

ANALISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE CONCRETO POSTENSADO

María Angélica Sánchez Rueda

SUPERVISOR DE PRACTICA UPB

Esp. Robinson Mantilla

SUPERVISOR DE PRACTICA PRETCON S.A.S

Ing. Diego Felipe Serrano

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

2014

ANALISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE CONCRETO POSTENSADO

María Angélica Sánchez Rueda

Proyecto de práctica para optar por el título de Ingeniería Civil

SUPERVISOR DE PRACTICA UPB

Esp. Robinson Mantilla

SUPERVISOR DE PRACTICA PRETCO S.A.S

Ing. Diego Felipe Serrano

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del Director

Firma del Supervisor

Firma del Supervisor

Floridablanca, Marzo de 2014.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCION..... | 10 |
| 1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA | 12 |
| 1.1 Organigrama de la empresa | 12 |
| 2. OBJETIVOS..... | 13 |
| 2.1 Objetivo General..... | 13 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 13 |
| 3. MARCO DE REFERENCIA..... | 14 |
| 3.1 Historia del concreto postensado | 14 |
| 3.2 Métodos de pretensado | 20 |
| 3.3 Diseño | 22 |
| 3.3.1 Sistemas de gravedad..... | 23 |
| 3.3.2 Reglas de diseño empíricas | 25 |
| 3.3.2.1 Consideraciones generales..... | 26 |
| 3.3.2.2 Sistemas de postensado: Práctica de América del Norte | 26 |
| 3.3.2.3 Consideraciones de análisis..... | 27 |
| 3.3.2.4 consideraciones de diseño..... | 28 |
| 3.3.2.5 Precompresión promedia | 28 |
| 3.3.2.6 Porcentaje de balance de carga..... | 29 |
| 3.3.2.7 Perfil del tendón | 30 |
| 3.3.2.8 Fuerza del tendón | 32 |
| 3.4 Detalles típicos del postensado | 33 |
| 4. PLAN DE TRABAJO PROPUESTO | 36 |

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 4.1 | Actividades a desarrollar:..... | 36 |
| 4.2 | Desarrollo de actividades:..... | 37 |
| 5. | RESULTADOS..... | 49 |
| 6. | APORTE AL CONOCIMIENTO | 71 |
| 7. | CONCLUSIONES | 72 |
| 8. | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 74 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. Deflexión máxima admisible calculada..... | 23 |
| TABLA 2. Requisitos de diseño para funcionamiento..... | 25 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. Concreto presforzado | 20 |
| FIGURA 2. Concreto postensado..... | 21 |
| FIGURA 3. Cargas equivalentes del cable | 29 |
| FIGURA 4. Opciones principales de distribuir el cable. | 30 |
| FIGURA 5. Puntos de salida de tendón uniforme..... | 33 |
| FIGURA 6. Puntos de salida de tendón banda..... | 34 |
| FIGURA 7. Junta de construcción con punto de tensionamiento intermedio | 35 |
| FIGURA 8. Colocación de tendones adicionales..... | 35 |
| FIGURA 9. Planta arquitectura..... | 37 |
| FIGURA 10. Estructura tridimensional en adapt builder | 38 |
| FIGURA 11. Discretización de la losa | 39 |
| FIGURA 12. Líneas de apoyo | 40 |
| FIGURA 13. Tendones bandas | 41 |
| FIGURA 14. Tendones distribuidos | 42 |
| FIGURA 15. Perfil en tendon bandas | 43 |
| FIGURA 16. Perfil en tendon distribuido | 44 |
| FIGURA 17. Cargas distribuidas | 45 |
| FIGURA 18. Secciones de diseño (strips)..... | 45 |
| FIGURA 19. Deflexión bajo cargas de servicio total..... | 47 |
| FIGURA 20. Deflexión bajo carga última..... | 48 |

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANALISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE CONCRETO
POSTENSADO

AUTOR: MARIA ANGELICA SANCHEZ RUEDA

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR: ROBINSON MANTILLA

RESUMEN

Práctica realizada en PRETCON S.A.S en Bucaramanga, Colombia. Empresa con una vasta presencia en todo el territorio colombiano, la cual brinda el servicio de diseño postensado, asistencia en la elección de los esquemas estructurales, presupuesto y detallado tanto del acero postensado como del acero adherido. Esta experiencia tuvo una duración de seis (6) meses, durante los cuales el estudiante se desempeñó como auxiliar de ingeniería y de diseño estructural. Como sus principales responsabilidades se encontraba el modelamiento de losas elevadas en el software ADAPT-Builder y el análisis de los resultados obtenidos.

Otro de los componentes importantes de esta práctica fue el trabajo en equipo que se realizó con los encargados de las partes de un proyecto, como lo son los dueños, el arquitecto y el encargado del diseño sísmico, con el fin de desarrollar y concluir el proyecto en cuestión, con una solución económica y viable.

Palabras claves: Diseño postensado, esquemas estructurales, detallado del acero postensado.

ABSTRACT OF THE THESIS PROJECT

TITTLE: **STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN OF PRE-STRESSED CONCRETE**

AUTHOR: **MARIA ANGELICA SANCHEZ RUEDA**

FACULTY: **FACULTY OF CIVIL ENGINEERING**

DIRECTOR: **ROBINSON MANTILLA**

ABSTRACT

Internship made in PRETCON S.A.S in Bucaramanga, Colombia. This company has presence in all colombian territory, and offers services of posttensioning design, assistance in the selection of structural schemes, budget and detailed steel post-tensioned as steel reinforced. This experience lasted 6 months, during this time, the student worked as an auxiliary of engineer and structural design. The Main responsibilities were the modeling of post tensioned slabs in the Adapt-builder software and the analysis of the results previously obtained.

Another important component worth mentioning is the team work with the managers of the parts in a project, as they are the owners, the architects and the seismic designer, this in order to develop and conclude the project assigned, with a viable an affordable solution.

Key words: Posttensioning design, structural schemes, detailed of post-tensioned.

INTRODUCCION

A diferencia del concreto reforzado, donde el acero se coloca y se adhiere al concreto el cual se fisura antes de que la resistencia del refuerzo pasivo se desarrolle; en el concreto presforzado el acero adherido o no adherido se tensiona previamente hasta que alcanza un valor muy cercano a su resistencia máxima, logrando así contrarrestar o reducir los esfuerzos de tensión desarrollados bajo las acciones de servicio.

El concreto presforzado es una manera especial de combinar aceros y concretos de muy alta resistencia. El acero, ya sea en cables o barras, una vez dentro del concreto, el acero se tensiona, logrando un estado de esfuerzos de compresión que busca equilibrar las cargas sin mayoración. El presfuerzo ayuda a reducir de manera significativa las grietas y deflexiones causadas por cargas normales, permitiendo utilizar materiales de alta resistencia.

Un método de presforzado es el concreto postensado, el cual a diferencia del concreto pretensado (donde se tensionan los cables antes del vaciado o fundida del concreto), en el postensado como su nombre lo indica, se tensionan los cables una vez el concreto haya adquirido su resistencia característica ($75\% f'_c = 3000$ psi mínimo). En semejanza con el concreto pretensado, el postensado tiene la ventaja de que comprime el concreto antes de su puesta en servicio, haciendo que las tracciones que aparecen al flectar la pieza se conviertan en una pérdida de compresión previa, evitando así que el concreto trabaje a tracción, esfuerzo para el cual no tiene un buen comportamiento.

Con este último método (postensado), se diseñan losas de entresijos de varios proyectos, algunos de los cuales se mencionaran en este libro; losas armadas en una o dos direcciones cumpliendo las normas y códigos tanto nacionales como

internacionales existentes, entre estos el (ACI 318) y las normas colombianas (NSR-10, NSR 98).

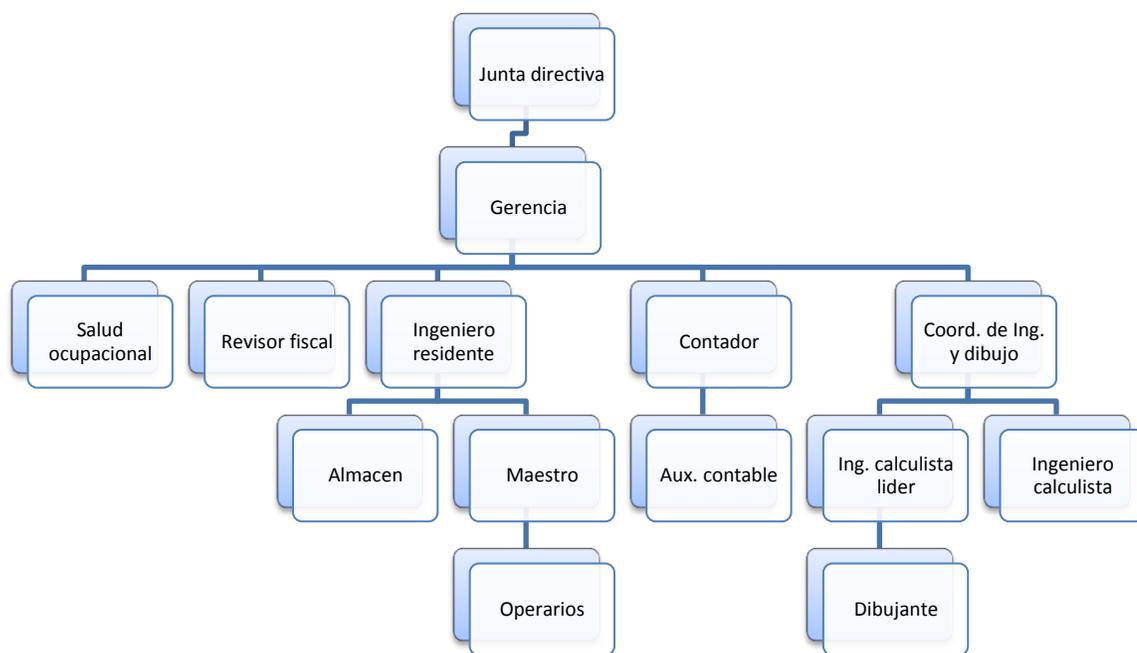
1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA

Pretcon S.A.S fue fundada en el año 2010 por el Ingeniero Carlos Alberto López, rápidamente ha pasado a convertirse en la principal compañía de diseño y colocación de cable postensado en el país.

Pretcon ofrece paquetes del sistema postensado, los cuales incluyen:

Planos de instalación, producción y transporte de los cables postensados, anclajes y material necesario para la instalación, equipo de tensionado, asistencia técnica y soporte directo en obra¹.

1.1 Organigrama de la empresa



¹ Pretcon S.A.S. Disponible en web http://www.pretcon.com/index.php?option=com_content&view=article&id=3:la-empresa&catid=2:empresa&Itemid=11

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General.

- Analizar y diseñar losas de concreto postensado en una y dos direcciones.

2.2 Objetivos Específicos.

- Analizar mediante un modelamiento de elementos finitos el comportamiento de losas postensadas.
- Estudiar la manera en que actúa la losa en condiciones iniciales, al momento de aplicar cargas de servicio y en estado último.
- Determinar la precompresión y el balance necesario de los cables, para el óptimo uso de la losa con tendones no adheridos.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Historia del concreto postensado

El concreto postensado fue utilizado por primera vez en el puente de Walnut Lane en Filadelfia en 1949. El puente tenía vigas postensadas prefabricadas con el sistema europeo Magnel. Las primeras construcciones de edificios postensados fueron en EE.UU. a mediados de 1950 utilizando el método de construcción de losas elevadas².

Originalmente, las losas de concreto se refuerzan con acero en las losas elevadas de los edificios. Las losas eran prefabricadas en el suelo en una pila y luego eran elevadas por separado mediante gatos hidráulicos que estaban ubicados en la parte superior de las columnas. Si bien este fue un proceso inherentemente eficiente, ya que existían dos problemas; en primer lugar, las placas tendían a pegarse ya que eran levantadas juntas, y el peso propio hacía que se agrietaran. En segundo lugar, eran comunes luces de 28 a 30 pies y las losas eran de 10-12 mm de espesor, la deflexión era un problema grave. Deflexiones en el centro de la luz y agrietamientos antes de tiempo eran comunes en la construcción. Una vez que las empresas de elevación comenzaron a postensar sus losas, los problemas de deflexión prácticamente desaparecieron.

El método de construcción de elevación de losas, en pocos días pasó a ser conocido como "Button-headed tendon system". Un tendón tenía 1/4 de pulgada de diámetro, con alrededor de una fuerza efectiva de 7 kip, generalmente eran seis o siete alambres por tendón. Para asegurar los cables en cada extremo, se pasan a través de agujeros redondos entre una placa de soporte de acero rectangular y una arandela circular, por lo general roscado externamente³. Luego

² POST-TENSIONING INSTITUTE. Fifth edition.

³ REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

se forma un botón en cada extremo del alambre por impacto dinámico (básicamente martillando el final del acero del tendón). Los botones demasiado grandes para pasar a través de los agujeros, eran protegidos, y estaban envueltos en papel encerado para evitar la adherencia con el hormigón. Todo esto se hace en una bodega o recinto cerrado, y luego se traslada al puesto de trabajo. Los grupos de tendones se instalan con sus respectivos perfiles, y el hormigón se coloca. Cuando el hormigón alcanza una resistencia mínima, los tendones se tensionan a la tensión y elongación requerida con un gato hidráulico. A continuación, se inserta una cuña de acero para atascar el cable y de este modo medir el alargamiento entre la placa de soporte y la arandela.

En realidad hubo dos grandes problemas con el sistema “button-headed tendons”. En primer lugar, era el problema con la longitud exacta. Cualquier desviación entre la longitud del tendón y la longitud los bordes de losa, requiere ya sea un nuevo tendón o mover los bordes de losa antes de verter el hormigón. En segundo lugar, porque las cuñas y la arandela terminan en los bordes exteriores de la losa construida, y tienen que ser cubiertas con una segunda capa de hormigón vertido. Frente a esto se empotró el anclaje en el interior del borde de la losa terminada en una "caja de tensionamiento" que fue llenada con hormigón después, o por colada continua en el borde de la losa para cubrir los anclajes.

Además de resolver los problemas de deflexión, el postensado ayuda a reducir el espesor de la losa. Ahora se pueden utilizar secciones de 8 o 9 pulgadas en lugar de 12 pulgadas de grosor necesarios para losas no pretensadas. Las losas delgadas significan un ahorro en material, tiempo y mano de obra para el contratista.

A principios de 1960, “the button-headed tendon system” fue sustituido por tendones utilizando siete alambres pretensados y cuñas. El sistema de cadena de siete alambres fue mucho más económico y eliminó todos los inconvenientes

principales de construcción. Después de 5 o 6 años de feroz competición con el antiguo método, el sistema de cadena de siete alambres, ganó la batalla del mercado. A finales de 1960, “the button-headed tendón” se había extinguido, y prácticamente todos los cables postensionados para la construcción de edificios eran hebras de tendones.

Antes de 1963, las técnicas de análisis para los elementos indeterminados pretensados eran tediosas, altamente matemáticas, y no intuitivos. T.Y. Lin ha resuelto este problema⁴. En 1963, en el ACI Journal, Lin publicó un trabajo revolucionario en el análisis de los elementos indeterminados de hormigón pretensado usando un método que él llama "Balance de carga". Demostró cómo durante el diseño los tendones podrían ser considerados como las cargas que ejercen sobre el elemento de hormigón. Una vez hecho esto, la estructura puede ser diseñada como cualquier otra estructura no pretensada. Utilizando el balance de carga, estructuras postensionadas podrían analizarse completamente y con precisión utilizando cualquier técnica de ingeniería estructural estándar, tal como una distribución de momentos. La introducción del método de balance de carga hizo que el diseño de los elementos indeterminados de hormigón postensado fuera tan sencillo como el diseño de los elementos no pretensados.

La construcción con concreto postensado creció exponencialmente como resultado de esta nueva herramienta simplificada para el diseño. El método de ingeniería estructural simplificado para el diseño de edificios de concreto postensado fue la razón principal para el crecimiento explosivo de este en los años 1960 y 1970. Es interesante notar que el ACI 318-71 prácticamente ignoró el diseño de postensado, abordando principalmente algunos de los elementos de pretensados. El ACI 318-77 ha mejorado mucho, al reconocer la distribución de tendones de banda para losas de dos direcciones. Desde entonces ha habido un buen número de avances en los métodos de construcción particularmente en la

⁴ CALCULO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO PRESFORZADO.

construcción de losas en dos direcciones.

Dado que los tendones en dos direcciones perpendiculares están con un perfil curvo (alto en las columnas, bajo en el centro de la luz) y puesto que los tendones continúan desde un extremo de la losa al otro, estos tienen que ser tejidos como una cesta. Este era un procedimiento tedioso y de trabajo intensivo.

El sistema de colocación de armadura de cesta para los tendones fue reemplazado por la distribución del tendón en bandas. La distribución en bandas fue utilizada por primera vez a finales de 1960 Washington DC⁵: En este sistema, todos los tendones que van en una dirección se agrupan en una "banda" estrecha de 3-4 pies de ancho sobre las columnas, y los tendones en la dirección perpendicular están espaciados uniformemente. De esta manera, todos los tendones bandas se colocan primero, y todos los tendones uniformes se colocan después. Sólo hay dos números de secuencia.

Los ingenieros de diseño también se benefician de la distribución del tendón en bandas. En las losas de dos direcciones con las columnas distribuidas de forma irregular y compleja, hace que la visualización de las rutas de carga sea mucho más fácil, ayudando a asegurar que todas las cargas de la losa se transfieran a las columnas.

