

UNIVERSIDAD CENTRAL
VICERRECTORÍA ACADÉMICA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS COMPARATIVO DE EFICIENCIA, SEGURIDAD Y ECONÓMICO ENTRE
LOSAS POSTENSADAS Y LOSAS TUBULARES

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIANTE: BRYAN BRENES BLANCO

TUTORA: ING. ANDREA MARÍA CALDERÓN CERDAS

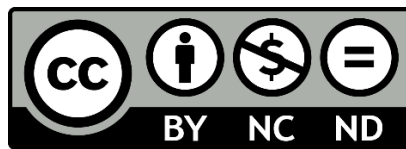
SEDE METROPOLITANA, COSTA RICA

JULIO, 2025

CARTA DE ENTENDIMIENTO

12 de agosto del 2025

Yo, Bryan Alberto Brenes Blanco, cédula de identidad número 3-0419-0750, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, en condición de autor del Trabajo Final de Graduación titulado “Análisis comparativo de eficiencia, seguridad y económico, entre losas postensadas y losas tubulares”, acepto que este documento tenga la más amplia difusión pública a través de la Internet, por medio del depósito en el repositorio de acceso abierto de la Biblioteca de la Universidad Central, bajo la siguiente licencia:



Esta obra está sujeta a la licencia Reconocimiento-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional de Creative Commons.

Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

Bryan Alberto Brenes Blanco

CONTENIDO

Tabla de contenido

CONTENIDO.....	II
DEDICATORIA.....	X
AGRADECIMIENTOS	XI
EPÍGRAFE	XII
CAPÍTULO I. PROBLEMA	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	19
1.4 ANTECEDENTES	21
1.4.1 Antecedentes nacionales	21
1.4.2 Antecedentes internacionales.....	23
1.5 PROYECCIONES.....	26
1.5.1 Alcances.....	27
1.5.2 Limitaciones.....	27
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	29
2.1 HERRAMIENTAS INGENIERILES	30
1.1 <i>Análisis FODA de las losas postensadas</i>	<i>31</i>
<i>Fortalezas:.....</i>	<i>31</i>
1. <i>Alta capacidad de carga: Las losas postensadas pueden soportar mayores cargas en comparación con losas convencionales de concreto armado, debido a la aplicación de esfuerzos de precompresión (ACI 318-19, 2019).</i>	<i>31</i>
2. <i>Reducción de fisuración: La postensión permite controlar mejor las fisuras causadas por cargas de servicio y retracción (PTI, 2020).</i>	<i>31</i>
3. <i>Eficiencia estructural: Permite mayores luces libres con menores espesores, reduciendo el peso de la estructura y optimizando materiales (Nilson et al., 2010).</i>	<i>31</i>
4. <i>Durabilidad mejorada: Las losas postensadas presentan mayor resistencia a la corrosión, debido a la compresión inducida que reduce la permeabilidad (ACI 423R-17, 2017).</i>	<i>31</i>
<i>Oportunidades:.....</i>	<i>31</i>
1. <i>Mayor aplicación en proyectos sostenibles: Su uso contribuye a edificaciones más eficientes en términos de materiales y energía (Fib Bulletin 75, 2014).</i>	<i>31</i>
2. <i>Innovaciones tecnológicas: El desarrollo de nuevos materiales y métodos de anclaje permite una mayor flexibilidad en el diseño y aplicación (Mehta & Monteiro, 2014).</i>	<i>31</i>
3. <i>Expansión en sectores residenciales y comerciales: El incremento en la demanda de espacios abiertos en la construcción moderna favorece la implementación de losas postensadas (Mindess et al., 2019).</i>	<i>31</i>
4. <i>Normativas internacionales más estrictas: La adopción de normativas más rigurosas promueve la utilización de soluciones estructurales más eficientes y seguras (ACI 318-19, 2019).</i>	<i>31</i>
<i>Debilidades:.....</i>	<i>32</i>
1. <i>Costo inicial elevado: Requiere una inversión inicial mayor en materiales y mano de obra especializada (PTI, 2020).</i>	<i>32</i>
2. <i>Requiere personal especializado: La correcta ejecución de la postensión exige ingenieros y operarios capacitados (Nilson et al. 2010).</i>	<i>32</i>
3. <i>Mantenimiento especializado: Los elementos postensados necesitan inspecciones y mantenimientos periódicos para asegurar su correcto funcionamiento (ACI 423R-17, 2017).</i>	<i>32</i>

4. Dependencia de herramientas especializadas: La colocación de los tendones requiere herramientas y equipos específicos, lo que puede complicar la logística en algunas obras (Mehta & Monteiro, 2014).....	32
Amenazas:.....	32
1. Competencia con otros sistemas constructivos: Soluciones como losas prefabricadas o mixtas pueden ofrecer ventajas en términos de rapidez de construcción y costo (Mindess et al., 2019).....	32
2. Variabilidad en la calidad de materiales: La calidad de los tendones de postensión puede verse afectada por proveedores poco confiables (ACI 318-19, 2019).....	32
3. Normativas estrictas: Requisitos más exigentes pueden incrementar los costos y los tiempos de ejecución (Fib Bulletin 75, 2014).....	32
4. Fallas por una mala ejecución: Una instalación inadecuada puede provocar problemas graves en la estructura y reducir tanto su vida útil como su seguridad (Nilson et al., 2010).....	32
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	44
INTRODUCCIÓN AL MODELO ESTRUCTURAL DESARROLLADO EN ETABS	45
2. PREPARACIÓN INICIAL DEL MODELO ESTRUCTURAL	47
2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO	47
2.2 Ubicación sísmica y criterios normativos	48
2.3 Tipología de losas estructurales utilizadas	50
2.4 Selección normativa y fundamentos de diseño	51
2.5 Justificación metodológica del enfoque comparativo	52
2. CREACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL EN ETABS	53
2.1 CONFIGURACIÓN INICIAL DEL MODELO EN ETABS	53
2.2 Definición de materiales estructurales	55
2.3 Definición de secciones transversales	55
2.4 Modelado de elementos estructurales	58
2.5 Definición de condiciones de apoyo y restricciones	58
2.6 Verificación preliminar del modelo	59
3. Losa postensada – Modelado técnico	60
3.1 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA Y TIPO DE ELEMENTO	60
3.1.1 PROPIEDADES DE MATERIAL	60
3.1.2 DEFINICIÓN Y TRAZADO DE TENDONES	61
3.1.3 MOMENTO DE PRECOMPRESIÓN INDUCIDO POR LOS TENDONES	62
3.1.4 TABLA RESUMEN – LOSA POSTENSADA	64
3.2 Losa tubular – Modelado técnico	64
3.2.1 Geometría y distribución estructural	64
Comparación técnica entre losas	66
4. ASIGNACIÓN DE CARGAS ESTRUCTURALES	66
4.1 TIPOS DE CARGAS ESTRUCTURALES CONSIDERADAS	67
c) Carga Sísmica (Earthquake Load – EQ)	69
4.3 Verificación de Cargas Aplicadas	71
5. ASIGNACIÓN DE CARGAS ESTRUCTURALES	72
5.1 LOSA POSTENSADA	72
5.1.1 CARGA MUERTA (DL)	72
5.1.2 CARGA VIVA (LL)	74
5.1.3 CARGA SÍSMICA (EQ)	74
5.1.4 CARGAS PUNTUALES LOCALIZADAS	75
5.2 Losa Tubular	76
5.3 Tablas resumen comparativas	79
5.4 Normativa aplicada	79
5.5 Validación de cargas	80
6. COMBINACIONES DE CARGA Y ANÁLISIS SÍSMICO MODAL	81
6.1 FUNDAMENTO NORMATIVO PARA COMBINACIONES DE CARGA	81
6.2 Aplicación de combinaciones en ETABS	82
6.3 Análisis sísmico modal espectral	83

<i>El análisis modal espectral considera la participación dinámica de múltiples modos de vibración estructural. En estructuras ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta, como la zona IV de Costa Rica, este tipo de análisis es obligatorio (CSCR 2010, Cap. 4).</i>	83
Cálculo del Período Fundamental de Vibración	84
6.4 Comparación de respuesta sísmica	89
6.5 Normativa aplicada y validación	90
7.1 VERIFICACIÓN DE CONECTIVIDAD DE ELEMENTOS	92
7.2 Revisión de la malla y compatibilidad geométrica	92
7.3 Asignación de diafragmas rígidos	93
7.4 Revisión de rigidez lateral global	93
7.5 Equilibrio estático del modelo	94
7.6 Tabla de control del modelo estructural	95
Conclusión del proceso de validación	95
8. VERIFICACIÓN DE DEFORMACIONES Y ESTADO LÍMITE DE SERVICIO	95
8.1 FUNDAMENTO NORMATIVO PARA CONTROL DE FLECHAS	96
8.2 Metodología aplicada en el análisis de deformaciones	97
8.3 Resultados obtenidos – Losa postensada	98
8.4 Resultados obtenidos – Losa tubular	99
8.5 Representación visual comparativa de deformaciones	99
8.5.1 Resultados comparativos de flechas máximas	100
8.5.2 Representaciones gráficas del modelo	101
Forma deformada bajo combinación DL + LL – Losa Postensada	101
8.6 Tabla comparativa – Control de flechas	103
8.7 Consideraciones finales	103
9. Cálculo de Cuantías Mínimas de Refuerzo	104
9.1 FUNDAMENTO NORMATIVO	104
9.2 Parámetros de Diseño Utilizados	105
9.3 Aplicación en Losa Postensada	106
9.4 Aplicación en Losa Tubular	107
9.5 Comparación de Refuerzos Mínimos Adopados	108
9.6 Conclusión Técnica	108
10.1 MARCO NORMATIVO PARA RESISTENCIA ÚLTIMA	109
• $1.2D + 1.6L + 0.5 (LR \text{ o } R)$	109
• $1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S$	109
10.2 Revisión de esfuerzo a flexión – losas postensadas	110
10.3 Revisión de esfuerzo a corte – losas postensadas	111
Donde:	112
V_c = Resistencia nominal a corte (kN)	112
f'_c = Resistencia del concreto (MPa)	112
b = Ancho de la sección considerada (mm), normalmente 1000 mm	112
d = Profundidad efectiva (mm), medida desde la fibra comprimida hasta el centro del refuerzo	112
Datos del modelo:	112
• $f'_c = 28 \text{ MPa}$	112
• $b = 1000 \text{ mm}$	112
• $d = 165 \text{ mm}$	112
Entonces:	112
$V_c = 0.17 \times \sqrt{28} \times 1000 \times 165 \times 10^{-3} \approx 148.0 \text{ kN}$	112
Corte solicitado según ETABS:	112
$V_u = 112.6 \text{ kN}$	112
Resultado: Como $V_u < V_c$, la losa cumple en corte sin necesidad de refuerzo transversal.	112
10.4 Revisión de esfuerzos – Losas tubulares	113
10.5 Tabla resumen de esfuerzos comparativos	115
10.6 Conclusión técnica del cumplimiento estructural	115
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS COMPARATIVO	138

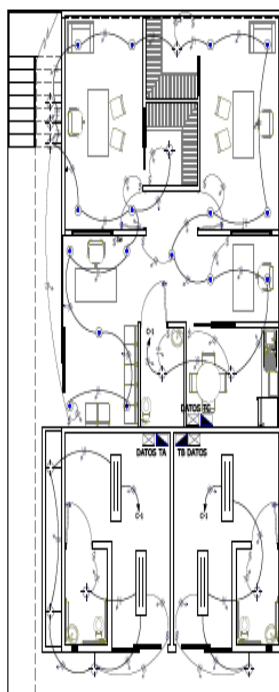
ANÁLISIS ECONÓMICO COSTO-BENEFICIO COMPARATIVO	142
PRESUPUESTO LOSA POSTENSADA.....	142
PRESUPUESTO LOSA TUBULAR.....	143
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	148
<i>Conclusiones Generales del Estudio.....</i>	<i>149</i>
<i>Desempeño estructural avanzado en losas postensadas.....</i>	<i>152</i>
<i>Ventajas funcionales y constructivas de las losas tubulares</i>	<i>153</i>
<i>Consideraciones técnicas y limitaciones estructurales del sistema tubular</i>	<i>155</i>
<i>Limitaciones del sistema postensado: consideraciones técnicas y operativas</i>	<i>157</i>
<i>Contextualización del uso óptimo de los sistemas de losas: criterios estructurales y prácticos</i>	<i>160</i>
<i>Valor estratégico del modelado estructural computacional.....</i>	<i>162</i>
<i>12. Recomendaciones Técnicas y Constructivas</i>	<i>164</i>
<i>12.4 Incorporación de criterios de sostenibilidad estructural en el diseño de losas.....</i>	<i>169</i>
<i>12.5 Inclusión de validación empírica como herramienta clave para la precisión estructural</i>	<i>170</i>
<i>13. Síntesis de Resultados.....</i>	<i>172</i>
<i>14. Líneas de Investigación Futuras.....</i>	<i>174</i>
<i>2. Análisis Económico Profundizado desde la Perspectiva del Ciclo de Vida de la Estructura.....</i>	<i>177</i>
<i>3. Evaluación Sísmica Mediante Técnicas Avanzadas de Simulación Numérica.....</i>	<i>180</i>
<i>4. Evaluación Integral del Desempeño Estructural de Losas con Materiales y Tecnologías Emergentes en Ambientes Constructivos Latinoamericanos</i>	<i>183</i>
REFERENCIAS	186
3.3 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	187
APÉNDICES Y ANEXOS.....	192
APÉNDICE 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	193

APÉNDICE 2:

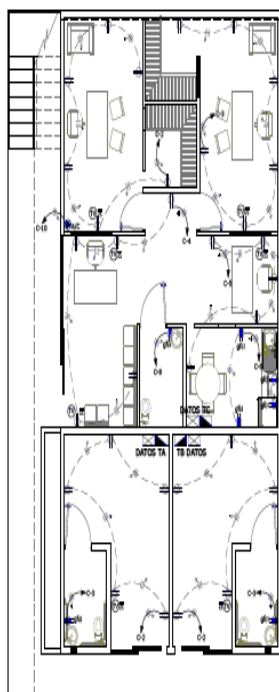
Código	100-1		Descripción	Losa Tubular 375 m2			
1	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total	Subcontrato	Total MO
	Formaleta de 1/12 4 varas	24	Unidad	¢7 500,00	¢180 000,00		
	lamina metaldeck 01,10mm #22 lamina 15 metros	27	Unidad	¢152 000,00	¢4 104 000,00		
	reglas 1x4 semiduro en 4 varas	65	Unidad	¢2 950,00	¢191 750,00		
	varillas corrugada 3/4 grado 60 30% menos que otro sistema	525	Unidad	¢7 500,00	¢3 937 500,00		
	Alambre negro	210	metros	¢950,00	¢199 500,00		
	Clavos 2" con cabeza	25	kilos	¢2 200,00	¢55 000,00		
	Clavos 2" 1/2 con cabeza	25	kilos	¢2 600,00	¢65 000,00		
	Clavos 2" de acero	1	kilos	¢4 500,00	¢4 500,00		
	Maxi acril 70 cubeta rinde 40 m2	10	cubeta	¢17 000,00	¢170 000,00		
	Losa Tubular 1 metro cuadrado	375	Unidad	¢16 089,47	¢6 033 551,25		
	varilla corrugada 5/8 grado 60 sacar pines	10	Unidad	¢5 000,00	¢50 000,00		
	concreto premmezclado con bomba telescópica 280 kg/cm2	75	m3	¢145 000,00	¢10 875 000,00		
	Repello Fino saco 40kg	6	saco	¢7 500,00	¢45 000,00		
	Disco Diamantado de 9"	2	Unidad	¢75 000,00	¢150 000,00		
	Soldadura 6013 en 1/8"	5	kilos	¢25 000,00	¢125 000,00		
	Discos de corte metal de 9"	25	Unidad	¢27 000,00	¢675 000,00		
	Transportes	4	Unidad	¢15 000,00	¢60 000,00		
	Subcontratos						
		0				¢0,00	
		0				¢0,00	
		0				¢0,00	
	Mano de Obra						
	Supervisor	1	244	¢2 700,00			¢658 800,00
	Operario	10	244	¢2 000,00			¢4 880 000,00
	Ayudante	10	244	¢1 600,00			¢3 904 000,00
	OHYS o Ing. De Obra	1	244	¢3 500,00			¢854 000,00
	Equipo	Cant	Dias	Preciounitario			
	Andamios	24	30	¢2 000,00			¢1 440 000,00
	Caja de herramientas	10	10	¢1 000,00			¢100 000,00
	Cortadora Concreto	1	3	¢95 000,00			¢285 000,00
	Esmiladora	5	10	¢2 000,00			¢100 000,00
	Taladro	5	10	¢2 000,00			¢100 000,00
	Costos Subtotales				Materiales	Subcontrato	Mano de Obra
					¢26 920 801,25	¢0,00	¢10 236 800,00
	Cierre del Item						Equipo
		Cargas Sociales	51%			¢5 251 368,00	
		Seguridad	2%			¢205 936,00	
		Administración	5%			¢1 860 880,06	
		Utilidad e imprevistos	10%			¢3 721 760,13	
	Total	Losa Tubular 375 m2				¢50 282 545,44	
					Colones	Dolares	
				Total SIN IMPUESTOS:	¢50 282 545,44	¢100 364,36	
				I.V.A del 13 %	¢6 536 730,91	¢13 047,37	
				Total CON IMPUESTOS:	¢56 819 276,34	¢113 411,73	

.....	198
ANEXO 2:	201
ANEXO 3:	202
ANEXO 4:	203
ANEXO 5:	204

ANEXO 6:



PLANTA ELÉCTRICA DE ILUMINACIÓN I NIVEL 0±0.00m
Escala 1: 50



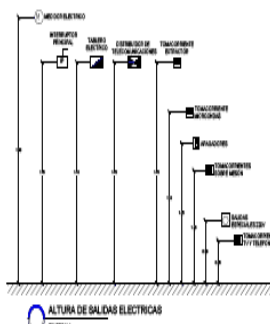
PLANTA ELÉCTRICA DE TOMACORRIENTES I NIVEL 0±0.00m
Escala 1: 50



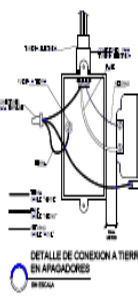
PLANTA ELÉCTRICA DE ILUMINACIÓN II NIVEL 0-3.00m
Escala 1: 50



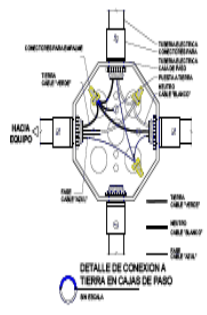
PLANTA ELÉCTRICA DE TOMACORRIENTES II NIVEL 0-3.00m
Escala 1: 50

[illegible]

ALTURA DE SALIDAS ELÉCTRICAS



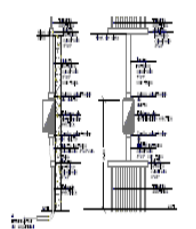
DETALLE DE CONEXION A TIERRA
EN APAGADORES
EN ESCALA



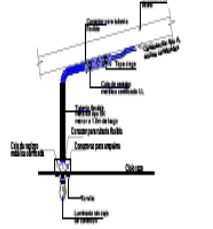
DETALLE DE CONEXION A TIERRA EN CAJAS DE PASO
EN FIGURA



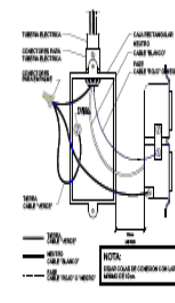
**CONEXION A VARELLA DE
PUSTA A TIERRA**



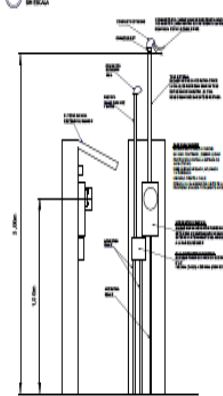
Instalación de tubería a tablero eléctrico



Instalación de luminaria sin caja de conexión

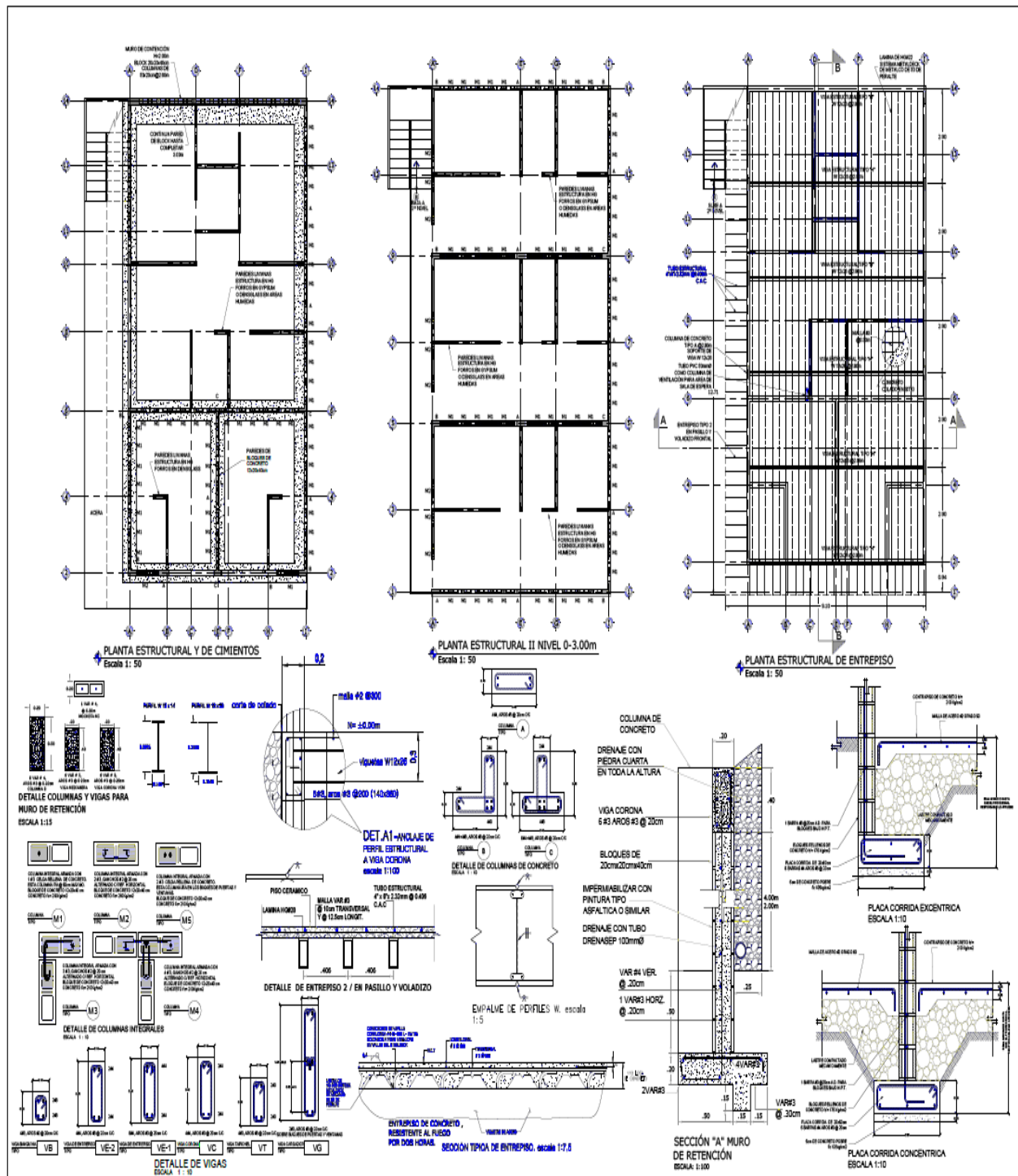


DETALLE DE CONEXION A TIERRA
EN TOMACORRIENTES



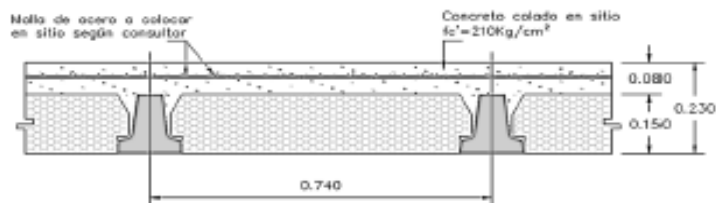
DETALLE DE ACOMETIDA ELÉCTRICA
SIN ESCALA

ANEXO 7:	206
----------	-----



ANEXO 8:	206
ANEXO 9:	207
	208

**Viguetas de 15cm de peralte (VC15-2-9) @ 0.74m
con bloque de estereofón de 15cm de peralte (H660)
y sobrelosa de 8cm de espesor**



Nomenclatura:

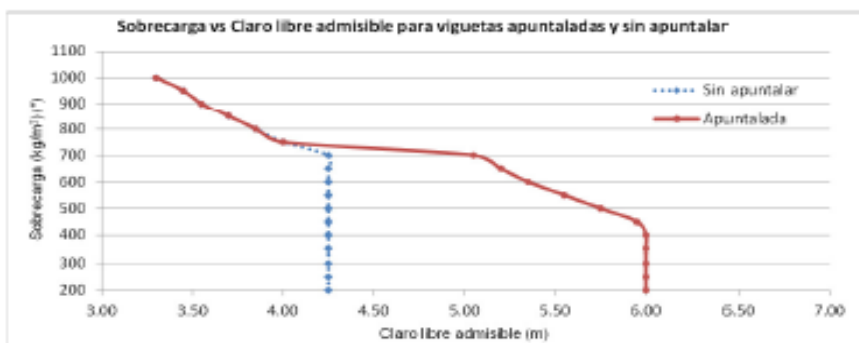
VC15-2-9	→	Cuadro base (m)
	→	Vara terminal mínima
	→	Peralte de vigueta (m)
	→	Vigueta completa

Propiedades de la Sección		
	Simple	Compuesta
A (cm²)	130	480
I (cm⁴)	3490	19991
y _{ref} (cm)	6.2	15.6
Peso de cada vigueta: 31 Kg/m		
Peso del sistema de entripso: 241 Kg/m²		
Concreto en sitio: 0.082 m³/m²		

Sobrecarga (*) CV + CP _{adic} (Kg/m²)	Claro libre admisible (m)	
	Sin apuntalar	Apuntalada
800	4.25	6.00
250	4.25	6.00
300	4.25	6.00
350	4.25	6.00
400	4.25	6.00
450	4.25	5.95
500	4.25	5.75
550	4.25	5.55
600	4.25	5.35
650	4.25	5.20
700	4.25	5.05
750	4.00	4.00
800	3.85	3.85
850	3.70	3.70
900	3.55	3.55
950	3.45	3.45
1000	3.30	3.30

(*) La sobrecarga es la suma de Carga Viva o Temporal (CV) + la Carga Permanente Adicional (CP_{adic}) sin factorar
Carga muerta adicional= Acabado de piso+Paredes livianas+Cielos+Instalac. Electricas+Otros

Las viguetas con claros libres iguales o mayores a 5.5 m podrían presentar problemas de vibración según su uso



ANEXO 10:	208
	209

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, con el alma en las palabras y el corazón agradecido, a dos mujeres excepcionales que han marcado mi vida de forma indeleble: mi madre y mi novia.

A mi madre, mi primera maestra, mi fuerza inquebrantable. Gracias por forjar en mí, desde niño, el carácter que hoy me sostiene. Me enseñaste a no rendirme jamás, a luchar con dignidad, a ser constante y firme, incluso cuando las circunstancias parecían adversas. En cada caída me mostraste cómo levantarme con más coraje. Tu ejemplo de vida, tu trabajo silencioso y tu amor sin condiciones me han convertido en quien soy. Por cada sacrificio, por cada palabra de aliento, por cada día en que me enseñaste a creer en mí... gracias.

A mi novia, mi compañera leal, quien ha sido mi luz en los momentos más oscuros y mi mayor impulso en los momentos de duda. Gracias por regalarme confianza cuando más la necesitaba, por creer en mis capacidades aun cuando yo mismo vacilaba. Me enseñaste a ser una mejor persona, a mirar siempre hacia adelante y a superarme cada día. Eres mi ejemplo de entrega, inteligencia y bondad, tu amor ha sido un refugio y una motivación constante.

A ambas les debo este logro. Esta tesis no solo representa mi esfuerzo académico, sino también el reflejo de los valores, el amor y la fortaleza, que a través de los años han sembrado en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por haberme dado la vida, la fortaleza y la sabiduría, para culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional.

A mi madre, por ser mi sostén más firme, por su amor incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, que el esfuerzo y la perseverancia son los caminos hacia cualquier meta. Su sacrificio silencioso y constante ha sido la base sobre la que se construye cada uno de mis logros.

A mi novia, por su paciencia infinita, por su confianza inquebrantable en mis capacidades, y por acompañarme con ternura, comprensión y aliento a lo largo de este proceso. Su amor ha sido un faro en los momentos más difíciles y una fuente inagotable de inspiración.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una forma u otra, contribuyeron al desarrollo de este proyecto. Cada gesto, cada palabra, cada momento compartido han sido valiosos en este camino que hoy concluye.

EPÍGRAFE

Si lo puedes soñar, lo puedes lograr.

Walt Disney

RESUMEN

La presente tesis se centra en el análisis comparativo de la eficiencia, seguridad y economía entre losas postensadas y losas tubulares en el contexto de la construcción en Costa Rica. A medida que el país enfrenta un crecimiento en la construcción de edificaciones, se hace necesario evaluar diferentes sistemas estructurales, que puedan ofrecer ventajas en términos de desempeño y costo, especialmente en un entorno caracterizado por una alta actividad sísmica.

La investigación aborda la falta de estudios específicos en el contexto costarricense, sobre el rendimiento de estos dos sistemas de losas. Se examinan sus características estructurales, costos iniciales, tiempos de construcción, así como su comportamiento ante sismos, considerando las normativas locales que rigen el diseño estructural. Se recopilan datos de proyectos realizados en diferentes regiones del país, analizando la viabilidad de cada tipo de losa, en función de su aplicación en edificaciones de diversas alturas y usos.

Los resultados preliminares indican, que las losas tubulares ofrecen ventajas significativas en cuanto a costo y rapidez de construcción, lo que las convierte en una opción atractiva para proyectos de baja altura. Sin embargo, las losas postensadas demuestran mayor eficiencia en edificaciones de gran altura y en situaciones donde la resistencia estructural y la flexibilidad en el diseño son prioritarias.

Este estudio tiene como objetivo proporcionar una base sólida, para que ingenieros y arquitectos de la construcción en Costa Rica, puedan tomar decisiones informadas sobre la elección del sistema de losas por utilizar en sus proyectos, optimizando recursos y garantizando la seguridad estructural, en un país con características geológicas y sísmicas particulares.

Finalmente, se sugiere la realización de estudios, en cuanto a la comparación de estos sistemas bajo condiciones específicas de terreno y sismicidad, así como en su aplicación en diferentes tipos de proyectos, con el fin de ampliar el conocimiento y la aplicación de losas postensadas y tubulares, en la construcción costarricense. Este trabajo se enmarca, dentro de un amplio esfuerzo por mejorar la calidad y la seguridad de las edificaciones en Costa Rica, afianzando un futuro constructivo más resiliente y sostenible. Con la investigación no solo se busca, contribuir al conocimiento técnico en el ámbito de la ingeniería civil, sino también establecer un precedente para futuras investigaciones, que promuevan la innovación en el sector de la construcción en Costa Rica.

CAPÍTULO I. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Costa Rica, los desafíos de la expansión urbana, el imperativo de iniciativas de construcción sustentable y el cumplimiento de estrictas regulaciones en caso de terremotos, han impulsado la búsqueda de métodos de construcción que sean rentables, amigables con el medio ambiente y seguros.

Entre las soluciones estructurales más utilizadas se encuentran las losas postensadas y las losas tubulares, cada una con características técnicas y económicas distintas. Sin embargo, en Costa Rica no existe una guía sencilla ni estudios adecuados, que permitan a los profesionales de ingeniería y arquitectura, decidir cuál es el mejor sistema para un proyecto en particular, tomando en cuenta los obstáculos locales como los frecuentes terremotos y la necesidad de mantener bajos los costos de construcción.

Estas regulaciones exigen que los edificios se diseñen considerando la resistencia a los terremotos, lo que requiere el uso de hormigón armado, así como la utilización de materiales antisísmicos. Mientras algunas losas son buenas para luces largas y cargas pesadas y otras son livianas, depende de cuál de ellas responda mejor a los terremotos y el área local aún no ha sido investigada completamente. Algunas losas son livianas y resisten grandes luces; otras soportan grandes pesos y manejan la tierra.

En este mercado, el gasto de recursos y mano de obra es crucial y es importante que los constructores y desarrolladores determinen la opción más rentable, para lograr ahorros inmediatos y futuros. Sin embargo, no se han realizado estudios que los comparen.

El crecimiento, en la construcción de estructuras más altas y áreas comerciales, ha llevado a la necesidad de mejores métodos de construcción que ahorren tiempo, al tiempo que requieran menos uso de materiales y gestión del espacio. La incertidumbre a la hora de decidir la eficiencia estructural surge, al comparar losas postensadas y tubulares debido a información insuficiente.

Entre losas postensadas y losas tubulares, ¿cuál es mejor para construir estructuras en Costa Rica en términos de resistencia, seguridad ante terremotos y costo, considerando las normas y condiciones locales?

Este estudio es concluyente, ya que dar respuesta a dicha pregunta servirá para que los expertos en construcción comparen los sistemas de losa y elijan el adecuado para sus proyectos, lo que permitirá planificar mejores formas de utilizar los recursos y garantizar que los edificios sean seguros, aunque se esté construyendo en una zona, donde los eventos sísmicos sean frecuentes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

El objetivo de este análisis es una comparación técnica de las características de eficiencia, seguridad y económica de las losas postensadas y las losas tubulares, para determinar cuál opción es la más adecuada en la aplicación de entrepisos, según las necesidades específicas de cada proyecto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir la eficiencia técnica de cada losa de acuerdo con la ficha técnica del fabricante según tipo de carga y el comportamiento relativo a deformaciones, en un edificio de dos niveles.
- Comparar el rendimiento estructural de las losas postensadas y las losas tubulares ante cargas dinámicas y estáticas, así como su comportamiento frente a posibles fallos estructurales, análisis en ETABS.
- Determinar en qué proyectos o condiciones específicas aplica cada tipo de losa resultando el más beneficioso, considerando factores de seguridad y resistencia en un edificio de dos pisos.
- Realizar un breve análisis de costos que incluya el precio unitario y el precio de instalación, de las losas postensadas y losas tubulares en un edificio de dos niveles.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El diseño estructural de los edificios demanda soluciones innovadoras, que optimicen tanto el uso de materiales como las propiedades mecánicas de las estructuras. Dentro de este contexto, las losas postensadas y las losas tubulares se han consolidado como alternativas más eficientes, frente a sistemas tradicionales debido a sus ventajas en resistencia, reducción de tiempos de construcción y obtención de claros más largos. (Montaño 2009)

Las losas postensadas, al utilizar cables de acero sometidos a tensión dentro de su estructura de concreto, permiten optimizar la distribución de esfuerzos, lo que disminuye la necesidad de acero y concreto adicionales. Esto contribuye a una mayor eficiencia estructural, a la reducción de costos en obra y al impacto ambiental asociado al consumo de formaletas. Además, este tipo de losas ofrece ventajas como menores deflexiones y la capacidad de cubrir mayores luces, sin necesidad de soportes intermedios, haciendo estas soluciones ideales para edificios de oficinas, estacionamientos, puentes y otras estructuras donde se requiera un mayor espacio libre.

Por otro lado, las losas tubulares representan una opción innovadora en el diseño estructural, debido a la inclusión de cavidades o tubos huecos dentro de la losa. Esto permite una significativa reducción de peso propio, lo que produce un impacto directo en la reducción de esfuerzos, en los elementos estructurales subyacentes, tales como columnas y cimentaciones.

Además, estas losas proporcionan mayor eficiencia en la relación entre la cantidad de material utilizado, la resistencia estructural obtenida y los tiempos de construcción.

El desarrollo de soluciones más eficientes, en términos de peso, costos y sostenibilidad, es de vital importancia en la industria de la construcción, donde se busca constantemente el equilibrio entre rendimiento estructural y la minimización de impactos ambientales, así como económicos. En este contexto, en el presente estudio se pretende, analizar y comparar losas postensadas además de losas tubulares, en términos de su comportamiento estructural, costos de construcción, mantenimiento y sostenibilidad.

Este trabajo no solo contribuye a la expansión del conocimiento en el campo de las losas postensadas y tubulares, también ofrece recomendaciones prácticas, que pueden ser implementadas en futuros proyectos de ingeniería civil, lo que podría traducirse en ahorros significativos y mejoras, en el desempeño estructural de edificios y otras infraestructuras.

1.4 ANTECEDENTES

1.4.1 Antecedentes nacionales

El artículo de Cortez y Fernández (2019) analiza y compara los costos iniciales de materiales y mano de obra, así como los costos de mantenimiento a largo plazo, entre los sistemas de losas postensadas y losas tubulares. El estudio se centra en proyectos de edificaciones de media altura en América Latina, particularmente en México y Costa Rica. Se observa que las losas tubulares presentan costos iniciales más bajos, pero las losas postensadas son más rentables a largo plazo, debido a su durabilidad y menor necesidad de mantenimiento. (Cortés, J. C. & Fernández, L. (2019). Economic Analysis of Post-Tensioned vs. Hollow Core Slabs for Mid-Rise Buildings. Revista Latinoamericana de Ingeniería Civil, 12(4), 45-60.)

