. $tp = 25$ cm.
--	---	--------------------------	---	-------------------------	---

Ratio máximo demanda / resistencia en albañilería	0.93	Costo Directo de Estructuras (C.D.E.)	S/ 563,000.00
---	------	---------------------------------------	---------------

Planta de referencia:



(*) Los tabiques de albañilería acoplados a la deformación lateral de la estructura, están proyectados en los ejes A, C, E, G, I en el sentido corto (Y). Mientras que en el sentido largo (X) los tabiques y parapetos en los ejes 2, 4 deben estar aislados de la deformación lateral de la estructura principal, pero arriostrados

**TABLA N.º 6.42: RESUMEN DEL COSTO DIRECTO DE ESTRUCTURAS (D.C.E.) en (S /)
DE LOS MODELOS OPTIMIZADOS**

Tipo de losa aligerada	Descripción del modelo	f'c 210 kgf/cm2 hecho en obra	f'c 210 kgf/cm2 pre mezclado	f'c 280 kgf/cm2 pre mezclado	f'c 350 kgf/cm2 pre mezclado	% máximo de diferencia entre C.D.E.
De espesor 17 cm., con bloques de poliestireno expandido (tecnopor)	2 pisos, 3 aulas por piso (AC = 449 m2)	117,500.00	110,000.00	110,000.00	112,000.00	6.82%
	3 pisos, 3 aulas por piso (AC = 674 m2)	182,000.00	169,000.00	169,000.00	172,500.00	7.69 %
	4 pisos, 4 aulas por piso (AC = 1198 m2)	388,000.00	361,000.00	339,000.00	335,500.00	15.50 %
	5 pisos, 4 aulas por piso (AC = 1498 m2)	674,000.00	633,000.00	570,000.00	550,000.00	22.50 %
De espesor 17 cm., con bloques de arcilla	2 pisos, 3 aulas por piso (AC = 449 m2)	118,000.00	111,000.00	111,000.00	113,000.00	6.31 %
	3 pisos, 3 aulas por piso (AC = 674 m2)	183,500.00	171,000.00	169,500.00	173,500.00	8.26 %
	4 pisos, 4 aulas por piso (AC = 1198 m2)	404,000.00	372,000.00	346,000.00	339,000.00	19.17 %
	5 pisos, 4 aulas por piso (AC = 1498 m2)	748,000.00	696,000.00	608,000.00	563,000.00	32.86 %
% máximo de diferencia entre CDE por tipo de aligerado (bloques de ladrillo versus bloques de tecnopor)	2 pisos, 3 aulas por piso	0.42 %	0.90 %	0.90 %	0.88 %	
	3 pisos, 3 aulas por piso	0.82 %	1.17 %	0.29 %	0.58 %	
	4 pisos, 4 aulas por piso	2.96 %	2.96 %	2.02 %	1.03 %	
	5 pisos, 4 aulas por piso	9.89 %	9.05 %	6.25 %	2.31 %	