Hay dos problemas en la construcción de postensado que necesitan una consideración especial, las cuales son, retención de acortamiento y la corrosión del tendón. Cabe señalar que la mecánica de acortamiento en losa son diferentes en losas postensadas que en losas no preesforzadas. Los ingenieros tuvieron que aprender a diseñar losas postensadas con niveles de cortante no superior a los encontrados normalmente y aceptados en las losas de barras de refuerzo. Esto se logra en gran medida por medios de unión de detalles entre los miembros

⁵ REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

postensados, muros y columnas. La corrosión del tendón ha sido el mayor problema que enfrenta la industria. Cuando los primeros edificios postensados tenían cerca de 15 años de edad, los problemas de corrosión comenzaron a emerger. Se notó que algunas envolturas del tendón y recubrimientos no pudieron resistir adecuadamente la corrosión en los ambientes más agresivos, como en el que se aplica sales de deshielo a las superficies de la losa. Especificaciones desarrolladas del material del tendón por PTI, a partir de mediados de la década de 1970, han resuelto en gran medida los problemas de corrosión en las mejoras en el revestimiento, y en los ambientes más agresivos, encapsulación completa de los tendones⁶.

El sistema de postensado tiene un gran potencial en el fortalecimiento de los edificios existentes. El uso de postensado es una forma eficaz de aumentar la capacidad de carga de los edificios con toda clase de estructuras y materiales, incluso de madera. Edificios altos, por ejemplo de 20 o más pisos, donde históricamente la mayoría han estado enmarcados en acero estructural, el concreto ofrece grandes costes y beneficios de rendimiento. El hormigón postensado también ofrece importantes beneficios de rendimiento en edificios altos, en especial en las áreas de resistencia al fuego, la transmisión del sonido, y la rigidez de suelo. Postensionar las losas de los edificios altos de hormigón minimiza su peso, y combinada con el uso de concreto de alta resistencia, ha hecho de la construcción de edificios altos de hormigón más y más factible.

El pretensado aumenta el rango de luz o del vano de sistemas de piso convencionalmente reforzados en aproximadamente 30% a 40%. Esta es la razón principal para el aumento del uso de hormigón pretensado. Algunas de las otras razones son⁷:

⁶ Design of post-tensioning slabs. PTI

⁷ DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO, duodécima edición.

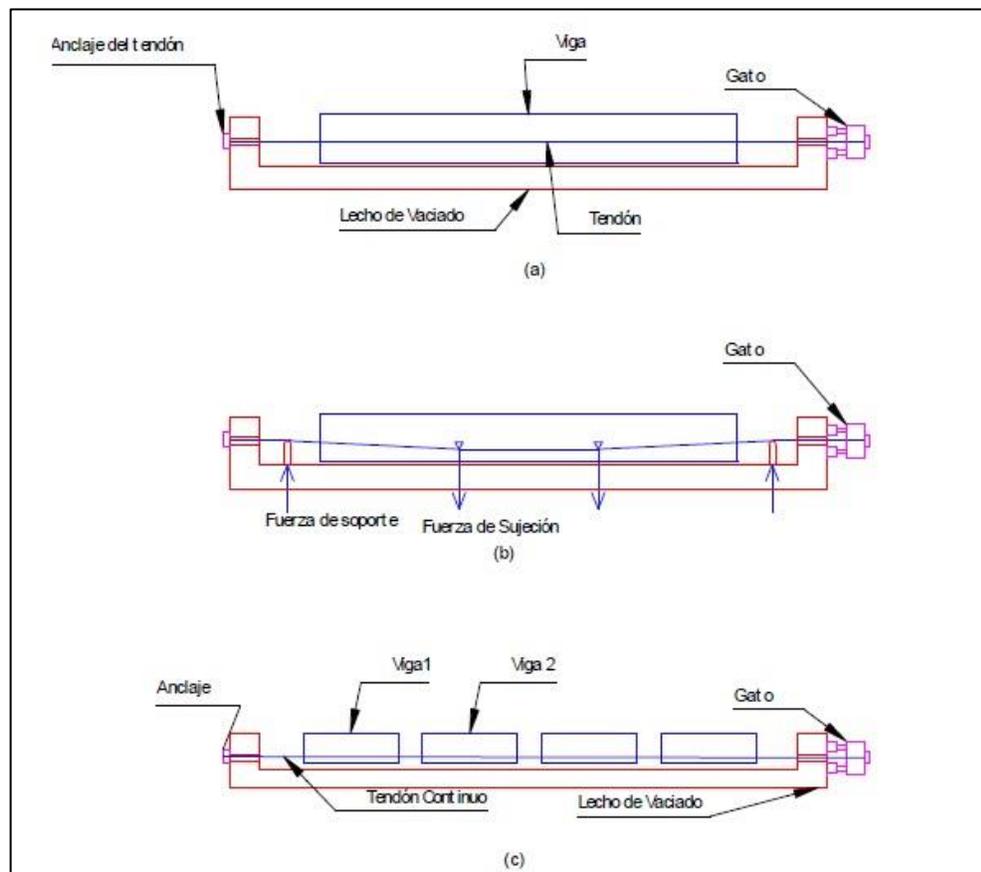
1. El hormigón pretensado generalmente no presenta fisuras y por lo tanto es más duradero.
2. El pretensado aplica fuerzas a los elementos que se oponen a las cargas de servicio. En consecuencia, hay menos fuerza neta para originar deflexiones.
3. El hormigón pretensado es elástico. Las fisuras debido a la sobrecarga se reparan rápidamente y las deformaciones se recuperan pronto después de la eliminación de la sobrecarga.
4. Resistencia a la fatiga (aunque no es una consideración de diseño en el diseño de edificios) es considerablemente más alta que la del concreto convencional reforzado porque los tendones están sometidos a pequeñas variaciones en la tensión debido a las cargas repetidas.
5. Los elementos de hormigón pretensado son generalmente libre de grietas, y son por lo tanto más rígidos que los elementos de hormigón convencional con las mismas dimensiones.
6. El diseño del postensado es más controlable que el diseño de acero reforzado, porque una fuerza predeterminada se introduce en el sistema, la magnitud, ubicación, y la técnica de la introducción de una fuerza adicional de este tipo se dejan para el diseñador, que puede adaptar el diseño de acuerdo a los requerimientos del proyecto.

Hay algunas desventajas en la utilización del hormigón pretensado, tales como incendios, la resistencia a la rotura de los sistemas no adheridos, y la dificultad en la toma de las penetraciones, debido al temor de cortar los tendones. Una de las principales motivaciones para el uso del hormigón pretensado proviene de la reducción de la profundidad estructural, lo que se traduce en una menor altura de piso a piso y una reducción de la superficie de pared. En los sistemas de pretensado, el ahorro en el refuerzo de acero que resulta del pretensado son casi compensados por el mayor costo unitario del cable. El ahorro de costes procede de la reducción en la cantidad de hormigón en combinación con ahorros no estructurales indirectos resultantes de la reducción de la altura-piso a piso.

3.2 Métodos de pretensado

Los métodos actuales de pretensado pueden ser estudiados en dos grupos, pretensado y postensado. En el pretensado, los tendones se tensionan y se anclan contra los anclajes exteriores. Luego el hormigón se coloca alrededor de los tendones. Después de que el hormigón se endurece, los anclajes son liberados, generando fuerzas de compresión en el hormigón, debido a que los tendones tienden volver a su longitud original.

Figura 1. Concreto presforzado

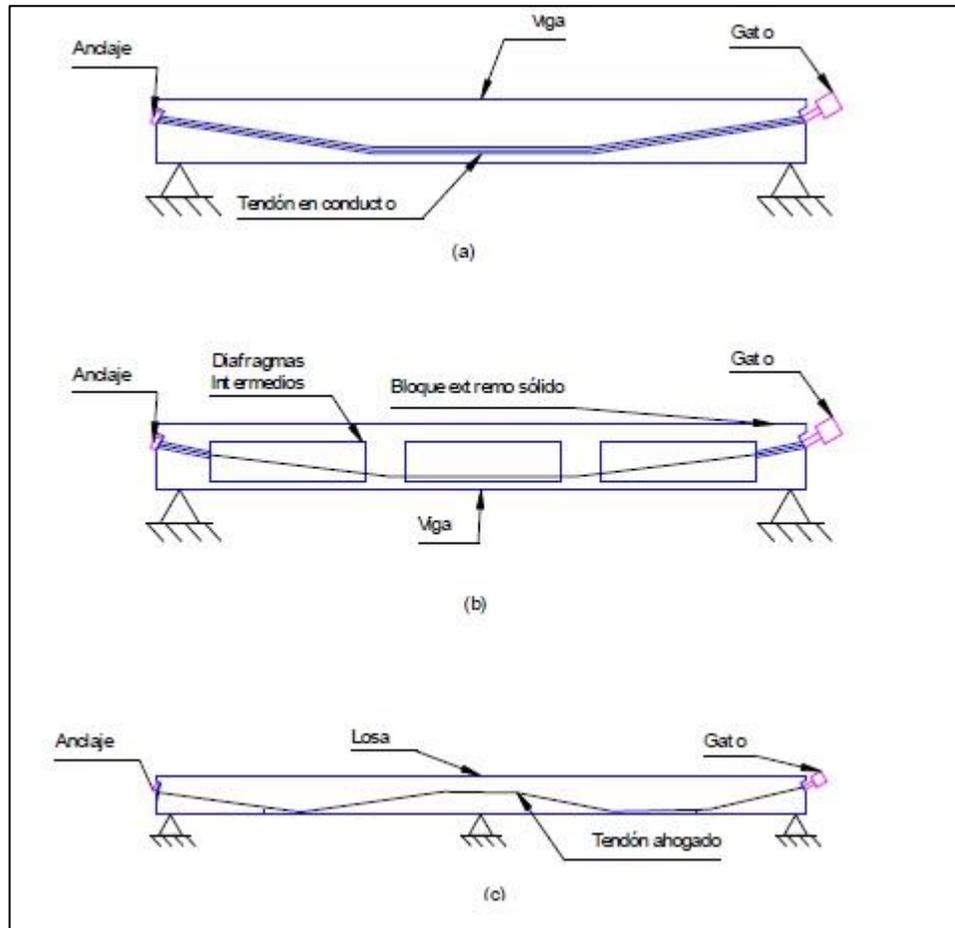


Fuente: Tesis “DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO PRESFORZADO”.

En el postensado, los tendones se tensionan y se anclan contra el concreto después de que este se haya endurecido. Los tendones son tensionados utilizando gatos hidráulicos después de que el hormigón ha alcanzado un mínimo

de aproximadamente el 75% de la resistencia de diseño. Las elongaciones se miden y se comparan con los valores calculados, si es satisfactorio, los tendones que salen de la losa se cortan. El encofrado es retirado después del tensionamiento. No obstante, el piso está de listo para soportar las cargas de construcción de los pisos de arriba.

Figura 2. Concreto postensado



Fuente: Tesis "DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO PRESFORZADO".

El postensado se lleva a cabo utilizando hilos de alta resistencia, alambres, barras o cables como tendones. Los cables son adheridos o no adheridos dependiendo de los requisitos del proyecto. En el sistema adherido, los tendones se instalan en conductos que se llenan de una lechada de mortero después de tensionar los

tendones. En la construcción, el sistema no adherido es la opción preferida, ya que no se requiere de la lechada. Los sistemas de postensado en edificios consisten en losas, viguetas y vigas, con un gran número de tendones. La lechada para cada uno de los tendones sería una operación que consume tiempo y costos. Por lo tanto, el sistema no adherido es más popular.

3.3 Diseño

Al momento de diseñar hay que tener en cuenta los siguientes pasos⁸:

1. Determinación del tamaño del elemento de concreto.
2. Establecer el perfil del tendón o tendones.
3. Calcular la fuerza de pretensado.
4. Verificación de la sección de flexión máxima y capacidad de cortante.
5. Verificación de las características de servicio, principalmente en términos de tensiones y deformaciones a largo plazo.

Las deformaciones de los elementos postensados tienden a ser pequeñas ya que bajo las cargas de servicio son generalmente “uncracked”, es decir, sin fisuras; y son mucho más rígidos que los elementos no presforzados con la misma sección transversal. Además, la fuerza de postensado induce deflexiones en una dirección opuesta a las producidas por las cargas externas. Por lo tanto, la deflexión final es una función del perfil del tendón y la magnitud de la tensión. Reconociendo este hecho, el código ACI no especifica los requisitos mínimos de profundidad para los elementos postensados. Sin embargo, las proporciones sugeridas pueden ser utilizadas como una guía para establecer la profundidad de los elementos continuos de flexión.

⁸ Design of post-tensioning slabs. PT1

Tabla 1. Deflexión máxima admisible calculada

| Tipo de elemento | Deflexión considerada | Límite de deflexión |
|--|---|---------------------|
| Cubiertas planas que no soporten ni estén ligadas a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes. | Deflexión inmediata debida a la carga viva, L | $\ell/180$ † |
| Entrepisos que no soporten ni estén ligados a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes. | Deflexión inmediata debida a la carga viva, L | $\ell/360$ |
| Sistema de entrepiso o cubierta que soporte o esté ligado a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes. | La parte de la deflexión total que ocurre después de la unión de los elementos no estructurales (la suma de la deflexión a largo plazo debida a todas las cargas permanentes, y la deflexión inmediata debida a cualquier carga viva adicional) † | $\ell/480$ ‡ |
| Sistema de entrepiso o cubierta que soporte o esté ligado a elementos no estructurales no susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes. | | $\ell/240$ § |

* Este límite no tiene por objeto constituirse en un resguardo contra el empozamiento de aguas. Este último se debe verificar mediante cálculos de deflexiones adecuados, incluyendo las deflexiones debidas al agua estancada, y considerando los efectos a largo plazo de todas las cargas permanentes, la contraflecha, las tolerancias de construcción y la confiabilidad en las medidas tomadas para el drenaje.

† Las deflexiones a largo plazo deben determinarse de acuerdo con C.9.5.2.5 ó C.9.5.4.3, pero se pueden reducir en la cantidad de deflexión calculada que ocurra antes de unir los elementos no estructurales. Esta cantidad se determina basándose en datos de ingeniería aceptables correspondiente a las características tiempo-deflexión de elementos similares a los que se están considerando.

‡ Este límite se puede exceder si se toman medidas adecuadas para prevenir daños en elementos apoyados o unidos.

§ Pero no mayor que la tolerancia establecida para los elementos no estructurales. Este límite se puede exceder si se proporciona una contraflecha de modo que la deflexión total menos la contraflecha no exceda dicho límite.

Fuente: NORMA SISMO RESISTENTE COLOMBIANA. Titulo C

3.3.1 Sistemas de gravedad

El perfil del tendón se establece basándose en el tipo y la distribución de la carga y teniendo en cuenta el recubrimiento mínimo requerido para la resistencia al fuego y para la protección contra la corrosión. El espaciamiento entre los tendones debe ser suficiente para permitir la fácil colocación del hormigón. Para obtener la máxima economía, el tendón debe estar situado excéntrico con respecto al centro de gravedad de la sección de concreto para producir el máximo efecto de balance frente a las cargas externas. Para los elementos sometidos a cargas uniformemente distribuidas, un perfil parabólico simple es ideal, pero en estructuras continuas los segmentos parabólicos formando una curva invertida suave en el apoyo son más prácticos. El efecto es desplazar el punto de contra flexión lejos de los apoyos.

La fuerza en el tendón inmediatamente después de soltar el gato hidráulico es menor que la fuerza inicial, debido al deslizamiento de los anclajes, las pérdidas

por fricción a lo largo del perfil del tendón, y acortamiento elástico del concreto. La fuerza se reduce aún más en un período de meses o incluso años, debido al cambio en la longitud del elemento de concreto resultante de la contracción y fluencia del hormigón y la relajación del acero de alta tensión. La tensión efectiva es la fuerza en el tendón después de que todas las pérdidas se han producido⁹.

El postensado puede ser considerado como un método de equilibrio de una cierta porción de las cargas aplicadas. Este método, desarrollado por Ty Lin, es aplicable a los sistemas indeterminados tan fácilmente como a las estructuras estáticamente determinadas. Además, el procedimiento da un método simple de cálculo de desviaciones considerando sólo la parte de la carga aplicada no equilibrada por la tensión¹⁰. Si la tensión efectiva equilibra completamente la carga aplicada, el elemento postensado no sufrirá ninguna deflexión y se mantendrá en posición horizontal, independientemente del módulo de rigidez o la fluencia del hormigón.

Una pregunta que suele surgir en el diseño de postensado es cuanto se debe balancear la carga aplicada. La respuesta, sin embargo, no es simple. Balancear toda la carga muerta muchas veces requiere de mucho cable, lo que lleva al diseño antieconómico. Por otra parte, hay situaciones en las que la carga viva es significativamente más pesada que la carga muerta, lo que es más económico para pretensar no sólo para el total de las cargas muertas, sino también para una parte significativa de la carga viva. Sin embargo, en el diseño de los sistemas típicos de losa, la fuerza de postensado se selecciona normalmente para equilibrar alrededor del 70% -90% de la carga muerta y, de vez en cuando, una pequeña parte de la carga viva. Esto conduce a una condición ideal con la estructura que tiene poca o ninguna deformación bajo cargas muertas.

Los límites máximos de esfuerzos a tensión y compresión permitidos en el concreto no son en sí para asegurar que los elementos postensados tienen un

⁹ NORMA SISMO RESISTENTE COLOMBIANA. Título C. 18.6

¹⁰ Cálculo de las estructuras de concreto presforzado. Ty Lin.

factor de seguridad adecuado contra la flexión. Por lo tanto, su resistencia a la flexión nominal se calcula con un procedimiento similar a la de una viga de hormigón armado.