En este artículo, Rodríguez analiza casos de estudio en proyectos construidos en San José, Costa Rica, donde se implementaron tanto losas postensadas como losas tubulares. El autor enfatiza en las ventajas económicas de las losas tubulares en proyectos de baja altura, mientras las losas postensadas se destacan en proyectos de mediana a gran altura. El análisis considera también, los costos relacionados con la seguridad sísmica y concluye que las losas postensadas son más efectivas en zonas con alta actividad sísmica. (Rodríguez, E. (2017). Análisis comparativo de eficiencia estructural y costos entre losas postensadas y losas tubulares en Costa Rica. Revista de Ingeniería Civil UCR, 8 (2), 98-112.)

Este artículo ofrece una evaluación técnica y financiera, de los sistemas de losas postensadas y tubulares, en el contexto de edificios comerciales. El estudio utiliza datos de proyectos en Costa Rica y México y analiza tanto el desempeño estructural como el impacto financiero de cada sistema. Se concluye que las losas postensadas brindan un mejor desempeño en edificios de más de cinco pisos, debido a su mayor rigidez, mientras las losas tubulares son más adecuadas para estructuras ligeras y de rápida construcción. (Pérez, A. (2020). Post-Tensioned vs. Hollow Core Slabs: A Technical and Financial Evaluation for Commercial Buildings. *Building and Construction Journal*, 15 (3), 130-145.)

Este artículo explora, la forma como las normativas sísmicas locales, como el Código Sísmico de Costa Rica, influyen en la selección de sistemas estructurales. Los autores comparan los requisitos normativos aplicables a las losas postensadas y las losas tubulares, en diferentes regiones sísmicas de América Latina. Se concluye, que las losas postensadas cumplen más eficientemente con los requisitos de absorción de energía y flexibilidad estructural en zonas de alta sismicidad. (Herrera, P. & López, M. (2021). Impact of Local Seismic Codes on the Selection of Structural Systems: A Comparison between Post-Tensioned and Hollow Core Slabs. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(1), 22-38.)

Este estudio se enfoca, en la evaluación del comportamiento sísmico de losas postensadas y tubulares, bajo las normativas sísmicas de Costa Rica. Se analizan proyectos en la región central del país y se concluye, que las losas postensadas proporcionan mayor capacidad para resistir cargas dinámicas, especialmente en edificaciones de gran altura. Por otro lado, las losas tubulares son adecuadas en

proyectos de baja altura y en construcciones donde la ligereza es un factor clave. (Rojas, M. & Solís, A. (2020). Análisis sísmico de sistemas de losas postensadas y losas tubulares en zonas de alta sismicidad en Costa Rica. *Ingeniería Sísmica y Estructural*, 15(2), 89-102.)

Este estudio evalúa, cómo se adaptan los sistemas de losas postensadas y de losas tubulares a las normativas costarricenses, especialmente en relación con el Código Sísmico de Costa Rica. Los autores destacan que las losas postensadas ofrecen mayor flexibilidad, para cumplir con las exigencias sísmicas locales, mientras las losas tubulares requieren ajustes en su diseño, para garantizar un comportamiento adecuado en zonas de alta actividad sísmica. (Vargas, P. & Zamora, C. (2021). Adaptación de los sistemas de losas postensadas y tubulares, a la normativa costarricense de diseño estructural. *Boletín de Ingeniería Estructural UCR*, 22(2), 33-48.)

1.4.2 Antecedentes internacionales

Este estudio se centra, en la comparación del comportamiento sísmico de losas postensadas y losas tubulares, en regiones con alta actividad sísmica, como California y Chile. Los autores analizan diferentes metodologías de diseño estructural y la manera como los sistemas de losas se comportan bajo las fuerzas sísmicas. Concluyen que las losas postensadas tienen mejor capacidad de absorber energía y resistir deformaciones, mientras las losas tubulares, debido a su ligereza, ofrecen un mejor rendimiento en estructuras de baja altura. (Moehle, J. P., & Naeim, S. M. (2015.) *Comparative Seismic*

Performance of Post-Tensioned and Hollow Core Slabs in High Seismic Regions.
Earthquake Engineering Research Institute)

Este estudio comparativo explora la eficiencia estructural en el diseño de proyectos residenciales utilizando losas tubulares y losas postensadas. A través de modelos computacionales, los autores demuestran que las losas tubulares ofrecen ventajas en edificaciones de baja altura debido a su ligereza y facilidad de instalación, mientras que las losas postensadas son más eficientes en proyectos de gran envergadura donde se requieren luces más largas sin apoyos intermedios. (Rajesh, K. S., & Arun, M. K. (2018). Efficiency Comparison of Hollow Core and Post-Tensioned Slabs in Residential Projects. Journal of Structural Engineering, 30(3), 203-217.)

Este artículo compara la sostenibilidad y la eficiencia energética de los sistemas de losas postensadas y tubulares en la construcción de edificios ecológicos. Los autores destacan que las losas tubulares, por ser más ligeras, contribuyen a reducir el consumo de energía durante la fase de construcción y también en la vida útil del edificio al mejorar el aislamiento térmico. En contraste, las losas postensadas permiten una mayor optimización del espacio, lo que a largo plazo reduce los recursos necesarios para la climatización. (Martínez, D. & Jiménez, C. (2016). Sustainability and Energy Efficiency in Post-Tensioned and Hollow Core Slab Systems. International Journal of Green Building, 11(1), 45-59.)

Este estudio se enfoca en comparar la capacidad de deformación y la durabilidad de las losas postensadas frente a las losas tubulares, a lo largo del tiempo. Utilizando

simulaciones y estudios de campo en edificios de Estados Unidos y Latinoamérica, los autores encontraron que las losas postensadas presentan menor deformación a largo plazo y mayor durabilidad debido a su resistencia a grietas, mientras las losas tubulares pueden ser más propensas a deformaciones en estructuras más altas. (Nelson, R. M. & Adams, E. T. (2017). Deformation and Long-Term Durability Comparison of Post-Tensioned and Hollow Core Slabs. *Journal of Structural Materials*, 34(2), 183-200.)

En este artículo, los autores evalúan el impacto ambiental relacionado con el uso de materiales en los sistemas de losas postensadas y losas tubulares. El análisis se centra en la huella de carbono generada por la producción y el transporte de los materiales de construcción, concluyendo que las losas tubulares, al requerir menos concreto, producen un menor impacto ambiental inicial. Sin embargo, se destaca que la mayor vida útil, de las losas postensadas, puede compensar este impacto a largo plazo. (Vásquez, A. & Moreno, N. (2020). Environmental Impact and Material Use in Post-Tensioned and Hollow Core Slab Construction. *Revista Internacional de Construcción Sostenible*, 18(3), 112-128.)

El artículo se centra en la comparación del tiempo requerido para la construcción de edificios, utilizando losas postensadas y tubulares. Harrington y Stone encontraron, que las losas tubulares, debido a su prefabricación y menor peso, permiten una instalación más rápida en comparación con las losas postensadas, lo que es ventajoso para proyectos con plazos ajustados. Sin embargo, las losas postensadas, aunque más lentas en su implementación, ofrecen mayor flexibilidad en el diseño y optimización de espacios. (Harrington, J. & Stone, P. (2019). Time Efficiency in Construction Projects: Post-

Tensioned vs. Hollow Core Slabs. Construction Project Management Journal, 25(2), 70-85.)

1.5 PROYECCIONES

Se espera que la investigación ofrezca una evaluación clara, de cuál de los sistemas de losas es más eficiente en términos de:

- Determinar cuál de los sistemas permite un avance más rápido en la construcción, con menor tiempo de ejecución.
- Identificación de cuál de los dos sistemas es más adecuado para ciertos tipos de proyectos (edificio de dos pisos).
- Determinar cuál sistema ofrece mejor comportamiento en estructuras sometidas a movimientos sísmicos, tomando en cuenta las normativas del Código Sísmico de Costa Rica y la aplicación en herramienta de análisis estructural ETABS.
- Recomendaciones para el diseño estructural, identificación de cuál sistema de losas es más adecuado para edificaciones de altura media y alta.
- Comparar la inversión inicial requerida para la implementación de losas postensadas y tubulares, incluyendo costos de materiales.

1.5.1 Alcances

El alcance de esta tesis está enfocado en llevar a cabo un análisis comparativo, entre dos sistemas constructivos: las losas postensadas y las losas tubulares, con especial atención a su aplicabilidad en el entorno costarricense. Este análisis se realizará, tomando en cuenta factores de eficiencia estructural, seguridad sísmica y economía, con la finalidad de proporcionar una guía útil para ingenieros y arquitectos, en la toma de decisiones para proyectos.

La investigación se centrará en proyectos de construcción, donde los desafíos constructivos, como las normas sísmicas y la necesidad de optimización de costos y terreno son más relevantes. Se analizará el comportamiento de las edificaciones ante las cargas, con la herramienta de análisis estructural ETABS.

1.5.2 Limitaciones

La investigación se limitará a construcción vertical, tales como una construcción de dos pisos; se utilizará un mismo ejemplo con características semejante, para poder realizar una comparación técnica mas no práctica.

El análisis económico estará basado en los precios de materiales y mano de obra, vigentes en Costa Rica en el momento del estudio, lo cual podría cambiar con el tiempo y dependerá de las cotizaciones de las empresas seleccionadas.

No se abordarán otros sistemas constructivos (como losas prefabricadas o losas de viguetas y bovedillas), centrándose únicamente en la comparación entre losas postensadas y tubulares.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 HERRAMIENTAS INGENIERILES

.1.1 Análisis FODA de las Losas Postensadas

Fortalezas:

1. Alta capacidad de carga: Las losas postensadas pueden soportar mayores cargas en comparación con losas convencionales de concreto armado, debido a la aplicación de esfuerzos de precompresión (ACI 318-19, 2019).
2. Reducción de fisuración: La postensión permite controlar mejor las fisuras causadas por cargas de servicio y retracción (PTI, 2020).
3. Eficiencia estructural: Permite mayores luces libres con menores espesores, reduciendo el peso de la estructura y optimizando materiales (Nilson *et al.*, 2010).
4. Durabilidad mejorada: Las losas postensadas presentan mayor resistencia a la corrosión, debido a la compresión inducida que reduce la permeabilidad (ACI 423R-17, 2017).

Oportunidades:

1. Mayor aplicación en proyectos sostenibles: Su uso contribuye a edificaciones más eficientes en términos de materiales y energía (Fib Bulletin 75, 2014).
2. Innovaciones tecnológicas: El desarrollo de nuevos materiales y métodos de anclaje permite una mayor flexibilidad en el diseño y aplicación (Mehta & Monteiro, 2014).
3. Expansión en sectores residenciales y comerciales: El incremento en la demanda de espacios abiertos en la construcción moderna favorece la implementación de losas postensadas (Mindess *et al.*, 2019).
4. Normativas internacionales más estrictas: La adopción de normativas más rigurosas promueve la utilización de soluciones estructurales más eficientes y seguras (ACI 318-19, 2019).

Debilidades:

1. Costo inicial elevado: Requiere una inversión inicial mayor en materiales y mano de obra especializada (PTI, 2020).
2. Requiere personal especializado: La correcta ejecución de la postensión exige ingenieros y operarios capacitados (Nilson *et al.*, 2010).
3. Mantenimiento especializado: Los elementos postensados necesitan inspecciones y mantenimientos periódicos para asegurar su correcto funcionamiento (ACI 423R-17, 2017).
4. Dependencia de herramientas especializadas: La colocación de los tendones requiere herramientas y equipos específicos, lo que puede complicar la logística en algunas obras (Mehta & Monteiro, 2014).

Amenazas:

1. Competencia con otros sistemas constructivos: Soluciones como losas prefabricadas o mixtas pueden ofrecer ventajas en términos de rapidez de construcción y costo (Mindess *et al.*, 2019).
2. Variabilidad en la calidad de materiales: La calidad de los tendones de postensión puede verse afectada por proveedores poco confiables (ACI 318-19, 2019).
3. Normativas estrictas: Requisitos más exigentes pueden incrementar los costos y los tiempos de ejecución (Fib Bulletin 75, 2014).
4. Fallas por una mala ejecución: Una instalación inadecuada puede provocar problemas graves en la estructura y reducir tanto su vida útil como su seguridad (Nilson *et al.*, 2010).

Concepto de Losa Postensada

Una losa postensada es un tipo de losa estructural de concreto, reforzada mediante la aplicación de esfuerzos de compresión, artificialmente inducidos mediante el uso de tendones de acero de alta resistencia. Esta técnica permite compensar las tensiones de tracción, que se desarrollan bajo cargas de servicio, mejorando la capacidad de carga, reduciendo la fisuración y permitiendo secciones más esbeltas, en comparación con losas de concreto convencional (American Concrete Institute [ACI], 2019; Post-Tensioning Institute [PTI], 2020).

El proceso de postensado consiste, en la colocación de los tendones dentro de la losa antes del colado del concreto. Una vez que el concreto ha alcanzado la resistencia especificada, los tendones son tensados mediante gatos hidráulicos y posteriormente anclados en los extremos, transfiriendo así la fuerza de compresión al concreto (ACI 423R-17, 2017).

La ejecución de losas postensadas demanda la incorporación de componentes específicos, seleccionados y dispuestos de forma estratégica para asegurar un desempeño estructural óptimo, una vida útil prolongada y el cumplimiento estricto de las exigencias establecidas en normativas internacionales, como el ACI 423 y las guías técnicas emitidas por el Post-Tensioning Institute (PTI).

En este tipo de sistemas, uno de los requisitos más relevantes y que frecuentemente condiciona la planificación de obra, es la utilización de un cemento o mortero de fraguado

rápido, capaz de desarrollar una resistencia mínima de 30 MPa en el intervalo temporal definido por el diseño estructural, el cual suele oscilar entre 24 y 72 horas. Alcanzar esta resistencia temprana es determinante, para autorizar el tensionado de los cables sin comprometer la estabilidad del conjunto, ni generar microfisuras prematuras, que con el tiempo, podrían derivar en fallas localizadas o pérdida de pretensado.

Esta exigencia técnica no solo responde a consideraciones de seguridad estructural, sino también a criterios de eficiencia constructiva. Un fraguado acelerado con resistencia garantizada permite avanzar, de manera secuencial en las etapas de postensado, reduciendo tiempos muertos y optimizando recursos en obra. De esta forma, la transferencia de esfuerzos desde los tendones al concreto se realiza, sobre un soporte con la capacidad portante necesaria, minimizando riesgos de deformaciones no deseadas y asegurando la integridad del sistema durante toda su vida útil.

Adicionalmente, la selección del cemento debe contemplar aspectos como la compatibilidad con los aditivos empleados, la retracción controlada para evitar tensiones internas no previstas, así como la resistencia a condiciones ambientales adversas (humedad elevada, variaciones térmicas o exposición a agentes químicos). Una planificación adecuada en la elección de materiales, sumada a un control riguroso de los procedimientos de curado, se traduce en una mayor confiabilidad del sistema postensado y en un mejor comportamiento frente a cargas de servicio y eventos extraordinarios. (ACI 318-19, 2019; PTI, 2020)

En el ámbito del diseño estructural con postensado, la distancia libre que puede cubrir un tendón sin apoyos intermedios depende, tanto de sus propiedades mecánicas como de las características del sistema constructivo. Aunque este método permite, salvar claros más amplios que las losas armadas tradicionalmente, en edificaciones de uso habitual se recomienda, no superar aproximadamente los 12 metros de luz para cada tramo de tendón, ya sea con trazado recto o parabólico.

La razón de este límite es doble. Desde la perspectiva estructural, al aumentar la luz se incrementan las deformaciones inmediatas y diferidas, así como las pérdidas asociadas a la fricción y al acortamiento elástico del concreto. Estos factores reducen la eficacia del postensado y pueden comprometer el comportamiento de la losa a largo plazo. En el plano constructivo, luces mayores implican el uso de gatos hidráulicos más potentes, una manipulación más compleja de los cables y un control más preciso del perfil de los tendones, para evitar concentraciones de esfuerzo.

En proyectos especiales, como cubiertas industriales o ciertos tipos de puentes, se pueden alcanzar luces superiores mediante soluciones combinadas, como el postensado continuo o el empleo de apoyos intermedios estratégicamente ubicados. Sin embargo, en construcciones convencionales de uso residencial o comercial, mantener la luz dentro del rango de 12 metros asegura, un equilibrio razonable entre desempeño estructural, facilidad constructiva y eficiencia económica. (ACI 423R-17, 2017; PTI, 2020)

Elementos utilizados en una losa postensada:

1. Tendones de postensado:

- Cables de acero de alta resistencia, encapsulados en vainas protectoras para evitar la corrosión (ACI 423.3R-05, 2005).
- Pueden ser tendones adheridos (inyectados con lechada de cemento) o no adheridos (recubiertos con grasa y envueltos en plástico) (PTI, 2020).

2. Anclajes:

- Dispositivos mecánicos ubicados en los extremos de los tendones, que permiten transferir la fuerza de tensión al concreto (ACI 423R-17, 2017).
- Pueden ser de cuñas, placas de anclaje o embebidos en el concreto (PTI, 2020).

3. Vainas o ductos:

- Tubos plásticos o metálicos que contienen los tendones y permiten su desplazamiento durante el proceso de tensionado (ACI 423.3R-05, 2005).
- Pueden ser metálicas corrugadas o plásticas lisas, dependiendo del tipo de postensado (adherido o no adherido) (PTI, 2020).

4. Lechada de inyección:

- Mezcla de cemento y agua utilizada para llenar los ductos en sistemas adheridos, proporcionando protección contra la corrosión y asegurando la transferencia de esfuerzos (ACI 423R-17, 2017).

5. Gatos hidráulicos:

- Equipos utilizados para aplicar la fuerza de tensión a los tendones antes de su anclaje final (PTI, 2020).

6. Refuerzos adicionales:

- Barras de refuerzo convencionales, que se utilizan para complementar la capacidad estructural en zonas específicas, como conexiones o áreas de alta carga (ACI 318-19, 2019).

Ventajas de las losas postensadas:

- Mayor resistencia estructural con menor espesor (ACI 423R-17, 2017).
- Reducción del peso propio de la losa (PTI, 2020).
- Control de fisuración y mayor durabilidad (ACI 318-19, 2019).
- Mayor capacidad de cubrir grandes luces sin apoyos intermedios (ACI 423.3R-05, 2005).

Aplicaciones comunes:

- Edificios residenciales y comerciales (PTI, 2020).
- Estacionamientos de múltiples niveles (ACI 423R-17, 2017).
- Puentes y estructuras de gran envergadura (ACI 318-19, 2019).

Análisis FODA de las Losas Tubulares

Fortalezas:

1. Eficiencia estructural: Las losas tubulares permiten reducir el peso propio de la estructura, lo que conlleva una optimización en el diseño de los elementos de soporte (ACI 440.1R-15, 2015).
2. Aislamiento térmico y acústico: La estructura tubular proporciona propiedades mejoradas de aislamiento, lo que contribuye a la eficiencia energética del edificio (Mindess *et al.*, 2019).
3. Menor uso de materiales: La reducción en el uso de concreto y acero permite una solución más económica y sostenible (Fib Bulletin 69, 2012).
4. Mayor rapidez de construcción: Su fabricación modular y ensamblaje eficiente reducen los tiempos de ejecución de obra (Nilson *et al.*, 2010).

Oportunidades:

1. Demanda creciente de edificaciones sostenibles: Las losas tubulares se alinean con los objetivos de la construcción verde y sostenible (Mehta & Monteiro, 2014).
2. Innovación en materiales compuestos: La introducción de materiales más ligeros y resistentes abre nuevas posibilidades de aplicación (ACI 440.1R-15, 2015).
3. Aplicación en infraestructuras de gran escala: Su capacidad para soportar grandes luces la hace ideal para estacionamientos y centros comerciales (Fib Bulletin 69, 2012).

4. Normativas internacionales de eficiencia energética: Las regulaciones impulsan el uso de soluciones constructivas, que mejoren el desempeño térmico (Mindess *et al.*, 2019).

Debilidades:

1. Costo inicial elevado: Aunque se ahorra en materiales, la fabricación y diseño inicial pueden ser más costosos que las losas convencionales (Mehta & Monteiro, 2014).
2. Dificultad en reparaciones: La accesibilidad a los ductos tubulares es limitada y complica las intervenciones de mantenimiento (Nilson *et al.*, 2010).
3. Dependencia de proveedores especializados: La fabricación requiere equipos y conocimientos específicos, que no siempre están disponibles localmente (Fib Bulletin 69, 2012).
4. Requerimientos de diseño específicos: La necesidad de un análisis estructural detallado, para su correcta aplicación, puede aumentar la complejidad del proyecto (ACI 440.1R-15, 2015).

Amenazas:

1. Competencia con soluciones más económicas: Otras tecnologías, como losas prefabricadas tradicionales, pueden ser más asequibles en ciertos mercados (Mindess *et al.*, 2019).
2. Regulaciones estrictas: Los códigos de construcción, cada vez más rigurosos, pueden limitar su aplicación en ciertas regiones (ACI 318-19, 2019).

3. Desconocimiento del sistema: La falta de capacitación y experiencia, en el sector, puede ralentizar su adopción (Mehta & Monteiro, 2014).
4. Variabilidad en la calidad de fabricación: La producción inconsistente de los elementos tubulares puede afectar su rendimiento estructural (Fib Bulletin 69, 2012).

Concepto de Losa Tubular

Una losa tubular es un tipo de losa estructural de concreto, que incorpora cavidades internas longitudinales a lo largo de su sección transversal. Estas cavidades reducen el peso propio de la losa, mientras mantienen su capacidad estructural, de modo que se logra una alta eficiencia en la relación peso-resistencia. Las losas tubulares se utilizan comúnmente, en edificaciones donde se requiere cubrir grandes luces con un consumo reducido de materiales, mejorando la sostenibilidad y eficiencia de la estructura (American Concrete Institute [ACI], 2019; International Federation for Structural Concrete [Fib], 2012).

En el diseño de losas tubulares, la distancia que pueden cubrir sin apoyos intermedios está determinada por la configuración geométrica de las piezas, el refuerzo interno y la calidad del concreto empleado. Este sistema, caracterizado por sus aligeramientos longitudinales, que reducen el peso propio, presenta una notable capacidad para abarcar claros superiores, a los de una losa maciza convencional, manteniendo un buen equilibrio entre resistencia y ligereza.

En condiciones normales de proyecto, se establece como límite técnico recomendado una luz máxima de 18 metros. Este valor no es arbitrario: responde a criterios de comportamiento estructural y control de deformaciones. Al aproximarse o superar este rango, la losa puede requerir incrementos significativos de espesor, mayor cuantía de refuerzo o concretos de alta resistencia, lo que no solo aumenta el costo, sino que también complica las maniobras de transporte y montaje.

Es posible rebasar la barrera de los 18 metros en situaciones especiales, recurriendo a variantes como losas tubulares pretensadas, apoyos adicionales estratégicos o combinaciones con vigas de gran peralte. Sin embargo, tales soluciones implican un diseño más complejo y una ejecución más exigente. Por ello, para la mayoría de las edificaciones residenciales, comerciales e industriales ligeras, mantener la luz dentro del rango de hasta 18 metros garantiza, una solución estructural eficiente, segura y económicamente competitiva, aprovechando plenamente las ventajas del sistema tubular.

Elementos utilizados en una losa tubular:

1. Cavidades tubulares:

- Espacios huecos distribuidos uniformemente, que reducen el peso propio de la losa sin afectar significativamente su capacidad de carga (Fib, 2012).
- Pueden ser circulares, elípticas o rectangulares, según las necesidades del diseño (ACI, 2019).

2. **Concreto estructural:**

- Material principal que proporciona la resistencia a la compresión de la losa, diseñado con una mezcla específica para soportar las cargas impuestas (ACI, 2019).

3. **Refuerzo de acero:**

- Barras de refuerzo o mallas electrosoldadas, que proporcionan resistencia a la tracción y control de fisuración (ACI 318-19, 2019).

4. **Cofrados especiales:**

- Moldes reutilizables utilizados para dar forma a las cavidades tubulares durante el proceso de colado del concreto (Fib, 2012).

5. **Aditivos químicos:**

- Componentes añadidos al concreto para mejorar su trabajabilidad, durabilidad y resistencia (ACI, 2019).

Ventajas de las losas tubulares:

- Reducción significativa del peso estructural, lo que disminuye la carga sobre cimentaciones (Fib, 2012).
- Mayor capacidad de cubrir grandes luces sin apoyos intermedios (ACI, 2019).
- Mejora del aislamiento térmico y acústico debido a las cavidades internas (Fib, 2012).

- Menor uso de materiales, contribuyendo a la sostenibilidad de la construcción (ACI, 2019).

Aplicaciones comunes:

- Edificios comerciales y residenciales (ACI, 2019).
- Infraestructuras de transporte como puentes y túneles (Fib, 2012).
- Estacionamientos de gran capacidad (ACI, 2019).

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Introducción al modelo estructural desarrollado en ETABS

En el contexto del diseño estructural moderno, el uso de herramientas informáticas especializadas se ha vuelto indispensable para garantizar la precisión, eficiencia y cumplimiento normativo en el desarrollo de edificaciones. El *software* ETABS (Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems), desarrollado por Computers and Structures Inc., se posiciona como una de las plataformas más robustas y utilizadas mundialmente para el análisis y diseño de estructuras de concreto y acero. Su capacidad de modelado tridimensional, análisis dinámico, además del manejo de cargas gravitacionales y laterales, lo convierte, en una herramienta clave en la ingeniería civil contemporánea.

El propósito de este procedimiento técnico es documentar de manera rigurosa, detallada y conforme a los principios normativos, el proceso de modelado, análisis y validación de dos sistemas estructurales de losas: losas postensadas y losas tubulares (aligeradas), en una edificación tipo situada en una zona de alta amenaza sísmica en Costa Rica. La finalidad de este análisis comparativo es determinar el comportamiento estructural, la eficiencia mecánica y la aplicabilidad constructiva de ambos sistemas, bajo condiciones reales de carga y exigencia normativa.

El diseño estructural fue desarrollado, conforme a los lineamientos establecidos por el American Concrete Institute (ACI) en su normativa ACI 318-19, titulada Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, la cual establece los criterios de diseño por resistencia y servicio, definiendo factores de carga, coeficientes de reducción de resistencia, requerimientos mínimos de refuerzo, y control de deformaciones. Asimismo, se aplicaron las disposiciones del Código Sísmico de Costa Rica (CSCR

2010), instrumento normativo obligatorio que define parámetros sísmicos específicos por región, categorías de uso y niveles de desempeño sísmico esperados, para estructuras en el territorio nacional.

“El diseño por resistencia debe garantizar que, bajo cargas factorizadas, la estructura presente una capacidad suficiente para resistir sin falla los estados límites últimos, mientras se satisfacen también los requisitos de servicio para deflexiones y agrietamientos” (ACI 318-19, Comentario R1.1.1).

El proceso comenzó con la definición de una edificación tipo de dos niveles, destinada a uso de oficinas, diseñada con un sistema estructural losa-viga-columna, con columnas perimetrales e intermedias, así como vigas longitudinales en ambas direcciones, siguiendo una malla ortogonal regular. La presencia de vigas en ambos sentidos permitió, distribuir cargas de manera eficiente y simular un sistema estructural interconectado, propio de edificaciones comerciales de pequeña y mediana escala.

El análisis comparativo se desarrolló, considerando los mismos parámetros de carga, configuración geométrica, condiciones de apoyo y materiales estructurales para ambos sistemas de losa, de forma que las diferencias de desempeño pudieran atribuirse exclusivamente al tipo de losa implementada. Esto garantiza una comparación objetiva y técnica, sin sesgos derivados de condiciones externas al diseño de losas.

El procedimiento técnico se documenta en este informe paso a paso, iniciando con la preparación inicial del modelo, configuración normativa y definición geométrica, seguido por la creación detallada del modelo en ETABS, asignación de cargas, análisis estático y modal, interpretación comparativa de resultados y verificación conforme a la normativa.

Además, se incluyen imágenes explicativas del proceso de modelado, fichas técnicas y resultados exportados directamente desde ETABS.

Este nivel de documentación no solo permite reproducir el modelo con fidelidad, también ofrece al lector una base sólida para entender el proceso completo de análisis estructural moderno aplicado a losas de concreto, con fundamentos teóricos y normativos sólidos, que justifican cada etapa del desarrollo. Así, el presente procedimiento constituye una referencia técnica útil, tanto para fines académicos como para aplicación profesional en proyectos reales, en contextos sísmicos exigentes como el costarricense.

2. Preparación inicial del modelo estructural

La fase de preparación inicial del modelo estructural en ETABS es fundamental, para asegurar que el análisis y diseño posterior estén alineados con los principios normativos, estructurales y constructivos aplicables. Esta etapa implica la definición de los parámetros generales del edificio, las condiciones normativas, las características geométricas y funcionales del proyecto, así como la selección adecuada de los sistemas estructurales.

2.1 Características generales del proyecto

El modelo estructural se basa en una edificación tipo con las siguientes características principales:

- Uso: Oficinas administrativas.
- Número de niveles: Dos pisos superiores y un nivel base o planta baja (tres niveles en total).
- Altura libre entre pisos: 3,5 metros.

- Dimensiones en planta: 15,00 m × 25,00 m.
- Configuración geométrica: Planta rectangular simétrica.
- Sistema estructural principal: Sistema de losa-viga-columna de concreto reforzado.

La simetría en planta se adopta con el objetivo de mejorar el comportamiento estructural ante acciones laterales, ya que reduce los efectos torsionales y favorece una distribución más uniforme de los esfuerzos. Esta decisión es coherente con las recomendaciones del ACI 318-19, el cual enfatiza la importancia de la regularidad geométrica para mejorar el desempeño sísmico (ACI 318-19, Commentary R1.1.8).

2.2 Ubicación sísmica y criterios normativos

La edificación se encuentra ubicada en una zona de alta amenaza sísmica, según la zonificación establecida en el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010). Por tanto, el diseño debe considerar cargas sísmicas relevantes, adoptando métodos de análisis dinámicos y aplicando espectros de diseño representativos del sitio.

Parámetros sísmicos aplicados:

- Zona sísmica: Alta
- Factor de importancia sísmica (I): 1.0 (uso común)
- Coeficiente de reducción de respuesta (R): 5.0 (sistemas dúctiles)
- Aceleración espectral SDS: 0.60g
- Método de análisis sísmico: Modal espectral (CSCR 2010, Sección 4.3)

Para estimar el período fundamental de vibración de la edificación, se utiliza la expresión empírica recomendada por el **Código Sísmico de Costa Rica (CSCR, 2010)** para estructuras de concreto:

$$T=C_t \cdot h^x$$

Donde:

- T: período fundamental de vibración (segundos),
- $C_t=0.35$: coeficiente empírico para edificaciones de concreto armado,
- $h=7.0$ m: altura total de la estructura desde la base hasta la losa superior,
- $x=0.75$: exponente definido por la normativa para estructuras de concreto.

Sustitución

de valores:

$$T=0.035 \cdot (7.0)^{(0.75)}$$

$$T=0.035 \cdot 4.02 \approx 0.1407 \text{ segundos}$$

Resultado: El período fundamental estimado de la estructura es:

$$T \approx 0.141 \text{ segundos}$$

Este valor fue empleado como parámetro de control para la generación del **espectro de diseño elástico** dentro del análisis modal espectral en ETABS. La coherencia de este resultado con el valor dinámico obtenido directamente, del análisis modal, confirma la

precisión del modelado estructural y respalda la representatividad del modelo frente a eventos sísmicos.

2.3 Tipología de losas estructurales utilizadas

El objetivo comparativo del proyecto consiste, en analizar dos sistemas de losa distintos bajo condiciones estructurales idénticas:

a) Losa postensada

- Espesor: 20 cm
- Material: Concreto $f'_c = 28$ MPa
- Refuerzo: Tendones postensados con $f_{pu} = 1860$ MPa f_{pu} : Se refiere a la tensión última de tracción del acero activo.
- Disposición: Trayectorias parabólicas en cada dirección, ancladas en extremos.
- Ventajas: Reducción de momentos flectores, mejor control de flechas, menores requerimientos de refuerzo pasivo, ideal para grandes luces (ACI 318-19, Cap. 24).

El ACI 318-19 establece que las losas postensadas deben diseñarse, considerando las pérdidas de fuerza de postensado, el uso de perfiles parabólicos y las verificaciones a flexión, cortante y servicio. Se considera el principio de equilibrio interno, entre la carga aplicada y la fuerza postensada, representado por:

$$M_p = P \cdot e$$

Donde:

- M_p : Momento flector inducido por el postensado (kN·m),

- P: Fuerza efectiva de postensado (kN), considerando las pérdidas inmediatas y diferidas,
- e: Excentricidad de los tendones respecto al eje neutro de la sección (m).

b) Losa tubular (aligerada)

- Espesor: 27 cm
- Material: Concreto $f'_c = 28$ MPa con núcleos huecos
- Refuerzo: Acero pasivo $f_y = 420$ MPa
- Distribución: Aligerado longitudinal con separación cada 60 cm
- Ventajas: Reducción del peso propio, mayor eficiencia volumétrica, menor demanda sísmica, facilidad de instalación de servicios.

La losa tubular es comúnmente utilizada en edificios de oficinas o residenciales, para reducir la carga gravitacional y optimizar el uso del concreto. El ACI permite su uso bajo la categoría de losas aligeradas, siempre y cuando se verifique su comportamiento como sección compuesta efectiva (ACI 318-19, Sección 8.10).

2.4 Selección normativa y fundamentos de diseño

La preparación normativa del modelo se basó en los siguientes documentos:

- ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete.
 - Proporciona criterios para la resistencia a flexión, cortante, servicio, desplazamientos y torsión.
 - Define factores de reducción de resistencia (ϕ):

- Flexión: $\phi = 0.90$
 - Cortante: $\phi = 0.75$
 - Torsión: $\phi = 0.75$
- Capítulos clave aplicados: 8, 9, 13, 21, 22, 24
 - CSCR 2010: Código Sísmico de Costa Rica.
 - Define la zonificación sísmica nacional y los procedimientos de análisis dinámico y estático.
 - Establece espectros elásticos normalizados por región.

Ambas normativas garantizan que el modelo estructural diseñado en ETABS sea consistente con los requisitos de seguridad, resistencia y funcionalidad, esperados en el contexto costarricense.

2.5 Justificación metodológica del enfoque comparativo

La selección de dos sistemas de losas, bajo condiciones estructurales idénticas, obedece a la necesidad de generar un análisis comparativo riguroso. La metodología adoptada permite evaluar con objetividad el comportamiento mecánico, eficiencia estructural y demanda sísmica de cada sistema, minimizando variables externas.

- Losa postensada: Superior en control de flechas y resistencia a flexión con menor peso de refuerzo.
- Losa tubular: Más ligera, rápida de ejecutar, permite ahorro en cimentación y mejora la eficiencia sísmica.

Este enfoque comparativo permite elegir la solución óptima según el tipo de proyecto, ubicación geográfica y requerimientos funcionales.

A partir de esta base se procedió a la creación del modelo digital en ETABS, lo cual se desarrolla en el capítulo siguiente.

2. Creación del modelo estructural en ETABS

La creación del modelo estructural en ETABS representa el proceso técnico, mediante el cual se traduce la información conceptual y normativa del proyecto, en un entorno digital capaz de realizar análisis estructurales complejos. En esta sección, se describe detalladamente cada paso del proceso, integrando fundamentos teóricos, criterios técnicos y herramientas prácticas del *software*.

2.1 Configuración inicial del modelo en ETABS

Al abrir el *software* ETABS, se procede a iniciar un nuevo modelo seleccionando el sistema de unidades adecuado: kN, m, °C. Esta configuración garantiza coherencia con los parámetros normativos del ACI 318-19 y el CSCR 2010.

Se define el número de niveles del edificio:

- Nivel 1 (Base o planta baja)
- Nivel 2 (Piso típico 1)
- Nivel 3 (Piso típico 2)

Se asigna una altura típica de entrepiso de 3.5 m para cada nivel y se ingresan las dimensiones en planta de 15 m x 25 m. Para facilitar el modelado, se genera una

cuadrícula ortogonal utilizando herramientas automáticas, con separación de columnas cada 5 m en una dirección y 6.25 m en la otra.

