

**DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE CRITERIOS PARA USO DEL SISTEMA  
POSTENSADO NO ADHERIDO EN LOSAS DE EDIFICACIONES**

**LUIS FERNANDO VARGAS REMOLINA**

**Trabajo de grado modalidad Monografía  
Para optar al título de Especialista en Estructuras**

**Director:**

**Ing. Civil, PhD. D. Ricardo Cruz H.**  
Profesor de la escuela de Ingeniería Civil  
Universidad Industrial de Santander



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS  
BUCARAMANGA  
2017**

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por darme la fortaleza, el empeño y las ganas de seguir adelante en mi formación personal, académica y profesional. Gracias a Él todo es posible.*

*A Liliana García, mi compañera de vida, quien me apoyo, me asistió y siempre me acompañó en esta gran meta.*

*Agradezco a todas las personas que me han acompañado en mi formación y en mi vida, a mi amada familia por su apoyo incondicional, especialmente a mis padres y hermanos, por estar cada día a mi lado y apoyarme en este éxito.*

*A la empresa Ingetensa SAS, en cabeza de los ingenieros Abedulio Camargo y Luz Emilia Jiménez, quienes aportaron en todo para la realización de este proyecto.*

*A la Universidad Industrial de Santander, la escuela de Ingeniería Civil y en especial al grupo de investigación INME por las herramientas, el equipo y el conocimiento necesario para la realización de este proyecto y preocuparse por el desarrollo del mismo, a su director, el ingeniero Ricardo Cruz por manifestar su interés en dirigir este trabajo de grado, su confianza, apoyo y asesoría; y demás profesores de la escuela y de la especialización que han contribuido durante esta carrera.*

*Luis Fernando Vargas Remolina*

**CONTENIDO**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introducción .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>1. Marco teórico.....</b>  | <b>16</b> |
| 1.1. Concreto preesforzado .....  | 16        |
| 1.2. Perdidas en el preesfuerzo .....   | 26        |
| 1.3. Especificaciones técnicas y normativa para anclajes y torones de preesforzado.....   | 27        |
| 1.4. Ejemplos de edificaciones con losas postensadas ubicadas en el Área Metropolitana de Bucaramanga.....                            | 41        |
| <b>2. Evaluación de cantidades de obra en estructuras con diferentes configuraciones y usos diseñadas con losas postensadas .....</b> | <b>51</b> |
| 2.1. Densidades de proyectos construidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga .....  | 51        |
| 2.2. Comparación entre losas postensadas y losas macizas en un edificio de parqueaderos   | 53        |
| <b>3. Análisis de información y resultados.....</b>   | <b>56</b> |
| 3.1. Grandes luces .....  | 56        |
| 3.2. Usos y acabados.....   | 57        |
| 3.3. Altura del edificio .....  | 57        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.4. Grandes superficies .....  | 58        |
| 3.5. Comportamiento estructural.....                                    | 58        |
| <b>4. Conclusiones .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>5. Notaciones .....</b>  | <b>60</b> |
| <b>Referencias bibliográficas .....</b>                                 | <b>61</b> |
| <b>Apéndices .....</b>  | <b>64</b> |
| <b>Apéndice A: Certificado de anclajes fabricados por surelock.....</b> | <b>64</b> |
| <b>Apéndice B: Detalles del diseño proyecto no. 10 .....</b>            | <b>70</b> |

**LISTA DE TABLAS**

|  |    |
|--|----|
| <i>Tabla 1. Torones y alambres de preesfuerzo</i> .....  | 30 |
| <i>Tabla 2. Requerimientos de esfuerzo de rotura</i> .....   | 31 |
| <i>Tabla 3. Requerimientos de límite elástico</i> .....  | 31 |
| <i>Tabla 4. Relación de diámetro entre el centro y los cables externos</i> .....                           | 31 |
| <i>Tabla 5. Descripción edificio No. 1</i> .....   | 41 |
| <i>Tabla 6. Descripción edificio No. 2</i> .....   | 42 |
| <i>Tabla 7. Descripción edificio No. 3</i> .....   | 43 |
| <i>Tabla 8. Descripción edificio No. 4</i> .....   | 44 |
| <i>Tabla 9. Descripción edificio No. 5</i> .....   | 45 |
| <i>Tabla 10. Descripción edificio No. 6</i> .....  | 46 |
| <i>Tabla 11. Descripción edificio No. 7</i> .....  | 47 |
| <i>Tabla 12. Descripción edificio No. 8</i> .....  | 48 |
| <i>Tabla 13. Descripción edificio No. 9</i> .....  | 49 |
| <i>Tabla 14. Descripción edificio No. 10</i> .....   | 50 |
| <i>Tabla 15. Caracterización de proyectos construidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga</i><br>..... | 52 |
| <i>Tabla 16. Cuadro comparativo de cantidades de obra</i> .....  | 54 |
| <i>Tabla 17. Cuadro comparativo de cantidades de obra totales</i> .....                                    | 55 |

**LISTA DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Esfuerzos efectivos y pérdidas de aceros de preesfuerzo.....                              | 17 |
| <b>Figura 2.</b> Banco de tensionamiento y armado para vigas pretensadas.....                              | 18 |
| <b>Figura 3.</b> Viga prefabricada pretensada .....  | 19 |
| <b>Figura 4.</b> Viga postensada.....  | 19 |
| <b>Figura 5.</b> Vigas de puentes con postensado adherido .....  | 21 |
| <b>Figura 6.</b> Losa maciza con postensado no adherido .....  | 22 |
| <b>Figura 7.</b> Detalle típico del sistema postensado en losas. ....                                      | 23 |
| <b>Figura 8.</b> Losa maciza plana postensada antes de la fundida.....                                     | 24 |
| <b>Figura 9.</b> Edificio con losas planas postensadas .....   | 24 |
| <b>Figura 10.</b> Edificio con pórticos y losas postensadas.....   | 25 |
| <b>Figura 11.</b> Losa con vigas postensadas antes de fundida.....   | 25 |
| <b>Figura 12.</b> Comparativo esfuerzo-deformación entre los aceros de refuerzo y de preesfuerzo.<br>..... | 28 |
| <b>Figura 13.</b> Torones no adheridos y adheridos.....  | 29 |
| <b>Figura 14.</b> Carrete de acero de preesfuerzo desnudo. ....  | 30 |
| <b>Figura 15.</b> Tendón siete hilos denominación ASTM A416. ....  | 32 |
| <b>Figura 16.</b> Monotorón para sistema no adherido .....   | 33 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 17.</b> Sistema de anclaje multitorón para puentes .....              | 35 |
| <b>Figura 18.</b> Sistema de anclaje para losas con multitorón adherido.....    | 36 |
| <b>Figura 19.</b> Sistema de anclaje para losas con monotorón no adherido ..... | 37 |
| <b>Figura 20.</b> Anclaje para monotorón no adherido .....                      | 37 |
| <b>Figura 21.</b> Cuñas para postensado .....                                   | 39 |
| <b>Figura 22.</b> Anclajes no adheridos encapsulados .....                      | 40 |
| <b>Figura 23.</b> Ducto para postensado adherido.....                           | 40 |
| <b>Figura 24.</b> Render proyecto No. 1.....                                    | 41 |
| <b>Figura 25.</b> Construcción de losas postensadas edificio No. 1.....         | 41 |
| <b>Figura 26.</b> Render proyecto No. 2.....                                    | 42 |
| <b>Figura 27.</b> Construcción de losas postensadas proyecto No.2.....          | 42 |
| <b>Figura 28.</b> Render proyecto No. 3.....                                    | 43 |
| <b>Figura 29.</b> Construcción de losas postensadas proyecto No.3.....          | 43 |
| <b>Figura 30.</b> Render proyecto No. 4.....                                    | 44 |
| <b>Figura 31.</b> Construcción de losas postensadas proyecto No.4.....          | 44 |
| <b>Figura 32.</b> Render proyecto No. 5.....                                    | 45 |
| <b>Figura 33.</b> Construcción de losas postensadas proyecto No.5.....          | 45 |
| <b>Figura 34.</b> Render proyecto No. 6.....                                    | 46 |
| <b>Figura 35.</b> Construcción de losas postensadas proyecto No.6.....          | 46 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 36.</b> Render proyecto No. 7.....                            | 47 |
| <b>Figura 37.</b> Construcción de losas postensadas proyecto No.7 ..... | 47 |
| <b>Figura 38.</b> Render proyecto No. 8.....                            | 48 |
| <b>Figura 39.</b> Construcción de losas postensadas proyecto No.8 ..... | 48 |
| <b>Figura 40.</b> Render proyecto No. 9.....                            | 49 |
| <b>Figura 41.</b> Construcción de losas postensadas proyecto No.9 ..... | 49 |
| <b>Figura 42.</b> Render proyecto No. 10.....                           | 50 |
| <b>Figura 43.</b> Planta tipo postensada proyecto No.10 .....           | 50 |

## APÉNDICES

Apéndice 1: Certificado de anclajes fabricados por surelock.....64

Apéndice 2: Detalles del diseño proyecto no. 10.....70

## RESUMEN

**TITULO:** DEFINICIÓN Y EVALUACIÓN DE CRITERIOS PARA USO DEL SISTEMA POSTENSADO NO ADHERIDO EN LOSAS DE EDIFICACIONES<sup>I</sup>

**AUTORES:** Luis Fernando Vargas Remolina<sup>II</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Sistema postensado, acero de preesfuerzo, monotorón, anclajes, cuñas.

## DESCRIPCIÓN

El auge de aplicación del sistema postensado en losas de diferentes estructuras en Bucaramanga (Santander, Colombia), genera la necesidad de un estudio detallado sobre las prácticas actuales de construcción, sus componentes y las especificaciones establecidas.

En este trabajo se presenta una recopilación de información y detalles del sistema postensado, especialmente hace énfasis en el preesfuerzo aplicado en losas de edificios con torones no adheridos. Esta información se compila con el fin de ampliar un poco las especificaciones dadas por el título C de la NSR-10 para el concreto preesforzado.

Se presentan además los resultados de un estudio comparativo realizado para un proyecto en el Área Metropolitana de Bucaramanga, donde se evaluó una estructura con dos sistemas estructurales similares pero involucrando losas postensadas en una de las opciones evaluadas y losas macizas con refuerzo convencional en el otro.

El objetivo general de esta monografía es evaluar y demostrar por medio de la definición de unos criterios la obtención de algunos de los beneficios del postensado no adherido en losas y sus especificaciones. Además se presenta una recopilación de diferentes proyectos ubicados en el Área Metropolitana de Bucaramanga y se hace una caracterización por el uso de la estructura, las alturas tanto por pisos y metros, las luces entre elementos verticales y las áreas construidas.

Finalmente, se identifican las ventajas y beneficios del sistema, así como los diferentes usos que pueden tener el concreto postensado y la versatilidad que tiene el sistema en edificios de diferentes usos.

---

<sup>I</sup> Proyecto de grado desarrollado en la modalidad de monografía.

<sup>II</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil.

Director: Ricardo A. Cruz, Ingeniero Civil, PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEFINITION AND EVALUATION OF CRITERIA FOR USING THE POST-TENSIONING SYSTEM UNBONDED IN BUILDING`S SLABS <sup>III</sup>

**AUTHOR:** Luis Fernando Vargas Remolina<sup>IV</sup>

**KEY WORDS:** Post-tensioning system, prestressing steel, single-strand anchorages, wedges.

## DESCRIPTION

The application of the post-tensioning system in slabs of different structures in Bucaramanga (Santander, Colombia), generates the necessity of a detailed study on the current practices of construction, its compounds, and the established specifications.

This paper is a compilation of information and details of the post-tensioning system, which is emphasizing the prestressing applied to slabs of buildings with unbonded single strands. By the other hand, this information will broad in some way the specifications given by the NSR-10 Title C for the reinforced concrete.

The results of a comparative study for a project in the metropolitan area of Bucaramanga will be shown, where a structure with two similar structural systems but involving post-tensioning slabs were evaluated: the first one with solid slabs with post-tensioning system and the other one with conventional reinforcement.