Tabla 2. Requisitos de diseño para funcionamiento

| Comportamiento supuesto | Preesforzado | | | No preesforzado |
|---|-------------------------|--|--------------------------------------|--|
| | Clase U | Clase T | Clase C | |
| Propiedades de la sección para calcular esfuerzos bajo cargas de servicio | No fisurado | Transición entre no fisurado y fisurado | Fisurado | Fisurado |
| Esfuerzo admisible en transferencia | Sección bruta C.18.3.4 | Sección bruta C.18.3.4 | Sección fisurada C.18.3.4 | Sin requisitos |
| Esfuerzo de compresión admisible basado en sección no fisurada | C.18.4.1 | C.18.4.1 | C.18.4.1 | Sin requisitos |
| Esfuerzo a tracción, bajo cargas de servicio C.18.3.3 | C.18.4.2 | C.18.4.2 | Sin requisitos | Sin requisitos |
| Base para el cálculo de las deflexiones | $\leq 0.62\sqrt{f'_c}$ | $0.62\sqrt{f'_c} < f_t \leq \sqrt{f'_c}$ | Sin requisitos | Sin requisitos |
| Control de agrietamiento | C.9.5.4.1 Sección bruta | C.9.5.4.2 Sección fisurada, bilineal | C.9.5.4.2 Sección fisurada, bilineal | C.9.5.2, C.9.5.3 Momento efectivo de inercia |
| Cálculo de Δf_{ps} ó f_s para el control de fisuración | Sin requisitos | Sin requisitos | C.10.6.4 modificado por C.18.4.4.1 | C.10.6.4 |
| Refuerzo de superficie | --- | --- | Análisis de sección fisurada | $M/(A_s x \text{ brazo de palanca})$ ó $0.6f_y$ |
| | Sin requisitos | Sin requisitos | C.10.6.7 | C.10.6.7 |

Fuente: NORMA SISMO RESISTENTE COLOMBIANA. Título C.18.4

El refuerzo a cortante en los elementos postensados está diseñado de una manera casi idéntica a la de los elementos de hormigón no pretensados, con la debida consideración de las tensiones longitudinales inducidas por los tendones tensionados. Otra característica única para el diseño de elementos postensados son los altos esfuerzos en la zona de los anclajes. La fuerza se transfiere a los anclajes, generando grandes esfuerzos en esa zona, la cual requiere un refuerzo adicional.

3.3.2 Reglas de diseño empíricas

Algunas reglas como vano-profundidad y el valor medio de las tensiones de postensado son útiles en el diseño conceptual. Vano-profundidad para losas suele funcionar entre L/40 y L/50, mientras que para las viguetas es entre L/25 y L/35. Las vigas pueden ser mucho menos profundas que las viguetas, con una profundidad en el rango de L/20 y L/30. Vigas banda, definidas como aquellas con

una relación de ancho a profundidad de más de 4, ofrecen quizás menos profundidad sin necesidad de utilizar el hormigón como construcción de losa plana. Aunque una proporción de vano-profundidad aproximadamente igual a 35 es adecuada para las vigas banda para consideraciones de servicio y resistencia.

Como regla general, una compresión mínima de 125 a 150 psi (862 a 1034 kPa) es un rango práctico y económico para las losas. Para las vigas, el rango es de 250 a 300 psi (1724-2068 kPa). Los esfuerzos de compresión pueden ser hasta 500 psi (3447 kPa), estos son utilizados en sistemas de vigas banda. Incluso los esfuerzos más altos pueden ser necesarios para las vigas de transferencia¹¹.

Habitualmente, para una dimensión de losa, de carga, y para un método de construcción, menos material significa un diseño más económico. Existe un valor único para el área de diseño de acero, (A_s) en una sección simplemente reforzada; pero para una alternativa en postensado, el momento de diseño incluye efectos secundarios (fuerzas hiperestáticas), por lo tanto el momento de diseño es una función de la propia fuerza de postensado.

3.3.2.1 Consideraciones generales

Para una determinada geometría de los elementos, condiciones de los apoyos, y las cargas, el diseño de un elemento de postensado depende de tres parámetros que deben ser establecidos por el ingeniero de diseño:

1. Precompresión
2. Porcentaje de carga balanceada.
3. Perfil del tendón.

3.3.2.2 Sistemas de postensado: Práctica de América del Norte

En los Estados Unidos y Canadá, los edificios postensados y los parqueaderos suelen ser construidos con cables de siete hebras con un diámetro de (12,7 mm),

¹¹ REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

un cable no adherido (monofilamento - monostrand). Estos tendones, con su resistencia típica de 270 ksi (1860 MPa), también están engrasados y envainados. Una de las razones para el uso generalizado del tendón de 0,5 pulgadas de diámetro es que el ACI 318 tiene como requisito que la separación de los tendones no debe ser mayor de ocho veces el espesor de la losa. El uso de 0,5 pulgadas de diámetro, permite utilizar cables de 4 1/2 - 5 pulgadas (110-125 mm) para satisfacer tanto mínimo de precompresión media 125 psi (0.85 MPa) y los requisitos máximos de espaciado entre los tendones¹². Además, los tendones y los equipos de tensado son lo suficientemente ligeros para los trabajadores los cuales los pueden manejar de manera eficiente en el lugar. Tendones de mayor diámetro se utilizan principalmente en la construcción de puentes postensados. Aceros de mayor resistencia y tendones de diámetros más pequeños también son permitidos, pero no son de uso común en la nueva construcción.

3.3.2.3 Consideraciones de análisis

En ambos sistemas (una o dos direcciones), se debe especificar el modelo estructural incluyendo las secciones de diseño, independientemente de que análisis se utilice. Las losas apoyadas en columnas, generalmente califican como sistemas de dos direcciones; Las losas apoyadas en muro – viga, generalmente califican como sistemas de una sola dirección.

El tipo de apoyo de las conexiones también debe especificarse. En algunos casos, como las columnas de las esquinas de las losas planas, la asunción de la plena fijeza no cede un diseño satisfactorio. Estas conexiones pueden ser asumidas como conexiones articuladas, pero deben ser detalladas para permitir la rotación.

¹² Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08)

3.3.2.4 Consideraciones de diseño

Hay una gran diferencia entre el diseño de un elemento postensado y el diseño de un elemento de hormigón reforzado convencionalmente. Una vez que la geometría, la carga, las condiciones de apoyo, y las propiedades del material de un elemento simplemente reforzado se establecen, el área requerida de refuerzo, (AS), está dada por una fórmula bien definida. Por lo tanto, hay un diseño único para un problema dado. Mientras que para un elemento postensado, hay un número de diseños aceptables porque hay varios parámetros adicionales que deben ser determinados.

3.3.2.5 Precompresión promedia

El promedio de precompresión es la fuerza de postensado total dividido por el área de la sección transversal bruta normal a la fuerza. ACI 318 05/08 requiere un mínimo de 125 psi (0.85 MPa) de precompresión efectiva después de todas las pérdidas de pretensado. En general, 125 psi se debe utilizar para la precompresión media inicial. Para bóvedas y estructuras de estacionamiento, se usa 150-200 psi (1,0-1,4 MPa) si la formación de grietas es una preocupación. Sin embargo, un aumento en la precompresión no garantiza eliminar por completo la formación de grietas. Para evitar fugas, el aumento de postensado debe complementarse con otras medidas.

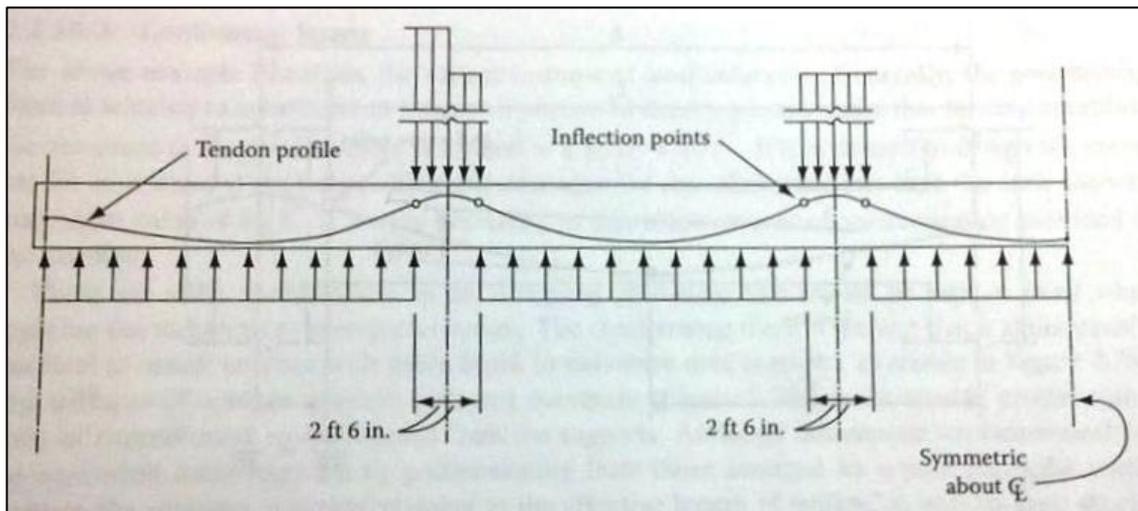
Por razones de economía, la máxima compresión previa debe limitarse; 275 psi (2,0 MPa) para losas y 350 psi (2,5 MPa) para las vigas. Sin embargo, los valores mucho más altos que éstos son típicamente necesarios para el diseño de vigas de transferencia. No es inusual tener aproximadamente 800 psi de pretensado en grandes vigas de transferencia¹³.

¹³ Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08)

3.3.2.6 Porcentaje de balance de carga

El postensado típicamente es como un sistema de cargas que contrarresta el peso propio de la estructura. Esto se expresa como la relación de la carga muerta que es equilibrada. Para las losas, se acostumbra a equilibrar entre 60% y 80% de la carga muerta. Para las vigas, por lo general esto se aumentó a entre 80% y 110%¹⁴. Una de las razones de que la carga equilibrada sea superior para las vigas es que la deflexión es más crítica para el desempeño del servicio de un sistema de piso. Para determinar la fuerza de postensado requerida, se comienza con el lapso crítico (generalmente, esto es la luz más larga). Utilizando el máximo perfil del tendón permisible en esta luz como una limitación de criterio, y el mínimo de precompresión como el otro, entonces determinamos una fuerza de postensado para equilibrar el porcentaje deseado de la carga muerta.

Figura 3. Cargas equivalentes del cable



Fuente: REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

¹⁴ REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

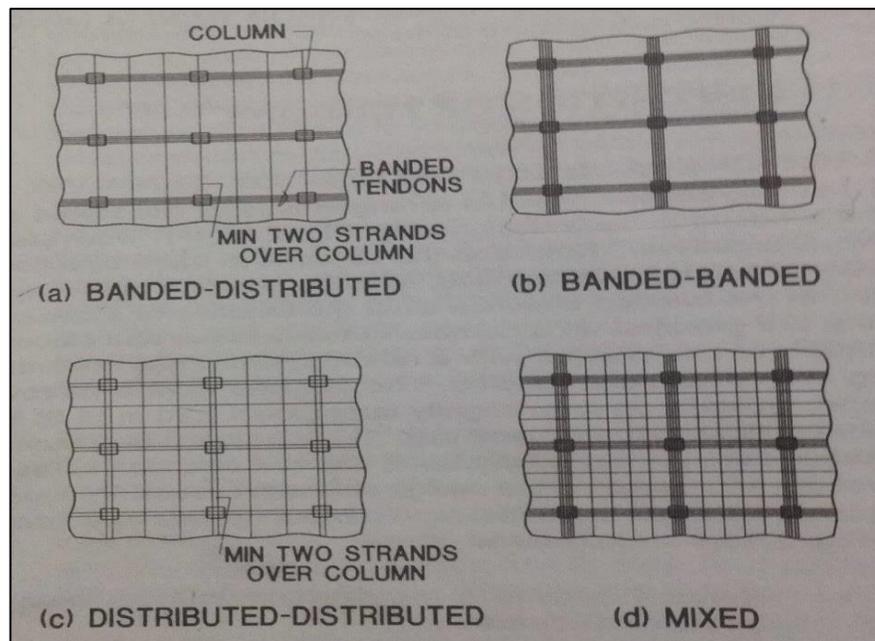
3.3.2.7 Perfil del tendón

Hay varios arreglos posibles para el diseño de los tendones en cada sección de diseño. En cada dirección estos pueden estar dispuestos en bandas, distribuidos, o una disposición mixta. En la dirección de bandas todos los tendones de una sección de diseño se agrupan en un número de paquetes y se colocan en paralelo entre sí. Los tendones forman una banda estrecha, típica o ligeramente mayor que 1,2 metros de ancho, siguiendo la línea de soporte. Los tendones en la dirección distribuida se colocan en paquetes de uno a cuatro, y se distribuyen por toda la sección de diseño de una forma uniforme¹⁵.

Las cuatro opciones son:

- Bandas en una dirección, y distribuido en la otra dirección.
- Bandas en ambas direcciones.
- Distribuido en las dos direcciones.
- Mixto, bandas y distribuido en ambas direcciones.

Figura 4. Opciones principales de distribuir el cable.



Fuente: Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors.

¹⁵ Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors. PTI

Todas las cuatro opciones indicadas se consideran para proporcionar capacidad de la misma fuerza. La elección del diseño se rige generalmente por la constructibilidad.

Es importante tener en cuenta que la opción de bandas en ambas direcciones no está permitida por el Código ACI [ACI - 318 , 1995], y la disposición preferida es la de banda en una dirección y distribuido en la otra.

En la práctica, los perfiles de los tendones son parábolas invertidas. Así, los tendones ejercen tanto fuerzas ascendentes como descendentes en la misma luz. Para los tendones de las vigas y los tendones de la losa en la dirección distribuida, un perfil parabólico invertido con puntos de inflexión en una décima parte de la longitud del tramo se utiliza normalmente. Para la dirección de bandas, una parábola parcial con una longitud recta de aproximadamente 4 pies sobre los soportes es más práctico.

Los puntos bajos del perfil del tendón se establecen normalmente en el centro de la luz para ambos tramos interiores y exteriores. El punto más alto del perfil del tendón debe estar lo más cerca de la superficie superior del elemento como sea posible, lo que permite el refuerzo en la dirección ortogonal. En el punto más bajo del perfil, lo mejor es colocar los tendones, lo más bajo posibles, para sacar el máximo provecho de las fuerzas de levantamiento en los tendones y su contribución a la resistencia a la rotura. Esta disposición es posible para los tramos críticos en un elemento continuo, pero puede ser necesario ajustarla para los otros tramos.

Si el uso de los perfiles máximos da como resultado una elevación excesiva en una luz que no sea el lapso crítico, la primera elección debe ser la reducción de la fuerza de pretensado. Si esto no es posible, se puede optar por elevar el tendón al centro de la luz para reducir la caída. Los tendones a lo largo y dentro de las

paredes interiores de un muro, deberán estar diseñados planos en su punto más alto. Los soportes de muros continuos eliminan la necesidad de pleonasma para la elevación. La colocación del tendón al punto más alto es el perfil más adecuado para resistir los momentos negativos típicos sobre muros de soporte.

3.3.2.8 Fuerza del tendón

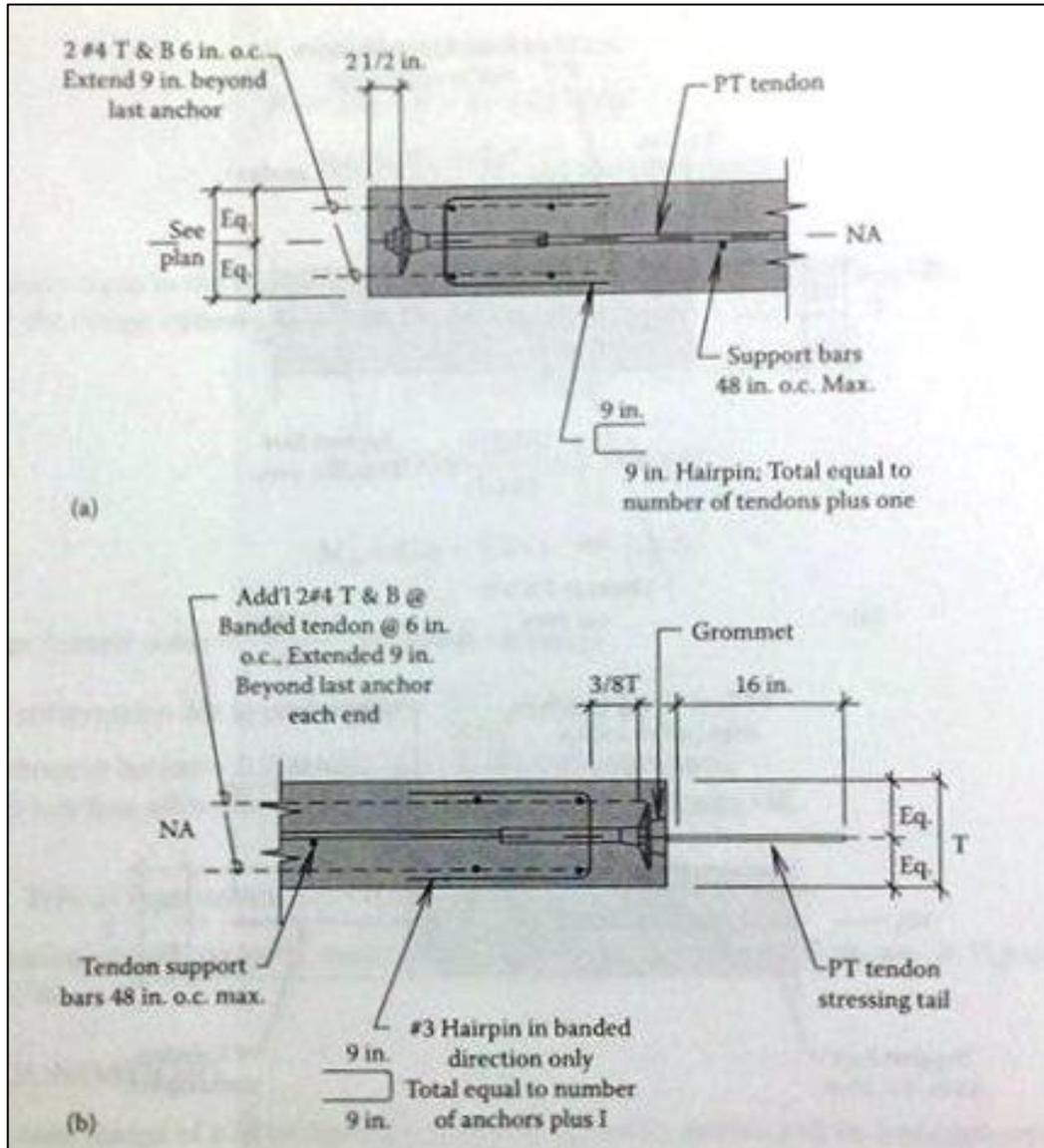
La mayoría de los ingenieros diseñan con las fuerzas efectivas finales (las fuerzas de postensado con todas las pérdidas de pretensado). La fuerza efectiva de un tendón es una función de un número de parámetros, incluyendo el perfil del tendón, ciertas propiedades del hormigón, y el medio ambiente. Para los diseños típicos, sin embargo, una fuerza constante de 27 kip (120 kN) se puede suponer para 0.5 pulgadas (12.7 mm) de cables no adheridos, siempre que se cumplan las siguientes condiciones de tensionamiento¹⁶:

1. Longitud del tendón (longitud entre anclajes) debe ser inferior a 240 pies (72 m).
2. Los tendones de menos de 120 pies (36 m) de largo se tensionaran en un extremo.
3. Los tendones de más de 120 pies, pero menos de 240 pies se tensionaran en ambos extremos.

