

*Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de construcciones*



Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Civil

Título: “Diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces”.

Autor: Karla Acosta Santana

Tutor: Lic. Ing. Pedro Hernández Delgado

Cotutor: M.Sc.Ing. Manuel Pedroso Martínez

Consultante: Ing. Carlos Alejandro Prado Camacho

Matanzas, 2020

PENSAMIENTO

“POR MUY LARGO QUE SEA EL CAMINO, LO MÁS IMPORTANTE ES EL PRIMER PASO”

VINICIUS DE MORAES

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente, declaro que Karla Acosta Santana es la única autora de este Trabajo de Diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

_____	_____	_____
Presidente	Secretario	Vocal

DEDICATORIA

A mis padres por ser la fuente de inspiración en este camino lleno de momentos difíciles y a la misma vez llenos de conocimiento, sobre todo por estar a mi lado brindándome el apoyo necesario para conseguir este triunfo, porque nunca dejaron de creer en mí y siempre mantuvieron la certeza de que lograría hacer este sueño realidad.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Lic. Ing. Pedro Hernández Delgado y M.Sc.Ing. Manuel Pedroso Martínez por todas las horas que me dedicaron y por saberme guiar en el desarrollo de esta tesis.

A mi consultante Ing. Carlos Alejandro Prado Camacho por todas las horas de sueño robadas y dedicadas al desarrollo de esta tesis.

A mis primos Lisandra y Eduardo por darme la fuerza para alcanzar mis metas.

A mi hermano de cariño y mi mejor amigo Mario Ernesto Almeida Bacallao por ser siempre mi soporte, apoyo y por liberarme siempre de las tensiones.

A mi hermano del corazón Alfredo Martínez Tapia por enseñarme que no hay camino difícil, ni meta imposible y que no hay nada que pueda más que nuestra fuerza interior.

A mi doctora Sara que es como mi segunda madre, a la que le debo mi vida y que ha estado a mi lado brindándome todo su apoyo como la niñita de sus ojos.

A la Escuela de Arte “Alfonzo Pérez Isaac” por enseñarme que cada sueño es posible alcanzarlo solo a través de esfuerzo y el trabajo duro.

A mis compañeros de aula que hoy son ingenieros, a los que siempre han estado a mi lado, a esos que siempre me hicieron olvidar el estrés y reírme de mi nerviosismo, al Club de los leprosos y a los ministros.

A los amigos falsos y a los verdaderos porque me enseñaron a no confiar tan rápido en las primeras impresiones y fueron la base para quien soy y quiero ser en mi vida profesional.

A la mejor alumna de medicina Marian Rivera Ponce y a Solange Días Domínguez por estar siempre a mi lado cuando necesité un consejo y por ser mis mejores amigas.

A todos los profesores que me enseñaron la base de esta carrera y que fueron mi motor impulsor durante todos estos años.

Al profe Boris por enseñarme a amar el álgebra.

A mi tía Tina que hoy no está conmigo, que me enseñó que la bondad y el amor de algunas personas no tiene límites y que la vida es el mayor reto que cualquier persona puede experimentar.

A mis abuelos Tano y Xiomara que son el mayor ejemplo de fortaleza que he visto en el mundo y que me muestran que la edad no es un impedimento, sino un impulso para demostrar que tanto somos capaces de hacer y de soportar.

RESUMEN

La losa postensada es una de las tecnologías que más ventajas brinda en su utilización en cuanto al ahorro de materiales, al eliminar las vigas y reducir la distancia de un nivel de piso respecto al otro, lo que le permite mejorar su rapidez de ejecución debido a su fácil montaje. La presente tesis tiene como problema investigativo ¿Cómo diseñar las losas postensadas para un edificio de grandes luces?, problema que se trazó para darle respuesta a la situación problémica que no es más que la necesidad de desarrollar en Cuba el diseño de las losas postensadas para un edificio con grandes luces, que permita flexibilidad en el diseño arquitectónico y facilite su construcción, demanda la introducción de nuevas tecnologías. Además se analizó el estado del arte referente a la tecnología de losa postensada, se desarrolló la metodología para el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces a partir de los criterios planteados en la (Amy Reineke Trygestad, 2005), (318, 2019), (T.Y.LIN, 1984) y (Reinforcement, 2006) y se diseñó las losas postensadas para un edificio de grandes luces partiendo del análisis y aplicación de la metodología desarrollada lo que permitió eliminar el problema investigativo y lograr la aplicación de este sistema tecnológico a los nuevos hoteles que se pretenden construir en Varadero para ampliar su capacidad hotelera y mejorar su resistencia a la misma vez que se logra un mayor ahorro económico sobre todo porque se reduce el número de importaciones de proyectos con esta tecnología.

Palabras claves: diseño; edificios; losa postensada; materiales y metodología.

ABSTRACT

The post-tensioned slab is one of the technologies that offers the most advantages in its use in terms of saving materials, by eliminating the beams and reducing the distance from one floor level to the other, allowing it to improve its speed of execution due to its easy assembly. The present thesis has as an investigative problem How to design the post-tensioned slabs for a large-span building? A problem that was designed to respond to the problem situation, which is nothing more than the need to develop in Cuba the design of the post-tensioned slabs for a building with large lights that allows flexibility in architectural design and facilitates its construction, demands the introduction of new technologies. In addition, the state of the art regarding post-tensioned slab technology was analyzed, the methodology for the design of post-tensioned slabs for a large span building was developed based on the criteria set forth in the (Amy Reineke Trygestad, 2005), (318 , 2019), (TYLIN, 1984) and (Reinforcement, 2006) and the post-tensioned slabs for a large-span building were designed based on the analysis and application of the developed methodology, which allowed eliminating the research problem and achieving the application of this technological system to the new hotels that are intended to be built in Varadero to expand their hotel capacity and improve their resistance at the same time that greater economic savings are achieved, especially since the number of imports of projects with this technology is reduced.

Keywords: design; buildings; post-tensioned slab; materials and methodology.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1: Estado del arte referente a la tecnología de losa postensada.	7
1.1 Características del pretensado.....	7
1.1.1 Reseña histórica del surgimiento de la tecnología del pretensado.....	7
1.1.2 Tipos de tensado.....	10
1.1.3 Tipos de armadura.....	12
1.1.4 Elementos singulares que componen las losas pretensadas.....	12
1.2 Características del postensado.....	15
1.2.1 Losa postensada.....	15
1.2.2 Factores que influyen en la selección de una losa.....	16
1.2.3 Tipología de las losas postensadas.....	17
1.2.4 Comportamiento de las losas postensadas.....	19
1.2.5 Ventajas y desventajas de la losa postensada frente a otras sollicitaciones de la losa de hormigón armado.....	20
1.2.6 Campo de aplicación de la tecnología del postensado.....	24
• A nivel nacional.....	25
• A nivel internacional.....	27
1.2.7 Proceso de ejecución de la losa postensada.....	30
1.2.8 Equipos empleados para el uso de la tecnología del postensado.....	31
1.2.9 Normas y códigos de cálculo y diseño empleados.....	31
1.3 Conclusiones parciales del capítulo.....	33
Capítulo 2: Metodología para el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces.....	34
2.1 Diseño y análisis de las losas postensadas.....	34
2.1.1 Métodos utilizados para el diseño, cálculo y análisis de las losas postensadas.....	35
2.1.1.1 Método de carga balanceada.....	37
2.1.1.1.1 Criterios para el balanceo de la carga.....	38
2.1.1.1.2 Esquema de comportamiento de carga balanceada.....	39
2.1.1.2 Método de diseño directo.....	41
2.1.2 Consideraciones y especificaciones para el diseño de las losas postensadas.....	44
2.1.3 Proceso de cálculo y diseño de las losas postensadas.....	46
2.2 Software utilizado para el diseño de las losas postensadas en Cuba.....	58
2.2.1 Pasos para el diseño de las losas postensadas mediante el Safe.....	61
2.3 Conclusiones parciales.....	67
Capítulo 3: Diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces	69
3.1 Descripción del objeto de estudio.....	69
3.1.1 Análisis de los niveles de losa a diseñar.....	69
3.2 Características de los materiales a emplear en los entrepisos.....	70
3.3 Diseño de las losas postensadas.....	71
3.3.1 Trazado de los ejes de carga.....	71
3.3.2 Determinación de la forma de trabajo de las losas.....	73

3.3.3 Determinación del espesor de las losas.....	76
3.3.4 Obtención de la carga que actúa sobre las losas.....	80
3.3.5 Realización del diseño por flexión.....	82
3.3.6 Realización del diseño por retracción y temperatura.....	83
3.3.7 Determinación de la cantidad de tendones y el espaciamiento entre ellos mediante el método de carga balanceada.....	83
3.3.8 Comprobación de cortante.....	92
3.3.9 Realización del modelo de las losas postensadas en el Safe.....	92
3.4 Conclusiones parciales.....	94
Conclusiones.....	95
Recomendaciones.....	96
Referencias bibliográfica.....	97
Anexos.....	99

INTRODUCCIÓN

El francés Eugène Freyssinet por medio de las propiedades de los materiales, llevó a la práctica de forma totalmente satisfactoria la idea del hormigón preesforzado. A partir de los años 30, la técnica empieza a utilizarse en Francia y Alemania, pero no se desarrolla hasta después de la Segunda Guerra Mundial, extendiéndose por todo el mundo en el campo de la obra civil. Dada la experiencia adquirida en la ejecución de puentes, arquitectos e ingenieros se concentraron en extender las ventajas técnicas del pretensado hacia la edificación. Las primeras aplicaciones de la técnica del postensado in situ aplicadas a la edificación datan de mediados de los años 50, sin embargo, el mayor desarrollo de esta técnica se encuentra en los años 70; periodo en el cual, el dominio del hormigón preesforzado y la reglamentación que lo definía, habían hecho en este campo sobre todo en Europa y en el norte de América, un espacio de verdaderos avances tecnológicos (Medina, 2013).

Una de las consecuencias de la aparición de esta novedosa tecnología fue el aumento en las luces de las construcciones, lo mismo en puentes que en edificios, que exigió un cambio radical en la forma actual de concebir una edificación y la introducción de novedades constructivas que garanticen tanto la preservación de las construcciones en el tiempo como la posibilidad de alcanzar alturas mayores sin tener que reducir las luces o alterar la concepción inicial de la edificación. El hormigón armado ante este cambio quedó en desventaja dando paso a lo que conocemos como hormigón postensado, hormigón que trajo consigo la posibilidad de resolver estos conflictos debido a la buena resistencia y otras características que posee, pero también mostró la necesidad de su estudio detallado para su correcta aplicación en las construcciones, única forma en la cual se pueden garantizar resultados satisfactorios con su empleo.

La aplicación de las losas postensadas en los edificios permitió cubrir grandes luces y ampliar la visión constructiva, además de ser relativamente sencillas de ejecutar debido a que están compuestas por armaduras activas, las cuales, se tensan una vez fraguado el hormigón y alcanzada la resistencia necesaria para resistir las tensiones inducidas (Castells, 2011). Este tipo de tecnología es muy utilizado en países como Estados Unidos, México y Panamá pertenecientes a América y otros como Alemania y

Francia que integran parte de Europa, surgió como resultado de la necesidad de lograr una mayor altura en las edificaciones y de romper con los esquemas fijados por los anteriores sistemas. Destacándose a nivel mundial estructuras como: El Centro comercial Sylvia Park que es un ejemplo del empleo de esta tecnología en el mundo. Este tipo de tecnología es empleada en zonas sísmicas por la estabilidad y resistencia que le garantiza a la estructura en países como: California, Ciudad de México, Chile y Japón.

En Cuba esta tecnología para el diseño de losas es muy poco conocida y por tanto existen escasos ejemplos de su aplicación destacándose el proyecto realizado por la Empai conocido por Hotel Donaire, que finalmente no fue ejecutado empleando el postensado(Delgado, 1999), y los edificios del Club Habana. Uno de los pioneros del postensados fue en Cuba el Puente Cuyaguaje aproximadamente en el año 1953, destacándose en su época por la luz que le permitía alcanzar el uso de esta tecnología y por ser un proyecto desarrollado y concebido en la región de América Latina.

Este sistema constructivo permite el desarrollo de losas planas sin vigas eliminando la interferencia con las mismas, disminuye la altura de un nivel de piso respecto al otro y de las columnas, por tanto, resulta más económico al posibilitar un mayor ahorro de los materiales al eliminar la necesidad de realizar un encofrado para las vigas, lo que facilita una mayor rapidez con el empleo de esta tecnología. Además, brinda la posibilidad de alcanzar un mayor número de pisos en las edificaciones, uno de los muchos elementos que lo hacen más factible y conveniente de aplicar en una edificación que la cotidiana losa de hormigón armado que brinda escasas ventajas en comparación a este sistema(Castells, 2011).

Es por esta razón que es necesario introducir en Cuba en mayor cantidad el empleo de este sistema sobre todo en edificios de grandes luces para garantizar no solo una mayor seguridad, resistencia, flexibilidad y estabilidad a las estructuras sino también para alcanzar un mayor ahorro económico y facilitar las construcciones, además de posibilitar que nuestro país sea capaz de desarrollar el empleo de esta tecnología por los profesionales de que dispone con pleno dominio y conocimiento del tema.

Situación problemática: La necesidad de desarrollar en Cuba el diseño de las losas postensadas para un edificio con grandes luces que permita flexibilidad en el diseño arquitectónico y facilite su construcción, demanda la introducción de nuevas tecnologías.

Problema de investigación: ¿Cómo diseñar las losas postensadas para un edificio de grandes luces?

Hipótesis: Si se logra el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces, se facilita el empleo de esta tecnología con sus ventajas estructurales y económicas, por los profesionales y el personal técnico vinculados a su diseño.

Objeto de estudio: Losas postensadas para edificios.

Campo de acción: Edificaciones de hormigón armado.

Objetivo general:

- Diseñar las losas postensadas para edificios de grandes luces

Objetivos Específicos:

- Analizar el estado del arte referente a la tecnología de losa postensada
- Desarrollar la metodología para el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces.
- Diseñar las losas postensadas para un edificio de grandes luces

Tareas de investigación:

- Análisis del estado del arte referente a la tecnología de losa postensada
- Desarrollo de la metodología para el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces
- Diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces

Para dar respuesta a los objetivos concebidos, se utilizaron un conjunto de métodos científicos, entre los que se destacan los métodos teóricos y empíricos.

Los métodos teóricos:

Analítico- sintético: Se utilizó para arribar a conclusiones a partir de diferentes enfoques mediante el análisis de la bibliografía consultada relacionada con el diseño de losas postensadas y para sistematizar la información recopilada y generalizarla, partiendo de un estudio de los puntos fundamentales a abarcar en la investigación.

Inductivo-deductivo: Posibilitó llegar a la generalización de los rasgos más importantes sobre el estado actual del conocimiento y aplicación de la tecnología de losa postensada en los estudiantes y profesionales vinculados a la Ingeniería Civil, por medio de la inducción y deducción de los aspectos más relevantes obtenidos a partir de la documentación científico-técnica disponible. Además, con la ayuda de este método se definió la hipótesis, y se precisaron algunas características que facilitaron el desarrollo de la investigación.

Histórico-lógico: Delimitó una línea en el tiempo de la evolución histórica del problema de investigación y su estado actual, partiendo del análisis de la información disponible sobre la aplicación de la tecnología de losas postensadas en Cuba y sus formas de diseño.

Modelación: Se utilizó para la elaboración de los modelos de las losas postensadas para el edificio analizado por medio de un software de diseño especializado en este tópico, a partir del cual se comprendió el funcionamiento y desarrollo del cálculo de las losas postensadas, además de los beneficios de su implementación en edificios de grandes luces en Cuba.

Los métodos empíricos:

Observación: Determinó por medio de un análisis y estudio visual de la información disponible y del área donde se emplazará la obra constructiva, la obtención de datos necesarios para el diseño de las losas en edificios de grandes luces en Cuba, mediante la tecnología del postensado.

Medición: Permitió mediante el análisis de los planos arquitectónicos disponibles del edificio en estudio, la obtención de medidas, lo que facilitó la realización y modelación de las losas postensadas de dicha construcción.

La tesis presenta determinados valores, destacándose entre ellos:

Económico: La adecuación de este sistema en Cuba sustituirá la forma tradicional de diseñar y concebir una losa, y logrará un mayor ahorro de materiales con su introducción debido a las ventajas que posibilita su empleo en edificios.

Social: Al aplicarse esta propuesta, se facilitará una estructura mucho más segura y cómoda (desde el punto de vista social) debido a las mejoras que introduce en la edificación y que permite un aumento por ende del confort, sin dejar de tener en cuenta la preservación del balneario de Varadero.

Metodológico: Una vez realizado el diseño de las losas mediante la tecnología del postensado en un edificio, se aporta a las empresas especializadas una herramienta pionera para el posterior estudio de otros aspectos relacionados con el tema o el empleo de esta tecnología en el país.

Ambiental: Una vez realizado el diseño de las losas con la tecnología del postensado, se demuestra el increíble ahorro tanto económico como de tiempo que genera la utilización de este método y que conlleva a una implicación ambiental adecuada, por la escasa utilización de materiales procedente del mismo ya que se elimina el encofrado de las vigas.

Es importante señalar que el aporte teórico de la presente investigación, se basa en que puede ser utilizada como base bibliográfica para el diseño de losas postensadas en edificios de grandes luces en la formación de pregrado y postgrado.

El aporte práctico, se sintetiza en la aplicación de este sistema tecnológico a los nuevos hoteles que se pretenden construir en Varadero para ampliar su capacidad hotelera y mejorar su resistencia a la misma vez que se logra un mayor ahorro económico sobre todo cuando se trata de edificios de grandes luces.

Aporte económico: Se sustituyen la mayor parte de las importaciones de los proyectos que emplean la tecnología del postensado.

Estructura de la tesis:

Resumen.

Índice.

Introducción.

Se detalla el protocolo de investigación, donde se plantea la situación problemática, el problema investigativo, el objetivo general y los objetivos específicos, los métodos de investigación utilizados y los principales valores que presenta la tesis.

Capítulo I: Se realiza un análisis del estado del arte que permite la comprensión del método y la tecnología para la implementación de las losas postensadas para un edificio de grandes luces, sin dejar de tener en cuenta las ventajas y desventajas que posibilita.

Capítulo II: Se desarrolla de forma teórica la metodología para el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces teniendo en cuenta los métodos científicos para su implementación y la base teórica, y de cálculo disponible.

Capítulo III: Se realiza el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces partiendo de la determinación de ciertos parámetros y de la información teórica y de cálculo disponible, lo que permitió la obtención de los resultados finales de la investigación.

Conclusiones: Concluida la investigación, según la situación problemática y la aplicación de los métodos de investigación, se obtienen conclusiones partiendo de los objetivos específicos planteados.

Recomendaciones.

Bibliografía.

Anexo.

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE REFERENTE A LA TECNOLOGÍA DE LOSA POSTENSADA.

Se realiza un análisis del estado del arte que permite la comprensión del método y la tecnología para la implementación de las losas postensadas en edificios de grandes luces, partiendo de un estudio de las características del pretensado, definiendo los tipos que existen a partir de los elementos que los componen y los beneficios que proporcionan, sobre todo cuando se tiene en cuenta al postensado, estableciendo sus ventajas e inconvenientes respecto a otros sistemas como lo es el hormigón armado, además de tener en cuenta las normas, códigos y requisitos necesarios para el diseño de las losas con la tecnología del postensado.

1.1 Características del pretensado.

El pretensado surge de la necesidad de aumentar las capacidades resistentes y el comportamiento estructural del hormigón armado como elemento estructural, siendo este insuficiente según la tipología estructural empleada, ya sea por la funcionalidad que conlleva o la estética que exige (Argila, 2018).

El pretensado introduce un sistema de cargas previo a la actuación de cargas exteriores, de una forma voluntaria y controlada, de cara a que el estado final resultante de tensiones sea el adecuado para la estructura en cuestión. Este sistema de cargas introducido se hace mediante la utilización de cordones o barras de acero tensadas desde sus extremos. La utilización de esta tecnología permite una disminución del espesor de las piezas tratadas, así como de la armadura pasiva necesaria (Argila, 2018).

1.1.1 Reseña histórica del surgimiento de la tecnología del pretensado.

Según (Borrás, 2009-2010) y (Mohamed et al., 2007) una de las consecuencias del desarrollo del hormigón pretensado ha sido la notable evolución en el diseño de formas de los puentes, en los que se han aplicado nuevas técnicas constructivas que han aumentado las posibilidades para salvar vanos de grandes luces, acortando los tiempos de ejecución y proporcionando una serie de ventajas relativas a la durabilidad, seguridad y economía.

En la edificación el proceso ha sido diferente, debido sin duda a que la estructura resistente queda integrada y “oculta” en un conjunto constituido por elementos de diversa naturaleza y, por tanto, sus formas suelen ser consecuentes con los criterios derivados del diseño global del edificio.

La idea básica del pretensado de materiales es antigua y está presente en diferentes ramas tecnológicas. Basta recordar algunos procesos de ejecución tales como los buques de los vikingos, que pretensaban sus barcos mediante unos tirantes de madera comprimiendo sus cubiertas y bordas, o cuando se ataban cintas o bandas metálicas alrededor de duelas de madera para formar los barriles, que al apretar los cinchos, estaban sometidos a una fuerza que creaba un esfuerzo de compresión entre las duelas y las habilitaba para resistir la tensión en arco, producida por la presión interna del líquido contenido, así mismo la cámara inflada a presión de una rueda es otro ejemplo de la aplicación del principio de pretensado: someter un material, incapaz de resistir sollicitaciones en un cierto sentido, a esfuerzos iniciales de sentido contrario.

La primera propuesta de pretensar el hormigón se remonta a 1886, cuando un ingeniero de San Francisco, California, *P.H.Jackson* registra una patente donde propone el empleo de tirantes pretensados provistos de anclajes de rosca o de cuña en bloques de hormigón. En 1906, *M.Koenen*, de Berlín, realizó el primer ensayo con armadura hormigonada bajo tensión, creando un aparato en el que aplicaba una tensión previa y posteriormente una carga inferior a 1.000 Kp/cm² que se reducía además en el tiempo hasta casi anularla. Se continuaron nuevos ensayos y patentes sin mucho éxito pues el pretensado se perdía por efectos de la retracción y la fluencia del hormigón, no conocidos en la época.

Los primeros éxitos prácticos del uso de esta tecnología los obtuvo, en 1919 *K. Wettstein*, de Bohemia, con sus “*Wettstein-Bretter*” (tablas-*Wettstein*), que con el objetivo de alcanzar una resistencia del hormigón lo más alta posible utilizó como armadura alambres de cuerda de piano, con una resistencia de 1.400 a 2.000 N/mm². Pronto advirtió que carecía de sentido colocar en el hormigón los alambres no tensionados, en consecuencia, los tensó hasta un punto próximo a su límite elástico, colocándolos próximos a la superficie (es decir, alejados del centro de la sección). Con notable intuición, pensó que

la adherencia hormigón-armadura era función de la superficie específica de contacto, por lo que empleó gran número de alambres delgados, en lugar de utilizar barras de mayor sección. Probablemente, *R.H.Dill*, de Alexandra, *Nebraska*, USA, en 1923, haya sido el primero en darse cuenta de que debían emplearse alambres de alta resistencia con tensiones elevadas.

Sin embargo, las hipótesis fundamentales para asegurar el éxito del hormigón pretensado fueron establecidas y descritas de forma inobjetable por el francés *Eugène Freyssinet*, quien en 1928, patentó a su nombre el sistema de pretensado con tensiones en el acero de más de 400N/mm². El mérito principal de *Freyssinet* es el haber investigado la esencia de la fluencia lenta y de la contracción del hormigón, extrayendo las conclusiones correctas para el hormigón pretensado. En 1939, produjo un sistema de anclaje mediante cuñas cónicas para los anclajes de los extremos y diseñó gatos de doble acción, los cuales tensaban los alambres y después presionaban los conos machos dentro de los conos hembra para anclarlos a las placas de anclaje. Este método consiste en estirar los alambres entre dos pilares situados a varias decenas de metros, poniendo obturadores entre las unidades, colocando el hormigón y cortando los alambres después de que el hormigón adquiriera una resistencia de diseño específica. En 1941 proyectó el puente en pórtico de dos articulaciones, muy rebajado, sobre el río *Marne* cerca de *Lucancy* del que se hicieron 5 réplicas en el mismo río.

Entre 1940 y 1942, *Gustave Magnel*, de Bélgica, desarrolló un procedimiento de anclaje mediante el cual dos alambres se tensaban simultáneamente y se anclaban con una simple cuña de metal en cada extremo, con este método construyó en 1948 el primer puente con vigas continuas sobre el río *Mosa*, en *Sclayn*, de 2x62m de luz (hormigón pretensado sin adherencia).

En 1952, hay una reunión en Cambridge, en la cual se crea una sociedad internacional bajo el nombre de *Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP)*. El objetivo principal de este grupo de ingenieros visionarios era diseminar el mensaje e iluminar al mundo acerca del concepto relativamente desconocido de la construcción con hormigón pretensado, lo cual se llevaría a cabo alentando la integración de grupos nacionales en

todos los países que tuviesen particular interés en el asunto y facilitando un foro internacional para el intercambio de información.

El postensado se comenzó a implementar en Europa mucho antes que, en Estados Unidos, siendo pionera en el uso en obra civil de dicha solución estructural. En el ámbito de la edificación, sin embargo, sí que fueron los americanos los primeros en aplicar el pretensado. Las losas postensadas suponen una de las técnicas constructivas más comunes en el campo de la edificación, mayoritariamente se ha asentado en aquellas edificaciones caracterizadas por cargas relativamente elevadas y dotadas de unas luces considerables (Argila, 2018).

Los primeros casos de utilización de losas planas postensadas en el sector de la edificación datan de 1955 y, dicha introducción estructural surge fundamentalmente de la necesidad de reducir problemas asociados al uso de las losas de hormigón armado: reducción de peso, de flechas generadas y de anchos de fisura (Argila, 2018).

Sin embargo, estos últimos años la progresión del empleo de esta tipología de sistemas estructurales ha conseguido aumentar su presencia en obras de edificación. Este progreso se debe a la mayor divulgación técnica y formación sobre proyectistas en cuanto a ventajas técnicas, costes y sostenibilidad que ofrece la técnica en cuestión (Argila, 2018).

En la actualidad el concepto del balance de cargas desarrollado por el Profesor T. Y. Lin es el más utilizado (Montaño, 2006) ya que simplifica de gran manera el diseño y análisis de los elementos pre-esforzados. Utilizando este concepto se visualiza el pre-esfuerzo introducido en el hormigón como un conjunto de cargas internas que logran equilibrar en cierto grado las cargas externas a las que el elemento será solicitado en la puesta en servicio (T.Y.LIN, 1984).

1.1.2 Tipos de tensado.

Se diferencian dos tipos de tensado: pretensado con armaduras pretensadas y con armaduras postensadas a partir de lo planteado por (Argila, 2018) y (LTD., 2009).

- Armaduras pretensadas. Se trata del método usado para piezas prefabricadas. En esta tipología de tensado se adoptan trazados rectos tanto por su definición – tesado antes de vertido- como por su fácil y rápida ejecución en planta de prefabricación. Los cordones, dispuestos en bancadas, se tensan y quedan anclados. Seguidamente, se vierte el hormigón que, una vez endurecido queda completamente adherido al acero. Una vez el hormigón haya adquirido la resistencia suficiente se transfiere la fuerza de pretensado a la pieza, ya sea destensando los cables o bien cortándolos (ver Fig 1.1)



Fig 1.1 Esquema de piezas de hormigón con armaduras pretensadas (Argila, 2018).

Este método genera un buen vínculo entre las armaduras y el hormigón, el cual las protege de la oxidación a la vez que permite la transferencia directa de la tensión gracias a la adherencia del hormigón al acero. Exigen fuertes puntos de anclaje y es por ello que son prefabricados en serie dentro de naves con las instalaciones adecuadas y permiten pretensar, en una sola operación, varios elementos. Entre otros aspectos, las piezas que más habitualmente se ejecutan con este tipo de pretensado son: dinteles, paneles para cubiertas y entrepisos, vigas, viguetas y pilotes, aplicados a edificios, naves, puentes, gimnasios y estadios principalmente.

- Armaduras postensadas. La principal diferencia del hormigón con armaduras pretensadas es la aplicación de carga a los tendones, la cual se da después del hormigonado, una vez alcanzada la suficiente resistencia. En cuanto al trazado, permite variar la excentricidad dentro del elemento, logrando así estados tensionales y esfuerzos más ajustados a los deseados. Dichos trazados suelen ser parabólicos siguiendo la ley de momentos flectores para reducir estos esfuerzos al máximo. También cabe la posibilidad de que el trazado en armaduras postensadas vaya por fuera de la sección, conocido como pretensado exterior (ver Fig 1.2)

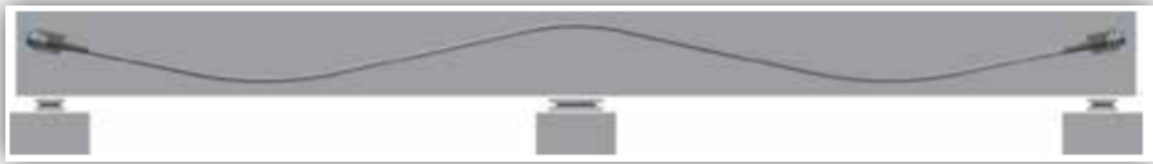


Fig 1.2 Esquema de pieza de hormigón con armaduras postensadas(Argila, 2018).

1.1.3 Tipos de armaduras.

En (Borrás, 2009-2010) se diferencian dos tipos de armaduras en el hormigón pretensado:

- Armaduras activas, son las de acero de alta resistencia mediante las cuales se introduce el esfuerzo de pretensado
- Armaduras pasivas, son las armaduras habituales del hormigón armado, asociadas a las anteriores

1.1.4 Elementos singulares que componen las losas pretensadas.

Las armaduras activas son los elementos estructurales de acero de alta resistencia a través de las cuáles se aplican las cargas de pretensado, sus elementos constituyentes pueden ser alambres, barras o cordones, siendo los cordones los más empleados en las losas postensadas de edificación (Argila, 2018).

Las características principales que se estudian para la definición de la calidad de estos aceros de alta resistencia son las siguientes.

- Diagrama Tensión – Deformación
- Carga unitaria máxima a tracción ($f_{máx}$)
- Límite elástico (f_y)
- Alargamiento remanente concentrado de rotura (ϵ_u)
- Alargamiento bajo carga máxima ($\epsilon_{máx}$)
- Módulo de elasticidad (E_s)
- Estricción (η)
- Aptitud al doblado alternativo (exclusivamente para alambres)

- Relajación
- Resistencia a la fatiga
- Susceptibilidad a la corrosión bajo tensión
- Resistencia a la tracción desviada (sólo para cordones de diámetro nominal igual o superior a 13mm)

En las armaduras activas nos encontramos con los siguientes elementos:

✓ Alambres

Aceros de alto contenido en carbono y sección maciza derivados de un trefilado y estirado en frío para aumentar su resistencia a tracción. Suelen suministrarse en rollos y sus valores característicos de diámetro nominal (mm) se ajustan a la serie siguiente: 3 – 4 – 5 – 6 – 7,5 – 8 – 9,4 – 10

✓ Barras

Aceros de sección maciza que se suministran únicamente en geometría rectilínea, suelen ser empleadas en piezas postensadas y de corta longitud en las que las pérdidas por penetración de cuña serían demasiado elevadas.

✓ Cordones

Se tratan del elemento principal del tendón, que tiene como función recoger la fuerza introducida a la hora de tesar y transmitírsela a la estructura. Pueden ser lisos o grafilados y se diferencian en tres tipos según el número de alambres por los que están compuestos:

- Cordón de 2 o 3 alambres
- Cordón de 7 alambres

Cabe decir que, no obstante, en losas postensados se usa únicamente el cordón de 7 alambres, el cual puede encontrarse fundamentalmente en dos diámetros: 15,2 mm y 16 mm.

Estos elementos se suministran en rollos y se identifican mediante una etiqueta que contiene los datos siguientes:

- Designación del producto
 - Número de rollo
 - Nombre del fabricante y planta de fabricación
 - Identificación del organismo de certificación y número identificativo de la certificación
- ✓ Tendones

Se entiende por tendón el conjunto de cordones enfilados dentro de un mismo conducto y que, a nivel de cálculo, se consideran como una sola armadura. Dicho conducto se conoce por el nombre de vaina. En el caso de armaduras pretensadas, cada una de las armaduras individuales recibe el nombre de tendón.

- Distribución de tendones

La disposición de los tendones de postensado en planta se trata de un aspecto importante, debido a que en función de esto es el funcionamiento del postensado y sus prestaciones a nivel de transmisión de cargas varía.

Se proyectan 4 soluciones de disposición de tendones.

- Tendones concentrados en dos direcciones
 - Tendones distribuidos en dos direcciones
 - Tendones concentrados en una dirección y distribuidos en la otra
 - Combinación de tendones concentrados y distribuidos en ambas direcciones
- ✓ Vainas

Se conoce como vaina el conducto por el que discurren los cordones y se encuentra embebido en el hormigón. Pueden ser metálicas o de plástico, especialmente de polietileno de alta densidad u otro material plástico no corrosivo.

✓ Anclajes

Estos elementos se encuentran en los extremos de los tendones y permite transferir la carga aplicada a los cordones mediante un gato hidráulico a la estructura. Se conocen como anclajes a las placas metálicas, cuñas y otros elementos de protección frente a la corrosión. Existen dos tipos de anclajes: activos y pasivos. Los primeros, son aquellos desde los que se tensa (Fig. 1.3) mientras que los segundos son los que reciben la carga a través del tendón, pero no directamente del gato de tensado (Fig 1.4).



Fig 1.3 Anclaje activo(Argila, 2018).



Fig 1.4 Anclaje pasivo(Argila, 2018).

El tamaño de los anclajes es variable dependiendo del número de cordones a anclar y suelen ser rectangulares. Además, el conjunto tendón-anclaje ha de ser capaz de resistir ensayos estáticos y de fatiga debido a las grandes tensiones que experimenta al transmitirse la carga.

1.2 Características del postensado.

Según (Argila, 2018) el hormigón postensado es aquel hormigón que se somete, después del vertido y fraguado, a esfuerzos de compresión por medio de armaduras activas, con la misión de mejorar las propiedades relativas a su geometría, seguridad, durabilidad y economía.

1.2.1 Losa postensada.

Las losas postensadas consisten en losas coladas, postensadas mediante el uso de cables de acero o torones de alta resistencia dispuestos según un trazado parabólico, y anclados a través de cuñas a sus anclajes extremos. Una vez colada la losa, cada cable es tensado en forma independiente según las indicaciones del proyecto, generando de esta manera una compresión en toda su sección, y un balanceo de las cargas en el centro de éstas. La flexibilidad del sistema ofrece mejores posibilidades creativas para el diseño, permitiendo mayores luces, plantas libres y estructuras más esbeltas. Es importante destacar que con este sistema pueden eliminarse las vigas tradicionales estáticas, lográndose así una mayor altura útil de piso a piso, y dejando mayor espacio para la instalación de ductos y servicios. Esto permite resolver problemas de rasante, así como, en algunos edificios en altura, agregar pisos adicionales sin modificar la altura total del edificio, o bien, agregar un subterráneo para una determinada profundidad (Moreno, 2017).

1.2.2 Factores que influyen en la selección de una losa.

Los principales factores a tener en cuenta al momento de elegir la tipología estructural de una losa son los siguientes(Argila, 2018):

- Luz típica entre pilares
- Relación entre luces de los vanos en direcciones x e y, seleccionando soluciones bidireccionales (relaciones cercanas a 1) o unidireccionales
- Magnitud de la Cargas adicionales a Peso Propio y Sobrecarga de Uso (ligero, medio o pesado)
- Altura total de la losa estructural: determina la altura total del edificio
- Constructibilidad: acceso de grúas, coste de encofrado y cantidad de puestas, utilización de mesas, vinculación a elementos construidos con anterioridad, punzonamiento y posibilidad de tesar desde los bordes exteriores
- Flexibilidad para el *layout* de instalaciones y/o servicios a disponer entre la losa y el falso techo: posibilidad de disponer vigas de espesor
- Peso propio de la losa por unidad de superficie (promedio): determina el tamaño de soportes y cimentaciones, y en zona sísmica, la magnitud de la fuerza horizontal

- Requerimientos en Estado Limite de Seguridad (fisuración, deformación) y en Estado Limite de utilización (resistencia)
- Si la losa es parte de la estructura resistente frente a cargas horizontales, es preferible la utilización de vigas de espesor para materializar los pórticos resistentes
- Acabados: hormigón visto, falso techo, entre otros
- Tipo de Edificio: en altura o en superficie

1.2.3 Tipología de las losas postensadas.

A partir de (CCL, 2016) y lo planteado por (Argila, 2018) se define que las diferentes categorías de las losas postensadas en una edificación están dadas en función de las cargas actuantes según su uso. Se clasifican principalmente en sistemas unidireccionales y bidireccionales, dentro de cada sistema puede dividirse cada tipo, teniendo en cuenta el uso de las vigas o ausencia de estas y el tipo de losa (maciza, aligerada o reticular).

- ✓ Dentro de la categoría de sistemas unidireccionales, nos encontramos con:
 - Losa con vigas planas unidireccionales
 - Losa con vigas de espesor unidireccionales
- ✓ Por otro lado, se distinguen los siguientes sistemas bidireccionales postensados:
 - Losas macizas planas
 - Losas macizas con capiteles o ábacos
 - Losas aligeradas
 - Losas de vigas planas en dos direcciones
 - Losas de vigas de espesor en dos direcciones

En este proyecto de tesis se realizará mayor hincapié en los sistemas Bidireccionales especialmente el vinculado a:

- Losas macizas planas

En (Argila, 2018) se plantea que esta tipología conlleva un sistema estructural capaz de abarcar luces de 7 a 11m, y en ocasiones hasta más, para resistir cargas de diferentes magnitudes.

Por lo que a ventajas se refiere, suponen un encofrado muy sencillo dado la ausencia de elementos como ábacos o capiteles. Por otro lado, el aumento de luz supone mayores problemas de punzonamiento o, en su defecto, acumulación excesiva de armadura pasiva sobre pilares. Es importante también que, para vanos largos, su apropiado empleo requiere de grandes cantidades de hormigón (ausencia de aligeramientos) y, por consiguiente, genera mayores deformaciones que otras soluciones.

En el supuesto caso de luces muy distintas en ambas direcciones, no es recomendable su empleo. La solución pasaría por adoptar un armado postensado unidireccional y una solución de armado convencional para la otra dirección.

El trazado de tendones puede efectuarse de cualquier manera, siendo el más empleado el que dispone tendones concentrados en una dirección y distribuidos en la otra, con la finalidad de reducir la deformación de la losa (Fig 1.5).

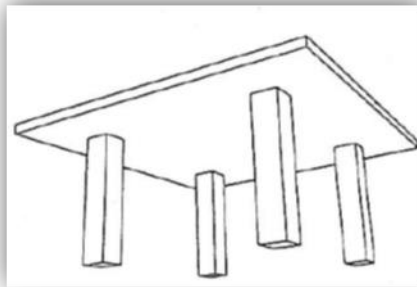


Fig 1.5 Losa maciza plana (Argila, 2018).