The general objective of this monograph is to evaluate and demonstrate by the definition of some technical criteria the benefits of the non-adhered post-tensioning in slabs and their specifications. In addition, a compilation of different projects located in the metropolitan area of Bucaramanga are presented and a characterization by the use of the structure, the both heights: by floors and meters, the span between vertical elements and the built areas is made.

Finally, the advantages and benefits of the system are identified, as well as the different uses which it can have and its versatility in different buildings types.

---

<sup>III</sup> Degree work. Type monograph.

<sup>IV</sup> Faculty of physic – mechanical engineering, School of civil engineering.

Director: Civil Engineer, Ricardo Cruz, PhD.

## Introducción

La arquitectura de hoy en día, los estilos de vida contemporáneos, la necesidad de estructuras polifacéticas sin restricciones de espacios, la optimización de materiales y por consiguiente el ahorro en costos, representan un gran reto para la ingeniería. La posibilidad de aumentar las luces entre elementos verticales y por lo tanto la disminución en cantidad de estos, permite crear amplios espacios y por ende mayor comodidad para los usuarios; muchas veces conseguir grandes luces y el cumplimiento de deflexiones por normativa en los elementos, conlleva a grandes espesores de losa que limitan la altura libre de entre pisos. Actualmente en el país, especialmente en ciudades densamente pobladas, el costo del suelo repercute un aumento en el costo total de una construcción. La posibilidad de reducir el espesor de una losa considerablemente (hasta un 40%), podría en algunos casos aumentar una planta más sin superar la altura total de la edificación, lo que significa para el constructor una opción que beneficia el presupuesto total, además de la comodidad de servicio sin afectar la estabilidad de la estructura (Aalami, 2014).

En los últimos años, el concreto reforzado ha sido el material estructural más utilizado en la construcción de edificios de diferente uso. Esto es debido a la disponibilidad que ofrece este material, así como a la experiencia acumulada de años que ha permitido desarrollar procesos de cálculo y métodos constructivos estandarizados. Sin embargo, las losas de las edificaciones, además de ser estables y resistentes, deben satisfacer las condiciones de funcionalidad y durabilidad exigidas. La escasa resistencia a la tracción del concreto hace que aparezcan fisuras debidas a retracción y a tensiones en pequeñas solicitaciones, esto afecta la durabilidad de la estructura y la deformabilidad de la misma. A lo anterior hay que sumarle el efecto que pueda dar

lugar a deflexiones que superan las instantáneas y conllevan a daños en los elementos no estructurales que soportan las losas (Asociación Técnica Española de Pretensado, 1996).

Evidentemente hay limitaciones que tienen los elementos que trabajan a flexión construidos con concreto reforzado, por ello, a medida que las luces son mayores, el peso propio de la estructura aumenta, ya que la disposición del acero de refuerzo y el dimensionamiento de los elementos están directamente relacionados con la luz libre a cubrir y las cargas a soportar.

Pues bien, el concreto preesforzado y en especial el postensado en losas, tema del cual tratara este trabajo, constituye sin duda una solución real a las condiciones anteriores. Postensar una estructura consiste en introducir, por medio de acero de alta resistencia, esfuerzos de pre-compresión al concreto que permitan minimizar las tensiones que este debe soportar. Estas fuerzas inducidas ayudan a equilibrar el peso propio de la estructura e incluso las cargas permanentes y las sobrecargas. Los efectos del postensado conllevan a que la estructura sea más rígida, durable y que las deformaciones sean enormemente reducidas (Nawy, 2010).

Hoy en día esta técnica ha tomado más participación en la construcción de edificaciones en el país, en especial en Bucaramanga, según compilación de información en diferentes constructoras de la ciudad, se han construido varios proyectos utilizando diferentes sistemas estructurales con losas postensadas. Este trabajo refleja la recopilación de información que permite conocer un poco más de este sistema, algunos edificios construidos en la ciudad y una compilación de diferentes especificaciones que aclaren las normativas estipuladas y la viabilidad del uso del sistema a la hora de diseñar una estructura. Adicional se muestran unos criterios importantes que se deben tener en la arquitectura y diseño de la estructura para obtener mayores beneficios del sistema postensado implementado en losas de edificios.

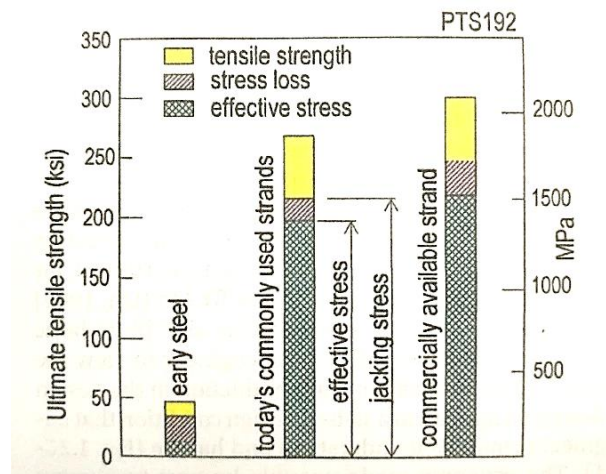
## **1. Marco teórico**

### **1.1. Concreto preesforzado**

Según definición del American Concrete Institute - ACI, en el informe ACI 318S-14, el concreto preesforzado es aquel concreto reforzado al que se le han introducido esfuerzos internos por medio de refuerzo activo o preesforzado con el fin de reducir los esfuerzos potenciales de tracción en el concreto causados por las cargas.

El preesforzado es simplemente la aplicación de fuerzas que tienden a doblar y a comprimir un elemento de concreto. Normalmente, se aplica para contrarrestar las tensiones de flexión y tracción que resultan de otras cargas.

En 1872, PH. Jackson, un ingeniero de San Francisco, EEUU, obtuvo una patente para el postensado. El insertó varillas de acero en unidades de mampostería y las tensionaba con un dispositivo roscado. Aplicó las fuerzas de contrarrestar correctamente, pero debido a las propiedades del acero disponible en 1886, estas fuerzas no eran efectivas por mucho tiempo. Su esfuerzo fue seguido en 1888 por C.W. Doehring, quien obtuvo una patente en Alemania para pretensar las losas con alambres metálicos. Debido a que inicialmente el acero tenía un rendimiento de esfuerzos relativamente bajo, ninguno de estos intentos tuvo éxito. El bajo esfuerzo de tensión inicial combinado con una alta fluencia y retracción del hormigón, hizo perder la mayor parte de la fuerza de tensión aplicada a la estructura, dejando prácticamente el acero inefectivo (Billington, 2004). En la figura 1 se muestra los esfuerzos efectivos y las pérdidas de los aceros utilizados en el inicio del preesforzado y los utilizados comúnmente hoy en día.



**Figura 1.** Esfuerzos efectivos y pérdidas de aceros de preesfuerzo.

Adaptado de Post-tensioned buildings, Design and construction, Bijan O. Aalami, 2014

De 1926 a 1928, Eugene Freyssinet reconoció los efectos de las pérdidas de tensión a largo plazo y utilizó un nuevo acero de alta resistencia para construir exitosamente elementos preesforzados en Francia. En 1940 introdujo el sistema Freyssinet, compuesto por anclajes de cuña para 12 tendones de alambre. Los avances en el acero de alta resistencia, junto con la invención del sistema de anclaje, demostraron ser otro avance en la aplicación efectiva del preesforzado (Aalami, 2014).

El concepto básico de concreto reforzado, tanto para la construcción preesforzada o no preesforzada, es que el refuerzo de acero se coloca en aquellas ubicaciones donde se producen esfuerzos de tensión. En concreto preesforzado, se utiliza acero de alta resistencia. Este refuerzo es tensado antes de la aplicación de cargas externas. Esta tensión inicial del refuerzo pre-comprime el hormigón, dándole la capacidad de resistir cargas más altas antes del agrietamiento (Collins and Mitchell, 1997).

En un principio el preesforzado estaba enfocado o aplicado a la construcción de puentes o estructuras especiales, sin embargo cada vez es más frecuente la aplicación en la construcción de

edificios. Existen dos tipos de preesforzado según la aplicación de las fuerzas en los elementos de concreto y en el método constructivo usado para estos. El concreto preesforzado puede ser pretensado o postensado según diferentes condiciones (Naaman, 2004).

**1.1.1. Pretensado.** Es el preesfuerzo aplicado en elementos estructurales antes del vaciado del concreto, este tipo de preesfuerzo es típico en estructuras prefabricadas, ya que se necesitan bancos de tensionamiento de gran tamaño, como se muestra en la figura 2. Los torones se tensionan y se anclan a los bancos, luego se vacía el concreto y después de alcanzada una resistencia específica se liberan los torones del banco, estos tienden a acortarse, pero no lo hacen por la adherencia con el concreto, de esta forma es transferida la carga para comprimir el concreto (Montoya, 2012).



**Figura 2.** Banco de tensionamiento y armado para vigas pretensadas

Las características de este tipo de preesfuerzo son:

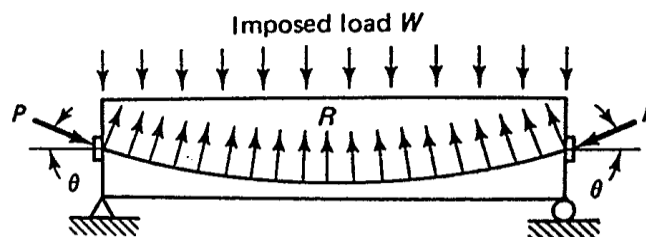
- Se pueden fabricar elementos prefabricados transportables, en condiciones ideales, como se muestra en la figura 3.
- El anclaje se da por adherencia.

- El acero tiene trayectorias rectas.
- Los elementos son generalmente simplemente apoyados (Forcada, 1999).



**Figura 3.** Viga prefabricada pretensada

**1.1.2. Postensado.** Es el preesfuerzo aplicado en elementos estructurales después del vaciado y fraguado del concreto. Los torones o cables de acero son instalados durante el proceso de armado, ensamble de formaleta y acero de refuerzo convencional, se vacía el concreto y se realiza el tensionamiento después de alcanzar una resistencia especificada. Una vez la fuerza del acero alcanza el valor de diseño, el tendón es anclado al concreto, conservando la tensión en el acero y la compresión en el concreto. En la figura 4 se muestra un diagrama de fuerzas en un viga postensada (Montoya, 2012).



**Figura 4.** Viga postensada

Adaptado de Prestressed Concrete, Edward G. Nawy, 2010

Las características de este tipo de preesfuerzo son:

- Elementos prefabricados y fundidos in situ.
- Se aplica el preesfuerzo después del fraguado.
- El anclaje requiere de dispositivos mecánicos.
- La trayectoria de los torones puede ser recta o curva.
- El elemento puede ser simplemente apoyado o tener continuidad en los apoyos (elemento hiperestático) (Forcada, 1999).

El postensado mejora la debilidad natural del concreto, la tensión, y aprovecha sus resistencia a la compresión. En las estructuras, esto se logra mediante tendones o cables de acero que se colocan antes del vaciado y se tensionan posteriormente utilizando gatos hidráulicos cuando se alcanza una resistencia específica, lo que permite desencofrar los elementos y avanzar en el proceso constructivo. Los cables quedan fijos en tensión utilizando sistemas de anclaje y sujeción especialmente diseñados en cada extremo. Esto aporta compresión en el borde de los elementos estructurales, lo que aumenta la resistencia del concreto para resistir esfuerzos de tensión.

Si los tendones se curvan, de tal manera que sigan un perfil determinado, además de ejercer compresión en el perímetro, van a ejercer un beneficioso conjunto de fuerzas que compensan las cargas aplicadas de servicio y peso propio aliviando parte de la estructura y contribuyendo a una mayor resistencia (Nawy, 2010).