Los tendones que no cumplen estas condiciones se pueden utilizar, siempre y cuando la fuerza efectiva asumida sea baja para tener en cuenta mayores pérdidas por fricción.

¹⁶ REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

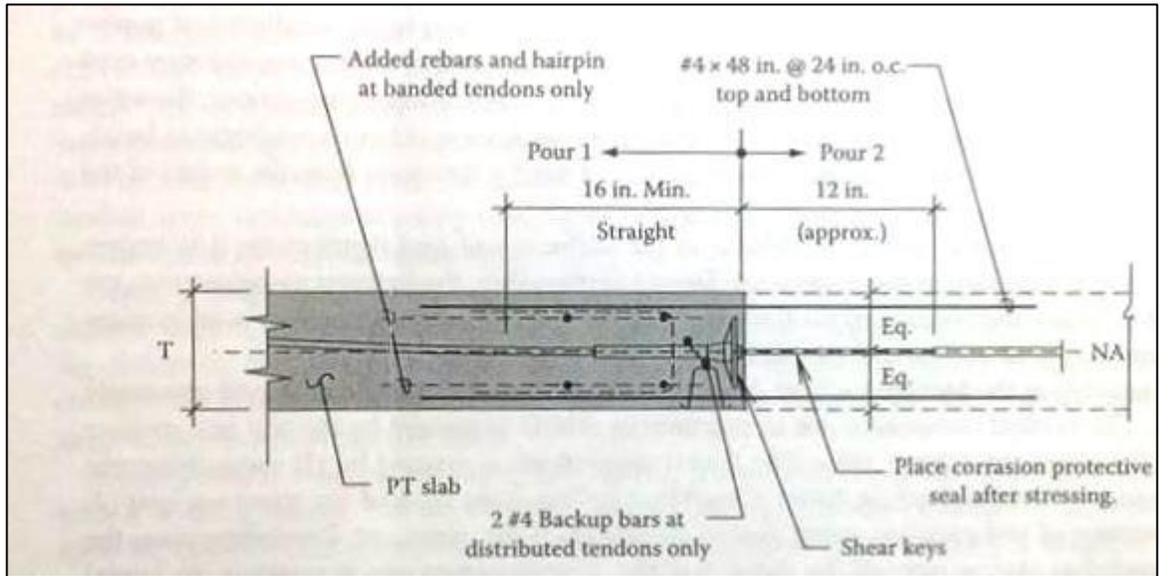
Figura 6. Puntos de salida de tendón banda



(a) Anclaje muerto y (b) anclaje vivo

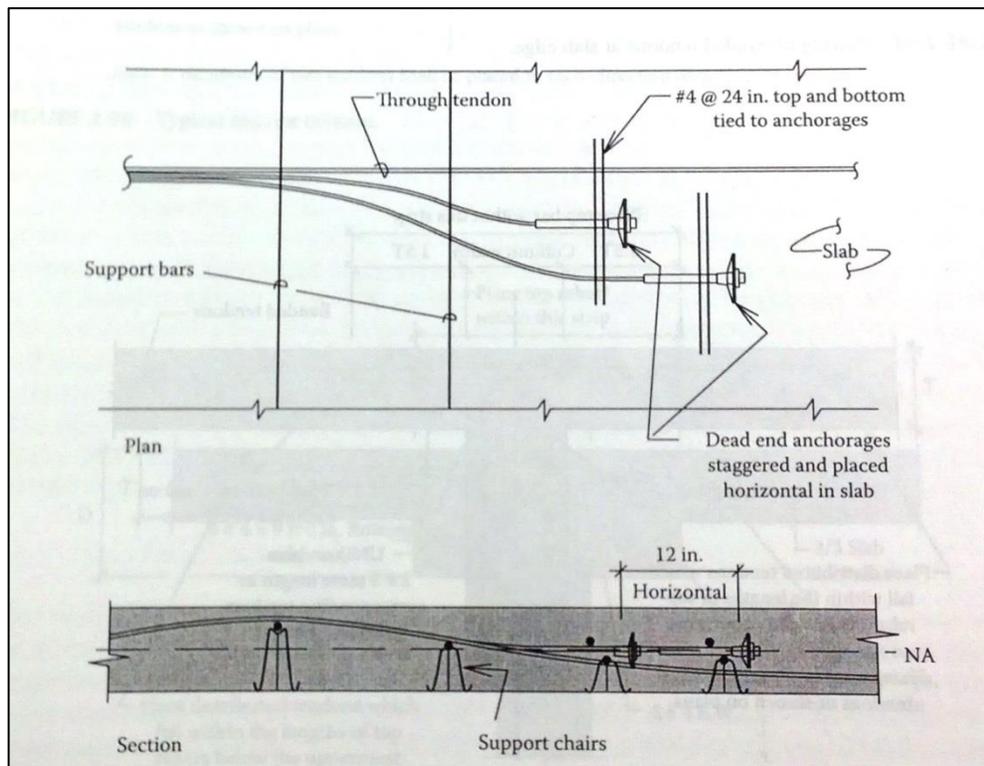
Fuente: REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

Figura 7. Junta de construcción con punto de tensionamiento intermedio



Fuente: REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

Figura 8. Colocación de tendones adicionales



Fuente: REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS.

4. PLAN DE TRABAJO PROPUESTO

4.1 Actividades a desarrollar:

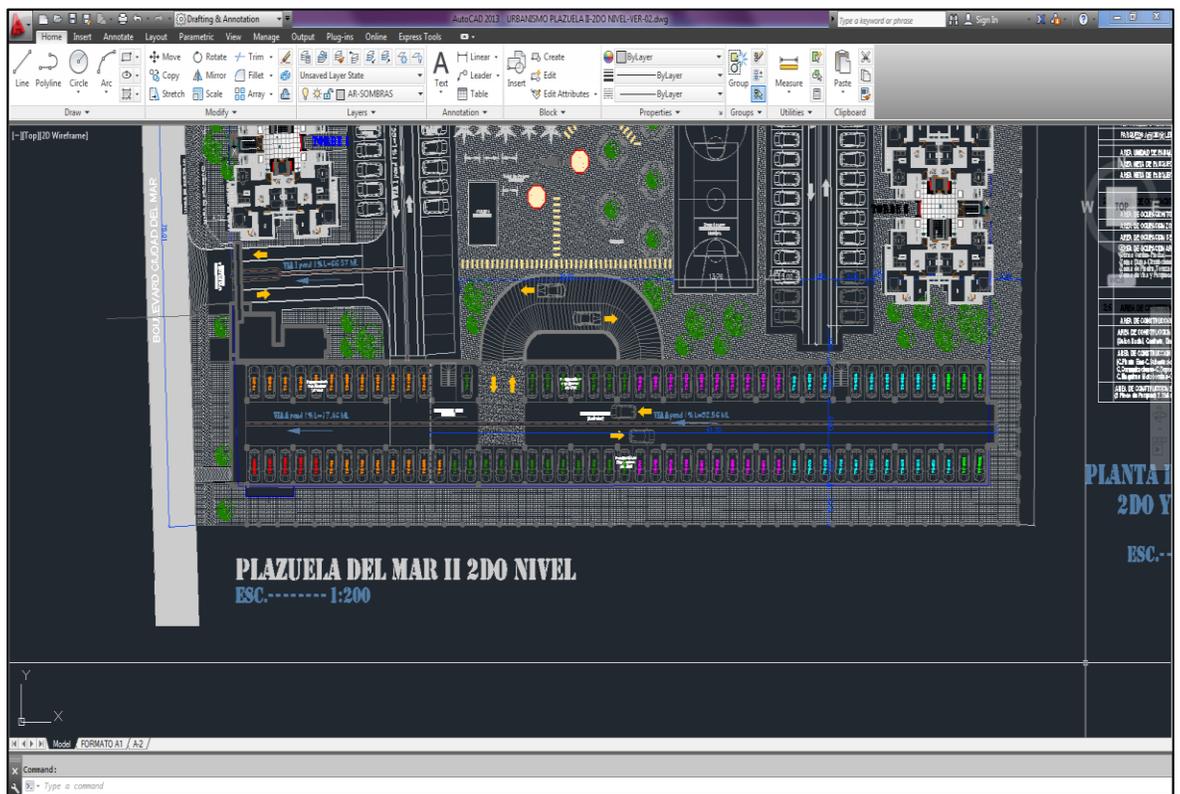
- Modelar losas de entrepisos en la plataforma de ADAPT-Builder, generando un análisis estructural.
- Estimación de precompresión y fuerza de balance (perfiles) de los cables.
- Verificación de esfuerzos en losas postensadas.
- Distribución de aceros de refuerzo para el comportamiento de la losa en condiciones iniciales, cargas de servicio y estado último.
- Garantizar fuerza efectiva de los cables.

4.2 Desarrollo de actividades:

- Modelamiento de losas de entrepisos en la plataforma de ADAPT-Builder:

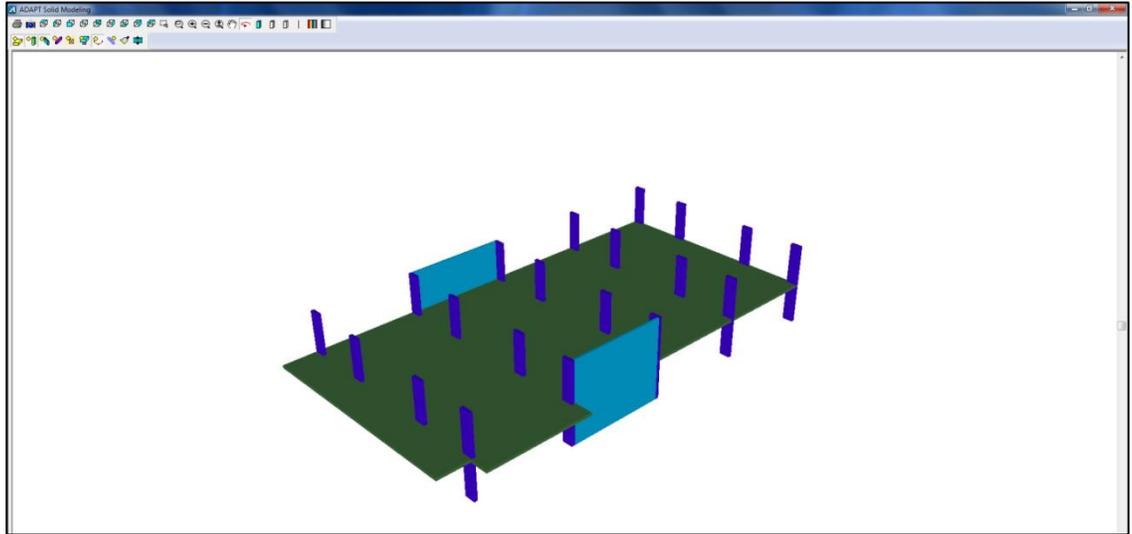
Al momento de empezar el diseño de una losa de entrepiso lo primero que se hace es tomar la arquitectura y montarla en el programa obteniendo la estructura del nivel deseado. Aquí incluimos pantallas, columnas, vigas, losa. El espesor de la losa es acordado con las respectivas partes, pero llegado el caso que este no sea suficiente para resistir las cargas actuantes, el espesor de la losa se aumenta.

Figura 9. Planta arquitectura



Fuente: Autor

Figura 10. Estructura tridimensional en Adapt Builder



Fuente: Autor

- Luego de tener la geometría de la estructura montada y definida, se hace un estudio de partes finitas llamada “*discretización de la losa*” (mesh).

La división de la losa en sub-elementos se ha vuelto un poco más fácil con los programas de método de elementos finitos recientes, ya que casi todos los programas tienen interfaces gráficas.

Para el análisis de la losa, la división de la estructura en elementos se realiza generalmente con sólo dos criterios en mente, los cuales son¹⁷:

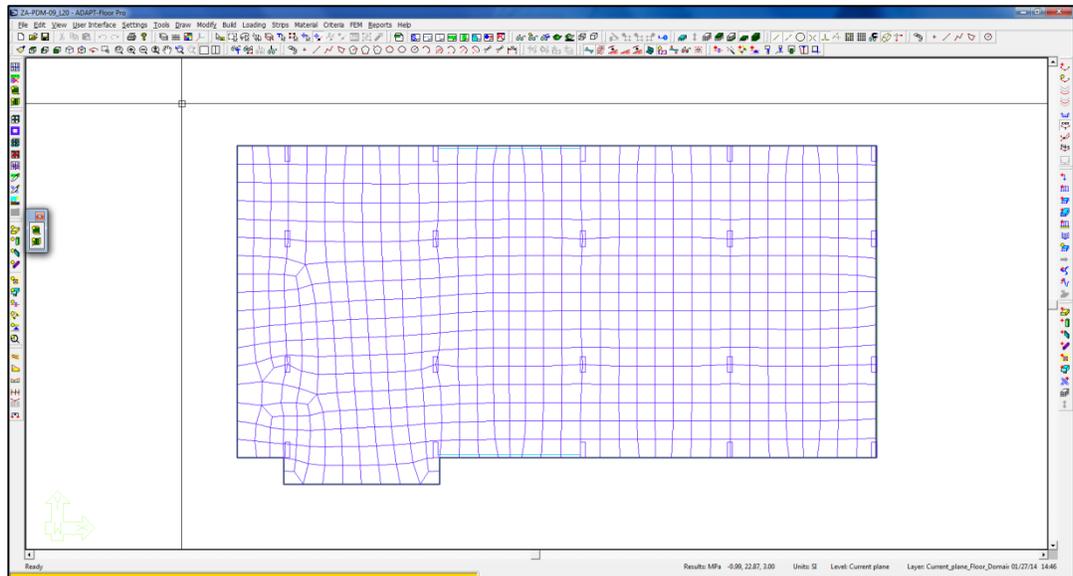
- Solución precisa y esperada de la losa.
- Facilidad al usuario.

El tamaño relativo elegido de los sub-elementos de losa controla la

¹⁷ Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors. PTI

exactitud de la solución obtenida; esto quiere decir que cuanto menor es el tamaño del elemento con respecto a la geometría de la estructura, más precisa será la solución. Obviamente, el tamaño y la forma de los subelementos de losa dependen de las ubicaciones de todas las pantallas, columnas, aberturas, y demás características estructurales.

Figura 11. Discretización de la losa



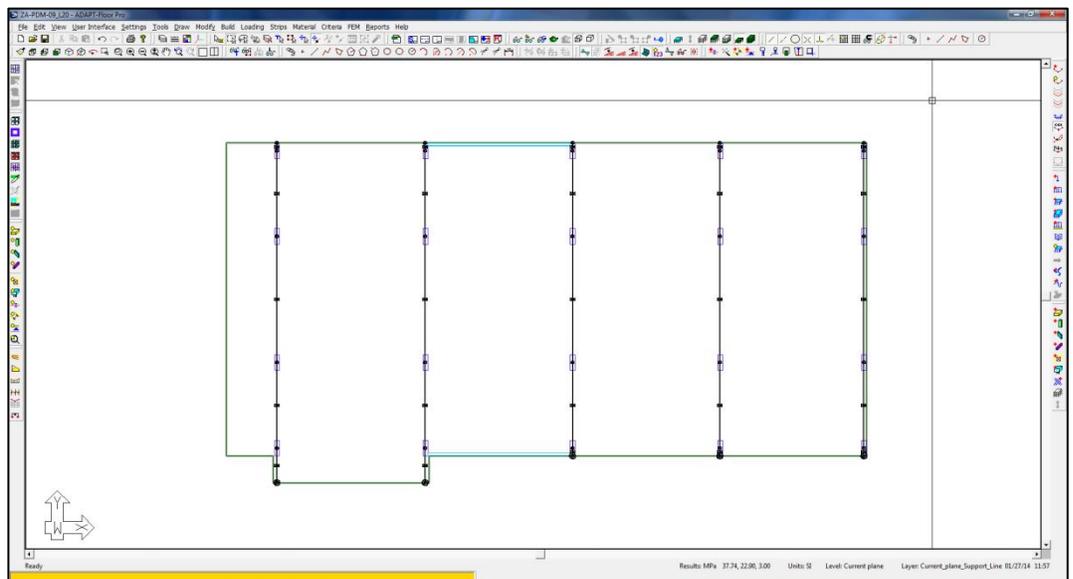
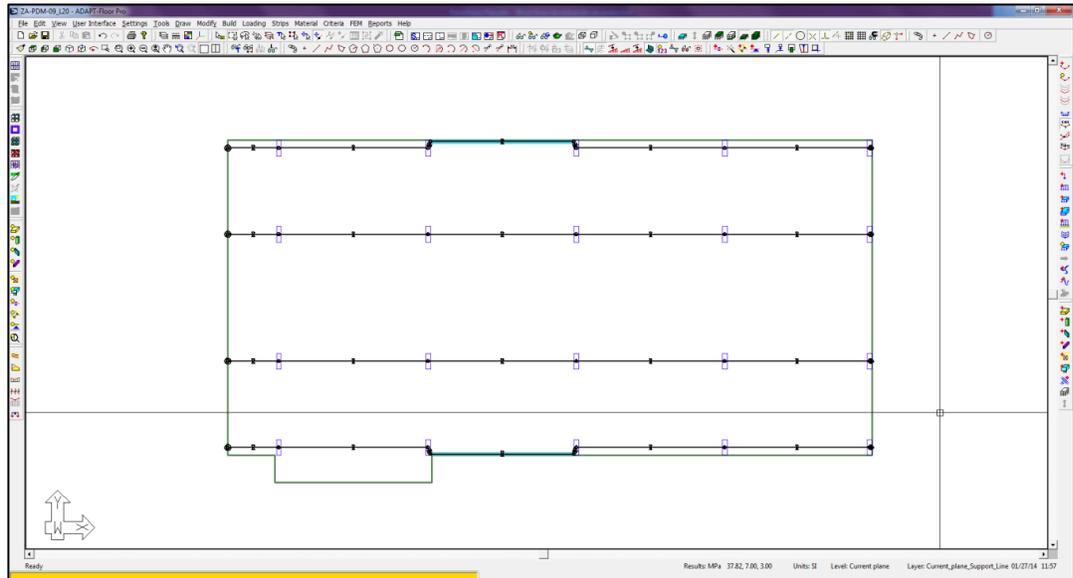
Fuente: Autor

- En seguida se procede a hacer los support lines (líneas de apoyo), los cuales deben trazarse por la línea de “cero cortante”.