- ✓ Existen dos tipos de losas postensadas según el tipo de tendón utilizado (Castells, 2011):
 - Losas postensadas con tendones adherentes:

La tipología adherente restringe el espesor de la losa, ya que las vainas suelen ser de mayor tamaño que las utilizadas para la ejecución del postensados no adherentes, por lo que resulta menos interesante su utilización en edificación, además también necesita de la inyección de lechada en el interior de la vaina lo que limita su utilización, ya que necesita de grandes espacios y maquinarias muy incómodas de utilizar en edificación, el tipo de postensado adherente es más propio de construcciones civiles tales como puentes.

- ·Losas postensadas con tendones no adherentes:

Las losas postesadas con tendones no adherentes están formadas por armaduras pasivas y armaduras activas, estas últimas constituidas por cordones de acero de alto límite elástico, engrasados y embutidos en una vaina de polietileno de alta densidad.

1.2.4 Comportamiento de las losas postensadas.

Tanto el hormigón pretensado como el postensado responden a una necesidad de contrarrestar los esfuerzos y deformaciones que generan las cargas verticales que se transmiten a través de elementos verticales portantes, correspondiendo así a un diseño estructural más eficiente que el de hormigón armado (Argila, 2018).

Según (Freyssinet, 2015) las losas postensadas son realizadas principalmente con acero de preesfuerzo formado por torones que se colocan al mismo tiempo que el acero de refuerzo tradicional y se tensan cuando el concreto llega al 70 u 80 % de su resistencia, debido al trazado parabólico con que se coloca el acero de preesfuerzo, su tensado ejerce una fuerza interna en la estructura que se opone al sentido de aplicación de las cargas, reduciendo así los efectos de estas (Fig 1.6).

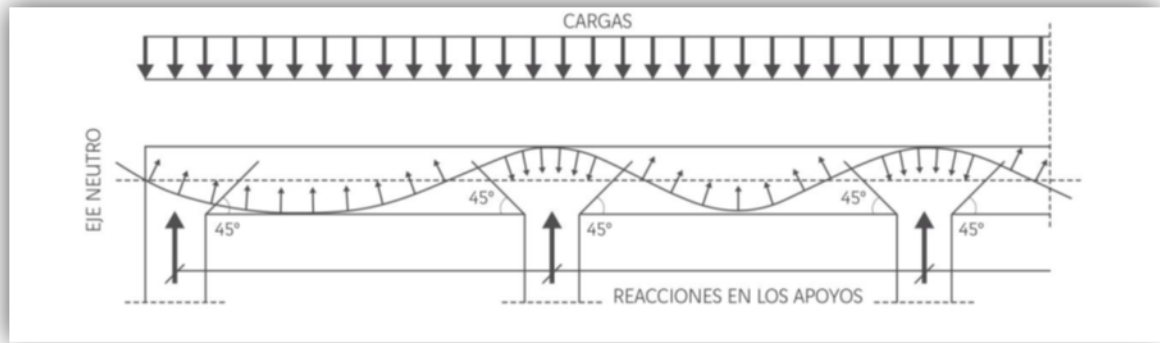


Fig 1.6 Comportamiento de una losa postensada (Freyssinet, 2015).

Por otra parte, el preesfuerzo comprime la sección transversal de la losa, reduciendo los esfuerzos de tensión en el concreto y por consiguiente la cantidad de acero de refuerzo necesario. Con esta técnica es posible tener menores espesores de losa que los requeridos en losas de concreto reforzado tradicional, se limita la fisuración y se disminuyen las deflexiones (Freyssinet, 2015).

1.2.5 Ventajas y desventajas de la losa postensada frente a otras sollicitaciones de la losa de hormigón armado.

Según (Argila, 2018) la utilización de la losa postensada supone las siguientes ventajas frente a las losas armadas convencionales:

- Las fuerzas introducidas por el tesado neutralizan en una gran parte las cargas exteriores actuantes, reduciendo estas considerablemente
- El postensado aporta un estado de compresión constante a la losa. Esto provoca una mayor compacidad, rigidez, durabilidad y estanqueidad que otras tipologías que no incorporan esta técnica y que, en su defecto, contemplan fisuras críticas de mayor ancho y sufren una deformabilidad instantánea mayor
- La deformabilidad diferida, aquella generada por las cargas permanentes, también es menor debido a las cargas de desvío incorporadas al sistema mediante el postensado, esto es, porque se crean unas deformaciones y flechas permanentes contrarias a las cargas permanentes

- Las losas son más resistentes, dado que se ejecutan con materiales, tanto de hormigón como de acero de alta resistencia
- Su mejor comportamiento frente a la fisuración se traduce en una mejora de la resistencia de las armaduras frente a la corrosión, evitando filtraciones de agentes agresivos
- Todas las características previas mencionadas aportan una posibilidad de reducción del espesor de las losas, reduciendo la armadura pasiva a emplear y el peso propio de la estructura permitiendo, a su vez, un aumento de luces entre pilares. La reducción del espesor conlleva a la posibilidad de elaborar un mayor número de plantas para edificios de gran altura con el consiguiente beneficio económico que ello supone. Todos estos aspectos se plasman en la Fig 1.7

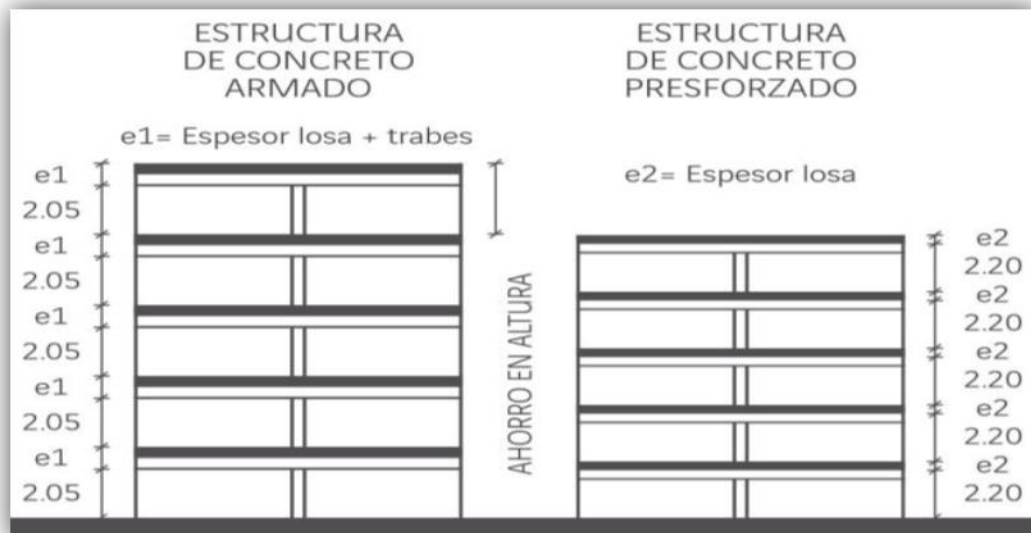


Fig 1.7 Comparación entre los edificios de hormigón armado y de hormigón presforzado.

- Las altas resistencias conseguidas a edades tempranas permiten descimbrados en menores intervalos de tiempo, permitiendo así la continuación de trabajos en plantas superiores
- Los plazos de ejecución en la losa postensada se ven reducidos debido a la mecanización del proceso, así como la necesidad de emplear menor cantidad de hormigón y armaduras pasivas

- La cimentación de una estructura postensada también puede ser más ligera debido a la disminución de las cargas que llega a esta
- Resultan estructuras más económicas por medio del ahorro de hormigón y acero frente a otras estructuras de resistencias similares
- Debido a la limitación de la fisuración su resistencia al fuego también es mayor.
- Con el trazado apropiado de tendones se aumenta la resistencia al punzonamiento.
- Presenta un ahorro en puntales y encofrados destacable por la posibilidad de desencofrar al tesar los cables después del hormigonado, liberando las plantas inferiores durante la ejecución de las losas superiores
- Respecto al punto de vista medioambiental la losa postensada también presenta ventajas debido a la menor cantidad de materiales necesario durante su proceso de construcción, reduciendo la energía necesaria en el proceso

Mientras que (Borrás, 2009-2010) define otras cuatro ventajas que se suman a las anteriores:

- Alta resistencia a la fatiga, ya que la amplitud de los cambios tensionales en el acero activo, bajo cargas alternadas, son muy reducidos
- Mayores luces con mayores esbelteces de las losas que permiten el ahorro del hormigón, reduciendo el peso propio de la estructura. Se puede reducir hasta un 30% el espesor de la losa sin disminuir la capacidad portante
- Ahorro económico considerable en coste de materiales, principalmente hormigón y acero corrugado, en comparación con la losa maciza de hormigón armado convencional. Esto se traduce en una estructura más económica en su realización, ya que se necesitan menores cuantías de acero corrugado como armadura pasiva y la nueva armadura activa no repercute en un incremento de coste en el balance global
- Las ventajas económicas del empleo del postesado resultan evidentes, cuando se trata de disponer vanos relativamente grandes en edificios, que superan el rango de las losas de hormigón unidireccionales, o bidireccionales con soluciones reticulares (ver Fig 1.8)

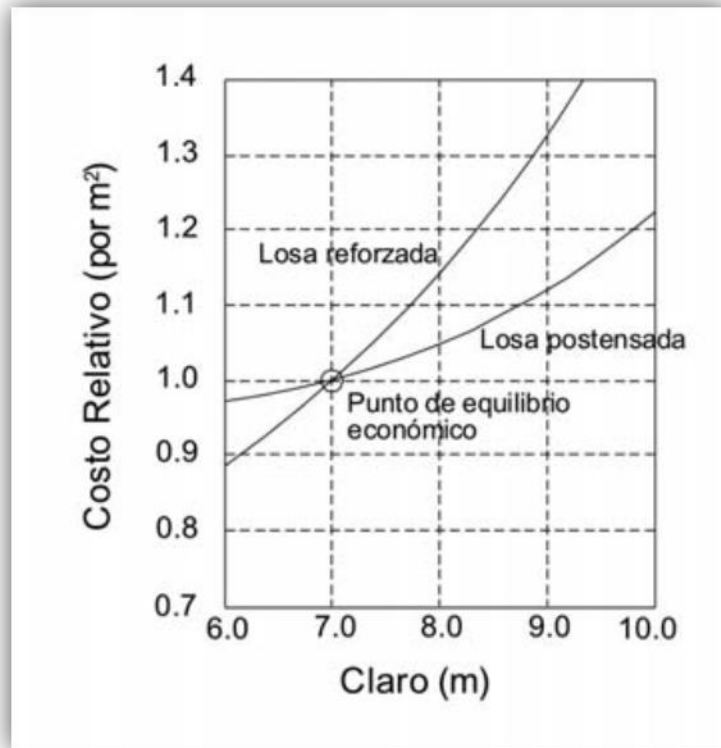


Fig 1.8 Comportamiento del costo de una losa postensada y una losa reforzada según el claro (GRUPO ALCREQ, 2017).

El postensado posee ritmos de ejecución más eficientes porque:

- Menor manipulación de materiales
- Desencofrado anterior
- Menor impacto en el resto de las tareas
- Menor cantidad de concreto y del trabajo de puesta en obra
- Menor cuantía de armadura pasiva y del trabajo de puesta en obra
- Reducción de los costos de transporte de materiales
- Reducción de los costos indirectos como almacenamiento y manipulación
- Simplificación de los encofrados
- Reducción de los espesores, lo que se traduce en:
 - Menor excavación y menor costo del muro pantalla (continuo o de pilotes)
 - Sobre rasante: edificios de altura igual con mayor número de losas

- Menor peso de la estructura y menores cimentaciones
- Menor número de pilares y más optimizados (desaparecen los pilares de pequeñas dimensiones 0.25x0.25 m supra-dimensionados)

Entre los inconvenientes de este tipo de losa podemos destacar los siguientes (Argila, 2018):

- Todo y que el volumen de hormigón utilizado sea menor, el utilizado es de alta resistencia y tiene un precio mayor que los hormigones convencionales
- Presenta la necesidad de mano de obra especializada para la colocación de los tendones y el posterior tesado de los mismos
- Requiere de mayores espacios para encofrados debido a las zonas auxiliares para colocar los gatos hidráulicos
- Debido a la esbeltez de la estructura requiere un control más exhaustivo de las deformaciones
- Se trata de estructuras poco flexibles a la hora de hacer modificaciones posteriores a la ejecución, como por ejemplo la apertura de nuevos huecos
- Las reparaciones de las losas, por ejemplo, debido a las roturas de cables son muy complicadas y requieren de mano de obra especializada

1.2.6 Campo de aplicación de la tecnología del postensada.

En la siguiente tabla se observan algunos de los primeros puentes que se construyeron en el Continente Americano con la tecnología del pretensado:

Tabla 1.1 Primeros puentes de postensado. Elaborado por la autora.

<i>Lugar</i>	<i>Año</i>	<i>Nombre</i>	<i>País</i>	<i>Luces en metros</i>
1ero	1953	Cuyaguaje	Sábalo-Cuba	14-91-14
2do	1952	Cañas	Trinidad-Cuba	15-79-15
3ero	1953	Arimao	Cienfuegos-Cuba	15-61-15
4to	1949	Walnut-Lane	Filadelfia-Estados Unidos	23-49-23
5to	1953	Agabama	Trinidad-Cuba	30-40-30

A nivel nacional:

- Puente Cuyaguaje

Puente sobre el río Cuyaguaje (Fig 1.9) en la provincia de Pinar del Río, Cuba. La construcción de este Puente se realizó en 1953. Es uno de los pioneros en la aplicación de la tecnología del postensado en América Latina. Este puente tiene 91 metros de luz, sin apoyos intermedios y tiene un espesor en el centro del tramo de 1.8 m, fue proyectado con hormigón pretensado con armaduras postensadas por los ingenieros: Luis Sáenz Duplace y Ignacio Martín (Arestuche & Pérez, 2009).



Fig 1.9 Puente Cuyaguaje (Arestuche & Pérez, 2009).

- Puente de Bacunayagua (Fig 1.10)

Ubicado en la Autopista Habana-Matanzas, sobre el río Bacunayagua, fue diseñado por el ingeniero civil cubano Luis Sáenz Duplace, y ejecutado por la compañía Sáenz, Cancio y Martín, su construcción se terminó en noviembre de 1959. Esta obra, de 313,5 metros de longitud total, 110 de altura máxima, y 16 de ancho, cuenta con vigas, pre y postensadas de sección transversal "I", espaciadas a 2,80 metros y con peralte uniforme de 1,605 metros las interiores y de 1,655 las exteriores (Arestuche & Pérez, 2009).



Fig 1.10 Puente de Bacunayagua (Arestuche & Pérez, 2009).

- Puente del Ferrocarril Central sobre el río Canímar (Fig 1.11)

Su construcción se terminó en 1976 y posee una longitud de 303 metros, para 11 luces de 25 metros postensadas con el uso de cables del sistema Freyssinet y otras dos de 14 metros para los estribos (Arestuche & Pérez, 2009).



Fig 1.11 Puente del Ferrocarril Central sobre el río Canímar (Arestuche & Pérez, 2009).

- Puente Guanima

El nuevo puente de Guanima (Fig 1.12 y 1.13) terminado el 20 de abril de 2017, fue diseñado por la Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de Matanzas, permite el paso de vehículos con cargas superiores a 30 toneladas, consta de dos calzadas separadas y edificadas con una tipología de vigas potensadas que garantizan su durabilidad (Marrero & Alfonso, 2017).



Fig 1.12 Puente Guanima.



Fig 1.13 Puente Guanima.

- Residencia Flores

Grupo de edificios (Fig 1.14 y 1.15) residenciales que se comenzaron a construir alrededor del año 2000, ubicados en la Habana que cuentan con una estructura de hormigón armado, con entrepisos y cubierta de postensado, lo que permite a la estructura alcanzar una mayor resistencia y durabilidad.



Fig 1.14 Residencial Flores.



Fig 1.15 Residencial Flores.

- **A nivel internacional:**
 - Centro artístico y cultural de *Kozienice* (Fig 1.16)

Tanto en (Szydłowski & Labuzek, 2017) como en (Argila, 2018) se describe como un centro cultural situado en el centro de la ciudad de *Kozienice* en el este de Polonia, se inauguró en el 2015 y es un amplio edificio que estructuralmente se compone de tres losas de gran esbeltez, pretensado con tendones no adherentes.



Fig 1.16 Centro artístico y cultural de Koziénice. (Argila, 2018)

- **Centro comercial *Sylvia Park***

El centro comercial *Sylvia Park* (Fig 1.17) situado en la ciudad de Auckland, es el más grande de *Nueva Zelanda*. Su creciente número de visitantes llevó a la necesidad de la ampliación de las zonas de estacionamiento. La solución a esta demanda se determinó añadiendo cuatro pisos de aparcamientos a los dos ya existentes, así pues, se optó por la solución postensada. Esta opción no solo causó un impacto mínimo a las actividades del centro comercial si no que aumentara considerablemente la seguridad e higiene durante la construcción. También redujo cada nivel de las losas 200 mm, ofreciendo grandes beneficios en gradientes de rampa y costes de construcción (Argila, 2018).



Fig 1.17 Centro comercial Sylvia Park. (Argila, 2018)

- *Media City* (Reino Unido)

Media City (Fig 1.18) se sitúa en la ciudad de *Sanford*, al oeste de *Manchester* (Reino Unido). Es una nueva y moderna zona de la ciudad donde cuatro de los edificios que la integran fueron construidos con losas postensadas de 275 mm de espesor, variando en algunos casos a 300 mm y 400 mm con el fin de adaptarse a tramos específicos de mayor luz (Argila, 2018).



Fig 1.18 Media City(Argila, 2018)

- *Torre Agbar*, en Barcelona

La *torre Agbar (Fig 1.19)* es un rascacielos construido en la ciudad de Barcelona. La torre fue diseñada por el arquitecto francés *Jean Nouvel* en colaboración con la firma de arquitectos barcelonesa *b720*. Tiene 144 metros de alto y 34 plantas, convirtiéndose en el momento de su apertura (junio de 2005) en el tercer edificio más alto de la capital catalana, posee losas compuestas de hormigón postensado (Argila, 2018).



Fig 1.19 Torre Agbar (Argila, 2018).

- *Bonaire*, parque comercial y de ocio (Fig 1.20)

El edificio está situado en *Aldaia*, Valencia en un solar de planta rectangular limitado por la autovía A-3 y el corredor comarcal. El edificio dispone de una planta subterránea destinada, principalmente, a aparcamiento. La losa de la planta baja es de hormigón postesado adherente de 25 cm. de espesor debido a que cubre una superficie aproximada de 60.000 m².



Fig 1.20 Bonaire, parque comercial y de ocio, Valencia (Argila, 2018).

1.2.7 Proceso de ejecución de la losa postesada.

La losa postesada, en función de unos previos y adecuados cálculos, debe adaptarse a un óptimo plan de obra para su correcta ejecución. El primer paso para llevar a cabo la correcta construcción de una estructura de hormigón armado, ya sea postesado o con armaduras pasivas, es realizar un óptimo plan de obra, pudiendo tener como referencia los siguiente pasos para la realización del proceso de ejecución de una losa postesada(Castells, 2011):

1. Acopio de materiales
2. Colocación de cimbras y encofrados
3. Colocación de mallazo o armadura pasiva inferior
4. Colocación de anclajes activos
5. Colocación de separadores o silletas para los tendones
6. Colocación de los tendones

7. Colocación de la armadura pasiva superior y en anclajes
8. Protección de anclajes y acopladores frente a la entrada de hormigón
9. Vertido y compactación del hormigón
10. Curado del hormigón
11. Tesado. Clavado de cuñas
12. Clareado de puntales. Reapriete de cimbras
13. Corte de los excesos o rabos de armadura activa
14. Hormigonado del anclaje para su protección

1.2.8 Equipos y materiales empleados para el uso de la tecnología del postensado.

Según (Aguilar, 2018) el sistema postensado utiliza los mismos materiales que se usan en el hormigón armado, pero incluye además, los torones de acero de alta resistencia y los mecanismos que se utilizarán para el tensado, anclaje y acabado de los mismos.

Entre los materiales y equipos que se utilizan en el montaje del postensado constan como principales los siguientes:

- Hormigón de alta resistencia
- Torones de acero de alta resistencia, cubiertos por un conducto o revestimiento
- Dispositivos de anclajes, compuestos por bloques de anclajes y placas de apoyo
- Sillas de tendones o barras de refuerzo asignadas para crear la trayectoria del tendón de acero
- Cuñas de anclaje utilizadas para fijar el cable torón a los formadores de caja
- Formadores de caja, utilizados para crear el espacio donde se colocará el gato de tensado
- Gatos hidráulicos: Son los elementos utilizados para realizar el tesado de los cordones, están accionados mediante las centrales hidráulicas(Castells, 2011)

Además de estos se puede añadir un mezclador de lechada y una bomba de eyección para los sistemas de hormigón postensado adherente. El proceso de instalación no se limita únicamente a estos materiales.

1.2.9 Normas y códigos de cálculo y diseño empleados.

Para el diseño de la losa se empleará la normativa estadounidense que recoge de una manera más explícita los elementos necesarios para el cálculo de una losa postensada, entre las que se destaca:

1. *Building Code Requirements for Structural Concrete. (ACI 318-19)*
2. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*
3. *Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete. (A 416/A416M – 06)*
4. *Post-Tensioning for Two-Way Flat Plate Construction by Amy Reineke Trygestad, P.E.*
5. *Density of artificial and natural materials, and of structural elements such as design of weight structures. (NC283:2003)*
6. *Design and Building Bases for Tourism Investment – Part 8: Requirements for Structure. (NC 775-8:2010)*

La norma estadounidense (ACI 318-19) recoge a su vez otras como:

- 6.1 *318-19 Seminars that provide technical updates through comprehensive day-long seminars at your office or a location near you.*
- 6.2 *318-19 Webinars that provide technical updates from your desktop.*
- 6.3 *ACI's Reinforced Concrete Design Manual including explanations, analyses, examples, and design aids for reinforced concrete structures.*
- 6.4 *ACI's Detailing Manual providing examples and considerations for conveying your design intent through structural details.*

Se tendrá en cuenta para el desarrollo del diseño el libro Diseño de Estructuras de Concreto Preesforzado por T.Y. LIN, que es uno de los más empleados en el mundo en lo que a este tópico se relaciona.

El uso de las normas estadounidense es necesario porque tiene en cuenta las especificaciones para el diseño y cálculo de una losa postensada, que no considera la norma cubana de requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de

hormigón (NC 207:2019) basada en la (318, 2019), debido a que esta recoge solamente los aspectos generales del pretensado.

1.3 Conclusiones parciales del capítulo.

Después de analizar el estado del arte referente a la tecnología de losa postensada se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los documentos idóneos para guiar el diseño y análisis de una losa postensada son: *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-19) y el libro *Diseño de Estructuras de Concreto Preesforzado* por T.Y. LIN
- El uso de los tendones no adherentes reduce la necesidad de mortero y requiere menor cantidad de maquinaria por lo que su empleo es más recomendable cuando se trata de realizar un diseño de losa postensada
- La posibilidad de reducir el consumo de acero, de cubrir mayores luces, de reducir los plazos de ejecución y de una alta resistencia a la fatiga convierten al postensado en la tecnología ideal para emplear en la confección de losas planas en edificaciones
- Las losas planas pertenecientes a la tipología de losa postensada bidireccional son las más recomendadas para luces entre 7 y 11m, aunque pueden abarcar en ocasiones luces mayores para resistir cargas de diferentes magnitudes

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LAS LOSAS POSTENSADAS PARA UN EDIFICIO DE GRANDES LUCES.

El objetivo de este capítulo es desarrollar de forma teórica la metodología para el diseño de las losas postensadas teniendo en cuenta los métodos científicos para su implementación y la base teórica y de cálculo disponible, partiendo del estudio y análisis del software y las hojas de cálculos utilizados para el diseño, del método de carga balanceada, del método directo y de las consideraciones de diseño.

2.1 Diseño y análisis de las losas postensadas.

El diseño y análisis de una losa postensada depende de la determinación de las cargas actuantes, de las características de los materiales y de los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de la franja (directo) y el diseño del pórtico.

En el caso de losas en una dirección:

Las losas unidireccionales transmiten la carga en una sola dirección, lo cual viene marcado por sus elementos resistentes (nervios o viguetas). Por otro lado, los elementos lineales resistentes, frente a las solicitaciones a las que se ven sometidos trabajan principalmente a flexión (flector + cortante). También pueden estar solicitados a axial, pese a ser un aspecto en general de menor importancia (Argila, 2018).

Los sistemas unidireccionales son muy usuales cuando se dan luces muy distintas en las dos direcciones, donde básicamente las vigas se encargan de cubrir las luces mayores mientras que la losa asume las cargas de las luces menores.

Debe considerarse la influencia de las aberturas para las losas en el caso de la resistencia a flexión y cortante, evaluando la posibilidad de que se formen secciones críticas creadas por las aberturas. Las cargas concentradas y las aberturas de losas pueden hacer que ciertas regiones de las losas en una dirección tengan un comportamiento en dos direcciones.

Según (T.Y.LIN, 1984) el diseño a la flexión de una losa simple de un sentido, usualmente es similar al de una viga. La mayoría de las losas continuas se diseñan como

vigas continuas, este tipo de losa tiene el refuerzo principal solamente a lo largo de la longitud de la misma. El procedimiento usual para diseñar una losa preesforzada de un sentido es considerar un ancho tipo de 1m de losa y tratarlo como si fuera una viga, como se hace para una losa de concreto reforzado de un sentido. Aunque el acero de preesfuerzo principal se coloca solamente en el sentido longitudinal y en toda la longitud de la losa, también se colocan aceros en el sentido transversal, ya sea preesforzado o no, para impedir el agrietamiento y para distribuir cualquier concentración de cargas.

Aunque una losa de un sentido puede preesforzarse en dos direcciones, no es una losa de dos sentidos porque el preesfuerzo transversal solo sirve para absorber los esfuerzos de retracción y temperatura del hormigón, pero no se intenta para soportar ninguna porción de la carga hacia los apoyos.

En el caso de losas en dos direcciones:

Las losas bidireccionales tienen la capacidad de transmitir la carga en dos direcciones. Por ello es que los componentes de esta tipología se tratan de elementos resistentes o nervios dispuestos en ambas direcciones, lo que se conoce con el nombre de retícula. Por lo que a la respuesta estructural frente a solicitaciones se refiere, se ven obligados a trabajar principalmente a flexión, solo que, a diferencia de los unidireccionales, en ambas direcciones. El esfuerzo axial generalmente no propiciará problemas (Argila, 2018).

Según (T.Y.LIN, 1984) y (318, 2019) una losa presforzada de dos sentidos es una cuyos aceros de preesfuerzo se encuentran en dos direcciones perpendiculares sirviendo ambas para transmitir la carga hacia los apoyos. Cuando una losa esta sostenida por una red de columnas, tengan capiteles o no los tenga se puede llamar una losa plana preesforzada, este tipo de losa puede ser diseñada utilizando el método de balance de cargas, dicho método producirá un momento resistente similar en cada dirección.

El diseño de una losa con comportamiento en una y en dos direcciones debe calcularse cumpliendo los apartados presentes en la norma (318, 2019).

2.1.1 Métodos utilizados para el diseño, cálculo y análisis de las losas postensadas.

En los fundamentos planteados por (T.Y.LIN, 1984) existen numerosos métodos para el diseño, cálculo y análisis de una losa postensada que se basan en diferentes conceptos para identificar y definir su proceder:

- Primer concepto: El preesfuerzo transformará al concreto en un material elástico. Este concepto considera el concreto como un material elástico y es probable que aun sea el punto de vista más común entre los ingenieros. Se le acredita a Eugene Freyssinet haber visualizado al concreto preesforzado como esencialmente concreto, el cual es transformado de un material frágil a uno elástico por la precompresión que se le da. El concreto que es débil a la tensión y resistente a la compresión, se comprime de modo que el concreto frágil sea capaz de soportar esfuerzos de tensión. De este concepto nació el criterio de no esfuerzos de tensión. Generalmente se cree que, si no hay esfuerzos de tensión en el concreto, no puede haber grietas, y que el concreto ya no es un material frágil, sino que se convierte en un material elástico. De este punto de vista del concreto se visualiza como sujeto a dos sistemas de fuerzas: el preesfuerzo interior y la carga externa, con los esfuerzos de tensión debidos a las cargas externas balanceados por el esfuerzo de compresión debidos al preesfuerzos. Similarmente, el agrietamiento del concreto debido a las cargas se proviene o se demora por la precompresión producida por los tendones. Así, cuando no hay grietas, los esfuerzos, deformaciones y deflexiones del concreto debidos a los sistemas de fuerzas se pueden considerar separadamente y superponer si es necesario
- Segundo concepto (**Principio del par resistente interno**): Preesfuerzo para la combinación de acero de alta resistencia con concreto. Este concepto considera al concreto preesforzado como una combinación de acero y concreto, similar al concreto reforzado, con el acero absorbiendo la tensión y el concreto la compresión, así que los dos materiales forman un par resistente contra el momento exterior. En el concreto preesforzado se utiliza el acero de alta resistencia, el cual se tendrá que alargar una gran cantidad antes de que se utilice totalmente su resistencia. Si el acero de alta resistencia se ahoga únicamente, como el refuerzo ordinario del concreto, el concreto circundante se agrietará

seriamente antes de que se desarrolle la resistencia total del acero, por tanto, es necesario preestirar el acero respecto al concreto. Preestirando y anclando al acero contra el concreto, produciéndose esfuerzos y deformaciones deseables en ambos materiales: esfuerzos y deformaciones de compresión en el concreto, y esfuerzos y deformaciones de tensión en el acero. Esta acción combinada permite el empleo seguro y económico de los dos materiales, lo cual no se puede conseguir ahogando simplemente el acero en el concreto como se hace para el concreto reforzado ordinario. Hay casos aislados en los cuales se utilizó el acero de resistencia media como un refuerzo simple sin preesforzar, mientras que el acero estaba corrugado especialmente para la adherencia, con el objetivo de distribuir las grietas. Este proceso evita los gastos de preestiramiento y alargamiento, pero no se puede aplicar al acero de alta resistencia, ni tiene los efectos deseables de precomprimir el concreto y de reducir las deflexiones

- Tercer concepto (**Método de carga balanceada**): Preesforzado para lograr el balance de las cargas, este concepto visualiza el preesforzado como un intento de balancear las cargas en un miembro. La aplicación de este concepto requiere tomar el concreto como un cuerpo libre y reemplazar los tendones con fuerzas que actúan sobre el concreto. Se selecciona este método de carga balanceada por ser más sencillos para diseñar y analizar estructuras del tipo losa preesforzada

2.1.1.1 Método de carga balanceada.

Mira al concreto preesforzado primeramente como un intento para equilibrar una porción de la carga sobre la estructura. Este concepto de carga balanceada representa frecuentemente la forma más simple para diseñar y analizar el preesforzado. Cuando se trata de estructuras estáticamente indeterminada este concepto ofrece tremendas ventajas tanto en el cálculo como en la visualización, es un método más sencillo y aunque diseños preliminares y frecuentemente los análisis finales para estructuras indeterminadas son más fáciles al utilizar este método (T.Y.LIN, 1984).

El diseño por el concepto de carga balanceada consiste en igualar la $DL+k_1LL$ (en donde k_1 es un factor de seguridad que vale cero o tiene un valor mucho menor que uno) con el punto de deflexión nula (Fig 2.1).

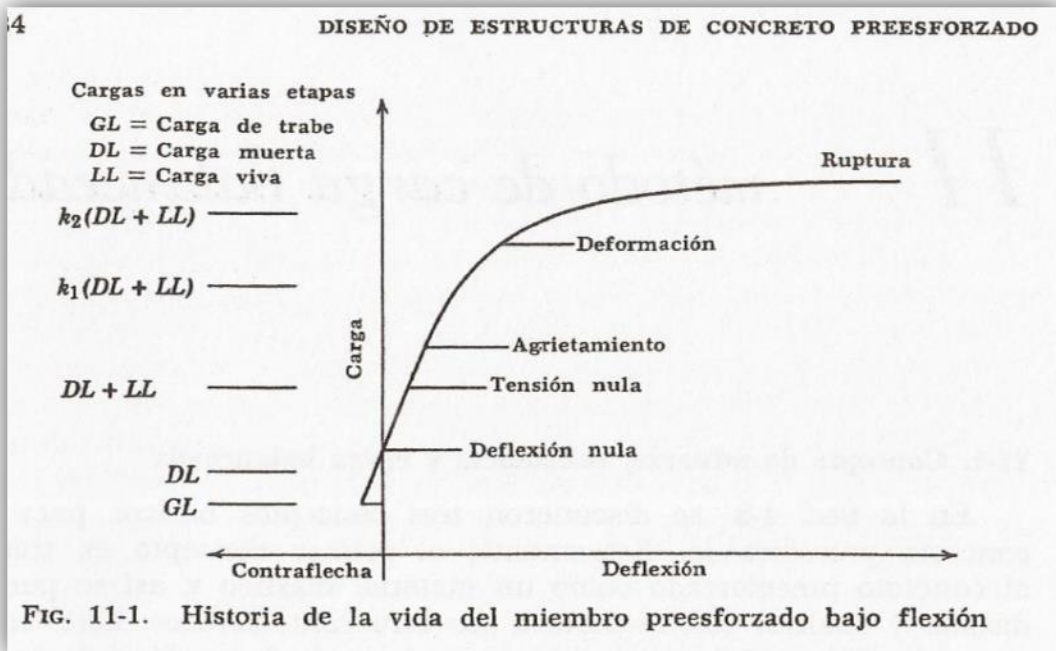


Fig 2.1 Historia de la vida del miembro preesforzado bajo flexión (T.Y.LIN, 1984).

2.1.1.1.1 Criterios para el balanceo de la carga.

Según (T.Y.LIN, 1984) el balanceo de la carga muerta puede requerir demasiado preesfuerzo, puesto que siempre se permite una cierta deflexión para una estructura no preesforzada bajo la carga muerta, es razonable permitir también una cantidad limitada de deflexión, si esto no fuera objetable.

Existe una gran tendencia en las estructuras preesforzadas a incrementar sus deflexiones como resultado de la deformación plástica y la contracción. Por ello deberán limitarse las deflexiones a un valor menor al principio.

Cuando se intenta evaluar la magnitud de la carga viva se va a balancear por el preesfuerzo, es necesario considerar la carga viva real, no la carga viva especificada en el diseño. Si la carga viva de diseño es mayor que la carga viva real, debería balancearse solamente una pequeña cantidad de la carga viva o posiblemente ninguna. Por otro lado, si la carga viva real fuera mucho mayor que la carga viva de diseño, especialmente si fuera prolongada, sería deseable balancear una porción mayor de la carga viva. El ingeniero debería ejercer su buen juicio al escoger la cantidad apropiada de carga que va

a ser balanceada por el preesfuerzo. Esto debería hacerse teniendo en cuenta la satisfacción de requisitos tales como las limitaciones de esfuerzos elásticos, control de grietas y resistencia a la ruptura.

Se puede lograr un diseño de carga balanceada con precisión considerable, debido a que la carga de la gravedad y la fuerza de preesfuerzo se pueden predecir frecuentemente con exactitud. Sin embargo, se pueden encontrar variaciones tales, que la carga real y el preesfuerzo real no se pueden esperar. Para un miembro relativamente rígido, los errores al estimar el peso y el preesfuerzo, usualmente serán despreciables. Para un miembro elástico, aun las ligeras variaciones pueden resultar en errores considerables en la estimación del balance de carga y puede resultar una contraflecha o una deflexión.

El módulo de la elasticidad del concreto y las características plásticas no se pueden predeterminar con exactitud. Afortunadamente, ni el modulo ni la deformación plástica por flexión entrarán en escena si se equilibra exactamente la carga prolongada por la componente del preesfuerzo. En otras palabras, puesto que no hay carga transversal en el miembro, no habrá flexión sin importar el valor del módulo o del coeficiente de elasticidad.

Dependiendo de la exactitud deseada en el control de la contraflecha y de la deflexión, se puede escoger la cantidad de carga que se va a balancear. Si se pueden estimar los límites de error y si la importancia del control de la deflexión o en la contraflecha se puede tasar, no será difícil diseñar al miembro para que tenga el comportamiento deseado.

2.1.1.1.2 Esquema de comportamiento de la carga balanceada.

Cuando el tendón está centrado en el interior de la sección de concreto preesforzado y se cuenta con un área de acero menor se compensan los momentos y se elimina la tracción en la parte inferior de la viga (Fig 2.2).

El error ha nacido de aplicar un pretensado centrado, que si bien ha ayudado a las fibras inferiores, donde va a tener lugar la tracción, ha penalizado al mismo tiempo las fibras superiores, donde a la compresión derivada de las cargas ha añadido la del pretensado, duplicándola (Borrás, 2009-2010).

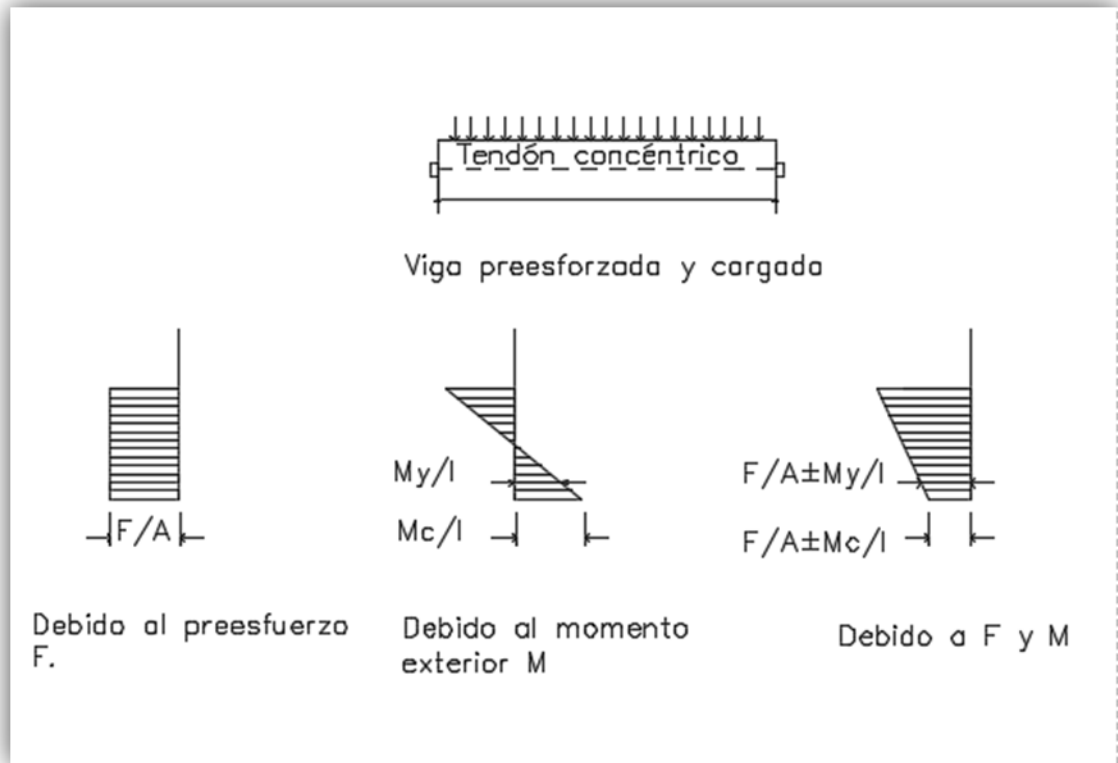


Fig 2.2 Distribución del esfuerzo a través de una sección de concreto preesforzado concéntricamente. Elaborado por la autora.