El postensado puede ser adherido o no adherido, según la forma en cómo trabaja el acero de preesfuerzo con el concreto, como se explica a continuación:

**1.1.2.1. Postensado adherido.** El postensado adherido por lo regular es un sistema de más de un torón, estos van en un ducto metálico corrugado y conforman un cable, tal y como se muestra en la figura 5, este sistema también es llamado multitorón y luego de colocar la tensión a los cables, el ducto es relleno con un mortero o grout que no solo le da protección a los torones, si no que asegura la adherencia al resto de la estructura.

Este sistema se diferencia con el postensado no adherido en la forma en la que transmite las fuerzas a la estructura, ya que no depende exclusivamente de los anclajes, sino también de la adherencia entre el ducto del cable y el concreto (Palacios y Cachay, 2010).



**Figura 5.** Vigas de puentes con postensado adherido

Adaptado de Curso de Concreto Preesforzado, Jaime Garzón – STUP Latinoamérica, 2016

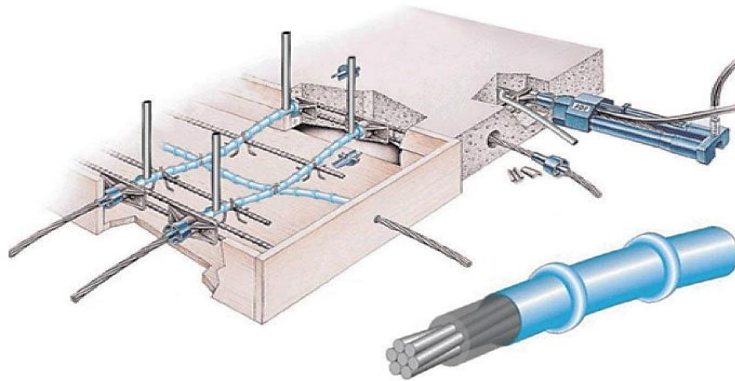
**1.1.2.2. Postensado no adherido.** El postensado no adherido es un sistema monotorón, conformado por un torón recubierto en una vaina o funda plástica de polietileno de alta densidad, tiene una grasa de alta resistencia mecánica que le permite deslizarse libremente dentro de la funda al momento del tensado. La fuerza de tensión depende exclusivamente de los anclajes en sus extremos, ya que por la grasa y la funda plástica, no existe adherencia entre el torón y el

concreto de la estructura. En la figura 6 se muestra el armado de una losa con torones adheridos (Palacios y Cachay, 2010).



**Figura 6.** Losa maciza con postensado no adherido

**1.1.3. Losas postensadas.** El postensado se usó en losas por primera vez en los EE.UU. a mediados de los años cincuenta. Fueron los americanos los pioneros en su empleo en el campo de la edificación, las primeras losas planas postensadas utilizadas en edificios datan de 1955, estos primeros elementos se construyeron mediante el método “lift-slab” o método de la losa elevadora. Las losas se fundían en planta baja, sirviendo unas de encofrado de otras y posteriormente se izaban hasta su posición final. El postensado se introdujo en losas para resolver problemas de peso, deflexiones y fisuración que surgieron en losas reforzadas convencionalmente. Desde entonces el postensado se ha convertido en una herramienta o un sistema muy práctico para resolver problemas regulares en la construcción de edificios (Aalami, 2014). En la figura 7 se muestra una losa postensada con los detalles y accesorios utilizados regularmente.



**Figura 7.** Detalle típico del sistema postensado en losas.

Adaptado de VSL Chile – [www.vslchile.cl](http://www.vslchile.cl) (Consultado en abril 2017)

**1.1.3.1. Sistemas de pisos – Losas planas.** Las losas planas son elementos estructurales sin vigas que soportan las cargas del piso directamente, la losa es el elemento primario que transmite estas cargas a los elementos verticales. El postensado va distribuido en estas losas mediante franjas de cables que se modelan para soportar y contrarrestar las cargas sobreimpuestas (ver figura 8). Este tipo de losas son de gran aplicación en edificios altos, de grandes áreas y grandes luces, ya que gracias a su espesor sin vigas descolgadas favorecen la altura entre piso libre y dan amplitud a los espacios, tal y como se muestra en la figura 9. Este sistema de losas es una buena opción en zonas de alto riesgo sísmico debido a que aligeran la edificación y disminuyen la altura del edificio, logrando un mejor comportamiento antes sismos de los edificios con este sistema. Además de lo anterior, estas losas han presentado un muy buen comportamiento en zonas costeras, ya que responden satisfactoriamente a las cargas producidas por corrientes de vientos fuertes (Aalami y Kelley, 2001).



**Figura 8.** Losa maciza plana postensada antes de la fundida

Adaptado de Post-tensioned buildings, design and construction, Bijan O. Aalami, 2014



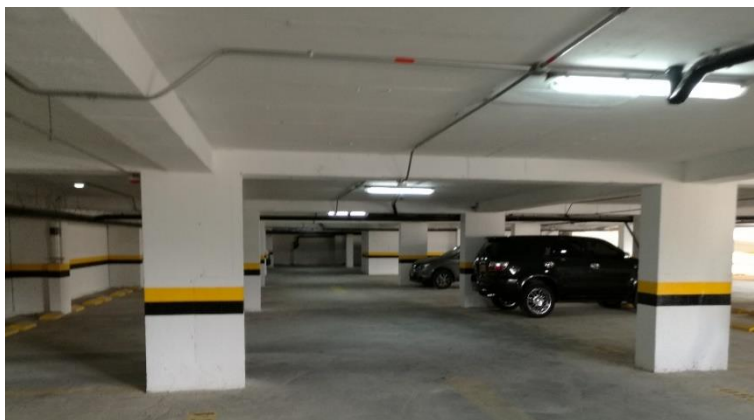
**Figura 9.** Edificio con losas planas postensadas

Adaptado de Post-tensioned buildings, design and construction, Bijan O. Aalami, 2014

**1.1.3.2. Losas postensadas con vigas.** En ocasiones por requerimientos normativos sísmicos o cuando la relación entre luces y espesor de losa no es apropiado para una losa plana, es conveniente usar sistemas de losas con vigas postensadas que ayudan en el comportamiento sísmico. Gracias al postensado se pueden lograr elementos horizontales con grandes luces y una sensación de amplitud que permiten lograr paneles grandes, como se muestra en la figura 10. Se

modelan estructuras como pórticos que forman parte del sistema de resistencia sísmica y se implementa el postensado para control de deflexiones en grandes luces y control de fisuración (Aalami, 2014).

Si bien es cierto el sistema de pórticos es tradicional y regularmente se construye con acero de refuerzo pasivo, la implementación del postensado en estos sistemas permite usar losas macizas con espesores reducidos y la construcción de grandes luces, como se evidencia en la figura 11.



**Figura 10.** Edificio con pórticos y losas postensadas.



**Figura 11.** Losa con vigas postensadas antes de fundida

Tal y como se muestra en la figura 11, las vigas y losas postensadas requieren de un acero de refuerzo convencional mínimo por ductilidad y temperatura, este refuerzo para retracción del concreto viene especificado en una cantidad mínima por normativas vigentes, en Colombia por el Reglamento de Construcción Sismo Resistente, NSR-10.

## **1.2. Perdidas en el preesfuerzo**

**1.2.1. Instantáneas o inmediatas.** En el concreto preesforzado se tienen unas pérdidas de preesfuerzo a corto plazo debido a la curvatura de los cables, la instalación y la fricción de los materiales que se ven reflejadas en la fuerza inicial (Garzón, 2016). Las pérdidas a corto plazo más importantes son:

- Perdidas por fricción y curvatura entre concreto y acero.
- Asentamiento de cuñas en el anclaje.
- Acortamiento elástico del concreto.

**1.2.2. Diferidas o a largo plazo.** Las pérdidas a largo plazo son producidas generalmente por las condiciones y características de los materiales utilizados y se ven reflejadas en la fuerza efectiva de preesfuerzo (Garzón, 2016). Las pérdidas más frecuentes son:

- Perdida de humedad y retracción.
- Flujo plástico o fluencia bajo carga axial permanente.
- Relajación del acero de preesfuerzo.

### **1.3. Especificaciones técnicas y normativa para anclajes y torones de preesforzado**

El sistema postensado está básicamente conformado por: concreto, acero de preesfuerzo o torones, anclajes y cuñas, hay algunos accesorios adicionales que permiten el armado del sistema pero que no aportan a la resistencia de este (Kelley, 2003).

En el título C del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, el cual se encuentra basado en la norma americana ACI 318-08, se presentan las especificaciones de los materiales para el concreto preesforzado en Colombia. Estas especificaciones hacen referencia a normas americanas del ASTM y especificaciones del Post-Tensioning Institute, PTI. A continuación se presenta la recopilación de los requisitos para los materiales utilizados para el preesforzado de las estructuras y los accesorios complementarios según la NSR-10 y las referencias a las cuales hace esta norma.

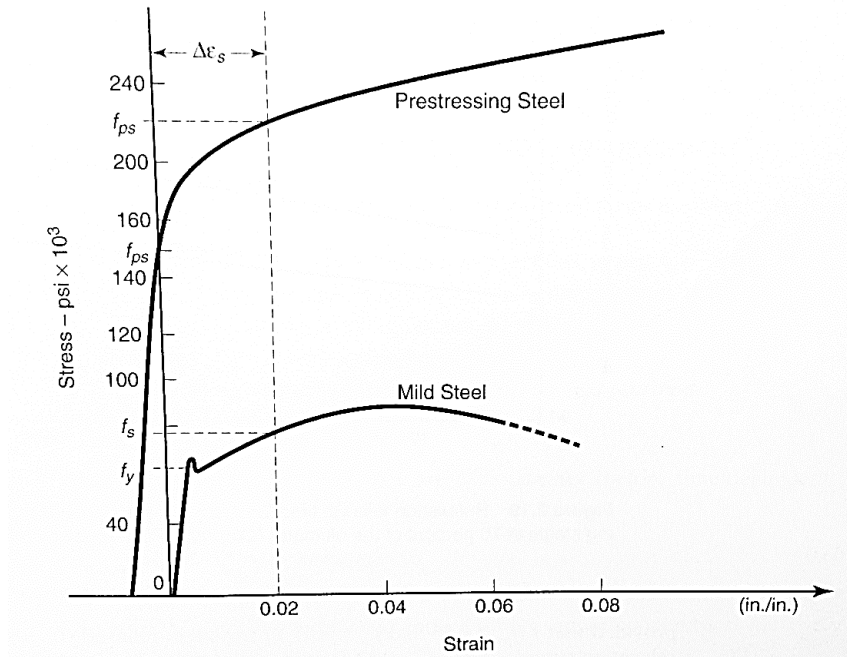
**1.3.1. Acero de preesforzado.** En el Reglamento Colombiano, NSR-10, está especificado así:

acero de alta resistencia como alambre, barra, torón, o un paquete (tendón) de estos elementos, utilizado para aplicar fuerzas de preesforzado al concreto.

El acero preesforzado debe cumplir con una de las siguientes normas:

- (a) Alambre: NTC 159 (ASTM A421M).
- (b) Alambre de baja relajación: NTC 159 (ASTM A421M).
- (c) Torón: NTC 2010 (ASTM A416M).
- (d) Barras de alta resistencia: NTC 2142 (ASTM A722).

Para concreto postensado se utiliza regularmente torón de 7 hilos de alambre designación ASTM A416, en diámetros de 1/2" (12.7 mm) y 5/8" (15.24 mm). Este acero es de alta resistencia, generalmente grado 270, que alcanza resistencias últimas mayores al acero de refuerzo (Madrazo, 2006), esta comparación se evidencia en la figura 12.