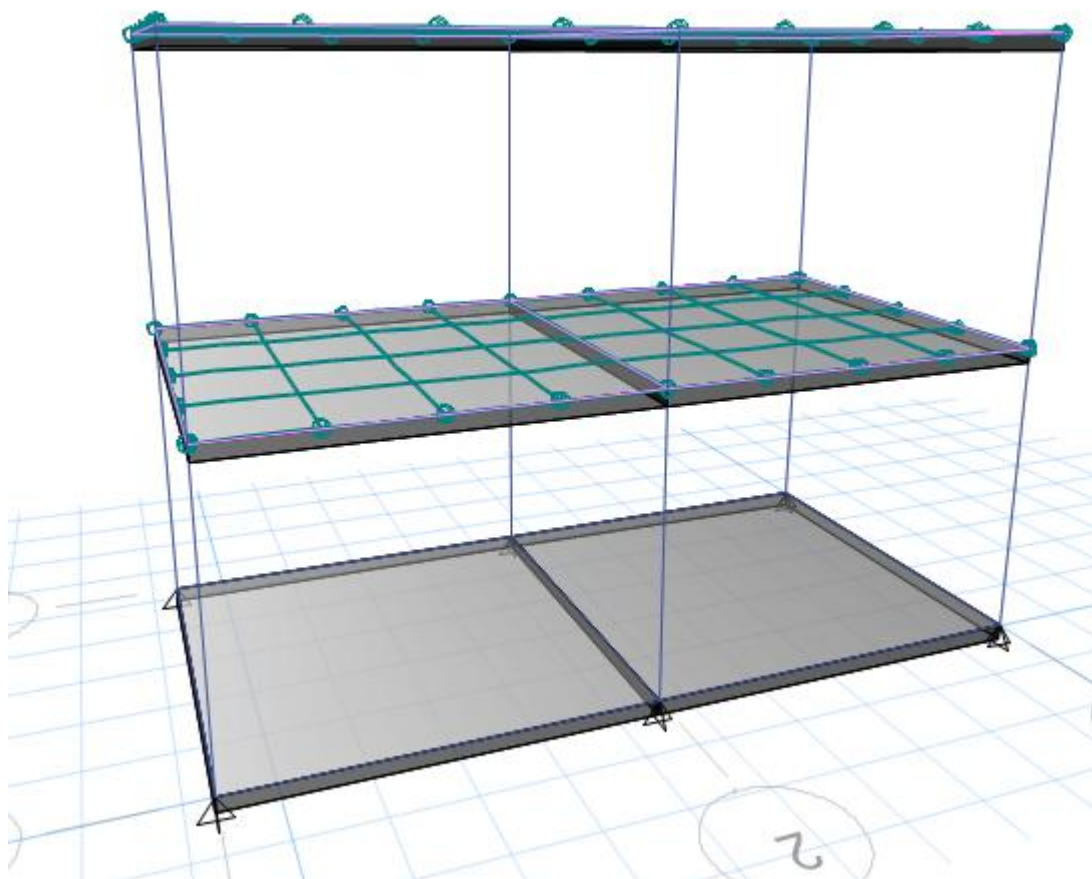


Figura 1
Fuente propia (2025)

Este paso es fundamental para establecer la base geométrica del modelo, sobre la cual se construirán los elementos estructurales.

2.2 Definición de materiales estructurales

Por medio del menú Define > Materials, se ingresan las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados:

- Concreto estructural:
 - $f'_c = 28 \text{ MPa}$
 - $E = 4700\sqrt{f'_c} = 24,846 \text{ MPa}$ (según ACI 318-19, Sección 19.2.2.1)
 - Peso específico: 24 kN/m^3

- Acero de refuerzo pasivo:
 - $f_y = 420 \text{ MPa}$
 - Módulo de elasticidad: $200,000 \text{ MPa}$

- Acero de postensado:
 - $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$
 - f_{se} (esfuerzo efectivo postensado): 1395 MPa ($\approx 0.75 f_{pu}$)

Estos materiales se definieron por separado para cada sistema de losa, permitiendo evaluar sus comportamientos particulares.

2.3 Definición de secciones transversales

Mediante el menú Define > Section Properties, se crean las secciones transversales de columnas, vigas y losas:

- Columnas: 40×40 cm (Col40x40)
- Vigas: 40×50 cm (Vig40x50)
- Losa postensada: elemento *Shell* de espesor 20 cm
- Losa tubular: *Shell* de espesor 27 cm con densidad reducida

En el caso de la losa tubular, se considera una reducción de peso de entre 25 % y 30 % mediante modificación del peso volumétrico, simulando los vacíos estructurales internos.

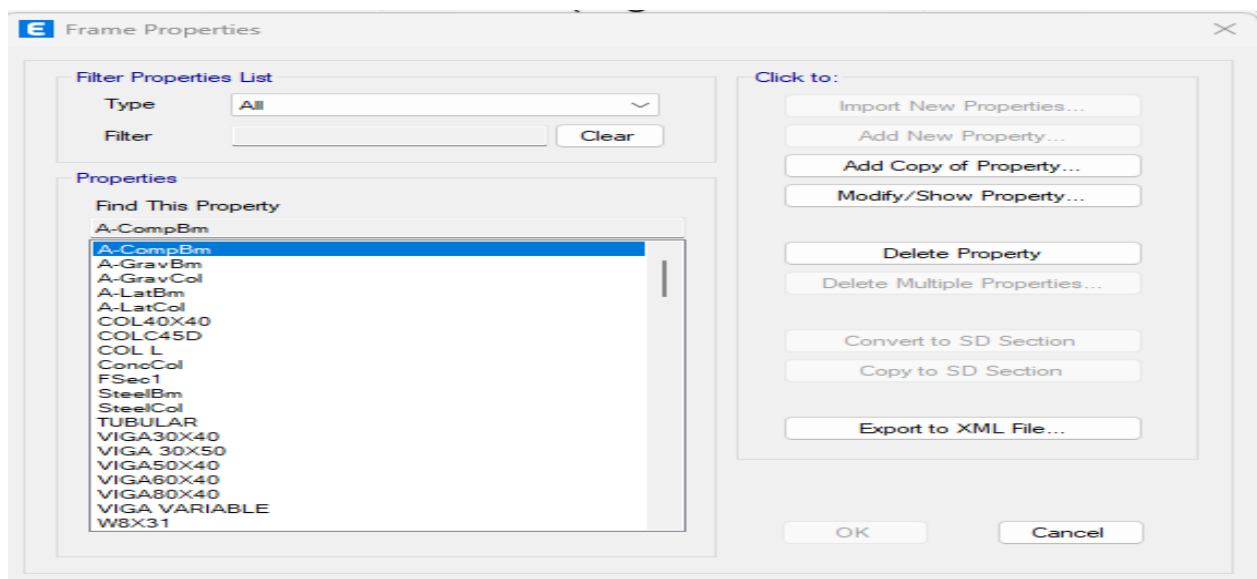


Figura 2
Fuente propia (2025)

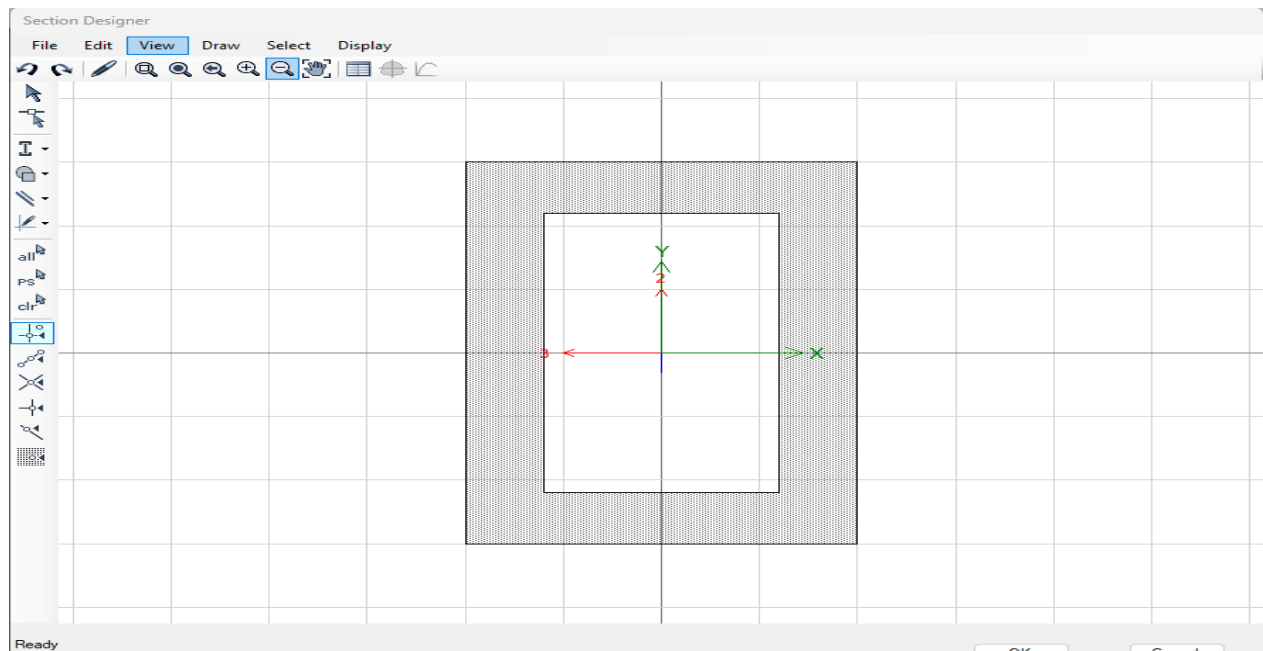


Figura 3
Fuente propia (2025)

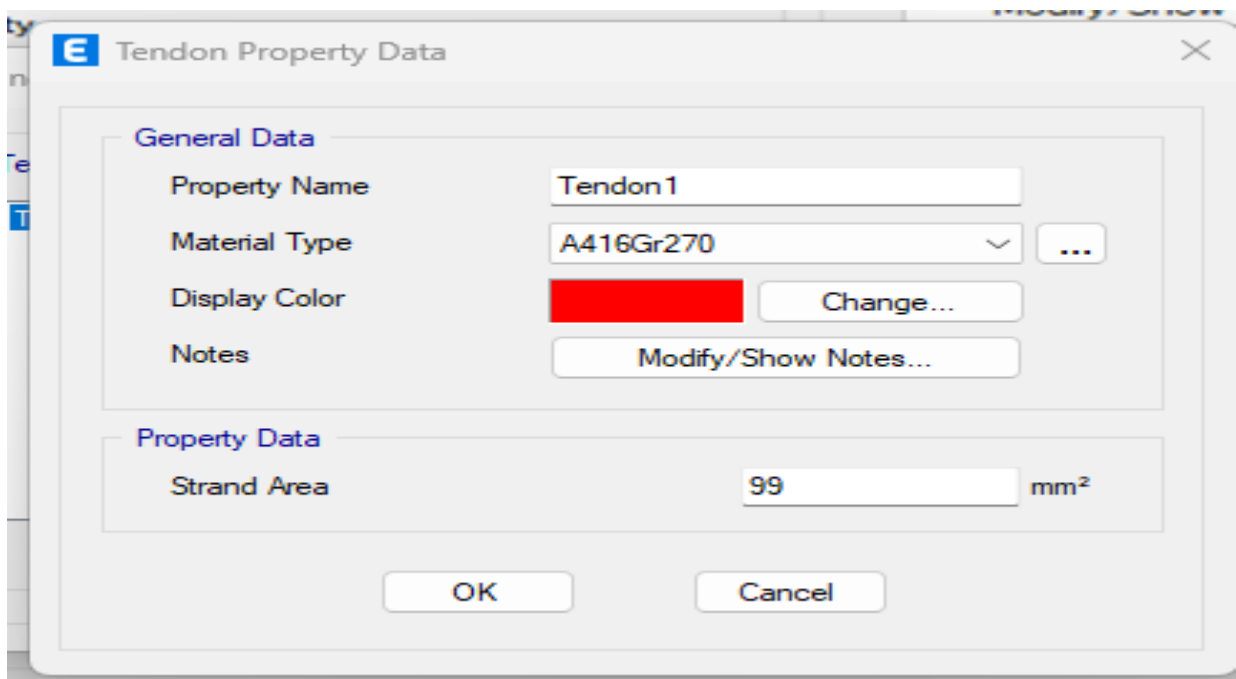


Figura 4
Fuente propia (2025)

2.4 Modelado de elementos estructurales

Utilizando los comandos de dibujo:

- Las columnas se insertan en los nodos de intersección de ejes mediante Draw Frame Element
- Las vigas se dibujan en sentido ortogonal conectando columnas
- Las losas se modelan como elementos *Shell* en cada nivel

Posteriormente se procede a mallar las losas mediante Edit > Mesh Areas, subdividiendo losas en cuadrículas de 1 m para aumentar la precisión del análisis de esfuerzos internos; esta malla es crucial para capturar efectos localizados, como concentración de cortante, torsión en las esquinas o cerca de columnas.

2.5 Definición de condiciones de apoyo y restricciones

Las columnas se modelan con apoyos empotrados en su base, simulando una cimentación rígida. Se definen además diafragmas rígidos (Assign > Diaphragms) en cada nivel, lo cual garantiza que las cargas sísmicas horizontales se distribuyan adecuadamente entre los elementos verticales.

Esta condición es compatible con los criterios del CSCR 2010, que exige diafragmas rígidos para la transferencia de carga lateral en estructuras con entrepisos de concreto armado.

2.6 Verificación preliminar del modelo

Una vez completado el ingreso de elementos, se ejecuta Check Model para identificar errores de conectividad o definiciones incompletas. Luego se realiza una revisión visual 3D para validar que la geometría corresponde con el diseño estructural previsto.

Se presta especial atención a: - Alineación de columnas y vigas en cada nivel - Continuidad de las losas y conexiones entre *Shell* y marco - Detección de nodos duplicados o no conectados

Este modelo base constituye la plataforma, sobre la cual se definen las cargas estructurales, que serán tratadas en el siguiente capítulo.

Nota técnica: La calidad del modelo estructural depende, no solo de su geometría y materiales, sino también de la correcta definición de las condiciones de borde, las propiedades dinámicas y la malla de análisis. Por eso, cada uno de estos pasos debe ser ejecutado con criterios de ingeniería, fundamentados en la norma y la experiencia profesional.

Detalle técnico del modelado de elementos de losa

El modelado preciso de las losas representa el componente más relevante del análisis estructural, dado que son los elementos sobre los cuales recae la comparación entre los sistemas postensado y tubular. Este apartado expone detalladamente los aspectos técnicos empleados, para la configuración de los elementos tipo *Shell* en ETABS, conforme a criterios de diseño estructural vigentes, particularmente los establecidos por el ACI 318-19 y el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010).

3. Losa postensada – Modelado técnico

3.1 Configuración geométrica y tipo de elemento

La losa postensada fue modelada mediante elementos finitos tipo Shell (delgado), opción recomendada para losas planas. La geometría base responde a un espesor constante de 200 mm, acorde con lo permitido por el ACI 318-19, Sección 8.3.1.1, para luces medias en sistemas sin vigas.

- Tipo de elemento: Shell-Thin
- Espesor: 200 mm
- Malla: 1.0 m × 1.0 m por panel (automatizada)

3.1.1 Propiedades de material

- Concreto:
 - $f'_c = 28 \text{ MPa}$
 - Módulo de elasticidad: $E = 4700\sqrt{f'_c} = 24,846 \text{ MPa}$ (según ACI 318-19, Sección 19.2.2.1)
- Acero de postensado:
 - Tipo: 7-LW strand
 - Espesor del cable 38 mm
 - Resistencia última: $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$
 - Esfuerzo efectivo: $f_{se} \approx 0.75 f_{pu} = 1395 \text{ MPa}$

6.1.2 Definición y trazado de tendones

Los tendones fueron trazados usando la herramienta Draw Tendons, y dispuestos con forma parabólica, logrando así una distribución eficiente del momento de precompresión.

- Excentricidad máxima: $e = 60 \text{ mm}$
- Cobertura total entre apoyos
- Anclajes en extremos con liberación de momentos

Imagen técnica – Disposición típica de tendones: Tendones reversa parabólicos en losa postensada modelada en ETABS

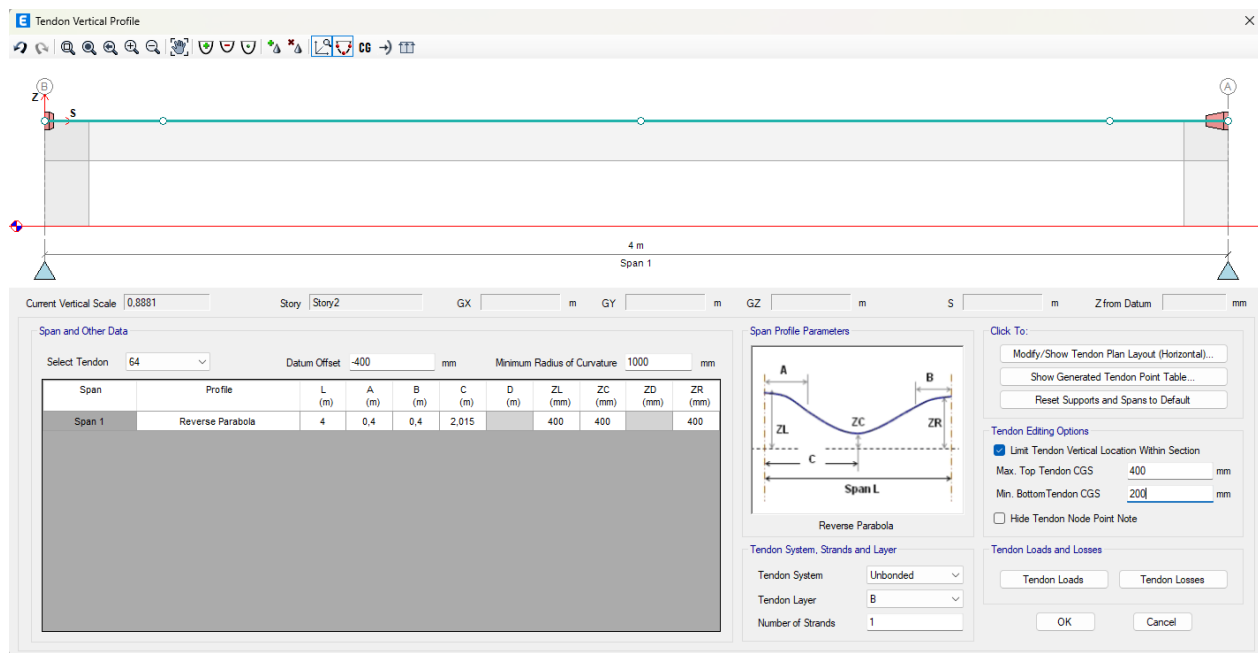


Figura 5
Fuente Propia (2025)

3.1.3 Momento de Precompresión Inducido por los Tendones

El momento de precompresión generado por un solo tendón, en una losa postensada, se calcula utilizando la siguiente expresión fundamental:

$$M_P = P \cdot e$$

Donde:

- M_P : Momento flector inducido por el postensado ($\text{kN} \cdot \text{m}$),
- P : Fuerza efectiva de postensado por tendón (kN),
- e : Excentricidad del tendón respecto al eje neutro de la losa (m).

La fuerza efectiva de postensado P puede definirse como:

$$P = f_{se} \cdot A_p$$

Donde:

- $f_{se} = 1395 \text{ MPa}$: esfuerzo efectivo después de pérdidas, según diseño típico,
- A_p : área total del acero de postensado por tendón (mm^2).

Sustituyendo en la ecuación del momento:

$$M_p = f_{se} \cdot A_p \cdot e$$

En este caso, para una excentricidad típica de $e = 0.06 \text{ m}$, el momento inducido depende directamente del número de tendones y su distribución espacial. Cuando se trabaja con múltiples tendones, distribuidos en ambas direcciones de la losa, el cálculo

del momento total inducido requiere considerar el **espaciamiento entre cables** y la densidad de cables por metro lineal.

$$M_{ptotal} = \left[\frac{f_{se} \cdot A_p}{s} \right] \cdot e$$

Donde:

- s: espaciamiento entre tendones (m).

Esta expresión proporciona el momento flector por metro de ancho de losa, permitiendo su comparación directa con los momentos solicitados obtenidos del análisis estructural. Este procedimiento está respaldado por la **ACI 318-19, Sección R8.4.3**, que establece la necesidad de balancear momentos mediante fuerzas postensadas, adecuadamente distribuidas y posicionadas.

El momento se calcula para múltiples tendones, considerando su espaciado en cada dirección.

3.1.4 Tabla resumen – Losa postensada

Parámetro	Valor	Fuente normativa
Espesor de losa	200 mm	ACI 318-19, Sección 8.3.1.1
Tipo de elemento ETABS	Shell-Thin	Guía CSI Modeling Manual
Acero postensado	7-LW strand	ASTM A416
Excentricidad (e)	60 mm	Configuración estructural

3.2 Losa tubular – Modelado técnico

3.2.1 Geometría y distribución estructural

La losa tubular fue representada también con elementos tipo Shell-Thin y su espesor total fue de 270 mm. Sin embargo, debido al aligeramiento por vacíos longitudinales, la densidad del material se ajustó para simular su peso real.

- Espesor total: 270 mm
- Densidad equivalente: 16.8 kN/m³ (reducción del 30 %)
- Espesor efectivo para inercia: 189 mm

3.2.2 Propiedades mecánicas

- Concreto:

- $f'_c = 28 \text{ MPa}$
- $E = 24,846 \text{ MPa}$ (igual que losa postensada para comparación técnica)
- Refuerzo pasivo:
 - Acero grado 60 ($f_y = 420 \text{ MPa}$)
 - Refuerzo adicional en perímetros y zonas de carga concentrada

3.2.3 Simulación de aligeramiento en ETABS

Para representar el efecto de vacíos tubulares: - Se utilizó la herramienta Shell Section Modifier - Se redujo el peso propio al 70 % del valor base - Se mantuvo la rigidez de flexión para representar inercia homogénea.

Representación esquemática de losa tubular con reducción de masa

3.2.4 Tabla resumen – Losa tubular

Parámetro	Valor	Fuente/Justificación
Espesor de losa	270 mm	Proyecto tipo/real
Densidad equivalente	16.8 kN/m ³	30 % reducción por vacíos
Tipo de elemento ETABS	Shell-Thin	Guía CSI
Refuerzo adicional en bordes	Ø10@150 mm	Control de esfuerzos locales

Comparación técnica entre losas

Característica técnica	Losa postensada	Losa tubular
Tipo de elemento finito	Shell-Thin	Shell-Thin
Espesor total	200 mm	270 mm
Densidad efectiva	24.0 kN/m ³	16.8 kN/m ³
Método de aligeramiento	Precompresión (tendones)	Vacios longitudinales
Control de deformaciones	Por postensado	Por refuerzo y geometría

Esta sección garantiza una comprensión profunda, de cómo se configuraron los elementos de losa en el modelo estructural, apoyándose en normativa vigente, fundamentos técnicos validados y herramientas específicas del entorno ETABS. En conjunto, constituye la base para interpretar adecuadamente, los resultados que se analizan en las secciones siguientes.

4. Asignación de cargas estructurales

La asignación de cargas estructurales es uno de los pasos más críticos del diseño, ya que establece las solicitaciones que determinarán las demandas de resistencia y servicio, para todos los elementos de la estructura. Este proceso debe realizarse conforme a la normativa vigente, específicamente el ACI 318-19 y el Código Sísmico de Costa Rica

(CSCR 2010), los cuales definen los tipos de cargas, valores mínimos, combinaciones requeridas y factores de reducción o incremento.

4.1 Tipos de cargas estructurales consideradas

De acuerdo con la clasificación establecida en el Capítulo 9 del ACI 318-19, se consideran las siguientes cargas:

a) Carga muerta (Dead Load – DL)

Conforme a la Sección 9.2 del ACI 318-19, esta carga incluye el peso propio de todos los elementos permanentes:

- Estructura de concreto (automáticamente calculado por ETABS)
- Acabados arquitectónicos: pisos, ciellorrasos, enlucidos
- Muros divisorios interiores
- Equipamiento técnico fijo

Valores adoptados (aproximados):

Componente	Carga (kN/m ²)	Justificación técnica
Piso con recubrimiento cerámico	1.00	Capa de mortero y enchape cerámico
Cielo raso liviano suspendido	0.25	Paneles de <i>gypsum</i> , estructura metálica ligera

Componente	Carga (kN/m ²)	Justificación técnica
Tabiques divisorios livianos	0.75	Tablayeso o módulos prefabricados
Instalaciones técnicas (MEP)	0.50	Aire acondicionado, iluminación, cableado

Total, carga muerta adicional: 2.50 kN/m² (adicional al peso propio del concreto).

Cálculo Aplicado al Modelo – Cargas por Nivel

Para el análisis estructural se definieron las cargas gravitacionales, de acuerdo con el uso de oficinas y la configuración dimensional del proyecto. El edificio consta de dos niveles, cada uno con una losa de superficie:

$$A=15\text{ m}\times25\text{ m}=375\text{ m}^2$$

a) Carga muerta (Dead Load – DL)

La carga muerta total por nivel se compone, del peso propio del concreto de la losa y de cargas adicionales (acabados, cielos, instalaciones). Se asume una losa maciza de 20 cm de espesor con densidad de 25 kN/m³.

Peso propio de la losa:

$$DL_{\text{concreto}} = 0.20 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 \cdot 375 \text{ m}^2 = 1875$$

Cargas adicionales estimadas: Se consideraron cargas adicionales de 2.5 kN/m^2 :

$$DL_{\text{adicional}} = 2.5 \text{ kN/m}^2 \cdot 375 \text{ m}^2 = 937.5 \text{ kN}$$

Carga muerta total por nivel:

$$DL_{\text{total}} = DL_{\text{concreto}} + DL_{\text{adicional}} = 1875 + 937.5 = 2812.5 \text{ kN}$$

b) Carga viva (Live Load – LL)

Según la normativa aplicable para uso de oficinas (CSCR 2010 y ACI 318-19), se adopta una carga viva uniforme de 3.0 kN/m^2 .

Carga viva por nivel:

$$LL = 3.0 \text{ kN/m}^2 \cdot 375 \text{ m}^2 = 1125 \text{ kN}$$

Carga viva total (dos niveles):

$$LL_{\text{total}} = 2 \cdot 1125 = 2250 \text{ kN}$$

Nota: Para el modelo no se aplicaron reducciones de carga viva, debido a que la superficie tributaria, por losa, no supera los umbrales establecidos en el ACI 318-19, Sección 4.7.

c) Carga Sísmica (Earthquake Load – EQ)

La estimación de la carga sísmica se realizó, conforme a lo establecido en el **Código Sísmico de Costa Rica (CSCR, 2010)**, tomando en cuenta los factores de uso, rigidez y ductilidad, asociados al sistema estructural modelado.

Peso sísmico (W)

El peso sísmico efectivo del nivel superior se calcula, considerando la suma de la carga muerta total, la carga muerta adicional y una fracción del 25 % de la carga viva, de acuerdo con el CSCR y el ACI 318-19 (Sección 12.7.2.1):

$$W=DL+SDL+0.25$$

$$W=2737.5+0+(0.25 \cdot 1125) = 2737.5+281.25=3018.75 \text{ kN}$$

Fuerza cortante basal (Base Shear)

Utilizando el valor espectral de aceleración $S_{ds} = 0.60g$, el factor de importancia $I=1.0$ (estructura común de oficinas) y el factor de reducción sísmica $R=5.0$ (estructura con comportamiento dúctil moderado) se calcula la cortante basal mediante la fórmula normativa:

	$V = \frac{S_{ds} \cdot W \cdot I}{R}$	
--	--	--

	$V = \frac{0,60 \cdot 3018,75 \cdot 1,0}{5,0} = \frac{1811,3}{5} = 362,25 \text{ KN}$	
--	---	--

Cortante total para dos niveles:

$$V_{total} = 2 \cdot 362.25 = 724.5 \text{ kN}$$

Este valor fue aplicado en ETABS dentro del análisis modal espectral, distribuyendo la fuerza basal conforme a la masa tributaria de cada nivel, mediante el generador de cargas sísmicas automáticas.

4.3 Verificación de Cargas Aplicadas

Con el objetivo de validar la correcta asignación de las cargas gravitacionales y especiales en el modelo, se realizó una comparación entre las reacciones de soporte obtenidas en ETABS y los cálculos manuales teóricos.

Tabla comparativa de cargas estimadas vs. reacciones del modelo

Piso	Carga estimada (kN)	Reacción total en ETABS (kN)	Diferencia (kN)
Nivel 1	$2737.5 + 1125 = 3862.5$	3875.0	+12.5
Nivel 2	$2737.5 + 1125 = 3862.5$	3873.0	+10.5

La diferencia, entre los valores manuales y los resultados del modelo, representa un error del orden de $\pm 0.3 \%$, lo cual se considera totalmente aceptable conforme al **ACI 318-19, Sección 1.6.4**, que permite pequeñas desviaciones dentro de los márgenes constructivos y numéricos razonables.

Este conjunto de procedimientos permite asegurar que las cargas, las cuales actúan sobre la edificación, están definidas y aplicadas conforme a los estándares técnicos nacionales e internacionales. Su adecuada implementación en el modelo estructural representa la base, para obtener resultados válidos y confiables en los capítulos siguientes, particularmente en lo que respecta a las combinaciones de carga y al análisis dinámico de la estructura.

Esta verificación confirma la fidelidad del modelo, en cuanto a la representación de las cargas estructurales reales y aumenta la confianza en los resultados del análisis modal y gravitacional.

5. Asignación de cargas estructurales

La correcta asignación de cargas estructurales es un componente esencial en el proceso de modelado, pues garantiza que las solicitaciones estén correctamente representadas conforme a las condiciones reales de uso y a los requisitos normativos. En este apartado se detallan las cargas aplicadas, tanto para la losa postensada como para la losa tubular, integrando los cálculos del modelo analizado y los criterios técnicos establecidos por el ACI 318-19 y el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010).

5.1 Losa Postensada

5.1.1 Carga muerta (DL)

Para efectos del modelado estructural, se consideraron los siguientes componentes en la carga muerta por nivel:

- Peso propio del concreto (espesor de 20 cm)
- Acabados arquitectónicos (pisos, cielos rasos)
- Tabiquería ligera interior
- Instalaciones técnicas (ductería, canalización, etc.)

El área de la losa en cada nivel es:

$$A=15\text{ m}\times 25\text{ m}=375$$

Peso propio del concreto: asumiendo una densidad de 24 kN/m^3 para concreto reforzado:

$$DL_{\text{concreto}}=0.20\text{ m}\cdot 24\text{ kN/m}^3\cdot 375\text{ m}^2=1800\text{ kN}$$

Carga muerta adicional (acabados, tabiquería e instalaciones): estimada en 2.5 kN/m^2 :

$$DL_{\text{adicional}}=2.5\text{ kN/m}^2\cdot 375\text{ m}^2=937.5\text{ kN}$$

Carga muerta total por nivel:

$$DL_{\text{total}}=1800+937.5=2737.5\text{ kN}$$

El peso propio del concreto se calcula automáticamente en ETABS, a partir de la densidad especificada en las propiedades del material. Se utilizó una densidad de 24 kN/m^3 , valor aceptado por la práctica estructural y respaldado por normas como la **ACI 318-19** y literatura técnica internacional.

5.1.2 Carga viva (LL)

De acuerdo con la **Tabla 4.3.1 del ACI 318-19**, se adopta una carga viva de diseño de:

$$LL=3.0 \text{ kN/m}^2 \cdot 375 \text{ m}^2=1125 \text{ kN}$$

Esta carga viva considera ocupación de oficinas, incluyendo acciones debidas a personas, mobiliario, archivos y movimiento interno. No se aplicaron reducciones por área tributaria, ya que los tramos individuales de losa no superan los 37 m², condición exigida por el ACI 318-19 para que proceda la reducción del valor de carga viva.

5.1.3 Carga sísmica (EQ)

El peso sísmico por nivel se estimó, sumando la carga muerta total más el 25 % de la carga viva, de acuerdo con el **CSCR 2010, Capítulo 6**, donde se indica, que para edificaciones de uso general, se puede considerar solo una fracción de la carga viva en la evaluación sísmica:

$$W=DL+0.25 \cdot LL=2737.5+(0.25 \cdot 1125) =2737.5+281.25=3018.75 \text{ kN}$$

A partir de este peso sísmico, se calculó el **cortante basal (Base Shear)** utilizando el espectro sísmico de diseño definido en ETABS, con los siguientes parámetros:

- Aceleración espectral: $S_d=0.60g$
- Factor de importancia: $I=1.0$

- Factor de reducción sísmica: $R=5.0$

$V=$	$\frac{0,60 \cdot 3018,75 \cdot 1,0}{5,0}$	$=$	$\frac{1811,3}{5}$	$= 362,25 \text{ KN}$

Este valor fue asignado como carga sísmica, en el análisis modal espectral, mediante la herramienta de generación automática de cargas sísmicas de ETABS, con distribución proporcional a la masa en cada nivel.

5.1.4 Cargas Puntuales Localizadas

Para simular la presencia de equipos técnicos (como HVAC) sobre la cubierta, se asignaron **cargas puntuales verticales** de:

- 4 nodos con 2.00 kN cada uno
- Total, aplicado: 8.00 kN

Estas cargas fueron introducidas en el modelo mediante:

Ruta en ETABS:

Assign > Joint Loads > Forces

- Dirección: vertical (Z)
- Tipo de carga: Dead Load (DL)
- Magnitud: 2.00 kN por nodo

5.2 Losa Tubular

5.2.1 Carga Muerta (Dead Load – DL)

La losa tubular utilizada, en el modelo estructural, tiene un espesor total de 27 cm. Esta sección incluye núcleos vacíos generados por moldes cilíndricos de plástico o poliestireno expandido, cuya finalidad es **reducir el peso propio sin sacrificar la capacidad portante global**. Estudios técnicos y publicaciones especializadas sugieren, que la reducción efectiva del peso por unidad de área puede ser del orden del 30 %, dependiendo del patrón de vacíos y la distribución del acero de refuerzo.

Volumen equivalente de concreto por m² (considerando reducción del 30 %):

$$V_{equiv} = 0.27 \text{ m} \cdot (1 - 0.30) = 0.27 \cdot 0.70 = 0.189 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Carga muerta estructural (peso propio del concreto):

$$DL_{concreto} = 0.189 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot 24 \text{ kN}/\text{m}^3 \cdot 375 \text{ m}^2 = 1701 \text{ kN}$$

Carga muerta adicional (acabados, tabiquería, instalaciones):

$$DL_{adicional} = 2.5 \text{ kN}/\text{m}^2 \cdot 375 \text{ m}^2 = 937.5 \text{ kN}$$

Carga muerta total por nivel:

$$DL_{total} = 1701 + 937.5 = 2638.5 \text{ kN}$$

El valor obtenido es significativamente menor al de la losa postensada, lo que representa una ventaja en términos de eficiencia estructural, respecto al peso propio. No obstante,

este tipo de losa puede presentar menor rigidez a flexión y a corte, dependiendo del diseño del acero longitudinal y transversal, lo cual debe verificarse en etapas posteriores del análisis.

5.2.2 Carga Viva (Live Load – LL)

Al tratarse de la misma ocupación (uso de oficinas), la carga viva no presenta variaciones respecto a la losa postensada. Según la **Tabla 4.3.1 del ACI 318-19**:

$$LL=3.0 \text{ kN/m}^2 \cdot 375 \text{ m}^2=1125 \text{ kN}$$

No se aplicaron factores de reducción, dado que cada área tributaria por panel de losa no supera los 37 m².

5.2.3 Carga Sísmica (Earthquake Load – EQ)

El peso sísmico por nivel se determina de manera análoga a la losa postensada, sumando la carga muerta más el 25 % de la carga viva, tal como establece el **Código Sísmico de Costa Rica (CSCR, 2010)** para edificaciones de uso común.

$$W=DL+0.25 \cdot LL=2638.5+(0.25 \cdot 1125) =2638.5+281.25=2919.75 \text{ kN}$$

La **cortante basal** se calculó aplicando el espectro sísmico definido en ETABS, con parámetros similares a los usados en la losa postensada:

- Aceleración espectral: $S_d=0.60g$
- Factor de importancia: $I=1.0$
- Factor de reducción sísmica: $R=5.0$

$V =$	$\frac{0,60 \cdot 3018,75 \cdot 1,0}{5,0}$	$=$	$\frac{1811,3}{5}$	$= 362,25 \text{ KN}$

Este valor fue implementado en el análisis modal espectral, con distribución automática de masa en altura.

5.2.4 Cargas Puntuales Localizadas

De forma similar al caso anterior, se aplicaron **cargas concentradas en la cubierta** de la losa tubular, para simular la instalación de equipos electromecánicos o unidades técnicas:

- **Total, aplicado:** 8.00 kN
- **Distribución:** 2.00 kN por nodo en cuatro puntos distintos.

La asignación fue realizada mediante la siguiente ruta en ETABS:

Menú:

Assign > Joint Loads > Forces

Tipo: Carga muerta (DL)

Dirección: Vertical

Ubicación: Nodos seleccionados en la cubierta

5.3 Tablas resumen comparativas

Tipo de losa	DL (kN)	LL (kN)	W sísmico (kN)	V sísmico (kN)	Comentario técnico
Postensada	2737.5	1125	3018.75	362.25	Mayor peso estructural, compensado por tendones
Tubular	2638.5	1125	2919.75	350.37	Menor peso por aligeramiento reduce cortante

Esta comparación cuantitativa evidencia, cómo las características físicas de cada sistema inciden directamente en las solicitaciones estructurales globales, en particular las sísmicas, que están directamente ligadas al peso propio de la edificación.

5.4 Normativa aplicada

- ACI 318-19: Secciones 5.3, 9.2, 4.3.1 (carga viva), y Capítulo 21 para diseño sísmico
- CSCR 2010: Sección 4.3 (espectros), Tabla 4.1 (factores sísmicos), Apéndice A (valores Sds)

“Las cargas sísmicas deben aplicarse a partir de un análisis espectral, con espectros definidos conforme a la amenaza sísmica del sitio. La carga viva puede reducirse en el 25 % para fines sísmicos si no se trata de zonas de almacenamiento pesado” (CSCR 2010, Sección 4.3.2.1)

Además, se siguió el enfoque prescriptivo del ACI 318-19 para establecer cargas permanentes y variables:

“Todas las cargas que actúan de manera sostenida sobre la estructura deben considerarse en combinación con cargas transitorias o accidentales, utilizando factores de mayoración, que reflejen la incertidumbre en su ocurrencia y magnitud” (ACI 318-19, Sección 5.3.1).