La solución correcta es desplazando el punto de aplicación del pretensado a la parte inferior de la sección (Fig 2.3), para impedir la aparición de fisuras, esto es, la existencia de tracciones en el estado tensional final, la fuerza de pretensado deberá crear el estado de tensiones que aparece en la figura 2.3: compresión nula en la fibra superior, e igual a la resistencia del hormigón en la fibra inferior. Así tendremos el máximo aprovechamiento, lo que permite ahorrar un 50% de material respecto a la solución previa (Borrás, 2009-2010).

Cuando se desplace el cable se produce un momento adicional producto de la excentricidad que se opone al momento de las cargas. La solución es ligeramente más complicada cuando se pone el tendón excéntricamente con respecto al centroide de la sección de concreto. Debido a un preesfuerzo excéntrico, el concreto está sujeto a un

momento, así como a una carga directa. El momento producido por un preesfuerzo es F_e y los esfuerzos debido a este son:

$$f = F_e y / I \quad (2.1)$$

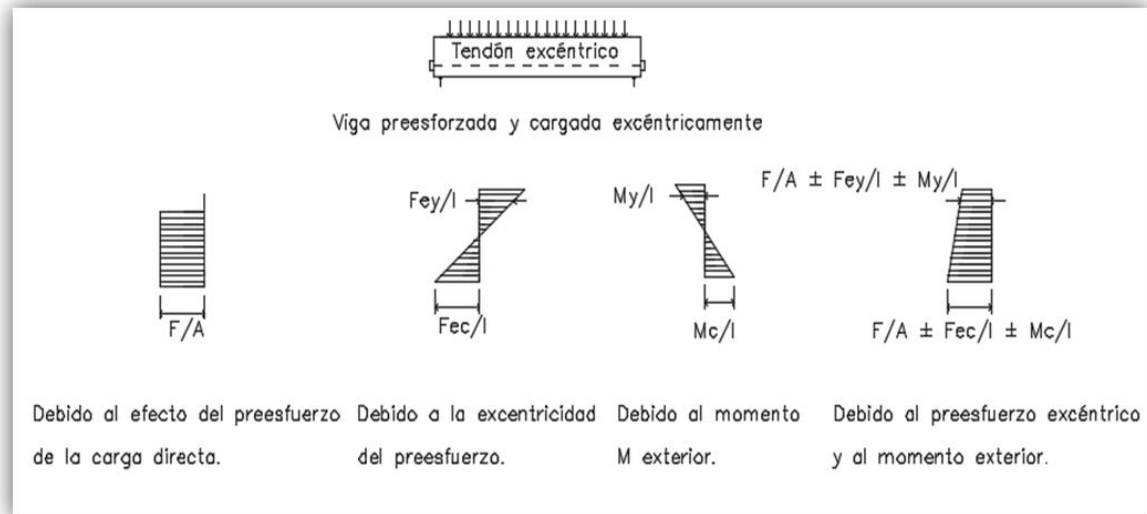


Fig 2.3 Distribución del esfuerzo a través de una sección de concreto preesforzado excéntricamente. Elaborado por la autora.

2.1.1.2 Método de diseño directo.

Según (318, 2019) el Método de Diseño Directo consiste en un conjunto de reglas para la distribución de momentos a las secciones de losa y de vigas y simultáneamente cumplir con los requisitos de seguridad y con la mayoría de los requisitos de funcionamiento. Consiste en tres pasos fundamentales, como se muestran a continuación:

- (1) Determinación del momento estático mayorado total.
- (2) Distribución del momento estático mayorado total a las secciones de momentos negativos y positivos.
- (3) Distribución de los momentos mayorados negativos y positivos a las columnas y franjas centrales y a las vigas, si las hay. La distribución de momentos a las columnas y franjas centrales se usa también en el método del pórtico equivalente (Fig 2.4 y 2.5).

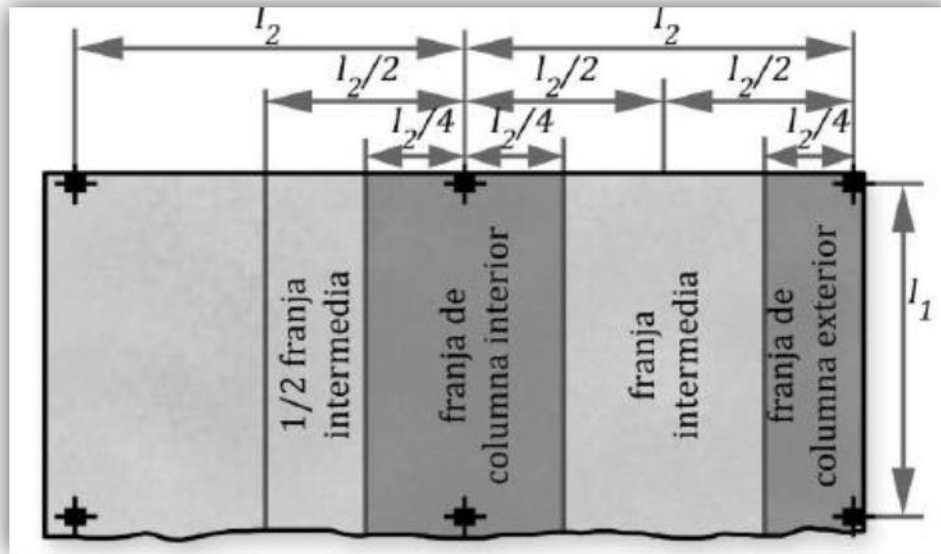


Fig. 2.4 Franja de columna $l_2 \leq l_1$ (318, 2019).

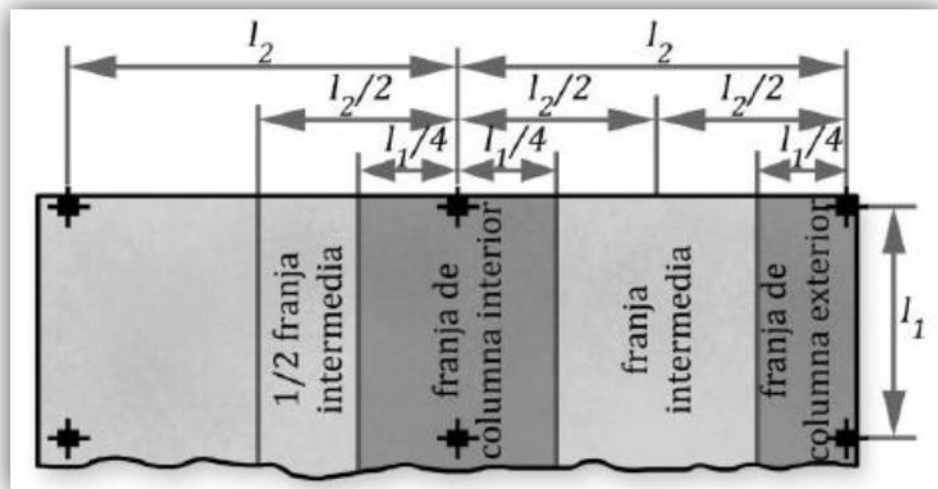


Fig 2.5 Franja de columna $l_2 > l_1$ (318, 2019).

El método de diseño directo se desarrolló tomando en cuenta los procedimientos teóricos para la determinación de los momentos en losas con o sin vigas, la necesidad de disponer de procedimientos simples de diseño y construcción y precedentes derivados del comportamiento de los sistemas de losas. En consecuencia, los sistemas de losa que se diseñan con el método de diseño directo deben cumplir con las limitaciones.

Se puede usar el método de diseño directo aun si la estructura no cumple con las limitaciones, siempre y cuando se pueda demostrar por medio del análisis que la limitación en particular no aplica a esa estructura. Por ejemplo, en el caso de un sistema de losa que soporta una carga inmóvil (por ejemplo, un depósito de agua, en el cual se espera que la carga sobre todos los paneles se espera que sea la misma), no es necesario cumplir con las limitaciones de carga viva.

Se permite que los sistemas de losas en dos direcciones que cumplan con las siguientes limitaciones sean diseñados de acuerdo a este método:

- Deben existir un mínimo de tres vanos continuos en cada dirección.
- Las longitudes de luces contiguas medidas centro a centro de los apoyos en cada dirección no deben diferir en más de un tercio de la luz mayor.
- Los paneles de las losas deben ser rectangulares, con una relación entre la luz mayor y menor, medidas centro a centro de los apoyos del panel, no mayor de 2.
- Las columnas pueden estar desalineadas hasta un 10 por ciento de la luz (medido en la dirección del desalineamiento) con respecto a cualquier eje que pase por el centro de columnas sucesivas.
- Todas las cargas deben ser únicamente gravitacionales y estar uniformemente distribuidas en todo el panel.
- La carga viva no mayorada no debe exceder de dos veces la carga muerta no mayorada.
- Para una losa con vigas entre los apoyos en todos los lados, debe satisfacerse la ecuación siguiente para las dos direcciones perpendiculares.

$$0.2 \leq \frac{\alpha_{f1} \times l_2}{\alpha_{f2} \times l_1} \leq 5 \quad (2.2)$$

Donde α_{f1} y α_{f2} se calculan de acuerdo con:

$$\alpha_f = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cs} \times I_s} \quad (2.3)$$

I_s - Inercia de losa.

I_b -Inercia de viga.

Se permiten variaciones de las limitaciones, siempre que se demuestre por medio de análisis que se cumplen las condiciones de equilibrio y compatibilidad geométrica, si la resistencia de diseño en cada sección es por lo menos igual a la resistencia requerida y si se cumplen todas las condiciones de funcionamiento incluyendo los límites especificados para las deflexiones.

Este método de diseño se puede aplicar tanto para losas en dos direcciones como para losas en una dirección, y se debe tener en cuenta el cumplimiento de las limitaciones que se plantean para las losas en dos direcciones, variando solamente la tercera limitación para el caso de losas en una dirección, varía debido a que la relación entre la luz mayor y menor, medidas de centro a centro de los apoyos de los paños debe ser mayor que 2. Este método permite delimitar las franjas intermedias y de columnas por lo que tiene un papel fundamental cuando se trata de delimitarlas y determinar su ancho de franja.

2.1.2 Consideraciones y especificaciones para el diseño de las losas postensadas.

Las consideraciones y especificaciones siguientes se establecieron a partir de lo planteado en (T.Y.LIN, 1984) y (318, 2019).

- Los tendones de vigas y losas postensadas continuas en general tienen esfuerzos aplicados en un punto a lo largo del vano donde el perfil del tendón se encuentra cerca o en el centro de la sección transversal del concreto. Por lo tanto, las juntas de construcción interiores usualmente están ubicadas dentro del tercio final del vano, en vez del tercio central del vano
- Los requisitos de refuerzo preesforzado se han seleccionado para proporcionar una fuerza efectiva a la losa, aproximadamente igual a la resistencia a la fluencia del refuerzo no preesforzado por retracción y temperatura. Esta cantidad de preesforzado, 0.7 MPa sobre el área total del concreto, se ha utilizado exitosamente en un gran número de proyectos. Cuando el espaciamiento de tendones empleados como refuerzo por retracción y temperatura sea mayor de 1.4 m, se requiere refuerzo adherido adicional en los bordes de la losa donde se

aplican fuerzas de preesforzado, para poder reforzar en forma adecuada el área entre el borde de la losa y el punto donde los esfuerzos de compresión, más allá de los anclajes individuales, se han distribuido suficientemente, de manera que la losa trabaje uniformemente a compresión

- Los tendones empleados como refuerzo por retracción y temperatura deben colocarse, en altura, lo más cercanos posible al centro de la losa. En los casos donde los tendones para retracción y temperatura se emplean para sostener los tendones principales, se permiten variaciones en localización con respecto al centroide de la losa; sin embargo, la resultante de los tendones para retracción y temperatura no debe caer fuera del área del núcleo central de la losa
- El diseñador debe evaluar los efectos del acortamiento de la losa para asegurar una acción apropiada. En la mayoría de los casos el bajo nivel de preesforzado recomendado no deberá causar dificultades en una estructura detallada adecuadamente. Puede requerirse atención especial cuando los efectos térmicos sean importantes
- El espaciamiento de los cables para las losas planas tiene un promedio de 60 cm. Para losas con espesores entre 15 y 25 cm, el espaciamiento máximo ha sido de 1.36 m para techos y de 1.06 m para pisos. El espaciamiento mínimo variará entre 15.2 cm y 20.3 cm.
- El espaciamiento entre los tendones no debe exceder de 1.8 m
- Para el diseño de zonas de anclaje de postensado debe usarse un factor 1.2 para la fuerza de preesfuerzo máxima aplicada por el gato
- Los aceros de preesforzado no adheridos deben estar encapsulados en un ducto de postensado. El acero de preesforzado deben quedar completamente recubierto y el ducto postensado alrededor del acero de preesforzado debe llenarse con un material adecuado que asegure la protección contra la corrosión
- La separación de los cables o grupos de cables en una dirección no debe ser mayor que 8 veces el espesor de la losa ni que 5 ft. La separación de los cables debe ser tal que se obtenga un pretensado promedio mínimo (después de todas las pérdidas de pretensado) de 125 psi sobre la sección de losa tributaria del cable o grupo de cables. Se debe prestar particular atención

- En cada dirección se deben colocar como mínimo dos cables que atraviesen la sección crítica de corte sobre las columnas
- Para losas preesforzadas con cargas uniformemente distribuidas, el espaciamiento máximo s de los tendones o grupos de tendones en al menos una dirección debe ser el menor de entre $8h$ y 1.5 m.

2.1.3 Procesos de cálculo y diseño de las losas postensadas.

El proceso de cálculo y diseño de las losas postensadas por medio de los criterios planteados en (Amy Reineke Trygestad, 2005), (318, 2019),(T.Y.LIN, 1984),(Reinforcement, 2006) y la opinión de la autora de esta tesis.

- Predimensionamiento
 - Selección del espesor de la losa

Para la selección del peralte se tiene en cuenta los siguientes criterios:

Criterio #1(ver Tabla 2.1 y 2.2): Al estimar el peralte de una sección preesforzada, una regla aproximada es utilizar el 70% del peralte correspondiente para la construcción convencional del concreto reforzado (T.Y.LIN, 1984).

Tabla 2.1 Espesor mínimo de losas en una dirección macizas no preesforzadas.

Elaborado por la autora.

<i>Condición de apoyo</i>	<i>h mínimo</i>
Simplemente apoyadas	1/20
Un extremo continuo	1/24
Ambos extremos continuos	1/28
En voladizo	1/10

Para f_y distinto de 420 MPa, los valores de la Tabla 2.1 deben multiplicarse por $(0.4 + \frac{f_y}{700})$

Tabla 2.2 Espesor mínimo de losas no preesforzadas en dos direcciones sin vigas interiores (mm). Elaborado por la autora.

f_y (MPa)	<i>Sin ábacos</i>		<i>Con ábacos</i>	
	<i>Paneles exteriores</i>	<i>Paneles</i>	<i>Paneles exteriores</i>	<i>Paneles</i>

			<i>interiores</i>			<i>interiores</i>
	<i>Sin vigas de borde</i>	<i>Con vigas de borde</i>		<i>Sin vigas de borde</i>	<i>Con vigas de borde</i>	
280	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$	$l_n/36$	$l_n/40$	$l_n/40$
420	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$
520	$l_n/28$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/34$	$l_n/34$

Criterio #2: También existen otras reglas empíricas, por ejemplo, el espesor de las losas preesforzadas puede variar entre $L/35$ para cargas fuertes y $L/55$ para cargas ligeras (T.Y.LIN, 1984).

Criterio #3: En losas planas preesforzadas continuas con más de dos vanos en cada dirección, la relación luz-espesor generalmente no debe exceder de 42 para pisos y 48 para cubiertas, estos límites pueden incrementarse a 48 y 52 cuando los cálculos indican que la deflexión tanto a corto como a largo plazo, la contraflecha, así como la frecuencia natural de vibración y su amplitud no son objetables (318, 2019).

Criterio #4: Cuando la relación de la carga viva y la muerta sea menor que 1 ($LL/DL \leq 1$) se estimará una relación de L/h de 45 para los pisos y 48 para las losas (Amy Reineke Trygestad, 2005).

- Combinación de cargas.

Deben considerarse las diversas combinaciones de carga con el fin de determinar la condición de diseño crítica. Esto resulta particularmente cierto cuando la resistencia depende de más de un efecto de carga, tal como la resistencia a flexión y carga axial combinada, o la resistencia a cortante, en elementos con carga axial.

Si algunas circunstancias inusuales requieren mayor confiabilidad en la resistencia de algún elemento en particular, distinta de aquella que se encuentra en la práctica acostumbrada, puede resultar apropiada para dichos elementos una disminución en los factores de reducción de resistencia ϕ o un aumento en los factores de carga estipulados.

En (López, 2016) se tendrán en cuenta para el diseño varios tipos de carga entre los que se destacan:

- Cargas permanentes o muertas: son cargas que actúan de forma continua sobre la estructura con una intensidad que puede considerarse que no varíe en el tiempo. Están constituidas principalmente por cargas gravitatorias y provienen del peso propio de todos los elementos que conforman la estructura, las terminaciones y los elementos no estructurales. También se considera cualquier otra carga peso o fuerza que actúe en todo momento sobre la estructura, como las debidas al efecto del pretensado y el empuje estático de líquidos y tierras
- Cargas vivas, temporales o de uso: son aquellas que no siempre actúan sobre la estructura con la misma intensidad en el tiempo, tiene un carácter muy variable en su distribución en tiempo, pudiendo desaparecer en determinados periodos de la construcción y utilización de la obra. Se consideran como tal el peso de los equipos, la acción del viento, el efecto del sismo, explosiones, rotura de equipos, entre otros

Para la cubierta y el entrepiso se utilizará la NC 775-8 2010 para extraer las cargas características de uso en caso de edificaciones de tipo turística y en caso de otro tipo de edificación se empleará la NC 284:2003.

Tanto para cubierta como para entrepiso las cargas permanentes (densidades de los materiales) se extraerán de la NC 283 2003.

Las combinaciones de los estados de carga que se emplearán están estipuladas en la (318, 2019)

- Diseño por flexión y por retracción y temperatura de ser necesario

Refuerzo mínimo a flexión en losas preesforzadas en una dirección:

En (P.Miller, 2012) se establece que en las losas con tendones no adheridos, el área mínima de refuerzo corrugado adherido $A_{smín}$ debe ser:

$$A_{smín} \geq 0.004Act \quad (2.4)$$

Act: es el área de la porción de la sección transversal entre la cara de tracción en flexión y el centroide de la sección bruta (Fig 2.6).

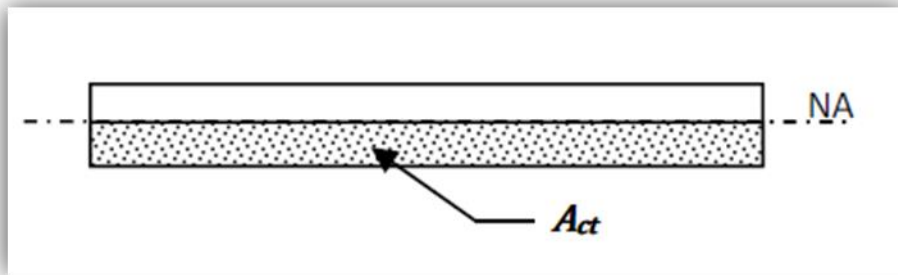


Fig 2.6 Área de la porción de la sección transversal entre la cara de tracción en flexión y el centroide de la sección bruta.

El espaciamiento por cálculo se determina de la manera siguiente:

$$@ = \left(\frac{b}{A_{\text{mín flexión}}} \right) \phi_{\text{barra}} \quad (2.5)$$

Se colocará un acero constructivo para amarrar el acero por flexión que estará en la misma dirección que el refuerzo preforsados principal o por temperatura, espaciado al doble del espaciamiento por flexión.

Refuerzo de retracción y temperatura:

En losas estructurales en una dirección donde el refuerzo a flexión se extiende en una sola dirección, se debe colocar refuerzo en dirección perpendicular al refuerzo a flexión para resistir los esfuerzos debidos a retracción y temperatura (Fig 2.7).

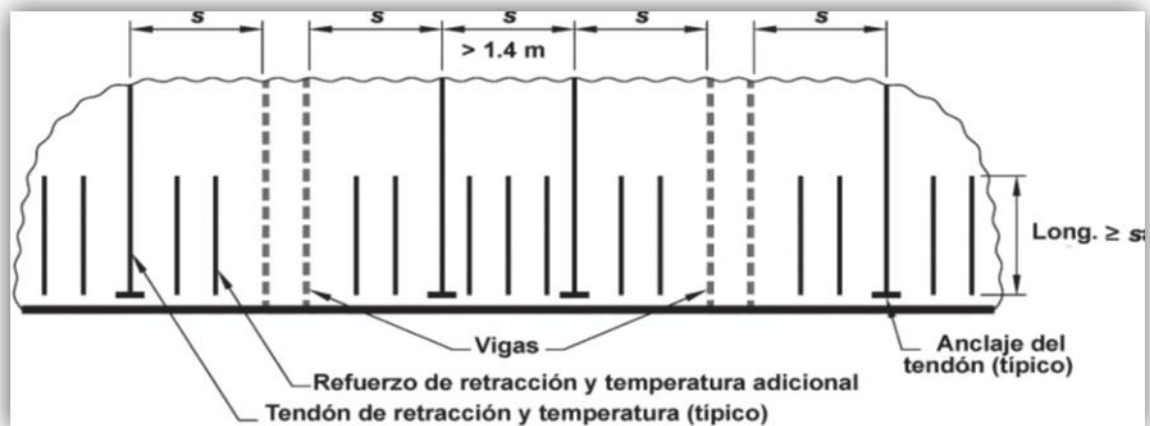


Fig 2.7 Vista en planta del borde de la losa mostrando el refuerzo adicional de retracción y temperatura (318, 2019).

El espaciamiento del refuerzo corrugado de retracción y temperatura no debe exceder el valor menor de $5h$ y 450 mm

El acero de preesforzado empleado como refuerzo de retracción y temperatura y su esfuerzo promedio mínimo de compresión, después de las pérdidas, debe ser al menos 0.7 MPa sobre el área bruta del concreto. Por lo que se colocará cada 45 cm 1 tendón para garantizar el cumplimiento de esta condición y el reforzamiento por temperatura y retracción.

Refuerzo mínimo a flexión en losas preesforzadas en 2 direcciones:

Para losas preesforzadas, la fuerza de preesfuerzo efectiva Aps fse debe proveer un esfuerzo de compresión promedio mínimo de 0.9 MPa sobre la sección de losa aferente al tendón o grupo de tendones. Para losas con sección transversal variable a lo largo del vano de la losa ya sea en la dirección paralela o en la perpendicular al tendón o grupo de tendones, se requiere un preesfuerzo promedio mínimo efectivo de 0.9 MPa en cada sección transversal de losa aferente al tendón o grupo de tendones a lo largo del vano.

En losas preesforzadas, se debe colocar un área mínima de refuerzo longitudinal corrugado adherido, Asmín en la zona de tracción precomprimida en la dirección de la luz bajo consideración de acuerdo con la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Área mínima de refuerzo longitudinal corrugado adherido, Asmín, en losas en dos direcciones con tendones adheridos y no adheridos.

Zona	f_t calculado después de considerar todas las pérdidas, MPa.	$A_{smín}$, mm ²
Momento positivo	$f_t \leq 0.17\sqrt{f'_c}$	No se requiere
	$0.17\sqrt{f'_c} > f_t \leq 0.5\sqrt{f'_c}$	$A_s = \frac{N_c}{0.5f_y}$
Momento negativo en la columna	$f_t \leq 0.5\sqrt{f'_c}$	$A_s = 0.00075A_{cf}$

f'_c = resistencia especificada a la compresión del concreto, MPa

f_t = esfuerzo en la fibra extrema por tracción en la zona de 2 tracción precomprimida, calculado para las cargas de servicio usando las propiedades de la sección bruta después de tener en cuenta todas las pérdidas de preesforzado, MPa

f_y = resistencia especificada a la fluencia del refuerzo no preesforzado, MPa

N_c es la fuerza de tracción resultante que actúa sobre la porción de la sección transversal de concreto que se encuentra sometida a los esfuerzos de tracción debido a los efectos combinados de las cargas de servicio y el preesfuerzo efectivo, N. (Ver Fig 2.8)

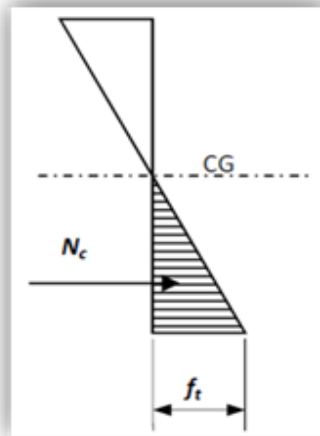


Fig 2.8 Fuerza de tracción resultante (N_c)

A_{cf} es la mayor área de la sección transversal bruta de las franjas vigalosa en los dos pórticos equivalentes ortogonales que se intersectan en una columna en una losa en dos direcciones.

El refuerzo corrugado mínimo en la parte inferior de la losa, A_s , en cada dirección, debe ser el mayor de entre (a) y (b):

$$a) A_s = \frac{0.37\sqrt{f'_c} b_w d}{f_y} \quad (2.6)$$

$$b) A_s = \frac{2.1b_w d}{f_y} \quad (2.7)$$

b_w es el ancho de la cara de la columna a través de la cual pasa el refuerzo.

El refuerzo corrugado inferior calculado debe pasar dentro de la zona circunscrita por el refuerzo longitudinal de la columna y debe anclarse en los apoyos exteriores.

➤ Abertura

Se permite dejar aberturas de cualquier tamaño en los sistemas de losas si se demuestra por medio de análisis que se cumplen todos los requisitos de resistencia y condiciones de funcionamiento, incluyendo los límites especificados para las deflexiones.

En los sistemas de losas sin vigas se permite dejar aberturas de acuerdo con (a) hasta (d).

(a) Se permite dejar aberturas de cualquier tamaño en la zona común a dos franjas centrales que se intersecten, siempre que se mantenga como mínimo la cantidad total de refuerzo requerido para la losa sin aberturas.

(b) Donde dos franjas de columna se intersecten esta área no debe perforarse con aberturas de más de un octavo del ancho de la franja de columna de cualquiera de los dos vanos. En los lados de la abertura, debe añadirse una cantidad de refuerzo equivalente al interrumpido por la abertura.

(c) En la zona común a una franja de columna y una franja central no más de un cuarto del refuerzo en cada franja puede interrumpirse por aberturas. Una cantidad de refuerzo equivalente al interrumpido por la abertura debe añadirse en los lados de ésta.

(d) Cuando las aberturas están situadas dentro de las franjas de columna o a una distancia menor a $10h$ de una carga concentrada o zona de reacción, se debe cumplir con lo planteado en el criterio #1 en caso de losas sin cabezas de cortante o con el criterio #2 en losas con cabezas de cortante.

Criterio #1: Cuando las aberturas de las losas están situadas dentro de las franjas de columnas o a una distancia menor a $10h$ de una zona de carga concentrada o de reacción, la porción de b_o encerrada por las líneas rectas que se proyectan desde el centroide de la columna, carga concentrada o área de reacción tangentes a los bordes de las aberturas debe considerarse como inefectiva.

Criterio #2: Cuando una abertura está localizada dentro de la franja de la columna o a menos de $10h$ de una columna en losas con cabeza de cortante, la parte inefectiva de bo debe ser la mitad de la definida en el criterio #1.

- Análisis de las franjas
- Para cada franja y panel interior
 1. Extracción y obtención del ancho de la franja, espesor de losa, luz, fuerza de servicio y excentricidad del centro y de los apoyos.
 - Ancho de franja: Se determina según las Figuras 2.4 y 2.5
 - Espesor y luz de la losa

El espesor se determinará teniendo en cuenta los cuatro criterios planteados anteriormente y la luz no será más que la extensión de la losa (Fig 2.9).

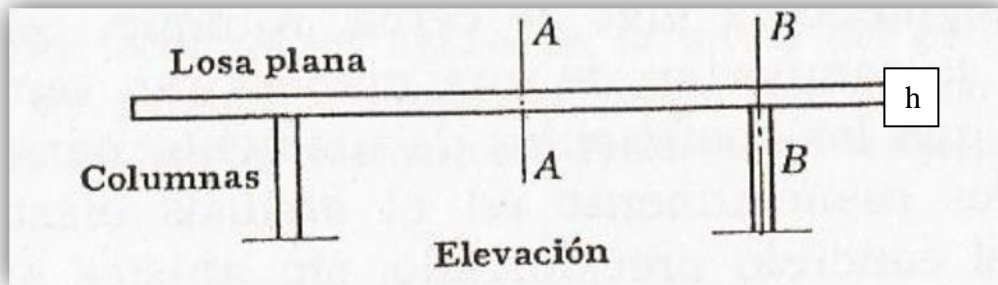


Fig 2.9 Vista de una losa apoyada sobre 2 columnas.

- Fuerza de servicio (fuerza diseñada en los tendones)

El efecto de una fuerza del pretensado en un miembro puede evaluarse reemplazando el tendón con el equivalente, externamente, las cargas aplicadas.

$$F_S = A_{ps}(0.7f_{pu} - losses) \quad (2.8)$$

A_{ps} : Área del tendón.

f_{pu} : Resistencia nominal de los tendones.

Losses: Los valores se asumen en un rango de 15 ksi a 20 ksi.

- Excentricidad del centro y de los apoyos (Fig 2.10)

$$e = \frac{h}{2} - r_n \quad (2.9)$$

h : Espesor de losa.

r_n : Recubrimiento neto.

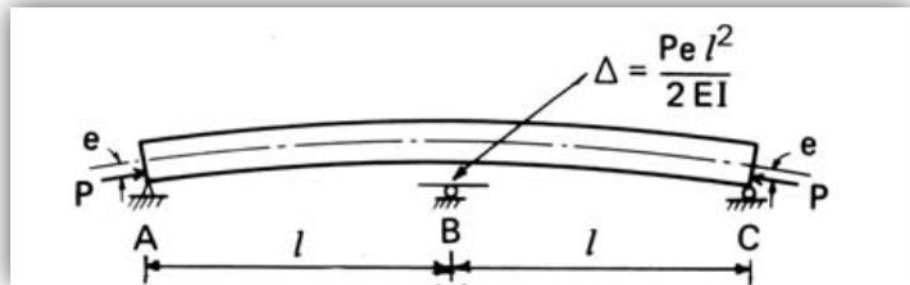


Fig 2.10 Actuación de la excentricidad.

- Determinación de la inercia de la losa (I_s). Ver Figura 2.11

$$I_s = \frac{bh^3}{12} \quad (2.10)$$

b : Ancho de la franja.

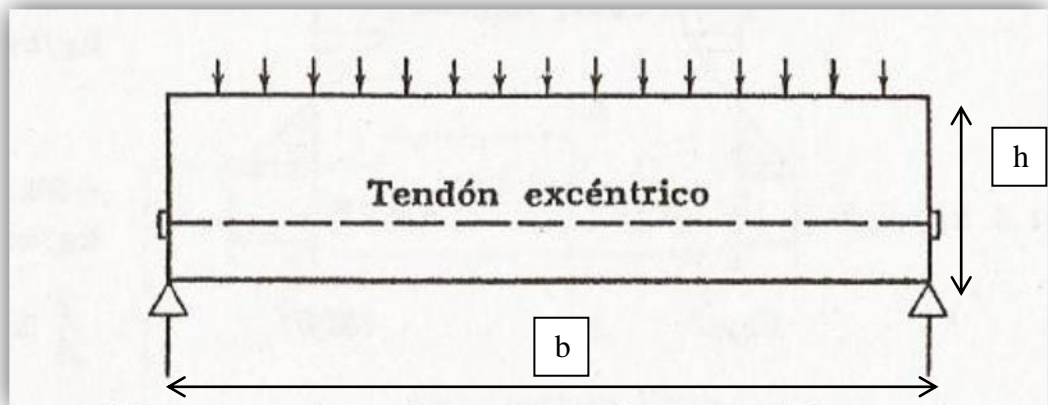


Fig 2.11 Vista de una losa postensada.

- Obtención de la carga total tributaria (Q) y la carga permanente a compensar por el postensado (g).

$$Q = \text{Carga total} \times (\text{Ancho de franja}) \quad (2.11)$$

- El valor de la carga permanente a compensar por el postensado (g) estará determinado de un 65 a un 80% de la carga total tributaria (Q) (Amy Reineke Trygestad, 2005)

4. Calculo del resto de la carga (q).

$$\bullet \quad q = Q - g \quad (2.12)$$

5. Estimación del momento del resto de la carga (Fig 2.12).

- Estos momentos se estiman teniendo en cuenta que se trata de una losa continua y siguiendo los criterios y condiciones planteadas en (318, 2019) para la redistribución de estos.

$$\bullet \quad M = \frac{ql^2}{K} \quad (2.13)$$

- K : factor que depende de las condiciones de apoyo de los paños de la losa

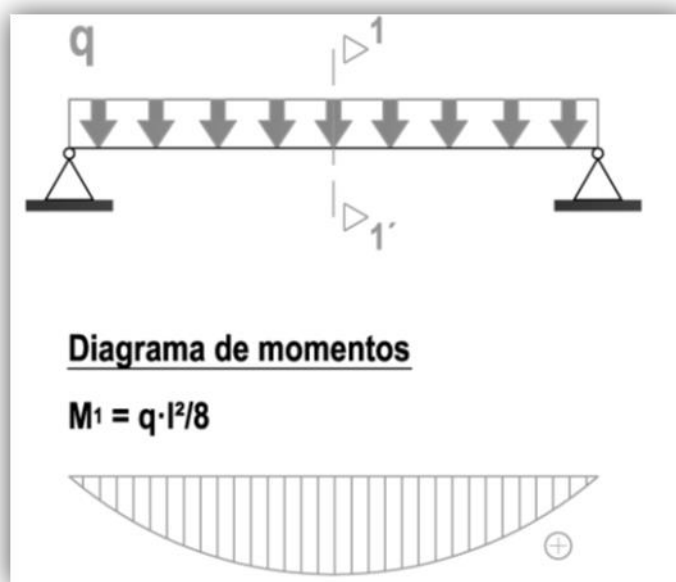


Fig 2.12 Momento del resto de la carga.

6. Determinación del esfuerzo de la fibra extrema (Fig 2.13).

$$\circ \quad \sigma_e = Mc/I \quad (2.14)$$

Mediante el análisis de la figura 2.11 se obtiene:

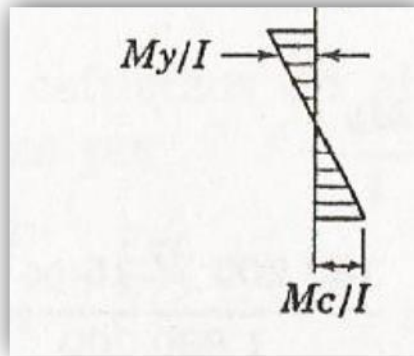


Fig 2.13 Esfuerzo de la fibra extrema debido al momento del resto de la carga o momento exterior (T.Y.LIN, 1984).

7. Obtención de la fuerza pretensado para la carga g (F o P).

$$\bullet P = \frac{g l^2}{8 \delta} \quad (2.15)$$

$$\bullet \delta = \text{Excentricidad del centro} + \text{Excentricidad del apoyo} \quad (2.16)$$

• En caso de que las excentricidades sean iguales ($\delta = 2e$)

8. Calculo del esfuerzo de pretensado (Fig 2.14).

$$\bullet \sigma_p = P/A \quad (2.17)$$

Se determinará teniendo en cuenta la figura 2.11 y debido al efecto de preesfuerzo de la carga directa.

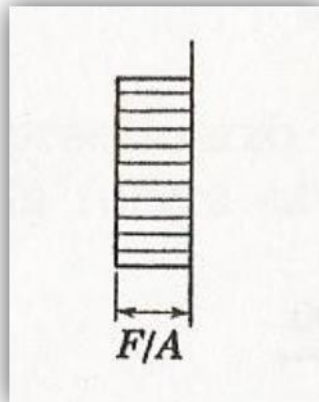


Fig 2.14 Esfuerzo del pretensado (T.Y.LIN, 1984).

9. Determinación del esfuerzo total de la fibra superior y de la fibra inferior (Fig 2.15).

○ Fibra superior:

$$\sigma_+ = \sigma_p + \sigma_e \quad (2.18)$$

○ Fibra inferior:

$$\sigma_- = \sigma_p - \sigma_e \quad (2.19)$$

Ambas fibras se determinarán teniendo en cuenta la figura 2.13 y 2.14, y debido al preesfuerzo no excéntrico y al momento exterior.

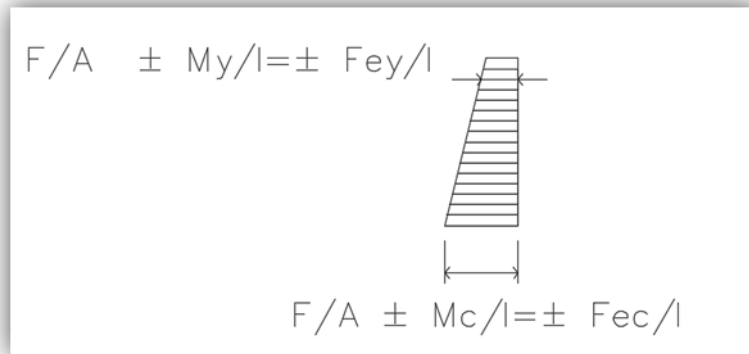


Fig 2.15 Esfuerzo total de las fibras. Elaborado por la autora.