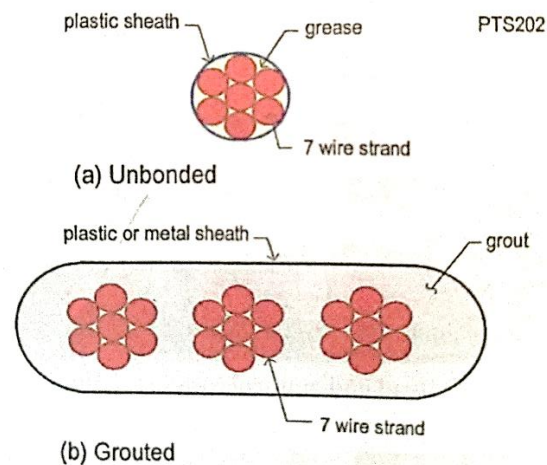


**Figura 12.** Comparativo esfuerzo-deformación entre los aceros de refuerzo y de preesfuerzo.

Adaptado de Prestressed Concrete, Edward G. Nawy, 2010

En el postensado se pueden usar tendones adheridos o no adheridos, según el uso o el elemento en construcción. Los tendones siempre llevan un ducto que los protege o los agrupa dependiendo de la adherencia con el concreto, si es adherido los ductos suelen ser metálicos, estos se instalan junto con el acero de preesfuerzo y posterior al tensionamiento se inyecta una lechada de cemento en el ducto para ocasionar la adherencia con el concreto. La lechada sirve como inhibidor de corrosión. Si los tendones son no adheridos, estos van recubiertos de una grasa de alta temperatura, la cual facilita su movimiento dentro del concreto y los protege de corrosión, y una funda de polipropileno

de alta densidad que evita la adherencia con el concreto, en la figura 13 se muestran los componentes de un tendón no adherido (a) y uno adherido (b) (McCormac, 2010).



**Figura 13.** Torones no adheridos y adheridos.

Adaptado de Post-tensioned buildings, design and construction, Bijan O. Aalami, 2014

El acero de preesfuerzo debe ser evaluado y certificado según norma ASTM A416, cumpliendo último esfuerzo de tensión, carga mínima al 1% de deformación, elongación antes de falla, módulo de elasticidad, diámetros y áreas netas por torón y debe ser de baja relajación y relevado de esfuerzos. Los diámetros regularmente utilizados para este sistema son de 1/2" (12.7 mm) y 5/8" (15.2 mm), los cuales tienen diferentes propiedades y requerimientos, como se encuentra especificado en la ASTM A416 (Madrado, 2006).

Cada rollo o carrete que sale de planta de producción, debe tener identificación, grado del acero, número de bobina, temperatura, tipo de acero (relajación normal o relevado de esfuerzos) y su certificado de calidad y resistencia, en la figura 14 muestra cómo llega un carrete de torón de 5/8" a una obra para su posterior instalación, estos rollos pesan aproximadamente entre 2.500 kg y 3.500 kg (ASTM A416).



**Figura 14.** Carrete de acero de preesfuerzo desnudo.

**1.3.1.1. Ensayo de relajación.** Al acero usado en el preesfuerzo de estructuras de concreto, se le deben hacer ensayos de pérdidas por relajación por muestras representativas en un periodo de no menos de 1000 horas, ensayados a 20 °C y esforzados inicialmente a no menos de 70% de la resistencia a la rotura mínima especificada. Estos ensayos deben cumplir ASTM A416 y ASTM E328 (PTI, 2000).

**1.3.1.2. Especificaciones ASTM A416.** El valor de la resistencia a tracción,  $F_{pu}$ , debe basarse en el grado o tipo de acero de preesfuerzo, los valores máximos están estipulados en la tabla 1:

**Tabla 1.** Torones y alambres de preesfuerzo

| Tipo  | Valor máximo $F_{pu}$ permitido para cálculos de diseño | Norma ASTM |
|---|---|------------|
| Torón (liberado de esfuerzos y baja relajación)   | 1860 MPa  | A416M      |
| Alambre (liberado de esfuerzos y baja relajación) | 1725 MPa  | A421M      |

Adaptado de ACI 318S-14

A continuación, en las tablas 2, 3 y 4, se relacionan las características más importantes para el acero de alta resistencia para presforzado según norma ASTM A416, se muestran para los diámetros regularmente utilizados.

**Tabla 2.** *Requerimientos de esfuerzo de rotura*

| Diámetro nominal del torón |       | Esfuerzo de rotura |       | Área nominal del torón |                 | Peso nominal del torón |          |
|----------------------------|-------|--------------------|-------|------------------------|-----------------|------------------------|----------|
| in                         | mm    | lbf                | kN    | in <sup>2</sup>        | mm <sup>2</sup> | lb/1000ft              | kg/1000m |
| <b>Grado 270</b>           |       |                    |       |                        |                 |                        |          |
| 1/2                        | 12,7  | 41300              | 183,7 | 0,153                  | 98,71           | 520                    | 775      |
| 5/8                        | 15,24 | 58600              | 260,7 | 0,217                  | 140             | 740                    | 1102     |

Adaptado de ASTM A416

**Tabla 3.** *Requerimientos de límite elástico*

| Diámetro nominal del torón |       | Carga inicial |       | Carga mínima al 1% de deformación |        |
|----------------------------|-------|---------------|-------|-----------------------------------|--------|
| in                         | mm    | lbf           | kN    | lbf                               | kN     |
| <b>Grado 270</b>           |       |               |       |                                   |        |
| 1/2                        | 12,70 | 4.130         | 18,40 | 35.100                            | 156,10 |
| 5/8                        | 15,24 | 5.860         | 26,10 | 49.800                            | 221,50 |

Adaptado de ASTM A416

**Tabla 4.** *Relación de diámetro entre el centro y los cables externos*

| Diámetro nominal del torón |       | Diferencia mínima entre el diámetro del cable central y el diámetro de cables exteriores |        |
|----------------------------|-------|--|--------|
| in                         | mm    | in   | mm     |
| <b>Grado 270</b>           |       |  |        |
| 1/2                        | 12,70 | 0,0030   | 0,0762 |
| 5/8                        | 15,24 | 0,0040   | 0,1016 |

Adaptado de ASTM A416

Hay pérdidas de tensión en el acero (sin incluir las de fricción) que pueden aproximarse a los 60 ksi (414 MPa), lo que equivale a la resistencia de una barra de refuerzo común, por lo tanto es

evidente que se necesitan aceros de alto grado que tienen resistencias mínimas muy superiores a este valor para poder lograr un postensado efectivo (Naaman, 2004).

También se requieren otras propiedades en el acero de preesfuerzo como permanecer elástico hasta tensiones relativamente altas, ductilidad suficiente antes del esfuerzo de falla, baja relajación, resistencia a la fatiga y a la corrosión y que sea económico y fácil de manejar (Naaman, 2004). En la figura 15 se muestra un tendón siete hilos denominación ASTM A416 de 1/2”.



**Figura 15.** Tendón siete hilos denominación ASTM A416.

### **1.3.1.3. Esfuerzos admisibles en el acero de preesforzado.** Según la NSR-10 en el capítulo

C.18, los esfuerzos de tracción en el acero de preesforzado no deben exceder:

- (a) Durante el tensionamiento en el extremo del gato:  $0.94 F_{py}$

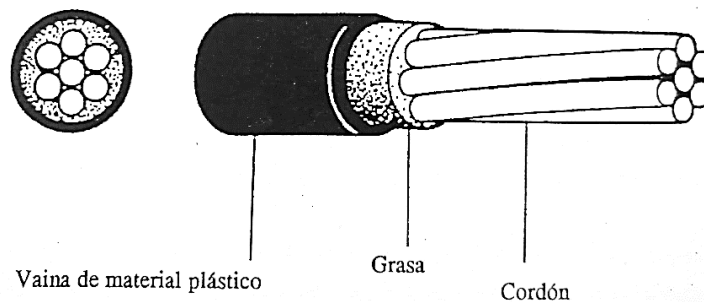
Pero no mayor que el mínimo entre  $0.80 F_{pu}$  y el máximo valor recomendado por el fabricante del acero o los dispositivos de anclaje.

- (b) Inmediatamente después de transferencia del preesfuerzo:  $0.82 F_{py}$ , pero no mayor que  $0.74 F_{pu}$ .

**1.3.1.4. Revestimiento para torones no adheridos.** El monotorón no adherido debe tener un recubrimiento que lo inhiba de adherencia con el concreto, esta funda debe tener las siguientes propiedades (PTI, 2000):

- Resistencia y durabilidad suficiente para soportar los posibles daños durante la fabricación, el transporte, la instalación y el vaciado del concreto.
- Debe ser impermeable y proteger de la humedad el acero.
- Químicamente estable, que soporte la exposición a altas temperaturas y los cambios agresivos durante el vaciado y el curado del concreto y la vida de la estructura. Debe estar libre de iones de cloruros que puedan ocasionar corrosión.
- No reactivo con el concreto, el acero y los accesorios del sistema.

El recubrimiento debe ser continuo en todo el torón para prevenir la introducción de lechada o cemento al acero de preesfuerzo, este es regularmente de polipropileno de alta densidad. En la figura 16 se muestra la composición del recubrimiento del torón no adherido.



**Figura 16.** Monotorón para sistema no adherido

Adaptado de Recomendaciones para construcción de losas postensadas, Asociación Técnica Española de Pretensado, 1996

**1.3.2. Anclajes y cuñas.** Los anclajes para el sistema postensado son regularmente fabricados en acero fundido de alta ductilidad, estos pueden variar geoméricamente dependiendo del sistema implementado, es decir si es adherido o no el postensado al concreto (Aalami, 2014).

Según capítulo 18, numeral 21 de la NSR-10, los anclajes y conectores para tendones adheridos y no adheridos deben desarrollar al menos el 95% de  $F_{pu}$  cuando se ensayen bajo condiciones de no adherencia, sin que excedan la deformación prevista. Para los tendones adheridos los anclajes y conectores deben ser colocados de manera que  $F_{pu}$  se desarrolle al 100% en las secciones críticas, después que el acero de preesfuerzo este adherido al elemento.

Según la NSR-10, en el caso de elementos no adheridos sometidos a cargas repetitivas, debe prestarse atención especial a la posibilidad de fatiga en los anclajes y conectores. Para ir a un contexto más actualizado, según el ACI 318S-14, en el capítulo 25.9, La fuerza de preesforzado en el dispositivo de anclaje,  $P_{pu}$ , debe exceder el menor valor de (a) hasta (c), donde 1.2 es el factor de carga:

(a)  $1.2 (0.94 \cdot F_{py}) \cdot A_{ps}$

(b)  $1.2 (0.80 \cdot F_{pu}) \cdot A_{ps}$

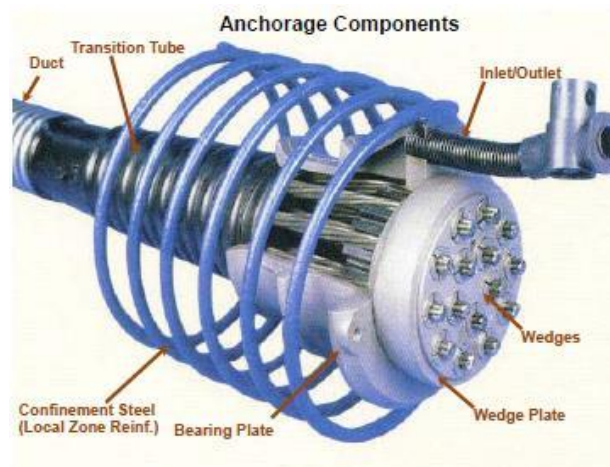
(c) La máxima fuerza en el gato designada por el suministrador de los dispositivos de anclaje, multiplicada por 1.2

Donde  $A_{ps}$  es el área del acero de preesfuerzo en la zona de tracción por flexión.

Cuando se utilicen dispositivos de anclaje especiales, debe colocarse refuerzo de superficie adicionalmente al refuerzo de confinamiento especificado para el dispositivo de anclaje.