El ingeniero determina una serie de líneas de apoyo en cada una de las dos direcciones principales. Por lo general, se trata de las líneas que unen los soportes adyacentes a lo largo de la losa.

En un sistema de piso muy irregular donde las columnas se compensan significativamente entre sí, la designación de las líneas de apoyo puede ser menos evidente. Sin embargo, los criterios de selección siguen siendo los mismos que en una losa regular.

Figura 12. Líneas de apoyo



Fuente: Autor

- Posteriormente se colocan los cables en la estructura cumpliendo con el código ACI 318 y cumpliendo con pre-compresiones mínimas. En este caso son cables monostrand no adheridos de 12.7mm. Se les llama bandas a los cables que van agrupados en los apoyos de la losa, y uniformes a los que van distribuidos como su nombre lo dice en una forma uniforme en toda la

losa.

La ventaja constructiva de este esquema es que no requiere de entretejido de los tendones en diferentes direcciones. Los tendones distribuidos directamente sobre el soporte se colocan y se fijan en la posición primera, seguida de la colocación de todos los tendones bandas. Entonces el resto de los tendones distribuidos se colocan sobre las bandas. La mayoría de los otros sistemas de disposición de los tendones requiere cierta superposición.

Otra de las ventajas de la forma banda-distribuido, desde el punto de vista de diseño, es que ambas direcciones pueden ser diseñados con el máximo perfil. Los tendones de bandas y uniformes generalmente no se cruzan en sus puntos altos o bajos, con la excepción de los tendones distribuidos sobre los soportes. Por lo tanto, la mayor parte de los cables pueden ser colocados con el máximo perfil permitido sin la interferencia de los tendones en la dirección perpendicular.

Figura 13. Tendones Bandas

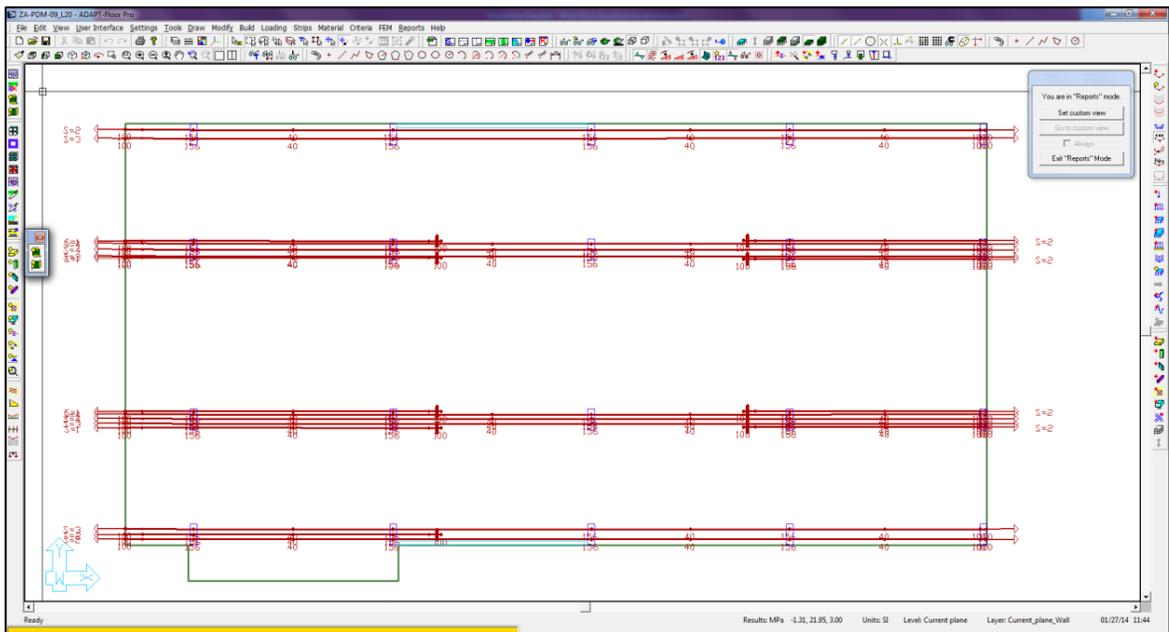


Figura 14. Tendones distribuidos



Fuente: Autor

- Después de tener los cables dibujados, se les da el perfil deseado, para que trabajen con cierto balance en toda la losa.

El número de tendones y su perfil se determina a través de los cálculos de diseño. En la construcción de edificios los perfiles de los tendones son generalmente parábolas invertidas o parábolas parciales. En el sistema de dos direcciones, el sistema bandas - uniformes se utiliza casi exclusivamente. En la dirección de los tendones uniformes el perfil es comúnmente una parábola invertida. En la dirección de las bandas, se utiliza una parábola parcial.

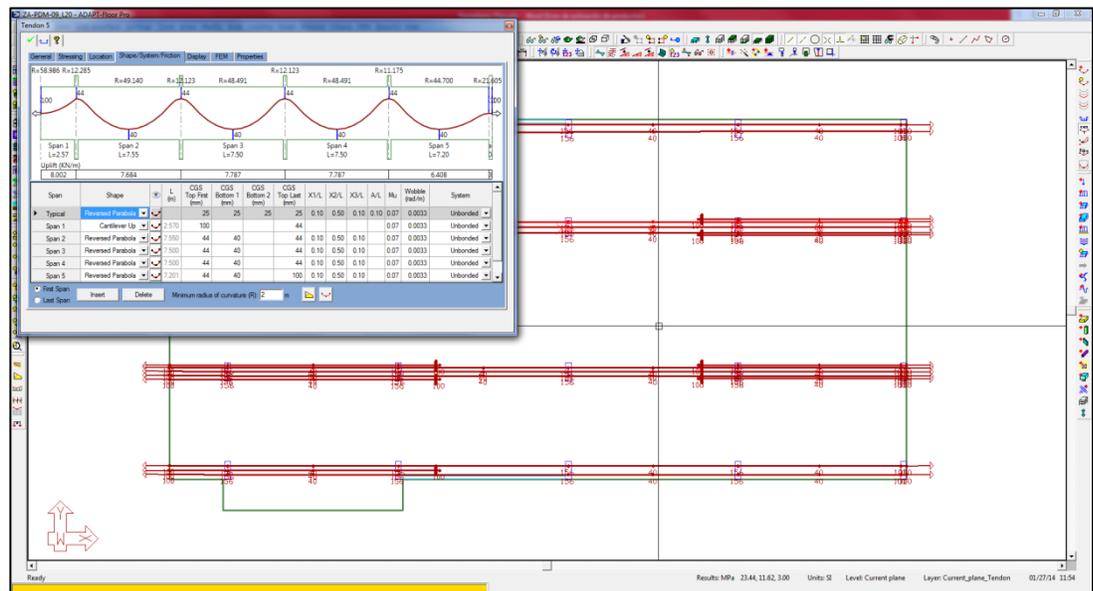
En la determinación del número de tendones y el perfil es necesario tener en cuenta lograr una óptima economía. Actualmente el software de diseño disponible puede calcular el número de tendones y sus perfiles satisfaciendo los criterios específicos, tales como¹⁸:

¹⁸ Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors. PTI

- Precompresión mínima y máxima recomendada.
- Porcentaje mínimo y máximo recomendado de peso propio para ser balanceado.
- Máximos esfuerzos de tensión y compresión admisibles.
- Cobertura mínima desde la parte superior e inferior.

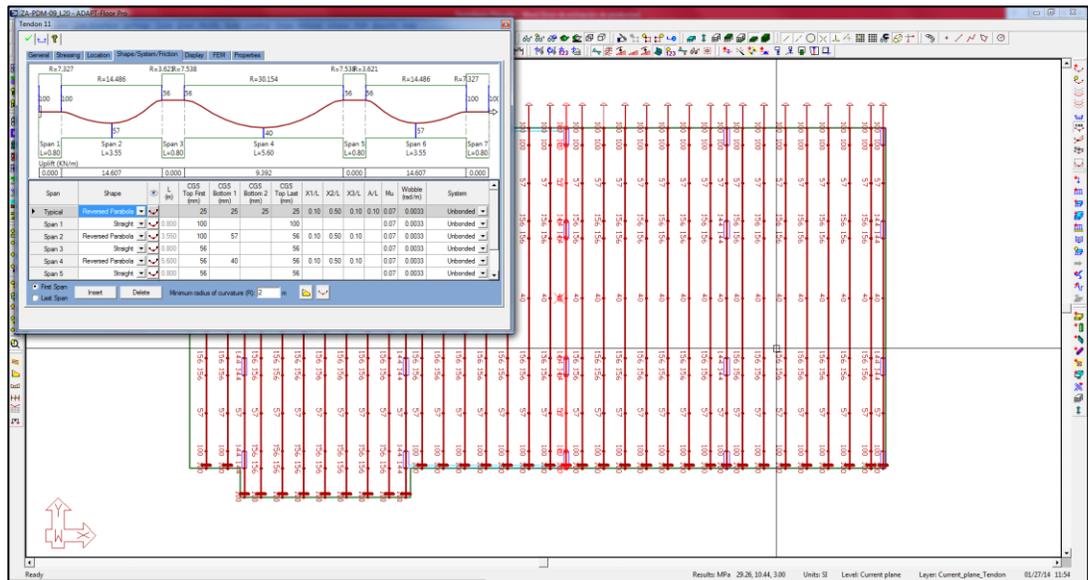
Estos criterios se especifican normalmente por el diseñador como parte de los datos de entrada.

Figura 15. Perfil en tendon bandas



Fuente: Autor

Figura 16. Perfil en tendón distribuido



Fuente: Autor

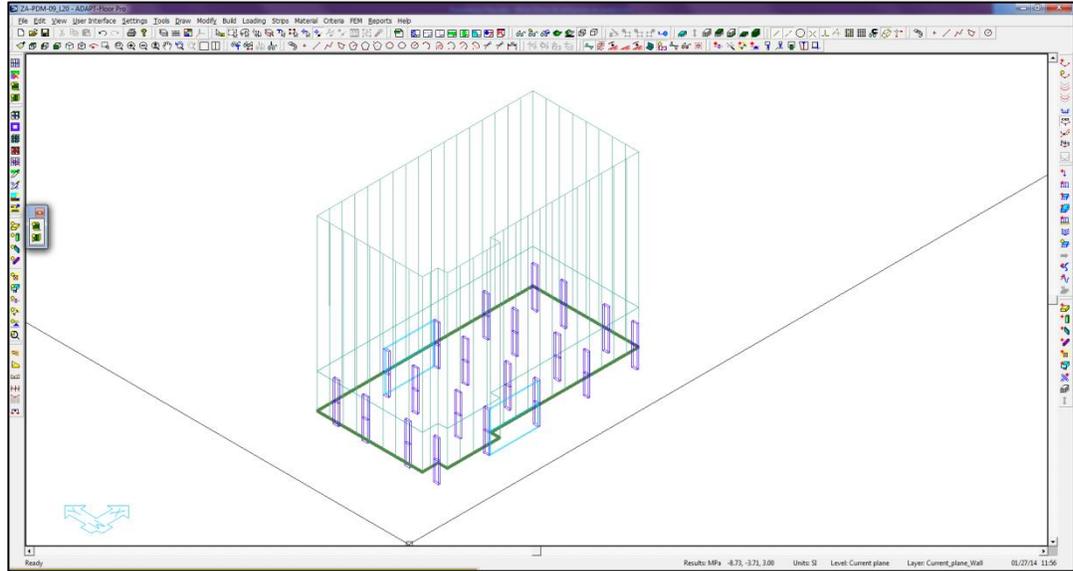
- Las cargas contempladas en la construcción de edificios consisten, en la mayoría de los casos, de las siguientes componentes principales¹⁹:
 - Peso propio y otra carga sobrepuesta permanente.
 - Carga viva.
 - Pretensado (suma de la carga equilibrada y acciones hiperestáticas).
 - Efectos a largo plazo (contracción, fluencia, envejecimiento del hormigón, relajación del pretensado).

Las cargas uniformes suelen consistir en peso propio, cargas muertas superpuestas, y cargas vivas. Una carga uniforme se asume para actuar

¹⁹ Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors. PTI

sobre toda el área afluente de la sección de diseño.

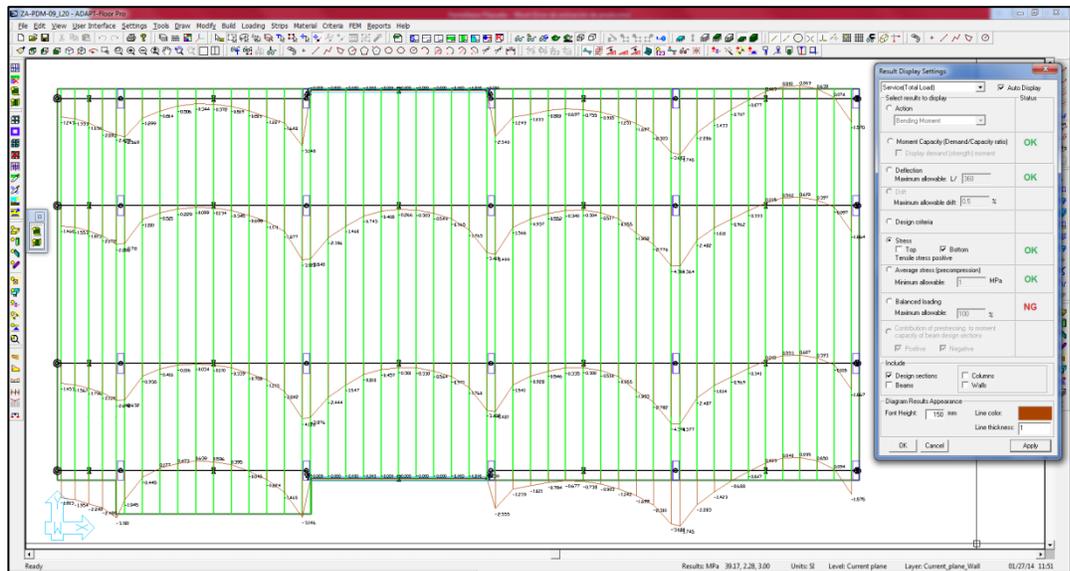
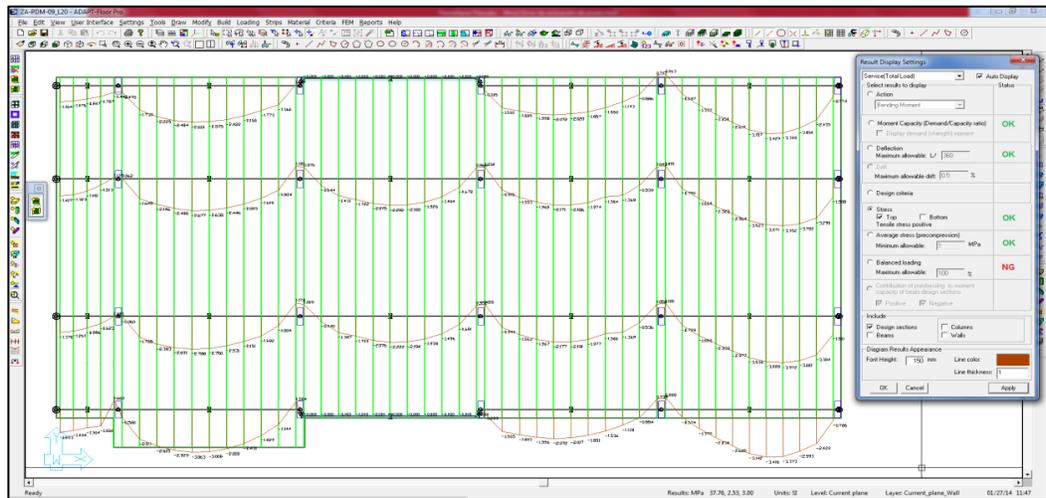
Figura 17. Cargas distribuidas



Fuente: Autor

- Revisión de esfuerzos: en este paso se analizan los resultados que nos arrojan las secciones de diseño, las cuales nos muestran los esfuerzos, deformaciones, fuerza de balance, entre otros; por ejemplo, en caso de que los esfuerzos excedan los límites especificados en la norma en algún lugar determinado de la sección, se debe agregar acero a esa zona, o se toman otras medidas para reducir el sobre-esfuerzo.