10. Estimación de la cantidad de cables por franja o por metro.

$$\bullet \quad n = P/Fs \quad (2.20)$$

11. Obtención del espaciamiento de los cables en cm.

Esta fórmula considera 2 cables dentro de una vaina:

$$\bullet \quad @ = 100/0,5n \quad (2.21)$$

Esquema que muestra la secuencia de pasos para la determinación de los cables (en caso de excentricidades iguales):

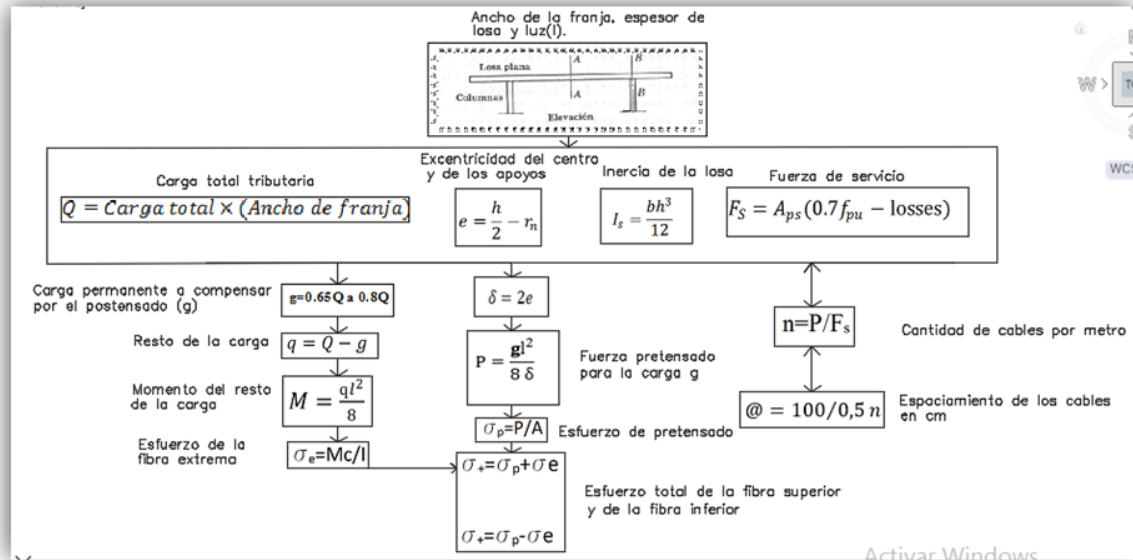


Fig 2.16 Esquema de determinación de los cables en losas postensadas. Elaborado por la autora.

Los cálculos se realizarán empleando hojas de cálculo en Excel (Fig 2.17) para facilitar el diseño, un ejemplo de esto es:

Franja Extrema. Centro Luz										
Carga total	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensada para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
Q	g	q	$M=q l^2/8$	$\sigma_e=Mc/I$	$P=g l^2/8\delta$	$\sigma_p=P/A$	$\sigma_+=\sigma_p+\sigma_e$	$\sigma_-=\sigma_p-\sigma_e$	$n=P/F_s$	$@=100/(2*n)$
(t/m ²)	(t/m ²)	(t/m ²)	(t-m)	(kg/cm ²)	(t)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)		
0,58	0,58	-0,13	-1,20	-14,9	42,9	19,5	4,6	34,4	3,8	52

Fig 2.17 Hoja de cálculo de los cables que componen la losa postensada. Elaborado por la autora.

2.2 Software utilizado para el diseño de las losas postensadas en Cuba.

En Cuba se utilizan software que facilitan el diseño de los elementos que componen una estructura tales como:

- *SAP2000*: Según (Novillo & Villa, 2004) es un programa de análisis y diseño estructural, que se basa en el método de elementos finitos utilizando matrices de

rigidez, el cual proporciona herramientas que son muy útiles dentro del modelado de edificios sismo resistentes. Con el *SAP2000* puedes modelar y diseñar puentes, tanques, cimentaciones, pilotes, plancha base entre otros siempre y cuando el modelo por elementos finitos sea coherente. Esta herramienta de cálculo permite optimizar el diseño considerando diversos sistemas estructurales, geometría, secciones y condiciones de carga para una determinada estructura, logrando de esta manera simular lo más cercano posible las condiciones a las que va a estar expuesta la estructura real dentro del modelo estructural.

- *ETABS*: es un programa de análisis y diseño con un propósito especial, sofisticado y fácil de usar, desarrollado específicamente para sistemas de edificaciones. *ETABS* posee una poderosa e intuitiva interfaz gráfica con procedimientos de modelaje, análisis y diseño sin igual, todos integrados usando una base de datos común. Aunque fácil y sencillo para estructuras simples, *ETABS* también puede manejar los más grandes y complejos modelos de edificios, incluyendo un amplio rango de comportamientos no lineales, haciéndolo la herramienta predilecta para ingenieros estructurales en la industria de la construcción. *ETABS* ofrece la mayor cantidad de herramientas de análisis y diseño disponibles para el ingeniero estructural que trabaja con estructuras de edificios (Br. Pinto Barrantes, 2018)
- *SAFE*: se creó con el propósito general de proporcionar un software más eficiente y completo para el análisis y diseño de los sistemas de losas, una herramienta que ofrece un ahorro significativo en el tiempo debido a que es un programa de elementos finitos que permite obtener una mayor precisión en comparación con equivalentes métodos estructurales. Es un programa sofisticado, fácil de usar, con fines especiales de análisis, diseño y detallado, desarrollado específicamente para losas de hormigón, contiene potentes herramientas de modelado basadas en objetos con una intuitiva interfaz gráfica, permitiendo el modelado rápido y eficiente de las losas ordinarias de geometría arbitraria con aberturas, ábacos, postensado, nervaduras, con vigas, apoyadas en columnas, paredes o suelos. El diseño es perfectamente integrado con la modelización y el análisis, y proporciona

la presentación de informes de la armadura necesaria calculada sobre la base de un elegido código de diseño. Dibujos detallados pueden ser producidos para losas y vigas diseñadas (Cabrera., 2014)

En (Hernández, 2011) el *SAFE* es un programa desarrollado por la empresa *CSI, Computer and Structures, Inc.* En Berkeley, California, EEUU. Es un programa especializado que automatiza el análisis y diseño de simple a complejas plateas y cimentaciones de concreto usando avanzados sistemas de modelación. El programa puede analizar y diseñar losas o plateas de formas arbitrarias y de espesor variable, de paneles desnivelados, con aberturas, vigas de borde y discontinuidades. Las cimentaciones pueden ser combinaciones de plateas, franjas de cimentación o cimentaciones corridas aisladas.

En *SAFE*, el análisis está basado en el método de elementos finitos, una moderna y consistente teoría el cual contempla la variación de las propiedades por los efectos de los momentos torsores. El enmallado es automático y está basado en parámetros especificados por el usuario. Las cimentaciones son modeladas como placas gruesas sobre cimentaciones elásticas, donde solamente la rigidez a la compresión del suelo es automáticamente discretizados basados en el módulo de la reacción de la sub-base que es especificada para cimentación.

Además, proporciona las disposiciones del refuerzo y evalúa los efectos de corte por punzonamiento alrededor de la base de la columna. Entre sus opciones, se puede incluir características del agrietamiento en el modelo de elemento finito, basados en el refuerzo proporcionado a la losa. Además, una opción comprensiva de exportación está disponible en el *ETABS* que automáticamente crea modelos completos de cualquier piso o cimentación para su diseño inmediato en el *SAFE*.

El *SAP2000* es el más completo de los tres, sin embargo, para edificaciones el *ETABS* es más amigable, posee una serie de herramientas que lo hace más fácil para definir la geometría, el *SAFE* es el más completo para losas y zapatas e interactúa con ambos *SAP2000* y *ETABS*.

Sin embargo, el *ETABS* no se queda atrás es ideal para edificios de concreto armado y acero, te permite diseñar muros de corte, muros acoplados, diseña nodos en edificios de concreto armado, verifica cosas como el criterio columna fuerte –viga débil tanto para estructuras de acero como en concreto, además te permite diseñar losas mixtas con vigas de acero. Y por si fuera poco tiene enlace directo con *SAFE*, el cual te permite diseñar las losas y cimentaciones de una manera muy rápida y amigable

El *SAFE* ofrece al usuario poderosas herramientas necesarias para el modelado, análisis diseño y detalle del hormigón en sistema de losas, es un programa que se basa en el diseño de una losa por el método de carga balanceada empleado para el cálculo y análisis de estructuras preesforzadas, por lo se determina para la realización de este estudio el empleo del mismo (López, 2016).

2.2.1 Pasos para el diseño de las losas postensadas mediante el *Safe*.

El manual (INC, 2010) permitió establecer los pasos para desarrollar la modelación de una losa postensada en dos niveles de piso que se muestran a continuación:

1. Selección o creación del modelo:

1.1 Del menú *File* seleccione *New Model*, esto despliega la Reja Definición, de la caja de diálogo, donde se selecciona la opción que se asemeje al diseño que se va a realizar para realizarle el menor número de modificaciones o se trabaja un modelo nuevo en *Grid Only*.

En caso de seleccionar la opción *Grid Only* del menú *File*:

- Se abre un cuadro de diálogo conocido como *Cordinate System Definition*, donde se selecciona el número de ejes en línea tanto en la dirección x como en y, y el espaciamiento entre los ejes, en el caso de que los espaciamientos sean distintos en el mismo cuadro de diálogo selecciono la variante *Edit Grig*, Además para modificar las unidades de medida en dicho cuadro marco *Modify/Show* en la opción *Unit* y al terminar las modificaciones se realiza *click* en *ok*.

1.2 Otra forma de crear un modelo es en el menú *File* se da *click* en importar, luego marcar *DWX/DWG Import*, esto despliega un recuadro, en la opción *Line* se selecciona 00-Ejes y además se precisa en este mismo cuadro la unidad en que se desea importar que tiene que coincidir con la unidad en que se dibujaron los ejes que se están importando al *Safe*. (Ver Anexos #1,2 y 3)

2 Definición de materiales, propiedades de elementos componentes de la estructura y de las cargas:

2.1 En el menú *Define* se marca la opción *Material Properties*, y luego *Add New Material Quick*. (Ver Anexos # 4 y 5)

- Se abre un nuevo cuadro donde se define el tipo de material (concrete) y su resistencia a compresión. Finalmente, *click* en *ok*. (Ver Anexos # 6)
- Posteriormente se da *click* en *Add New Material Quick* se define *Material Type* el tendón y como especificaciones *ASTM A416 Grade 186*. Finalmente, *click* en *ok*. (Ver Anexos # 7)

2.2 En el menú *define* se selecciona *Slab Property* en el cuadro de diálogo se marca la opción *Add New Property* lo cual muestra otro cuadro que permite (ver Anexo # 8):

- Definir espesor (*Thickness*) y tipo de estructura, *click* en *ok*. (Ver Anexo # 9)

2.3 En el menú *define* se selecciona *Tendon Properties*, *click* en *Add New Property*.

- Definir *Property Name*, en este caso *Tendon 1*, luego se selecciona el tipo de material (*material type*) que es *A416Gr186* y su área, posteriormente *click* en *ok*. (Ver Anexo # 10)

2.4 En el menú *define* en caso de llevar vigas se elige *Beam Property*, marco la opción *Beam1*, y luego *Modify/Show Property*, lo cual despliega un cuadro que permite:

- Definir *Web Width at Top*, *Web Width at Bottom* y *Depth.*, luego *click* en *ok*.

2.5 En el menú *Define*, en la opción *Column Propieties*, *Add New Property* se despliega un cuadro que permite:

- Definir las dimensiones de una columna después de seleccionar que la sección será rectangular. (Ver Anexo # 11)

2.6 En el menú *Define*, en la opción *Wall Propieties*, *Add New Property* se despliega un cuadro que permite:

- Definir el espesor y material del muro. (Ver Anexo # 12)

2.7 Del menú *Define* se selecciona *Load Patterns*, luego la opción *Add Load Pattem*.

- Selecciono el tipo de carga y *Self Weight Multiplies* (se asume de valor 0 para el resto de las cargas distintas a las muertas que se asume valor 1, en caso de que se quiera que el programa tenga en cuenta el peso propio de la losa). Además, se debe adicionar el tipo de carga *PRESTRESS-FINAL (PT-FINAL)* y *PRESTRESS-TRANSFER (PT-TRANSFER)*. (Ver Anexo # 13)

2.8 Del menú *Define* se selecciona *Load Cases*, y luego *click to Add New Case*.

- Marco las cargas creadas en el paso anterior. (Ver Anexo # 14)
- Revisar una a una de las cargas marcadas en *Modify/Show Cases*, en cuanto al tipo de área que debe ser *Static* y el tipo de análisis de área que es *Linear*. (Ver Anexo # 15)

2.9 Del menú *Define* se selecciona *Load Combination*, *click to Add New Combo*.

- Se asigna un nombre a la combinación y se eligen las cargas que pertenecerán a la misma con su respectivo factor de mayoración, además se define el tipo de carga y el tipo de análisis

2.10 Otra forma es en el menú *Define* se selecciona *Load Combination*, esto despliega un cuadro en donde se marca la opción *Add Default Design Combos*, esta elección permite obtener directamente un grupo de combinaciones las más desfavorables que tiene en cuenta el programa *Safe v.12*. (Ver Anexo # 16)

3 Dibujo de elementos componentes de la estructura (*Draw Objects*):

3.1 Click en el menú *Draw* y se selecciona *Snap Options*. (Ver Anexo # 17)

3.2 Se selecciona el botón *Draw Slabs/Areas* y se sitúan sobre los ejes que desean que cubra la cubierta.

- Se designa el *Type of Object, Property y Edge Drawing Type*. (Ver Anexo # 18)
- El alero se realiza por medio de *Edit menu*, luego *Edit Areas* y finalmente se selecciona la opción *Expand/Shrink Areas* y se realiza *click* en *ok*. (Ver Anexo # 19)

3.3 Se selecciona el botón *Draw Walls* y se sitúan sobre los ejes que desean cubrir con el muro. (Ver Anexo # 20)

3.4 Se selecciona el botón *Draw Columns* y se sitúan sobre los ejes donde se desean colocar las columnas, luego de que se le asignan las dimensiones correspondientes. (Ver Anexo # 21)

3.5 De llevar vigas se colocan por medio del botón *Draw Beams/Lines* desplegando un cuadro donde se define en *property* que se está trabajando en el caso *beam1*.

3.6 Para asignar una abertura a la cubierta se emplea el botón *Draw Rectangular Slabs/Areas* o *Draw Slabs/Areas* (en caso que se desee que tenga una sección distinta a la rectangular), lo que genera un recuadro en el cual se selecciona el tipo de objeto en este caso abertura (*opening*) y luego se selecciona donde se desea colocar la misma. (Ver Anexo # 22)

3.7 Se selecciona el menú *Draw* y luego *Draw Design Strips*. (Ver Anexo # 23, 24 y 25)

- Este proceso de dibujado se realiza tanto para *Layer A* que es el que se muestra como para *Layer B*.
- Luego se realiza click en el menú *Select*, donde marco *Properties* y luego *Design Strip Layers*, lo que muestra un cuadro en el que se selecciona *Layer A* y *Layer B*, finalmente se selecciona *ok*. (Ver Anexo # 26)
 - Se selecciona el menú *Edit*, luego *Add/Edit Design Strips* y posteriormente *Edit Strip Widths*, donde se abre un cuadro de diálogo en el que se marca la opción *Auto Widen Entire Strip*
 - Se hace click en el menú *Select*, luego *Properties* y después *Design Strip Layers*, luego se abre un cuadro donde marco *Layer A* (este proceso se hace también para *Layer B*), posteriormente se da *click* en *ok*
 - Se realiza click en el menú *Edit*, en *Add/Edit Tendons* y en *Add Tendons in Strips*. En este cuadro que se genera se define el *Layout Type*, el *Band Width (Para Layer A) or Tendon Spacing (Para el caso de Layer B)*, *Tendon Property* y *Vertical Profile* (Este proceso se realiza para *Layer A* y *B*). (Ver Anexo # 27 y 28)
 - Se selecciona *shift* con *click* derecho a la misma vez y se despliega un cuadro que permite ver la información de los *strips*. (Ver Anexo # 29)
 - Para obtener información sobre los tendones marco *click* derecho y se despliega un recuadro que permite ver el comportamiento del tendón mediante la selección de *Geometry* y luego *Vertical Profile*. (Ver Anexos # 30, 31, 32 y 33)
 - Luego en *Set Display Options* desmarco las siguientes opciones: *Tendon*, *Design Strip Layer A* y *Design Strip Layer B*. (Ver Anexo # 34)

4 Asignar las cargas a los elementos:

4.1 Para asignar la carga a la estructura en el menú *Assign* se selecciona *Load Data* y posteriormente *Surface Loads* donde se permite:

- Definir *Load Pattem Name*, la dirección en que actúa la carga, el tipo de carga y el valor de la misma.
- Luego es necesario cerciorarse de que las cargas hayan sido correctamente asignadas con un *click* derecho sobre la losa y desplegando las siguientes opciones. (Ver Anexo # 35 y 36)

5 Analizar el modelo, obtención de deformación y ciertos esfuerzos y reacciones:

5.1 Se selecciona *Set Display Options* que genera un cuadro donde se marca *Show Mesh* y se realiza *click* en *ok* para que se desarrollen los cambios.

5.2 Se presiona el botón *Run Analysis & Design* lo que genera un gráfico de comportamiento de las deformaciones que ocurren en la losa según la combinación de carga seleccionada.

5.3 En el menú *Diplay* se selecciona la opción *Show Deformed Shape* o directamente se va a este botón, lo que permite elegir el caso de la carga y la combinación a utilizar, y finalmente se presiona el botón *Apply* y luego *Close* para que se genere la nueva deformación. (Ver Anexo # 37, 38 y 39)

5.4 En el menú *Diplay* se selecciona la opción *Show Slab Forces/Stresses* para obtener las fuerzas, los cortantes y momentos tanto máximos como por cada dirección, se le da *Apply* y luego *close* para que se generen los resultados. (Ver Anexo # 40)

6 Realizar el diseño:

6.1 Se selecciona *Display menu* y luego *Show Slab Design*. Se marca el *Layer* o los *Layers* que se desean comprobar y el *Display Type* en este caso *Flexure Stress Check-Transfer*.

6.2 Se presiona *Detailing*, y luego *Detailing Preferences* y se da *click* en *ok*, luego en el menú *Detailing* se da *click* en *Slab/Mat Reinforcing Preference* y por último *click* en *ok* para que se generen los cambios. (Ver Anexos # 41, 42, 43 y 44)

- Luego en *Detailing*, se marca *Drawing Sheet Setup* para seleccionar los datos de la plantilla y se da *click* en *ok*
- Posteriormente se realiza *click* en *Detailing*, luego en *Drawing Format Properties* y finalmente *click* en *ok*
- Finalmente se selecciona en *Detailing* la opción *Show Detailing*. Se define en el cuadro que se genera el tipo de dibujo. (Ver anexos desde la # 45 a la # 60)

7 Creación de Reporte:

7.1 Se selecciona el menú *File* y la opción *Report Setup*, luego *click* en *ok*.

7.2 Se selecciona el menú *File* y la opción *Create Report*, se asigna un nombre y se da *click* en *guardar*, luego se despliega un cuadro en el que se selecciona el formato del archivo y se da *click* en *ok*, para que se genere el reporte. (Ver Anexos # 61)

2.3 Conclusiones parciales.

Luego de analizar de forma teórica la metodología para el cálculo y diseño de las losas postensadas a partir de los métodos científicos para su implementación y la base teórica y de cálculo disponible se determinaron las siguientes conclusiones:

- El método de carga balanceada representa frecuentemente la forma más simple para diseñar y analizar el preesforzado de la losa debido a que visualiza el concreto preesforzado primeramente como un intento para equilibrar una porción de la carga sobre la estructura
- El análisis del esquema de comportamiento de carga balanceada determinó la necesidad de emplear tendones excéntricos para impedir la aparición de fisuras, esto es, la existencia de tracciones en el estado tensional final

- El método directo permitió establecer un procedimiento a través de las franjas centrales y de columnas para la determinación de la cantidad de tendones y el espaciamiento entre ellos
- El *Safe* se determinó como el software necesario para realizar el modelo debido a que es un programa especializado que automatiza el análisis y diseño de simple a complejas losas y cimentaciones de concreto, usando avanzados sistemas de modelación

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LAS LOSAS POSTENSADAS PARA UN EDIFICIO DE GRANDES LUCES.

Se realizó el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces a partir de la determinación de ciertos parámetros como, la cantidad de paños que conforman la losa y sus dimensiones, el ancho de las franjas de diseño, el espesor de la losa, las cargas que actúan sobre la misma, la utilización del método de diseño directo para la ubicación de los ejes de carga o franjas, para la determinación de los esfuerzos de pretensado y otros esfuerzos que facilitaron la obtención de la cantidad de tendones y su espaciamiento, y la comprobación de dichos procedimientos mediante la modelación de las losas por el Software de diseño Safe para lograr un diseño más certero y válido .

3.1 Descripción del objeto de estudio.

El hotel estará ubicado en La Habana y constará de 8 niveles de losas de hormigón postensado incluyendo un mezzanine y la cubierta. Las áreas correspondientes a cada piso se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Áreas por niveles de pisos. Elaborado por la autora.

<i>Niveles de pisos</i>	<i>Área (m²)</i>
N01 +0.00	2.028
Mezzanine	545
N02 +6.07	1974
N03 +11.62	1974
N04 +16.46	1974
N05 +22.65	1261
N06 +26.77	234
N07 +30.38	234
Totales	10 223

3.1.1 Análisis de los niveles de losa a diseñar.

Para el diseño de las losas postensadas se seleccionaron dos entrepisos que pertenecen al N01 +0.00 y N02 +6.07, el análisis realizado para seleccionar los niveles se basó en el nivel más crítico, por tanto, el más cargado. Además, para su selección se tuvo en cuenta que el N01 +0.00 era único y no se repetía, mientras que el N02 +6.07 se repetía en dos pisos posteriores.

Losa nivel N01 +0.00. El área de esta losa es de 2,028m². Consiste en una losa limitada por los muros interiores y exteriores del sótano existiendo columnas y muros que permiten apoyar la losa. Las franjas de columnas oscilan entre 1,6 y 3,077 m con un ancho de franjas centrales promedio de 4.4m. Se definieron 16 franjas de columnas con luces entre 3 y 8.50m, con áreas tributarias entre 3.5 y 8.5m.

Losas nivel Mezzanine +2.86 y +3.05. Consiste en tres zonas independientes. La de mayor extensión (+3.05) tiene un área rectangular de 396.72 m². Se han considerado 7 franjas de columnas con luces del orden de 4.50m y áreas tributarias de 8.60m.

Las otras dos zonas (+2.86) tienen un área de 71.77 y 77.47 m² y luz simple del orden de los 6m. Se han considerado 6 franjas de columnas, con áreas tributarias máximas de 7.0m.

Losas niveles N02+6.07, N03+11.62 y N04+16.46. Estos tres niveles son similares, se diferencian en planta del nivel N01+0.00 en que tiene voladizos de 3.50m por tres fachadas. Poseen un área de 1,973.56m². Se definieron 19 franjas sobre columnas con luces de hasta 8.5m y áreas tributarias de 8.5m.

Losa nivel N05+22.65. Este nivel es una simplificación de los niveles anteriores, manteniendo los voladizos, con un área de 1,260.92m². Se definieron 16 franjas sobre columnas con luces y áreas tributarias de hasta 8.5m.

Losas niveles Torreón +26.77 y Cubierta +30.38. Estas dos losas son similares y sobresalen por encima del resto de las cubiertas. Son rectangulares y tienen un área cada una de 234.40m². Se definieron 4 franjas de columnas.

3.2 Características de los materiales a emplear en los entresijos.

Hormigón. Teniendo en cuenta la localización de la obra próxima al mar se ha considerado, de acuerdo con la tabla No. 1 de la norma cubana NC 120.2014 Hormigón Hidráulico Especificaciones, el tipo de exposición relativo a la corrosión de armaduras clasificando como de muy alta agresividad, implicando una resistencia mínima a compresión (f_{ck}) de 35 MPa.

Acero de pretensado. Se emplearán cables de acero 13mm (1/2 plg) de diámetro que satisfagan las propiedades establecidas en la norma ASTM-A-416 especificándose una resistencia última mínima ($f_p=1860$ kN), sin adherencia y de bajo relajamiento, con un área de 98.7 mm^2 y un peso de 0.775 kg/m .

Acero de refuerzo ordinario. Grado G-60

3.3 Diseño de las losas postensadas.

Se basó en el empleo del método de diseño directo y el método de carga balanceada para establecer las franjas centrales y de columnas, y poder determinar los momentos que se producen, para establecer el número de tendones y su espaciamiento en las losas para cada nivel analizado, dichos resultados serán comprobados mediante el modelado de las losas de cada nivel en Safe. Para la realización del diseño de las losas se hace necesario la determinación de la cantidad de paños con sus respectivas dimensiones lo que permitirá establecer un espesor para las losas y determinar la forma de trabajo de las mismas.

3.3.1 Trazado de los ejes de cargas.

Se realizó por medio de un análisis de la mejor ubicación de las vigas virtuales o sea de los tendones, situándolas sobre la trayectoria de las columnas en la dirección de trabajo más conveniente y a partir de la forma de trabajo de las losas, este análisis se basó en lograr que los ejes de carga (o franjas) fueran lo más similares posibles para todos los niveles para facilitar el diseño y los trabajos de ejecución en un futuro. (Ver Fig 3.1 y Fig 3.2)



Fig 3.1 Franjas(F) del N01 +0.00. Elaborado por la autora.

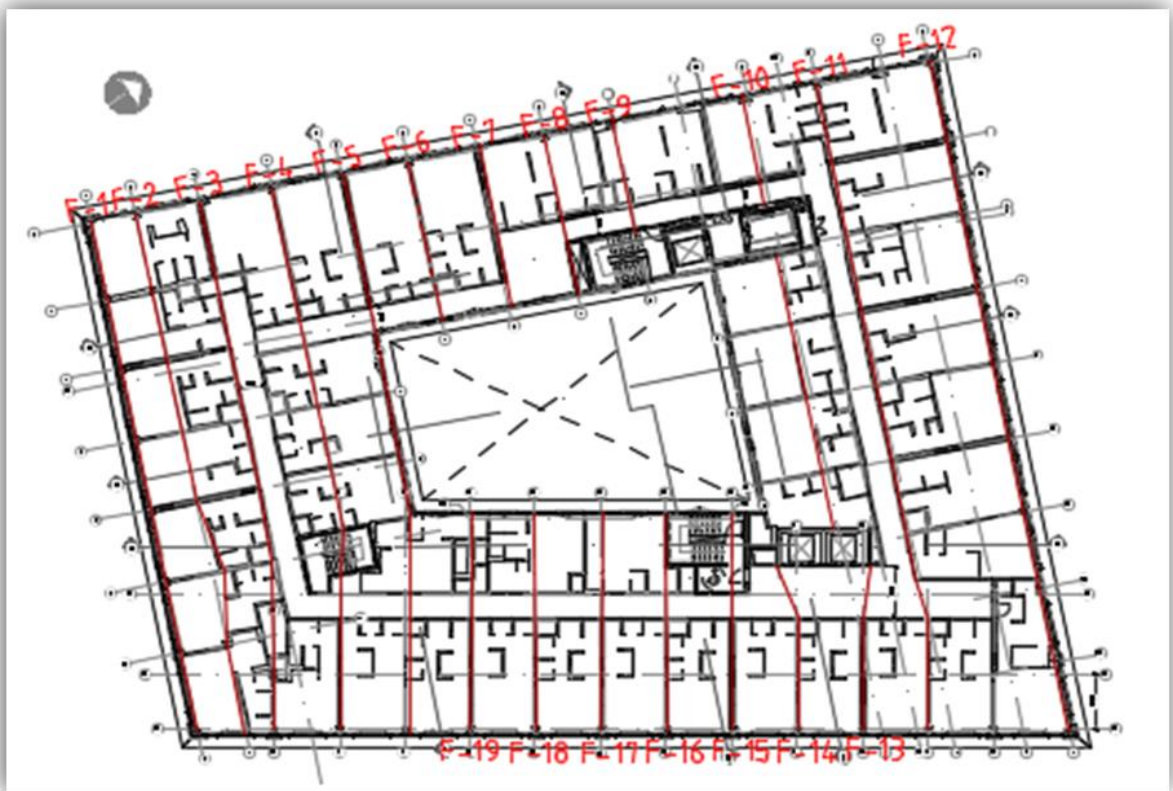


Fig 3.2 Franjas(F) del N02 +6.07. Elaborado por la autora.

3.3.2 Determinación de la forma de trabajo de la losa.

Según ACI 318-019 se establece que la forma de trabajo de una losa dependerá de la relación entre la luz larga y la luz corta $\left(\frac{LL}{LC}\right)$, disponiendo que si dicha relación es mayor que 2 la losa trabaja en una dirección $\left(\frac{LL}{LC} > 2\right)$ y si es menor igual que 2 la losa trabaja en dos direcciones $\left(\frac{LL}{LC} \leq 2\right)$.

En cada nivel se establece una división de la losa para obtener las dimensiones de las luces de los paños que las componen y poder determinar la dirección en que trabajan la mayoría de sus paños (ver Fig 3.3, Fig 3.4; Tabla 3.2 y Tabla 3.4).

Para el N01 +0.00:

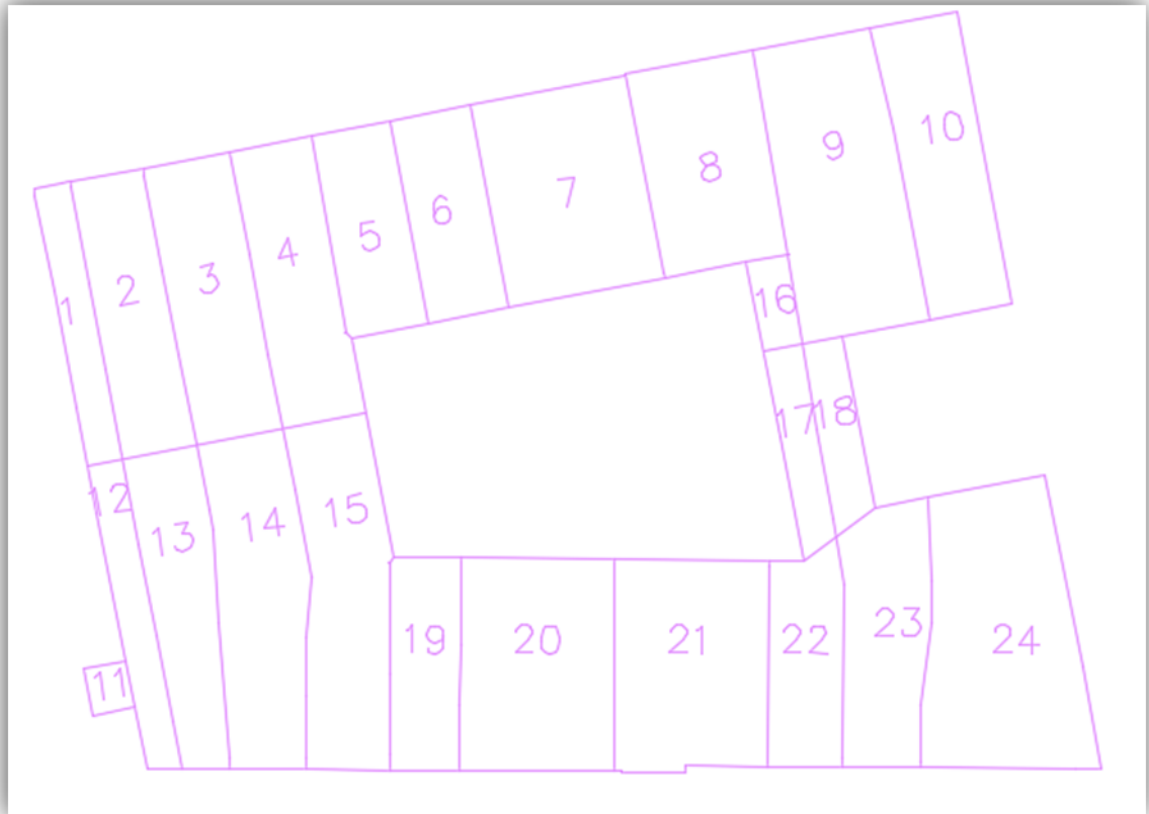


Fig 3.3 División de paños para losa postensada. Elaborado por la autora.

Tabla 3.2 Datos sobre las luces de los paños. Elaborado por la autora.

Paños	Luz corta(mm)	Luz larga(mm)	m=LL/Lc
1	2048,1542	15568,1652	7,6010709
2	4098,7727	15568,1652	3,7982504
3	4840,4246	15568,1652	3,2162809
4	4612,7927	15568,1652	3,3749978
5	4378,0398	11376,422	2,5985195
6	4495,4162	11376,422	2,5306716
7	8785,6495	11376,422	1,2948868
8	7141,3925	11376,422	1,5930257
9	6550,0392	16421,1872	2,5070365
10	4908,5295	16421,1872	3,3454392
11	2340,8758	2596,2068	1,109075
12	1911,2951	16.994,659	8,8916981
13	2613,1566	16.994,659	6,5034981
14	4194,4386	18239,518	4,3485004
15	4611,8667	19755,2837	4,2835765
16	2394,1947	5045,126	2,107233
17	2394,1947	11709,8265	4,8909249
18	2394,1947	9593,078	4,0068078
19	3871,822	11697,1175	3,0210887
20	8496,6723	11697,1175	1,3766704
21	8466,7285	11697,1175	1,3815392
22	4148,2905	11697,1175	2,8197441
23	4358,0765	14897,1507	3,4182857
24	9959,8793	16495,6659	1,6562114

En el caso del N01 +0.00 se dividió la losa en un total de 24 paños y se analizaron los paños # 1, 3, 9 y 21 dando como resultado que la mayoría de los paños trabajan en una dirección (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Determinación de la forma de trabajo de las losas. Elaborado por la autora.

Paños	Luz corta(mm)	Luz larga(mm)	m=LL/Lc	Forma de trabajo
1	2048,1542	15568,1652	7,6010709	En una dirección
3	4840,4246	15568,1652	3,2162809	En una dirección
9	6550,0392	16421,1872	2,5070365	En una dirección
21	8466,7285	11697,1175	1,3815392	En dos direcciones

Para el N02 +6.07:

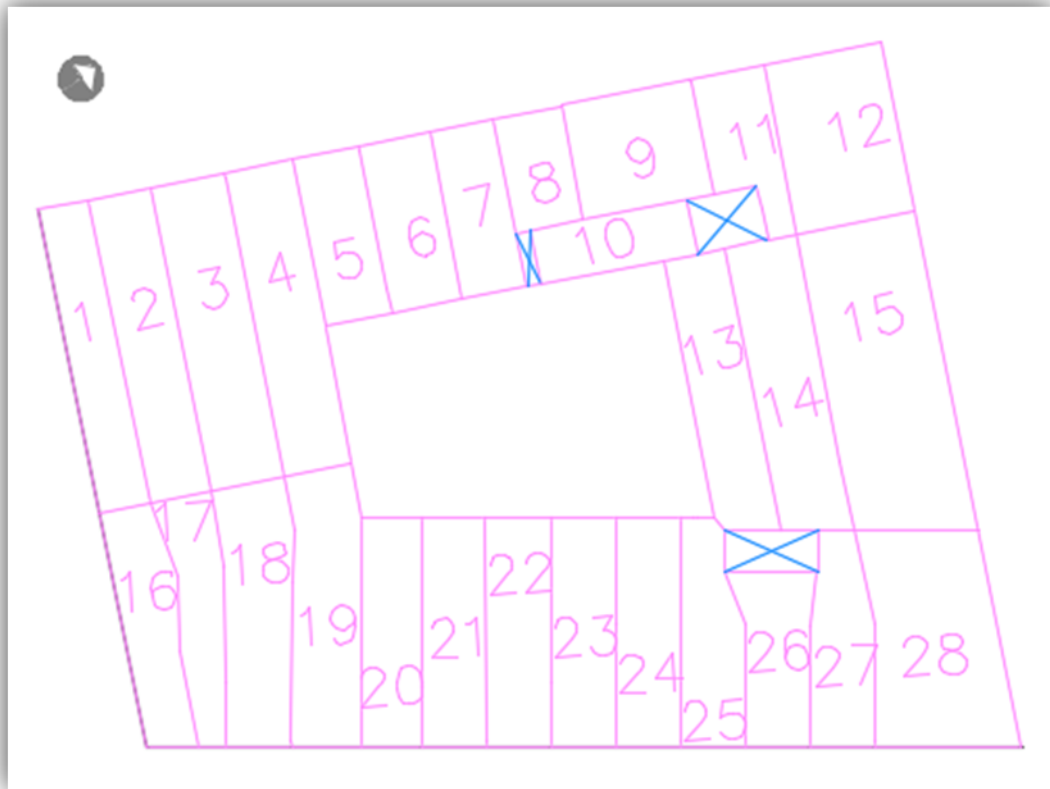


Fig 3.4 División de paños de la losa. Elaborado por la autora.

Tabla 3.4 Datos sobre las luces de los paños. Elaborado por la autora.

Paños	Luz corta(mm)(LC)	Luz larga(mm)(LL)	$m=LL/Lc$
1	3398	20243,2008	5,9573869
2	4150,7622	20243,2008	4,876984
3	4840,8387	20243,2008	4,1817549
4	4613,1865	20243,2008	4,3881167
5	4378,4135	11326,422	2,5868781
6	4728,4612	11326,422	2,3953717
7	4263,1388	11326,422	2,6568269
8	4523,831	11326,422	2,5037235
9	8557,2929	11326,422	1,3235987
10	3665	10380,2524	2,8322653
11	4902,0761	11326,422	2,3105357
12	7832,0841	11326,422	1,4461568
13	4082,8756	18760,72	4,5949771

14	4902,0761	19773,422	4,0336832
15	7832,0891	21276,0438	2,7165222
16	3465,1142	15624,5921	4,5091132
17	1847,9693	15624,5921	8,4550063
18	4241,8	17349,9828	4,0902407
19	4594,9762	18638,0318	4,0561759
20	38.886.238	150.526.344	3,8709413
21	4243,9925	150.526.344	35468,098
22	4253,0078	150.526.344	35392,915
23	4236,4115	150.526.344	35531,568
24	4233,7882	150.526.344	35553,584
25	4251,1843	150.526.344	35408,097
26	4232,4107	11528,8876	2,7239529
27	4247,0152	14491,4285	3,4121443
28	9601,5668	14491,4285	1,5092775

En el caso del N02 +6.07 se dividió la losa en un total de 28 paños y se analizaron los paños #1, 4, 11 y 18 dando como resultado que la mayoría de los paños trabajan en una dirección (ver Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Determinación de la forma de trabajo de las losas. Elaborado por la autora.

Paños	Luz corta(mm)(LC)	Luz larga(mm)(LL)	$m=LL/Lc$	Forma de trabajo
1	3398	20243,2008	5,9573869	En una dirección
4	4613,1865	20243,2008	4,3881167	En una dirección
11	4902,0761	11326,422	2,3105357	En una dirección
18	4241,8	17349,9828	4,0902407	En una dirección

3.3.3 Determinación del espesor de las losas.

Para la determinación del espesor se utilizaron hojas de cálculo en Excel que se basaron en el análisis de cada criterio planteado en relación al mismo en el capítulo #2. En el análisis del espesor se estudiaron los tramos más críticos de las losas y sus correspondientes paños, lo que permitió determinar el espesor más adecuado para las losas tanto del N01+0.00 como del N02 +6.07, a partir de la aplicación de los criterios para la luz corta mayor de dichos paños.