**1.3.2.1. Anclajes para postensado adherido.** Para postensado adherido se utilizan platinas de multitorón que varían dependiendo del número de torones en cada ducto, estas transmiten la fuerza del torón directamente al concreto. Adicional se debe contar con unos dispositivos mecánicos que ayudan en esa transferencia, estos dispositivos sirven de apoyo para las placas de anclajes y como guía al ducto de acero donde van instalados los torones. El sistema de anclaje para postensado adherido multitorón consta de: cuñas, platina o bloque de anclaje, guía metálica, ducto de acero y refuerzo en zonas de anclaje, este sistema se muestra en las figuras 17 y 18, para puentes y losas respectivamente (PTI, 2013).

Según el ACI 318S-14, en el capítulo 25.8, para tendones adheridos, los anclajes y conectores deben localizarse de manera tal que  $F_{pu}$  se desarrolle al 100% en las secciones críticas, después de que el acero de preesforzado haya sido adherido al miembro.



**Figura 17.** Sistema de anclaje multitorón para puentes

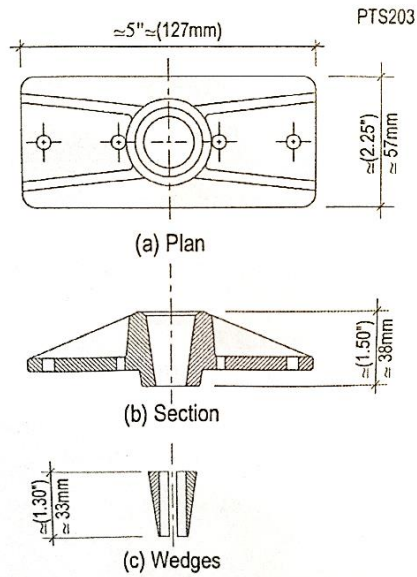
Adaptado de Post-Tensioning Terminology – PTI, 2013



**Figura 18.** Sistema de anclaje para losas con multitorón adherido

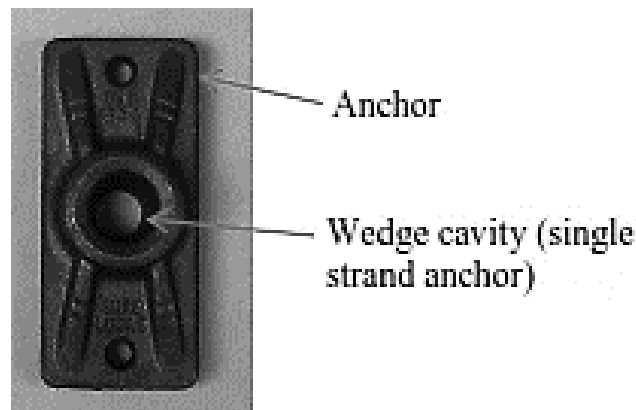
Adaptado de Post-tensioned buildings, design and construction, Bijan O. Aalami, 2014

**1.3.2.2. Anclajes para postensado no adherido.** Los componentes básicos para el anclaje de un sistema no adherido monotorón para losas postensadas consta de un anclaje tipo platina hecho de acero fundido de alta ductilidad y cuñas en cono que transfieren el esfuerzo de tensión al concreto. Regularmente se deja un anclaje fijo o muerto en el cable que se instala en el momento del corte del cable, el anclaje vivo o de tensado es instalado en el momento de la colocación de los torones y es anclado al cable en el procedimiento de tensionamiento. Ambos anclajes tienen la misma tipología y se muestran a continuación en las figuras 19 y 20 (Aalami, 2014):



**Figura 19.** Sistema de anclaje para losas con monotorón no adherido

Adaptado de Post-tensioned buildings, design and construction, Bijan O. Aalami, 2014



**Figura 20.** Anclaje para monotorón no adherido

Adaptado de Post-Tensioning Terminology – PTI, 2013

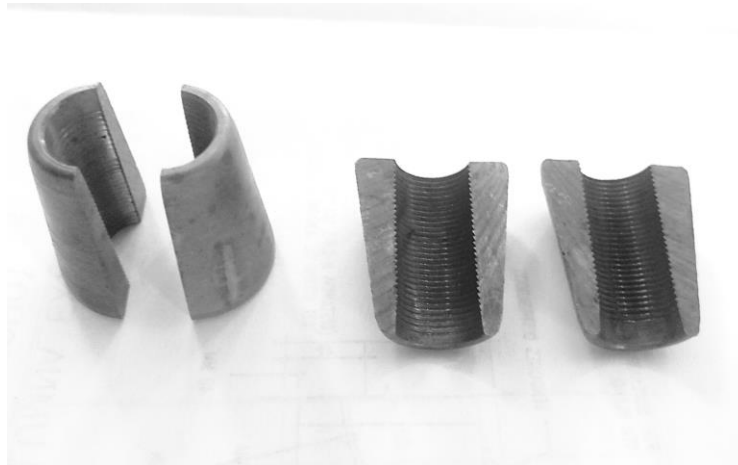
Dado que en casi todos los casos, la resistencia de diseño será menor que la resistencia a la deformación, el requisito de que los anclajes para los tendones no adheridos desarrollen el 95% de la resistencia real a la rotura del material del cable, proporciona un margen de seguridad sustancial entre la capacidad última y la resistencia del diseño del tendón (PTI, 2000).

Según el ACI 318S-14, en el capítulo 25.8, en el caso de la construcción no adherida sometida a cargas repetitivas, debe prestarse atención especial a la posibilidad de fatiga en los anclajes y conectores del acero de preesforzado.

Los anclajes deben ser sometidos a pruebas tracción, de fatiga y conocer el esfuerzo transmitido por el anclaje al concreto. Adicional al sistema se deben colocar algunos refuerzos con varillas convencionales en las zonas de anclaje para aportar a la resistencia del concreto.

Existen unos anclajes para postensado no adherido de la marca Surelock muy conocidos en el país, estos son importados desde EE.UU. y cumplen todos los requisitos de norma NSR-10, además con las especificaciones del PTI, instituto de postensado referente a nivel mundial. Este anclaje se le han realizado distintas pruebas según normativas y cuenta con un certificado emitido por el International Code Council, ICC en Estados Unidos (ver anexo 1). En este certificado se evidencian algunas especificaciones adicionales de este tipo de anclajes.

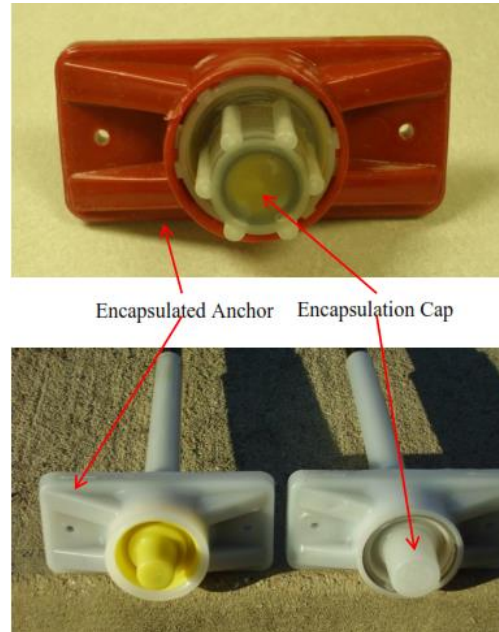
**1.3.2.3. Cuñas.** La cuña estándar para cualquier sistema de preesforzado está compuesta por dos partes que forman un cono truncado, internamente esta mecanizado con dientes anulares, como se muestra en la figura 21. Después del mecanizado, las cuñas son endurecidas mediante proceso térmico para crear una superficie dura, lo que permite que los dientes sujeten el torón de una manera efectiva, pero deben ser suaves para poder ingresar lo suficiente al agujero de la platina de anclaje (Aalami, 2014).



**Figura 21.** Cuñas para postensado

Las cuñas deben estar diseñadas para evitar el fallo prematuro del acero por descuadre o efectos de punzonamiento, deben resistir las pruebas de tracción, fatiga y las condiciones de carga para el sistema. El tamaño de las cuñas varía dependiendo del torón utilizado en el sistema, las cuñas para torón de 1/2" y 5/8" son diferentes para cada diámetro, así como hay cuñas para pantallas ancladas que constan de 3 secciones (Madrazo, 2006).

**1.3.3. Sistema encapsulado.** Los aceros de preesforzado no adheridos deben estar encapsulados en un ducto de postensado, y el espacio entre el torón y el ducto debe llenarse completamente con un material que inhiba la corrosión. El ducto debe ser impermeable y continuo en toda su longitud. Este debe estar conectado a todos los anclajes de manera impermeable, ya sean de tensionamiento, intermedios o fijos (PTI, 2000). En la figura 22 se muestra un ejemplo de anclajes encapsulados en polipropileno de alta densidad.



**Figura 22.** Anclajes no adheridos encapsulados

Adaptado de Post-Tensioning Terminology – PTI, 2013

Los ductos para postensado adherido, que se muestran en la figura 23, deben ser impermeables al mortero y no reactivos con el concreto, el acero de preesforzado, el mortero de inyección e inhibidores de corrosión. Los ductos deben mantenerse libres de agua y deben tener área transversal interior a lo menos igual a dos veces el área transversal de acero de preesforzado. Todos los sistemas de anclaje, conectores y dispositivos auxiliares, deben estar protegidos permanentemente contra la corrosión (PTI, 2013).



**Figura 23.** Ducto para postensado adherido

Adaptado de Post-Tensioning Terminology – PTI, 2013

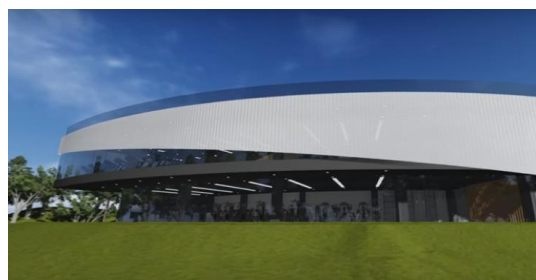
## 1.4. Ejemplos de edificaciones con losas postensadas ubicadas en el Área Metropolitana de Bucaramanga

A continuación se presenta un inventario que muestra, a manera de ejemplo, algunas de las edificaciones con diferentes sistemas estructurales utilizando el sistema postensado no adherido para la construcción de las losas. Estos proyectos reflejan la versatilidad que tiene el sistema para estructuras de diferentes usos, además se conoció por medio de la empresa que diseña y construye que los beneficios en cuanto a cantidades y ahorro económico para las configuraciones mostradas fueron buenos con respecto a otros sistemas, esto se muestra con más detalle en el capítulo 2.