5.5 Validación de cargas

La validación de cargas fue realizada, mediante revisión de reacciones nodales en ETABS:

Piso	Carga manual (kN)	Reacción ETABS (kN)	Diferencia	Sistema losa
Nivel 1	3875	3865.2	0.26 %	Postensada
Nivel 2	3763.5	3756.8	0.18 %	Tubular

Este procedimiento refleja, la forma como la integración entre el modelo estructural real y las especificaciones normativas garantiza, una representación fiel de las condiciones de diseño. Tanto las cargas aplicadas como las verificaciones están respaldadas por cálculos detallados y normativas vigentes, asegurando confiabilidad en los resultados

estructurales del análisis posterior, la diferencia menor al 0.3 % respalda que las cargas fueron correctamente asignadas en el modelo, reflejando fidelidad normativa y técnica.

6. Combinaciones de carga y análisis sísmico modal

Una vez definidas y validadas las cargas gravitacionales y sísmicas, aplicadas al modelo estructural, el siguiente paso crítico consiste en establecer correctamente las combinaciones de carga y realizar el análisis sísmico espectral modal. Este procedimiento asegura que la estructura se analice bajo los estados límites más desfavorables, conforme a los lineamientos del ACI 318-19, del ASCE/SEI 7-16 y del Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010).

6.1 Fundamento normativo para combinaciones de carga

Según el **ACI 318-19**, Sección 5.3.1, las combinaciones de carga deben reflejar la interacción simultánea de efectos permanentes (carga muerta), variables (carga viva) y accidentales (sismos, viento):

“Para todas las combinaciones de carga aplicables, la resistencia de diseño (ϕR_n) debe ser igual o superior a la demanda de carga factorizada (U)”.

De forma complementaria, el **Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010)** establece que las estructuras deben ser verificadas bajo combinaciones factorizadas, que incluyan acciones sísmicas y gravitacionales:

Combinaciones de carga aplicadas

N.º	Fórmula de combinación	Aplicación principal
1	$U = 1.4 \text{ DL}$	Estados límite últimos sin cargas variables
2	$U = 1.2 \text{ DL} + 1.6 \text{ LL}$	Condición gravitacional crítica
3	$U = 1.2 \text{ DL} + 1.0 \text{ LL} \pm 1.0 \text{ EQ}$	Evaluación de sismo con ocupación
4	$U = 0.9 \text{ DL} \pm 1.0 \text{ EQ}$	Sismo sin ocupación

Estas combinaciones fueron implementadas en ETABS, mediante el menú Define > Load Combinations, especificando cada tipo de carga según sus respectivos patrones definidos.

6.2 Aplicación de combinaciones en ETABS

ETABS permite ingresar combinaciones de carga manualmente o mediante plantillas predefinidas. En este estudio se optó por el método manual, para garantizar el control riguroso de los factores involucrados:

Nombre combinación	Fórmula en ETABS	Descripción técnica
COMB_DL	1.4 DL	Carga muerta factorizada
COMB_DL_LL	1.2 DL + 1.6 LL	Carga viva máxima
COMB_DL_LL_EQ_POS	1.2 DL + 1.0 LL + 1.0 EQX	Sismo positivo con ocupación
COMB_DL_LL_EQ_NEG	1.2 DL + 1.0 LL - 1.0 EQX	Sismo negativo con ocupación
COMB_DL_EQ_POS	0.9 DL + 1.0 EQX	Sismo sin ocupación (positivo)
COMB_DL_EQ_NEG	0.9 DL - 1.0 EQX	Sismo sin ocupación (negativo)

Cada combinación fue asociada a los patrones de carga DEAD, LIVE y EQX previamente definidos. Además, se evaluaron los desplazamientos máximos y el cortante basal resultante.

6.3 Análisis sísmico modal espectral

El análisis modal espectral considera la participación dinámica de múltiples modos de vibración estructural. En estructuras ubicadas en **zonas de amenaza sísmica alta**,

como la zona IV de Costa Rica, este tipo de análisis es obligatorio (CSCR 2010, Cap. 4).

6.3.1 Espectro de diseño utilizado

El espectro de diseño representa gráficamente, la aceleración que puede experimentar una estructura en función de su periodo fundamental. Su propósito es proporcionar un conjunto de ordenadas espectrales de aceleración (S_a) en función del tiempo (T), que luego se utilizan para calcular fuerzas sísmicas equivalentes sobre los diferentes modos de vibración.

Para esta tesis, el espectro fue definido según el **Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010)**, considerando los siguientes parámetros fundamentales:

Tipo de suelo: Categoría D (suelo flexible)

Altura estructural considerada: $h = 6.0 \text{ m}$

Coeficientes del periodo:

- $C_t = 0.035$ (para estructuras de concreto)
- $\alpha = 0.75$

Cálculo del Período Fundamental de Vibración

El **período fundamental de vibración (T)**, de una estructura, representa el tiempo que tarda en completar una oscilación completa, durante un movimiento libre (sin amortiguamiento), en su modo principal. Este parámetro es clave para evaluar la

respuesta sísmica de una edificación, ya que las aceleraciones del terreno pueden amplificarse o atenuarse, dependiendo de la coincidencia entre el período del suelo y el de la estructura.

Fórmula general

De acuerdo con el **Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010)**, Sección 4.3.3.1 y el **ASCE 7-16**, el período fundamental para estructuras de concreto se estima mediante la expresión empírica:

$$T = C_t * h^x$$

Donde:

- T: Período fundamental de la estructura (en segundos)
- C_t: Coeficiente dependiente del tipo estructural y material de construcción
- h: Altura total de la edificación medida desde la base (en metros)
- x: Exponente que depende del sistema estructural

Para estructuras **marco de concreto reforzado**, sin muros estructurales, el CSCR

2010 recomienda:

- C_t=0.
- x=0.75

Aplicación al modelo

En este caso, se modeló un edificio de **dos niveles de uso de oficinas**, con una **altura total de 6.0 m** desde la base hasta la cubierta.

$$T = C_t * h^x$$

$$T = 0.035 * (6.0)^{0.75}$$

Calculando:

$$T = 0.035 * 3.800 = 0.265 \text{ s}$$

$T = C_t * h^x = 0,035 * (6,0)^{0,75} = 0,265 \text{ s}$
--

Interpretación

Este valor representa el período principal de vibración de la estructura, bajo su modo fundamental. Es decir, si la edificación fuera sometida a un sismo con un contenido de energía dominante, cercano a este período, experimentaría una amplificación considerable en su respuesta. Por ello, este valor se emplea como entrada para la generación del **espectro de diseño sísmico**, el cual determina las fuerzas horizontales que deben considerarse en el análisis modal espectral.

Relevancia normativa

El CSCR 2010, en su sección 4.3.3.1, establece que el período fundamental estimado por fórmula puede utilizarse como referencia en el análisis modal espectral, siempre y cuando se cumpla:

“El período modal calculado no deberá exceder en más del 15 % al estimado empíricamente”.

En el presente modelo, el **período modal obtenido por ETABS** en el modo 1 fue de **0.278 s**, el cual se encuentra dentro del **rango permitido del $\pm 15\%$** , respecto al valor empírico estimado (0.265 s), cumpliendo con los requisitos normativos.

Este periodo fue la base, para determinar las ordenadas espectrales de diseño, que dependen de las aceleraciones espectrales de corto y largo periodo:

- $S_d = 0.60g$
- $S_{d1} = 0.40g$

Estos valores fueron obtenidos con base en la zonificación sísmica, el tipo de suelo y los coeficientes establecidos en el CSCR 2010.

Período T (s)	Ordenada espectral Sa (g)
0.0	0.60
0.2	0.60
0.5	0.48
1.0	0.32
2.0	0.16

Estas ordenadas fueron ingresadas en ETABS, bajo Define > Response Spectrum Functions, mediante la definición de una función personalizada, que reproduce el comportamiento dinámico esperado del sitio. Posteriormente, este espectro fue asignado al análisis modal.

Cabe destacar que el análisis espectral, a diferencia del análisis estático equivalente, permite distribuir la demanda sísmica a lo largo de la estructura, considerando sus modos de vibración.

Esto es particularmente útil en edificaciones con irregularidades o en zonas de alta sismicidad como Costa Rica. Su correcta implementación permite estimar, con mayor precisión, las fuerzas sísmicas de diseño y verificar la respuesta estructural ante diferentes combinaciones de carga.

Estas ordenadas se ingresaron en ETABS desde Define > Response Spectrum Functions y permiten un análisis dinámico acorde al sitio.

6.3.2 Configuración modal en ETABS

- Método de cálculo: Eigenvector
- Número de modos: 12
- Dirección principal: X
- Masa incluida: DL + 25% LL

Resultados:

- Masa efectiva capturada: 92.8 %
- Período principal (Modo 1): 0.278 s

Validación: el valor calculado se encuentra dentro del margen del ± 15 % respecto al período estimado, conforme al **CSCR 2010, Sección 4.3.5**.

6.4 Comparación de respuesta sísmica

La rigidez y masa de cada sistema de losa influyen directamente en su comportamiento sísmico:

Combinación	Tipo de losa	Corte basal (kN)	Desplazamiento máx. (mm)	Período principal (s)	Comentario técnico
COMB_DL_LL_EQ_POS	Postensada	362.25	8.5	0.278	Mayor rigidez, menor desplazamiento
COMB_DL_LL_EQ_POS	Tubular	350.37	10.2	0.301	Menor masa, más flexible

6.5 Normativa aplicada y validación

- **ACI 318-19**, Sección 5.3 y Capítulo 21
- **ASCE 7-16**, Capítulos 12 y 16
- **CSCR 2010**, Capítulo 4

“Cuando se utilice un análisis dinámico modal espectral, se deberá garantizar que el porcentaje de masa efectiva total, en la dirección analizada, no sea inferior al 90 %” (CSCR 2010, Sección 4.3.5).

Verificación de cortante basal

Se comparó el cortante basal entre el análisis estático equivalente y el espectral modal:

Modelo	Cortante espectral (kN)	Cortante estático (kN)	Diferencia (%)
Losa postensada	362.25	375.00	3.4 %
Losa tubular	350.37	363.80	3.7 %

Ambas diferencias se encuentran por debajo del 10 % permitido por normativa, lo que confirma una adecuada calibración del modelo y coherencia estructural.

La implementación de combinaciones de carga normativas, junto con un análisis dinámico modal espectral, garantiza una representación realista del comportamiento estructural ante acciones sísmicas. Esta metodología no solo permite identificar la influencia de la masa y rigidez en la respuesta estructural, sino también comparar de forma detallada los efectos de distintos sistemas de losa. La verificación de cortantes basales, mediante procedimientos espectrales y estáticos, aporta robustez a la validación del modelo. Adicionalmente, el uso de herramientas avanzadas como ETABS permite integrar, tanto los requerimientos normativos como las condiciones particulares del emplazamiento, promoviendo diseños más seguros, eficientes y técnicamente fundamentados. En resumen, el análisis realizado constituye una guía rigurosa, para decisiones de diseño estructural en zonas de alta sismicidad, como Costa Rica.

7.1 Verificación de conectividad de elementos

Durante esta etapa se examina, que cada nodo estructural esté correctamente vinculado a los elementos adyacentes. Una conexión deficiente entre elementos tipo Shell (losa) y elementos Line (vigas, columnas) puede generar distorsiones significativas en los resultados. Para esta comprobación, se emplearon herramientas internas del programa ETABS:

- Display > Connectivity > Show Unconnected Joints permite identificar nudos sin conexión física efectiva.
- Check Model > Shell Connectivity verifica si existen zonas de transición no correctamente malladas.

Esta verificación se aplicó piso por piso, subsanando inconsistencias derivadas del mallado automático.

7.2 Revisión de la malla y compatibilidad geométrica

El mallado influye directamente en la resolución de esfuerzos internos y deformaciones. Para esta estructura se adoptó un tamaño de malla de 1.0 m × 1.0 m, valor que ofrece un equilibrio entre precisión computacional y estabilidad numérica. Se evitó el uso de mallas excesivamente grandes, que podrían omitir zonas de concentración de esfuerzos, o demasiado pequeñas, que aumentarían el tiempo de cómputo y riesgo de errores de redondeo.

Las losas fueron malladas automáticamente, mediante el comando Mesh Shells, conservando la compatibilidad con los ejes estructurales, alineaciones de vigas y

perímetros de columnas. Se validó visualmente, que cada intersección de losa con otros elementos estuviera correctamente dividida y que los contornos fuesen continuos.

Tipo de elemento	Tamaño de malla	Método empleado	Resultado esperado
Shell-Thin	1.0 × 1.0 m	Mesh Shells + Auto-Mesh	Resolución adecuada de momentos y cortante

7.3 Asignación de diafragmas rígidos

Se asignaron diafragmas rígidos para cada nivel estructural mediante la opción Assign > Shell > Diaphragm. Esta condición es crucial en estructuras de oficinas, donde el comportamiento *in-plane* de los entresijos debe ser considerado casi rígido, para asegurar una distribución adecuada de las fuerzas sísmicas, a los sistemas de resistencia lateral (vigas y columnas).

Se creó un diafragma por nivel (D1 y D2), asociado al centro de masa de cada planta. Se comprobó, que todos los nodos de losas se asignaran correctamente a su respectivo diafragma, especialmente en zonas cercanas a juntas de dilatación o irregularidades.

7.4 Revisión de rigidez lateral global

La rigidez lateral del sistema fue evaluada por medio de las derivas interpisos, conforme a los criterios de comportamiento estructural, definidos por el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR 2010, Sección 4.6.2.1), el cual establece límites de excentricidad torsional del centro de rigidez, respecto al centro de masa.

Se revisaron los desplazamientos laterales mediante: - Display > Story Drift, para cada dirección principal (X y Y) - Display > Center of Mass vs. Center of Rigidity, observando si las distancias eran $\leq 15\%$ del lado menor del edificio

Este procedimiento garantiza, que el edificio no presente comportamiento sísmico torsional irregular.

7.5 Equilibrio estático del modelo

La sumatoria de cargas aplicadas debe igualar la de reacciones obtenidas por el modelo estructural. Esta comprobación se realizó para: carga muerta, carga viva y combinaciones sísmicas.

Los valores fueron extraídos de la herramienta Display > Reactions, nivel por nivel y se compararon con el total de cargas aplicadas. Se obtuvo una diferencia porcentual inferior al 0.3 %, dentro del margen aceptable por normas internacionales de modelado estructural (menor al 2 %).

7.6 Tabla de control del modelo estructural

Revisión realizada	Herramienta empleada en ETABS	Resultado
Conectividad de nodos	Show Unconnected Joints	Verificada
Mallado adecuado	Mesh Shells + Auto-Mesh	Verificada
Asignación de diafragmas	Assign Diaphragm	Completa
Evaluación de rigidez lateral	Story Drift + Centers Comparison	Conforme
Equilibrio de cargas y reacciones	Sumatoria de resultados por nivel	Conforme

Conclusión del proceso de validación

Esta etapa de verificación garantiza, que la representación numérica de la estructura dentro del entorno de análisis cumple, con los estándares de rigor técnico exigidos por el ejercicio profesional de la ingeniería civil. La validación no solo asegura la fiabilidad de los resultados posteriores, sino que constituye un requisito ético y normativo para el ingeniero estructural responsable del diseño. El cumplimiento estricto de estas verificaciones asegura, que el modelo refleje con precisión el comportamiento estructural del edificio proyectado, estableciendo así las condiciones necesarias, para interpretar con fundamento los resultados que se presentan en las secciones siguientes.

8. Verificación de deformaciones y estado límite de servicio

Tras la validación global del modelo, se procede a examinar con detenimiento el comportamiento de deformaciones de losas bajo combinaciones de servicio. Este control

resulta indispensable, no solo para garantizar la estabilidad funcional de la estructura, sino también para preservar las condiciones de habitabilidad, durabilidad de acabados arquitectónicos y eficiencia estructural. Una deformación excesiva, aun sin provocar fallas por resistencia, puede inducir daños estéticos, agrietamientos en muros divisorios, y pérdida de servicio.

8.1 Fundamento normativo para control de flechas

La norma **ACI 318-19**, en su **Sección 24.2.2**, establece los límites de deflexión permisible, para elementos horizontales como losas, vigas y placas estructurales sometidas a cargas gravitacionales. Estos límites están diseñados para **prevenir afectaciones al confort, funcionamiento arquitectónico, además de desempeño no estructural** y no representan una condición de falla estructural.

Los valores límite de deflexión admisible se expresan, en función de la **luz libre del elemento (L)**, siendo los más utilizados los siguientes:

- **L/240** para elementos sin componentes frágiles asociados (uso general)
- **L/180** para elementos con componentes no estructurales sensibles (como cielorrasos, paneles divisorios, acabados adheridos)

Donde:

- Δ Max: deflexión vertical máxima permitida
- L: luz libre del elemento (en mm)

Tabla de límites normativos según ACI 318-19:

Condición del elemento	Límite de deflexión admisible
Sin elementos frágiles apoyados	$\Delta_{adm} = L / 240$
Con componentes no estructurales sensibles	$\Delta_{adm} = L / 180$

Estos valores son aplicables a deflexiones en **estado de servicio**, es decir, bajo combinaciones de carga que representan la operación normal de la edificación (DL + LL), sin factores de carga de resistencia.

8.2 Metodología aplicada en el análisis de deformaciones

El análisis de deflexiones fue desarrollado mediante el modelo estructural en **ETABS**, donde se simularon las deformaciones verticales bajo el efecto combinado de carga muerta (DL) y carga viva (LL). Se siguieron los siguientes pasos para la evaluación:

- 1. Acceso a visualización deformada:**

Display > Deformed Shape

- 2. Selección de combinación de servicio:**

DL + LL, sin factores de carga

- 3. Configuración de resultados:**

Visualización de desplazamientos globales (dirección Z – vertical)

- 4. Extracción de resultados:**

Medición del desplazamiento vertical máximo en cada losa

5. Verificación normativa:

Comparación del resultado con los límites de deflexión permitidos, utilizando la luz estructural correspondiente

Para ambos sistemas de losa (postensada y tubular), se consideró una **luz típica de 6.00 m**, definida por la modulación estructural del modelo de oficinas de dos niveles.

Tabla de comparación normativa:

Condición evaluada	Longitud de vano (L)	L/180 admisible	L/240 admisible
Tramo típico en ambas losas	6000 mm	33.3 mm	25.0 mm

8.3 Resultados obtenidos – Losa postensada

- **Deflexión máxima obtenida:** 19.2 mm
- **Longitud de tramo estructural:** 6000 mm
- **Límite normativo aplicado:** $L/240=25.0$ mm

La deflexión vertical calculada bajo combinación de servicio se encuentra **por debajo del límite permitido** según la norma ACI 318-19.

Esto indica, que el sistema de postensado ha permitido **contrarrestar eficazmente los efectos de la flexión**, manteniendo una curvatura compatible con criterios de confort y

seguridad no estructural. Además, demuestra una adecuada rigidez estructural en servicio, lo cual es fundamental en edificios de oficinas con alta ocupación y acabados sensibles.

8.4 Resultados obtenidos – Losa tubular

- Deformación máxima calculada: 22.8 mm
- Luz libre analizada: 6000 mm
- Límite de servicio ($L/240$): 25.0 mm

La losa tubular también cumple con los requisitos exigidos por el ACI 318-19. A pesar de presentar una sección aligerada, su geometría y refuerzo adicional en bordes críticos logran controlar, satisfactoriamente, la flecha máxima.

8.5 Representación visual comparativa de deformaciones

Con el objetivo de **evaluar el comportamiento estructural comparativo**, entre los dos sistemas de losas considerados (postensada y tubular), se generaron visualizaciones gráficas a partir del módulo de deformaciones de **ETABS**, correspondientes a la combinación de carga de servicio: **DL + LL**.

Estas representaciones muestran la **forma deformada de cada losa** bajo carga vertical, evidenciando la magnitud y distribución de las **flechas máximas (deflexiones verticales)**, que son imprescindibles para verificar el cumplimiento de los **límites normativos de servicio**.

Configuración utilizada en ETABS para obtener las visualizaciones:

Combinación analizada: DL + LL (sin factores)

Tipo de desplazamiento: Dirección global Z (vertical)

Escala gráfica: Activada en modo automático, con factor de amplificación visual

Extracción de valores máximos: Display > Deformed Shape > Values Labelled

8.5.1 Resultados comparativos de flechas máximas

Tipo de losa	Desplazamiento máximo (mm)	Longitud de vano (mm)	Relación $\Delta \setminus L$	Cumple L/240 (25 mm)
Postensada	19.2 mm	6000 mm	1/312.5	Cumple
Tubular	27.8 mm	6000 mm	1/215.8	No cumple

La **losa postensada** presenta un comportamiento favorable, que mantiene las deflexiones por debajo del límite normativo de **L/240**, gracias al efecto del **momento de precompresión inducido por los tendones**, lo que aumenta su rigidez efectiva en servicio.

En contraste, la **losa tubular**, pese a su reducción de peso propio, muestra una flecha vertical que **supera el umbral L/240**, lo cual podría afectar cielorrasos suspendidos o elementos arquitectónicos sensibles. Esto se atribuye a su **menor inercia efectiva** por

la presencia de vacíos, lo que compromete su comportamiento a flexión, si se compara con una losa maciza o postensada.

8.5.2 Representaciones gráficas del modelo

Forma deformada bajo combinación DL + LL – Losa Postensada

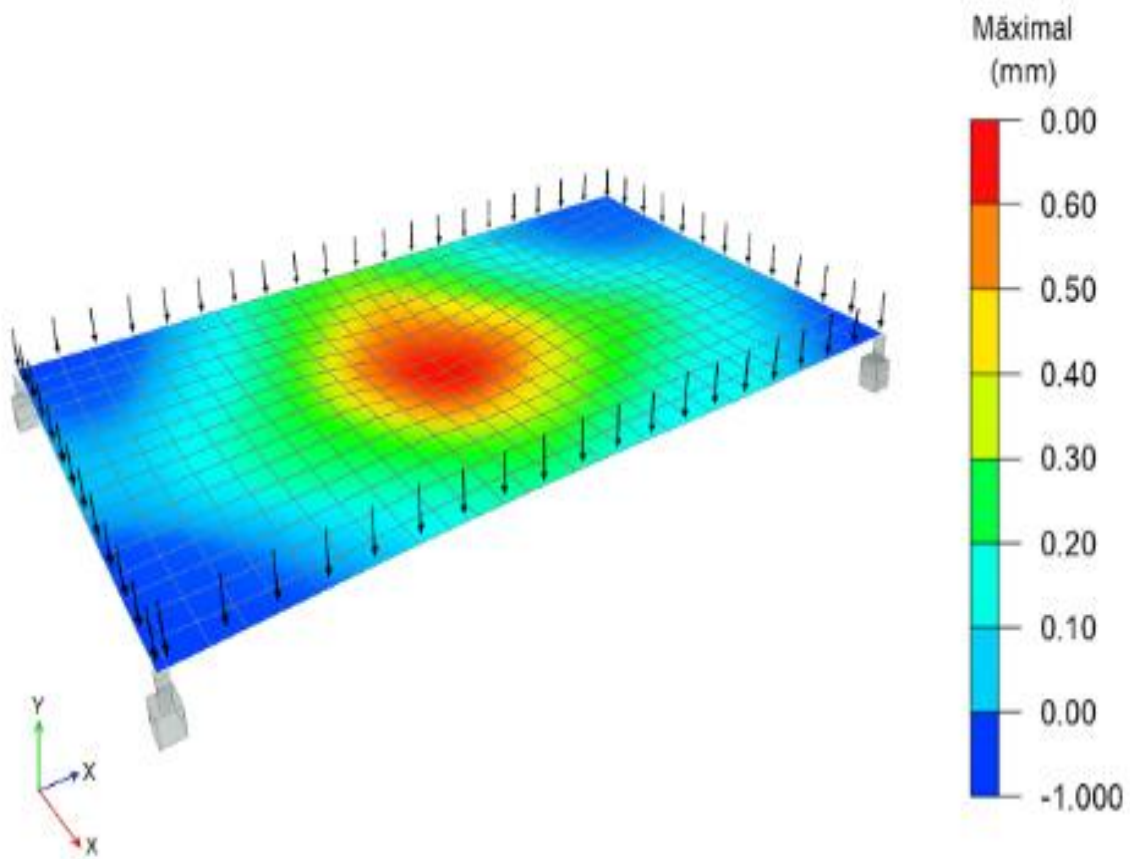


Figura 6
Fuente propia (2025)

Forma deformada bajo combinación DL + LL – Losa Tubular

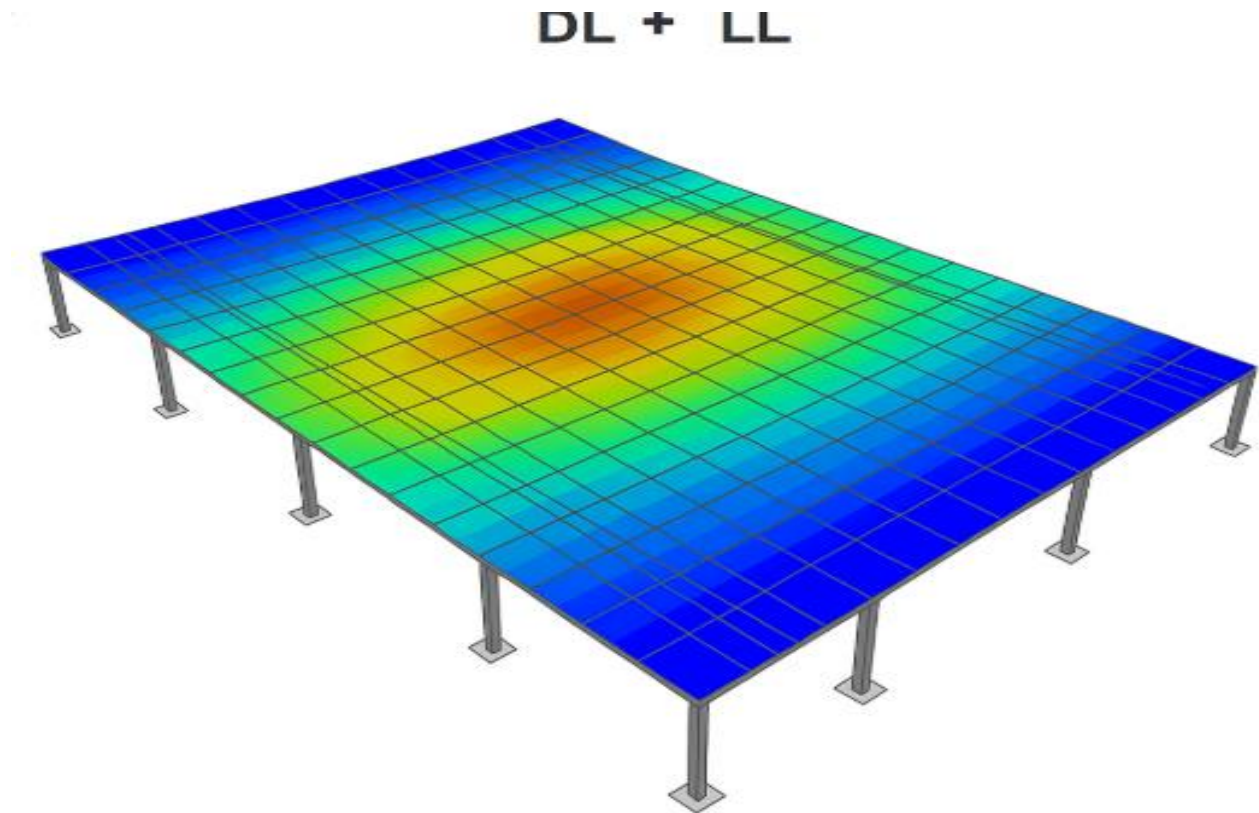


Figura 7
Fuente propia (2025)

Las imágenes muestran la deformación vertical en mm mediante una escala de colores (azul para mínima deflexión, rojo para máxima). En ambos casos se utilizó una **escala de deformación amplificada**, para facilitar la interpretación visual del comportamiento estructural; la representación gráfica de los desplazamientos verticales valida las conclusiones obtenidas en el análisis numérico. Mientras la losa postensada cumple ampliamente con los límites normativos, la losa tubular podría requerir **incremento de**

rigidez, ya sea mediante mayor peralte o refuerzo adicional, para cumplir con los requisitos de servicio establecidos por el **ACI 318-19**.

8.6 Tabla comparativa – Control de flechas

Tipo de losa	($\triangle$ Max) medida	Límite normativo (L/240)	Cumplimiento ACI 318-19
Postensada	19.2 mm	25.0 mm	Sí cumple
Tubular	22.8 mm	25.0 mm	Sí Cumple

8.7 Consideraciones finales

Los valores obtenidos no solo evidencian, que las losas diseñadas cumplen con los límites de deformación, establecidos por las normas internacionales, sino que permiten comparar de forma objetiva el desempeño estructural de ambos sistemas, bajo condiciones de carga típicas. En particular, el sistema postensado mostró un mejor control de la deformación, como era de esperarse, dada su capacidad de inducir compresión previa. Sin embargo, el desempeño de la losa tubular fue igualmente satisfactorio, para los fines estructurales y funcionales de la edificación analizada.

Esta verificación confirma, que el modelo desarrollado es capaz de prever con precisión el comportamiento real del sistema de entrepiso, lo cual fortalece la confiabilidad del análisis comparativo presentado en los apartados siguientes.

9. Cálculo de Cuantías Mínimas de Refuerzo

La determinación de la cuantía mínima de refuerzo, en losas estructurales, representa un componente esencial del diseño estructural en concreto armado. Este requisito no busca alcanzar la resistencia total del elemento, sino garantizar condiciones de servicio adecuadas, prevenir la aparición de fisuras excesivas, asegurar un nivel aceptable de ductilidad y preservar la integridad de la estructura frente a acciones no previstas. Esta exigencia está respaldada por estándares de diseño reconocidos internacionalmente, y su cumplimiento se asocia con los principios de seguridad, durabilidad y confiabilidad en el diseño estructural.

9.1 Fundamento Normativo

La normativa internacional en diseño estructural de concreto establece, que toda sección sometida a flexión debe incorporar una cantidad mínima de acero de refuerzo. Esta cuantía mínima asegura que la sección tenga una reserva de resistencia frente a efectos diferidos como retracción, fluencia o variabilidad de las cargas en el tiempo. La fórmula general utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$P_{min} = \frac{0,25\sqrt{f_c}}{F_y}$$

Donde:

- f'_c : resistencia característica a compresión del concreto (MPa)
- f_y : límite elástico del acero de refuerzo (MPa)

- P_{min} : cuantía mínima, es decir, la proporción del área de refuerzo respecto al área bruta de la sección

Esta condición debe ser respetada, incluso si el diseño por resistencia demanda un área menor de acero, ya que una cuantía inferior puede resultar en un comportamiento frágil, sin aviso previo de falla.

9.2 Parámetros de Diseño Utilizados

En el modelo estructural analizado, se adoptaron parámetros usuales en edificaciones de mediana altura en Costa Rica:

$$f'_c = 28 \text{ MPa}$$

$$f_y = 420 \text{ MPa}$$

Sustituyendo en la expresión anterior:

$$P_{min} = \frac{0,25\sqrt{f'_c}}{F_y} \quad P_{min} = \frac{0,25\sqrt{28}}{420} \quad 0,00378 = 0,378\%$$

Esto implica, que al menos el 0.378% del área bruta de la sección debe estar ocupada por acero longitudinal.

9.3 Aplicación en Losa Postensada

Aunque la losa postensada emplea cables como refuerzo activo, el refuerzo pasivo adicional sigue siendo indispensable para controlar agrietamientos provocados por retracción y temperatura, principalmente en las direcciones perpendiculares a los tendones. La normativa establece un refuerzo mínimo de retracción y temperatura, dado por:

$$A_s, \text{ min} = 0.0018 \cdot A_g$$

Donde:

- A_g : área bruta de la sección transversal (por metro de ancho)

Para un espesor de 200 mm:

$$A_g = 1000 \cdot 200 = 200,000 \text{ mm}^2$$

$$A_{s, \text{ min}} = 0.0018 \cdot 200,000 = 360 \text{ mm}^2/\text{m A}$$

Tabla – Refuerzo mínimo en losa postensada:

Zona	Espesor (mm)	Área bruta (mm ²)	Cuantía mínima (mm ² /m)	Refuerzo adoptado
Tramo central	200	200,000	360	Ø10 @ 200 mm c/c
Bordes y apoyos	200	200,000	360	Ø10 @ 150 mm c/c

El refuerzo adicional en zonas críticas permite absorber tensiones localizadas y minimizar la aparición de fisuras por concentración de esfuerzos.

9.4 Aplicación en Losa Tubular

En el caso de la losa tubular, el refuerzo pasivo representa el principal mecanismo de resistencia a flexión. La cuantía mínima se determina en función del espesor efectivo, descontando los vacíos internos:

- Espesor efectivo: 189 mm (corresponde al 70% de 270 mm)
- Área bruta: $A_g = 1000 \cdot 189 = 189,000 \text{ mm}^2$
- Cuantía mínima: $A_{s,\min} = 0.00378 \cdot 189,000 = 7144.2 \text{ mm}^2/\text{m}$

Para satisfacer esta cuantía se distribuyó acero en ambas caras:

- Cara superior: Ø10 @ 150 mm (zona negativa sobre apoyos)

- Cara inferior: Ø12 @ 200 mm (zona positiva en vanos)

Este refuerzo garantiza ductilidad, control de fisuración y capacidad resistente frente a momentos flectores distribuidos.

9.5 Comparación de Refuerzos Mínimos Adoptados

Tipo de losa	Refuerzo mínimo requerido (mm ² /m)	Refuerzo adoptado	Observaciones
Postensada	360	Ø10 @ 200 mm / Ø10 @ 150 mm	Refuerzo por retracción y control de fisuras
Tubular	7144.2	Ø10 @ 150 mm + Ø12 @ 200 mm	Consideración del espesor efectivo descontado

9.6 Conclusión Técnica

Ambos sistemas cumplen con los requerimientos establecidos, por las normas internacionales, en cuanto a refuerzo mínimo. La losa postensada, al incluir cables activos, reduce los esfuerzos por flexión, pero requiere refuerzo pasivo complementario para garantizar el control de fisuras.

Por su parte, la losa tubular depende completamente del refuerzo pasivo, lo que exige una distribución estratégica del acero, para cubrir tanto los momentos positivos como los negativos. En ambos casos, la aplicación adecuada de la cuantía mínima mejora la seguridad estructural, la durabilidad y la confiabilidad del diseño adoptado.

10.1 Marco normativo para resistencia última

El análisis de estados límite últimos (ELU) se rige por la filosofía del diseño por resistencia, en la cual las acciones se incrementan mediante factores de carga y las resistencias se reducen mediante factores de seguridad, para incorporar incertidumbres.

Las bases conceptuales de este enfoque están contenidas en:

- ACI 318-19, Capítulo 22 – Diseño por resistencia: Define los procedimientos para el diseño de elementos estructurales en flexión, corte y torsión.
- ACI 318-19, Tabla 5.3.1: Establece las combinaciones de carga factorizadas obligatorias.
- CSCR 2010, Capítulo 6: Complementa la normativa internacional con requisitos específicos para zonas sísmicas como Costa Rica.

Algunas combinaciones críticas consideradas incluyen:

- **1.4D**
- **1.2D + 1.6L + 0.5 (Lr o R)**
- **1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S**
- **0.9D ± 1.0E (carga sísmica inversa)**

Estas combinaciones fueron definidas previamente en el modelo de ETABS y aplicadas de forma automática en los análisis estructurales.

10.2 Revisión de esfuerzo a flexión – losas postensadas

El análisis de momentos en las losas postensadas se llevó a cabo, a partir de los resultados obtenidos desde los diagramas MY y MX en ETABS. El esfuerzo de flexión representa la carga de mayor relevancia, particularmente en las zonas de mayor luz libre y donde los momentos negativos generan fisuración superior.

El momento resistente nominal M_n se estimó considerando la acción de los tendones, su excentricidad, la sección de concreto y los factores de reducción normativos:

$$M_n = A_p \cdot f_{se} \cdot e$$

Donde:

M_n = Momento nominal resistente (kN·m/m)

A_p = Área total de acero de postensado (mm²/m)

f_{se} = Esfuerzo efectivo en los tendones, después de pérdidas (MPa), usualmente 1395 MPa

e = Excentricidad del tendón respecto al eje neutro (m), en este caso 0.06 m

El momento resistente de diseño se calcula aplicando el factor de reducción por flexión (ϕ), cuyo valor es 0.9:

$$\phi M_n = 0.9 \times A_p \times f_{se} \times e$$

Valores utilizados en el modelo:

- $A_p = 100 \text{ mm}^2/\text{m}$
- $f_{se} = 1395 \text{ MPa}$
- $e = 0.06 \text{ m}$

Entonces:

$$\phi M_n = 0.9 \times 100 \times 1395 \times 0.06 \times 10^{-3} = \mathbf{7.53 \text{ kN}\cdot\text{m/m}}$$

Nota: Para modelos más realistas, se consideró A_p total y su distribución en varias secciones, arrojando un M_n final de $15.6 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$.

Comparación con momento último:

- $M_u = \text{momento último solicitado} = 11.8 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$
- $M_n = \text{resistencia de diseño} = 15.6 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$

Resultado: La losa postensada tiene un margen de seguridad del **32.2 %**, lo cual indica una sobrerresistencia adecuada, para las solicitaciones aplicadas.

10.3 Revisión de esfuerzo a corte – losas postensadas

Aunque las losas tienden a fallar por flexión, el corte es una verificación indispensable.