Tramos analizados del N01+0.00:

Frontal (Fig 3.5):

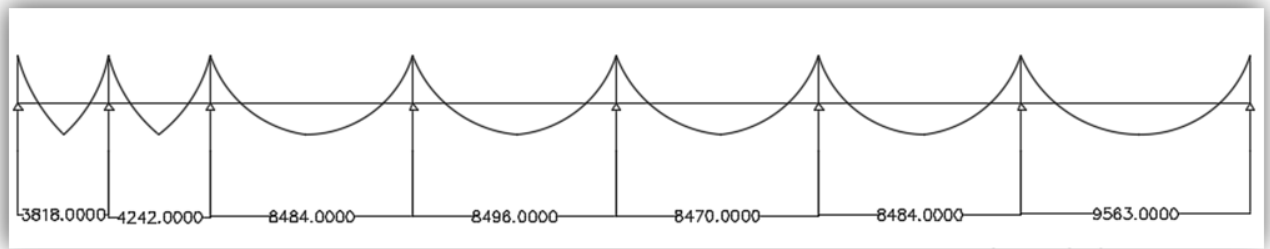


Fig 3.5 Paños frontales. Elaborado por la autora.

Trasero (Fig 3.6):

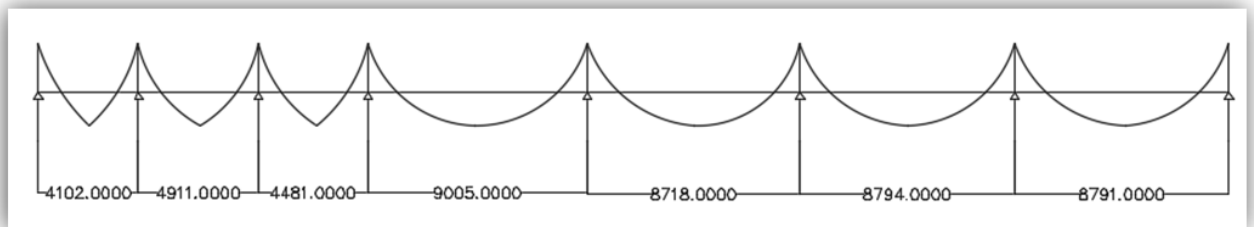


Fig 3.6 Paños Traseros. Elaborado por la autora.

Lateral Derecho (Fig 3.7):



Fig 3.7 Paños Laterales Derechos. Elaborado por la autora.

Lateral Izquierdo (Fig 3.8):

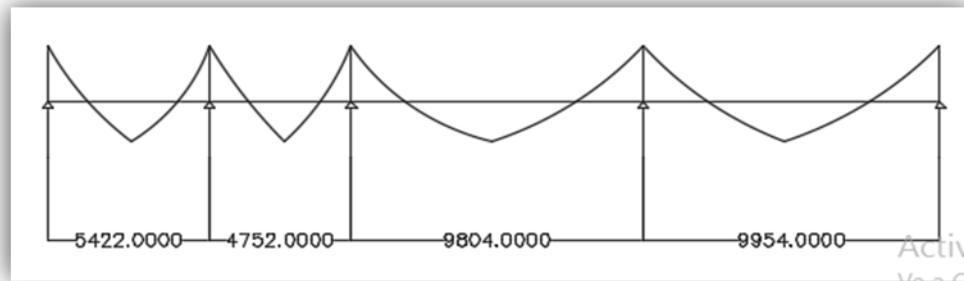


Fig 3.8 Paños Laterales Izquierdos. Elaborado por la autora.

Se seleccionó del N01 +0.00, como tramo más crítico de los anteriormente analizados el Lateral Izquierdo, con la luz corta mayor de 9954 mm, a esta luz se le aplicaron los 4 criterios de espesor y se le realizó un promedio a los valores obtenidos mediante la aplicación de los criterios para dicho nivel (ver Tabla 3.6 y 3.7).

Tramos analizados del N02+6.07:

Frontal (Fig 3.9):

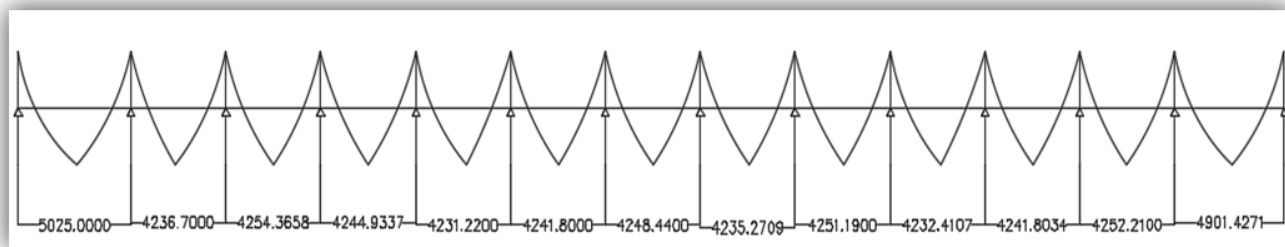


Fig 3.9 Paños Frontales. Elaborado por la autora.

Trasero (Fig 3.10):

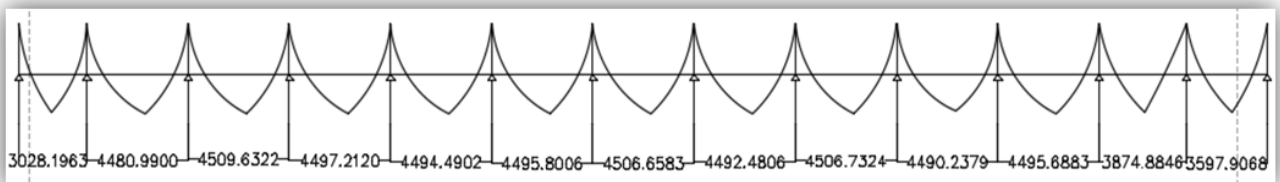


Fig 3.10 Paños Traseros. Elaborado por la autora.

Lateral Derecho (Fig 3.11):

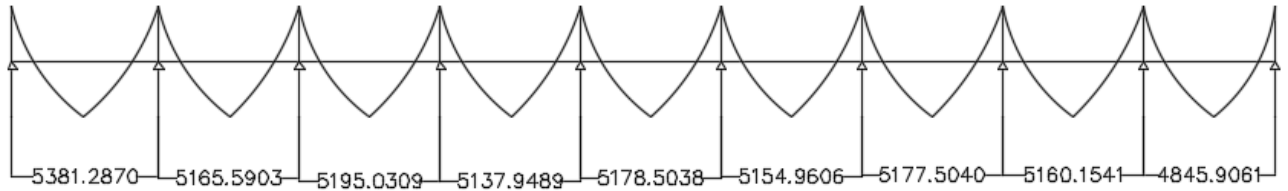


Fig 3.11 Paños Laterales Derechos. Elaborado por la autora.

Lateral Izquierdo (Fig 3.12):

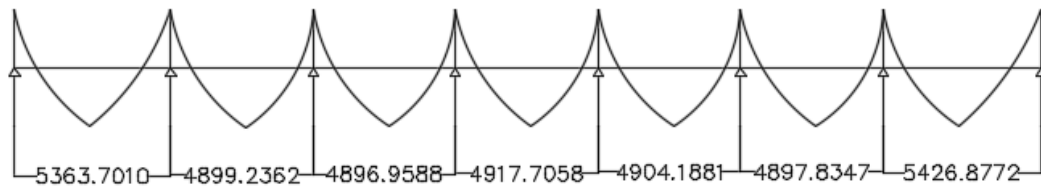


Fig 3.12 Paños Laterales Izquierdos. Elaborado por la autora.

F2-3 (Fig 3.13):

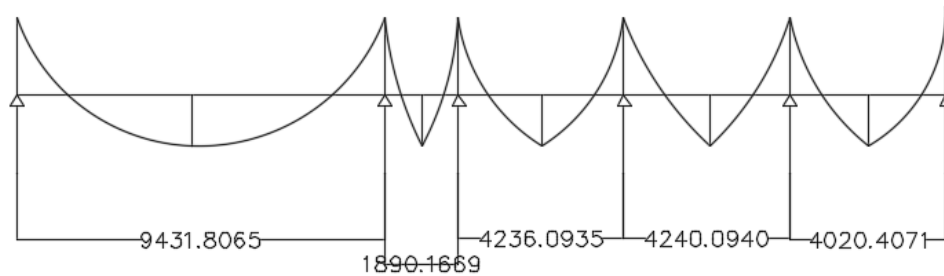


Fig 3.13 Paños franja F2-3. Elaborado por la autora.

Se seleccionó del N02 +6.07, como tramo más crítico de los anteriormente analizados la franja 2-3 (F2-3), con la luz corta mayor de 9431.8065 mm, a esta luz se le aplicaron los 4 criterios de espesor y se le realizó un promedio a los valores determinados mediante la aplicación de los criterios para dicho nivel (ver Tabla 3.6 y 3.7).

Tabla 3.6 Aplicación de los criterios de espesor. Elaborado por la autora.

<i>Niveles</i>	<i>Tramo crítico</i>	<i>Luz(mm)</i>	<i>Criterio #1(Ambos extremos continuos)</i>	<i>Criterio #2 (cargas ligeras)</i>	<i>Criterio #3</i>	<i>Criterio #4</i>
N01 +0,00	Lateral Izquierdo	9954	294,5571429	180,9818182	237	221,2
N02 +6,07	F2-3	9431,81	279,1044781	171,4873909	224,5668	209,5957

Tabla 3.7 Determinación del espesor. Elaborado por la autora.

<i>Niveles</i>	<i>Promedio de los criterios(mm)</i>	<i>Espesor seleccionado (cm)</i>
N01 +0,00	233	23
N02 +6,07	221	22

Según los cálculos realizados se empleará un espesor de 23cm para N01 +0.00 y un espesor de 22cm para el N02 +6.07.

3.3.4 Obtención de la carga que actúa sobre las losas.

Las cargas permanentes (G) (densidades de los materiales) se obtuvieron mediante la (Normalización, 2003). Para la determinación de alguna de estas cargas como el peso propio de la losa de hormigón postensada se tuvieron en cuenta los datos siguientes:

- Espesor de la losa N01 +0.00=0.23m
- Espesor de la losa N02 +6.07=0.22m
- Densidad del hormigón postensado=25 KN/m³

La obtención de las cargas de uso (Q) se basó en la (Normalización, 2010) y en la variedad de locales soportada por cada nivel. Las cargas actuantes sobre ambos niveles se obtuvieron a partir de los parámetros mostrados en la Tabla 3.8 y 3.9.

Para el N01 +0.00:

Tabla 3.8 Determinación de las cargas. Elaborado por la autora..

<i>Elemento</i>	<i>Tipo de carga</i>	<i>Descripción</i>	<i>kg/m²</i>
Entrepisos	Carga permanente (G)	Losa hormigón 23 cm (0,23m)	575
		Sobrecarga de tabique	50
		Conformación de piso	24
		Falso techo	20
	Carga de uso (Q)	Locales de equipos y almacenes	400

Para el N02 +6.07:

Tabla 3.9 Determinación de las cargas. Elaborado por la autora.

Elemento	Tipo de carga	Descripción	kg/m ²
Entrepiso	Carga permanente (G o CP)	Losa hormigón 22 cm (0,22m)	550
		Sobrecarga de tabique	50
		Conformación de piso	24
		Falso techo	20
	Carga de uso (Q o CU)	Dormitorios y pasillos	150

Se utilizaron 3 combinaciones de carga a partir de lo planteado en la ACI 318:2019, las cuales se muestran a continuación:

- $G + Q\eta$ (3.1)

- $\eta = 0,5 + \frac{0,6}{\sqrt{n}} = 0,5 + \frac{0,6}{\sqrt{6}} = 0.7449$ (3.2)

- Existen 6 niveles de habitaciones (n)

- $1.2G + 1,4Q$ (3.3)

- $1,2G + 1,6Q$ (3.4)

Según las combinaciones de carga se obtienen los siguientes resultados para cada nivel. (Ver Tabla 3.10 y 3.11)

N01 +0.00:

Tabla 3.10 Determinación de las combinaciones de carga. Elaborado por la autora..

Sub Total (kg/m ²)	$G + Q\eta$ (kg/m ²)	$1,2G+1,6Q$ (kg/m ²)	$1.2G +1,4Q$ (kg/m ²)
669	967,0	1442,8	1362,8
400			
KN/m ²	9,669795897	14,428	13,628
t/m ²	0,96697959	1,4428	1,3628

El Sub total se determina para las cargas permanentes como la suma de sus variedades de cargas y de igual manera se determina para las cargas de uso, esto se aplica de la misma forma para los 2 niveles analizados.

A partir de los resultados obtenidos mediante las combinaciones se selecciona como la más crítica **1,2G + 1,6Q**.

N02 +6.07:

Tabla 3.11 Determinación de las combinaciones de carga. Elaborado por la autora.

<i>Sub Total (kg/m²)</i>	<i>G + Q_η (kg/m²)</i>	<i>1,2G+1,6Q (kg/m²)</i>	<i>1.2G +1,4Q (kg/m²)</i>
644	755,7	1012,8	982,8
150			
KN/m ²	7,557423461	10,128	9,828
t/m ²	0,755742346	1,0128	0,9828

A partir de los resultados obtenidos mediante las combinaciones se selecciona como la más crítica **1,2G + 1,6Q**.

3.3.5 Realización del diseño por flexión.

El diseño a flexión se realizará teniendo en cuenta la cantidad de paños determinados y el análisis se realizará para cada nivel a partir del espesor de los mismos y la forma de trabajo de los paños que los componen.

El diseño se realiza tanto en el N01+0.00 como en el N02+6.07 para un total de 3 paños, los cuales trabajan en una dirección, partiendo de los siguientes datos:

Tabla 3.12 Datos utilizados en el diseño por flexión. Elaborado por la autora.

<i>Niveles</i>	<i>Datos</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Ambos	Rn	20	mm
Ambos	b	1000	mm
N01+0,00	h	230	mm
N02+6,07	h	220	mm
Ambos	fy	420	Mpa
Ambos	ø	13	mm

En el diseño se tuvieron en cuenta las fórmulas 2.4 y 2.5 planteadas en el capítulo #2, lo que facilitó obtener los resultados que se muestran en la Tabla 3.13 y 3.14:

N01+0.00:

Tabla 3.13 Determinación de las áreas de acero a flexión. Elaborado por la autora.

<i>Para N01+0.00</i>	<i>mm²</i>	<i>mm²</i>	<i>cm²</i>	<i>cm</i>	<i>mm</i>
<i>Paños</i>	<i>Act</i>	<i>Asmín- flexión</i>	<i>Asmín- flexión</i>	@	@
1	115000	460	4,6	28	280
3	115000	460	4,6	28	280
8	115000	460	4,6	28	280

Se colocarán cada 1000 mm en los paños que trabajan en una dirección un área de refuerzo de 460 mm² mediante la ubicación de barras corrugadas ø13@280mm.

N02+6.07:

Tabla 3.14 Determinación de las áreas de acero a flexión. Elaborado por la autora.

<i>Para N01+0.00</i>	<i>mm²</i>	<i>mm²</i>	<i>cm²</i>	<i>cm</i>	<i>mm</i>
<i>Paños</i>	<i>Act</i>	<i>Asmín- flexión</i>	<i>Asmín- flexión</i>	@	@
1	110000	440	4,4	29	290
4	110000	440	4,4	29	290
18	110000	440	4,4	29	290

Se colocarán cada 1000 mm en los paños que trabajan en una dirección un área de refuerzo de 440 mm² mediante la ubicación de barras corrugadas ø13@290mm

3.3.6 Realización del diseño por retracción y temperatura.

Este análisis se realizará solo para los niveles que poseen paños que trabajan en una dirección y se colocarán perpendiculares a los aceros de refuerzo por flexión. Se colocará 1 tendón cada 45cm o 450mm para garantizar la presión mínima de 0.7MPa y el refuerzo a retracción y temperatura.

3.3.7 Determinación de la cantidad de tendones principales y secundarios, y el espaciamiento entre ellos mediante el método de carga balanceada.

- **Determinación del ancho de las franjas.**

El ancho de la franja se determinó por medio de la Fig 2.4 y 2.5, y la ubicación de las franjas presentes en la Fig 3.1 y 3.2 (para el caso de cables principales). Para el caso de los cables secundarios se tendrá en cuenta la Fig 3.14 y 3.15.

N01+0.00:



Fig 3.14 Franja para la determinación del total de cables secundarios(CS-1).
N02+6.07:



Fig 3.15 Franja para la determinación del total de cables secundarios(CS-1).

En el caso de los cables principales los anchos de franja toman los valores mostrados en la Tabla 3.15 y 3.16.

Para N01 +0.00:

Tabla 3.15 Datos de las franjas de diseño. Elaborado por la autora.

<i>Cantidad de Franjas</i>	<i>Ancho(m)</i>	<i>Longitud(m)</i>
1	1,536	32,167
2	2,235	32,506
3	2,4	33,552
4	3,098	11,074
5	2,2	11,321
6	3,077	11,321
7	3,94	11,071
8	3,42	39,59
9	2,846	16,426
10	1,105	5,314
11	2,525	14,662
12	1,563	15,643
13	1,603	11,057
14	1,906	11,697
15	1,603	11,697
16	2,12	10,496

Se seleccionaron para la realización del diseño 3 de las franjas más críticas, entre ellas la franja #3, 6 y 14.

Para N02 +6.07:

Tabla 3.16 Datos de las franjas de diseño. Elaborado por la autora.

<i>Cantidad de Franjas</i>	<i>Ancho(m)</i>	<i>Longitud(m)</i>
1	0,757	35,306
2	1,795	36,172
3	2,248	36,325
4	2,364	37,296
5	2,248	38,380
6	2,28	11,019
7	2,25	11,321
8	2,196	11,042
9	3,268	7,876
10	3,376	26,434

11	3,107	44,664
12	1,882	46,502
13	2,118	11,100
14	2,121	11,372
15	2,122	14,691
16	2,113	14,720
17	2,123	14,848
18	2,121	14,655
19	2,029	14,904

Se seleccionaron para la realización del diseño 3 de las franjas más críticas, entre ellas la franja #3, 9 y 19.

En el caso de los cables secundarios los anchos de franja toman los valores mostrados en la Tabla 3.17 .

Tabla 3.17 Datos de las franjas de diseño. Elaborado por la autora.

<i>Niveles</i>	<i>Franjas analizadas</i>	<i>Ancho de franja(m)</i>	<i>Longitud(m)</i>
N01+0,00	CS-1	1	50,761
N02+6,07	CS-1	1	56,192

- **Definir el valor de la fuerza de servicio.**

Para la obtención de la fuerza de servicio se empleó la fórmula 2.8 del capítulo #2.

$$F_S = A_{ps}(0.7f_{pu} - losses) = 0.987 \text{ cm}^2 (0.7 \times 18.6 \text{ t} - 1.4 \text{ t}) = 11.46 \sim 11.5 \text{ t}$$

- **Determinación de la excentricidad en el centro y en los apoyos.**

La excentricidad se fijó entre los valores de 0.07 y 0.075 con el objetivo de obtener un número de cable más factible y un espaciamiento entre ellos más adecuado (ver Tabla 3.18 y 3.19).

Tabla 3.18 Valores de excentricidad para las franjas donde se ubican los tendones principales. Elaborado por la autora.

<i>Niveles</i>	<i>Franjas analizadas</i>	<i>Excentricidad</i>
N01+0,00	F-3	0,075
	F-6	0,07
	F-14	0,075
N02+6,07	F-13	0,075
	F-3	0,075

	F-6	0,075
	Voladizo #1 y #2	0,075

Tabla 3.19 Valores de excentricidad para las franjas donde se ubican los tendones secundarios. Elaborado por la autora.

Niveles	Franjas analizadas	Excentricidad
N01+0,00	CS-1	0,07
N02+6,07	CS-1	0,07

- **Obtención de la inercia de la losa.**

La inercia de la losa varía en función del nivel que se esté analizando, su espesor de losa y el ancho de la franja. La fórmula 2.10 planteada en el capítulo #2 facilitó la obtención de la inercia de la losa (ver Tabla 3.20 y 3.21).

Tabla 3.20 Valores determinados de inercia de la losa según la franja analizada para tendones principales. Elaborado por la autora.

Niveles	Franjas analizadas	Espesor(m)	Ancho de franja(m)	Inercia(m ⁴)
N01+0,00	F-3	0,23	2,4	0,0024334
	F-6	0,23	3,077	0,003119822
	F-14	0,23	1,906	0,001932525
N02+6,07	F-3	0,22	2,248	0,00199
	F-9	0,22	3,268	0,0028998
	F-19	0,22	2,029	0,0018
	Voladizo #1 y #2	0,22	2,4	0,0021296

Tabla 3.21 Valores determinados de inercia de la losa según la franja analizada para tendones secundarios. Elaborado por la autora.

Niveles	Franjas analizadas	Espesor(m)	Ancho de franja(m)	Inercia(m ⁴)
N01+0,00	CS-1	0,23	1	0,001013917
N02+6,07	CS-1	0,22	1	0,000887333

Una vez obtenidos los parámetros analizados anteriormente y teniendo en cuenta la Tabla 3.22 y 3.23 se procede a la determinación del número de cables tanto principales como secundarios.

Tabla 3.22 Otros datos necesarios para la determinación de los cables principales y el espaciamiento de los mismos. Elaborado por la autora.

Niveles	Franjas analizadas	Luz(l)(m)	Resistencia del hormigón(Mpa)	Carga(1,2CP+1,6CU) (t/m ³)
N01+0,00	F-3	5,64	35	1,44

	F-6	6,15	35	1,44
	F-14	7,5	35	1,44
N02+6,07	F-3	7,8	35	1,013
	F-9	5,8	35	1,013
	F-19	7,6	35	1,013
	Voladizo #1	4,5	35	1,013
	Voladizo #2	5,6	35	1,013

Tabla 3.23 Otros datos necesarios para la determinación de los cables secundarios y el espaciamiento de los mismos. Elaborado por la autora.

<i>Niveles</i>	<i>Franjas analizadas</i>	<i>Luz(l) (m)</i>	<i>Resistencia del hormigón (Mpa)</i>	<i>Carga(1,2CP+1,6CU) (t/m³)</i>
N01+0,00	CS-1	7,25	35	1,44
N02+6,07	CS-1	8,8	35	1,013

Para la determinación de la cantidad de cables fue necesario hallar ciertos parámetros que se muestran en las tablas siguientes partiendo de los datos obtenidos anteriormente en el transcurso del capítulo #3.

Las fórmulas (F) empleadas para la determinación de los parámetros que conforman las tablas (3.24 a 3.39) relacionadas con la determinación de los tendones tanto principales como secundarios son las siguientes:

- F 2.11 (Q)
- F2.12 (q)
- F2.13 (M)
- F2.14 (σ_e)
- F2.15 (P)
- F2.16 (δ)
- F2.17 (σ_p)
- F2.18 y 2.19 (σ_+)
- F2.20 (n)
- F2.21 (@)

Para la determinación de los cables principales se utilizaron las tablas (3.24 a 3.31) siguientes:

- En el caso del N01+0.00 se seleccionaron para el diseño de los tendones 3 franjas:

Tabla 3.24 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora.F-3

Apoyos	Tramos intermedios	Luz	Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por franja	Espaciamiento de los cables en cm	Fórmulas de momentos
1		5,386	3,46	0,690	2,38	1,07	3,41	16,1	57,6	10,4	26,5	-5,7	5	40	M=q ² /10
	1 2	5,386	3,46	0,690	2,38	1,07	3,10	14,6	57,6	10,4	25,1	-4,2	5	40	M=q ² /11
2		5,513	3,46	0,660	2,28	1,18	3,40	16,1	57,8	10,5	26,5	-5,6	5	40	M=q ² /11
	2 3	5,64	3,46	0,750	2,59	0,86	1,72	8,1	68,7	12,4	20,6	4,3	6	33	M=q ² /16
3		4,9055	3,46	0,660	2,28	1,18	3,40	16,1	45,7	8,3	24,3	-7,8	4	50	M=q ² /11
	3 4	4,171	3,46	0,680	2,35	1,11	2,20	10,4	34,1	6,2	16,6	-4,2	3	68	M=q ² /16
4		3,933	3,46	0,780	2,70	0,76	2,20	10,4	34,7	6,3	16,7	-4,1	3	66	M=q ² /11
	4 5	3,695	3,46	0,800	2,76	0,69	1,37	6,5	31,5	5,7	12,2	-0,8	3	73	M=q ² /16
5		4,2095	3,46	0,680	2,35	1,11	3,20	15,1	34,7	6,3	21,4	-8,8	3	66	M=q ² /11
	5 6	4,724	3,46	0,720	2,49	0,97	2,80	13,2	46,3	8,4	21,6	-4,8	4	50	M=q ² /11
6		4,724	3,46	0,720	2,49	0,97	3,08	14,5	46,3	8,4	22,9	-6,2	4	50	M=q ² /10

Tabla 3.25 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora.F-6

Apoyos	Tramos intermedios	Luz	Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por franja	Espaciamiento de los cables en cm	Fórmulas de momentos
1		3,675	4,43	0,690	3,06	1,37	5,20	19,2	34,4	4,9	24,0	-14,3	3	67	M=q ² /10
	1 2	3,675	4,43	0,690	3,06	1,37	4,72	17,4	34,4	4,9	22,3	-12,5	3	67	M=q ² /11
2		2,5945	4,43	0,660	2,92	1,51	5,18	19,1	16,4	2,3	21,4	-16,8	1	140	M=q ² /11
	2 3	1,514	4,43	0,750	3,32	1,11	2,62	9,7	6,3	0,9	10,5	-8,8	1	362	M=q ² /16
3		3,8305	4,43	0,660	2,92	1,51	5,18	19,1	35,8	5,1	24,1	-14,0	3	64	M=q ² /11
	3 4	6,147	4,43	0,720	3,19	1,24	4,27	15,7	100,5	14,2	29,9	-1,5	9	23	M=q ² /11
4		6,147	4,43	0,720	3,19	1,24	4,69	17,3	100,5	14,2	31,5	-3,1	9	23	M=q ² /10

Tabla 3.26 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora.F-14

Apoyos	Tramos intermedios	Luz	Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por franja	Espaciamiento de los cables en cm	Fórmulas de momentos
1		3,471	2,74	0,630	1,73	1,02	5,71	34,0	17,4	4,0	38,0	-30,0	2	132	M=q ² /10
	1 2	3,471	2,74	0,630	1,73	1,02	5,19	28,1	17,4	4,0	32,1	-24,1	2	132	M=q ² /11
2		5,457	2,74	0,760	2,09	0,66	4,12	27,2	51,8	11,8	39,0	-15,4	5	44	M=q ² /9
	3 6	7,443	2,74	0,680	1,87	0,88	4,49	24,3	86,2	19,7	44,0	-4,6	7	27	M=q ² /11
3		7,443	2,74	0,680	1,87	0,88	4,94	29,4	86,2	19,7	49,1	-9,7	7	27	M=qv ² /10

Cuando los espaciamientos de los cables sobrepasen los 100 cm se colocarán cada 45cm. En el caso del N02+6.07 se seleccionaron para el diseño de los tendones 3 franjas:

Tabla 3.27 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora.F-3

Apoyos	Tramos intermedios	Luz	Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por franja	Espaciamiento de los cables en cm	Fórmulas de momentos
1		5,334	2,28	0,750	1,71	0,57	3,46	19,1	40,5	8,2	27,3	-10,9	4	57	M=q ² /10
	1 2	5,334	2,28	0,750	1,71	0,57	3,15	17,4	40,5	8,2	25,6	-9,2	4	57	M=q ² /11
2		6,542	2,28	0,80	1,82	0,46	2,52	13,9	65,0	13,1	27,0	-0,8	6	35	M=q ² /11
	2 3	7,75	2,28	0,80	1,82	0,46	1,73	9,6	91,2	18,4	28,0	8,9	8	25	M=q ² /16
3		6,401	2,28	0,80	1,82	0,46	2,52	13,9	62,2	12,6	26,5	-1,3	5	37	M=q ² /11
	3 4	5,052	2,28	0,80	1,82	0,46	1,73	9,6	38,7	7,8	17,4	-1,7	3	59	M=q ² /16
4		4,902	2,28	0,80	1,82	0,46	2,52	13,9	36,5	7,4	21,3	-6,5	3	63	M=q ² /11
	4 5	4,752	2,28	0,65	1,47	0,81	3,07	17,0	27,6	5,6	22,5	-11,4	2	83	M=q ² /16
5		4,92	2,28	0,80	1,82	0,46	2,52	13,9	36,7	7,4	21,3	-6,5	3	63	M=q ² /11
	5 6	5,088	2,28	0,80	1,82	0,46	1,73	9,6	39,3	7,9	17,5	-1,6	3	59	M=q ² /16
6		6,422	2,28	0,65	1,48	0,80	4,41	24,3	50,9	10,3	34,6	-14,0	4	45	M=q ² /11
	6 7	7,756	2,28	0,78	1,78	0,50	1,91	10,5	89,0	18,0	28,5	7,5	8	26	M=q ² /16
7		6,173	2,28	0,65	1,48	0,80	4,41	24,3	47,0	9,5	33,8	-14,8	4	49	M=q ² /11
	7 8	4,59	2,28	0,680	1,55	0,73	4,03	22,2	27,2	5,5	27,7	-16,7	2	85	M=q ² /11
8		4,59	2,28	0,680	1,55	0,73	4,43	24,4	27,2	5,5	29,9	-19,0	2	85	M=q ² /10

Tabla 3.28 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora.F-9

Apoyos	Tramos intermedios	Luz	Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por franja	Espaciamiento de los cables en cm	Fórmulas de momentos
1		5,84	3,31	0,800	2,65	0,66	2,23	8,4	75,3	10,5	18,9	2,0	7	31	M=q ² /10
	1 2	5,84	3,31	0,800	2,65	0,66	2,02	7,7	75,3	10,5	18,2	2,8	7	31	M=q ² /11
2		3,845	3,31	0,700	2,32	0,99	3,71	14,1	28,5	4,0	18,1	-10,1	2	81	M=q ² /9
	3 6	1,85	3,31	0,689	2,28	1,03	3,15	11,9	6,5	0,9	12,8	-11,0	1	354	M=q ² /11
3		1,850	3,31	0,689	2,28	1,03	3,46	13,1	6,5	0,9	14,0	-12,2	1	354	M=q ² /10

Tabla 3.29 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora.F-19

Apoyos	Tramos intermedios	Luz	Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por franja	Espaciamiento de los cables en cm	Fórmulas de momentos
1		6,781	2,06	0,695	1,43	0,63	3,62	22,1	54,7	12,3	34,4	-9,9	5	42	M=q ² /10
	1 2	6,781	2,06	0,695	1,43	0,63	3,29	20,1	54,7	12,3	32,4	-7,8	5	42	M=q ² /11
2		7,208	2,06	0,715	1,47	0,59	3,08	18,8	63,6	14,3	33,0	-4,5	6	36	M=q ² /16
	5 6	7,635	2,06	0,670	1,38	0,68	3,56	21,8	66,9	15,0	36,7	-6,8	6	34	M=q ² /11
6		7,635	2,06	0,670	1,38	0,68	3,92	23,9	66,9	15,0	38,9	-8,9	6	34	M=q ² /10

Tabla 3.30 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. Voladizo #1

Apoyos	Tramos intermedios	Luz	Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por franja	Espaciamiento de los cables en cm	Fórmulas de momentos
1		4,463	2,43	0,800	1,94	0,35	0,70	3,6	32,3	6,1	9,7	2,5	3	71	M=q ² /10
	1 2	4,463	2,43	0,800	1,94	0,49	0,90	4,2	32,3	6,1	10,3	1,9	3	71	M=q ² /11
2		4,2515	2,43	0,700	1,70	0,73	1,34	6,3	25,6	4,9	11,2	-1,4	2	90	M=q ² /11
	2 3	4,04	2,43	0,702	1,71	0,72	0,92	3,0	23,2	4,4	7,4	1,4	2	99	M=q ² /16
3		4,1575	2,43	0,669	1,63	0,80	1,48	7,0	23,4	4,4	11,4	-2,5	2	98	M=q ² /11
	3 4	4,275	2,43	0,800	1,94	0,49	0,90	4,2	29,6	5,6	9,8	1,4	3	78	M=q ² /11
4	3V	3,400	2,43	0,729	1,77	0,53	1,52	7,2	45,9	8,6	28,6	-6,6	3	67	M=q ² /2

Tabla 3.31 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. Voladizo #2

Apoyos	Tramos intermedios	Luz	Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por franja	Espaciamiento de los cables en cm	Fórmulas de momentos
1		5,555	2,43	0,740	1,80	0,63	1,98	10,2	46,3	8,8	19,0	-1,5	4	50	M=q ² /10
	1 2	5,555	2,43	0,740	1,80	0,63	1,80	8,5	46,3	8,8	17,2	0,3	4	50	M=q ² /11
2		5,474	2,43	0,760	1,85	0,58	2,03	11,7	46,1	8,7	20,4	-2,9	4	50	M=q ² /9
	3 6	5,392	2,43	0,780	1,90	0,53	1,52	7,2	45,9	8,7	15,9	1,5	4	50	M=q ² /11
3	3V	3,800	2,43	0,780	1,90	0,53	3,86	19,9	45,6	8,6	28,6	-11,3	4	50	M=q ² /2

Para determinar los cables secundarios se estudia una sola franja por nivel, debido a que los resultados obtenidos se distribuyen de manera general en toda la losa (Tabla 3.32 a 3.39).

N01+0.00:

Tabla 3.32 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. CS-1

Franja Extrema. Centro Luz											
Carga total tributaria	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
1,44	0,680	0,98	0,46	2,20	25,0	46,0	20,0	45,0	-5,0	4,0	50

Tabla 3.33 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. CS-1

Franjas Interiores. Centro Luz											
Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
1,44	0,68	0,98	0,46	1,51	17,2	46,0	20,0	37,2	2,8	4,0	50

Tabla 3.34 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. CS-1

Franja Extrema. Apoyo Interior											
Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
1,44	0,680	0,98	0,46	2,42	27,5	46,0	20,0	47,5	-7,5	4,0	50

Tabla 3.35 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. CS-1

Franjas Interiores. Apoyos Interiores											
Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
1,44	0,68	0,98	0,46	2,20	25,0	46,0	20,0	45,0	-5,0	4,0	50

Tabla 3.36 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. CS-1

Franja Extrema. Centro Luz											
Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
1,01	0,66	0,35	0,35	3,42	42,4	45,6	20,7	63,1	-21,6	4,0	50

Tabla 3.37 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. CS-1

Franjas Interiores. Centro Luz											
Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
1,01	0,66	0,35	0,35	1,71	21,2	45,6	20,7	41,9	-0,4	4,0	50

Tabla 3.38 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. CS-1

Franja Extrema. Apoyo Interior											
Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
1,01	0,66	0,35	0,35	3,42	42,4	45,6	20,7	63,1	-21,6	4,0	50

Tabla 3.39 Determinación de los tendones. Elaborado por la autora. CS-1

Franjas Interiores. Apoyos Interiores											
Carga total	Relación	Carga permanente a compensar por el postensado	Resto de la Carga	Momento resto de la carga	Esfuerzo fibra extrema	Fuerza pretensado para la carga g	Esfuerzo de pretensado	Esfuerzo total fibra superior	Esfuerzo total fibra inferior	Cantidad de cables por metro	Espaciamiento de los cables en cm
1,01	0,66	0,35	0,35	2,73	33,9	45,6	20,7	54,6	-13,1	4,0	50

No es necesario comprobar el cortante porque según la ACI 318:019 una losa de hormigón garantizando su espesor según los criterios puede resistir los efectos del

punzonamiento a pesar de ser una losa plana apoyada sobre muros y columnas por lo que no es necesario reforzarla por esa vía.

3.3.9 Realización del modelo de las losas postensadas en *Safe*.

Se realizó un modelo en *Safe* de las losas postensadas para cada nivel analizado para poder comprobar la validés de los resultados de diseño obtenidos manualmente por medio de la ayuda de hojas de cálculo en Excel.

Dichos modelos se realizaron teniendo en cuenta los pasos para diseñar las losas postensadas abordados en el capítulo #2.

Para la realización del modelo se tuvieron en cuenta una serie de combinaciones de carga que se enuncian a continuación:

- CP+PTTRANSFER
- CP+PTFINAL
- CP+CU+PTFINAL
- CP+0.5CU+PTFINAL
- 1.4CP
- 1.2CP+1.6CU

Además se partió de los datos que se muestran en la Tabla 3.40 para la elaboración del modelo.

Tabla 3.40 Datos introducidos en el Safe. Elaborado por la autora.

<i>Datos</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad en la que se introdujo en el programa</i>
f'c	6000	Psi
Tipo de tendón	A416MGr186	
Diámetro del tendón	13	mm
Área de tendón	98,7	mm ²
Espesor de losa N01+0,00	230	mm
Altura de muros y columnas	5600	mm
CP	0,00000669	KN/mm ²
CU	0,000004	KN/mm ²
Espesor de losa N02+6,07	220	mm

Altura de muros y columnas	4590	mm
CP	0,00000644	KN/mm ²
CU	0,0000015	KN/mm ²
Dimensiones de Columna	600x600	mm
Espesor de muro	200	mm
Espaciamiento de los cables secundarios	38	in

Lo que permitió obtener un plano con la distribución de los tendones principales (concentrados) y secundarios (distribuidos) que se correspondía con los resultados obtenidos mediante las tablas relacionadas con la determinación de los tendones.(Ver Anexos # 31, 32 y del #50 a # 59)

3.4 Conclusiones parciales.

Luego de analizados los resultados obtenidos mediante el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces se determinaron las siguientes conclusiones:

- Se determinó que la combinación de carga más crítica es la de 1.2CP+1.6CU, porque conduce a una mayor cantidad de cables para reforzar la losa y mantenerla con una capacidad de resistencia adecuada
- La mayoría de las losas trabajan en una dirección y su espesor es uniforme tanto para el nivel N01+0.00 como para el N02+6.07
- Se comprobaron los resultados obtenidos mediante la determinación de un plano con la distribución de los cables en Safe

CONCLUSIONES

- Se analizó el estado del arte referente a la tecnología de losa postensada, la cual permite mediante su empleo abarcar grandes luces, garantizar mayores resistencias y reducir la altura de un nivel de piso respecto al otro al eliminar las vigas y disminuir el espesor de la losa, por lo que es muy utilizada a nivel internacional.
- Se desarrolló la metodología para el diseño de las losas postensadas para un edificio de grandes luces a partir de los criterios planteados en la (Amy Reineke Trygestad, 2005), (318, 2019), (T.Y.LIN, 1984) y (Reinforcement, 2006)
- Se diseñó las losas postensadas para edificios de grandes luces partiendo del análisis y aplicación de la metodología desarrollada

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la EMPAI seguir investigando acerca del desarrollo del diseño, construcción e implementación de las losas postensadas en el país
- Se Propone a la Universidad de Matanzas Sede Camilo Cienfuegos continuar realizando investigaciones que permitan profundizar en las formas de trabajo de las losas postensadas, por medio de herramientas computacionales como el Safe
- Se sugiere la realización de cursos capacitacionales a todos los recién graduados de la carrera de Ingeniería Civil sobre la tecnología del postensado en general y el diseño de las losas postensadas debido al aumento de su utilización en el país
- Se recomienda la utilización del Autocad para la obtención de los planos de losa postensada debido a que los Software como el Safe no cumplen con los requisitos necesarios para la elaboración de los mismos.