### 1.4.1. Proyecto No. 1

*Tabla 5. Descripción edificio No. 1*

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| <b>Ciudad</b>                           | Floridablanca                   |
| <b>Dirección</b>                        | Cra 21 No. 30 – 02<br>Cañaveral |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR - 10                        |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Institucional -<br>Gimnasio     |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 2                               |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 8,05 m                          |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 0                               |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 4,2 m                           |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 9,0 m                           |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,15 m                          |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos de concreto            |
| <b>Área total construida postensada</b> | 1.700 m <sup>2</sup>            |
| <b>Año de construcción</b>              | 2016                            |



**Figura 24.** Render proyecto No. 1

Adaptado de  
[www.campestre Bucaramanga.com](http://www.campestre Bucaramanga.com)



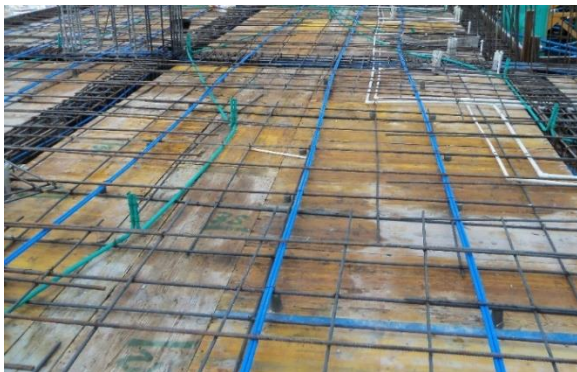
**Figura 25.** Construcción de losas postensadas edificio No. 1

### 1.4.2. Proyecto No. 2



**Figura 26.** Render proyecto No. 2

Adaptado de [www.viveaquotower.co](http://www.viveaquotower.co)



**Figura 27.** Construcción de losas postensadas proyecto No.2

**Tabla 6.** Descripción edificio No. 2

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| <b>Ciudad</b>                           | Bucaramanga                     |
| <b>Dirección</b>                        | Cra 41 No. 40 – 131<br>Cabecera |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR - 10                        |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Vivienda                        |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 35                              |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 112,7 m                         |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 5                               |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 3,25 m                          |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 11 m                            |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,15 m                          |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos de concreto            |
| <b>Área total construida postensada</b> | 35.600 m <sup>2</sup>           |
| <b>Año de construcción</b>              | 2016                            |

### 1.4.3. Proyecto No. 3



**Figura 28.** Render proyecto No. 3

Adaptado de [www.construcasa.com.co](http://www.construcasa.com.co)



**Figura 29.** Construcción de losas postensadas proyecto No.3

**Tabla 7.** Descripción edificio No. 3

|   |   |
|---|---|
| <b>Ciudad</b>                           | Bucaramanga                               |
| <b>Dirección</b>                        | Carrera 36 entre Calle 44 y 45 - Cabecera |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR – 10                                  |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Oficinas                                  |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 12  |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 34,05 m                                   |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 4   |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 2,70 m                                    |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 8,0 m                                     |
| <b>Voladizo</b>                         | 3,20 m                                    |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,15 m                                    |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos de concreto                      |
| <b>Área total construida postensada</b> | 4.500 m <sup>2</sup>                      |
| <b>Año de construcción</b>              | 2017                                      |

#### 1.4.4. Proyecto No. 4



**Figura 30.** Render proyecto No. 4

Adaptado de [www.otacc.com](http://www.otacc.com)



**Figura 31.** Construcción de losas postensadas proyecto No.4

**Tabla 8.** Descripción edificio No. 4

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| <b>Ciudad</b>                           | Bucaramanga                     |
| <b>Dirección</b>                        | Calle 49 No. 27A – 34 Sotomayor |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR – 10                        |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Vivienda                        |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 10                              |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 30,40 m                         |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 3                               |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 2,85 m                          |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 7,85 m                          |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,14 m                          |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos de concreto            |
| <b>Área total construida postensada</b> | 4.300 m <sup>2</sup>            |
| <b>Año de construcción</b>              | 2017                            |

### 1.4.5. Proyecto No. 5



**Figura 32.** Render proyecto No. 5  
Adaptado de [www.inverlemesa.com](http://www.inverlemesa.com)



**Figura 33.** Construcción de losas postensadas proyecto No.5

**Tabla 9.** Descripción edificio No. 5

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>Ciudad</b>                           | Bucaramanga                 |
| <b>Dirección</b>                        | Calle 34 No. 29 – 27 Aurora |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR - 10                    |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Vivienda                    |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 24                          |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 68,40 m                     |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 3                           |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 2,85 m                      |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 8,20 m                      |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,14 m                      |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos de concreto        |
| <b>Área total construida postensada</b> | 9.800 m <sup>2</sup>        |
| <b>Año de construcción</b>              | 2016                        |

### 1.4.6. Proyecto No. 6



**Figura 34.** Render proyecto No. 6

Adaptado de [www.inverlemesa.com](http://www.inverlemesa.com)



**Figura 35.** Construcción de losas postensadas proyecto No.6

**Tabla 10.** Descripción edificio No. 6

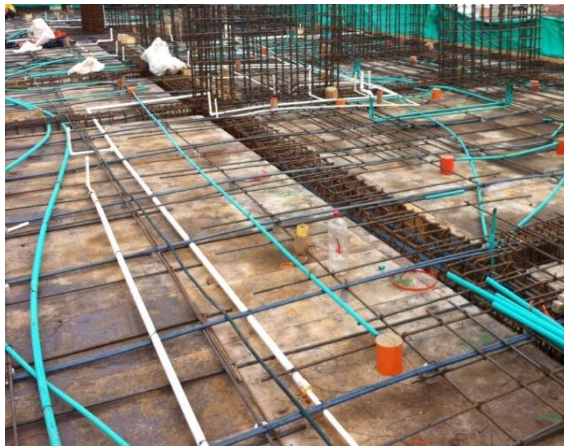
|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| <b>Ciudad</b>                           | Bucaramanga                      |
| <b>Dirección</b>                        | Carrera 17A No. 61 – 38 La Ceiba |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR - 10                         |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Vivienda                         |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 18                               |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 49,50 m                          |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 3                                |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 2,75 m                           |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 7,75 m                           |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,14 m                           |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos de concreto             |
| <b>Área total construida postensada</b> | 21.400 m <sup>2</sup>            |
| <b>Año de construcción</b>              | 2015                             |

## 1.4.7. Proyecto No. 7



**Figura 36.** Render proyecto No. 7

Adaptado de [www.inverle mesa.com](http://www.inverle mesa.com)



**Figura 37.** Construcción de losas postensadas proyecto No.7

**Tabla 11.** Descripción edificio No. 7

|   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| <b>Ciudad</b>                           | Bucaramanga                           |
| <b>Dirección</b>                        | Calle 21 No. 20 – 32<br>San Francisco |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR – 10                              |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Vivienda                              |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 23                                    |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 63,25 m                               |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 3                                     |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 2,75 m                                |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 7,50 m                                |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,14 m                                |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos de concreto                  |
| <b>Área total construida postensada</b> | 14.200 m <sup>2</sup>                 |
| <b>Año de construcción</b>              | 2014                                  |

### 1.4.8. Proyecto No. 8



**Figura 38.** Render proyecto No. 8

Adaptado de [www.valderramavalco.com](http://www.valderramavalco.com)



**Figura 39.** Construcción de losas postensadas proyecto No.8

**Tabla 12.** Descripción edificio No. 8

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| <b>Ciudad</b>                           | Floridablanca                       |
| <b>Dirección</b>                        | Calle 157 No. 17 - 237<br>Cañaveral |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR - 10                            |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Parqueaderos                        |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 5                                   |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 19,25 m                             |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 2                                   |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 2,75 m                              |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 8,5 m                               |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,15 m                              |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos de concreto                |
| <b>Área total construida postensada</b> | 10.500 m <sup>2</sup>               |
| <b>Año de construcción</b>              | 2016 - 2017                         |

### 1.4.9. Proyecto No. 9



**Figura 40.** Render proyecto No. 9

Adaptado de [www.valderramavalco.com](http://www.valderramavalco.com)



**Figura 41.** Construcción de losas postensadas proyecto No.9

**Tabla 13.** Descripción edificio No. 9

|   |   |
|---|---|
| <b>Ciudad</b>                           | Bucaramanga                             |
| <b>Dirección</b>                        | Cra 33 No. 86 – 20<br>Carretera antigua |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR - 98                                |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Vivienda                                |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 20                                      |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 52,10 m                                 |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 6                                       |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 2,42 m                                  |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 5,5 m                                   |
| <b>Espesor de losa post.</b>            | 0,13 m                                  |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Sistema de muros de carga (túnel)       |
| <b>Área total construida postensada</b> | 37.500 m <sup>2</sup>                   |
| <b>Año de construcción</b>              | 2015                                    |

1.4.10. Proyecto No. 10



Figura 42. Render proyecto No. 10

Adaptado de [www.hgconstructora.com](http://www.hgconstructora.com)

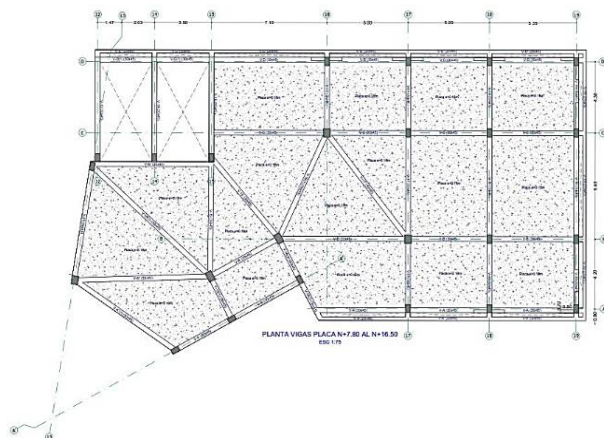


Figura 43. Planta tipo postensada proyecto No.10

Tabla 14. Descripción edificio No. 10

|   |                              |
|---|------------------------------|
| <b>Ciudad</b>                           | Piedecuesta                  |
| <b>Dirección</b>                        | Cra 4 con Calle 6n           |
| <b>Norma de diseño</b>                  | NSR – 10                     |
| <b>Uso de la estructura</b>             | Parqueaderos                 |
| <b>No. De Pisos sobre N+0,00</b>        | 11                           |
| <b>Altura del edificio sobre N+0,00</b> | 20,80 m                      |
| <b>No. De Sótanos</b>                   | 3                            |
| <b>Altura libre (Piso - Techo)</b>      | 2,60 m                       |
| <b>Luz libre mayor (Entre Columnas)</b> | 9 m                          |
| <b>Sistema Estructural</b>              | Pórticos y muros de concreto |
| <b>Área total construida postensada</b> | 4.000 m <sup>2</sup>         |
| <b>Año de construcción</b>              | 2017                         |

## **2. Evaluación de cantidades de obra en estructuras con diferentes configuraciones y usos diseñadas con losas postensadas**

El sistema postensado en la construcción de losas ha sido aceptado y adoptado exitosamente desde años atrás en varios países del mundo. Actualmente el comportamiento de los sistemas postensados para edificación es bien conocido y existen capítulos especialmente dedicados a ellos en varios reglamentos internacionales (Freyssinet, 2015).

Pero a la hora de evaluar la conveniencia de un sistema u otro se necesitan conocer ciertos parámetros o características del proyecto que ayuden a definir el sistema estructural a usar. Para el caso de las losas postensadas, si bien es cierto es un sistema que evidencia grandes bondades y beneficios, hay ciertas características que se deben cumplir o evaluar en la arquitectura del proyecto para el uso del sistema.

Este sistema no es conveniente para luces pequeñas (entre 3 m y 5 m), alturas de entre piso relativamente bajas y espacios que no necesiten amplitud y no se puedan aprovechar las bondades del sistema. Se puede realizar, al fin y al cabo esta en el criterio del diseñador y el constructor la conveniencia o no del sistema, pero puede salir mucho más costoso que si se construye con un sistema reforzado tradicional.

### **2.1. Densidades de proyectos construidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga**

A continuación se presentan evaluaciones de cantidades de acero y concreto para diferentes estructuras construidas en el Área Metropolitana de Bucaramanga, AMB, descritas en el capítulo

anterior, para las cuales se determinó conveniente utilizar el sistema postensado en las losas de estas edificaciones.

**Tabla 15.** Caracterización de proyectos construidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga

|  | <b>Proyecto No. 1</b>       | <b>Proyecto No. 2</b> | <b>Proyecto No. 3</b> | <b>Proyecto No. 10</b> |
|--|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Uso</b>   | Institucional -<br>Gimnasio | Vivienda              | Oficinas              | Parqueaderos           |
| <b>Luces [m]</b>   | 9,00                        | 9,00                  | 8,00                  | 7,50                   |
| <b>Altura edificio [m]</b>                                   | 8,05                        | 112,70                | 34,05                 | 20,80                  |
| <b>Altura entrepiso [m]</b>                                  | 4,20                        | 3,25                  | 2,70                  | 2,60                   |
| <b>Espesor de losa [m]</b>                                   | 0,15                        | 0,15                  | 0,15                  | 0,15                   |
| <b>Áreas construida [m<sup>2</sup>]</b>                      | 1.700                       | 35.600                | 4.500                 | 4.000                  |
| <b>Volumen de concreto total [m<sup>3</sup>]</b>             | 471,07                      | 11.473,58             | 1.365,01              | 1.137,23               |
| <b>Cantidad de Acero total [Kg]</b>                          | 57.748,00                   | 1.412.183,00          | 179.362,00            | 124.622,94             |
| <b>Densidad concreto total [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>]</b> | 0,28                        | 0,32                  | 0,30                  | 0,28                   |
| <b>Densidad acero total [Kg/m<sup>2</sup>]</b>               | 33,97                       | 39,67                 | 39,86                 | 31,16                  |

Tal y como se evidencia en la tabla anterior, para diferentes proyectos que se construyeron en el Área Metropolitana de Bucaramanga, las densidades de acero y concreto son bajas, comparadas con densidades que comúnmente se obtienen con sistemas reforzados para las luces y las alturas mostradas, de edificios de diferentes usos.