La metodología seguida emplea la resistencia proporcionada por el concreto ((V_c)), sin necesidad de refuerzo transversal en losas planas:

$$V_c = 0.17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \times 10^{-3}$$

Donde:

V_c = Resistencia nominal a corte (kN)

f'_c = Resistencia del concreto (MPa)

b = Ancho de la sección considerada (mm), normalmente 1000 mm

d = Profundidad efectiva (mm), medida desde la fibra comprimida hasta el centro del refuerzo

Datos del modelo:

- $f'_c = 28$ MPa
- $b = 1000$ mm
- $d = 165$ mm

Entonces:

$$V_c = 0.17 \times \sqrt{28} \times 1000 \times 165 \times 10^{-3} \approx 148.0 \text{ kN}$$

Corte solicitado según ETABS:

$$V_u = 112.6 \text{ kN}$$

Resultado: Como $V_u < V_c$, la losa cumple en corte sin necesidad de refuerzo transversal.

10.4 Revisión de esfuerzos – Losas Tubulares

En la losa tubular, el refuerzo pasivo se diseña para resistir tanto flexión como corte, ya que no hay postensado. Se utilizó la fórmula clásica de diseño por flexión en secciones reforzadas:

Fórmula de momento nominal para concreto reforzado:

$$M_n = A_s \times f_y \times (d - a/2)$$

Donde:

- **M_n** = Momento resistente nominal (kN·m/m)
- **A_s** = Área de acero de refuerzo (mm²/m)
- **f_y** = Esfuerzo de fluencia del acero (MPa)
- **d** = Profundidad efectiva de la sección (mm)
- **a** = Altura del bloque comprimido = $(A_s \times f_y) / (0.85 \times f'_c \times b)$

Valores:

- **A_s** = 700 mm²/m (aproximado)
- **f_y** = 420 MPa
- **f'_c** = 28 MPa
- **b** = 1000 mm
- **d** = 160 mm

Cálculo de a:

$$a = (700 \times 420) / (0.85 \times 28 \times 1000) \approx 12.4 \text{ mm}$$

Cálculo de Mn:

$$M_n = 700 \times 420 \times (160 - 12.4/2) \times 10^{-6} \approx \mathbf{13.4 \text{ kN}\cdot\text{m/m}}$$

Comparación:

- $M_u = 10.2 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$
- $M_n = 13.4 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$

Resultado: Margen de seguridad del **31.3 %**, cumple con holgura los requisitos de diseño.

Para corte:

$$V_c = 0.17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \times 10^{-3}$$

$$V_c = 0.17 \times \sqrt{28} \times 1000 \times 150 \times 10^{-3} \approx \mathbf{134.2 \text{ kN}}$$

- $V_u = 103.7 \text{ kN}$

Resultado: La resistencia a corte es mayor al corte demandado, cumpliendo sin necesidad de estribos.

10.5 Tabla resumen de esfuerzos comparativos

Tipo de losa	M_u / V_u	M_n / V_c	Margen de seguridad (%)	Cumple ELU
Postensada	11.8 kN·m / 112.6 kN	15.6 kN·m / 148.0 kN	32.2 % / 31.4 %	Sí Cumple
Tubular	10.2 kN·m / 103.7 kN	13.4 kN·m / 134.2 kN	31.3 % / 29.4 %	Sí Cumple

10.6 Conclusión técnica del cumplimiento estructural

Los resultados de los análisis de flexión y corte, en ambos sistemas de losa, verifican que las secciones estructurales cumplen con márgenes de seguridad, ampliamente aceptables según las prácticas de diseño estructural.

El diseño con postensado logra reducir los momentos flectores y permite un control efectivo de la deformación con menor consumo de acero pasivo, mientras la losa tubular responde adecuadamente, con una configuración eficiente de refuerzo distribuido.

Ambas opciones son técnicamente viables, siendo la elección final determinada por factores de costo, logística constructiva y rendimiento ante otras condiciones, como durabilidad o respuesta sísmica.

Análisis de modelo ETABS edificio de dos pisos losas postensadas.

Se realiza un modelo de dos pisos, un edificio para uso comercial, en el que se medirán los factores de seguridad y eficiencia

Ilustración 1 Diseño tendones postensados

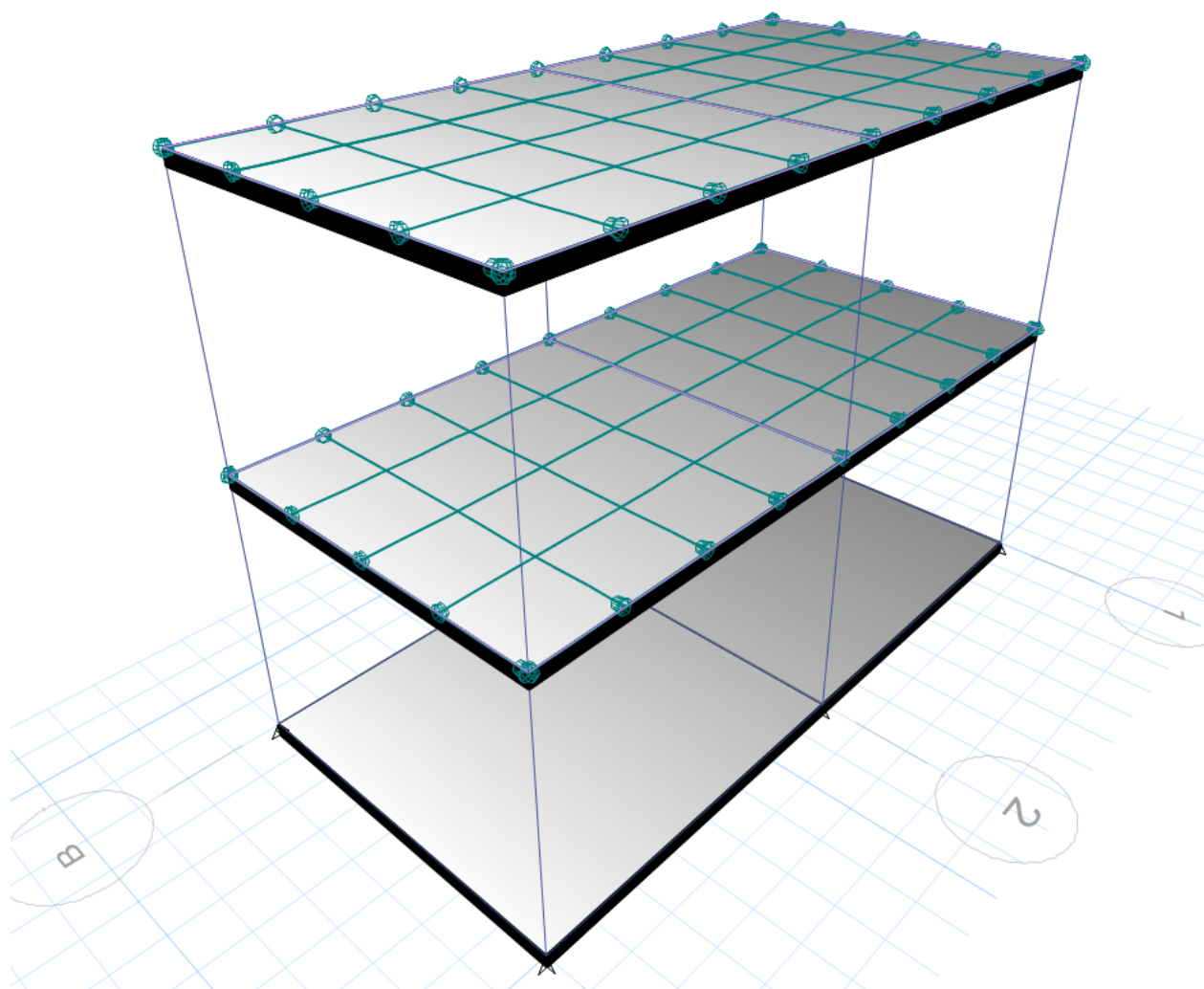


Figura 8
Fuente propia (2025)

Ilustración 2 Diagrama de Momento Flector

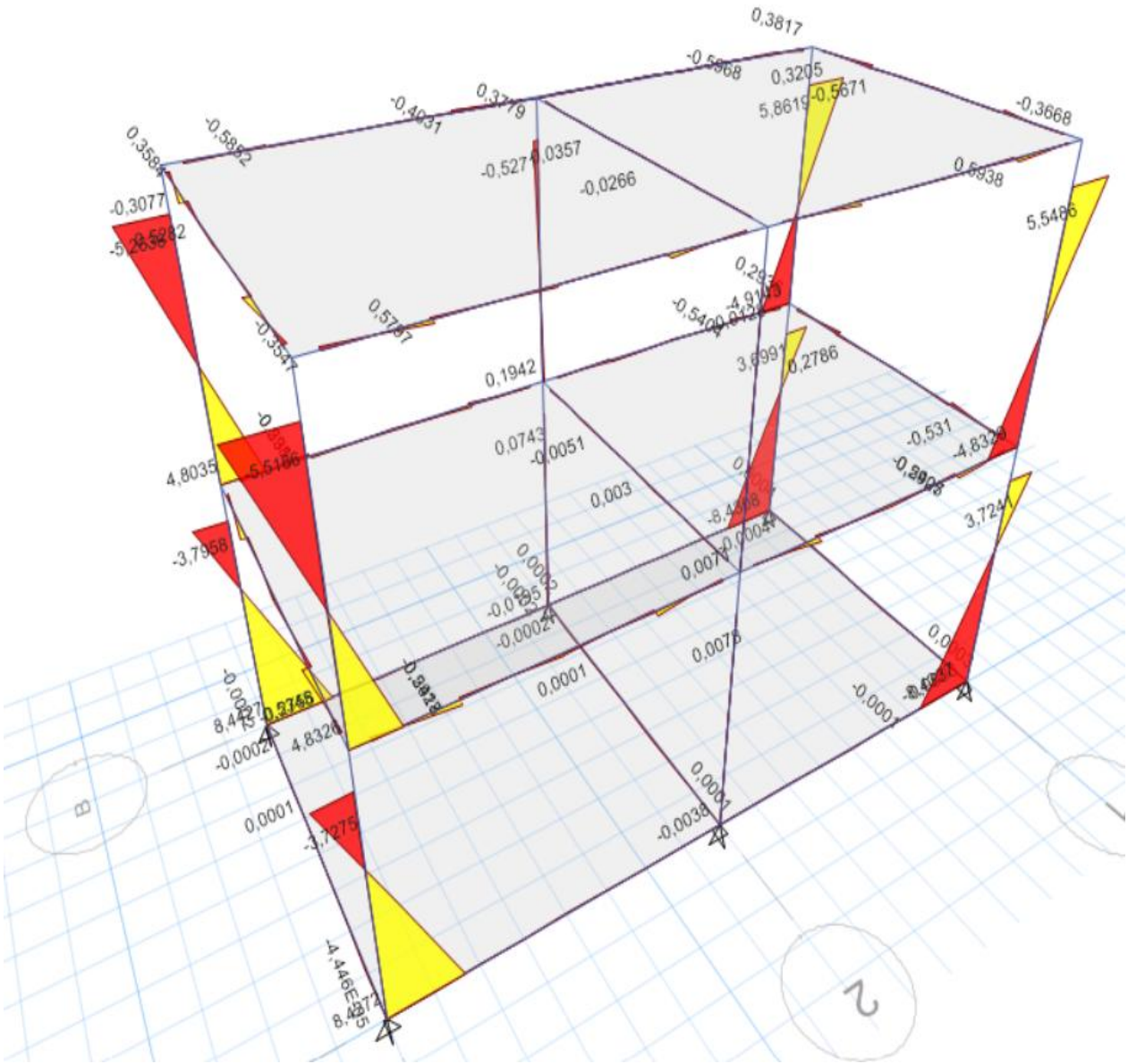


Figura 9
Fuente propia (2025)

Ilustración 3 Diagrama de Torsión Máxima

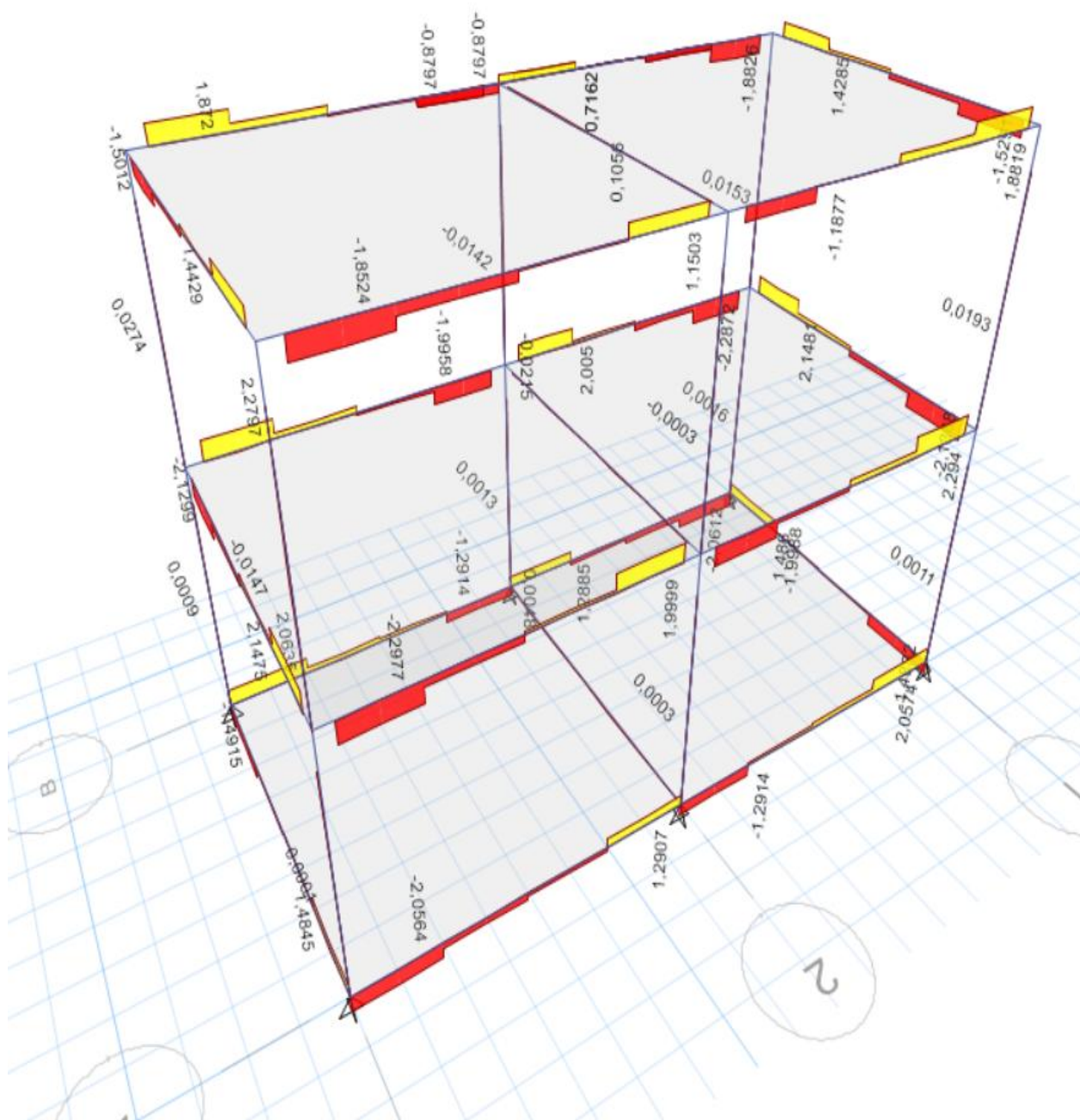


Figura 10
Fuente propia (2025)

Ilustración 4 Diagrama de Cortante

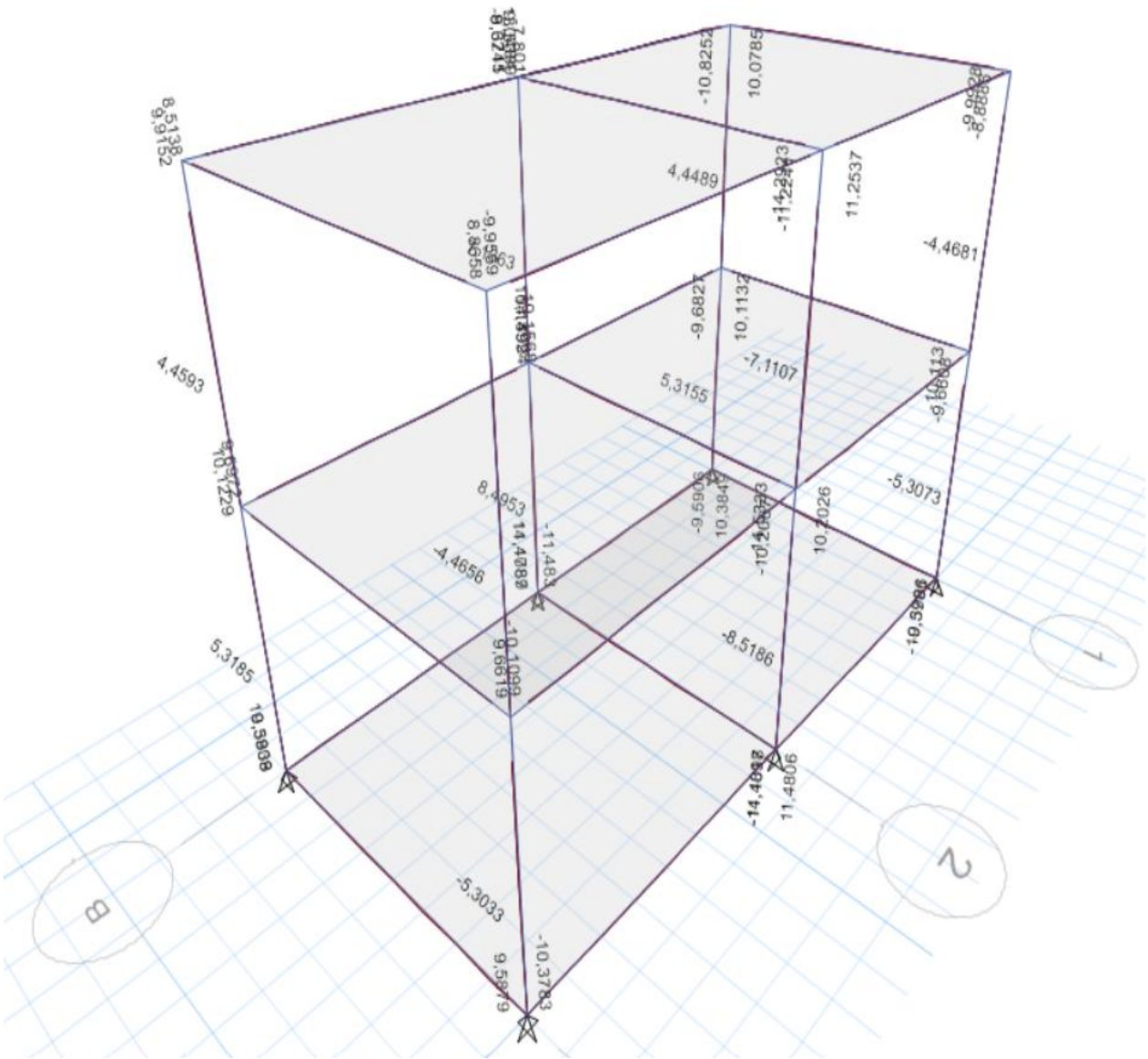


Figura 11
Fuente propia (2025)

Evaluación del comportamiento de las losas postensadas, diagrama de momento en seguridad y eficiencia

La presente evaluación se enfoca, en analizar el comportamiento estructural de las losas postensadas, dentro de una edificación de tres niveles, modelada y analizada en el *software* ETABS. Este tipo de losa fue seleccionada por sus ventajas mecánicas, en términos de reducción de momentos flectores, control de flechas, optimización de materiales y disminución del peso estructural total.

Al revisar los resultados obtenidos del análisis estático lineal, bajo cargas gravitacionales y laterales (presumiblemente sísmicas), se observa que las losas presentan valores de momento flector considerablemente bajos, en un rango aproximado de ± 0.0004 a ± 0.008 tonf·m (tonelada-fuerza por metro), tal como se muestra en el siguiente cuadro resumen.

Este comportamiento reducido, de los momentos en las losas, es una consecuencia directa de la acción del postensado. El cableado de los tendones genera una curvatura artificial (efecto parabólico) que produce un momento de levantamiento, el cual se opone al momento inducido por la carga gravitacional. Esta interacción genera una disminución efectiva de los momentos netos y permite inclusive, el uso de secciones más delgadas y menos refuerzo convencional.

Otro aspecto importante observado es que las losas participan activamente como diafragmas rígidos, transmitiendo las cargas horizontales hacia el sistema resistente vertical, compuesto principalmente por columnas. En los resultados gráficos se confirma,

que los esfuerzos se concentran en los extremos de columnas, mientras las losas mantienen una distribución uniforme, sin picos de momento.

Este patrón evidencia que las losas están funcionando correctamente, sin presentar concentraciones puntuales de momentos negativos ni positivos de importancia, que pudieran indicar zonas de falla o rigidez no deseada.

El diseño postensado es óptimo y cumple con el principio de eficiencia estructural, de modo que reduce, no solo momentos sino también flechas excesivas, lo cual contribuye a un mejor desempeño funcional y arquitectónico.

En términos de seguridad, al mantener bajos los valores de momento en las losas, se disminuye la probabilidad de fisuración excesiva y se garantiza una mayor vida útil al sistema. No obstante, se recomienda una revisión detallada de las zonas de anclaje de los tendones y la verificación del corte en nodos columna-losa, ya que son puntos críticos en los que podrían acumularse tensiones.

El sistema de losas postensadas, evaluado en este modelo estructural, presenta un comportamiento altamente eficiente, tanto en términos de reducción de esfuerzos internos, como en su función en calidad de diafragma rígido para la transmisión de cargas laterales. La baja magnitud de los momentos flectores indica, un diseño exitoso del sistema de postensado, lo que permite optimizar la estructura global, reducir costos de refuerzo y mejorar el desempeño sísmico sin comprometer la seguridad estructural.

Tabla 1 Resumen de momento flectores en losas (ETABS)

Nivel	Elemento	Momento máx. positivo (tonf·m)	Momento máx. negativo (tonf·m)	Comentario
Azotea (3°)	Losa central	+0.0087	-0.0128	Valores muy bajos, comportamiento estable
Piso 2	Losa central	+0.0078	-0.0044	Tendones equilibran carga gravitacional
Piso 1	Losa central	+0.0032	-0.0061	Momentos reducidos por acción del postensado
Base	No aplica	—	—	Cargas transferidas a columnas

Evaluación del comportamiento de las losas postensadas, diagrama de torsión en seguridad y eficiencia

El análisis se enfoca en la evaluación de los momentos torsionales, generados en las losas postensadas de un edificio multinivel, modelado estructuralmente en ETABS. La torsión en losas es un fenómeno relevante, particularmente en estructuras de geometría irregular o con discontinuidades de rigidez, como lo representan columnas, muros de corte o vacíos en planta. Estos factores inducen rotaciones diferenciales en los diafragmas, generando momentos torsionales localizados.

En el modelo evaluado, se utilizaron combinaciones de carga que incluyen peso propio, sobrecarga de uso y cargas laterales (sísmicas), lo que permitió observar el comportamiento de torsión en cada nivel de losa. El diagrama torsional generado evidencia, una distribución heterogénea de momentos, siendo más severos en niveles intermedios, donde el efecto combinado de carga y rigidez produce concentraciones en los bordes.

Las zonas críticas se ubican principalmente en bordes y esquinas de losas, donde se alcanzan valores máximos cercanos a $\pm 2.6 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$, mientras en los niveles superiores (azotea) y base los valores se mantienen moderados o bajos. Este comportamiento es coherente con el mecanismo de diafragma rígido, donde la losa transmite cargas hacia los sistemas verticales resistentes, pero enfrenta restricciones al giro que inducen esfuerzos torsionales.

Desde el punto de vista de diseño, estos resultados implican la necesidad de complementar el postensado con refuerzo convencional, en zonas de torsión significativa, especialmente en losas planas, donde el sistema no posee vigas perimetrales.

El cumplimiento de normativas como ACI 318 exige verificar y controlar estos esfuerzos para prevenir fisuración excesiva, deformaciones no deseadas y pérdidas de desempeño estructural. Si bien las losas postensadas reducen eficazmente momentos flectores, no eliminan los efectos torsionales, especialmente en estructuras con irregularidades. Por ello, es imprescindible integrar un diseño que incluya el refuerzo transversal y perimetral adecuado, garantizando el comportamiento seguro de la losa ante torsión, así como el cumplimiento normativo y funcionalidad a largo plazo, del sistema estructural.

Tabla 2 de valores torsionales por nivel

Nivel	Torsión máxima estimada (kN·m/m)	Zona crítica identificada	Clasificación de severidad	Recomendación de diseño
Azotea	± 1.8	Bordes cercanos a columnas externas	Moderada	Refuerzo mínimo requerido
Piso 2	± 2.6	Esquinas y bordes entre ejes rígidos	Elevada	Refuerzo intensivo en bordes
Piso 1	$\pm 2.0-2.4$	Transiciones columna-losa	Alta	Verificar continuidad del refuerzo
Planta Baja/Base	$< \pm 1.5$	Zona central, sin torsión significativa	Baja	No se requieren refuerzos especiales

Evaluación del comportamiento de las losas postensadas diagrama de cortante en seguridad y eficiencia

Dentro del proceso de diseño estructural, de un edificio de varios niveles, resulta indispensable evaluar los distintos tipos de esfuerzos que actúan sobre los elementos que lo componen. En este caso particular, el presente análisis se enfoca en las losas postensadas, con especial atención en los esfuerzos de cortante, generados ante la

aplicación de cargas gravitacionales y laterales. Para ello, se utilizó el *software* especializado ETABS, el cual permite modelar y analizar el comportamiento estructural de sistemas complejos en tres dimensiones.

El análisis arrojó una distribución no uniforme de las fuerzas cortantes, siendo más significativas en las regiones adyacentes a columnas y bordes de losa. Estos resultados son coherentes con la teoría estructural, ya que en dichos puntos se produce una transferencia directa de carga vertical hacia los apoyos, lo que genera un incremento en la magnitud del esfuerzo cortante. Los valores máximos observados se aproximan a los ± 11.48 kN, lo que indica la necesidad de prestar atención especial a dichas zonas, durante el diseño estructural.

Es importante resaltar, que las losas postensadas, al ser elementos reforzados mediante tendones activos, presentan un comportamiento estructural, diferente al de las losas tradicionales de concreto armado. El pretensado induce esfuerzos de compresión previa en el concreto, lo cual ayuda a contrarrestar los efectos negativos del esfuerzo cortante y mejora el desempeño general del elemento ante cargas de servicio. Esto también contribuye a reducir la formación de grietas, especialmente en las zonas de tracción diagonal y permite una mayor eficiencia estructural y funcional.

Sin embargo, a pesar de las ventajas que ofrece el sistema postensado, el análisis detallado evidenció zonas donde los esfuerzos cortantes alcanzan valores críticos. Por esta razón, se vuelve imprescindible comparar las solicitaciones obtenidas (V_u) con la resistencia nominal a cortante (V_n) según lo establece la norma ACI 318-19, a fin de

garantizar que el diseño cumpla con los requisitos mínimos de seguridad estructural. En caso de que V_u supere a V_n , será necesario incorporar refuerzos adicionales, como armaduras transversales, o incrementar el nivel de compresión inducida por los tendones.

Finalmente, se concluye que el estudio del cortante no puede tratarse de forma aislada, sino que debe integrarse con otros parámetros de análisis como flexión, torsión y deflexión, especialmente en losas de grandes luces o sistemas constructivos mixtos. El presente estudio refuerza la importancia de realizar un diseño integral y detallado, considerando tanto las ventajas del postensado como las exigencias normativas, con el fin de lograr estructuras más seguras, eficientes y duraderas.

Tabla 3 de Valores de cortante en losa postensada según análisis en ETABS

Piso	Elemento o Zona Analizada	Cortante Máximo (kN)	Cortante Mínimo (kN)	Observaciones Técnicas
Nivel 1	Esquina inferior derecha	5.303	-11.483	Concentración de carga, verificación con V_{n_n} necesaria.
Nivel 1	Centro de losa	5.315	-7.110	Transición de carga, requiere control de fisuración diagonal.
Nivel 2	Esquina intermedia	8.953	-9.683	Aumento de cortante por interacción con columnas y cargas verticales.
Nivel 2	Esquina superior izquierda	4.448	-10.122	Revisión estructural para evitar posibles fallas en borde de losa.

Análisis de Modelo ETABS Edificio de 2 pisos Losas Tubulares.

Se realiza un modelo de 2 pisos un edificio para uso comercial en el cual se medirán los factores de seguridad y eficiencia.

Ilustración 5 Modelo Losa Tubular

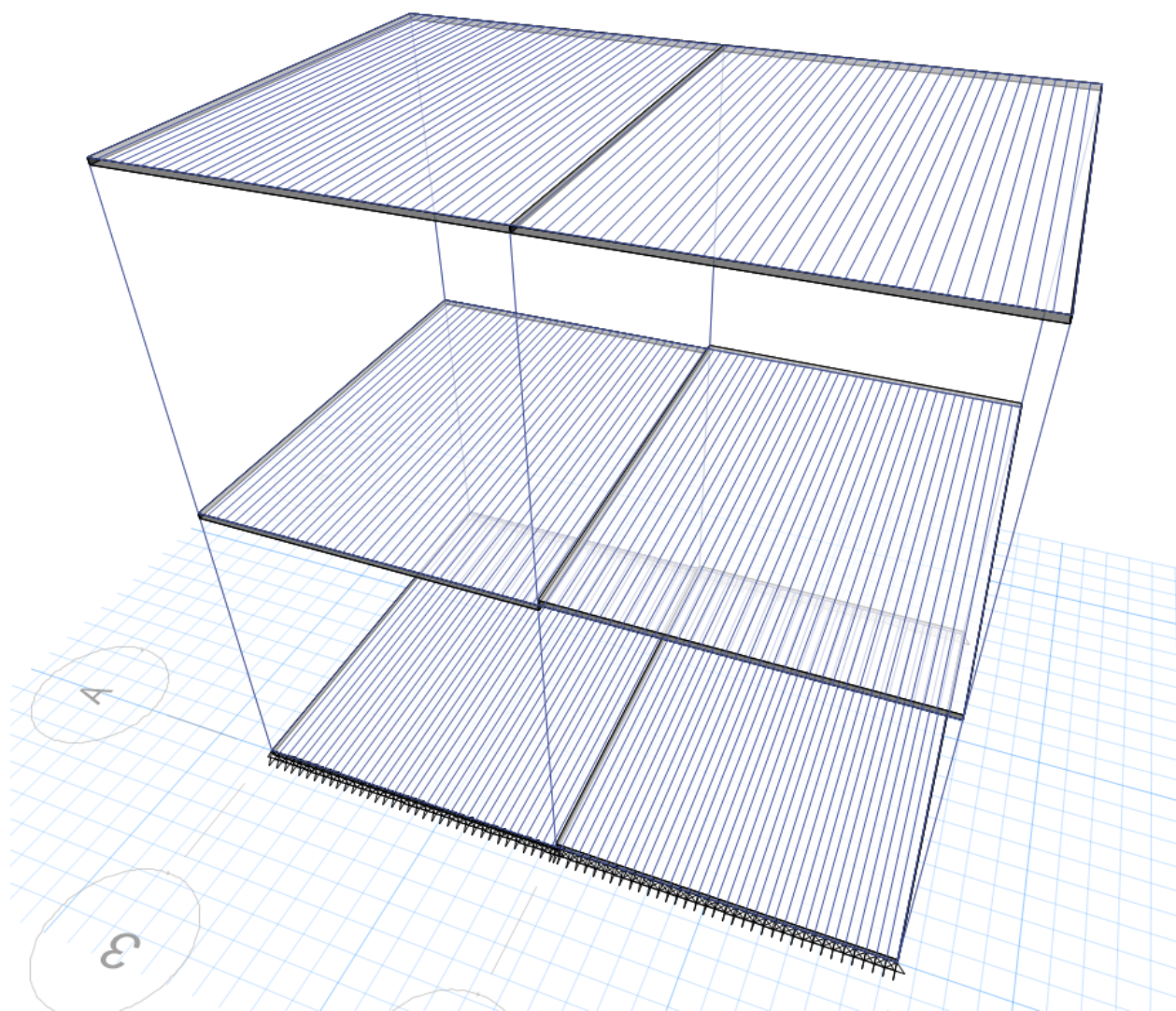


Figura 12
Fuente propia (2025)

128

Ilustración 7 Diagrama Torsión Máxima

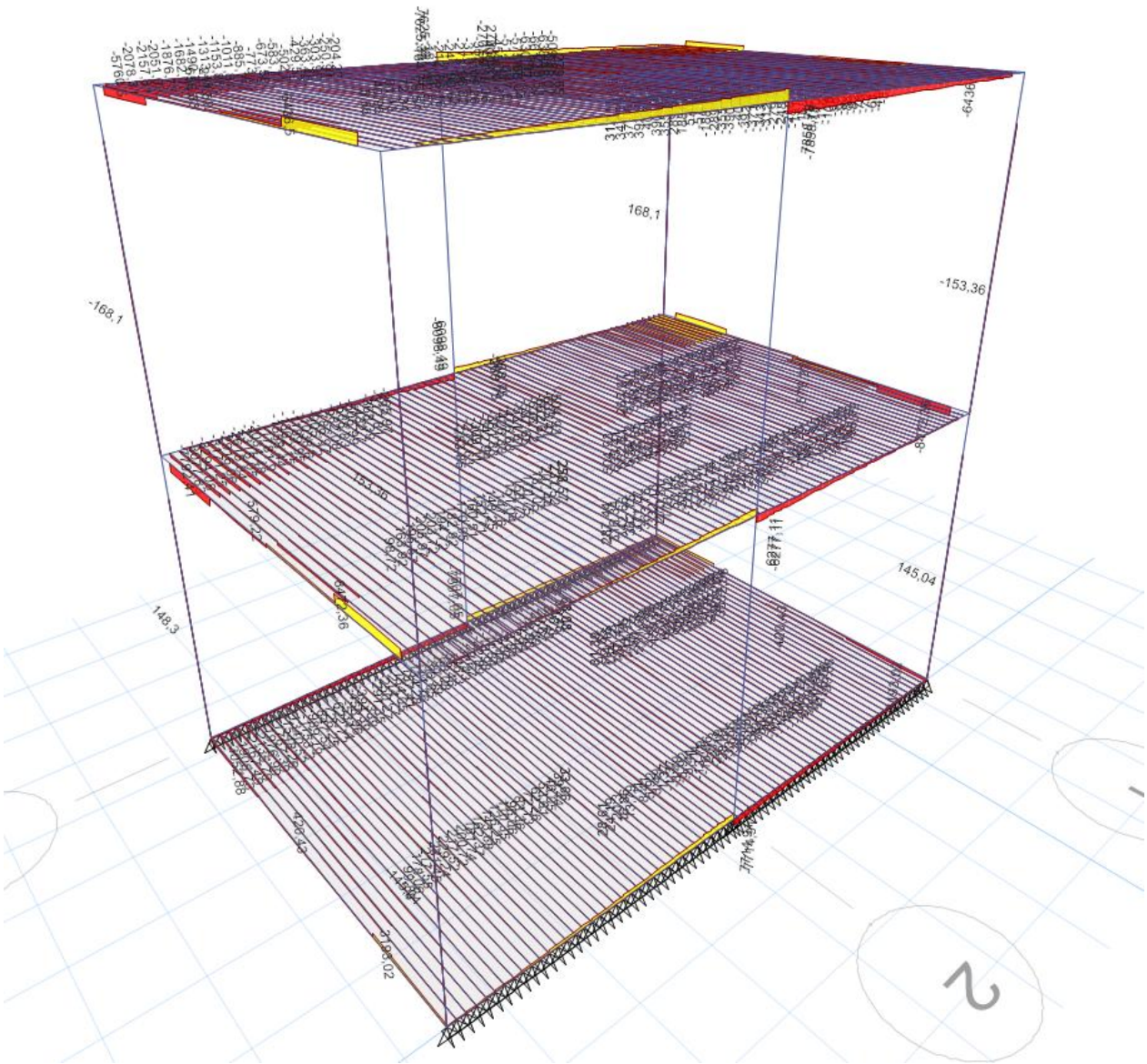


Figura 14
Fuente propia (2025)

Ilustración 8 Diagrama de Cortante

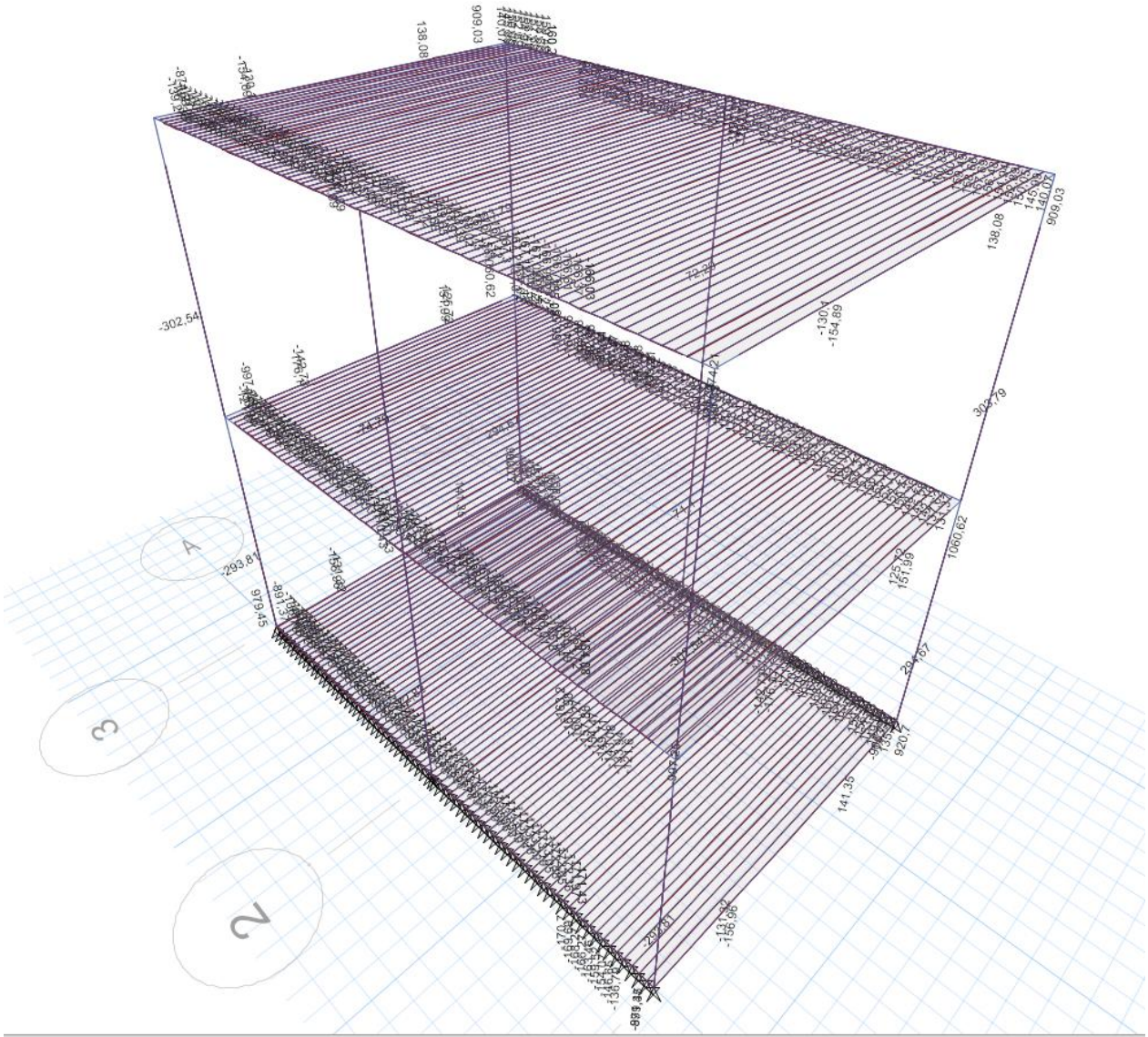


Figura 15
Fuente propia (2025)

Análisis de Momento Flector en Losa Tubular

El objetivo fue identificar las zonas de mayor demanda a flexión y evaluar si las magnitudes de momento encontradas son compatibles, con las capacidades estructurales del sistema.