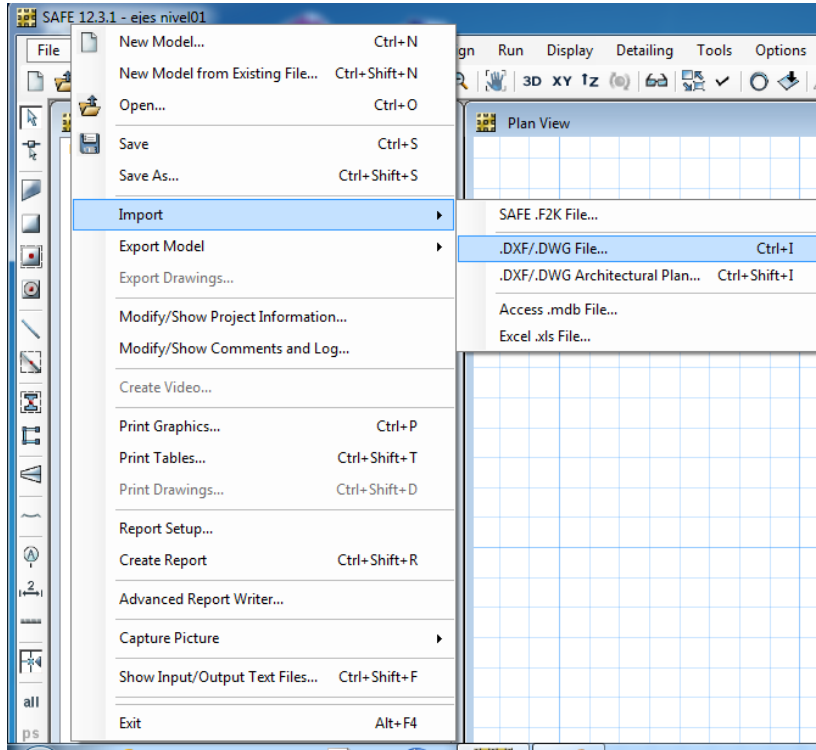
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 318, A. C. 2019. Building Code Requirements for Structural Concrete *ACI 318-19*.
- AGUILAR, J. A. H. 2018. *COMPARACIÓN TÉCNICA - ECONÓMICA DEL ENTREPISO DE UN EDIFICIO DE 10 PLANTAS CON UN SISTEMA DUAL QUE EMPLEA LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO O DE HORMIGÓN POSTENSADO.*, Escuela Politécnica Nacional de Quito.
- AMY REINEKE TRYGESTAD, P. E. 2005. Post-Tensioning for Two-Way Flat Plate Construction.
- ARESTUCHE, L. G. & PÉREZ, R. R. 2009. *PUENTES DE MATANZAS*.
- ARGILA, I. H. D. 2018. *Uso de la losa postesa en la Edificación*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Camins.
- BORRÁS, F. O. 2009-2010. *APLICACIÓN DEL HORMIGÓN POSTESADO EN EDIFICACIÓN*. Universidad Politécnica de Valencia.
- BR. PINTO BARRANTES, R. A. 2018. *Software ETABS y su influencia en el aprendizaje de análisis estructural en estudiantes de ingeniería civil de la Universidad "Cesar Vallejo" filial Lima – Norte*. Universidad "Cesar Vallejo".
- CABRERA., T. D. M. 2014. *Apuntes prácticos para la explotación del software profesional. Diseño de losas por Método de Elementos Finitos.*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- CASTELLS, Á. C. 2011. *ESTUDIO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOSAS POSTESADAS*. Escuela Técnica Superior de Gestión en la Edificación.
- CCL 2016. Post-Tensioned Slabs. 16.
- DELGADO, P. H. 1999. HOTEL DONAIRE.
- FREYSSINET, E. D. S. 2015. SISTEMA DE LOSAS POSTENSADAS. 6.
- GRUPO ALCREQ, S. A. D. C. V. 2017. LOSA POSTENSADA. 12.
- HERNÁNDEZ, I. E. 2011. Manual de Aplicación del Programa SAFE
- INC, C. A. S. 2010. *Post-Tensioned Concrete Design Manual*.
- LÓPEZ, C. C. 2016. *Análisis y Diseño Automatizado de Elementos Planos con SAFE.*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- LTD., T. F. P. C. C. 2009. *Prestressing Manual*.
- MARRERO, J. C. & ALFONSO, T. 2017. RECONSTRUCCIÓN CAPITAL DEL PUENTE GUANIMA.
- MEDINA, J. M. B. 2013. *DISEÑO DE LOSAS POSTENSADAS EN EDIFICACIONES, CON APLICACIÓN AL CASO DEL EDIFICIO "PARQUE TECNOLÓGICO DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA"*. Universidad de Cuenca.
- MOHAMED, A. W., MOHAMED, H. R., MOHAMED, H. A., EMAM, K. S., MAHMOUD, M. H. & ALI, M. N. 2007. *Pre-Stressed Concrete Slabs*. AinShams University.
- MORENO, E. 2017. *Losas Postensadas* [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/EricMoreno17/losas-postensadas-64822276> [Accessed 22 de febrero 2020].
- NORMALIZACIÓN, C. T. D. 2003. Density of artificial and natural materials, and of structural elements such as design of weight structures. *NC 283 : 2003*.

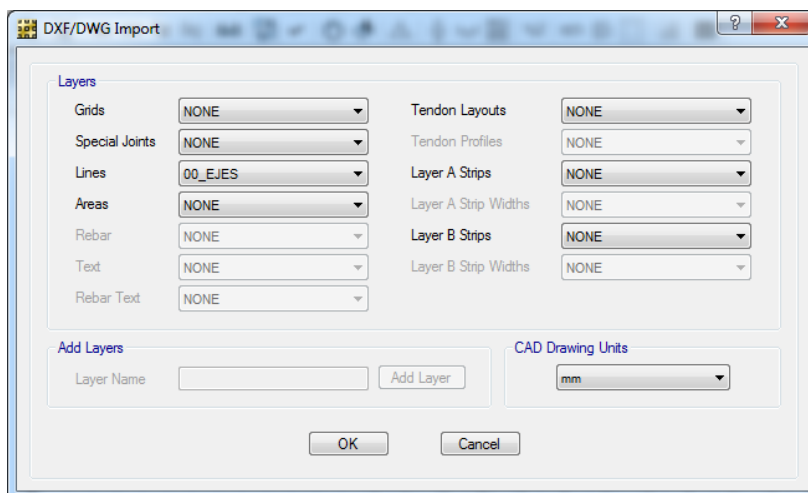
- NORMALIZACIÓN, C. T. D. 2010. Design and Building Bases for Tourism Investment-Part 8: Requirements for Structure. *NC 775-8: 2010*.
- NOVILLO, E. G. & VILLA, G. M. 2004. *Estudio Comparativo de una Estructura de Seis Niveles con Aplicación del Programa SAP2000*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- P.MILLER, J. 2012. *Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Design for Buildings*.
- REINFORCEMENT, S. A. O. S. 2006. Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete. *A 416/A416M – 06*.
- SZYDLOWSKI, R. & LABUZEK, B. Post-Tensioned Concrete Long-Span Slabs in Projects of Modern Building Construction. *Materials Science and Engineering*, 2017 Cracow University of Technology, Warszawska Street 24, 31-155 Cracow. IOP, 9.
- T.Y.LIN 1984. *Diseño de Estructuras de Concreto Preeesforzado*.

ANEXOS

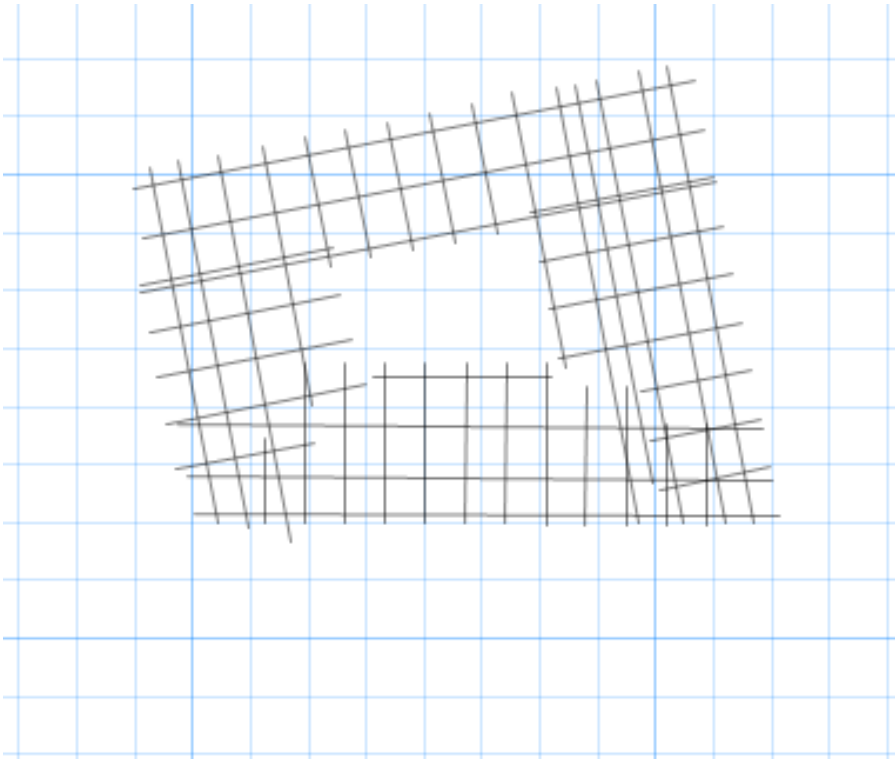
Anexo #1: Cuadro de Iniciación de la importación.



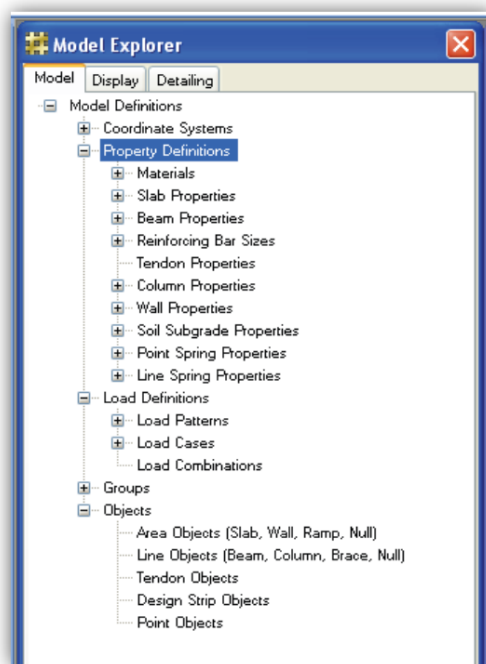
Anexo #2: Cuadro de definición de la importación de los ejes.



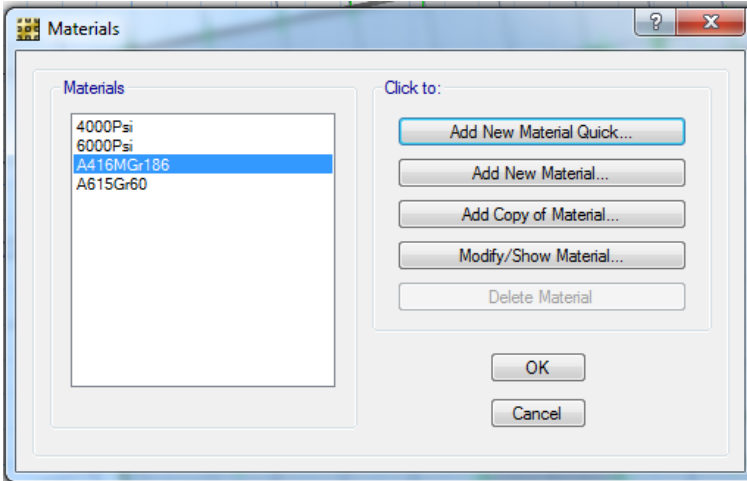
Anexo #3: Ejes importados para ambos niveles.



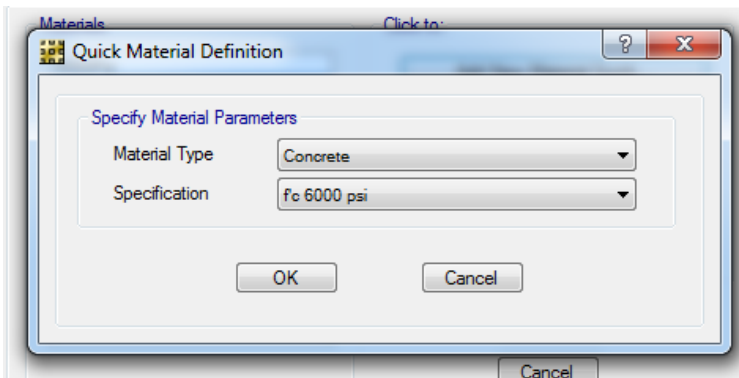
Anexo #4: Lista de explorar modelo.



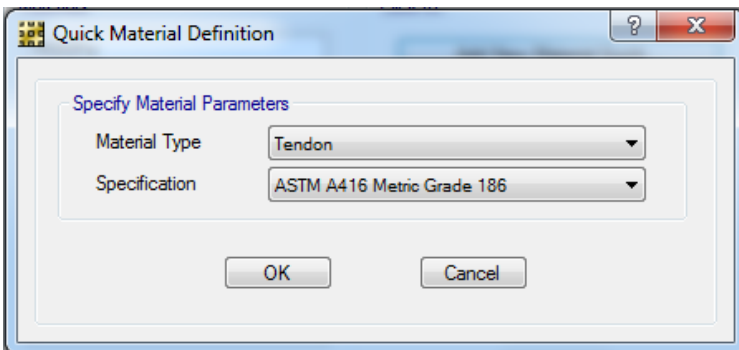
Anexo #5: Cuadro de materiales.



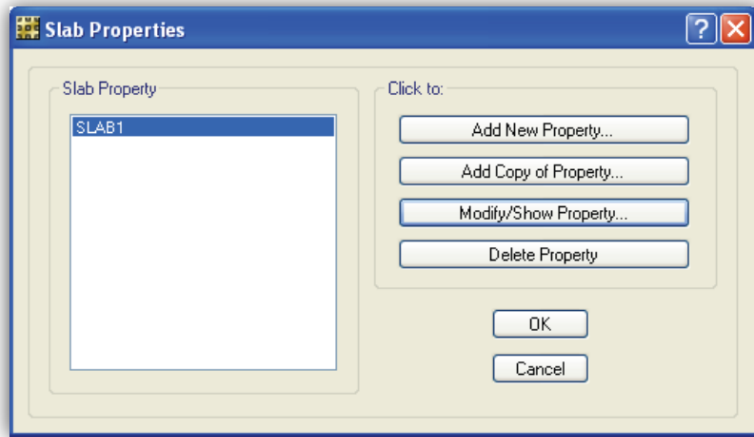
Anexo #6: Cuadro de definición rápida del material(concreto).



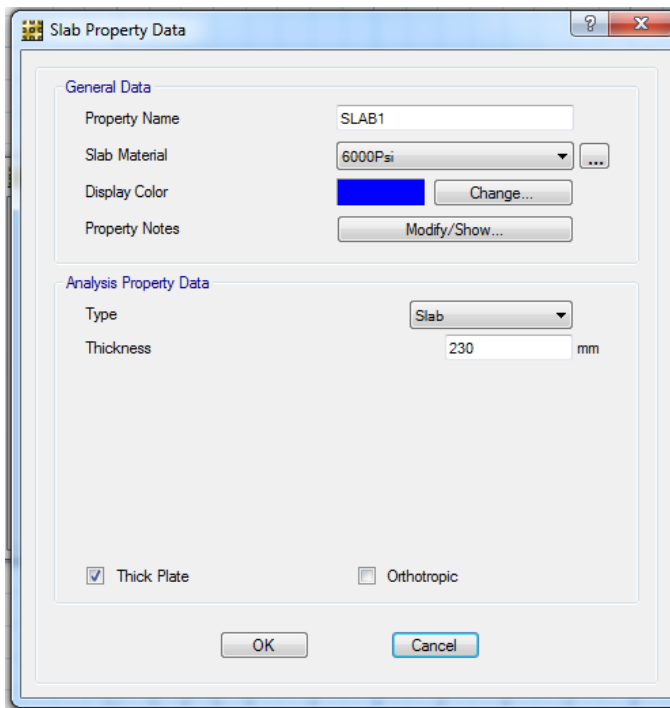
Anexo #7: Cuadro de definición rápida del tendón.



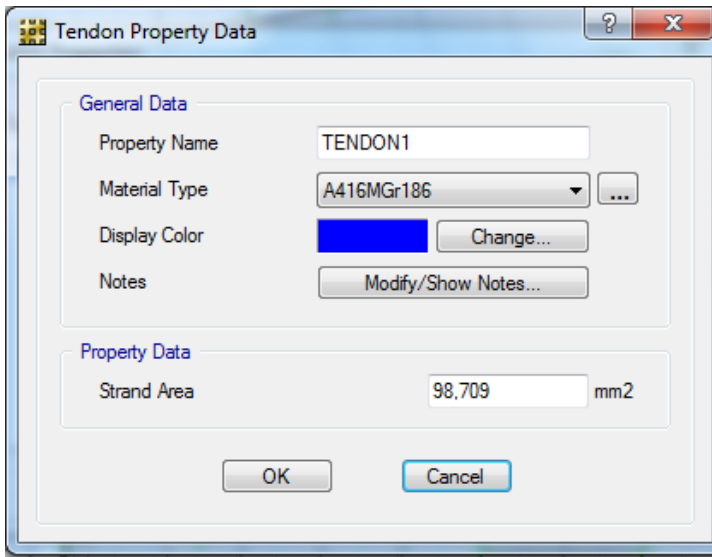
Anexo #8: Cuadro de propiedades de la losa.



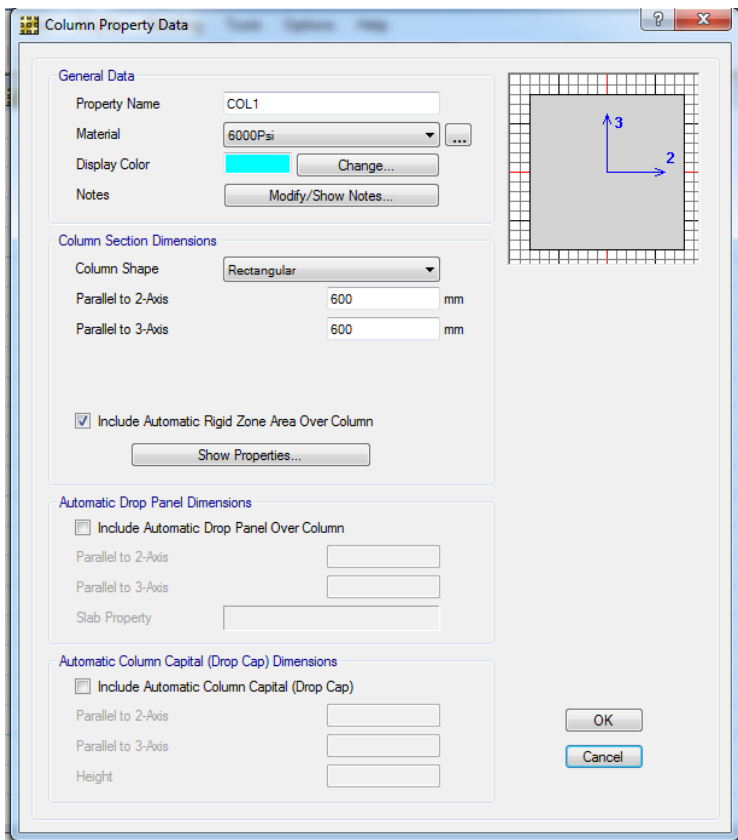
Anexo #9: Cuadro de información de las propiedades de la losa para N01+0.00 (para el N02+6.07 el *espesor (thickness)* es 220 mm).



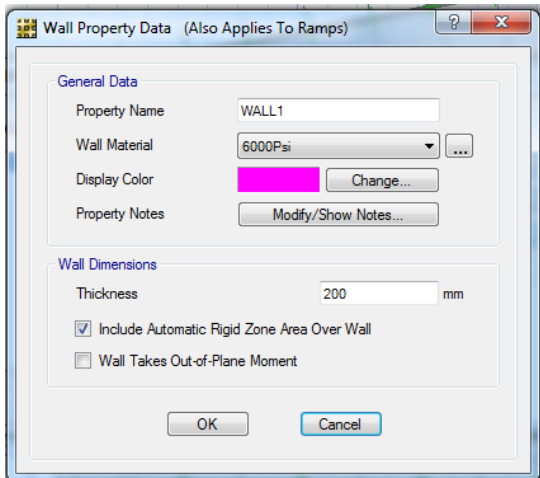
Anexo #10: Cuadro de información de las propiedades del tendón.



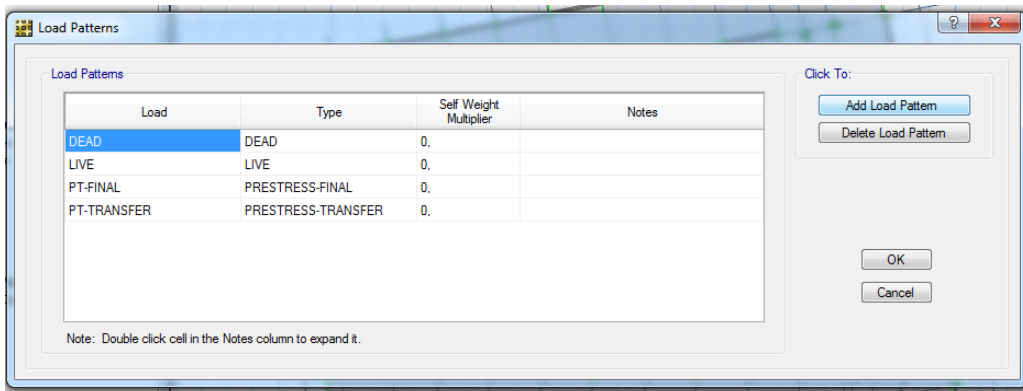
Anexo #11: Cuadro de información de las propiedades de la columna.



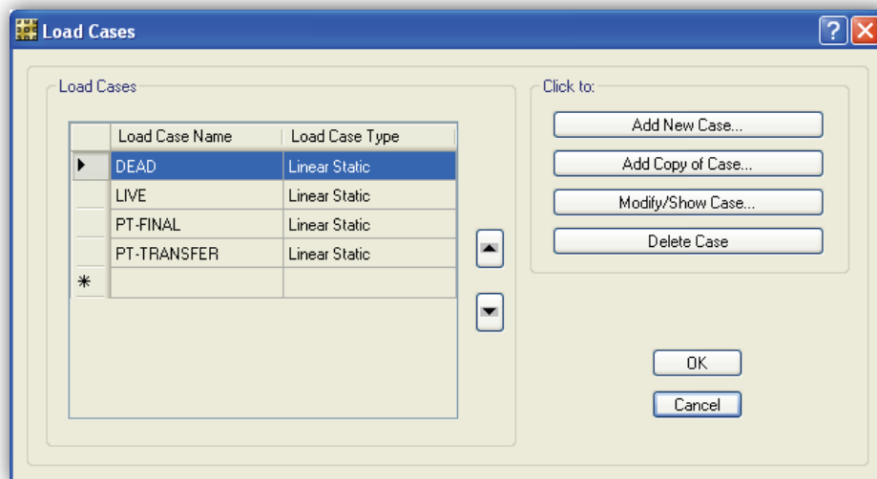
Anexo #12: Cuadro de información de las propiedades del muro.



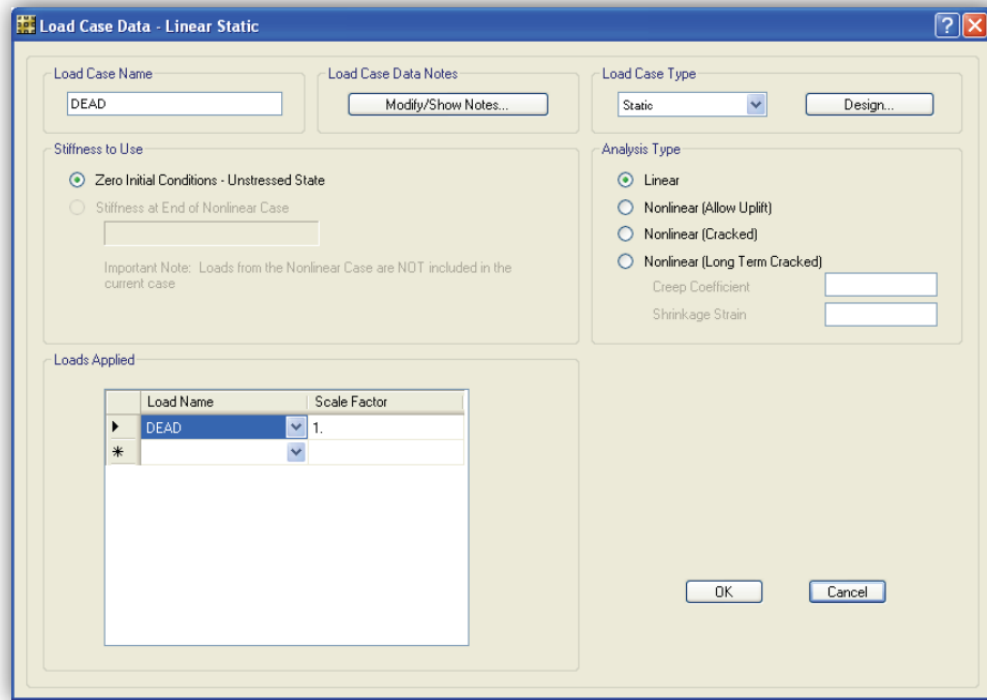
Anexo #13: Cuadro de modelación de carga (patrón de carga).



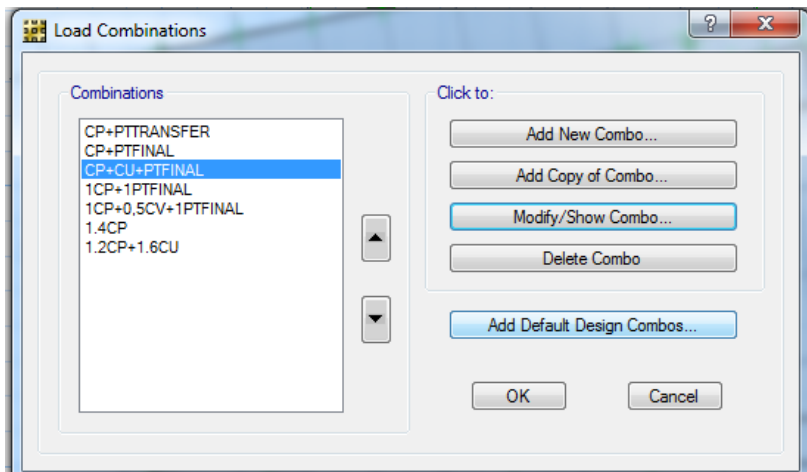
Anexo #14: Cuadro para establecer los casos de carga.



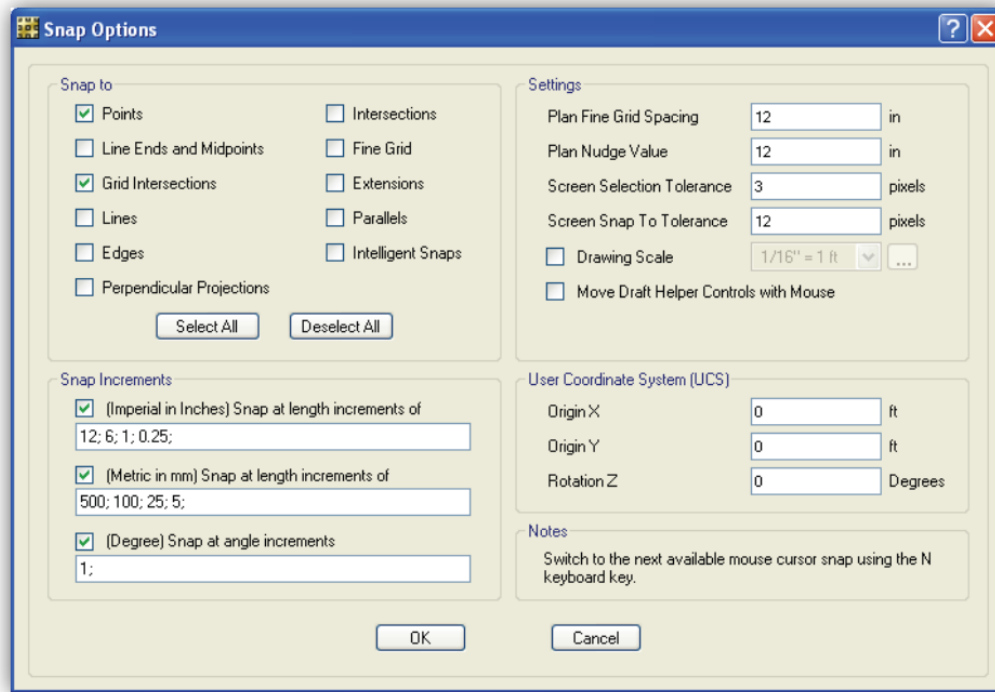
Anexo #15: Cuadro de información de los casos de carga linealmente estática.



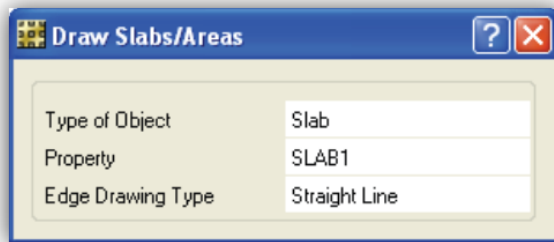
Anexo #16: Cuadro para insertar combinaciones de carga.



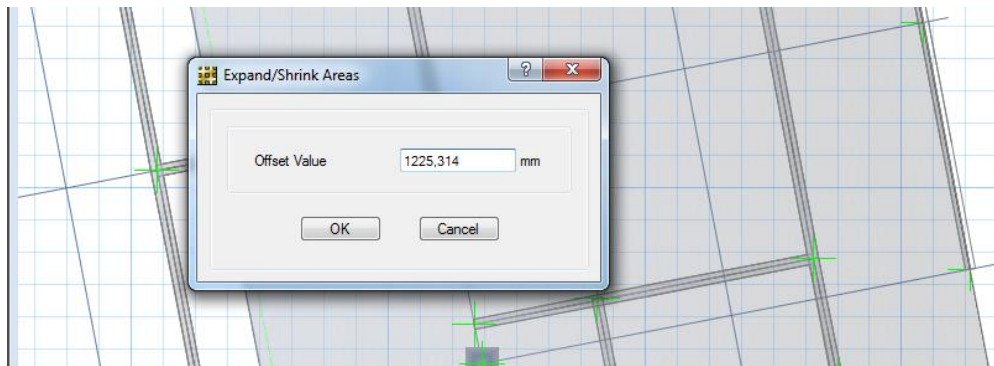
Anexo #17: Cuadro de opciones automáticas.



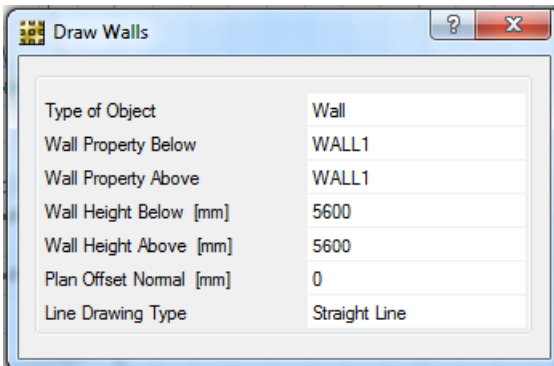
Anexo #18: Cuadro de dibujado de losa.



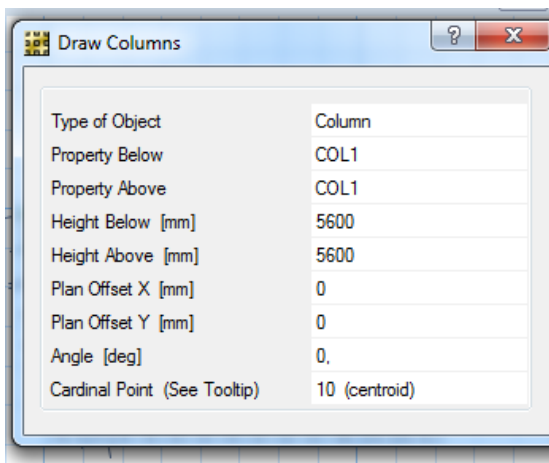
Anexo #19: Cuadro de expandir áreas para el caso del N01+0.00.



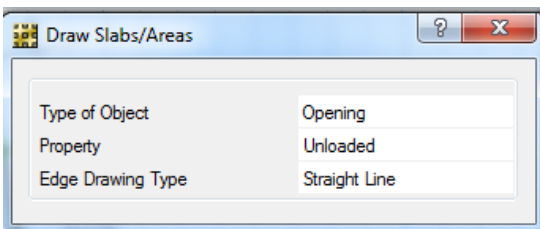
Anexo #20: Cuadro de dibujado de muros para N01+0.00 (En el caso del N02+6.07 la altura toma un valor de 4590 mm).



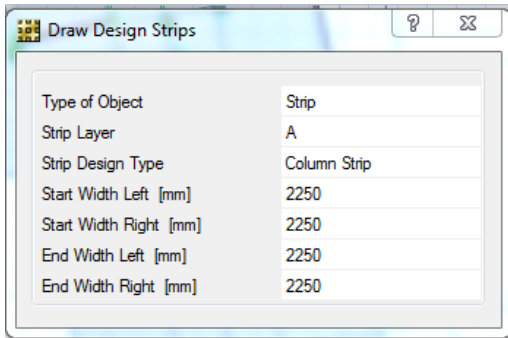
Anexo #21: Cuadro de dibujado de columnas para N01+0.00 (En el caso del N02+6.07 la altura toma un valor de 4590 mm).



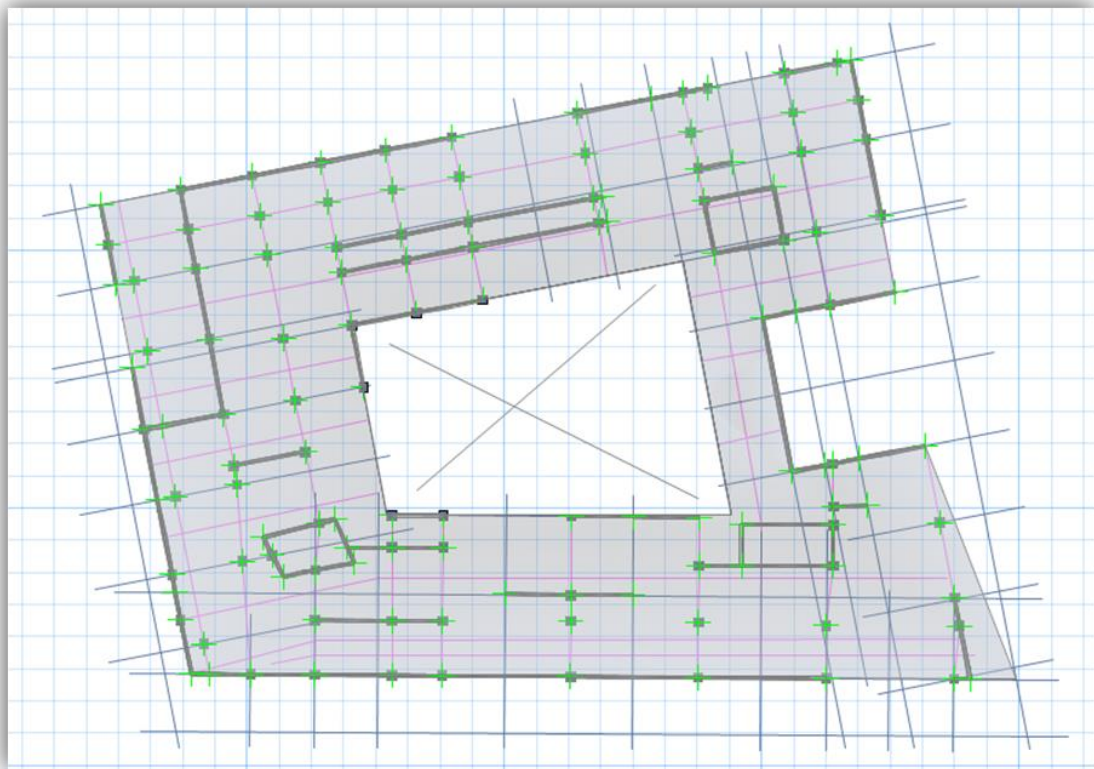
Anexo #22: Cuadro de dibujo de losa rectangular (área de abertura)



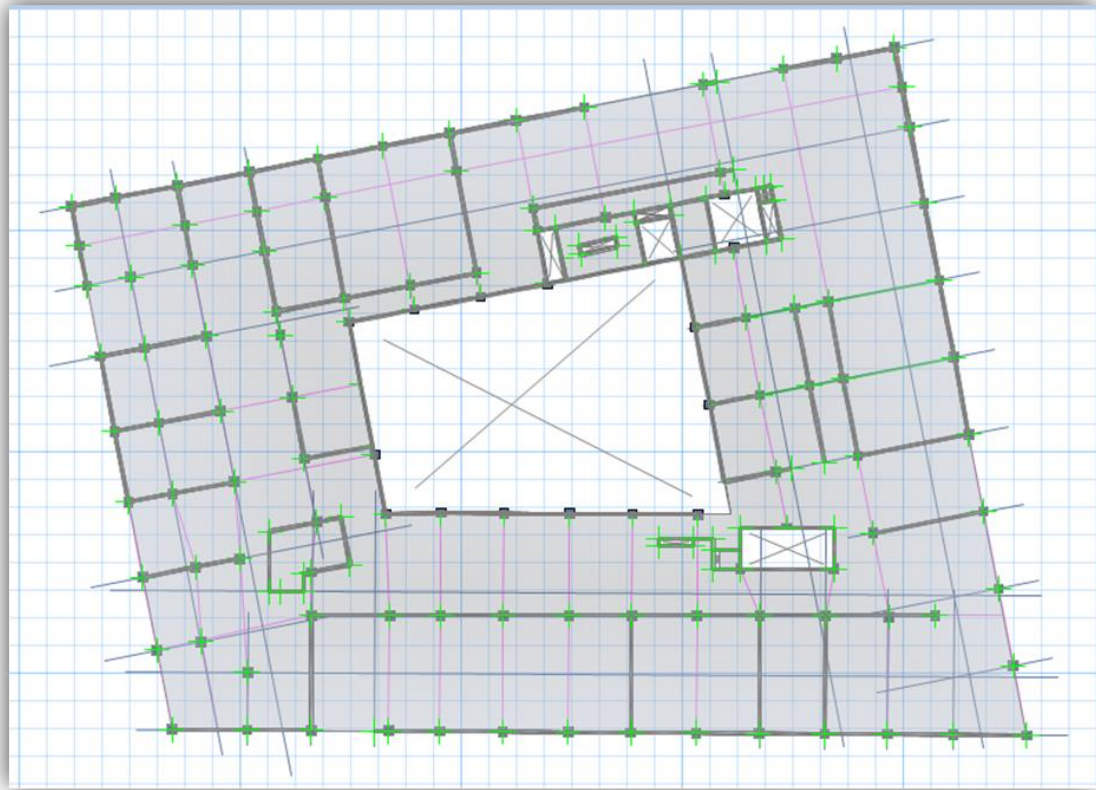
Anexo #23: Cuadro de dibujo del diseño de los ejes de carga (se emplean los mismos datos variando solamente los *layer*, teniendo en cuenta que *layer B* es para *strip* horizontales, *layer A* para los *strip* verticales y *other* es para los cables secundarios).