Según indagación a diferentes constructores y diseñadores con gran experiencia en el Área Metropolitana de Bucaramanga como Inrale, Valco y Valderrama entre otras, para configuraciones similares, usos mostrados y diseño con capacidad de disipación especial de energía (DES), los

proyectos pueden tener densidades de concreto por encima del  $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2$  y de acero por encima de  $50 \text{ Kg}/\text{m}^2$ , con lo que se evidencia un ahorro en los proyectos anteriormente caracterizados.

## **2.2. Comparación entre losas postensadas y losas macizas en un edificio de parqueaderos**

El proyecto a considerar se encuentra ubicado en el municipio de Piedecuesta, Santander, Área Metropolitana de Bucaramanga. Se trata de una edificación para parqueaderos en su gran mayoría de niveles y algunos con uso para zona social (canchas y gimnasio), con sistema de resistencia sísmica en pórticos con muros estructurales en concreto reforzado. La estructura tiene capacidad especial de disipación de energía (DES), tiene 11 pisos sobre el nivel N+0,00 y 3 sótanos. Fue diseñado bajo todos los lineamientos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, se realizaron dos diseños manteniendo como base el sistema estructural descrito anteriormente y realizando el sistema de entre pisos en uno con losas macizas y el otro modelo con losas postensadas.

Los materiales fueron los mismos para los dos modelos, concreto de 28 MPa y acero de 420 MPa, se introdujeron todos los datos de sismo y espectro de aceleraciones por norma. Para la ciudad donde se construirá el proyecto, la amenaza sísmica es alta. Las cargas consideradas son las mínimas de diseño por norma NSR-10, para el uso que se especifica, algunas losas son para parqueaderos y otras para zona social. En el Anexo 2 se presenta una breve memoria de diseño para conocer más detalles del diseño.

Tal y como se caracterizó en el capítulo anterior, el proyecto No. 10 es un edificio para parqueaderos con alturas de entrepiso de 2,60 m en la mayoría de las plantas, tiene diferentes luces,

donde la mayor es de 9 m, para lo cual se busca demostrar la conveniencia del uso del sistema postensado en esta configuración.

Para el modelo de losas macizas se obtuvieron vigas de 30 cm x 45 cm y espesor de placa de 18 cm, cumpliendo solicitaciones de carga y sismo. La losa se diseñó con un refuerzo en doble malla de 6,5 mm cada 15 cm. Para el modelo de losas postensadas se modelo con vigas descolgadas de 30 cm x 35 cm y espesor de placa de 15 cm, la losa es postensada en una dirección con vigas descolgadas. Adicional, en la losa se dejan unos refuerzos por ductilidad y temperatura que son cuantías mínimas por norma, se colocan varillas No. 4 en positivos y negativos cada 45 cm para cumplir este requisito.

Realizados todos los cálculos de los modelos y el diseño de cada uno de los elementos estructurales, se procedió a sacar cantidades de acero y concreto para realizar una comparación entre los modelos, para ello, se obtuvieron cantidades por cada tipo de elemento estructural para cuantificar en que parte de la estructura se dan los mayores cambios, en la tabla 16 se muestra el cuadro comparativo de cantidades de obra obtenidas.

**Tabla 16.** Cuadro comparativo de cantidades de obra

| <b>ÁREA TOTAL CONSTRUIDA PROYECTO:</b> |                      | 3997 m <sup>2</sup> |                          |                |
|--|----------------------|---------------------|--------------------------|----------------|
| <b>Detalle Placas</b>                  | <b>Losas Macizas</b> |                     | <b>Losas Postensadas</b> |                |
|  | <b>Cantidad</b>      | <b>Unidad</b>       | <b>Cantidad</b>          | <b>Unidad</b>  |
| <b>Espesor</b>                         | 18                   | cm                  | 15                       | cm             |
| <b>CONCRETOS</b>                       |                      |                     |                          |                |
| <b>DETALLE</b>                         | <b>Losas Macizas</b> |                     | <b>Losas Postensadas</b> |                |
|  | <b>Cantidad</b>      | <b>Unidad</b>       | <b>Cantidad</b>          | <b>Unidad</b>  |
| Zapatas                                | 121,73               | m <sup>3</sup>      | 104,06                   | m <sup>3</sup> |

|          |        |    |        |    |
|----------|--------|----|--------|----|
| Columnas | 83,69  | m3 | 83,69  | m3 |
| Muros    | 193,80 | m3 | 193,80 | m3 |
| Losas    | 906,94 | m3 | 734,06 | m3 |

**ACEROS**

| DETALLE  | Losas Macizas |        | Losas Postensadas |        |
|----------|---------------|--------|-------------------|--------|
|          | Cantidad      | Unidad | Cantidad          | Unidad |
| Zapatas  | 7.832,00      | Kg     | 5.741,16          | Kg     |
| Columnas | 24.290,77     | Kg     | 20.180,55         | Kg     |
| Muros    | 20.069,44     | Kg     | 20.069,44         | Kg     |
| Losas    | 89.146,41     | Kg     | 73.895,29         | Kg     |

Como se evidencia en el cuadro, las diferencias significativas se dan en concreto y acero de las zapatas y losas, donde las dimensiones cambiaron significativamente, así como en el refuerzo de las columnas donde se mantuvieron las dimensiones en ambos diseños, pero se disminuye el refuerzo debido al peso de la estructura.

A continuación, en la tabla 17, se muestra el resumen total de cantidades y las densidades obtenidas para el comparativo de los sistemas de losas.

**Tabla 17.** Cuadro comparativo de cantidades de obra totales

| TOTALES  |               |        |                   |        |             |
|----------|---------------|--------|-------------------|--------|-------------|
| DETALLE  | Losas Macizas |        | Losas Postensadas |        | % Variación |
|          | Cantidad      | Unidad | Cantidad          | Unidad |             |
| CONCRETO | 1.337,49      | m3     | 1.137,23          | m3     | 14,973%     |
| ACEROS   | 145.000,79    | Kg     | 123.548,61        | Kg     | 14,795%     |

Como se evidencia en el cuadro comparativo, las cantidades totales de acero y de concreto para el modelo de losas postensadas es menor, ya que para las luces que se manejaron en este proyecto, el sistema postensado permite menores espesores y cuantías de acero más pequeñas. Además hay que resaltar la comodidad de servicio que brinda el sistema de losas postensadas, ya que al reducir la altura de las vigas descolgadas y el espesor de las losas, da una sensación de mayor amplitud, lo que refleja mayor comodidad y maniobrabilidad para el usuario de los parqueaderos.

Se puede mostrar una variación del 15% comparando los dos sistemas, lo cual económicamente en un proyecto de gran dimensión es un ahorro significativo a la hora de evaluar el presupuesto. Además hay que resaltar que el sistema postensado conlleva a otros ahorros importantes que desencadenan economía, como en el tiempo de ejecución, en la mano de obra y en acabados.

### **3. Análisis de información y resultados**

Recopilada la información y estudiando los resultados del comparativo de diferentes proyectos con diferentes usos, así como la evaluación más a fondo de un proyecto con diseño en dos sistemas estructurales. Se pueden obtener unos criterios importantes a la hora de evaluar y definir el sistema estructural con losas postensadas para usarlo en el diseño de un proyecto.

#### **3.1. Grandes luces**

Como se pudo comprobar en la recopilación de información y en los ejemplos de los proyectos construidos en los últimos años en el Área Metropolitana de Bucaramanga, el sistema postensado en losas resulta en una disminución significativa en la cuantificación y presupuesto de los

proyectos cuando se tienen luces de más de 6 metros, mejorando las cuantías con respecto a un diseño en sistema tradicional.

### **3.2. Usos y acabados**

Además es importante evaluar el uso de la estructura, ya que como se demuestra en el cuadro, para algunos usos específicos el sistema da mayor rendimiento y beneficios, como es el caso de edificios para usos institucionales y edificios de parqueaderos, donde se necesitan mayores espacios libres y la sensación de amplitud repercute en un confort y mejor servicio al usuario de la estructura.

Sumado a lo anterior, el sistema postensado en algunos usos permite ahorrar en materiales de acabados, ya que dependiendo del tipo de acabado y de las especificaciones, se pueden suprimir procesos como el cielo raso, el mortero de piso y otros que se pueden evaluar, ya que estas losas tienen un acabado más uniforme comparado con losas tradicionales, tanto por debajo como por la superficie. Sin duda, evaluar estos ahorros, que sumados con los anteriormente mencionados se empiezan a ver reflejados en un presupuesto final que a la postre muestran las bondades del sistema y la competitividad que tiene con respecto a los demás sistemas.

### **3.3. Altura del edificio**

Otro criterio importante, a la hora de evaluar la viabilidad del sistema postensado, es la altura total del edificio, como es bien sabido en el país las licencias de construcción son dadas por alturas en metros y no por número de pisos, por lo tanto con un sistema postensado donde se obtienen menores espesores y alturas de vigas y losas, se puede obtener un piso más en construcciones de

gran altura sin afectar la altura libre entrepisos de las plantas del proyecto. Por lo tanto, y así como se expuso en capítulos anteriores, el postensado permite alturas de entrepiso por encima de 2,5 m, que es lo normalmente utilizado con otros sistemas, beneficiando así tanto el espacio diseñado como la altura final del edificio.

### **3.4. Grandes superficies**

Sumado a los criterios, anteriormente mencionados, se puede definir el sistema postensado como ideal para estructuras de grandes áreas como en pisos industriales, donde la continuidad de una losa reforzada es difícil de obtener ya que por durabilidad este concreto se empieza a fisurar rápidamente. En los proyectos descritos anteriormente, las losas tenían grandes superficies, de más de 300 m<sup>2</sup>, por lo que la continuidad de la losa se mantuvo y en el momento de la construcción, las juntas fueron suprimidas, logrando realizar la construcción en un solo vaciado para cada losa.

### **3.5. Comportamiento estructural**

Durante la etapa de diseño, es importante evaluar el desempeño de la estructura ante la acción de las cargas y el sismo de diseño, se pudo comprobar que en las estructuras postensadas el comportamiento mejora, ya que se puede lograr una masa total del edificio mucho menor a la de un sistema tradicional. Sin embargo, los mayores beneficios del sistema son la amplitud de espacios, las luces grandes con espesores y dimensiones más bajas, así como el control de las deflexiones y la limitación de la fisuración del concreto. Con el postensado se puede obtener una estructura más ligera, columnas más esbeltas y cimientos de menores dimensiones, todo esto trasciende en el comportamiento estructural de la edificación.

#### 4. Conclusiones

- Son múltiples los beneficios que tiene el postensado, desde la funcionalidad de la estructura, pasando por luces que permiten grandes espacios, hasta el proceso constructivo, ya que permite aumentar la velocidad de construcción debido a las resistencias altas obtenidas tempranamente. Además hace que el concreto trabaje a compresión, evitando así, fisuras por retracción y deflexiones excesivas. En cualquier caso, el postensado constituye una alternativa competitiva para la construcción de edificios.
- El sistema postensado refleja economía y ahorro en materiales con respecto a otros sistemas, se logró evidenciar en la comparación de los modelos una disminución significativa en las densidades por metro cuadrado de acero y concreto. Estos ahorros son importantes a la hora de calcular un presupuesto, ya que son los materiales más importantes durante la ejecución de la construcción. Además se pueden sumar ahorros en procesos constructivos y en tiempos de ejecución, que junto a la de los materiales representan un dinero importante en la construcción de edificios.
- Se definieron varios criterios que son importantes a la hora de evaluar un sistema estructural postensado en un proyecto, es importante estudiar las luces del proyecto, el uso, los acabados, la altura del edificio y el comportamiento sísmico del edificio para obtener las mayores bondades y beneficios que ofrece el sistema postensado.
- Sería importante realizar este tipo de análisis de manera más profunda para diferentes configuraciones de estructuras, realizar un comparativo con otros sistemas estructurales, como muros de carga, y con edificios de mayor altura, ya que al disminuir el alto de las vigas, con el sistema postensado se puede ganar un piso más sin aumentar la altura total de las edificaciones.