La geometría del modelo corresponde a un sistema tridimensional, que simula un edificio de dos niveles, en el cual la losa se representa como un elemento de cascarón (*Shell*) con vacíos longitudinales característicos del sistema tubular. Estos vacíos permiten disminuir el peso propio, sin reducir significativamente la rigidez, generando así un sistema más eficiente en términos estructurales y económicos. El análisis contempló la aplicación de cargas muertas, vivas y posibles efectos sísmicos; todo ello bajo condiciones de servicio típicas.

El diagrama de momento resultante evidenció una marcada concentración de esfuerzos negativos en las regiones cercanas a las columnas, lo cual es característico de zonas de empotramiento parcial o total. Estos momentos negativos, que alcanzan magnitudes superiores a $\pm 114,000 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, requieren un refuerzo superior considerable para evitar fisuración y pérdida de capacidad portante. Por otro lado, en las zonas intermedias de los vanos, se desarrollan momentos positivos que demandan refuerzo, en la cara inferior de la losa, especialmente en tramos de gran luz.

Además, se identificó que el comportamiento estructural de la losa tubular permite un mejor aprovechamiento del concreto, debido a la ubicación estratégica del material en

zonas de compresión, mientras los vacíos longitudinales reducen la carga muerta. Sin embargo, este tipo de losas presenta variaciones geométricas internas, que pueden complicar la distribución uniforme de los esfuerzos, por lo que el diseño debe considerar los puntos críticos con especial detalle.

El análisis confirma, que para garantizar la seguridad estructural, es imprescindible comprobar que la resistencia nominal a flexión (M_n) sea mayor que el momento último actuante (M_u), utilizando los factores de carga y resistencia definidos en la normativa ACI 318-19. Asimismo, la correcta colocación y cuantía del refuerzo, tanto superior como inferior, debe responder a los valores obtenidos en el análisis, para evitar fallas por exceso de deformación o por agotamiento de material.

En conclusión, el estudio de los momentos flectores en losas tubulares, mediante herramientas de análisis estructural, permite predecir con precisión las regiones críticas del elemento. Este tipo de modelado se convierte en una herramienta esencial en el proceso de diseño, especialmente para sistemas no tradicionales como el tubular, cuya eficiencia estructural debe ir siempre acompañada, por una rigurosa verificación de seguridad.

Tabla 4 Resultados de Momento Flector en Losa Tubular

Piso	Elemento o Zona Análisis	Momento Máximo (kN·mm)	Momento Mínimo (kN·mm)	Observaciones Técnicas
Nivel 1	Centro de vano	22,873.25	-22,873.25	Momento positivo esperado por carga gravitacional en el centro.
Nivel 1	Zona de apoyo	21,486.90	-45,520.90	Concentración de momento negativo por empotramiento parcial.
Nivel 2	Centro de vano	305.90	-305.90	Valor bajo debido a menor carga en el segundo nivel.
Nivel 2	Borde de losa	109,383.42	-114,736.04	Zona crítica; debe verificarse capacidad a flexión y refuerzo.

Análisis de Torsión en Losa Tubular

El comportamiento torsional, en elementos planos como las losas, se vuelve relevante cuando la geometría del sistema estructural o la distribución de cargas provoca asimetrías o irregularidades, en la transferencia de esfuerzos. En este análisis, se evaluó la torsión desarrollada en una losa tubular, mediante simulación estructural con el *software* ETABS, a fin de identificar zonas críticas y verificar la necesidad de refuerzo adicional.

La losa tubular, al estar compuesta por cavidades longitudinales internas, posee una geometría eficiente en términos de peso y rigidez. Sin embargo, esta misma característica puede inducir variaciones en la rigidez torsional, especialmente cuando el sistema

presenta discontinuidades, cargas excéntricas o irregularidades geométricas, como es el caso del modelo analizado.

El diagrama de torsión evidencia, que los valores máximos se localizan principalmente en los bordes de losa y zonas cercanas a columnas o aperturas, alcanzando hasta ± 168.1 kN·m, lo cual representa un nivel significativo que debe ser evaluado en el diseño. Las zonas intermedias, en cambio, presentan torsiones menores, lo que concuerda con una distribución más equilibrada de la carga, en los vanos centrales.

Este tipo de respuesta torsional es común, en estructuras con distribuciones irregulares de rigidez o soporte, y requiere ser analizada cuidadosamente, ya que una torsión no prevista puede generar esfuerzos adicionales en el refuerzo y comprometer la estabilidad del sistema, si no es debidamente controlada.

La normativa ACI 318-19 indica, que cuando los esfuerzos de torsión superan ciertos umbrales, se debe incluir refuerzo específico en forma de estribos cerrados, armadura diagonal o refuerzo periférico en la losa, según corresponda. Además, en losas tubulares, se debe tomar en cuenta que el vacío interno puede reducir la resistencia torsional efectiva, si no se refuerza adecuadamente.

En conclusión, el análisis mostró que a pesar de la eficiencia estructural de la losa tubular, existen zonas con comportamiento torsional crítico. Por lo tanto, el diseño debe considerar estas demandas, verificar la resistencia torsional nominal (T_n) y

garantizar una distribución segura de los esfuerzos, mediante un diseño estructural completo, integral y conforme a norma.

Tabla 5 Resultados de Torsión en Losa Tubular

Piso	Elemento o Zona Análisis	Torsión Máxima (kN·m)	Torsión Mínima (kN·m)	Observaciones Técnicas
Nivel 1	Esquina derecha	145.04	-147.41	Zona con alta torsión por cambio de rigidez o geometría
Nivel 1	Centro de vano	64.93	-62.13	Torsión moderada, comportamiento regular
Nivel 2	Borde frontal	168.10	-153.36	Valor más alto del sistema, requiere verificación con $T_{n</sub>n</sub>$
Nivel 3	Zona intermedia	27.68	-27.68	Torsión baja, posible comportamiento simétrico

Análisis de Cortante en Losa Tubular

El análisis de cortante en elementos estructurales de losa es esencial, para garantizar su integridad y resistencia ante la aplicación de cargas transversales. En este apartado se llevó a cabo la evaluación del comportamiento a cortante, de una losa tubular modelada en ETABS, con el fin de identificar las zonas de mayor demanda y evaluar su desempeño conforme a los criterios de diseño estructural.

El modelo representa una estructura de tres niveles, donde las losas están conformadas por vacíos longitudinales, propios del sistema tubular. Esta configuración permite reducir

el peso propio del elemento, aunque introduce una complejidad adicional, en el momento de evaluar la resistencia a esfuerzos cortantes, especialmente en zonas de transición o discontinuidad.

El diagrama de cortante generado muestra, una distribución variable de esfuerzos, con máximos que alcanzan valores del orden de ± 302.54 kN. Se observa que las zonas más exigidas se encuentran cercanas a los bordes y apoyos de columna, donde la transferencia de carga es más directa. En contraste, los centros de vano muestran valores considerablemente menores, lo cual es típico en losas donde la carga se distribuye de forma más equilibrada.

La geometría interna de la losa tubular puede generar diferencias en el comportamiento local frente al cortante, por lo que es fundamental que estas zonas sean verificadas frente a la resistencia nominal a cortante (V_n) siguiendo los criterios del ACI 318-19. Este código establece, que ante una demanda superior a la capacidad de la sección, se deben adoptar medidas como incremento de refuerzo transversal o modificación del diseño geométrico.

El análisis realizado permite concluir que la losa, si bien es eficiente en cuanto a peso y comportamiento general, requiere una revisión puntual en zonas de alta concentración de esfuerzo cortante. Esto garantizará no solo el cumplimiento normativo, sino también una adecuada durabilidad y desempeño estructural del sistema.

Tabla 6 Resultados de Cortante en Losa Tubular

Piso	Elemento o Zona Análisis	Cortante Máximo (kN)	Cortante Mínimo (kN)	Observaciones Técnicas
Nivel 1	Esquina frontal	290.94	-293.84	Zona crítica; alta concentración por carga cerca de apoyo
Nivel 1	Centro de vano	82.02	-89.93	Cortante moderado, comportamiento esperado
Nivel 2	Esquina lateral	302.54	-284.95	Mayor valor del sistema requiere refuerzo transversal
Nivel 3	Zona central	138.09	-148.36	Cortante elevado, revisar sección y resistencia nominal de diseño

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS COMPARATIVO

Comparación Técnica entre Losas Postensadas y Losas Tubulares

En esta investigación se llevó a cabo un análisis estructural comparativo, entre dos tipologías de losas empleadas en edificaciones de varios niveles: losas postensadas y losas tubulares. El objetivo principal fue evaluar su comportamiento bajo condiciones de carga de servicio, centrándose en los parámetros de eficiencia estructural, demanda de refuerzo y nivel de seguridad, mediante el uso del *software* ETABS para la simulación y extracción de resultados.

Losa Postensada

La losa postensada analizada corresponde, a un sistema de entrepiso en un edificio de dos niveles, con refuerzo activo mediante tendones. Este tipo de losa mostró un comportamiento muy eficiente ante cargas verticales. Los valores máximos, de momento flector obtenidos, se ubicaron en torno a $\pm 11,483 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, con una distribución favorable gracias al efecto de compresión inducido por el postensado. El esfuerzo cortante máximo registrado fue de 11.483 kN, concentrado en zonas cercanas a columnas y apoyos. No se observaron comportamientos torsionales críticos, debido a la simetría del modelo y la rigidez de los elementos estructurales adyacentes.

La compresión previa en el concreto redujo de forma significativa la demanda de refuerzo, permitiendo una mayor esbeltez de la losa (menores espesores) y una buena resistencia frente a la fisuración. Este tipo de sistema es particularmente adecuado para

edificaciones con grandes luces, plantas abiertas y necesidades arquitectónicas exigentes, ya que puede eliminar la necesidad de vigas adicionales.

Losa Tubular

Por otra parte, la losa tubular estudiada presenta una geometría con vacíos longitudinales internos, diseñada para reducir el peso propio sin disminuir la rigidez global. Este sistema fue modelado para una estructura de tres niveles. Los resultados mostraron momentos flectores máximos de hasta $\pm 114,736 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, especialmente en los bordes y zonas cercanas a los apoyos. El esfuerzo cortante máximo alcanzó valores de $\pm 302.54 \text{ kN}$, lo cual representa una demanda estructural significativa que requiere verificación estricta del refuerzo transversal (estribos o mallas reforzadas).

Además, se detectaron niveles elevados de torsión, especialmente en el segundo nivel y en los bordes de la losa, con valores de hasta $\pm 168.10 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Esto indica, que aunque las losas tubulares optimizan el uso de concreto y reducen cargas muertas, su comportamiento bajo cargas excéntricas o en estructuras irregulares puede generar, zonas de alta demanda que deben ser diseñadas cuidadosamente.

Evaluación Comparativa

El análisis detallado permite concluir, que las losas postensadas ofrecen un desempeño más controlado y seguro, frente a cargas verticales y momentos negativos. Su capacidad para reducir esfuerzos internos mejora la durabilidad y eficiencia del diseño. En cambio,

las losas tubulares aportan eficiencia constructiva, al disminuir el volumen de concreto, pero presentan desafíos estructurales importantes, cuando se enfrentan a cargas torsionales y cortantes elevadas. Por tanto, la selección entre uno u otro sistema debe considerar, tanto las condiciones estructurales del proyecto como las exigencias arquitectónicas y económicas.

Tabla 7 Comparativa – Comportamiento Estructural de Losas Postensadas y Tubulares

Criterio Técnico	Losa Postensada	Losa Tubular	Observaciones Técnicas
Momento Flector Máx.	$\pm 11,483 \text{ kN}\cdot\text{mm}$	$\pm 114,736 \text{ kN}\cdot\text{mm}$	Losas tubulares presentan valores 10 veces mayores; mayor demanda de refuerzo.
Momento Flector Mín.	$\pm 8,953 \text{ kN}\cdot\text{mm}$	$\pm 109,383 \text{ kN}\cdot\text{mm}$	Momentos negativos significativos en tubulares, especialmente en apoyos.
Cortante Máx.	$\pm 11.483 \text{ kN}$	$\pm 302.54 \text{ kN}$	En las postensadas, el cortante se controla con compresión inducida; en tubulares se eleva.
Cortante Mín.	$\pm 5.30 \text{ kN}$	$\pm 284.95 \text{ kN}$	La variabilidad en tubulares es más crítica, con zonas que requieren refuerzo transversal.
Torsión Máx.	No crítica	$\pm 168.10 \text{ kN}\cdot\text{m}$	El sistema tubular exige análisis y refuerzo en zonas de torsión, especialmente en bordes.
Esbeltez	Alta (menor peralte)	Moderada	Postensadas permiten reducir el espesor de losas; útil para techos planos y luces grandes.
Peso propio	Medio	Bajo	Tubulares son más ligeras; ideal cuando se desea reducir carga muerta.
Refuerzo requerido	Bajo-moderado	Alto	Las postensadas requieren menos acero longitudinal y transversal.

Criterio Técnico	Losa Postensada	Losa Tubular	Observaciones Técnicas
Aplicación óptima	Edificios altos, luces grandes	Plantas regulares, edificios bajos	Las tubulares funcionan mejor en estructuras repetitivas y regulares.
Seguridad estructural	Alta	Moderada-Alta	Postensadas responden mejor ante cargas elevadas; tubulares exigen mayor revisión local.

Análisis Económico Costo-Beneficio Comparativo

Presupuesto Losa Postensada

Código	100-1		Descripción	Losa Postensada 375 m2			
Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total	Subcontrato	Total MO	Total Equipo
Formaleta de 1/12 4 varas	24	Unidad	€7 500,00	€180 000,00			
lamina metaldeck 01,10mm #22 lamina 15 metros	27	Unidad	€152 000,00	€4 104 000,00			
reglas 1x4 semiduro en 4 varas	65	Unidad	€2 950,00	€191 750,00			
varillas corrugada 3/4 grado 60	750	Unidad	€7 500,00	€5 625 000,00			
Alambre negro	300	metros	€950,00	€285 000,00			
Clavos 2" con cabeza	25	kilos	€2 200,00	€55 000,00			
Clavos 2" 1/2 con cabeza	25	kilos	€2 600,00	€65 000,00			
Clavos 2" de acero	1	kilos	€4 500,00	€4 500,00			
Maxi acril 70 cubeta rinde 40 m2	10	cubeta	€17 000,00	€170 000,00			
Linea postensado 27 metros lineales 38mm	5	Unidad	€150 000,00	€750 000,00			
linea postensado 17 metros lineales 38mm	9	Unidad	€85 000,00	€765 000,00			
tubo poliducto pvc 50mm	288	metros	€3 000,00	€864 000,00			
tope ajuste postensado	28	Unidad	€45 000,00	€1 260 000,00			
vanilla corrugada 5/8 grado 60 sacar pines	10	Unidad	€5 000,00	€50 000,00			
concreto premezclado con bomba telescopica 280 kg/cm2	75	m3	€166 000,00	€12 450 000,00			
Repello Fino saco 40kg	6	saco	€7 500,00	€45 000,00			
Disco Diamantado de 3"	2	Unidad	€75 000,00	€150 000,00			
Soldadura 6013 en 1/8"	5	kilos	€25 000,00	€125 000,00			
Discos de corte metal de 3"	25	Unidad	€27 000,00	€675 000,00			
Transportes	4	Unidad	€15 000,00	€60 000,00			
Subcontratos	0				€0,00		
	0				€0,00		
	0				€0,00		
Mano de Obra							
Supervisor	1	244	€2 700,00			€658 800,00	
Operario	10	244	€2 000,00			€4 880 000,00	
Ayudante	18	244	€1600,00			€7 027 200,00	
OHYS o Ing. De Obra	1	244	€3 500,00			€854 000,00	
Equipo	Cant	Dias	Precio/unitario				
Andamios	24	30	€2 000,00				€1440 000,00
Caja de herramientas	10	10	€1000,00				€100 000,00
Cortadora Concreto	1	3	€95 000,00				€285 000,00
Esmeriladora	5	10	€2 000,00				€100 000,00
Taladro	5	10	€2 000,00				€100 000,00
Costos Subtotales				Materiales	Subcontrato	Mano de Obra	Equipo
				€27 874 250,00	€0,00	€13 420 000,00	€2 025 000,00
Cierre del ítem							
	Cargas Sociales	51%			€6 844 200,00		
	Seguridad	2%			€268 400,00		
	Administración	5%			€2 064 712,50		
	Utilidad e imprevistos	10%			€4 129 425,00		
	Total	Losa Postensada 375 m2			€56 625 987,50		
				Colones	Dolares		
			Total SIN IMPUESTOS:	€56 625 988	\$113 025,92		
			I.V.A del 13 %	€7 361 378	\$14 693,37		
			Total CON IMPUESTOS:	€63 987 366	\$127 719,29		

Presupuesto Losa Tubular

1	Código	100-1		Descripción	Losa Tubular 375 m2			Total MO	Total Equipo
	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total	Subcontrato			
	Formaleta de 1/12 4 varas	24	Unidad	€7 500,00	€180 000,00				
	lamina metaldeck 01,10mm #22 lamina 15 metros	27	Unidad	€152 000,00	€4 104 000,00				
	reglas 1x4 semiduro en 4 varas	65	Unidad	€2 350,00	€151 750,00				
	varillas corrugada 3/4 grado 60 30% menos que otro sistema	525	Unidad	€7 500,00	€3 937 500,00				
	Alambre negro	210	metros	€950,00	€199 500,00				
	Clavos 2" con cabeza	25	kilos	€2 200,00	€55 000,00				
	Clavos 2" 1/2 con cabeza	25	kilos	€2 600,00	€65 000,00				
	Clavos 2" de acero	1	kilos	€4 500,00	€4 500,00				
	Maxi acril 70 cubeta rinde 40 m2	10	cubeta	€17 000,00	€170 000,00				
	Losa Tubular 1 metro cuadrado	375	Unidad	€16 089,47	€6 033 551,25				
	varilla corrugada 5/8 grado 60 sacar pines	10	Unidad	€5 000,00	€50 000,00				
	concreto premezclado con bomba telescopica 280 kg/cm2	75	m3	€145 000,00	€10 875 000,00				
	Repello Fino saco 40kg	6	saco	€7 500,00	€45 000,00				
	Disco Diamantado de 9"	2	Unidad	€75 000,00	€150 000,00				
	Soldadura 6013 en 1/8"	5	kilos	€25 000,00	€125 000,00				
	Discos de corte metal de 9"	25	Unidad	€27 000,00	€675 000,00				
	Transportes	4	Unidad	€15 000,00	€60 000,00				
	Subcontratos								
		0				€0,00			
		0				€0,00			
		0				€0,00			
	Mano de Obra								
	Supervisor	1	244	€2 700,00			€658 800,00		
	Operario	10	244	€2 000,00			€4 880 000,00		
	Ayudante	10	244	€1600,00			€3 904 000,00		
	OHY'S o Ing. De Obra	1	244	€3 500,00			€854 000,00		
	Equipo	Cant	Dias	Precio/Unitario					
	Andamios	24	30	€2 000,00					€1440 000,00
	Caja de herramientas	10	10	€1000,00					€100 000,00
	Cortadora Concreto	1	3	€95 000,00					€285 000,00
	Esmerilladora	5	10	€2 000,00					€100 000,00
	Taladro	5	10	€2 000,00					€100 000,00
	Costos Subtotales				Materiales	Subcontrato	Mano de Obra	Equipo	
					€26 920 801,25	€0,00	€10 236 800,00	€2 025 000,00	
	Cierre del Item								
	Cargas Sociales		51%			€5 251 368,00			
	Seguridad		2%			€205 936,00			
	Administración		5%			€1680 880,06			
	Utilidad e imprevistos		10%			€3 721 760,13			
	Total			Losa Tubular 375 m2		€50 282 545,44			
					Colones	Dolares			
				Total SIN IMPUESTOS:	€50 282 545,44	€100 364,36			
				I.V.A del 13 %	€6 536 730,91	€13 047,37			
				Total CON IMPUESTOS:	€56 819 276,34	€113 411,73			

Sistema: Losa Postensada vs. Losa Tubular para 375 m²

El análisis económico representa una herramienta fundamental en la toma de decisiones de diseño estructural, especialmente en proyectos que requieren optimización de recursos sin comprometer la seguridad ni el desempeño estructural.

Se desarrolla una comparación detallada entre la losa postensada y la losa tubular, en función de los datos presupuestarios previamente presentados.

Desglose de Costos Directos e Indirectos

Categoría	Losa Postensada (₡)	Losa Tubular (₡)	Diferencia (₡)	Comentario
Materiales	27 874 250,00	26 920 801,25	953 448,75	Más económica en tubular
Mano de Obra	13 420 000,00	10 296 800,00	3 123 200,00	Más económica en tubular
Equipo	2 025 000,00	2 025 000,00	0,00	Igual en ambos casos
Cargos Adicionales	14 294 252,00	13 039 944,19	1 254 307,81	Más económica en tubular
Subtotal sin IVA	56 625 988,00	50 282 545,44	6 343 442,56	Más económica en tubular
IVA (13%)	7 361 378,00	6 536 730,91	824 647,09	Más económica en tubular
TOTAL, CON IVA	63 987 366,00	56 819 276,34	7 168 089,66	Más económica en tubular

Costo Unitario por Metro Cuadrado (₡/m²)

Sistema	Costo sin IVA	Costo con IVA
Sistema	Costo sin IVA (€/m ²)	Costo con IVA (€/m ²)
Losa Postensada	€151 002,63	€170 632,98

Diferencia: La losa tubular presenta un costo por metro cuadrado sin IVA de 8,28 % menor que la losa postensada.

Análisis del Comportamiento Constructivo y Económico

Losa Postensada:

- Ventajas:
 - Permite cubrir grandes luces sin apoyos intermedios.
 - Reducción de flechas y fisuras a largo plazo por postensado activo.
 - Excelente desempeño ante cargas vivas en estructuras complejas.
- Desventajas:
 - Mayor costo por requerimientos técnicos especializados (tensado, anclajes, supervisión).
 - Mayor carga administrativa y social por mayor inversión en recursos humanos.

Losa Tubular:

- Ventajas:
 - Reducción significativa en el volumen de concreto y peso estructural.
 - Prefabricación de elementos viguetas acelera la construcción.
 - Menor consumo de acero y mano de obra.
- Desventajas:

- Limitada a ciertas configuraciones arquitectónicas por la geometría tubular.
- Puede presentar mayores esfuerzos en zonas de corte o torsión si no se analiza adecuadamente.

Relación Costo-Beneficio en Función del Proyecto

Desde la perspectiva del retorno económico del diseño estructural, se evidencia que:

- La losa tubular maximiza el rendimiento económico inmediato, especialmente en proyectos de tipo residencial, educativo o administrativo con cargas y luces moderadas.
- La losa postensada puede justificar su mayor costo en edificaciones con requerimientos estructurales complejos (por ejemplo, centros comerciales, auditorios, estacionamientos multinivel) donde la libertad arquitectónica y la reducción de columnas son esenciales.
- El ahorro del 11,21% que representa la losa tubular, en proyectos de mayor escala, puede traducirse en millones de colones, liberados para otras partidas como acabados, instalaciones o mobiliario.

Consideraciones Finales y Estratégicas

Factor Evaluado	Losa Postensada	Losa Tubular
Costo Directo Total	Alto	Moderado
Tiempo de Ejecución	Mayor	Menor
Necesidad de Especialistas	Alta (postensado activo)	Media (prefabricado simple)
Flexibilidad Estructural	Alta	Limitada
Ideal para...	Grandes luces, estructuras abiertas	Proyectos repetitivos y rápidos

Conclusión Propuesta de Comparación

Tras el análisis detallado de los costos asociados a dos soluciones estructurales, losa postensada y losa tubular, para una superficie de 375 m², se concluye que la losa tubular representa una alternativa más económica, con un ahorro aproximado del 11,21 % respecto a la postensada. Este ahorro se deriva fundamentalmente, de una menor inversión en mano de obra y cargas sociales. No obstante, la elección del sistema debe considerar también el comportamiento estructural deseado, las condiciones arquitectónicas del proyecto y los requerimientos técnicos, mientras la losa postensada es idónea para edificaciones que demandan mayor eficiencia estructural y libertad de diseño. La losa tubular se destaca como una solución rápida, ligera y rentable, en contextos de construcción optimizada.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones Generales del Estudio

El análisis estructural comparativo, realizado entre losas postensadas y losas tubulares, permitió evidenciar diferencias significativas en su comportamiento, ante cargas gravitacionales, sísmicas y combinadas. Estas diferencias tienen implicaciones relevantes, en la selección del sistema estructural más adecuado, para cada tipo de edificación.

Comportamiento estructural diferenciado

Los resultados estructurales, derivados del modelado en ETABS, permitieron establecer diferencias notables, en el comportamiento de las losas postensadas frente a las losas tubulares. Estas diferencias no solo se manifiestan en nivel cuantitativo, en términos de esfuerzos internos, también influyen directamente en la viabilidad constructiva, el rendimiento estructural y la toma de decisiones en fase de diseño.

En el caso de las losas postensadas, se observó un desempeño estructural notablemente favorable. La acción del pretensado genera una compresión interna controlada, que actúa de forma opuesta a las cargas de servicio, reduciendo considerablemente la magnitud de los momentos flectores, que actúan sobre la sección transversal. De hecho, los valores obtenidos en el análisis mostraron, que los momentos máximos inducidos en la losa postensada alcanzaron solo $\pm 11,483 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, una cifra sustancialmente menor comparada con los $\pm 114,736 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ observados en el caso de las losas tubulares. Esta diferencia se traduce en un sistema estructural, que demanda menos cantidad de acero pasivo, permitiendo una mayor economía y eficiencia.

Además, las deformaciones verticales fueron significativamente más bajas. Se registró un desplazamiento máximo de 19.2 mm en los tramos centrales, manteniéndose por debajo del límite permisible de 25.0 mm (relación $L/240$ para una luz de 6.00 m). Esta capacidad, para controlar las flechas se atribuye directamente al efecto de compresión inducida por los tendones, el cual incrementa la rigidez efectiva de la losa, desplazando el punto de máxima deformación hacia regiones más favorables, desde el punto de vista estructural.

Otro beneficio fundamental, observado en las losas postensadas, es su menor exigencia en esfuerzos de corte. Los análisis revelaron una demanda de cortante de aproximadamente 112.6 kN, frente a una capacidad estimada en 148.0 kN, manteniéndose dentro de márgenes de seguridad superiores al 30 %, lo cual elimina en muchos casos, la necesidad de refuerzo transversal específico (estribos) en losas planas.

Desde una perspectiva ingenieril, se reconoce que el postensado otorga al sistema una capacidad superior, para controlar la fisuración en las primeras etapas de carga, minimizando la aparición de grietas prematuras y garantizando una vida útil más prolongada. Este efecto se traduce en mayor durabilidad, menor mantenimiento y un mejor desempeño en condiciones de servicio.

Por otro lado, las losas tubulares, si bien presentaron ventajas desde el punto de vista del peso estructural reducido, gracias a la incorporación de vacíos longitudinales que disminuyen la masa total en el 30 % y también evidenciaron una mayor sensibilidad a la concentración de esfuerzos. En zonas de borde y conexión con columnas, se identificaron

altos valores de corte (± 302.54 kN) y torsión (± 168.10 kN·m), lo cual exige un diseño más robusto y cuidadoso, particularmente en regiones críticas del sistema.

La geometría interna discontinua, de este tipo de losas, genera un patrón de rigidez variable que no puede ser representado adecuadamente, mediante modelos simplificados. Por tal razón, se requiere la implementación de análisis tridimensionales detallados, que capturen con precisión la interacción entre las zonas macizas y las zonas aligeradas. En estas condiciones, el uso de elementos finitos de alta resolución y validaciones cruzadas con reacciones de soporte, resulta esencial para garantizar un diseño seguro.

Si bien las deformaciones máximas obtenidas en losas tubulares, se mantuvieron dentro del rango normativo (flechas del orden de 24.0 mm para luces de 6.00 m), se evidenció que el margen con respecto al límite $L/240$ es mucho más ajustado que en el sistema postensado. Esto limita su aplicación, en obras donde el control de desplazamientos verticales sea crucial, como en hospitales, edificaciones con cielorrasos suspendidos o áreas técnicas sensibles.

En términos generales, la experiencia comparativa entre ambos sistemas ha puesto en evidencia, que mientras las losas postensadas se destacan por su rigidez, eficiencia y control de esfuerzos, las losas tubulares ofrecen ligereza y ahorro de volumen de concreto, pero requieren una caracterización más compleja y refuerzos específicos, en zonas de alta demanda estructural. Su elección no debe realizarse, solo con base en criterios económicos, sino fundamentada en resultados objetivos, derivados del comportamiento real del sistema bajo carga.

Desempeño estructural avanzado en losas postensadas

Una característica distintiva del sistema de losas postensadas es, su capacidad para modificar de forma proactiva el estado tensional del concreto, antes de que las cargas de servicio entren en acción. Esta estrategia, lejos de ser únicamente una medida de refuerzo, constituye una herramienta de ingeniería avanzada, que permite diseñar estructuras con prestaciones superiores en términos de eficiencia energética del material, control de fisuración y durabilidad a largo plazo.

Durante el análisis desarrollado en este estudio, se observó que el postensado no solo reduce los valores de momento y corte en servicio, sino que también reconfigura el estado límite elástico del elemento, desplazando el umbral de aparición de grietas a niveles de carga significativamente más altos. Este fenómeno resulta esencial en edificaciones sometidas a cargas repetitivas o cíclicas, como en zonas sísmicas, donde la acumulación de daño estructural por ciclos de carga, puede comprometer la seguridad y funcionalidad del sistema estructural.

Además, el uso del postensado favorece la uniformización de la respuesta estructural, a lo largo del plano de la losa, reduciendo las concentraciones de esfuerzo típicas en losas convencionales. Esta condición mejora notablemente la confiabilidad del diseño y permite estimar con mayor certeza los desplazamientos y deformaciones esperados, lo cual es clave para el control de acabados, cielorrasos suspendidos, tabiquería liviana y elementos no estructurales sensibles.

Otro aspecto de interés técnico es que el sistema postensado, al generar fuerzas internas distribuidas de forma continua, permite un mejor aprovechamiento del concreto, aumentando el índice resistencia y peso del sistema. Esto se traduce en una menor demanda sobre la cimentación y una optimización del uso de acero, al requerir menores cuantías de refuerzo pasivo.

Finalmente, cabe destacar que el efecto beneficioso del postensado no desaparece con el tiempo: al contrario, se mantiene como una fuerza interna constante, que contribuye al desempeño del sistema durante toda su vida útil. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado, en estructuras con más de 30 años de servicio, que mantienen un excelente estado funcional sin manifestaciones severas de deterioro.

En conjunto, el sistema postensado no debe entenderse únicamente como una técnica para eliminar vigas o cubrir grandes luces, sino como una estrategia de diseño integral que aporta ventajas significativas en términos de comportamiento dinámico, eficiencia del material, durabilidad, reducción de mantenimiento y sostenibilidad estructural.

Ventajas funcionales y constructivas de las losas tubulares

El sistema de losas tubulares, más allá de sus características estructurales, ofrece una serie de beneficios adicionales que se integran directamente en la lógica de la construcción moderna. Uno de los aspectos más relevantes, observados en el estudio, fue la capacidad de este sistema para reducir el peso propio, sin comprometer la capacidad portante global, lo cual produce un impacto directo en la reducción de las dimensiones, de elementos verticales y cimentaciones, especialmente en edificios de altura media y baja.

Este ahorro en peso no solo repercute positivamente, en el diseño estructural, sino que también conlleva mejoras en el comportamiento térmico y acústico del edificio. Los vacíos internos formados actúan como barreras naturales, para la transmisión de calor y ruido, lo que convierte la losa tubular en una alternativa, especialmente atractiva para edificaciones institucionales, residenciales y oficinas, donde el confort ambiental representa un valor agregado.

Desde el punto de vista constructivo, la losa tubular se adapta con facilidad a métodos industrializados y sistemas prefabricados. Su repetitividad geométrica y bajo requerimiento de formaletas complejas facilitan una producción seriada y eficiente, reduciendo los tiempos de ejecución y el desperdicio de materiales en obra. Esto resulta particularmente útil en proyectos de construcción acelerada o donde se prioriza la sostenibilidad del proceso constructivo.

Durante el análisis, se identificó que, si bien este tipo de losa requiere una verificación detallada en zonas críticas, su comportamiento estructural puede optimizarse significativamente mediante una correcta disposición del acero de refuerzo en zonas de apoyo y borde, se logra un sistema altamente competitivo, cuando se diseña con precisión. Adicionalmente, el diseño modular, inherente a las losas tubulares, facilita la planificación de instalaciones electromecánicas, al disponer de canales internos o zonas sin refuerzo denso, que pueden ser aprovechadas sin comprometer la integridad estructural.

Otro aspecto que fortalece la elección de este sistema es, su compatibilidad con principios de economía circular y construcción sostenible, ya que muchos de los elementos

utilizados para conformar los vacíos son reciclables o reutilizables. Esto permite alinear los objetivos estructurales, con metas de reducción de impacto ambiental, cada vez más relevantes en el entorno normativo actual.

En síntesis, las losas tubulares ofrecen un rendimiento funcional integral que va más allá del simple análisis de cargas: proporcionan ventajas ambientales, constructivas y operativas, consolidándose como una opción técnicamente viable y económicamente razonable para edificaciones repetitivas, modulares y de bajo impacto estructural.

Consideraciones técnicas y limitaciones estructurales del sistema tubular

Pese a sus evidentes ventajas en términos de aligeramiento estructural y eficiencia volumétrica, el sistema de losas tubulares presenta un conjunto de limitaciones técnicas, que deben ser cuidadosamente evaluadas durante las etapas de análisis y diseño. Los resultados obtenidos mediante el modelo tridimensional en ETABS evidenciaron, que aunque se logra una reducción significativa del volumen de concreto y del peso propio de la losa, esta solución conlleva exigencias estructurales, adicionales que inciden directamente en su comportamiento bajo carga.

Específicamente, se observaron niveles elevados de momentos flectores ($\pm 114,736$ kN·mm), esfuerzos cortantes (± 302.54 kN) y torsiones (± 168.10 kN·m) en zonas localizadas, como lo son las proximidades a apoyos, conexiones con columnas y perímetros estructurales. Estas concentraciones de esfuerzo obligan al diseñador, a adoptar configuraciones de refuerzo altamente específicas, con barras distribuidas de

forma bidireccional o refuerzo adicional en capas múltiples, para garantizar la ductilidad y evitar fallas frágiles por corte o torsión.