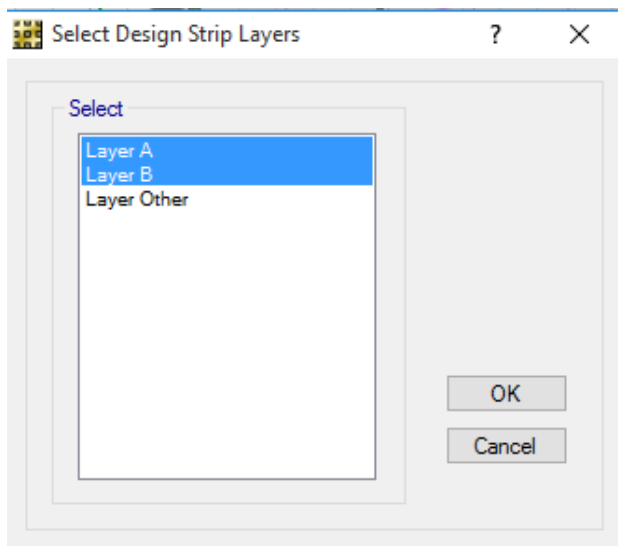
Anexo #24: Distribución de los *strip* para el N01+0.00.



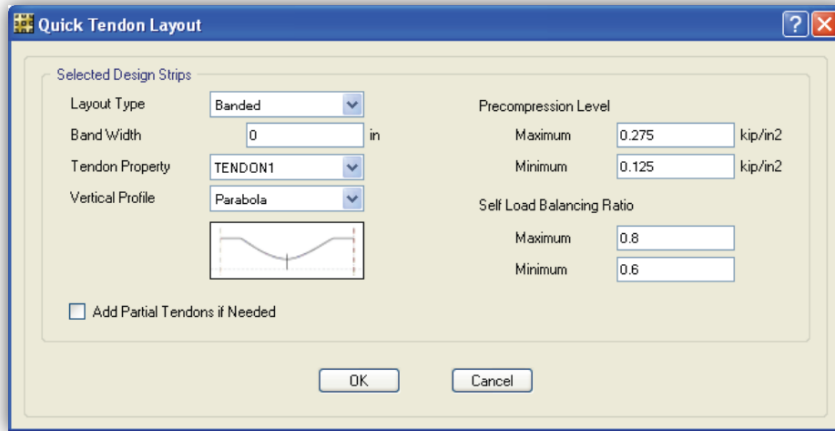
Anexo #25: Distribución de los *strip* para el N02+6.07.



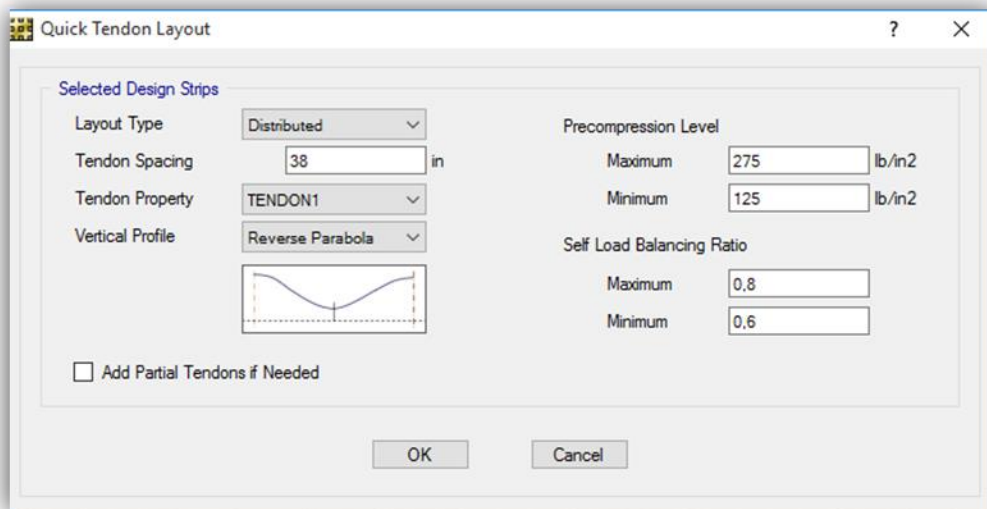
Anexo #26: Cuadro de selección de los Strip Layers.



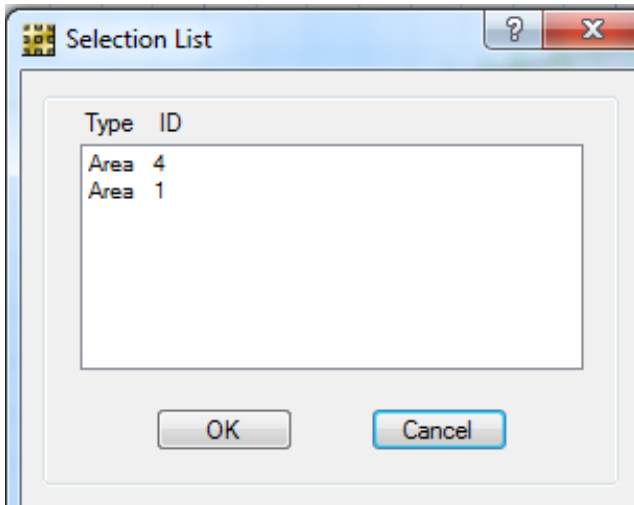
Anexo #27: Cuadro de rápida disposición del tendón (esta operación se realiza para layer A).



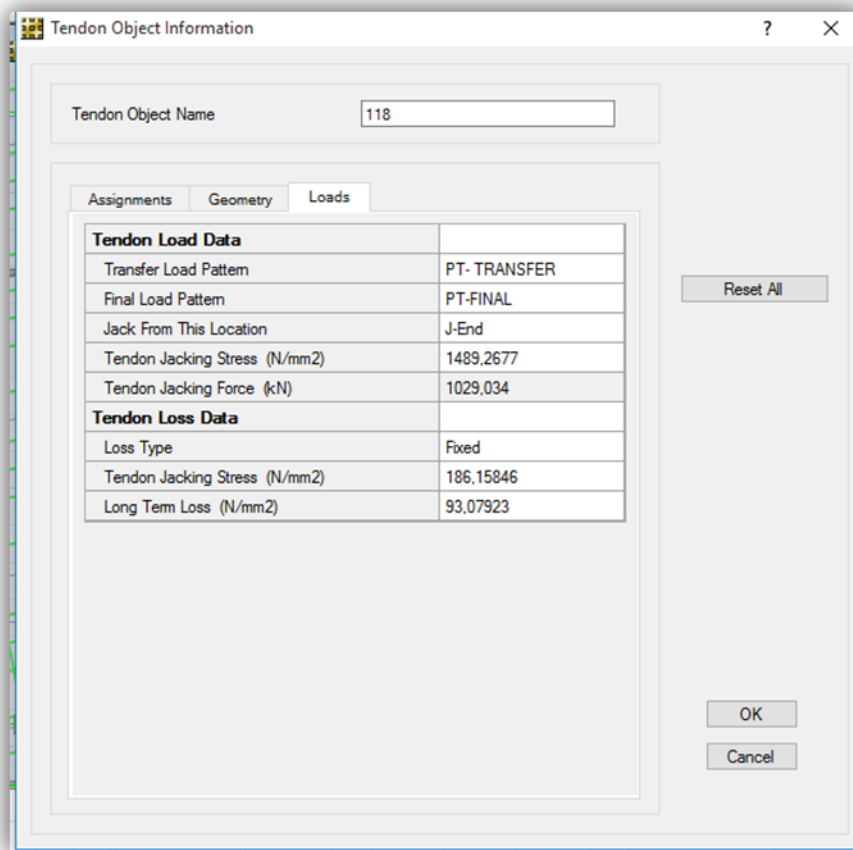
Anexo #28: Cuadro de rápida disposición del tendón (esta operación se realiza para layer B).



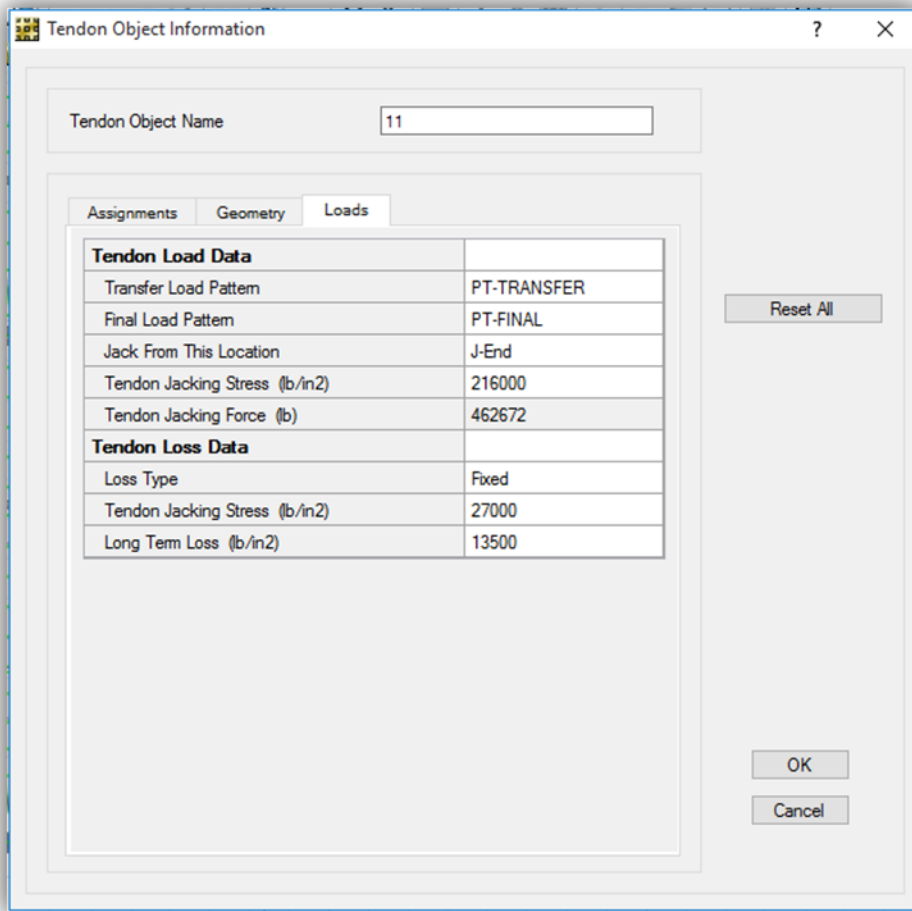
Anexo #29: Cuadro de Lista de Selección para N01+0.00.



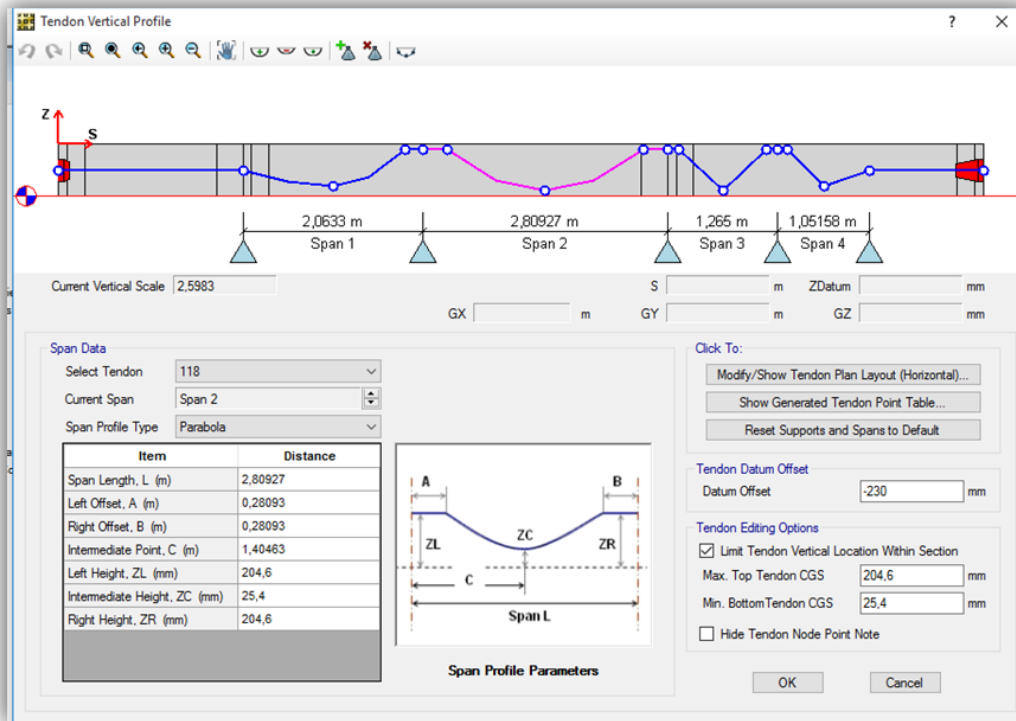
Anexo #30: Cuadro de información del tendón #118 para N01+0.00.



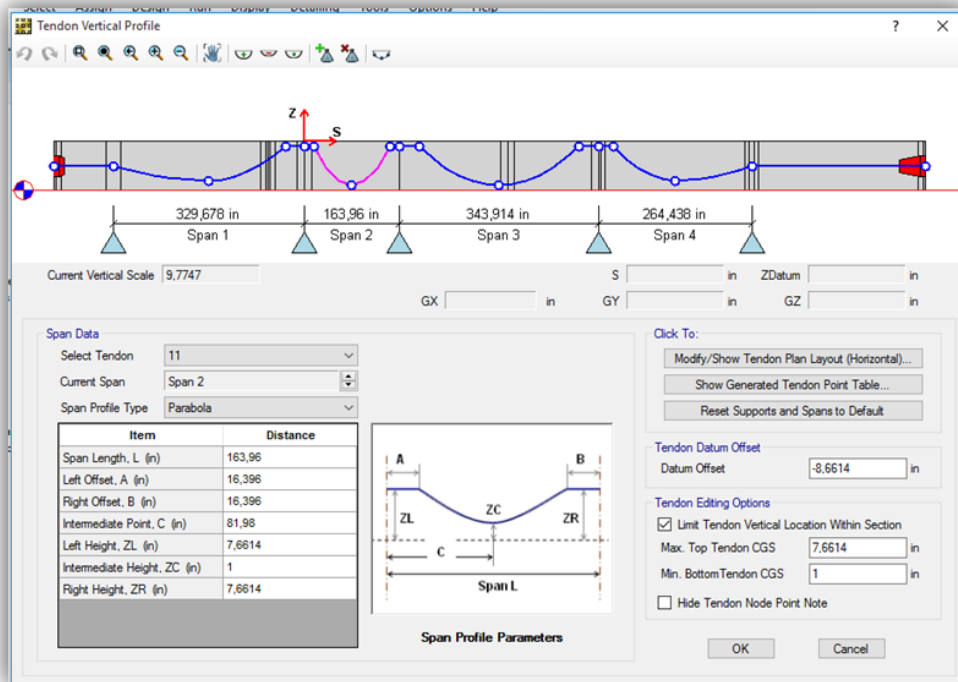
Anexo #31: Cuadro de información del tendón #11 para N02+6.07.



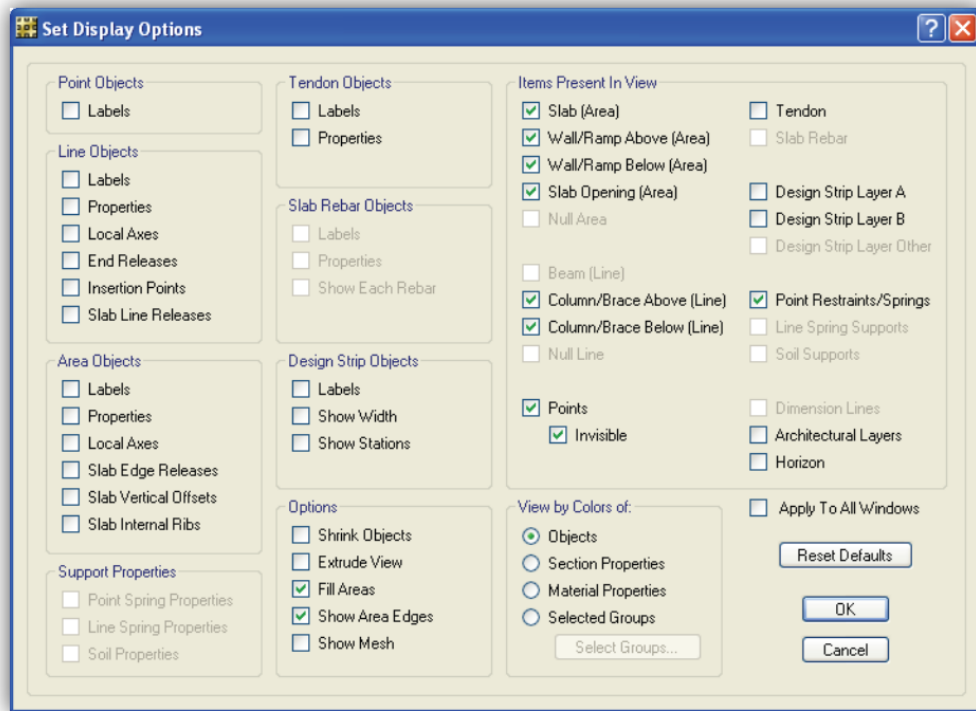
Anexo #32: Perfil Vertical del Tendón #118 para el N01+0.00.



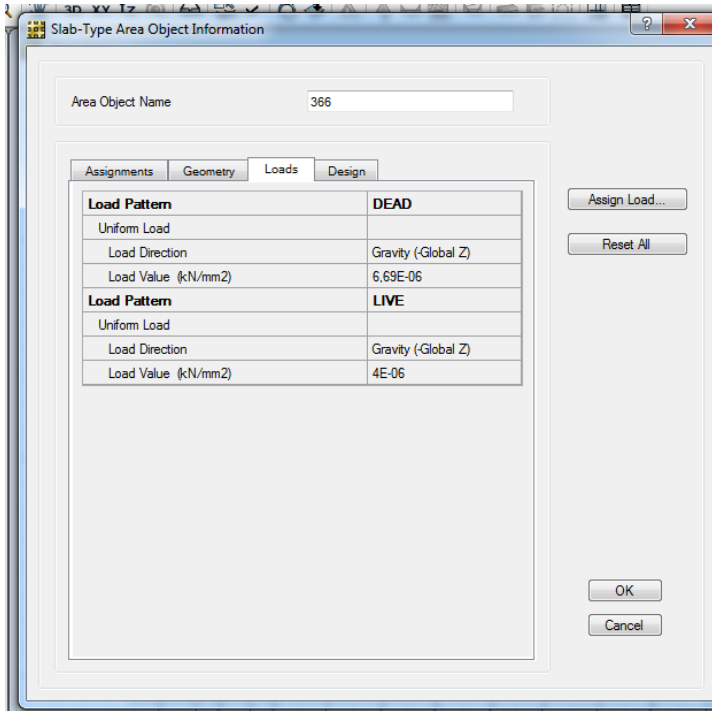
Anexo #33: Perfil Vertical del Tendón #11 para el N02+6.07.



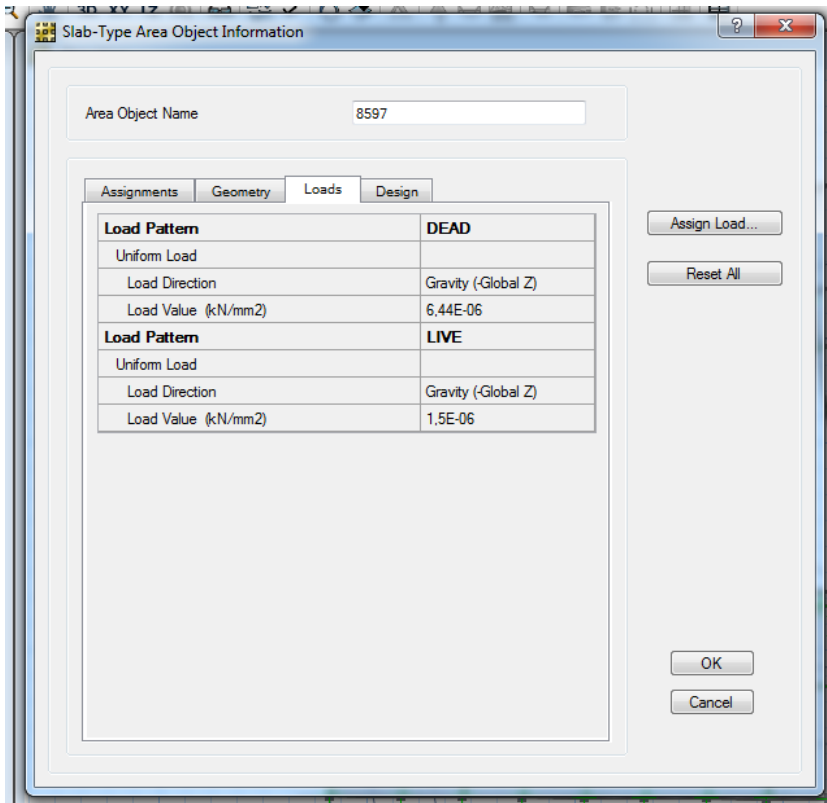
Anexo #34: Cuadro de ajuste de alternativa de exhibición.



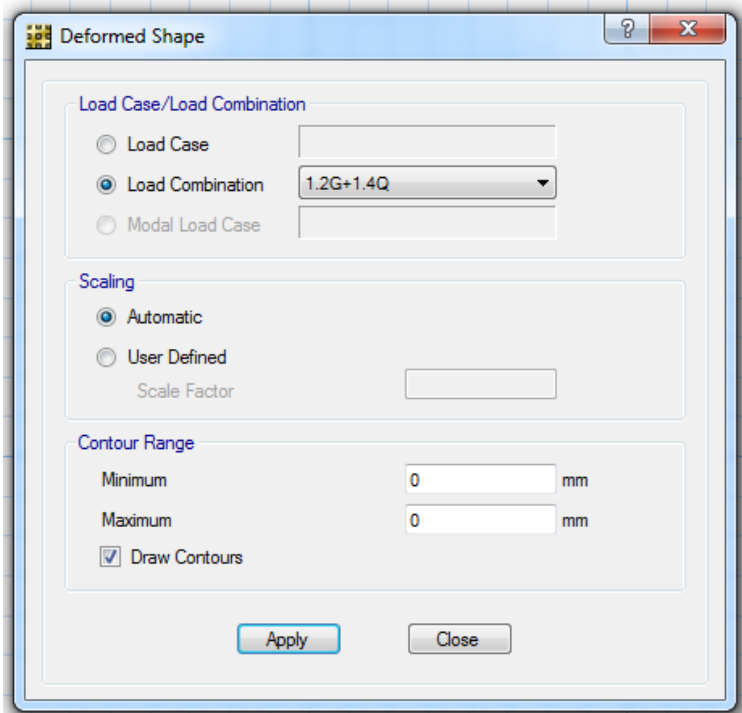
Anexo #35: Cuadro de información del objeto área tipo losa para N01+0.00.



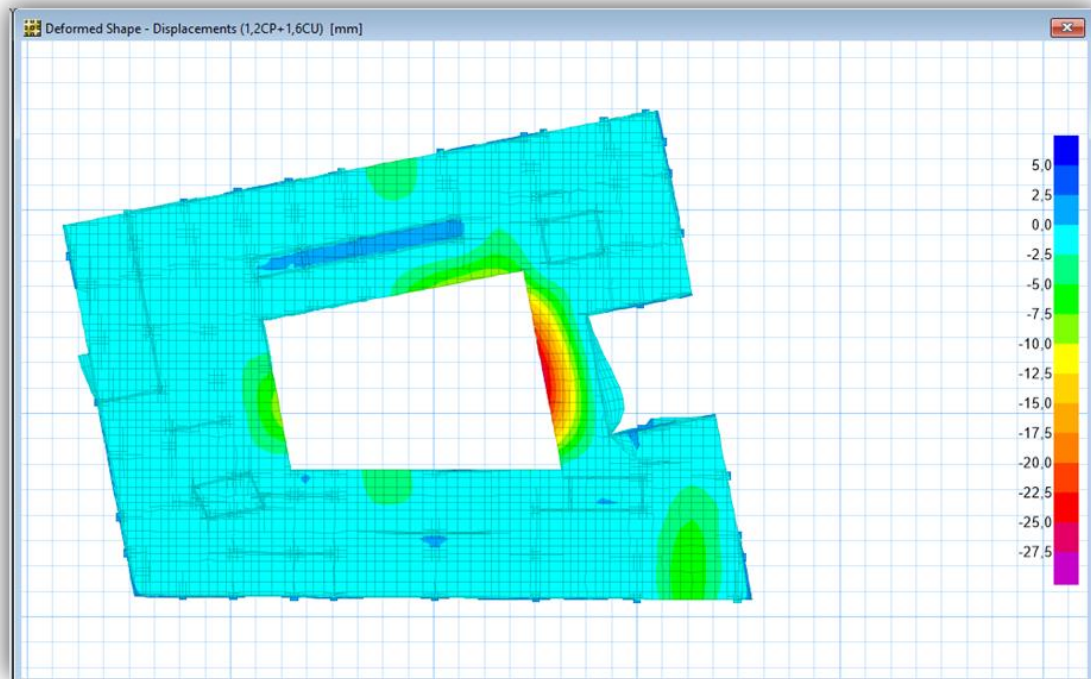
Anexo #36: Cuadro de información del objeto área tipo losa para N02+6.07.



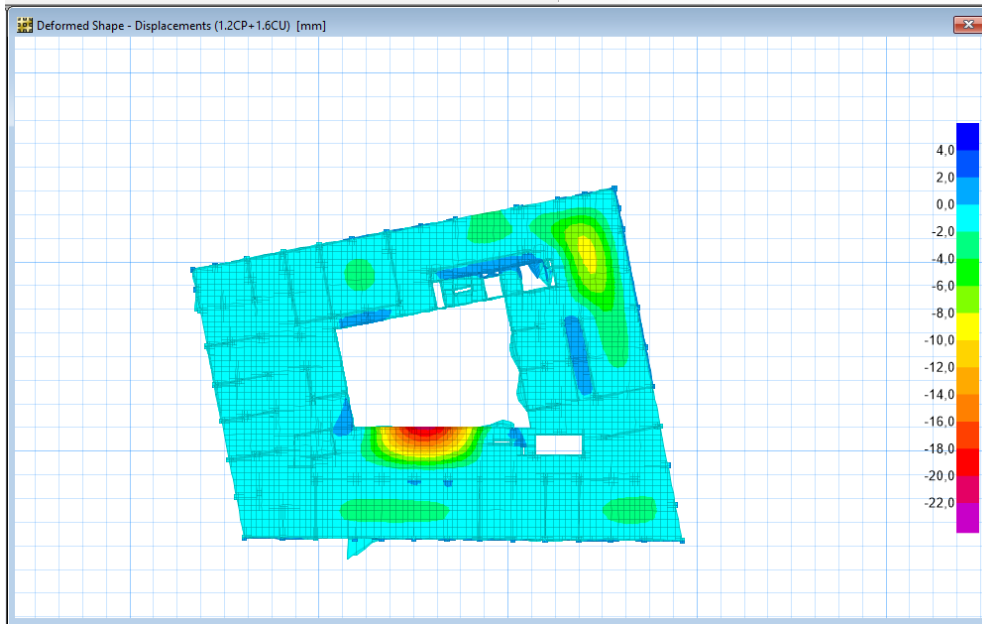
Anexo #37: Cuadro de opciones de Forma deformada.



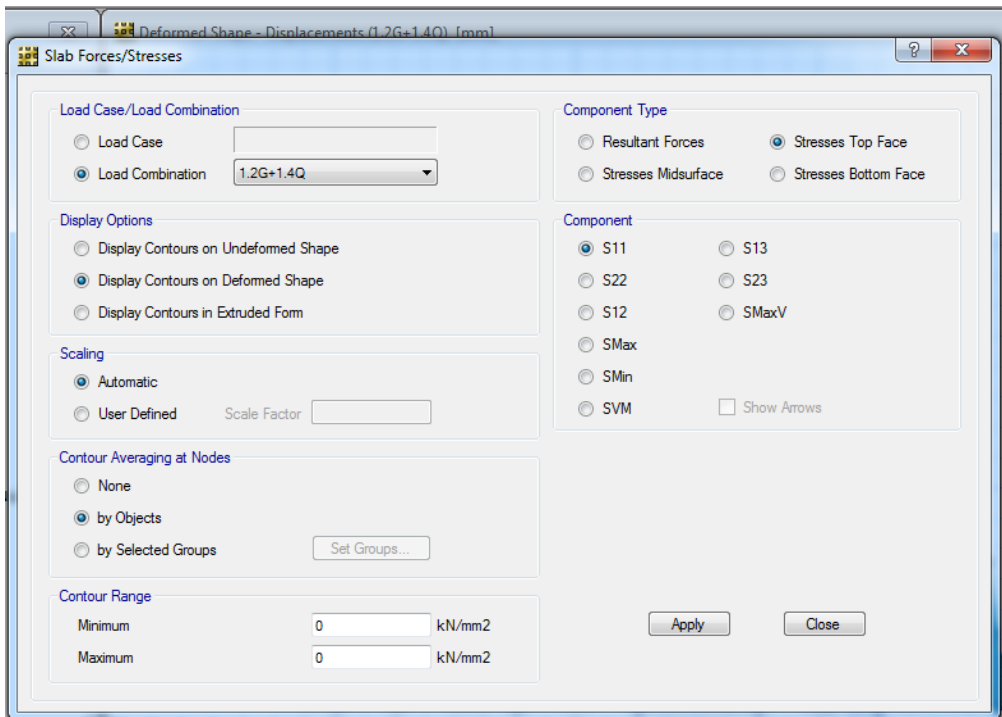
Anexo #38: Deformación de la losa para N01+0.00.



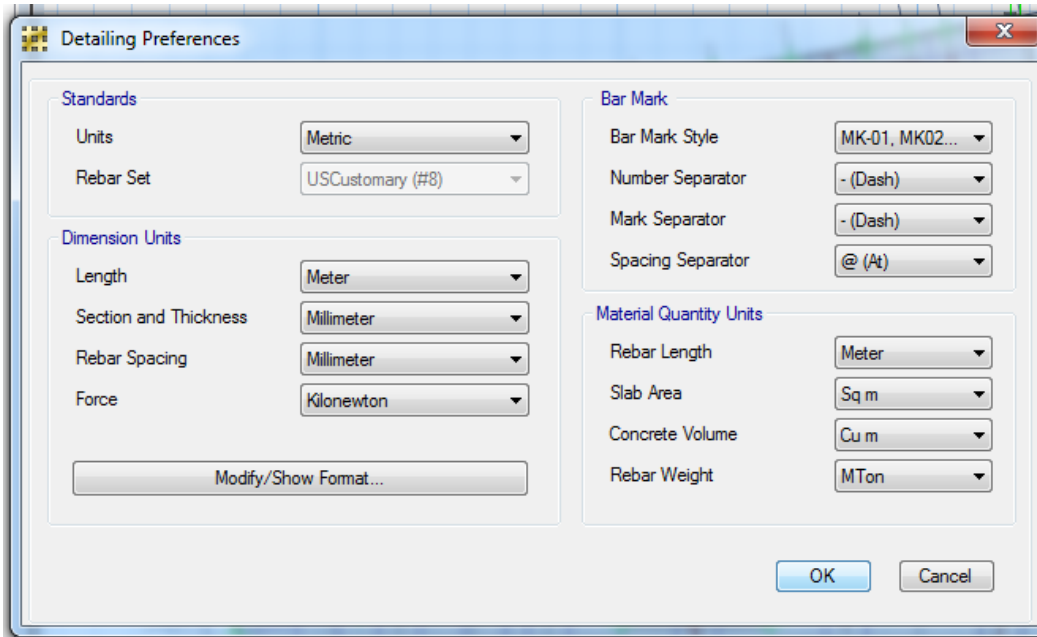
Anexo #39: Deformación de la losa para N02+6.07.



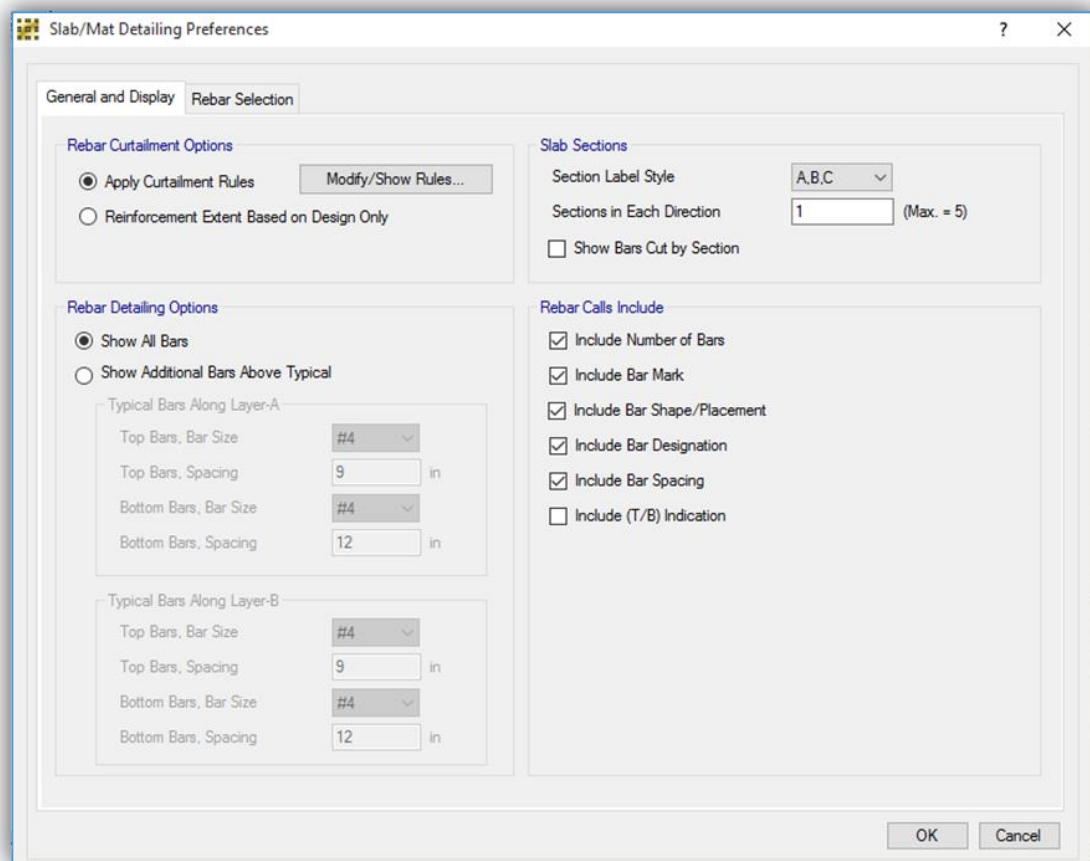
Anexo #40: Cuadro de opciones para mostrar esfuerzos de la losa.



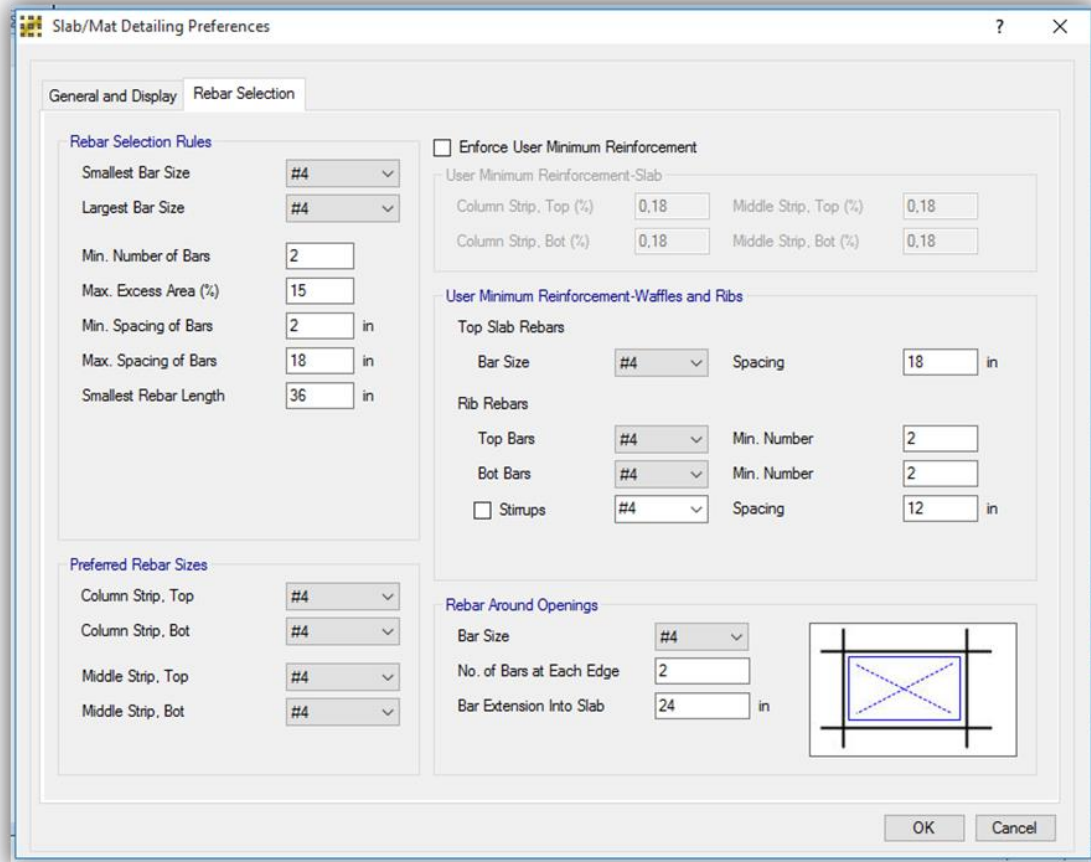
Anexo #41: Cuadro de selección de detalles de preferencia.