Figura 18. Secciones de diseño (Strips)



Fuente: Autor

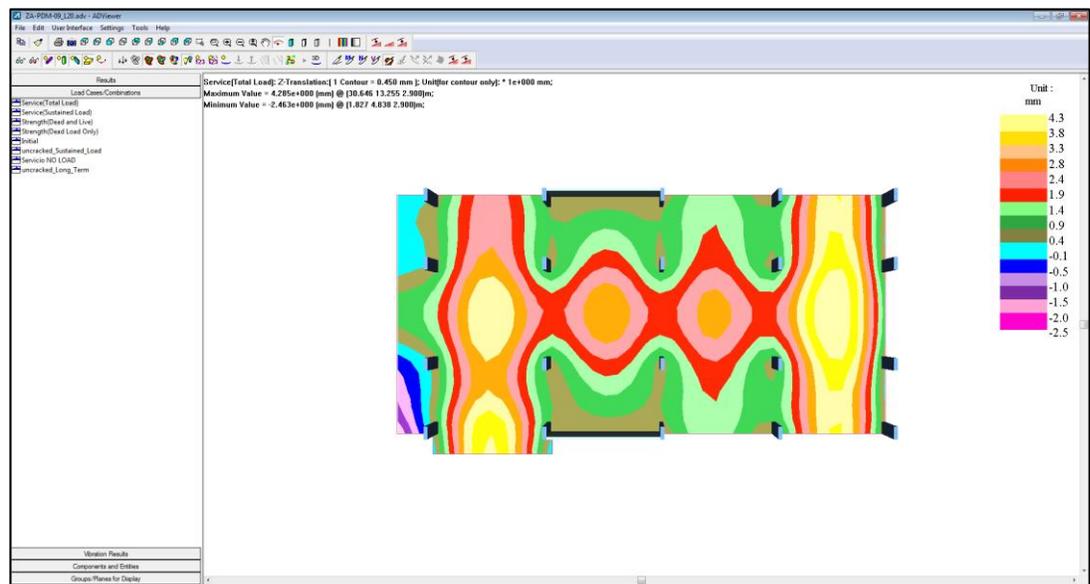
- **Control de deflexiones**

La deflexión se reduce al mínimo para el confort de los ocupantes y para mantener el buen funcionamiento de las instalaciones. La deflexión también se controla para mantener la percepción de un ocupante de que una estructura es segura. Un suelo excesivamente flácido puede acabar con la confianza de un ocupante en cuanto a la adecuación del margen de seguridad, aun cuando la estructura cumpla todos los requisitos de diseño.

La solución de elementos finitos permite obtener la deformación total automáticamente. En un diseño común de losa, el efecto de la fluencia y retracción en la deflexión a largo plazo normalmente se representa como un múltiplo de deformación elástica. Para los pisos de hormigón postensado, la deflexión a largo plazo normalmente se toma como tres veces la deformación elástica bajo carga sostenida.

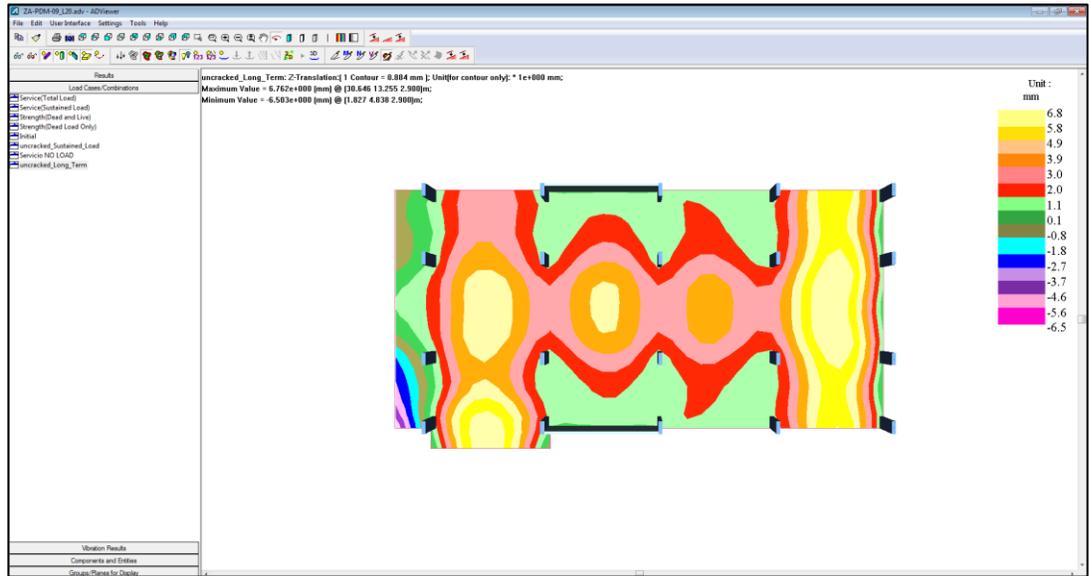
La deflexión obtenida por elementos finitos, constituye a la totalidad de la deflexión, incluyendo la acción biaxial de la losa, la contribución del momento de torsión y la acción de postensado.

Figura 19. Deflexión bajo cargas de servicio total



Fuente: Autor

Figura 20. Deflexión bajo carga última



Fuente: Autor

5. RESULTADOS

Durante los seis (6) meses de práctica se trabajó en varios proyectos, algunos de los cuales son:

- Diver Plaza (Centro comercial, Bogotá D.C)

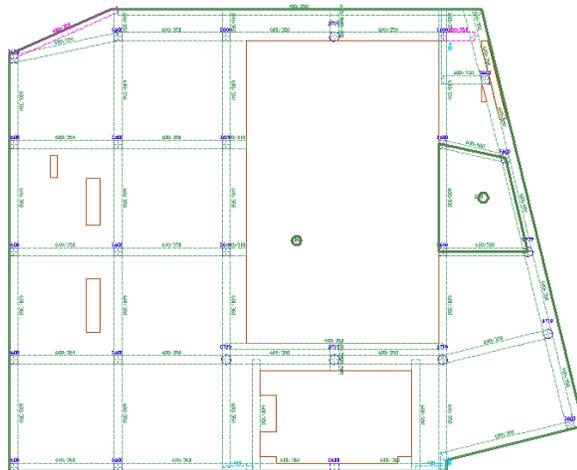
En este proyecto se trabajó sobre las siguientes losas elevadas:

| Nivel | Área (m2) |
|---------------|-----------|
| Segundo nivel | 8790,9 |
| Tercer nivel | 8790,9 |
| Cubierta | 6756,02 |

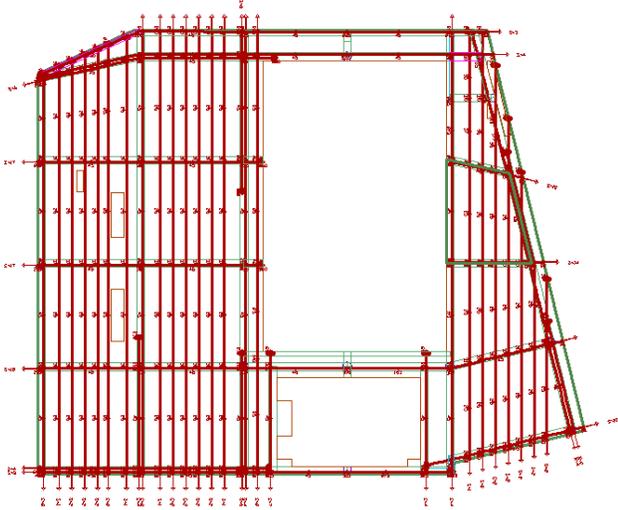
Subdividiendo cada nivel en 4 zonas, se obtienen los siguientes resultados adquiriendo consumos de cable y concreto.

Zona A - Cubierta:

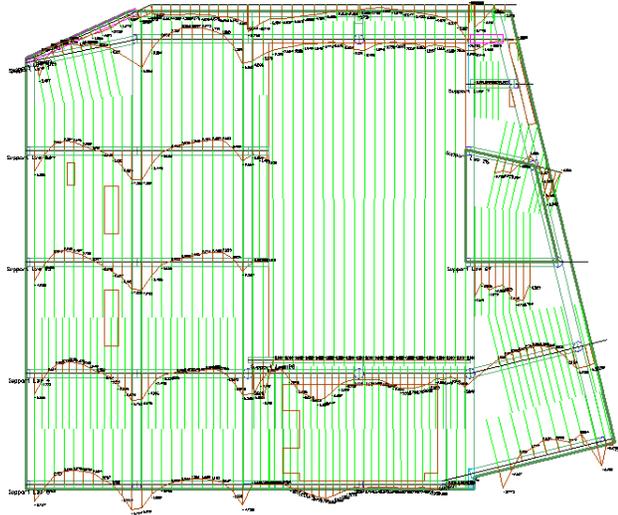
Geometría

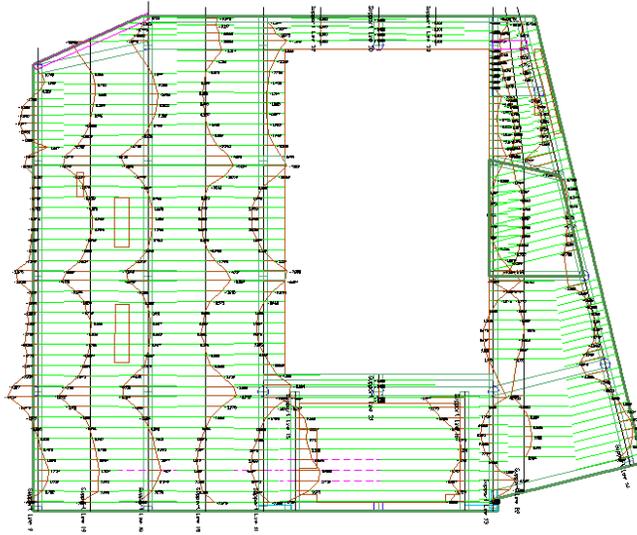


Distribución de cables



Esfuerzos



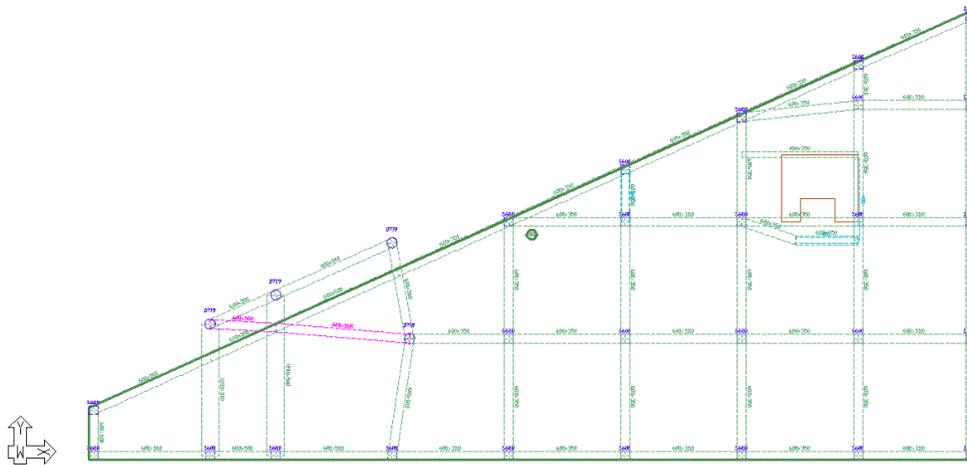


Consumo

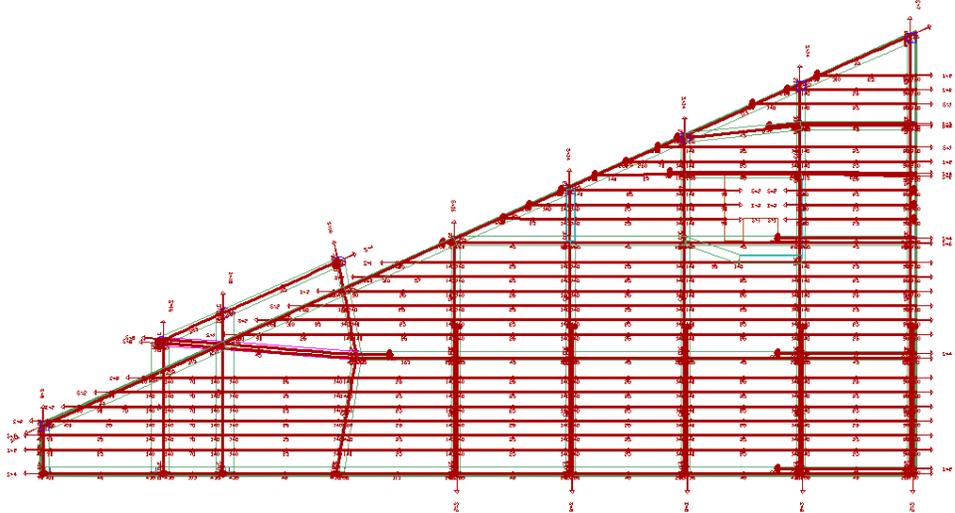
| | | |
|----------|-----------|------------|
| Cable | 4666.46 m | 5.18 m/m2 |
| Concreto | 210.35 m3 | 0.23 m3/m2 |

Zona B – Cubierta

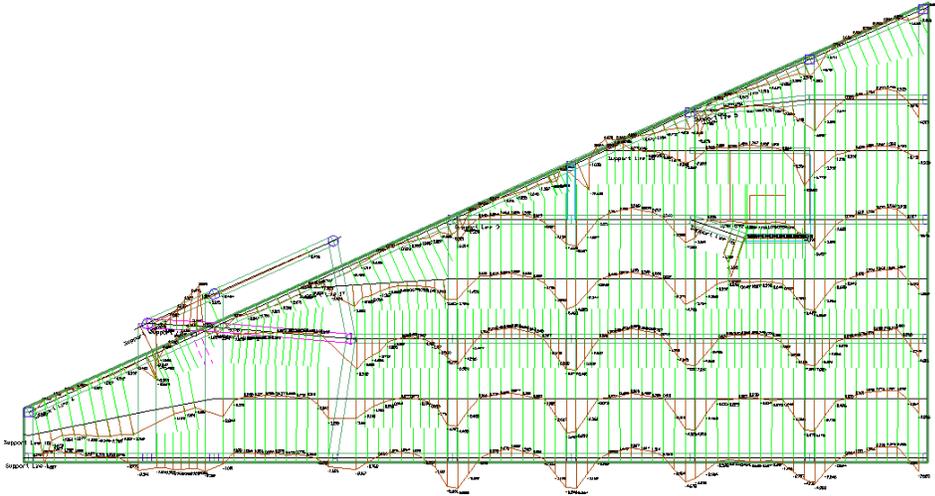
Geometría

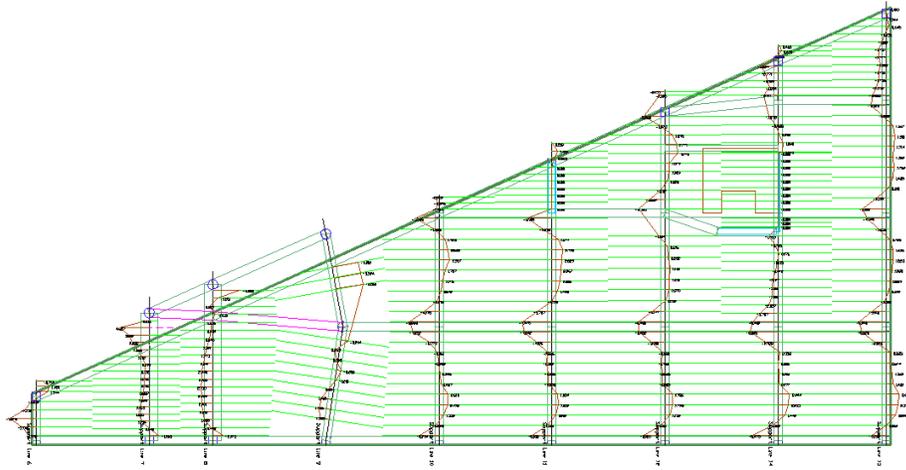


Distribución de cables



Esfuerzos



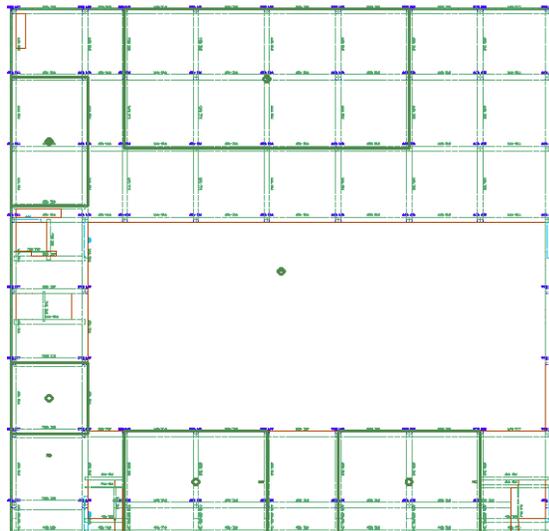


Consumo

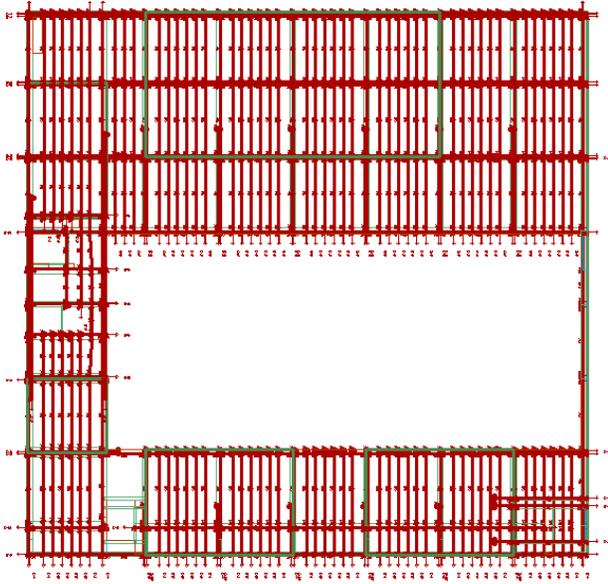
| | | |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|
| Cable | 5650.13 m | 5.50 m/m ² |
| Concreto | 245.32 m ³ | 0.24 m ³ /m ² |