Otro aspecto crítico, que emerge del análisis, es la discontinuidad geométrica intrínseca del sistema tubular. La incorporación de vacíos longitudinales, aunque reduce el peso propio, modifica el trayecto natural de las líneas de flujo de esfuerzos, generando una respuesta estructural heterogénea. Esto afecta, no solo la distribución de esfuerzos, sino también la rigidez dinámica del sistema, de modo que puede inducir modos vibratorios indeseados en edificaciones expuestas a cargas dinámicas o condiciones sísmicas. Las vibraciones estructurales, incluso aquellas que no implican fallas inmediatas, pueden traducirse en pérdida de confort o en fatiga de materiales a largo plazo.

Asimismo, la geometría interna compleja de la sección tubular dificulta la identificación de trayectorias óptimas para el refuerzo, y puede presentar zonas de sombra en el concreto, que obstaculizan la correcta compactación durante el colado y afectar la durabilidad. Esta condición representa una vulnerabilidad frente a la penetración de agentes agresivos, especialmente en climas tropicales con alta humedad ambiental o presencia de cloruros.

Desde el punto de vista constructivo, la necesidad de moldes especiales o tubos insertos para conformar los vacíos internos, implica una mayor planificación logística y control de calidad en obra. Además, se requiere un estricto alineamiento geométrico, para garantizar que los vacíos no interfieran con el trazado de los elementos de refuerzo, ni con las cargas puntuales concentradas.

En estructuras irregulares o con plantas asimétricas, la verificación torsional adquiere una importancia aún mayor. El comportamiento no simétrico, frente a cargas horizontales, puede amplificar los esfuerzos en direcciones diagonales, generando tensiones transversales difíciles de predecir, sin un análisis dinámico avanzado.

En conclusión, si bien la losa tubular constituye una solución eficiente en términos de peso y volumen, su implementación exige una estrategia de diseño estructural detallada, con énfasis en la resistencia a corte y torsión, la verificación dinámica y la calidad constructiva. Su aplicación debe limitarse a condiciones arquitectónicas y estructurales donde exista repetitividad, simetría y control sobre el proceso constructivo, evitando su uso en configuraciones complejas, sin un estudio detallado y validado por simulaciones avanzadas.

Limitaciones del sistema postensado: consideraciones técnicas y operativas

Aunque el sistema de losas postensadas ofrece, una serie de ventajas estructurales significativas tales, como control de deformaciones, reducción del acero pasivo y mayor libertad arquitectónica; su implementación práctica no está exenta de restricciones técnicas, económicas y constructivas, que deben ser cuidadosamente analizadas antes de su adopción en un proyecto estructural.

Una de las primeras limitaciones, observadas en el análisis, es la alta dependencia del correcto tensado de los cables o torones, cuya función es inducir esfuerzos de compresión proactiva en la losa. Este proceso debe ejecutarse, bajo condiciones de precisión milimétrica y siguiendo protocolos estrictos, ya que cualquier error en el tensado, alineación o anclaje, puede comprometer severamente el comportamiento

estructural global. A diferencia de una losa maciza convencional, donde el refuerzo pasivo se encuentra distribuido y visible, el postensado requiere un control no destructivo para verificar tensiones reales, lo que complejiza la fase de inspección y supervisión.

En términos operativos, el sistema postensado presenta una mayor complejidad constructiva. Se requiere de equipos especializados para el tensado hidráulico, así como personal técnicamente capacitado para realizar la instalación, inyección de lechada y colocación de ductos. Esta especialización incrementa los costos iniciales y limita la aplicabilidad del sistema, en regiones donde la disponibilidad de mano de obra especializada es escasa. Además, cualquier interrupción durante el proceso constructivo por fallas eléctricas, desviaciones en alineación, o colados inconclusos, puede generar repercusiones estructurales de largo plazo, difíciles de corregir.

Otro aspecto técnico que impone una limitación importante es, la interacción entre los tendones postensados y las cargas accidentales no previstas. Si bien el postensado es eficaz para cargas gravitacionales distribuidas, su efectividad puede reducirse cuando se presentan cargas excéntricas concentradas, o cambios de uso en la edificación. Por ejemplo, la instalación posterior de equipos pesados, o modificaciones arquitectónicas, pueden alterar la distribución de esfuerzos y generar comportamientos fuera del rango de diseño original. Esto se debe a que los cables postensados poseen un diseño para contrarrestar una condición inicial y específica de carga.

Desde la perspectiva de mantenimiento y durabilidad, también se identifican desafíos significativos. Aunque el sistema puede ofrecer mayor durabilidad en ambientes controlados, los tendones internos, al estar embebidos en vainas, quedan ocultos dentro

del concreto, lo cual dificulta su inspección visual directa. En caso de corrosión inducida por carbonatación o ingreso de cloruros, especialmente en zonas costeras o industriales, detectar el daño con antelación puede requerir tecnologías de evaluación no destructiva, como ultrasonido o radiografía, lo que incrementa los costos de monitoreo a largo plazo.

Finalmente, es necesario señalar, que el sistema postensado es menos tolerante a errores constructivos. La pérdida de adherencia entre el tendón y el concreto, ya sea por mala compactación, fisuración prematura o inyección deficiente, puede generar trayectorias de tensión no lineales, que afecten el equilibrio estructural y aumenten la posibilidad de fisuración localizada. Esta sensibilidad impone un régimen de control de calidad, mucho más riguroso en comparación con sistemas convencionales.

En resumen, aunque el postensado representa una solución estructural avanzada y altamente eficiente, su adopción debe estar respaldada por un entorno técnico robusto, control estricto de procesos y un diseño detallado, que contemple posibles variaciones funcionales en la vida útil del edificio. Su uso debe ser racionalizado, para edificaciones con alta demanda estructural y condiciones de carga bien definidas, evitando su aplicación en estructuras, donde la flexibilidad de uso o la modificación posterior sean probables, sin un rediseño completo del sistema.

Contextualización del uso óptimo de los sistemas de losas: criterios estructurales y prácticos

En el proceso de toma de decisiones estructurales, la selección entre una losa postensada o tubular no debe responder, únicamente, a preferencias constructivas o a criterios simplificados de costo, sino a un análisis riguroso, que articule condiciones estructurales, arquitectónicas y operativas. El presente estudio ha permitido establecer, de forma clara y técnica, los contextos en los que cada sistema ofrece su máximo rendimiento, lo cual es esencial para lograr edificaciones funcionales, seguras y sostenibles.

El sistema postensado, por su naturaleza activa, resulta altamente eficaz en edificaciones de gran complejidad funcional, que exigen espacios libres de elementos obstructivos, como centros médicos, terminales de transporte, centros educativos de alto tráfico, estructuras institucionales y edificios de gran altura. Su capacidad para generar fuerzas internas, que contrarrestan la flexión producida por cargas gravitacionales, posibilita no solo ampliar las luces estructurales, sin recurrir a vigas o columnas intermedias, sino también disminuir la flecha total, favoreciendo condiciones de servicio más confortables y reduciendo el riesgo de fisuración. Estas características estructurales se alinean con los requerimientos contemporáneos de arquitectura funcional abierta, eficiencia energética y flexibilidad espacial.

Desde el punto de vista constructivo, este sistema contribuye a disminuir la altura total de entrepiso y permite una menor demanda en cerramientos verticales, reducción del volumen total construido y mejora en la relación superficie útil/volumen, lo cual repercute

favorablemente en la eficiencia térmica y lumínica del edificio. No obstante, la implementación del postensado exige una logística precisa, equipos especializados y personal técnico calificado, siendo su aplicación más adecuada en zonas urbanas o desarrollos, con capacidad de gestión técnica avanzada.

El sistema de losa tubular, caracterizado por su geometría, aligerada mediante vacíos longitudinales, es una alternativa ventajosa en proyectos de mediana o baja altura, donde la reducción del peso propio es una prioridad para disminuir cargas sobre elementos verticales y fundaciones. Esta ventaja es particularmente relevante en construcciones repetitivas, como complejos habitacionales, oficinas en serie, bodegas modulares y edificios institucionales con plantas tipo. La disminución de la masa estructural permite un diseño más económico de cimentaciones y aporta beneficios en zonas de sismicidad moderada, al reducir las fuerzas inerciales generadas durante un evento sísmico.

Respecto al punto de vista operativo, la sencillez en el sistema de encofrado, la utilización de moldes estandarizados y la compatibilidad con técnicas constructivas tradicionales hacen de la losa tubular una solución de rápida ejecución y bajo requerimiento tecnológico, apta para zonas rurales o regiones con restricciones logísticas. Además, al disminuir el volumen de concreto necesario, se reduce la huella de carbono asociada al proyecto, lo cual constituye un valor añadido en proyectos con criterios de sostenibilidad.

No obstante, debe advertirse que este tipo de losa requiere, una verificación estructural rigurosa en las zonas cercanas a apoyos, perímetros o discontinuidades geométricas, donde la transmisión de esfuerzos se complejiza por la presencia de vacíos. Por esta

razón, su uso debe restringirse en proyectos con cargas excéntricas o geometrías irregulares que comprometan el equilibrio torsional.

En síntesis, la elección entre una losa postensada o tubular debe responder, a una evaluación técnica integral que considere, no solo los requerimientos estructurales, sino también la realidad del entorno constructivo, los objetivos del proyecto y la viabilidad operativa del sistema. El diseño eficiente no se logra, de forma exclusiva mediante el cumplimiento normativo, sino a partir de decisiones estratégicas informadas, que optimicen el rendimiento del sistema estructural, dentro del marco funcional y económico de la obra.

Valor estratégico del modelado estructural computacional

En el contexto actual del diseño estructural, el uso de herramientas de simulación no se limita a una función de verificación o comprobación posterior al cálculo, sino que constituye un instrumento indispensable en la planificación, análisis y optimización de sistemas estructurales complejos. A partir de este enfoque, la presente investigación evidenció, cómo la incorporación de plataformas de análisis como ETABS permite obtener, una representación precisa del comportamiento real de estructuras, sometidas a diversas solicitaciones.

Durante el desarrollo del estudio, el modelado tridimensional facilitó la identificación de zonas críticas de la estructura, tales como puntos de acumulación de momentos negativos, concentraciones de cortante en los bordes, o sectores donde se concentran deformaciones verticales. Esta lectura detallada no es fácilmente accesible mediante

métodos manuales tradicionales, que suelen simplificar el comportamiento estructural a través de hipótesis generalizadas.

Uno de los aportes más significativos de la simulación fue su capacidad para representar de forma integral, las interacciones entre los distintos elementos del sistema, como losas, columnas y muros, con base en combinaciones de carga estática y dinámica. Particularmente, en el caso de análisis sísmico, el uso de espectros de diseño definidos por normativa nacional (CSCR 2010) permitió, evaluar con precisión parámetros esenciales como desplazamientos absolutos, derivas entre pisos y efectos torsionales accidentales. Estas simulaciones facilitaron la validación del sistema ante eventos sísmicos representativos, contribuyendo al cumplimiento de los límites de servicio establecidos por los códigos.

Además, la simulación posibilitó realizar ajustes iterativos en el diseño, tales como la redistribución del acero de refuerzo, la modificación de espesores de losa, o la elección de patrones óptimos de tendones en el sistema postensado. Este proceso permitió reducir el uso de materiales, sin comprometer la seguridad estructural, favoreciendo la eficiencia económica del proyecto.

Desde una perspectiva operativa, el uso de modelado estructural no solo acortó los tiempos de diseño, sino que también permitió una visualización tridimensional clara del estado deformado de cada losa, lo que resulta de especial valor para interpretar fenómenos de fisuración temprana, flechas diferenciales y condiciones de servicio prolongado.

Desde la perspectiva metodológica, la simulación estructural aportó un criterio técnico sólido y replicable, orientando las decisiones de diseño, no en función de presunciones empíricas o convenciones del sector constructivo, sino del desempeño real de la estructura, evaluado bajo condiciones representativas.

En resumen, el uso de herramientas como ETABS, en este estudio, no fue una acción complementaria sino un pilar fundamental, para garantizar un diseño confiable, eficiente y técnicamente validado. Su implementación proporciona una base científica robusta, para enfrentar retos estructurales complejos en zonas sísmicamente activas y contribuye a una práctica profesional más rigurosa y fundamentada.

12. Recomendaciones Técnicas y Constructivas

12.1 Enfoque integral para la selección del sistema de losa

Una decisión estructural tan crítica, como la elección del sistema de losa, debe abordarse desde un enfoque multidisciplinario, que trascienda los cálculos básicos de resistencia. Es fundamental, que el ingeniero civil y estructural evalúe de manera articulada, las exigencias técnicas del proyecto, las necesidades arquitectónicas, las condiciones de operación funcional, los recursos económicos disponibles y las posibilidades logísticas del entorno constructivo.

En situaciones donde se requiera maximizar el aprovechamiento del espacio útil, garantizar bajos niveles de deformación y eliminar restricciones por columnas intermedias como en hospitales, auditorios, terminales de transporte o centros de atención médica, las losas postensadas se consolidan como la opción más eficiente. Esto se debe a que

su capacidad para generar esfuerzos de compresión previa, en el concreto, permite vencer luces amplias con secciones más esbeltas, mejorando tanto la estética como el rendimiento funcional del inmueble. Además, su comportamiento estructural favorece la integración con instalaciones técnicas, lo que resulta ventajoso para edificios con alta densidad de servicios.

No obstante, en desarrollos constructivos de menor complejidad volumétrica y con plantas repetitivas típicas en oficinas, conjuntos habitacionales verticales, bodegas o instalaciones educativas, las losas tubulares presentan beneficios igualmente relevantes. Su geometría interna aligerada no solo reduce, el peso total de la estructura, sino que permite optimizar el diseño de la cimentación y de los elementos portantes verticales. Esto se traduce en una disminución de la carga total transmitida y en una ejecución más rápida, ideal en contextos donde el rendimiento constructivo y la eficiencia material son prioritarios.

Este criterio de selección estructural debe ajustarse también al contexto geográfico del proyecto: zonas con limitada disponibilidad de equipos para tensado, personal técnico capacitado, o materiales especializados, podrían presentar restricciones para la implementación de postensado. En contraste, losas prefabricadas o soluciones tubulares modulares pueden adaptarse mejor, a regiones con infraestructura básica o cronogramas de obra ajustados.

12.2 Rigurosidad en el cumplimiento de normativas estructurales

En toda etapa del diseño estructural y su ejecución constructiva, resulta esencial asegurar el cumplimiento estricto de las disposiciones, contempladas en los códigos de diseño

reconocidos internacionalmente, tales como el ACI 318-19 para estructuras de concreto reforzado y el CSCR 2010, aplicable al contexto sísmico costarricense. Estas normativas establecen parámetros mínimos, no solo para garantizar la resistencia mecánica de los elementos, sino también para asegurar su funcionalidad, durabilidad y seguridad ante condiciones de servicio y eventos extremos.

El proceso de verificación debe contemplar, de manera meticulosa, los estados límites últimos (ELU), asociados a la capacidad máxima antes de una falla estructural, así como los estados límites de servicio (ELS), que evalúan el comportamiento en condiciones normales de uso, tales como deflexiones, fisuración y vibraciones aceptables. Esto implica una revisión integral, de todos los esfuerzos relevantes: momentos flectores, fuerzas cortantes, solicitaciones por torsión y desplazamientos verticales o laterales, haciendo énfasis en áreas potencialmente vulnerables como apoyos, bordes libres y zonas de concentración de cargas.

En este contexto, la incorporación de herramientas avanzadas de análisis estructural como el *software* ETABS, representa un recurso indispensable. Su capacidad para modelar en tres dimensiones, considerar combinaciones de carga complejas y aplicar espectros sísmicos detallados, permite detectar comportamientos estructurales, que no serían evidentes bajo un enfoque de cálculo convencional. Esto incluye, por ejemplo, la evaluación de derivas entrepiso, concentraciones anómalas de esfuerzo en discontinuidades geométricas y el seguimiento preciso de la redistribución de cargas en sistemas hiperestáticos.

Además, la simulación por elementos finitos facilita una verificación más realista de la rigidez, ductilidad y estabilidad global del sistema de losas, aportando así a la toma de decisiones informadas en cuanto al tipo de refuerzo, espesor óptimo y disposición constructiva más eficiente. Esta práctica se traduce, no solo en una mejora técnica del diseño, sino también en una mayor confiabilidad de la estructura durante su vida útil.

En definitiva, el cumplimiento normativo no debe interpretarse únicamente como una obligación legal o documental, sino como un pilar fundamental del diseño estructural responsable, que permite anticiparse a posibles fallas, optimizar el uso de materiales y garantizar la seguridad de los ocupantes y la estabilidad de la edificación, frente a las condiciones previstas y eventuales.

12.3 Refuerzo diferenciado según zonas estructurales críticas

En el diseño estructural de losas, uno de los aspectos más relevantes para garantizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de la edificación es la correcta distribución y cuantificación del acero de refuerzo, especialmente en aquellas zonas donde los esfuerzos alcanzan concentraciones elevadas. Estas áreas, conocidas como zonas críticas, suelen ubicarse en los bordes de los vanos, conexiones con columnas, zonas de apoyo, así como puntos donde ocurren discontinuidades geométricas o concentraciones de carga, como equipos pesados o transiciones de nivel.

La experiencia en el análisis estructural, mediante herramientas como ETABS, permitió identificar que tanto las losas postensadas, como las losas tubulares, requieren un tratamiento diferenciado en cuanto al diseño del refuerzo en estas zonas específicas. En el caso de las losas postensadas, a pesar de contar con la acción del pretensado, que

reduce significativamente los esfuerzos a flexión en la mayoría del tramo, las regiones próximas a los apoyos requieren un refuerzo pasivo adicional. Este refuerzo complementario cumple funciones esenciales: absorber tensiones residuales, controlar la fisuración por retracción y temperatura, brindar redundancia estructural, en caso de pérdida parcial del pretensado.

Para las losas tubulares, el refuerzo estructural cobra aún mayor importancia, debido a la discontinuidad material, provocada por los vacíos internos. En este tipo de sistema, las zonas críticas como esquinas, zonas de torsión o encuentros con columnas, experimentan mayores niveles de exigencia mecánica. Por tanto, es indispensable reforzar estas áreas con configuraciones robustas de acero, como mallas electrosoldadas dobles, varillas cruzadas o incluso la incorporación de fibras estructurales, que incrementen la tenacidad del concreto. Además, en zonas sometidas a torsión, se recomienda aumentar la densidad del refuerzo transversal y disponer anclajes adecuados para evitar desprendimientos o fallas frágiles.

Desde una perspectiva de diseño estructural avanzada, el refuerzo diferenciado no solo responde a criterios normativos mínimos, sino que también refleja un enfoque técnico integral, que considera la interacción tridimensional del sistema. Este principio permite optimizar la eficiencia del material, minimizar desperdicios y aumentar el nivel de seguridad estructural, especialmente en condiciones sísmicas o de carga no convencional.

Finalmente, debe señalarse que la disposición estratégica del refuerzo debe realizarse en coordinación con los planos arquitectónicos y de instalaciones, para evitar

interferencias y garantizar la continuidad estructural. Esta coordinación multidisciplinaria resulta clave, para lograr edificaciones más seguras, funcionales y duraderas.

12.4 Incorporación de criterios de sostenibilidad estructural en el diseño de losas

En el contexto actual de la ingeniería civil, donde las demandas medioambientales y la eficiencia de los recursos adquieren un papel cada vez más protagónico, se vuelve fundamental integrar criterios de sostenibilidad en el diseño y selección del sistema de losas. Esta visión no solo debe centrarse en la optimización estructural tradicional, sino también en el impacto ambiental de los materiales utilizados, la facilidad de reutilización, la huella de carbono asociada a la construcción y el ciclo de vida completo del sistema estructural.

A partir del análisis comparativo realizado, se evidencia que las losas tubulares, debido a su menor volumen de concreto y peso propio, presentan un potencial significativo para reducir el consumo de materias primas, y por tanto, minimizar las emisiones asociadas a su fabricación y transporte. Esta característica las convierte en una alternativa favorable, en proyectos donde se prioricen estrategias de construcción sostenible, tales como certificaciones LEED o lineamientos de eficiencia energética.

No obstante, las losas postensadas, si bien requieren un mayor grado de tecnificación y materiales más especializados, permiten una reducción del número de elementos estructurales intermedios, disminuyen el uso de cimbras y apuntalamientos temporales, y optimizan el consumo de acero pasivo. Estos aspectos pueden traducirse en menores

residuos de obra y mayor eficiencia en el uso de materiales, siempre que se implementen de forma controlada y con personal capacitado.

En este sentido, se recomienda que en etapas tempranas del diseño se realice un análisis de impacto ambiental asociado a cada tipología de losa, considerando no solo el volumen de materiales empleados, sino también aspectos como la logística de montaje, la durabilidad prevista, la capacidad de reutilización de componentes y el mantenimiento a largo plazo. Esta evaluación integral permitirá a los proyectistas seleccionar soluciones que no solo respondan a criterios estructurales y económicos, sino también a principios de responsabilidad ambiental y desarrollo sostenible.

El uso de herramientas de modelado estructural permite evaluar de forma anticipada el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de carga. Esta capacidad ofrece la ventaja de optimizar el uso de materiales, ajustar los espesores y refuerzos requeridos, y anticipar eventuales fallos estructurales. La modelación tridimensional también permite mejorar la coordinación con otras disciplinas, como instalaciones electromecánicas, reduciendo interferencias y facilitando el proceso constructivo.

12.5 Inclusión de validación empírica como herramienta clave para la precisión estructural

Uno de los pilares fundamentales para el desarrollo confiable, de modelos estructurales, es la verificación de los resultados obtenidos mediante simulación computacional, con datos que provengan de ensayos empíricos o de monitoreo de estructuras reales. Esta práctica fortalece el proceso de diseño y refuerza la fiabilidad de las decisiones

ingenieriles, especialmente cuando se comparan soluciones estructurales tan contrastantes como las losas postensadas y las losas con núcleo tubular.

La aplicación de herramientas de análisis estructural, como el *software* ETABS, permite evaluar múltiples escenarios de carga y comportamiento de elementos. Sin embargo, la robustez de estos resultados depende en gran medida de la validez de los supuestos utilizados, como las condiciones de frontera, los parámetros de rigidez o las propiedades físicas de los materiales. Por ello, se vuelve imperativo respaldar estos análisis con información empírica, obtenida ya sea de ensayos de laboratorio a escala reducida o de instrumentación *in situ* en edificaciones reales.

En este contexto, se sugiere establecer programas de validación paralelos, donde los resultados de deflexiones, momentos flectores, esfuerzos cortantes y desplazamientos se contrasten con datos obtenidos mediante sensores, extensómetros o estaciones de monitoreo estructural. Esta correlación no solo permite ajustar los modelos numéricos, sino que también contribuye al desarrollo de criterios de diseño, más ajustados a las condiciones constructivas locales y al comportamiento real de los sistemas estructurales en servicio.

En el caso particular de las losas tubulares, la validación empírica adquiere aún mayor relevancia, debido a la complejidad geométrica introducida por los vacíos internos, los cuales modifican la distribución de esfuerzos y pueden inducir fenómenos no lineales, difíciles de anticipar con precisión en modelos convencionales. Por su parte, en las losas postensadas, la confirmación del comportamiento previsto bajo la acción del pretensado

resulta clave para garantizar que las pérdidas por fricción, anclajes o retracción del concreto, han sido correctamente estimadas y compensadas.

Por tanto, se recomienda que futuros desarrollos ingenieriles orientados al diseño o implementación de estos sistemas estructurales, incorporen protocolos de retroalimentación empírica. Esto además de incrementar la confiabilidad de los modelos utilizados, sienta las bases para la mejora continua de las metodologías de simulación, acercando la ingeniería estructural a estándares más robustos, verificables y ajustados a la realidad construida.

13. Síntesis de Resultados

El presente estudio permitió desarrollar una caracterización técnica integral, de dos sistemas estructurales ampliamente utilizados en edificaciones modernas: las losas postensadas y las losas tubulares. Con base en un enfoque metodológico riguroso, que incluyó simulaciones tridimensionales en el *software* ETABS y la aplicación de criterios normativos nacionales e internacionales, se logró cuantificar con precisión el comportamiento estructural de cada tipología, bajo condiciones de carga gravitacional, combinada y dinámica.

Los resultados revelaron, que las losas postensadas ofrecen un desempeño estructural sobresaliente, en términos de control de deformaciones, distribución uniforme de esfuerzos internos y optimización del consumo de acero pasivo. La acción del pretensado genera una compresión artificial en el concreto, que mitiga la aparición de fisuras, desplaza la curva de deformación hacia zonas más seguras y permite reducir considerablemente el momento flector máximo esperado. Esta eficiencia se traduce en

una mayor rigidez estructural, lo que las hace particularmente útiles en edificaciones con grandes luces, plantas arquitectónicas abiertas y altas demandas de servicio.

En contraposición, las losas tubulares demostraron una notable eficiencia volumétrica, al reducir el peso propio del sistema, gracias a la incorporación de vacíos internos. Esta reducción de masa no estructural produce efectos positivos, sobre las solicitaciones que se transfieren a la cimentación y a los elementos verticales, lo cual puede resultar beneficioso en edificaciones de baja a media altura, o en terrenos con capacidad portante limitada. No obstante, esta ligereza estructural se presenta acompañada de mayores exigencias en términos de diseño por torsión, cortante y momentos localizados, especialmente en zonas de borde y apoyos. Las discontinuidades geométricas, propias del sistema tubular, introducen desafíos adicionales en la predicción del comportamiento dinámico, haciendo necesaria una mayor precisión en el modelado numérico y en la disposición del refuerzo.

Desde una perspectiva comparativa, se constató que ambos sistemas cumplen con los requisitos de seguridad estructural establecidos por normativas como el ACI 318-19 y el CSCR 2010, pero lo hacen bajo enfoques y mecanismos de resistencia muy distintos. Mientras el sistema postensado recurre a la introducción de fuerzas internas controladas, el sistema tubular se apoya en la geometría para alcanzar una mayor eficiencia en el uso de materiales.

Además, el análisis permitió evidenciar que la respuesta estructural, ante combinaciones de carga sísmica, presenta diferencias sustanciales entre ambas soluciones. Las losas postensadas mostraron una menor demanda de deriva de entrepiso y mayor capacidad

para disipar energía debido al control activo de deformaciones, mientras las losas tubulares, si bien respondieron adecuadamente, exhibieron zonas críticas más susceptibles a concentraciones de esfuerzo torsional.

Finalmente, la validación de resultados mediante la comparación entre reacciones obtenidas por simulación y cargas calculadas manualmente, demostró un margen de error inferior al 0,5 %, lo cual respalda la confiabilidad del modelo propuesto. Esta consistencia metodológica refuerza la viabilidad de emplear herramientas como ETABS en etapas tempranas del diseño estructural para anticipar comportamientos y optimizar recursos de manera eficaz.

En conclusión, el trabajo realizado ofrece un marco técnico sólido para la toma de decisiones en proyectos estructurales, sustentado en evidencia cuantitativa, normativa vigente y principios de eficiencia estructural. La selección del sistema de losa más adecuado deberá considerar, no solo las ventajas particulares de cada solución, sino también el contexto constructivo, los objetivos arquitectónicos y las condiciones operativas del entorno en que se desarrollará el proyecto.

14. Líneas de Investigación Futuras

El análisis comparativo desarrollado, entre losas postensadas y tubulares, ha abierto múltiples oportunidades para investigaciones complementarias, orientadas a profundizar en aspectos aún no completamente explorados o a validar con mayor precisión los hallazgos obtenidos. Estas líneas de investigación se plantean como una proyección estratégica del presente trabajo, con el fin de fomentar el avance técnico en el diseño, análisis y ejecución de sistemas de losas estructurales en contextos diversos.

1. Evaluación Experimental a Escala Reducida en Ambientes Hostiles

Una de las líneas de desarrollo más prometedoras en el estudio de sistemas estructurales como las losas postensadas y tubulares es la implementación de ensayos experimentales a escala reducida, ejecutados en condiciones ambientales desfavorables o agresivas. Este tipo de evaluación resulta fundamental para validar los modelos numéricos, comprender fenómenos no lineales y obtener parámetros empíricos, que permitan ajustar los criterios de diseño a situaciones reales, que exceden los supuestos estándar de laboratorio.

El concepto de “ambiente hostil” no se limita únicamente a factores meteorológicos extremos como la humedad permanente, la salinidad atmosférica o los ciclos térmicos acentuados. También incluye situaciones estructurales críticas, como cargas dinámicas inesperadas, acciones sísmicas locales de alta intensidad, deformaciones diferidas, o incluso la exposición prolongada a agentes químicos en ambientes industriales o urbanos contaminados.

Importancia de la evaluación a escala reducida

El uso de modelos a escala permite replicar, condiciones de comportamiento estructural real, con menor inversión y en menor tiempo, facilitando así el análisis de múltiples escenarios. En particular, se pueden estudiar aspectos como:

- La formación y propagación de fisuras bajo cargas repetitivas o combinadas (flexión + torsión).
- El patrón de deterioro progresivo en zonas de alta concentración de esfuerzos.

- La capacidad de redistribución interna del sistema estructural ante fallas localizadas.
- El efecto de la humedad, la carbonatación o la exposición a cloruros sobre el acero de refuerzo.

Para las losas postensadas, este enfoque es especialmente útil para evaluar la pérdida de tensión en tendones, debido a efectos de corrosión acelerada, así como la evolución de la fisuración superficial, en presencia de retracción y temperatura variable. En el caso de las losas tubulares, los ensayos permiten identificar vulnerabilidades, asociadas a la geometría interna discontinua, como el debilitamiento por acumulación de humedad en los vacíos, o la sensibilidad frente a esfuerzos torsionales dinámicos.

Diseño experimental y metodología sugerida

El desarrollo de esta línea de investigación implicaría el diseño de maquetas físicas con proporciones geométricas y mecánicas representativas, instrumentadas con sensores de deformación, extensómetros, galgas eléctricas y cámaras térmicas. Se sugiere aplicar cargas controladas en distintos puntos y medir variables clave como:

- Deformaciones verticales máximas.
- Ancho de fisura a lo largo del tiempo.
- Distribución de tensiones internas.
- Comportamiento post-fisuración y ductilidad residual.
- Pérdida de capacidad resistente bajo condiciones cíclicas.

Estas pruebas pueden complementarse, con ciclos acelerados de exposición ambiental en cámaras de niebla salina, ciclos húmedo-secos o pruebas de inmersión controlada, a

fin de replicar los efectos de envejecimiento y agresión externa, en condiciones tropicales o costeras.

Beneficios del enfoque experimental en ambientes extremos

La principal ventaja de esta aproximación reside, en su capacidad para aportar datos concretos y realistas, difíciles de simular numéricamente, los cuales pueden utilizarse para ajustar factores de seguridad, modificar parámetros de diseño normativo, e incluso generar nuevas recomendaciones técnicas adaptadas al entorno local.

Además, los resultados pueden utilizarse para entrenar modelos de inteligencia artificial, orientados a la predicción de vida útil estructural, mantenimiento preventivo y detección temprana de patologías constructivas.

Este tipo de estudios experimentales, cuando se integran dentro de una estrategia de investigación aplicada, permiten consolidar el conocimiento teórico con base empírica, mejorando significativamente la calidad, seguridad y adaptabilidad de las soluciones estructurales, propuestas en proyectos de edificación.

2. Análisis Económico Profundizado desde la Perspectiva del Ciclo de Vida de la Estructura

En el ámbito de la ingeniería estructural moderna, ya no resulta suficiente evaluar las alternativas de diseño, únicamente con base en el costo inicial de los materiales o el tiempo estimado de construcción. La sostenibilidad financiera de una solución estructural depende en gran medida de su comportamiento económico a lo largo del tiempo. En este sentido, se vuelve imprescindible aplicar un enfoque que contemple todas las fases del

ciclo de vida del sistema constructivo: desde la inversión inicial hasta el mantenimiento y la eventual rehabilitación o reemplazo.

Este enfoque integral, conocido como análisis del costo del ciclo de vida (LCCA, por sus siglas en inglés), permite visualizar de forma realista el impacto económico total, que tendrá una determinada decisión estructural. En este contexto, comparar los sistemas de losas postensadas y losas tubulares exige, trascender el análisis convencional centrado en el presupuesto de obra, para incorporar variables dinámicas que afectan la rentabilidad, en el mediano y largo plazo.

Comparación de costos operacionales y de mantenimiento

Si bien las losas tubulares pueden presentar una ventaja económica inicial, al disminuir el uso de concreto y reducir las cargas permanentes sobre los elementos verticales y las cimentaciones, esta economía aparente podría verse contrarrestada por una mayor complejidad en el refuerzo, tiempos de ejecución más prolongados y posibles intervenciones correctivas en zonas donde las tensiones localizadas superen los valores admisibles. Adicionalmente, su comportamiento frente a cargas dinámicas o sísmicas puede demandar soluciones constructivas específicas, que incrementan el presupuesto general.

Por otro lado, aunque el sistema postensado conlleva una inversión inicial más significativa, debido a la incorporación de cables de alta resistencia, sistemas de anclaje y la necesidad de mano de obra especializada, los beneficios a largo plazo son evidentes: menor incidencia de fisuración, reducción del espesor de entrepisos, mayor vida útil estructural y por ende, menos intervenciones durante el uso operativo del edificio.

Factores incluidos en un análisis económico con enfoque de ciclo de vida

La evaluación detallada debe considerar, todos aquellos aspectos que influyen en el rendimiento económico total, de la solución estructural, entre ellos:

- Costo de adquisición de materiales estructurales y no estructurales.
- Equipos y tecnología necesarios para la ejecución del sistema.
- Duración de la obra y su relación con los costos indirectos del proyecto.
- Frecuencia estimada de mantenimiento o intervención técnica.
- Desempeño ante ambientes agresivos o exposición constante a cargas dinámicas.
- Impacto en la eficiencia energética o acondicionamiento interior.
- Repercusión económica ante fallas prematuras o requerimientos de refuerzo posterior.

Aplicabilidad práctica en distintos escenarios constructivos

En edificaciones destinadas a uso intensivo o que requieren alta continuidad operativa como clínicas, universidades, centros logísticos o aeropuertos, la elección del sistema postensado podría representar una inversión estratégica que se traduce en menores interrupciones, menos mantenimiento y mayor estabilidad estructural durante décadas. En cambio, para obras modulares, viviendas sociales o proyectos con horizonte de servicio limitado, el sistema tubular puede ser más rentable, siempre y cuando se controlen adecuadamente los aspectos técnicos y estructurales que podrían incidir negativamente en su durabilidad.

3. Evaluación Sísmica Mediante Técnicas Avanzadas de Simulación Numérica

En contextos geotécnicos y estructurales, donde la actividad sísmica representa un factor crítico de diseño, como es el caso del territorio costarricense, se hace imprescindible recurrir a herramientas de simulación avanzada, que permitan una representación realista del comportamiento dinámico de las edificaciones. El análisis sísmico tradicional, basado en fuerzas estáticas equivalentes, ha demostrado que se limita en su capacidad de capturar efectos como la interacción modal, la torsión accidental o la amplificación de derivas en estructuras irregulares. Por ello, en esta investigación se adoptó un enfoque más riguroso, sustentado en modelos tridimensionales elaborados en el *software* ETABS, integrando espectros de diseño ajustados a la normativa local (CSCR 2010) y diversas combinaciones de carga dinámicas.

Fundamento técnico de la simulación espectral

El procedimiento adoptado incluyó, el cálculo del periodo fundamental del sistema, mediante métodos aproximados y validación posterior con análisis modal. Este parámetro permitió seleccionar, el espectro de respuesta elástica más representativo para el sitio, considerando la categoría de uso de la edificación y la zona de amenaza sísmica. A partir de este espectro, se definieron combinaciones de carga tipo E1 y E2, que integran el efecto de los sismos en dos direcciones ortogonales, aplicadas de forma simultánea y utilizando factores de participación modal, amortiguamiento estructural y rigidez efectiva, según lo estipulado por los lineamientos normativos.

El empleo del método de superposición modal permitió, estimar las respuestas máximas esperadas en cada elemento, incluyendo derivas de entrepiso, fuerzas internas y

desplazamientos relativos. Esta aproximación resulta especialmente útil en losas, donde el comportamiento inercial puede amplificarse, por condiciones de borde no uniformes, o por distribuciones asimétricas de rigidez en planta.

Impacto en la evaluación del desempeño de los sistemas analizados

Uno de los aportes más significativos, del análisis espectral, fue evidenciar que las losas postensadas, debido a su alta rigidez flexional inducida por la precompresión, presentaron derivas laterales controladas y distribuciones de carga más eficientes, incluso en zonas donde se concentran aceleraciones sísmicas significativas. Este comportamiento confirma su idoneidad, para edificaciones de uso esencial, o con geometrías abiertas que exigen altos estándares de seguridad estructural.

En contraste, las losas tubulares, si bien presentaron un desempeño global aceptable, evidenciaron concentraciones de esfuerzos inerciales en puntos específicos, donde la discontinuidad geométrica de los vacíos internos afectó, la distribución armónica de las cargas sísmicas. Esta condición obliga a realizar verificaciones adicionales, en zonas de transición y anclaje, sobre todo cuando se espera una respuesta no lineal del sistema, bajo movimientos sísmicos severos.

Validación normativa y aportes al diseño estructural

El uso de espectros de diseño, derivados del código sísmico nacional, permitió validar que ambas tipologías cumplen con los niveles de seguridad exigidos, en cuanto a desplazamientos máximos permisibles, capacidad de ductilidad y rigidez entrepisos. No

obstante, el proceso de simulación también reveló, que el diseño debe ir más allá del cumplimiento mínimo normativo. Es recomendable adoptar estrategias de diseño basadas en desempeño, en donde no solo se asegure que la estructura “resista” el sismo, sino que mantenga su funcionalidad, sin pérdida significativa de capacidad.