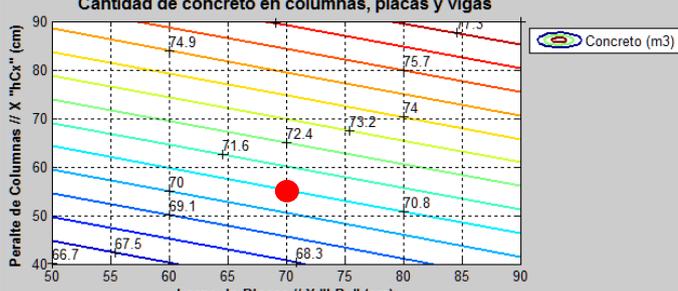
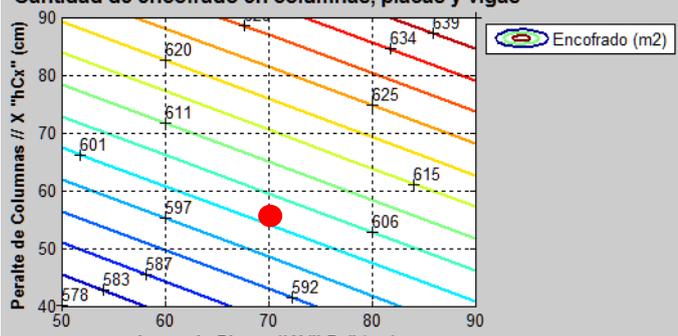
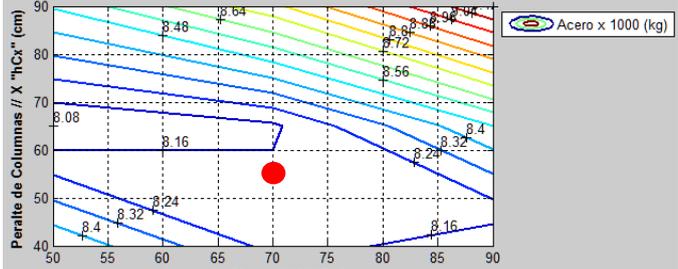
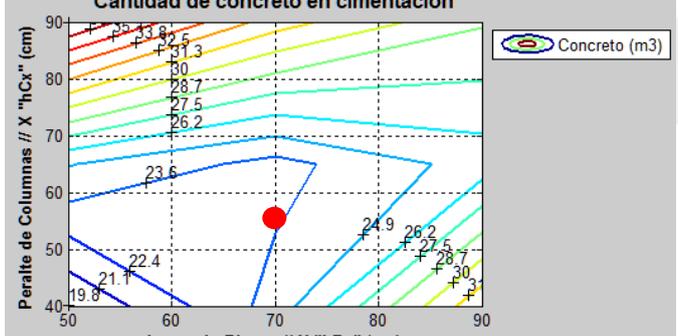
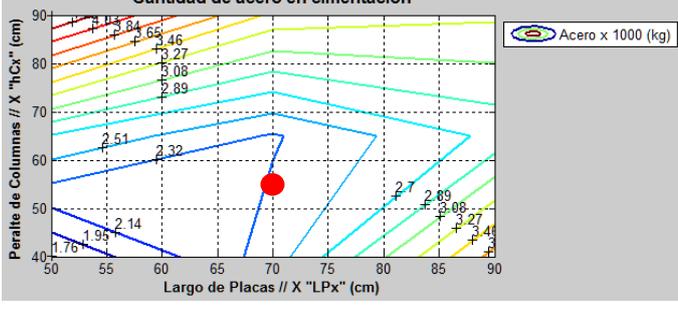
6.6. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CANTIDADES DE CONCRETO, ENCOFRADOS Y ACERO DE REFUERZO EN LOS MODELOS ÓPTIMIZADOS

A efectos de analizar la influencia de las cantidades de concreto, encofrados y acero, se ha procedido a construir los siguientes gráficos (ver tabla n.º 6.43).

Por ejemplo para el caso del modelo de 3 pisos, 3 aulas por piso, con $f'_c=280$ kgf/cm², premezclado y aligerado con bloques de tecnopor, se tiene:



TABLA N.º 6.43: Análisis de la de la influencia de las cantidades de concreto, encofrados y acero de refuerzo

Gráfico	Análisis y comentarios
<p style="text-align: center;">Cantidad de concreto en columnas, placas y vigas</p> 	<p>Para la combinación óptima (ver punto rojo), se observa que la cantidad de concreto en columnas, placas y vigas, está en un valor cercano al promedio.</p>
<p style="text-align: center;">Cantidad de encofrado en columnas, placas y vigas</p> 	<p>Para la combinación óptima (ver punto rojo), se observa que la cantidad de encofrado en columnas, placas y vigas, está en un valor cercano al promedio.</p>
<p style="text-align: center;">Cantidad de acero en columnas, placas y vigas</p> 	<p>Para la combinación óptima (ver punto rojo), se observa que la cantidad de acero de refuerzo en columnas, placas y vigas, está en un valor cercano al mínimo.</p>
<p style="text-align: center;">Cantidad de concreto en cimentación</p> 	<p>Para la combinación óptima (ver punto rojo), se observa que la cantidad de concreto en la cimentación, está en un valor cercano al mínimo.</p>
<p style="text-align: center;">Cantidad de acero en cimentación</p> 	<p>Para la combinación óptima (ver punto rojo), se observa que la cantidad de acero de refuerzo en la cimentación, está en un valor cercano al mínimo.</p>

De forma similar, se ha procedido con los otros modelos optimizados, teniéndose el siguiente resumen:

TABLA N.º 6.44: Resumen de análisis de la influencia de las cantidades de concreto, encofrados y acero de refuerzo en los modelos optimizados				
DESCRIPCIÓN	Modelo de 2 pisos, 3 aulas por piso	Modelo de 3 pisos, 3 aulas por piso	Modelo de 4 pisos, 4 aulas por piso	Modelo de 5 pisos, 4 aulas por piso
Cantidad de concreto estructural en columnas, placas y vigas	Valor cercano al mínimo.	Valor cercano al promedio.	Valor entre el promedio y el mínimo.	Valor cercano al promedio.
Cantidad de encofrado en columnas, placas y vigas	Valor cercano al mínimo.	Valor cercano al promedio.	Valor entre el promedio y el mínimo.	Valor entre el promedio y el mínimo.
Cantidad de acero de refuerzo en columnas, placas y vigas	Valor cercano al mínimo.			
Cantidad de concreto en la cimentación	Valor cercano al mínimo.			
Cantidad de acero de refuerzo en la cimentación	Valor cercano al mínimo.			

Comentarios:

- Al comparar el Costo Directo (C.D.) del modelo 780 optimizado de 2 pisos y 3 aulas por piso (con concreto premezclado 210 kgf/cm²) con el correspondiente Edificio 780 actual (con concreto 210 kgf/cm² mezclado en obra), se observa que existe una diferencia de S/ 121,690.00 - S/ 110,000.00 = S/ 11,690.00, que representa un 9.61 % de disminución en C.D.E.
- Se observa que, para los modelos optimizados de 2 y 3 niveles, el C.D. de estructuras es menor si se diseñase con concreto premezclado de 210 ó 280 kgf/cm² y con aligerado de 17 cm. con bloques de tecnopor.
- Se observa que para los modelos optimizados de 4 y 5 niveles, el C.D. de estructuras es menor si se diseñase con concreto premezclado 350 kgf/cm² y con aligerado de 17 cm. con bloques de tecnopor.

- En los gráficos de los espacios de diseño, se puede observar que en el sentido X, se tienen permanentemente restricciones relacionadas con la rigidez del edificio (derivas límites de entrepiso y en algunos casos el límite entre pórticos y duales tipo II), mientras que en el sentido Y, la condición crítica o restricción es la resistencia de los puntales en compresión (tabiques de albañilería). Los resultados donde se obtienen menor costo directo de estructuras para un mayor $f'c$ se explican en el aumento de la rigidez lateral en función del incremento en el módulo de elasticidad del concreto relacionado con $f'c$; es importante mencionar que en el proceso de optimización no se ha observado restricciones activas relacionadas con la resistencia en los elementos de concreto armado, por otro lado, el incremento de la resistencia $f'c$ no es determinante en el incremento de resistencia en los elementos de concreto armado sometidos fundamentalmente a flexión, pero sí en los que están sometidos a flexo compresión [15].
- Se observa que las dimensiones optimizadas correspondientes a concreto estructural de $f'c=210$ kgf/cm² mezclado en obra son las mismas que las dimensiones optimizadas correspondientes a concreto estructural de $f'c=210$ kgf/cm² premezclado.
- En los modelos optimizados de 1 a 2 pisos, es suficiente proyectar muros de albañilería de ladrillo tipo soga para controlar la deriva de entrepiso en el sentido corto. Sin embargo, en los modelos optimizados de 3 a 5 pisos, se ha encontrado necesario proyectar tabiques de albañilería de ladrillo tipo cabeza. Esto se explica a que en el sentido corto de los edificios, las restricciones activas que determinan las dimensiones óptimas (tanto de columnas de concreto armado y dimensiones de los muros de albañilería acoplados lateralmente a los pórticos de concreto armado) están relacionadas con la resistencia de los referidos tabiques de albañilería.

7. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se ha desarrollado un procedimiento para la optimización estructural, aplicado a edificaciones de uso educativo de Concreto Armado. Éste se clasificaría como una metodología aproximada, basada en criterios, procedimientos de inspección gráfica de los espacios de diseño, estrategias de sub estructuración, minimización de la cantidad de variables activas. El óptimo se obtiene por comparación entre óptimos relativos, pero en ningún caso se llega a determinar un óptimo absoluto.
- De la aplicación teórica del procedimiento desarrollado, se han optimizado un total de 4 modelos de edificios (correspondientes a pabellones de aulas de 2, 3, 4 y 5 pisos), de éstos se tiene las siguientes conclusiones (C.D.E.=Costo Directo de Estructuras):
 - Al comparar el C.D.E. del modelo 780 optimizado (con concreto premezclado 210 kgf/cm²) con el C.D.E. correspondiente al Edificio 780 sismo resistente actual (con concreto 210 kgf/cm² mezclado en obra), ambos para 2 pisos y 3 aulas por piso, se observa que el C.D.E. disminuye en 9.61 % de disminución en el modelo optimizado.
 - Se observa que para los modelos optimizados de 2 y 3 niveles, el C.D.E. es menor si se diseñase con concreto premezclado de 210 ó 280 kgf/cm², con losa aligerada de 17 cm. con bloques de tecnopor.
 - Se observa que para los modelos optimizados de 4 y 5 niveles, el C.D.E. es menor si se diseñase con concreto premezclado 350 kgf/cm² y con aligerado de 17 cm. con bloques de tecnopor.
 - Se observan porcentajes de disminución del C.D.E. entre 6.31% y 32.86% si se proyecta con concretos premezclados y/o de mayor resistencia (ej. $f'c=280$ kgf/cm², 350 kgf/cm²) en lugar del concreto tradicional de $f'c=210$ kgf/cm², mezclado en obra. Los mayores porcentajes de disminución del C.D.E. se obtienen para edificios de 5 pisos y 4 aulas por piso.
 - Se observan porcentajes de disminución en el C.D.E. entre 0.42% y 9.89%, si se proyecta la losa aligerada con bloques de tecnopor en lugar de los tradicionales bloques de ladrillo, donde los mayores porcentajes de disminución del C.D.E. se obtienen para edificios de 5 pisos y 4 aulas por piso.
 - En los gráficos de los espacios de diseño, se puede observar que en el sentido largo "X", se tienen permanentemente restricciones relacionadas con la rigidez del edificio (derivas

inelásticas límite de entrepiso y en algunos casos se tiene también la restricción relacionada al límite entre pórticos y duales), mientras que en el sentido corto “Y”, la restricción es la resistencia de los tabiques de albañilería, acoplados a la deformación lateral de la estructura.

- En los modelos optimizados de 2 pisos, es suficiente proyectar tabiques de albañilería de ladrillo tipo sogá para controlar la deriva inelástica de entrepiso en el sentido corto “Y”. Sin embargo, en los modelos optimizados de 3 a 5 pisos, es necesario considerar tabiques de albañilería de ladrillo tipo cabeza.
- Se observa que las dimensiones optimizadas correspondientes a concreto estructural de $f'c=210$ kgf/cm² mezclado en obra son las mismas que las dimensiones optimizadas correspondientes a concreto estructural de $f'c=210$ kgf/cm² premezclado, pero el C.D.E. disminuye si se proyectase con concreto premezclado.
- En base al análisis de la influencia de las cantidades de concreto, encofrados y acero, se concluye que la combinación óptima se halla en la combinación de valores de las variables de diseño que minimizan las cantidades de acero de refuerzo (para columnas, placas, vigas y cimentación) y concreto en la cimentación.
- Los resultados obtenidos con el procedimiento de optimización desarrollado, respecto a las dimensiones obtenidas para la sección transversal de columnas, placas, vigas, losas aligeradas, espesor y ubicación de tabiques de albañilería, podrían ser tomados para el caso de un proyecto real como un pre dimensionamiento que conduciría a tener un menor C.D.E., sin embargo, correspondería al profesional responsable del proyecto el análisis y diseño estructural final, de acuerdo a las condiciones propias del proyecto específico, debiéndose verificar que se cumplan lo establecido en el Reglamento Nacional de Edificaciones. Cabe precisar que en este trabajo, para la determinación de los óptimos no se ha llegado en ningún caso a diseños definitivos, sino, solamente a estimaciones con criterio técnico tal como se ha desarrollado y descrito en este trabajo de investigación.