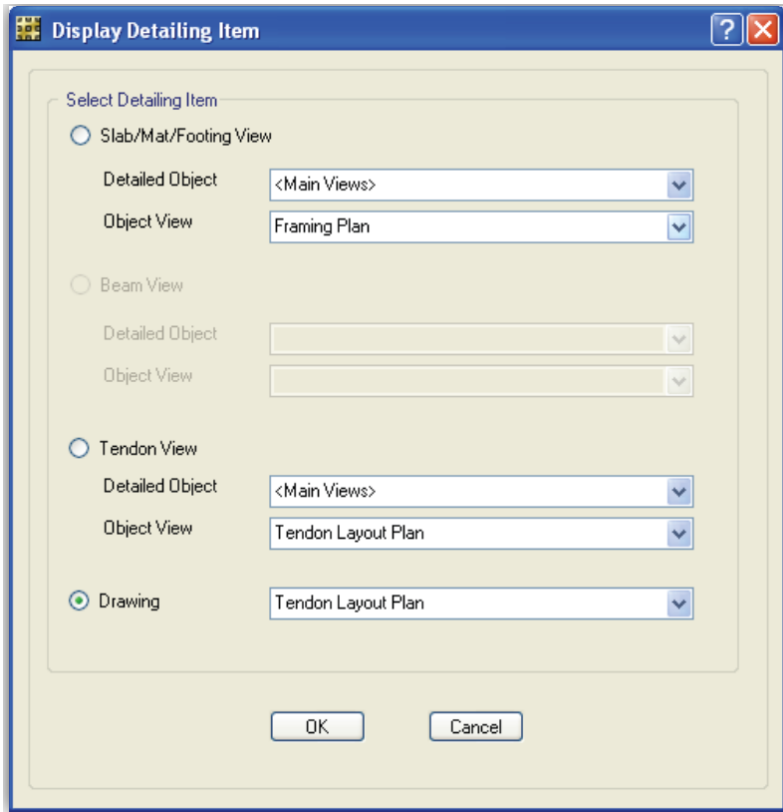
Anexo #42: Cuadro de selección de detalles de preferencia para la losa #1.



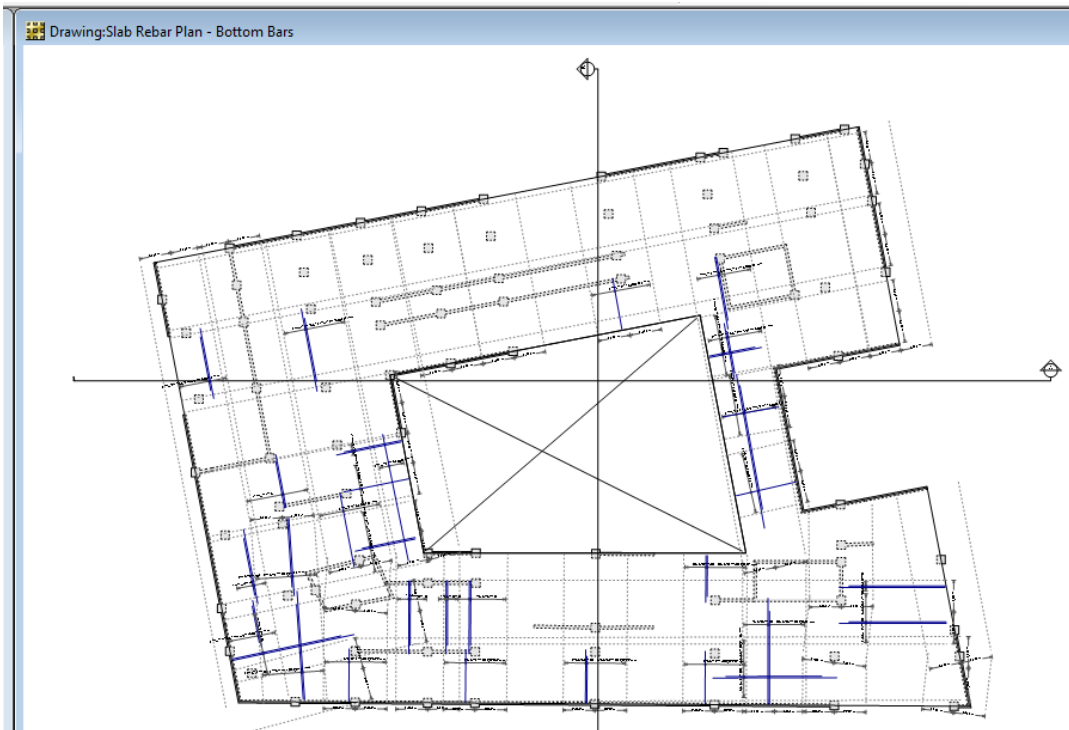
Anexo #43: Cuadro de selección de detalles de preferencia para la losa #2.



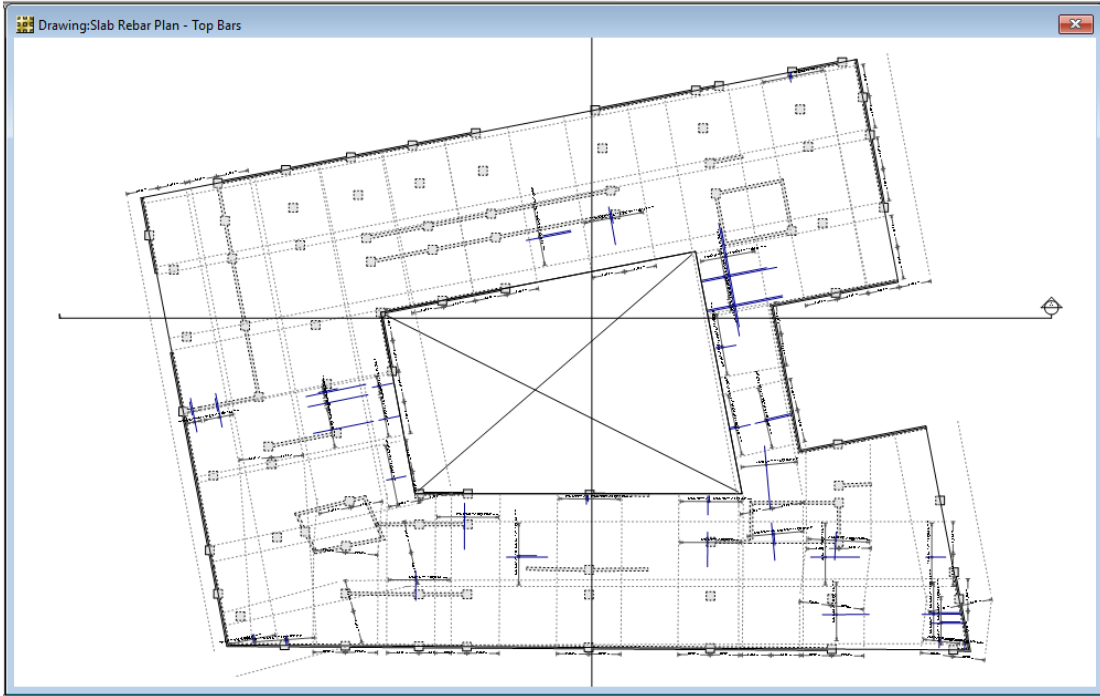
Anexo #44: Cuadro de selección para mostrar de detalles a detalle.



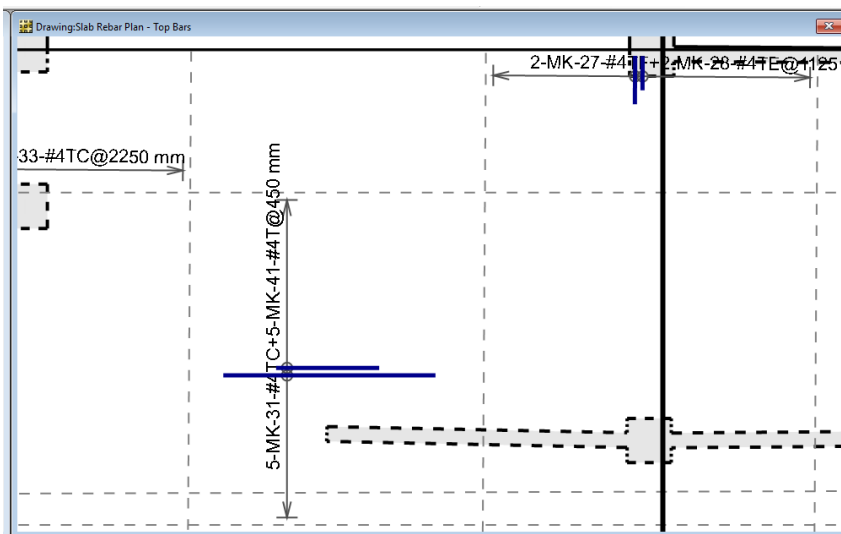
Anexo #45: Plano de refuerzo de acero para N01+0.00.



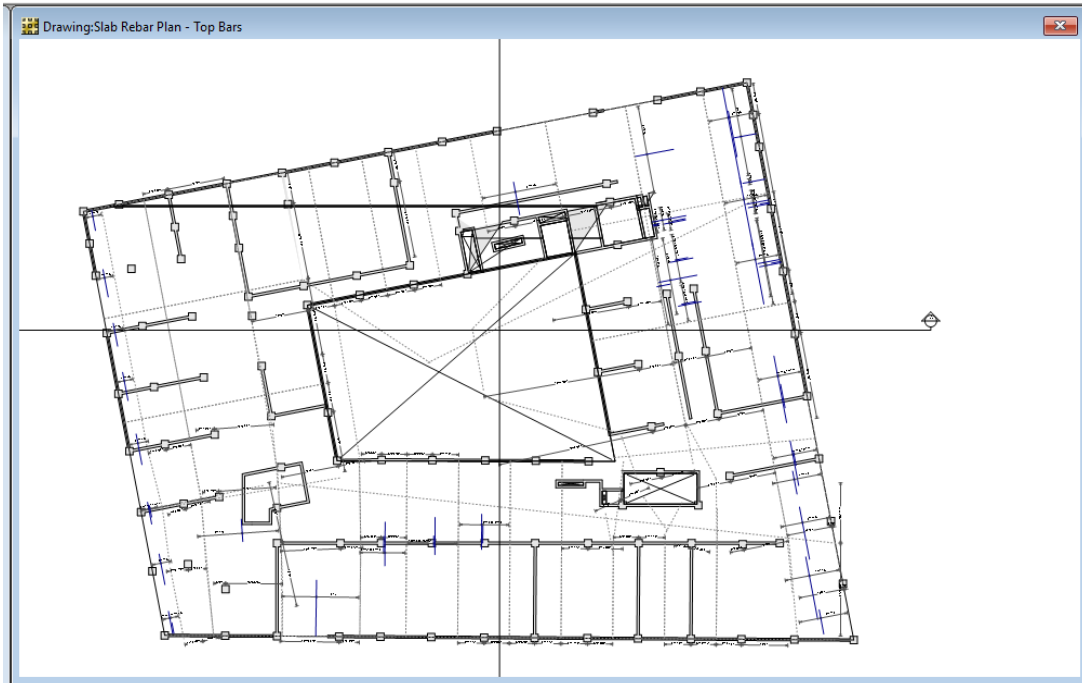
Anexo #46: Plano de refuerzo de acero para N01+0.00.



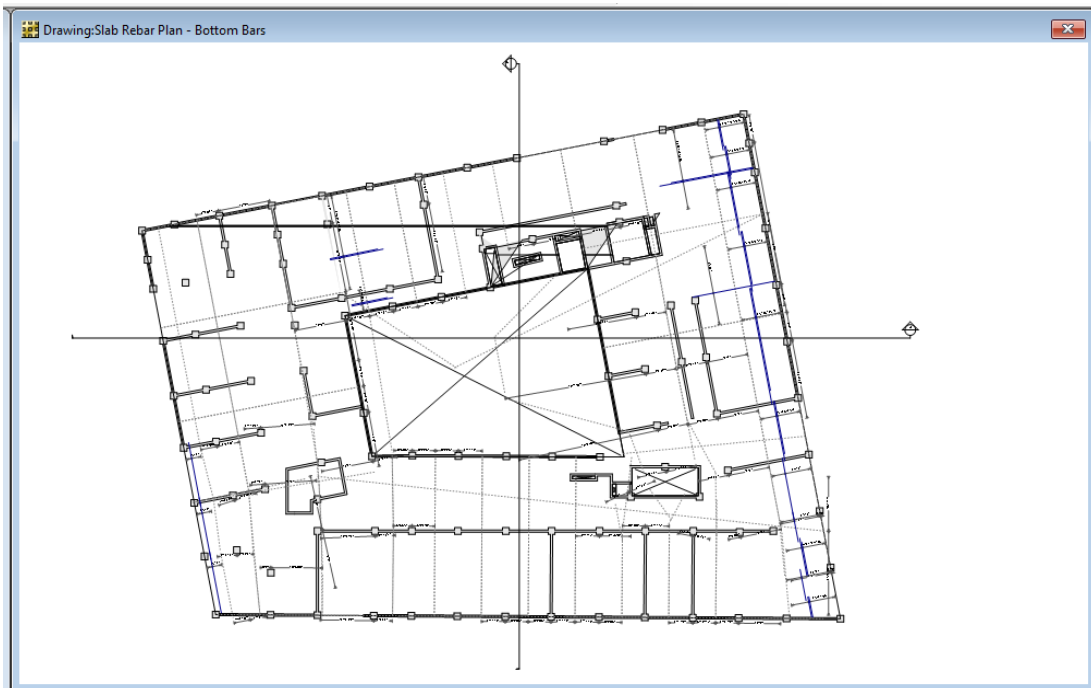
Anexo #47: Ampliación del plano de refuerzo de acero para N01+0.00 (#4 es lo mismo que $\varnothing 13\text{mm}$).



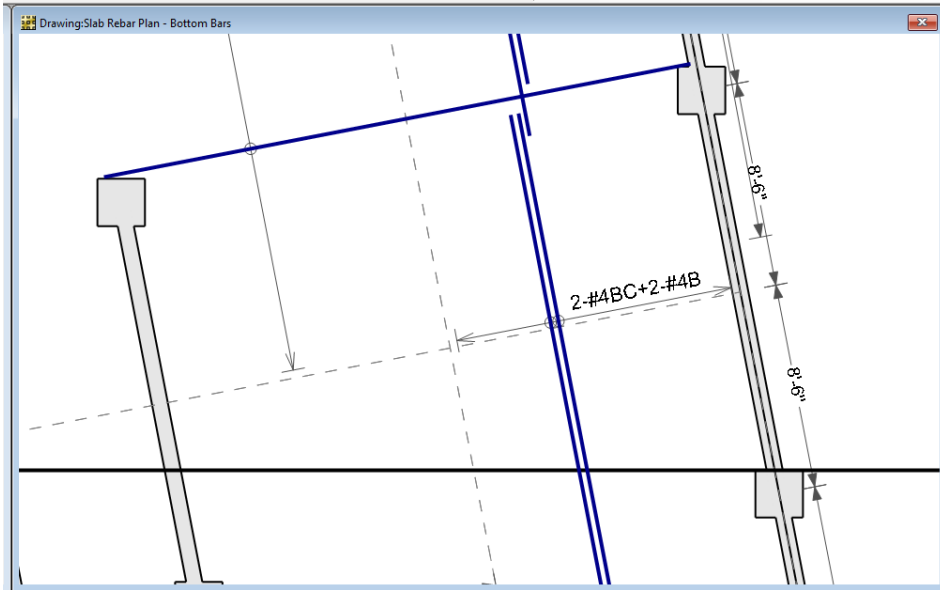
Anexo #48: Plano de refuerzo de acero para N02+6.07.



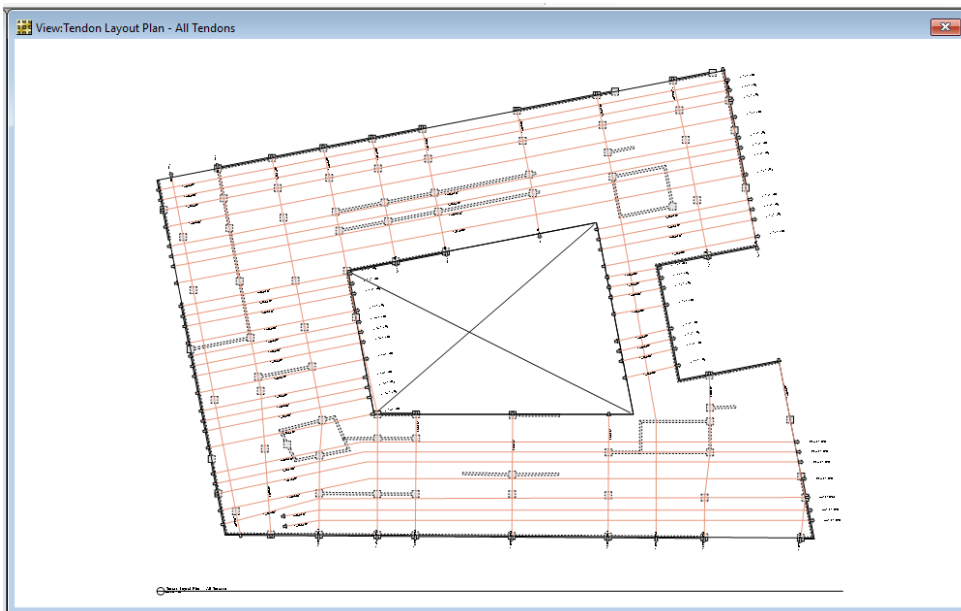
Anexo #49: Plano de refuerzo de acero para N02+6.07.



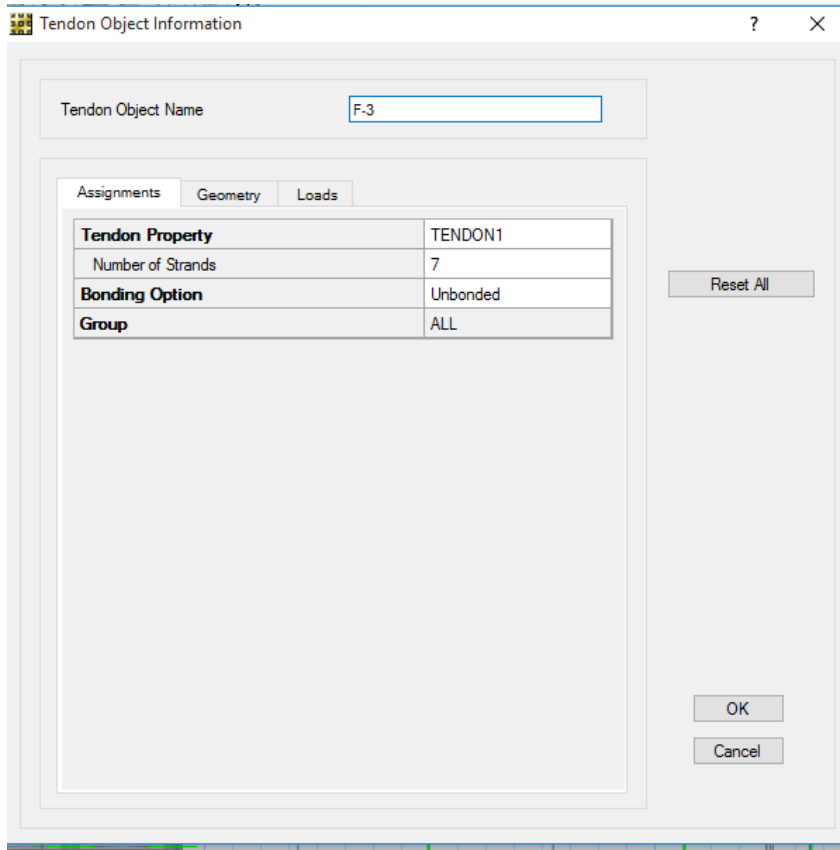
Anexo #50: Ampliación del plano de refuerzo de acero para N02+6.07 (#4 es lo mismo que $\varnothing 13\text{mm}$).



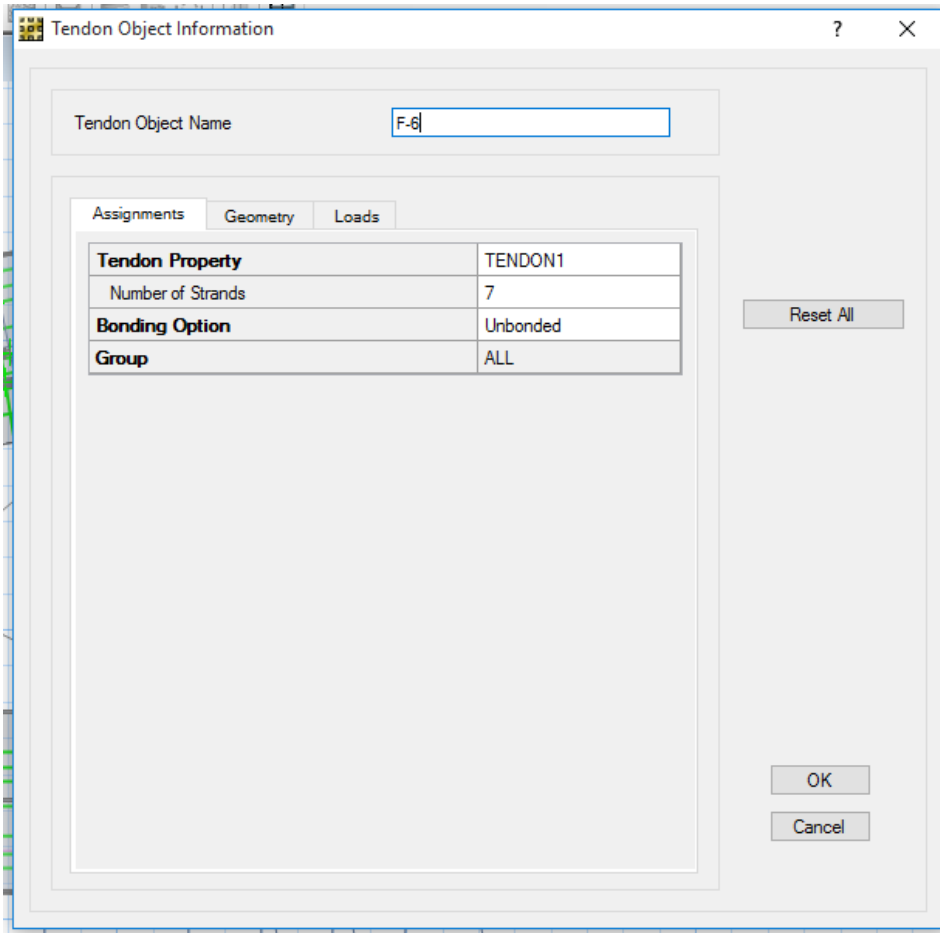
Anexo #51: Plano de distribución de tendones para N01+0.00.



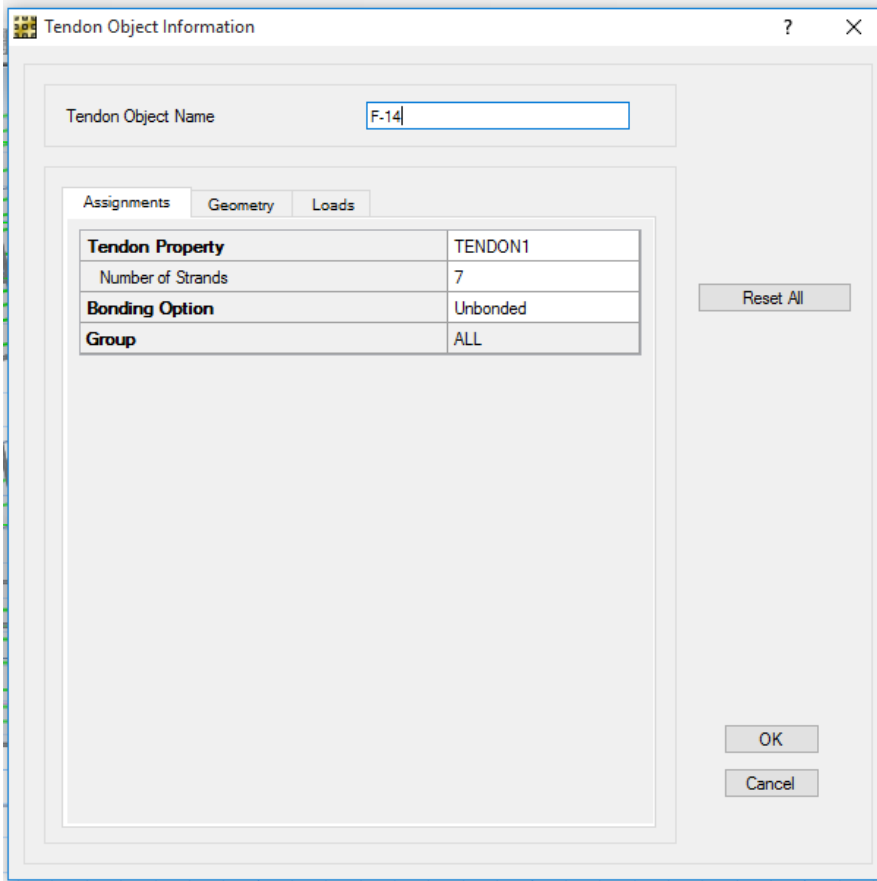
Anexo #52: Detalle de la cantidad de tendones principales por la franja F-3 para N01+0.00.



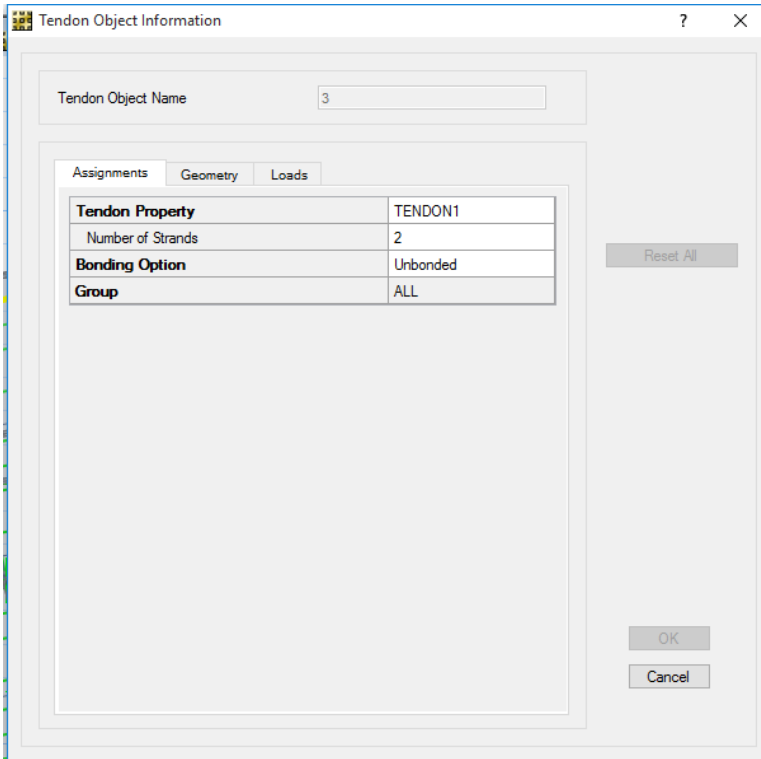
Anexo #53: Detalle de la cantidad de tendones principales por la franja F-6 para N01+0.00.



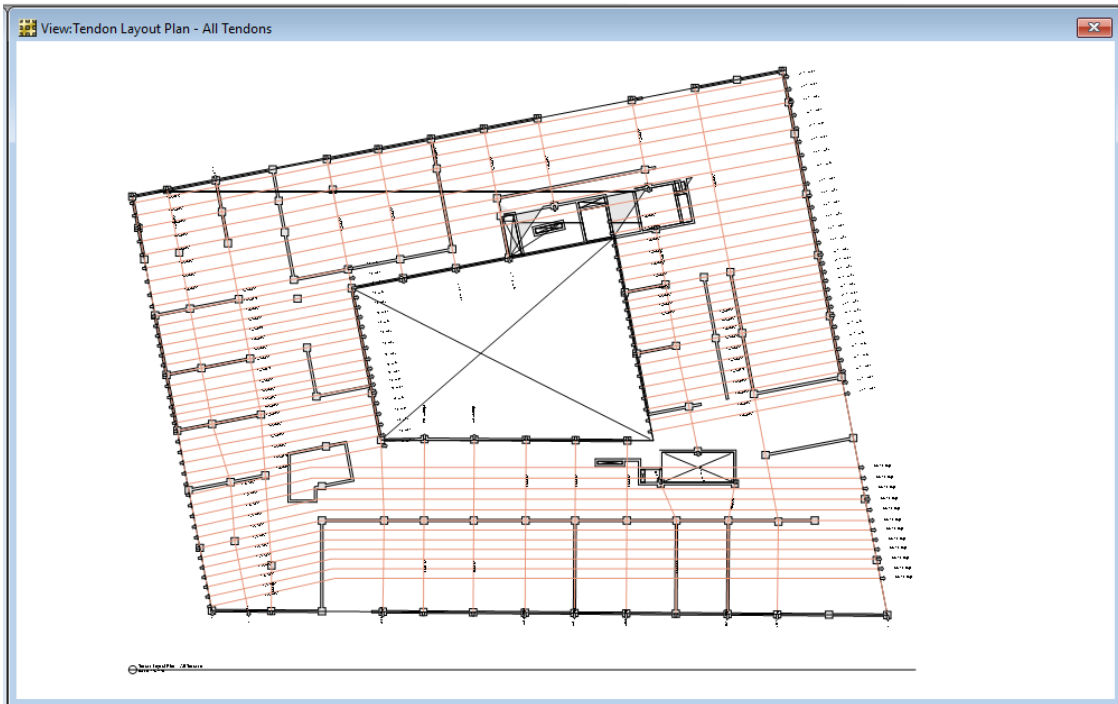
Anexo #54: Detalle de la cantidad de tendones principales por la franja F-14 para N01+0.00.



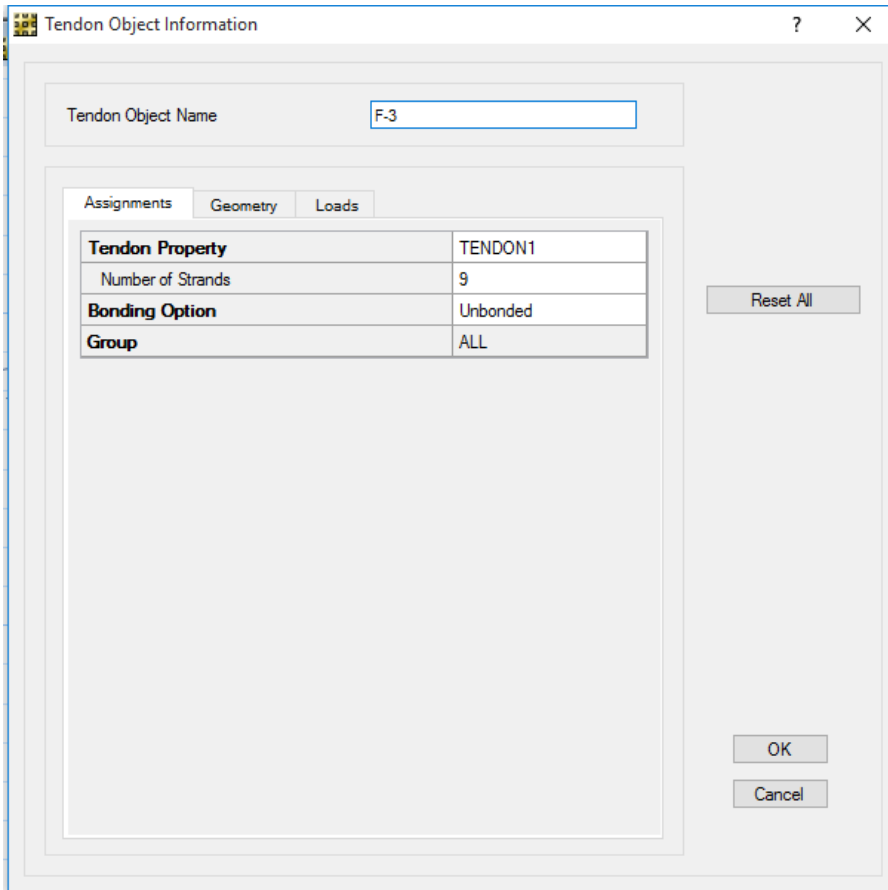
Anexo #55: Detalle de los tendones secundarios para N02+6.07 (CS-1).



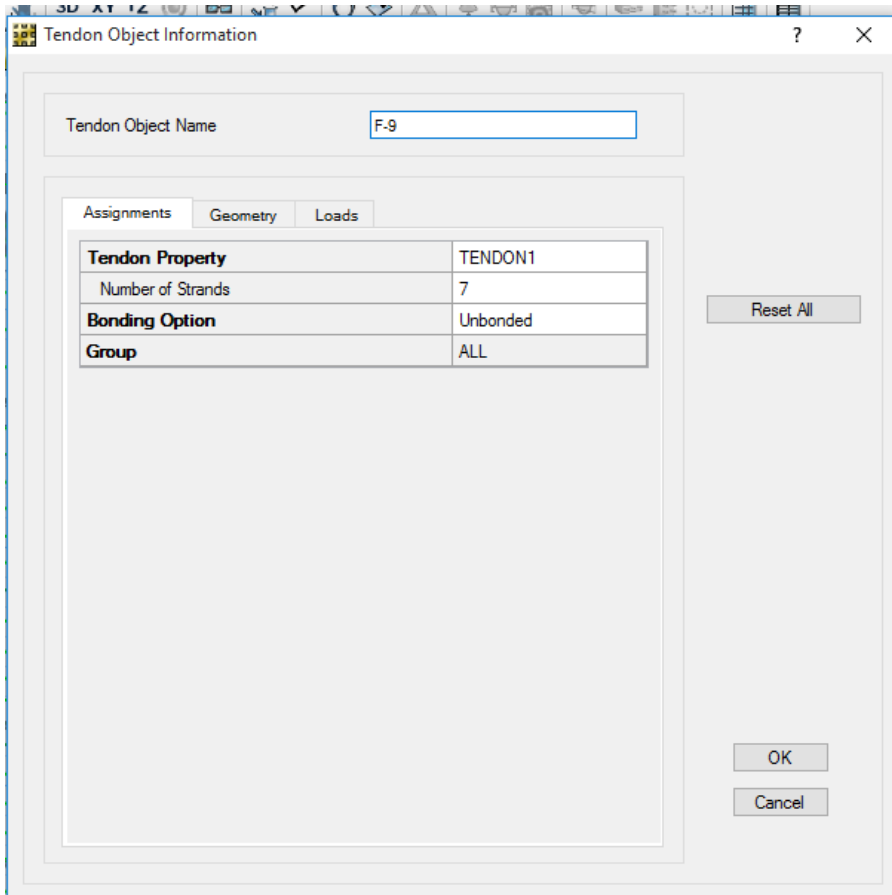
Anexo #56: Plano de distribución de tendones para N02+6.07.



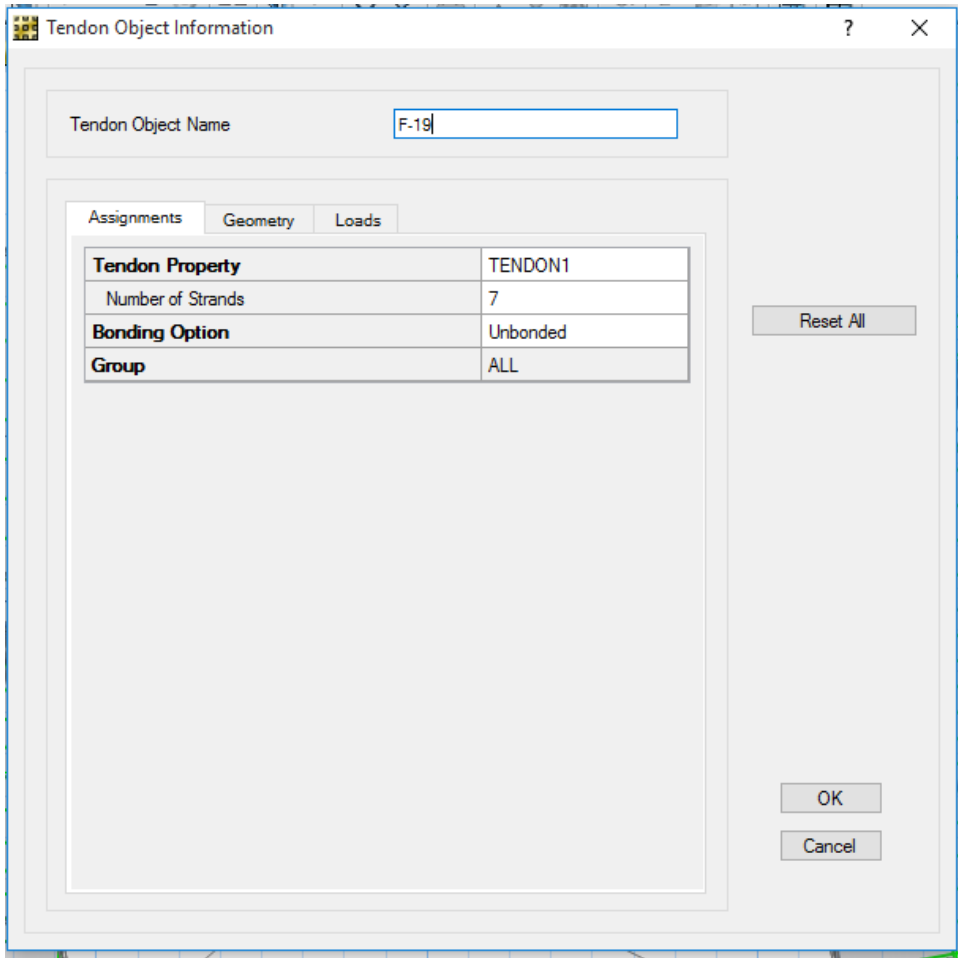
Anexo #57: Detalle de la cantidad de tendones principales por la franja F-3 para N02+6.07.



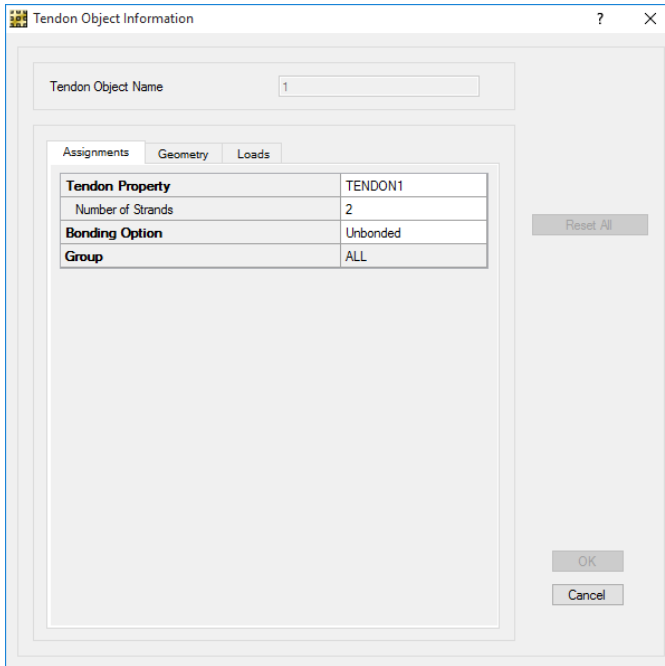
Anexo #58: Detalle de la cantidad de tendones principales por la franja F-9 para N02+6.07.



Anexo #59: Detalle de la cantidad de tendones principales por la franja F-19 para N02+6.07.



Anexo #60: Detalle de los tendones secundarios para N02+6.07 (CS-1).



Anexo #61: Presentación del documento de reporte.