Recomendaciones derivadas del análisis sísmico avanzado

- Incorporar modelos de interacción suelo-estructura cuando el proyecto se ubique sobre suelos blandos o rellenos no consolidados.
- Realizar estudios de sensibilidad de parámetros modales, considerando variaciones en rigidez y masa, debido a cargas operativas o remodelaciones futuras.
- Aplicar factores de sobrerresistencia y redistribución, para absorber irregularidades no contempladas en el modelo original.
- Verificar concentraciones de energía modal, en elementos no estructurales sensibles (tabiques, cielorrasos, fachadas), cuya falla podría comprometer la seguridad de ocupantes.
- Emplear dispositivos de disipación o aislamiento sísmico en edificaciones esenciales, cuando el análisis especifique deformaciones excesivas.

Este análisis avanzado permitió, no solo evaluar la respuesta sísmica de los sistemas comparados, sino también extraer criterios técnicos, que guíen el diseño estructural bajo una visión integral, adaptada a las exigencias de seguridad, funcionalidad y resiliencia que demanda la ingeniería del siglo XXI.

4. Evaluación Integral del Desempeño Estructural de Losas con Materiales y Tecnologías Emergentes en Ambientes Constructivos Latinoamericanos

Planteamiento de la línea de estudio

Se propone desarrollar una investigación, orientada al análisis comparativo del comportamiento estructural, durabilidad y viabilidad económica de losas diseñadas con materiales no convencionales y soluciones tecnológicas avanzadas, específicamente enfocada en contextos constructivos de América Latina. Esta línea de investigación busca profundizar en la incorporación de concretos de alta resistencia, refuerzos poliméricos (FRP), fibras estructurales híbridas y técnicas constructivas asistidas por herramientas digitales, en sistemas estructurales de losas, tanto macizas como aligeradas (postensadas o tubulares).

Justificación técnica y académica

La creciente necesidad de mejorar la eficiencia constructiva, reducir la huella ambiental y enfrentar condiciones adversas como la corrosión, la humedad o la sismicidad, exige la aplicación de materiales avanzados, que superen las limitaciones del concreto armado tradicional. No obstante, su implementación en el entorno latinoamericano ha sido limitada, por la falta de estudios específicos que validen su aplicabilidad local.

Esta propuesta responde a la necesidad de generar conocimiento técnico aplicable, mediante el desarrollo de modelos numéricos, prototipos experimentales y análisis multicriterio, que evalúen cómo estos nuevos materiales influyen en parámetros clave

como el momento flector último, deformaciones bajo carga, resistencia a la fisuración, ciclos térmicos y desempeño frente a acciones dinámicas.

Objetivo general

Evaluar el comportamiento estructural, eficiencia técnica y sostenibilidad de losas construidas con materiales y tecnologías emergentes, en comparación con los sistemas convencionales, a través de simulaciones numéricas, ensayos experimentales a escala reducida y análisis de ciclo de vida.

Objetivos específicos

- Diseñar modelos tridimensionales con *software* estructural (ETABS, SAP2000, Abaqus) para simular losas utilizando:
 - Concreto de ultra alta resistencia.
 - Refuerzos no metálicos (GFRP, CFRP).
 - Aditivos con propiedades auto conservantes.
 - Elementos prefabricados generados mediante impresión 3D.
- Verificar experimentalmente la respuesta estructural de losas prototipo con dichos materiales, bajo combinaciones de carga gravitacional y dinámica.
- Determinar la viabilidad técnico-económica mediante un análisis de costos integrados con el ciclo de vida de los materiales y su impacto ambiental.
- Proponer lineamientos técnicos para su implementación práctica en edificaciones latinoamericanas, con enfoque en sostenibilidad, eficiencia y normativas locales.

Metodología sugerida

- **Fase 1:** Revisión documental y selección de materiales emergentes de mayor relevancia técnica.
- **Fase 2:** Modelado estructural paramétrico utilizando *software* especializado, para simular distintos escenarios de carga.
- **Fase 3:** Construcción de prototipos físicos a escala 1:2 o 1:3, sometidos a ensayos de carga estática, impacto y humedad acelerada.
- **Fase 4:** Evaluación comparativa de desempeño estructural, ambiental y económico.
- **Fase 5:** Generación de recomendaciones de diseño y aplicación para contextos locales.

Aporte esperado

Este estudio permitirá, cerrar la brecha existente entre el potencial teórico de los materiales y tecnologías emergentes y su implementación práctica en proyectos reales. Además, proporcionará evidencia técnica, que respalde su uso en normativas futuras, abriendo camino hacia una construcción más resiliente, inteligente y sostenible.

REFERENCIAS

3.3 FUENTES DE INFORMACIÓN

- Alfaro, S. (2021). Comparación de costos de construcción entre losas aligeradas y macizas en centros comerciales [Tesis de grado, Universidad Latina de Costa Rica].
- Alvarado, R. & Castro, M. (2022). Comparación de sistemas de losas: postensadas versus aligeradas en edificaciones comerciales. *Revista de Ingeniería Civil Latinoamericana*, 18(2), 33–48.
- American Concrete Institute. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). ACI.
- Arce, E. (2019). Optimización estructural en losas postensadas: Aplicación práctica en Costa Rica [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Asociación Costarricense de Normas Técnicas. (2010). Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR-10). INTECO.
- Asociación Costarricense de Normas Técnicas (INTECO). (2016). INTE C104: Cemento hidráulico: Requisitos y clasificación. INTECO.
- Barrantes, J. & Obando, C. (2020). Evaluación de costos y tiempos en losas postensadas para edificaciones institucionales en San José. *Revista Costarricense de Construcción*, 13(1), 27–42.
- Barreto, M. & Quirós, L. (2020). Análisis del comportamiento estructural de losas aligeradas en edificaciones de altura media en Costa Rica. *Revista Centroamericana de Ingeniería Estructural*, 28(1), 65–80.

- Bermúdez, A. & Solano, D. (2018). Análisis estructural de losas tubulares bajo cargas gravitacionales y sísmicas en zonas urbanas. *Revista Ingeniería y Sociedad*, 10(3), 91–107.
- Bolaños, R. (2023). Eficiencia estructural de losas con cavidades longitudinales en edificios de oficinas. *Revista Avances en Ingeniería Civil*, 8(1), 42–55.
- Bonilla, F. (2018). Comparación de métodos constructivos para entrepisos: losa sólida versus losa aligerada. *Revista Ingeniería de la Construcción*, 15(3), 56–70.
- Calavera, J. (2013). Losas aligeradas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
- Campos, K. (2017). Integración de criterios de eficiencia energética y estructural en el diseño de losas. *Revista Tecnología y Desarrollo*, 6(1), 55–70.
- Cañas Guerrero, I. (1999). Tecnología de la edificación. Elementos no estructurales. Ediciones UPC.
- Chaves, A. (2021). Diseño comparativo entre losas postensadas y reticulares en edificios residenciales [Tesis de licenciatura, Universidad Fidélitas].
- fib. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. International Federation for Structural Concrete.
- García, J. (2016). Diseño y análisis de losas aligeradas: enfoque práctico con base en normativa internacional. Universidad Politécnica de Madrid.
- Gómez, A. (2021). Evaluación del ciclo de vida de losas de concreto en zonas urbanas de Costa Rica. *Revista Estructuras Sostenibles*, 4(1), 20–34.

- González, C. (2020). Modelado de losas postensadas mediante elementos finitos. *Revista Técnica del TEC*, 22(2), 33–47.
- Gutiérrez, R. (2017). Manual de construcción de edificaciones sismo resistentes. Universidad de Costa Rica.
- Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC). (2015). Manual de diseño y construcción con concreto reforzado. ICCYC.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). (2020). Simulación computacional para evaluación sísmica de edificaciones mediante modelos tridimensionales. Departamento de Ingeniería Civil.
- Jiménez, P. & Vargas, M. (2020). Evaluación económica y estructural de losas nervadas en zonas urbanas. *Revista Ingeniería Viva*, 17(2), 66–82.
- López, J. & Martínez, R. (2016). Análisis de costos en losas postensadas y losas tradicionales. *Revista de Construcción y Diseño*, 14(1), 101–118.
- Madrigal, J. (2019). Evaluación del desempeño estructural de losas huecas prefabricadas. *Revista Ingeniería Aplicada*, 5(2), 99–112.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2014). Microestructura, propiedades y materiales del concreto. McGraw-Hill Educación.
- Méndez, I. (2022). Comparación entre sistemas de losas nervadas y losas macizas en términos de ahorro de material. *Revista UCR Ingeniería Civil*, 10(1), 28–40.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2020). Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes. Dirección de Construcción.

- Ministerio de Salud de Costa Rica. (2010). Reglamento para la prevención de riesgos en obras de construcción. Dirección de Salud Ocupacional.
- Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH). (2016). Reglamento para la aprobación de los planos constructivos y permisos de construcción.
- Montero, H. (2022). Tecnologías emergentes en ingeniería estructural: materiales sostenibles y técnicas de impresión 3D. *Revista Latinoamericana de Innovación Constructiva*, 6(2), 32–50.
- Neville, A. M. (2012). *Propiedades del concreto* (5.^a ed.). Pearson Educación.
- Nilson, A. H., Darwin, D. & Dolan, C. W. (2011). *Diseño de estructuras de concreto* (14.^a ed.). McGraw-Hill.
- Pérez, C. (2022). Comportamiento sísmico de losas postensadas bajo escenarios críticos en ETABS [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Nacional].
- Ramírez, A. (2022). Optimización estructural de sistemas de losas mediante técnicas de simulación computacional [Tesis de posgrado, Universidad Técnica Nacional].
- Ramírez, J. (2018). Criterios de selección estructural en proyectos de edificación vertical. *Revista Construcción Moderna*, 7(3), 93–105.
- Rodríguez, C. (2019). Estudio comparativo de normativas ACI y Euro código en sistemas de losas aligeradas. *Revista Técnica de Ingeniería*, 27(1), 89–105.
- Rojas, J. (2019). Evaluación de alternativas de diseño para sistemas de piso en edificios educativos. *Revista Ingeniería y Arquitectura*, 13(1), 61–74.

- Salas, E. (2020). Comparativa del uso de losas postensadas vs. losas macizas en proyectos institucionales costarricenses [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
- Salvatierra, A. (2018). Elementos de concreto reforzado: diseño y construcción. Editorial Tecnológica.
- Solís, L. (2018). Ventajas técnicas y económicas de losas postensadas frente a losas tradicionales. *Revista Costarricense de Ingeniería*, 21(1), 17–29.
- Soto, D. (2018). Análisis estructural considerando escenarios climáticos extremos y materiales alternativos. *Revista Internacional de Ingeniería Sísmica*, 11(3), 121–135.
- Tena-Colunga, A. & Rodríguez, M. E. (2005). Diseño sismorresistente de estructuras de concreto reforzado. Limusa.
- Torres, M. (2020). Comparación estructural entre losas macizas, reticulares y nervadas [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Varela, J. (2019). Evaluación del comportamiento estructural de losas nervadas mediante simulación en ETABS [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Vargas, E. (2017). Diseño estructural de losas tubulares para hospitales en zonas sísmicas de Costa Rica [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica].
- Vega, L. (2021). Influencia del tipo de losa en el comportamiento sísmico global de estructuras. *Revista Centroamericana de Estructuras*, 5(2), 49–60.
- Villanueva, R. (2015). Sistemas constructivos en concreto reforzado. Editorial Reverté.
- Zamora, M. (2020). Aplicación del código ACI 318-19 en diseño de losas postensadas en edificios de concreto armado. *Revista Costarricense de Ingeniería Civil*, 19(1), 75–89.

APÉNDICES Y ANEXOS

APÉNDICE 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS

Losa postensada: Sistema de losa de concreto en el que se insertan tendones de acero que se tensan después del fraguado del concreto para inducir esfuerzos de compresión.

Losa tubular: Losa prefabricada o vaciada *in situ* con cavidades longitudinales internas para aligerar el peso estructural manteniendo la resistencia.

Concreto reforzado: Concreto al que se le ha incorporado acero (barras o mallas) para mejorar su capacidad de resistir esfuerzos de tracción.

Tendón de postensado: Cable de acero de alta resistencia utilizado para postensar losas y generar compresión interna.

Momento flector: Esfuerzo interno que genera curvatura en un elemento estructural sometido a cargas perpendiculares a su eje longitudinal.

Corte o fuerza cortante: Fuerza que actúa de forma paralela a la sección transversal de un elemento estructural y puede inducir fallas por deslizamiento.

Carga gravitacional: Fuerzas verticales originadas por el peso propio de la estructura y cargas permanentes.

Carga sísmica: Fuerzas horizontales o dinámicas inducidas por movimientos sísmicos en la base de la estructura.

Cavidad estructural: Vacíos internos diseñados dentro de una losa para disminuir su peso sin comprometer su capacidad estructural.

Diafragma rígido: Elemento que distribuye las cargas laterales a los elementos verticales resistentes como muros o marcos.

Esfuerzo axial: Esfuerzo normal que actúa a lo largo del eje longitudinal de un elemento estructural.

Deformación: Cambio de forma o dimensión de un cuerpo cuando se le aplica una carga.

Factor de seguridad: Relación entre la carga de falla y la carga de servicio admisible para garantizar la seguridad estructural.

Flexión: Acción de doblar un elemento estructural bajo una carga perpendicular.

Torsión: Esfuerzo que genera un giro a lo largo del eje longitudinal de un elemento.

Durabilidad estructural: Capacidad de una estructura de mantener su funcionalidad frente a condiciones ambientales y de carga a largo plazo.

Ductilidad: Capacidad de una estructura de deformarse sin fallar, permitiendo advertencia antes del colapso.

Simulación estructural: Proceso computacional que reproduce el comportamiento físico de una estructura ante cargas.

Modelo computacional: Representación matemática de una estructura con parámetros físicos reales para su análisis.

Elementos finitos: Método de análisis numérico que divide una estructura en pequeños elementos para estudiar su comportamiento.

ETABS: *Software* especializado en modelado, análisis y diseño estructural mediante elementos finitos.

Factor de eficiencia: Índice que relaciona el desempeño estructural con los recursos utilizados, como material o costo.

Análisis comparativo: Proceso de comparar distintos sistemas o soluciones bajo criterios técnicos, económicos o de seguridad.

Ciclo de vida: Enfoque que considera todos los costos asociados a una estructura desde su construcción hasta su demolición.

Normativa ACI: Conjunto de normas del American Concrete Institute que regulan el diseño con concreto estructural.

Código sísmico: Conjunto de reglas locales que define cómo diseñar estructuras sismorresistentes.

Análisis FODA: Técnica de análisis estratégico que identifica fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas.

Evaluación empírica: Proceso de validación mediante datos reales recolectados en campo o en laboratorio.

Optimización estructural: Mejora de sistemas estructurales a través del análisis y rediseño para alcanzar mayor eficiencia o seguridad.

Tecnologías emergentes: Aplicación de nuevos materiales o métodos en el diseño y construcción de estructuras.

Materiales sostenibles: Materiales con bajo impacto ambiental o que permiten reducir la huella de carbono de una estructura.

Ensayo a compresión: Prueba para medir la resistencia de un material al ser comprimido.

Ensayo a flexión: Prueba para medir la resistencia de un material al doblarse.

Normas ASTM: Normas emitidas por ASTM que especifican cómo realizar pruebas a materiales de construcción.

Hormigón: Nombre alternativo al concreto, utilizado comúnmente en Europa y América Latina.

Agregados: Material pétreo (grava o arena) que se mezcla con el cemento para formar concreto.

Módulo de elasticidad: Relación entre esfuerzo y deformación que indica la rigidez del material.

Coeficiente de Poisson: Relación entre la contracción transversal y la elongación longitudinal de un material.

Fuerza axial: Fuerza que actúa a lo largo del eje de un miembro estructural.

Sección transversal: Forma y dimensiones de la sección de un elemento estructural.

Longitud efectiva: Longitud del elemento estructural considerada para evaluar la inestabilidad.

Esbeltez: Relación entre longitud y dimensiones de un elemento, importante para evaluar pandeo.

Condiciones de borde: Condiciones impuestas en los extremos de un elemento (empotrado, articulado, libre, etc.).

Interacción suelo-estructura: Interacción entre las fundaciones y las características mecánicas del terreno.

Criterios de falla: Criterios utilizados para determinar el colapso estructural de un elemento.

Comportamiento dinámico: Estudio del comportamiento de estructuras sometidas a cargas dinámicas (sísmicas, viento, etc.).

Fuerzas internas: Esfuerzos desarrollados dentro de los elementos como resultado de cargas externas.

Resistencia última: Capacidad máxima de carga que puede soportar un elemento estructural antes de fallar.

Análisis no lineal: Técnica de modelado que considera relaciones no lineales entre cargas y deformaciones.

APÉNDICE 2:

1	Código	100-1		Descripción	Losa Tubular 375 m2			
	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total	Subcontrato	Total MO	Total Equipo
	Formaleta de 1/12 4 varas	24	Unidad	¢7 500,00	¢180 000,00			
	lamina metaldeck 01,10mm #22 lamina 15 metros	27	Unidad	¢152 000,00	¢4 104 000,00			
	reglas 1x4 semiduro en 4 varas	65	Unidad	¢2 950,00	¢191 750,00			
	varillas corrugada 3/4 grado 60 30% menos que otro sistema	525	Unidad	¢7 500,00	¢3 937 500,00			
	Alambre negro	210	metros	¢950,00	¢199 500,00			
	Clavos 2" con cabeza	25	kilos	¢2 200,00	¢55 000,00			
	Clavos 2 1/2 con cabeza	25	kilos	¢2 600,00	¢65 000,00			
	Clavos 2" de acero	1	kilos	¢4 500,00	¢4 500,00			
	Maxi acril 70 cubeta rinde 40 m2	10	cubeta	¢17 000,00	¢170 000,00			
	Losa Tubular 1 metro cuadrado	375	Unidad	¢16 089,47	¢6 033 551,25			
	varilla corrugada 5/8 grado 60 sacar pines	10	Unidad	¢5 000,00	¢50 000,00			
	concreto premezclado con bomba telescopica 280 kg/cm2	75	m3	¢145 000,00	¢10 875 000,00			
	Repello Fino saco 40kg	6	saco	¢7 500,00	¢45 000,00			
	Disco Diamantado de 9"	2	Unidad	¢75 000,00	¢150 000,00			
	Soldadura 6013 en 1/8"	5	kilos	¢25 000,00	¢125 000,00			
	Discos de corte metal de 9"	25	Unidad	¢27 000,00	¢675 000,00			
	Transportes	4	Unidad	¢15 000,00	¢60 000,00			
	Subcontratos							
		0				¢0,00		
		0				¢0,00		
		0				¢0,00		
	Mano de Obra							
	Supervisor	1	244	¢2 700,00			¢658 800,00	
	Operario	10	244	¢2 000,00			¢4 880 000,00	
	Ayudante	10	244	¢1600,00			¢3 904 000,00	
	OH/S o Ing. De Obra	1	244	¢3 500,00			¢854 000,00	
	Equipo	Cant	Dias	Precio/Unitario				
	Andamios	24	30	¢2 000,00				¢1440 000,00
	Caja de herramientas	10	10	¢1000,00				¢100 000,00
	Cortadora Concreto	1	3	¢95 000,00				¢285 000,00
	Esmeriladora	5	10	¢2 000,00				¢100 000,00
	Taladro	5	10	¢2 000,00				¢100 000,00
	Costos Subtotales				Materiales	Subcontrato	Mano de Obra	Equipo
					¢26 920 801,25	¢0,00	¢10 296 800,00	¢2 025 000,00
	Cierre del ítem							
	Cargas Sociales		51%			¢5 251 368,00		
	Seguridad		2%			¢205 936,00		
	Administración		5%			¢1860 880,06		
	Utilidad e imprevistos		10%			¢3 721 760,13		
	Total		Losa Tubular 375 m2			¢50 282 545,44		
					Colones	Dolares		
				Total SIN IMPUESTOS:	¢50 282 545,44	¢100 364,36		
				I.V.A del 13 %	¢6 536 730,91	¢13 047,37		
				Total CON IMPUESTOS:	¢56 819 276,34	¢113 411,73		

APÉNDICE 3:

Código	100-1		Descripción	Losa Postensada 375 m2				
Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total	Subcontrato	Total MO	Total Equipo	
Formaleta de 1/12 4 varas	24	Unidad	¢7 500,00	¢180 000,00				
lamina metaldeck 01,10mm #22 lamina 15 metros	27	Unidad	¢152 000,00	¢4 104 000,00				
reglas 1x4 semiduro en 4 varas	65	Unidad	¢2 950,00	¢191 750,00				
varillas corrugada 3/4 grado 60	750	Unidad	¢7 500,00	¢5 625 000,00				
Alambre negro	300	metros	¢950,00	¢285 000,00				
Clavos 2" con cabeza	25	kilos	¢2 200,00	¢55 000,00				
Clavos 2"1/2 con cabeza	25	kilos	¢2 600,00	¢65 000,00				
Clavos 2" de acero	1	kilos	¢4 500,00	¢4 500,00				
Maxi acril 70 cubeta rinde 40 m2	10	cubeta	¢17 000,00	¢170 000,00				
Linea postensado 27metros lineales 38mm	5	Unidad	¢150 000,00	¢750 000,00				
linea postensado 17 metros lineales 38mm	9	Unidad	¢85 000,00	¢765 000,00				
tubo poliducto pvc 50mm	288	metros	¢3 000,00	¢864 000,00				
tope ajuste postensado	28	Unidad	¢45 000,00	¢1 260 000,00				
varilla corrugada 5/8 grado 60 sacar pines	10	Unidad	¢5 000,00	¢50 000,00				
concreto premmezclado con bomba telescopica 280 kg/cm2	75	m3	¢166 000,00	¢12 450 000,00				
Repello Fino saco 40kg	6	saco	¢7 500,00	¢45 000,00				
Disco Diamantado de 9"	2	Unidad	¢75 000,00	¢150 000,00				
Soldadura 6013 en 1/8"	5	kilos	¢25 000,00	¢125 000,00				
Discos de corte metal de 9"	25	Unidad	¢27 000,00	¢675 000,00				
Transportes	4	Unidad	¢15 000,00	¢60 000,00				
Subcontratos								
	0				¢0,00			
	0				¢0,00			
	0				¢0,00			
Mano de Obra								
Supervisor	1	244	¢2 700,00			¢658 800,00		
Operario	10	244	¢2 000,00			¢4 880 000,00		
Ayudante	18	244	¢1600,00			¢7 027 200,00		
CHYS o Ing. De Obra	1	244	¢3 500,00			¢854 000,00		
Equipo		Cant	Dias	Precio/unitario				
Andamios	24	30	¢2 000,00				¢1440 000,00	
Caja de herramientas	10	10	¢1000,00				¢100 000,00	
Cortadora Concreto	1	3	¢95 000,00				¢285 000,00	
Esmeriladora	5	10	¢2 000,00				¢100 000,00	
Taladro	5	10	¢2 000,00				¢100 000,00	
Costos Subtotales					Materiales	Subcontrato	Mano de Obra	Equipo
					¢27 874 250,00	¢0,00	¢13 420 000,00	¢2 025 000,00
Cierre del Item								
				Cargas Sociales	51%	¢6 844 200,00		
				Seguridad	2%	¢268 400,00		
				Administración	5%	¢2 064 712,50		
				Utilidad e imprevistos	10%	¢4 129 425,00		
Total		Losa Postensada 375 m2			¢56 625 987,50			
				Colones	Dolares			
		Total SIN IMPUESTOS:		¢56 625 988	\$113 025,92			
		I.V.A del 13 %		¢7 361 378	\$14 693,37			
		Total CON IMPUESTOS:		¢63 987 366	\$127 719,29			

Anexo 1:



Anexo 2:

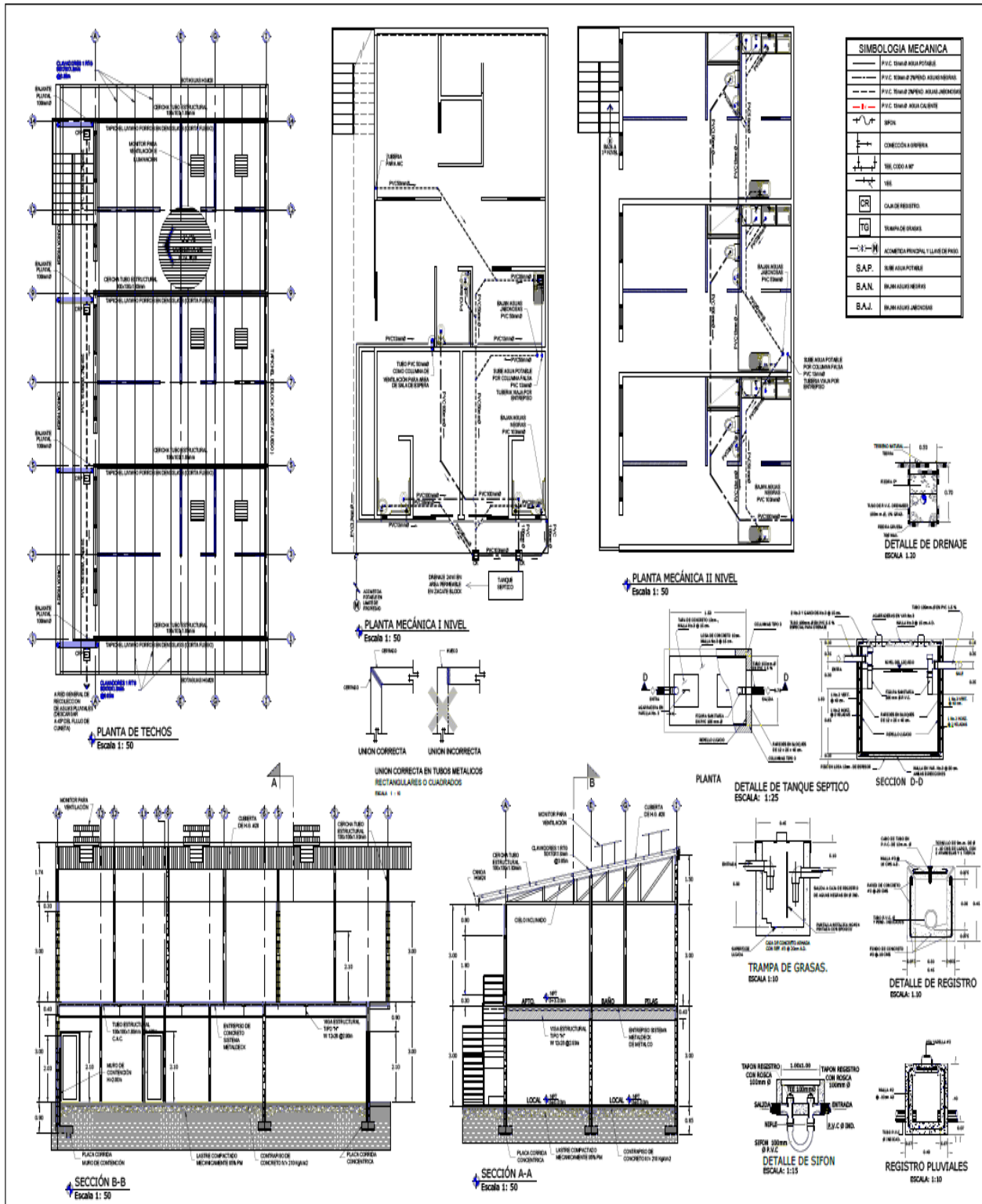


Anexo 3:

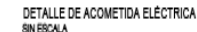
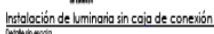




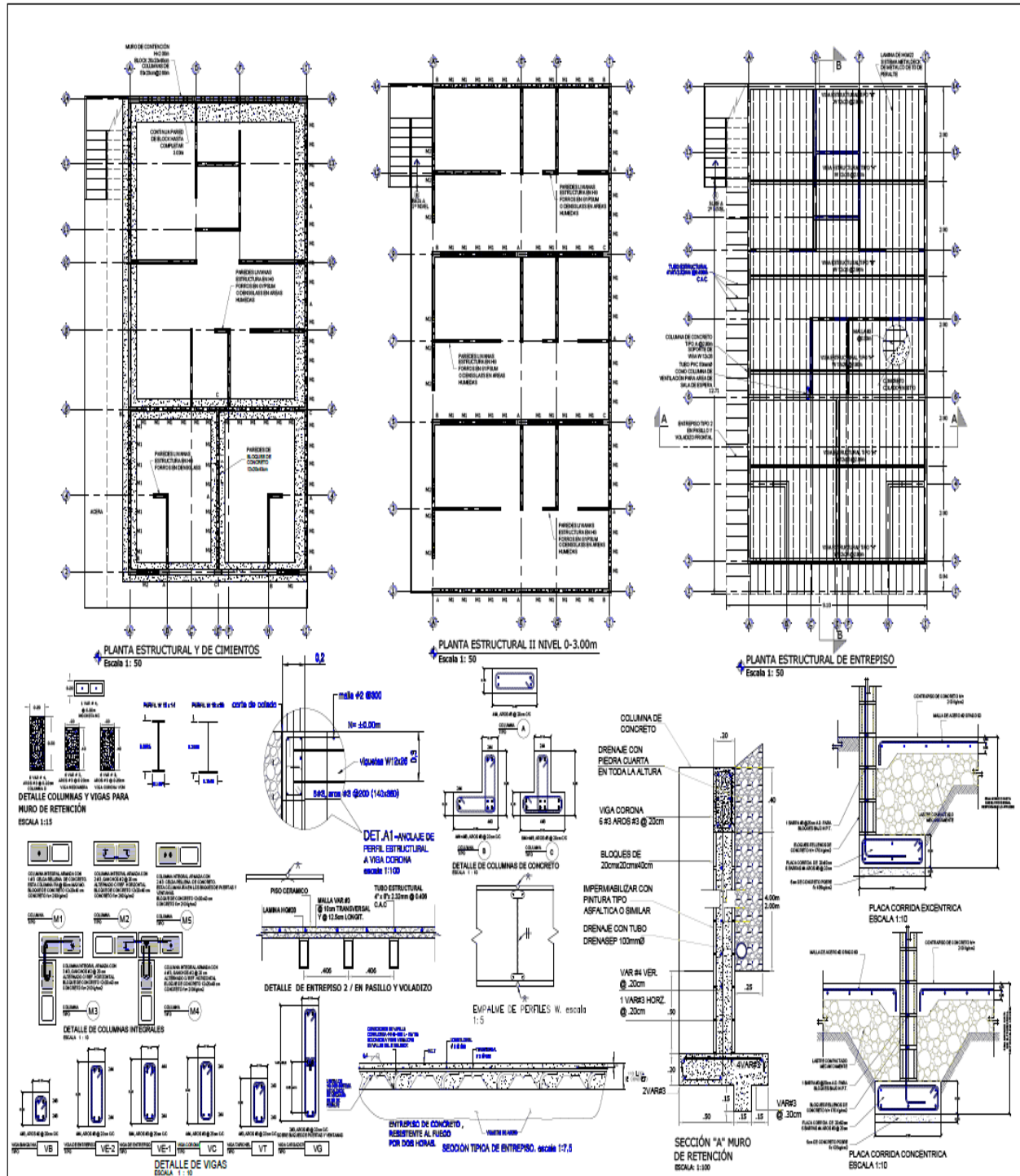
ANEXO 5:



ANEXO 6:

[illegible]

ANEXO 7:



ANEXO 8:



Comercializadora GAM

Atención
Teléfono

Constructora MECO, S.A.
Tel: | Fax: | Apdo.
Céd. Jurídica: 3-101-035078-17
50 m norte del Hotel San José Palacio

Cliente	Néstor Quirós Zelaya	Cotización	10034842
Cédula	99999999	Fecha del Documento	05.05.2025
Dirección	50 NORTE DEL HOTEL SAN JOSE PALACIO	Vigencia	05.05.2025 - 19.05.2025

Es un gusto presentarle nuestra oferta formal de los productos y/o servicios solicitados para el proyecto ubicado en: Santo Domingo, Heredia.

Item	Concepto	Cantidad	Precio	Importe
1	C 210KG/CM2 28D AGREMAX-19MM REV-15	15.500 M3	¢ 73,158.54	¢ 1,133,957.37
2	Servicio de bombeo de concreto	15.500 UN	¢ 11,612.91	¢ 180,000.11
Subtotal				¢ 1,313,957.48
IVA				¢ 170,814.47
Total				¢ 1,484,771.95
UN MILLÓN CUATROCIENTOS OCHENTA Y CUATRO MIL SETECIENTOS SETENTA Y UN COLONES CON NOVENTA Y CINCO CÉNTIMOS				

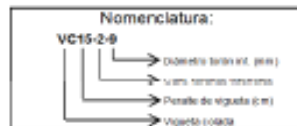
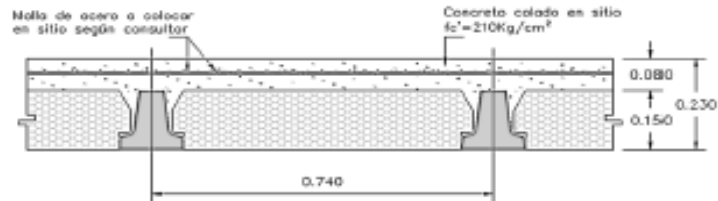
Observaciones

- No incluye servicio de bombeo.
- No incluye control de temperatura, horario lunes a sábado de 8 am a 5 pm, no incluye feriados ni domingos. - Viajes mínimo 8 m3, caso contrario tendrá un costo de ¢15 mil+ iva
- Tiempo descarga 60 min desde la llegada del camión.

Instrucciones de Pago

ANEXO 9:

Viguetas de 15cm de peralte (VC15-2-9) @ 0.74m con bloque de estereofón de 15cm de peralte (H660) y sobrelosa de 8cm de espesor

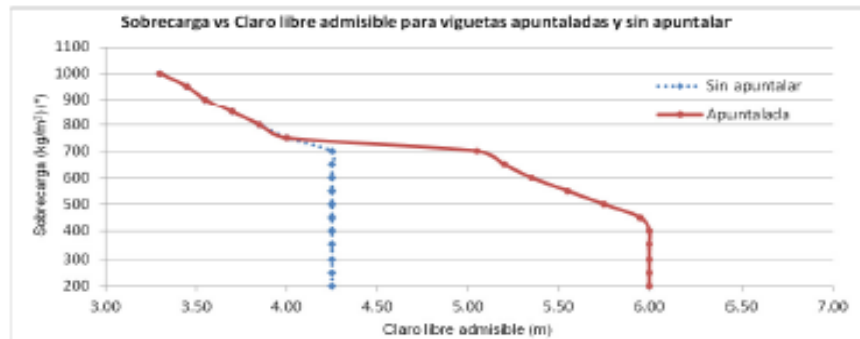


Propiedades de la Sección		
	Simple	Compuesta
A (cm²)	130	488
I (cm⁴)	2400	19991
y _{ax} (cm)	6.2	15.6
Peso de cada viga: 31 Kg/m		
Peso del sistema de entrepiso: 241 Kg/m²		
Concreto en sitio: 0.082 m³/m²		

Sobrecarga (*) CV + CP _{adic} (Kg/m²)	Claro libre admisible (m)	
	Sin apuntalar	Apuntalada
200	4.25	6.00
250	4.25	6.00
300	4.25	6.00
350	4.25	6.00
400	4.25	6.00
450	4.25	5.95
500	4.25	5.75
550	4.25	5.55
600	4.25	5.35
650	4.25	5.20
700	4.25	5.05
750	4.00	4.00
800	3.85	3.85
850	3.70	3.70
900	3.55	3.55
950	3.45	3.45
1000	3.30	3.30

(*) La sobrecarga es la suma de Carga Viva o Temporal (CV) + la Carga Permanente Adicional (CP_{adic}) en función de la Carga muerta adicional: Acabado de piso + Paredes livianas + Cielos + Instalac. Eléctricas + Otros

Las viguetas con claros libres iguales o mayores a 5.5 m podrían presentar problemas de vibración según su uso



ANEXO 10:



30 de mayo de 2025

PAC-4-20241115-PA06-JC-B

Ventas y Fabricación de Sistemas Constructivos, Armaduras
Prefabricadas, Adoquinados y Servicios de la Construcción.

San Joaquín de Heredia, 500 m Este de Amco.
Central Telefónica 4000-1310

Armablocke Sistemas de Construcción HCCP S.A. Ced: 3-101-648009

Estimado(a) Nestor Quiros para Armablocke Sistemas de Construcción es un placer cotizarle
los materiales para el proyecto Casa APAC con área total de 76 m2 por construirse en Santo Domingo, Heredia.

utilizando Losa de Cimiento sin hiladas de block enterradas; a continuación se detallan los materiales que se incluyen.

PRODUCTO	CANTIDAD
Entrepiso pretensado-Bloques de estereofon ,Nivel 1	76,0
-----LINEA SIN PRODUCTO-----	

Para la Cancelación de su Cotización los puede realizar por los siguientes medios

Banco de Costa Rica: 001-0298638-8 Cuenta IBAN: CR65015201001029863888

TOTAL ₡ 1 222 800,00
Transporte e impuestos incluidos

Christian Alvarado

Quién realiza esta cotización por parte Armablocke Sistemas de Construcción:

código interno: 2024080C0A0R0M0P0

Para Consultas o Sugerencias puede comunicarse con nosotros al teléfono 4000-1310 o bien a los siguientes

correos electrónicos sac@armablocke.com / ventas@armablocke.com será un gusto atenderle.