Zona C – Cubierta

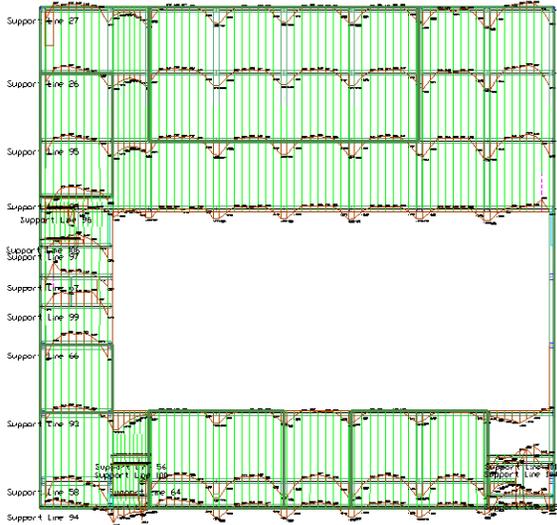
Geometría

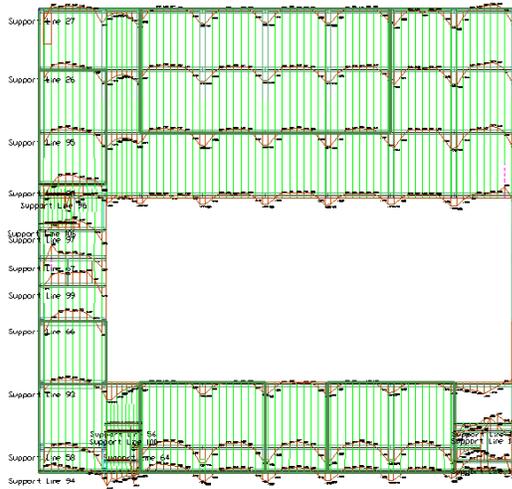


Distribución de cables



Esfuerzos



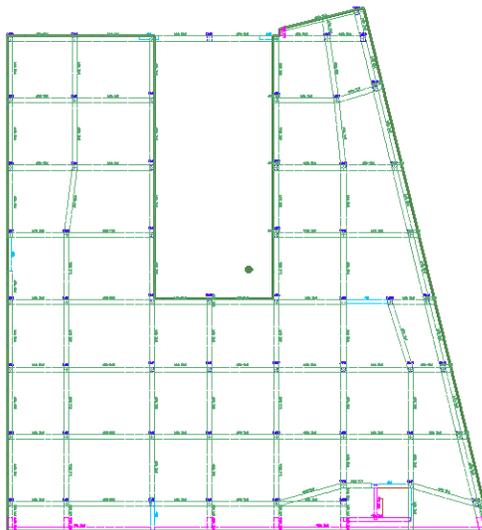


Consumo

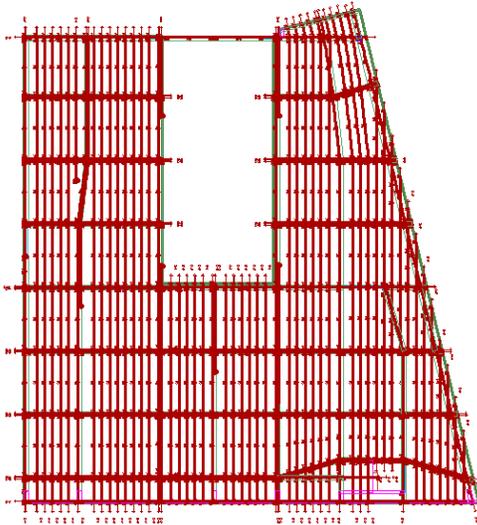
| | | |
|----------|----------|------------|
| Cable | 11459 m | 4.98 m/m2 |
| Concreto | 554.35m3 | 0.24 m3/m2 |

Zona D – Cubierta

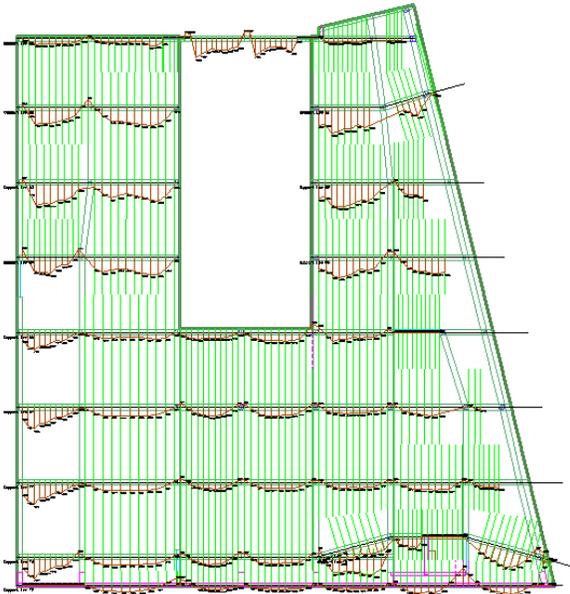
Geometría



Distribución de cables



Esfuerzos





Consumo

| | | |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|
| Cable | 13363.16 m | 5.27 m/m ² |
| Concreto | 548.96 m ³ | 0.22 m ³ /m ² |

- Quantum (Torre de apartamentos, Floridablanca)

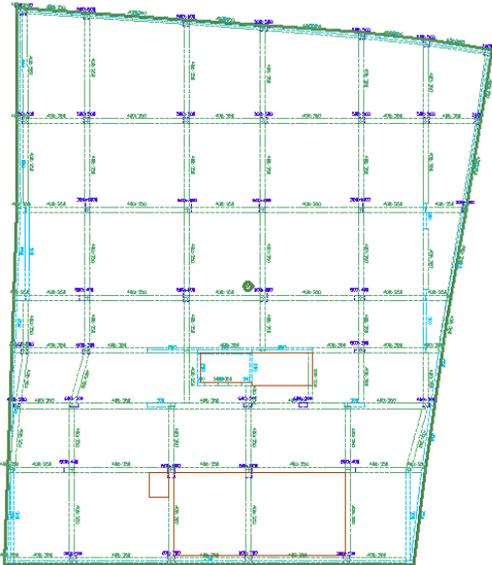
En este proyecto se trabajó sobre las siguientes losas elevadas:

| Nivel | Área (m ²) |
|--------------------|------------------------|
| Sótanos 3,2&1 | 3882.81 |
| Primer nivel | 1294.27 |
| Piso Tipico (3-14) | 7816.56 |
| Cubierta | 638.34 |

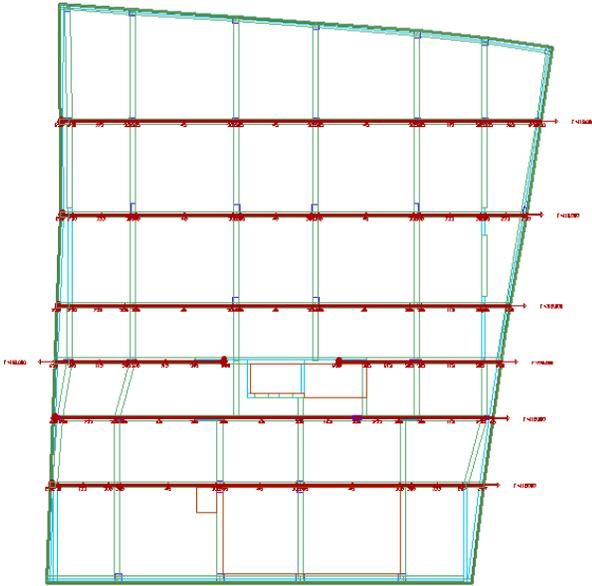
Analizando cada nivel, se obtienen los siguientes resultados adquiriendo consumos de cable y concreto.

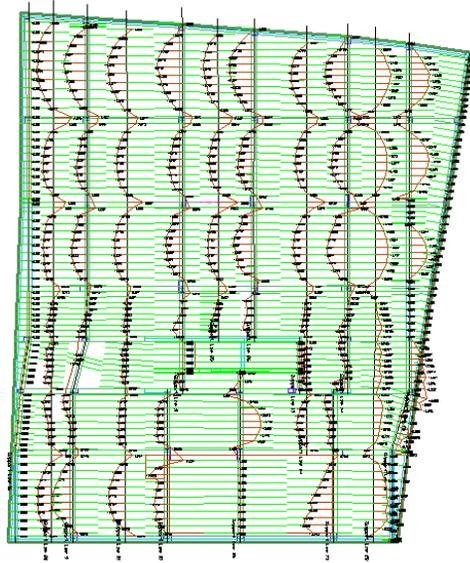
Sótanos

Geometría



Distribución de cables



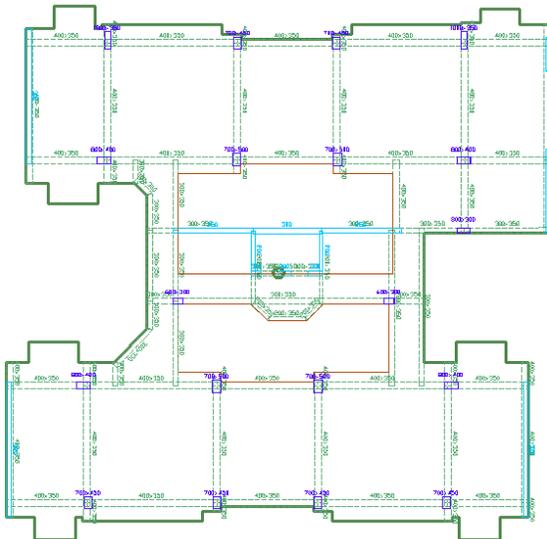


Consumo

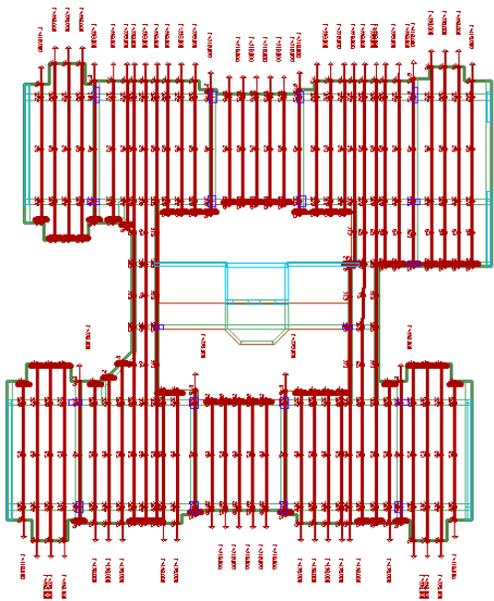
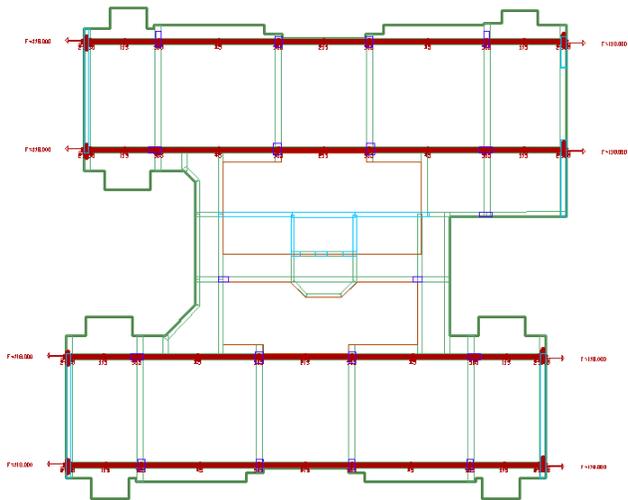
| | | |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|
| Cable | 2857.6 m | 2.2 m/m ² |
| Concreto | 252.13 m ³ | 0.19 m ³ /m ² |

Pisos tipo (3-14)

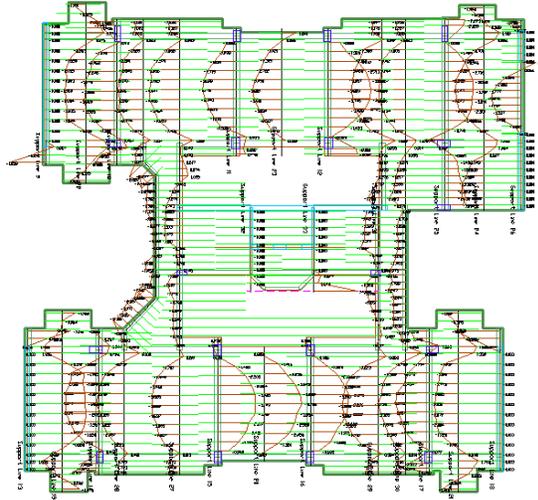
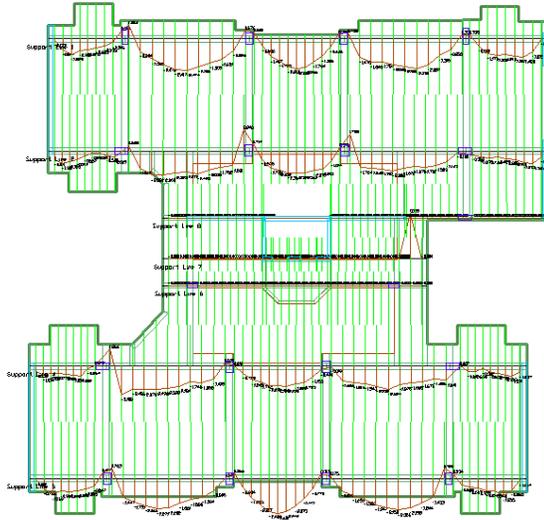
Geometría



Distribución de cables



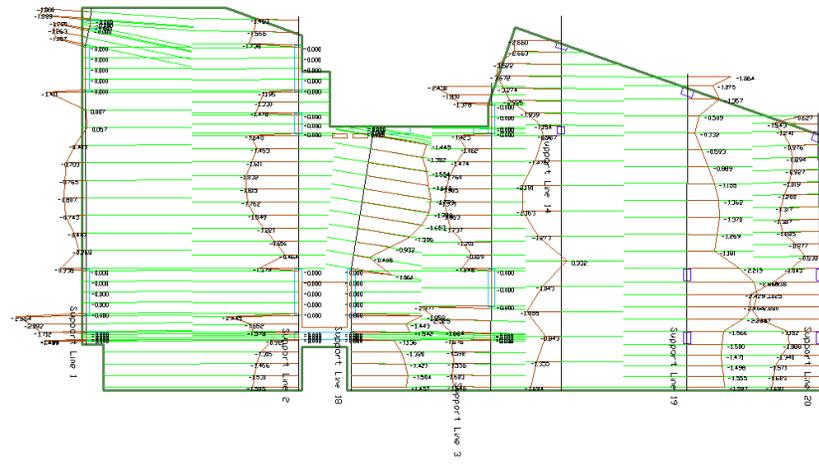
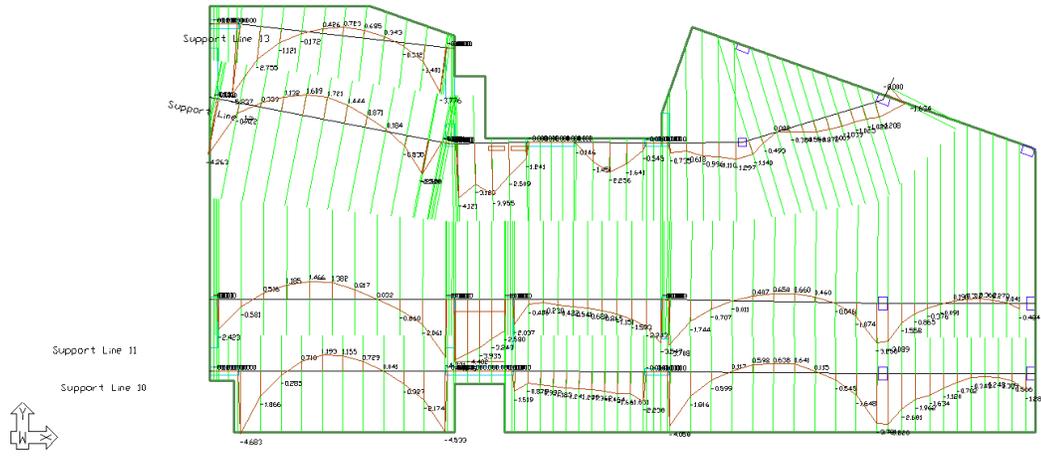
Esfuerzos



Consumo

| | | |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|
| Cable | 2179.88 m | 3.34 m/m ² |
| Concreto | 123.04 m ³ | 0.18 m ³ /m ² |

Esfuerzos

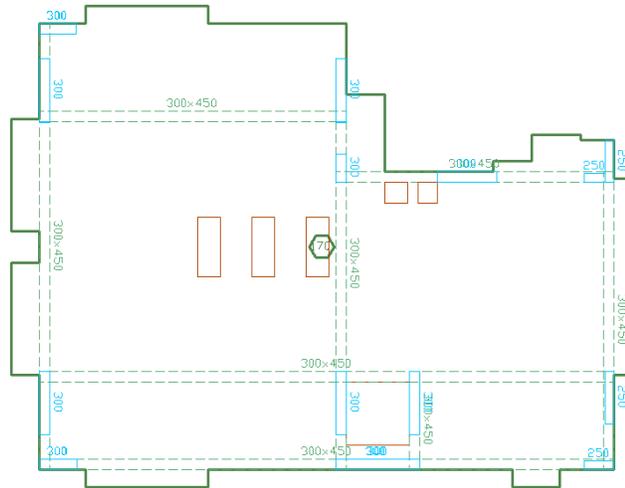


Consumo

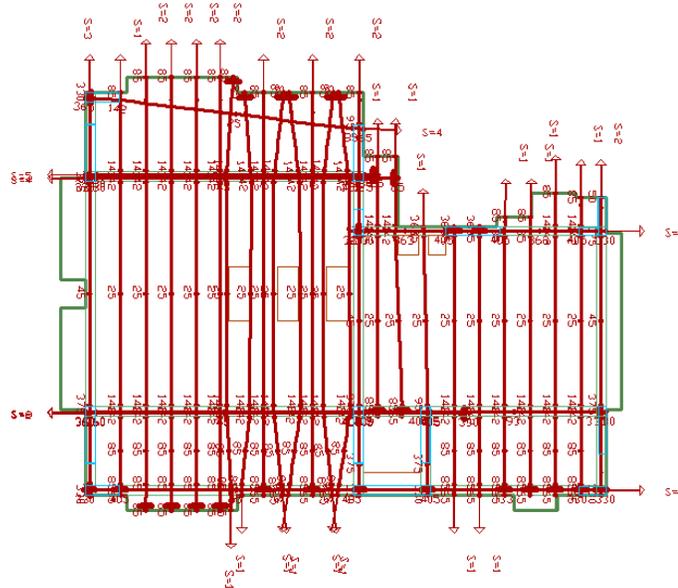
| | | |
|----------|----------------------|-------------------------------------|
| Cable | 1841.06 m | 5 m/m ² |
| Concreto | 73.65 m ³ | 0.19 m ³ /m ² |