8. FUENTES Y BIBLIOGRAFIA

- [1] R.H. Gallagher – O.C. Zienkiewicz (1973) “Optimum Structural Design: Theory and Applications”. Ed. John Wiley & Sons
- [2] U. Kirsch (1981) “Optimum Structural Design”. Ed. McGraw-Hill Book Company
- [3] A. Queizana – V.E. Sonzognib (2006) Art. “Algoritmos de Punto Interior para Optimización Estructural frente a acciones sísmicas”. Ed. Asociación Argentina de Mecánica Computacional
- [4] P.W. Christensen, A. Klarbring (2009) “An Introduction to Structural Optimization”. Ed. Springer Science + Business Media B.V.
- [5] J.A. Velásquez - L. Zapata (1983) “Optimización Estructural de miembros de armaduras”. UNI, Revista “Tecnía”, Vol2. No.2
- [6] L. Zapata - C. Gutiérrez (1986) “Optimización de pórticos rígidos de alma llena para naves industriales”. UNI, Revista “Tecnía”, Vol3. No.1
- [7] V. Ortega (2000) “Análisis económico de diseños estructurales”. Tesis M.I. PUCP
- [8] F. Quispe (2008) “Optimización del costo de reservorios circulares de concreto armado apoyados sobre el suelo”. Tesis M.I. PUCP
- [9] H. Moore (2007) “MATLAB para Ingenieros”, Pearson Prentice Hall, México
- [10] Pág. Web <http://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB#Sintaxis> (fecha de navegación 16/05/2010)
- [11] Pág. Web http://www.minedu.gob.pe/oinfe/xtras/NormaTecnica_PrimaryySecundaria_a_go2006.pdf (fecha de navegación 16/05/2010)
- [12] Astorga-Aguilar (2006), “Evaluación del riesgo sísmico de edificaciones educativas peruanas”,
- [13] V. Poves (2005) “Planeamiento integral de la construcción de cuatro colegios en Ancash”, Tesis de Grado PUCP
- [14] Quintana – León (2004) “Evaluación del desempeño sismoresistente de los colegios peruanos modernos”, Tesis de Grado PUCP
- [15] G. Ottazzi (2010) “Apuntes del Curso Concreto Armado I”, PUCP, Lima-Perú
- [16] R. Morales (2006) “Diseño en Concreto Armado”, ICG, Lima – Perú
- [17] A. Tena (2007) “Análisis de Estructuras con Métodos Matriciales”, Editorial Limusa, México DF

- [18] Nelson-McCormac (2006) "Análisis de Estructuras: Métodos Clásico y Matricial", Editorial Alfaomega, México DF
- [19] Nawy E. (2009) "Reinforced Concrete: a fundamental approach", Pearson Prentice Hall, USA
- [20] Silva W. (2009) "Apuntes del Curso Análisis Matricial de Estructuras", PUCP, Perú
- [21] Diaz M. (1979) "Optimización estructural de pórticos sometidos mayormente a flexión" (Tesis Maestría), UNI, Perú
- [22] Romani S. (2002) "Optimización de estructuras aporticadas de concreto armado" (Tesis Maestría), UNI, Perú
- [23] MacBain K. - Spillers W. (2009) "Structural Optimization", Springer, USA
- [24] Sanchez-Caballero S. - Sellés M. - Pla-Ferrando R. - Peydró M. "Nuevas técnicas de Optimización de estructuras", Universidad Politécnica de Valencia, Revista ³Ciencias
- [25] F. Navarrina (1987) "Una Metodología General para Optimización Estructural en Diseño Asistido por Ordenador", ETSICCP-UPC
- [26] J.M. Aguinagalde – M. No (1988) "Un nuevo método para la optimización de dimensiones de estructuras modelizadas por elementos finitos", (Revista Internacional de Métodos Numéricos para Calculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 4, 3, 275-295), Universidad Politécnica de Cataluña-España
- [27] P. Venkataraman (2002) "Applied optimization with MATLAB Programming", John Wiley & Sons, New York-USA.
- [28] M. Astorga - R. Aguilar (2006) "valuación del riesgo sísmico de edificaciones educativas peruanas", Tesis Maestría, PUCP, Lima-Perú
- [29] A. San Bartolomé - D. Quiun - W. Silva (2011) "Diseño y Construcción de estructuras sismorresistentes de albañilería", PUCP, Lima-Perú
- [30] A. Tena (2007) "Análisis de Estructuras con Métodos Matriciales", Limusa, México
- [31] Oficina de Infraestructura Educativa (2009) "NORMAS TÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE LOCALES DE EDUCACIÓN BÁSICA REGULAR", MINEDU, Lima-Perú
- [32] "Reglamento Nacional de Edificaciones", Normas E.020, E.030, E.060, MVCS-SENCICO, Lima-Perú
- [33] A. Blanco "Evaluación del Comportamiento Sísmico de las Edificaciones", PUCP, Lima-Perú

[34] N. Sánchez “Criterios Estructurales para la enseñanza a los alumnos de Arquitectura”, PUCP, Lima-Perú

[33] A. Blanco (2005), “Las Estructuras de los Centros Educativos (Colegios) en el Siglo XX en el Perú, Diversos Proyectos de Reforzamiento y Ejemplos de Estructuración de Edificaciones de la Universidad Católica del Perú”, Tesis Maestría, PUCP, Lima-Perú