Piso tipo (3-10)

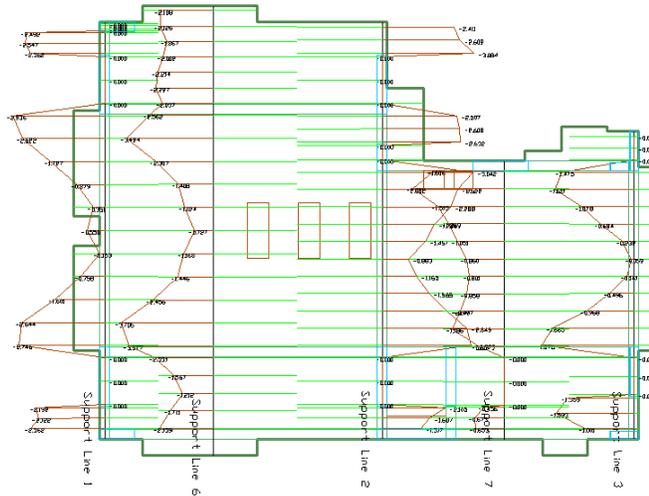
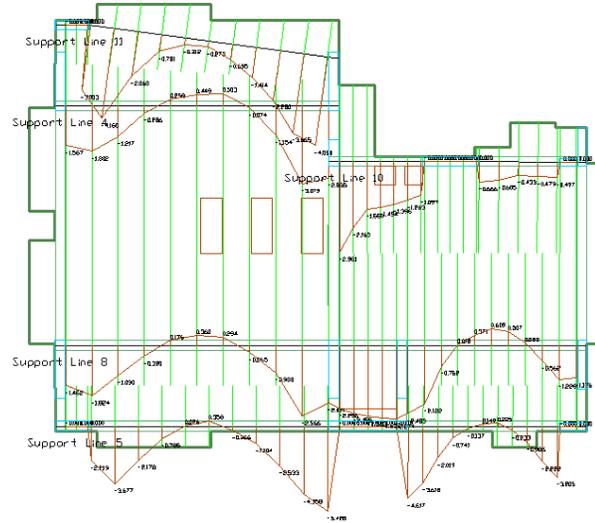
Geometría



Distribución de cable



Esfuerzos



Consumo

| | | |
|----------|----------------------|-------------------------------------|
| Cable | 783.02 m | 4.21 m/m ² |
| Concreto | 38.64 m ³ | 0.20 m ³ /m ² |

- Torres de Castilla (Torre de apartamentos – Girón, Santander.)

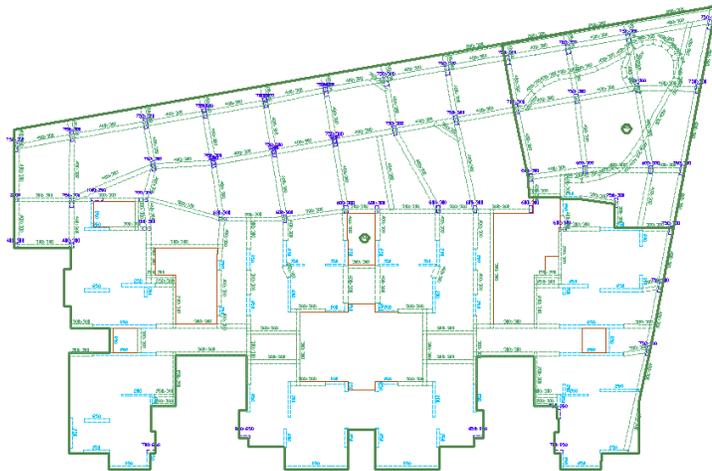
En este proyecto se trabajó sobre las siguientes losas elevadas:

| Nivel | Área (m2) |
|--------------------|-----------|
| Segundo nivel | 1338.15 |
| Piso Típico (3-12) | 5837.4 |

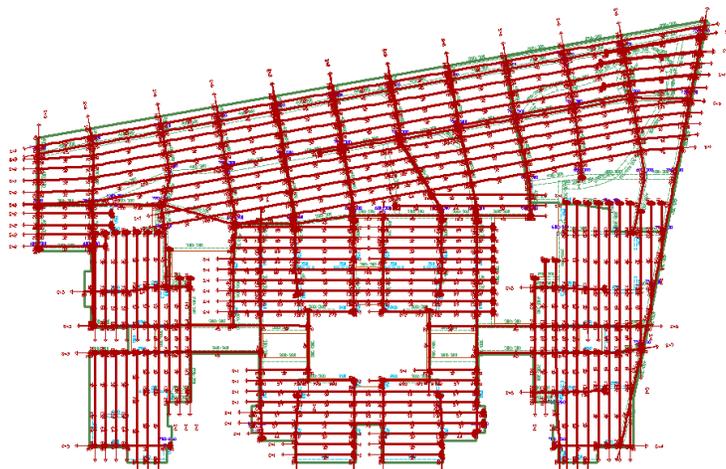
Analizando cada nivel, se obtienen los siguientes resultados adquiriendo consumos de cable y concreto.

Segundo nivel

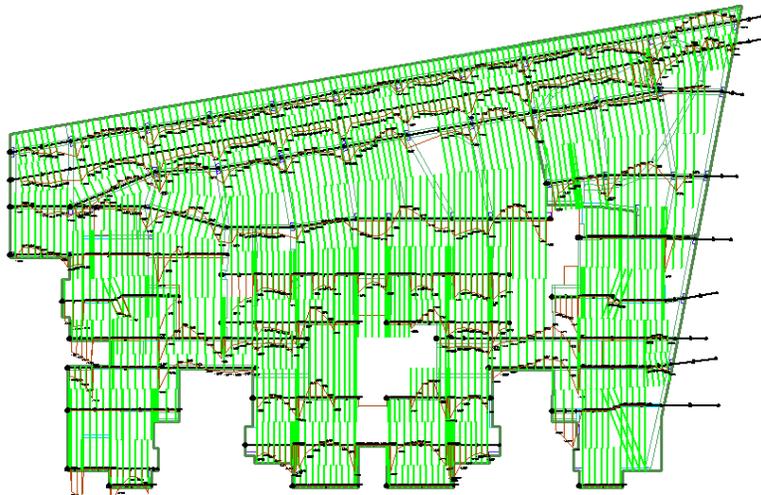
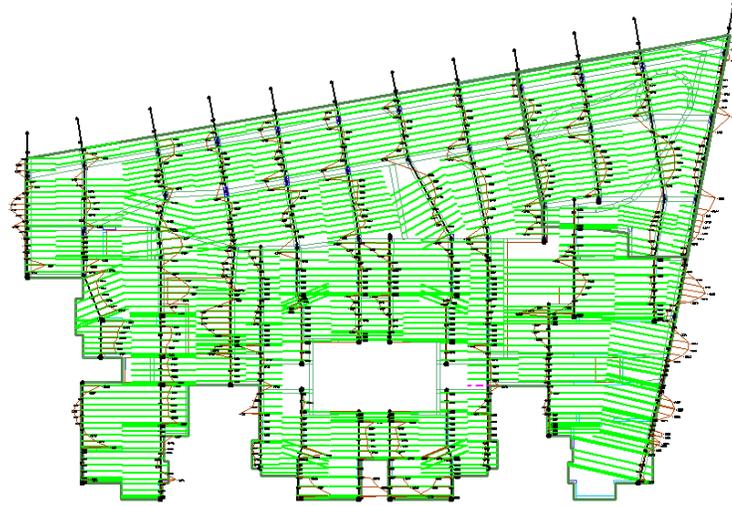
Geometría



Distribución de cable



Esfuerzos

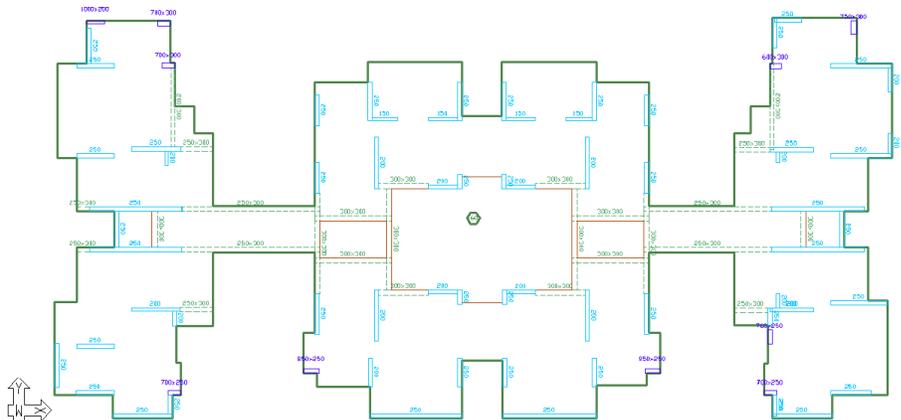


Consumo

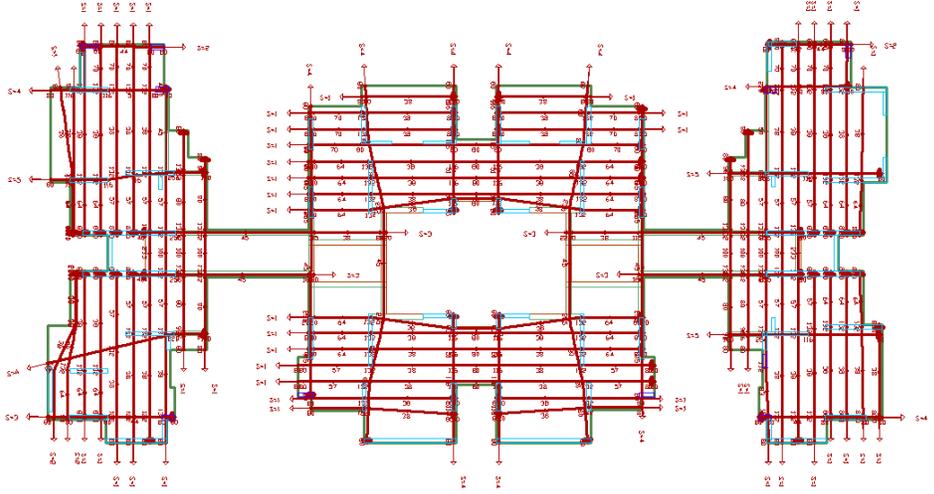
| | | |
|----------|----------------------|-------------------------------------|
| Cable | 3968.72 m | 2.96 m/m ² |
| Concreto | 258.14m ³ | 0.19 m ³ /m ² |

Piso Tipo

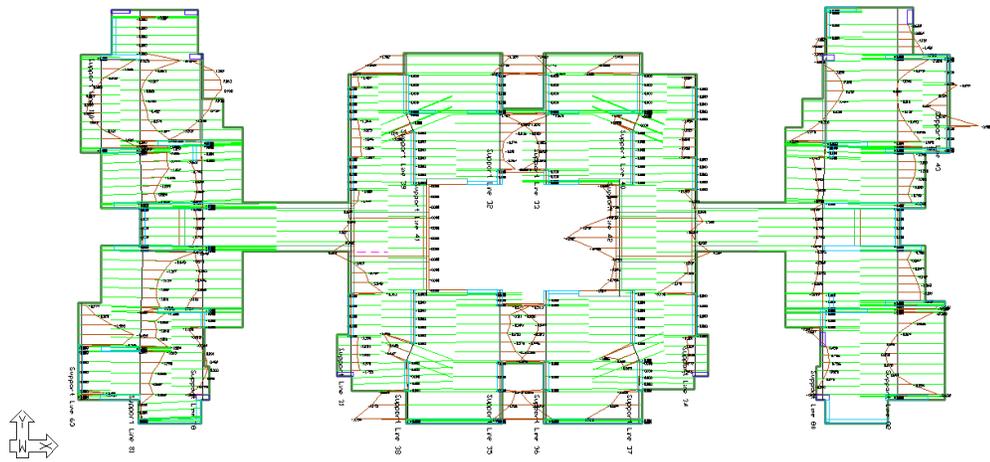
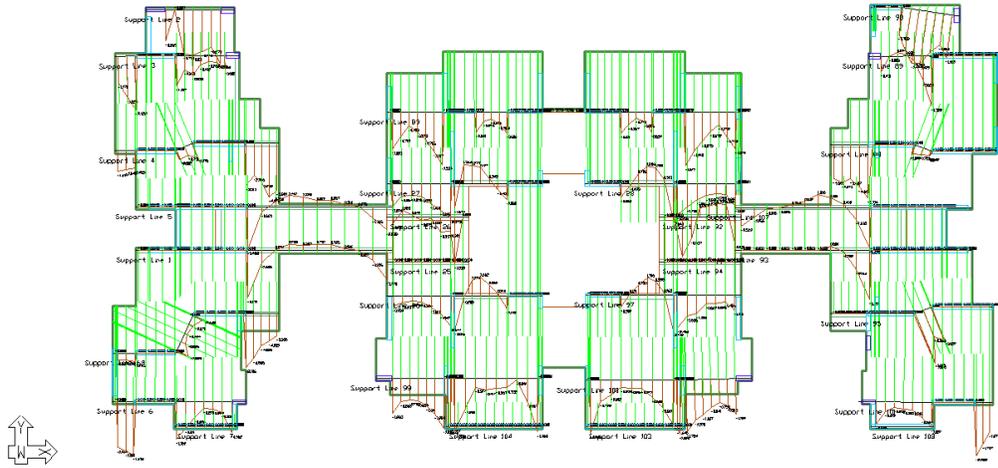
Geometría



Distribución de cable



Esfuerzos



Consumo

| | | |
|----------|----------------------|-------------------------------------|
| Cable | 1510.82 m | 2.58 m/m ² |
| Concreto | 97.84 m ³ | 0.17 m ³ /m ² |

6. APORTE AL CONOCIMIENTO

- Se adquirió un manejo avanzado en distintos software, como: ADAPT – Builder módulo Floor Pro, ADAPT-PT, DCC-CAD, AutoCAD; comprendiendo a fondo la funcionalidad de los mismos.
- Se ha obtenido entendimiento y mejor manejo de las normas [NSR-10 y ACI-318], extrayendo de éstas especificaciones y normas de diseño para el concreto presforzado.
- Se ha conseguido un mejor vocabulario y términos técnicos al momento de expresar las ideas en mente.
- Aprendizaje de análisis y lectura de planos arquitectónicos como estructurales.

7. CONCLUSIONES

- Haciendo una comparación rápida de costos entre una losa postensada y una de hormigón simplemente reforzado, se logra una reducción de costos significativa, ya que con el postensado los espesores de losa son menores y la cantidad de acero disminuye, así como el volumen del concreto.
- En los sistemas de losas de dos direcciones, donde se consiga un diseño de losa sin vigas, los espacios serán mucho más limpios y estéticos, cumpliendo de esta manera con uno de los objetivos más buscados en el uso de losas postensadas.
- Debido a que el presfuerzo introducido en las losas balancean el 100% de la carga muerta y de servicio, las deflexiones en la losa serán mínimas aún en claros más largos.
- Gracias a la combinación del concreto y el acero de presfuerzo, es posible producir en un elemento estructural que los esfuerzos y deformaciones se contrarresten total o parcialmente con los producidos por las cargas de balance, lográndose así diseños muy eficientes.
- Es necesario analizar la losa bajo todos los estados de cargas (condiciones iniciales, cargas de servicio y estado último), ya que se debe prever diseñar solamente con las cargas mayoradas, puesto que se puede llegar a fisurar la losa al momento de tensionar los cables.
- Si se hace un diseño con el balance de carga óptimo y necesario, y se cumplen las precompresiones promedias, se logra un diseño económico en cuanto a acero de presfuerzo y a acero adherido.

- Existe mayor ahorro de acero adherido en las losas de dos direcciones, debido a que si los esfuerzos a tensión no exceden lo especificado en las normas, no es obligatorio colocar aceros positivos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Tesis “concreto postensado”. Universidad Católica “Santo Toribio de Mogrovejo”. Facultad de ingeniería civil y ambiental. Chiclayo octubre del 2010.
- Tesis “Sistemas constructivos: Hormigón pretensado y postesado”. Universidad de la República. Facultad de arquitectura. Junio del 2011.
- Tesis “DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO PRESFORZADO”. Universidad Veracruzana, México. Facultad de ingenierías. Enero 2000.
- DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO, duodécima edición. Mc Graw Hill.
- Field procedures manual for unbonded single strand tendons. Pti post-tensioning institute. 3rd edition, first printing (pocket-size), April 2000.
- Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors. Pti Post-Tensioning Institute. Bijan O. Aalami, SE & Allan Bommer, PE.
- POST-TENSIONING INSTITUTE (2004). **Design of Post-Tensioning Slabs Using Unbonded Tendons**. Third Edition, Post-Tensioning Institute.
- International Code Council, “International Building Code” ICC, Washington, DC. USA, 2006.

- CALCULO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO PRESFORZADO. Ty Lin. EDITORIAL: Noriega.
- REINFORCED CONCRETE DESIGN OF TALL BUILDINGS. Bungale S. Taranath, PH.D., P.E., S.E.
- POST-TENSIONING INSTITUTE. Fifth edition.
- Design of post-tensioning slabs. PTI
- Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08)
- Concrete construction engineering, Handbook. Edward G. Nawy, Editor-in-Chief. Second Edition.