## 5. Notaciones

- ACI: American Concrete Institute
- PTI: Post-Tensioning Institute
- PCI: Precast/Prestressed Concrete Institute
- INME: Grupo de investigación en materiales y estructuras para la construcción
- $F_{pu}$ : Esfuerzo último de rotura
- $F_{py}$ : Esfuerzo último de fluencia
- $A_{ps}$ : Área del acero de preesfuerzo
- $P_{pu}$ : Fuerza de preesforzado en el dispositivo de anclaje
- AMB: Área Metropolitana de Bucaramanga

### Referencias bibliográficas

- AALAMI, Bijan O., Post-Tensioned Buildings, Design and Construction, First Edition, International Edition, PT-Structures, 2014.
- AALAMI, Bijan O. y KELLEY, Gail S., Design Of Concrete Floors With Particular Reference To Post-Tensioning, Post-Tensioning Institute, PTI Notes, Note 11 Phoenix, January, 2001.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI318S-14). Versión en español y sistema métrico SI, Norma del ACI 318, USA, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM, Standard Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM A370-77, USA, 1977.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM, Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete, ASTM A416/A416M-06, USA, 2006.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, Bogotá D.C., Colombia, 2010.
- ASOCIACIÓN TÉCNICA ESPAÑOLA DE PRETENSADO – ATEP, Recomendaciones para el proyecto y construcción de losas postensadas con tendones no adherentes H.P.9 – 96, Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1996.
- BILLINGTON, David P., Historical Perspective on Prestressed Concrete, Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI Journal, Enero - Febrero, 2004, pp. 14-30.

- COLLINS, Michael P. y MITCHEL, Denis, Prestressed Concrete Structures, Response Publications, Canada, 1997.
- FONSECA, Richard M. y LINARES, Oscar E., Diseño de un Puente Con Vigas Prefabricadas, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2015.
- FORCADA, Iván, Propuesta Normalizada de Diseño para Puentes Urbanos con Trabes Cajón en el Distrito Federal, Escuela Nacional de Estudios Profesionales “Acatlán”, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1999.
- FREYSSINET, Losas Postensadas, Disponible en: [http://www.freyssinet.com/freyssinet/wfreyssinet\\_mx.nsf/0/B657072F3949F3A486257EA800642EE5/\\$file/Losas%20Postensadas%202015.pdf](http://www.freyssinet.com/freyssinet/wfreyssinet_mx.nsf/0/B657072F3949F3A486257EA800642EE5/$file/Losas%20Postensadas%202015.pdf) >
- GARZÓN, Jaime E., Curso de Concreto Preesforzado, Especialización en Estructuras Cohorte VI, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.
- KELLEY, G. S., A Guide to the Components of an Unbonded Post-Tensioning System, Concrete International, American Concrete Institute, Detroit, EEUU, 2003.
- MADRAZO, Geoff, Post-Tensioning and Anchorage Systems, Georgia Institute of Technology, Lehigh University, 2006.
- MCCORMAC, Jack C. y BROWN, Russell H., Diseño de Concreto Reforzado, Octava Edición, Ed. Alfaomega Grupo Editor S.A., México, 2011.
- MONTOYA, Esneyder, Curso de Estructuras Postensadas, Modulo 1: Principios Básicos del Postensado, Ciudad de Panamá, 2012.

- NAAMAN, Antoine E., Prestressed Concrete, Analysis and Design, Second Edition, Techno Press 3000, Michigan, USA, 2004.
- NAWY, Edward G., Prestressed Concrete, A Fundamental Approach, Fifth Edition Update, Ed. Prentice Hall Pearson, USA, 2010.
- PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, PCI, Design Handbook, Precast and Prestressed Concrete, Sixth Edition, USA, 2004
- POST-TENSIONING INSTITUTE, PTI, Specification for Unbounded Single Strand Tendons, Second Edition, USA, 2000.
- POST-TENSIONING INSTITUTE, PTI, TAB.3-13 Post-Tensioning Terminology (PTT), PTI Technical Advisory Board, USA, 2013.
- VSL Sistemas Especializados de Construcción, Losas – Ficha Técnica, Disponible en:  
<<http://www.vslchile.cl/pagelosas.html> >

## **Apéndices**

### **Apéndice A: Certificado de anclajes fabricados por surelock**



ICC  
EVALUATION  
SERVICE

Innovation  
INSURANCE

*Most Widely Accepted and Trusted*

# ICC-ES Report

# ESR-2381

ICC-ES | (800) 423-6587 | (562) 699-0543 | [www.icc-es.org](http://www.icc-es.org)

Reissued 11/2018  
This report is subject to renewal 11/2018.

**DIVISION: 03 00 00—CONCRETE**  
**SECTION: 03 38 00—POST-TENSIONED CONCRETE**

**REPORT HOLDER:**

**PRECISION-HAYES INTERNATIONAL**

**704 WEST SIMONDS ROAD  
SEAGOVILLE, TEXAS 75159**

**EVALUATION SUBJECT:**

**PRECISION SURE-LOCK® POST-TENSION ANCHORAGE AND COUPLING SYSTEM  
AND THE HSM POST-TENSIONING ANCHORAGE SYSTEM**



Look for the trusted marks of Conformity!

*"2014 Recipient of Prestigious Western States Seismic Policy Council  
(WSSPC) Award in Excellence"*



A Subsidiary of  
  
INTERNATIONAL  
CONFEDERATION  
OF BUILDING OFFICIALS

*ICC-ES Evaluation Reports are not to be construed as representing aesthetics or any other attributes not specifically addressed, nor are they to be construed as an endorsement of the subject of the report or a recommendation for its use. There is no warranty by ICC Evaluation Service, LLC, express or implied, as to any finding or other matter in this report, or as to any product covered by the report.*



# ICC-ES Evaluation Report

## ESR-2381

Reissued November 2016

This report is subject to renewal November 2018.

[www.icc-es.org](http://www.icc-es.org) | (800) 423-6587 | (562) 699-0543

A Subsidiary of the International Code Council®

**DIVISION: 03 00 00—CONCRETE**  
**Section: 03 38 00—Post-Tensioned Concrete**

### REPORT HOLDER:

**PRECISION-HAYES INTERNATIONAL**  
 704 WEST SIMONDS ROAD  
 SEAGOVILLE, TEXAS 75159  
 (972) 287-2380  
[www.precision-surelock.com](http://www.precision-surelock.com)

### EVALUATION SUBJECT:

**PRECISION SURE-LOCK® POST-TENSION ANCHORAGE AND COUPLING SYSTEM AND THE HSM POST-TENSIONING ANCHORAGE SYSTEM**

## 1.0 EVALUATION SCOPE

Compliance with the following code:

- 2012, 2009 and 2006 *International Building Code*® (IBC)
- 2013 *Abu Dhabi International Building Code* (ADIBC)<sup>†</sup>

<sup>†</sup>The ADIBC is based on the 2009 IBC. 2009 IBC code sections referenced in this report are the same sections in the ADIBC.

Property evaluated:

Structural

## 2.0 USES

The Precision SURE-LOCK® Post-Tension Anchorage and Coupling System and the HSM Post-Tensioning Anchorage System are used as anchorages at fixed end, intermediate, and stressing end locations, and as couplers for unbonded, monostrand (single-strand), post-tensioning tendons in prestressed concrete designed in accordance with Chapter 18 of ACI 318, under the provisions of IBC Section 1901.2. The components of the system may be used in structures assigned to Seismic Design Categories A through F.

## 3.0 DESCRIPTION

### 3.1 Precision SURE-LOCK® Post-Tension Anchorage and Coupling System:

The Precision SURE-LOCK® Post-Tension Anchorage and Coupling System consist of ductile iron castings, steel wedges, and splice chuck couplers as described in Section 3.1.1. The Precision SURE-LOCK® System components are used with 1/2-inch-diameter (12.7 mm), seven-wire, low-relaxation steel strand conforming to ASTM A416, Grade 270 LR. The Precision SURE-LOCK® Post-Tension Anchorage and Coupling System anchorage and

coupler assemblies comply with ACI 318 Sections 18.21.1 and 18.14.1 [which require compliance with ACI 423.7-07 (2006 IBC: ACI 423.6-01)]. Refer to Figure 1 for illustrations of the anchor and coupler assembly components.

#### 3.1.1 Precision SURE-LOCK® System Components:

**3.1.1.1 SURE-LOCK® and SURE-LOCK® II Anchor Castings:** The SURE-LOCK® and SURE-LOCK® II Anchor Castings are ductile iron castings complying with ASTM A536, Grades 60-55-03 or 60-55-06, or SAE J434C, Grades D5503 or D5506. Acceptable BHN range is 170 to 302. The anchors are used with either of the wedges described in Section 3.1.1.2.

**3.1.1.2 Precision SURE-LOCK® Wedges:** SURE-LOCK® 1/2" x 1.2 and 1/2" x 1.3 wedges are two-piece wedges which are 1.2 and 1.3 inches (31 and 33 mm) long, respectively, and are manufactured from steel conforming to ASTM A106, Grade 12L14. The wedges are heat-treated according to the Precision SURE-LOCK® specification.

**3.1.1.3 Precision SURE-LOCK® and SURE-LOCK® II Splice Chuck Couplers:** The couplers are comprised of a 2-inch-diameter (51 mm) threaded connecting tube of ASTM A513/D 520 DCM steel tubing (Grade 1020), threaded end chucks (caps) of ASTM A106, C1045 steel, and wedges described in Section 3.2.2. The SURE-LOCK® coupler is nominally 5 1/2 inches (140 mm) long and the SURE-LOCK® II coupler is nominally 4 1/2 inches long. Both use the 1.3 wedges. The couplers also contain a plastic spacer, springs, and rings as temporary positioning aids.

#### 3.2 HSM Post-Tensioning Anchorage System:

The HSM Post-Tensioning Anchorage System consists of ductile iron castings, two-piece wedges and coupler assemblies. The components are described in Sections 3.2.1 and 3.2.2. The system must be used with 1/2-inch-diameter (12.7 mm), seven-wire, low-relaxation, steel strand conforming with ASTM A416, Grade 270. Refer to Figure 2 for illustrations of the anchor and coupler assembly components.

#### 3.2.1 Anchor Assembly Components:

**3.2.1.1 HSM 0.50-Inch and HSM-S 0.50-Inch Ductile Anchors:** The ductile anchors are manufactured to material specifications SAE J434C, Grade D5506 or Grade D5503, or ASTM A536, Grade 60-55-06 or Grade 60-55-03, with a Brinell hardness in either grade of 170-302. See Figure 2.

**3.2.1.2 HSM H500PL2-1.2 2/3 Wedges:** The two-piece wedges are manufactured from steel conforming to ASTM A106, Grade 12L14, and heat-treated to the HSM Wedge System Specification.

### 3.2.2 Coupler Assembly Components:

**3.2.2.1 HSM 0.50-inch Threaded Connecting Tube:** The connecting tubes are manufactured from ASTM A513, DOM (Drawn on Mandrel) Grade 1020/1026, steel tubing.

**3.2.2.2 HSM 0.50-inch System Plastic Spring Retainer and Springs:** These components are used to aid in field installation of the anchor assembly and are not critical to the coupler assembly performance. The springs are 0.09-inch-diameter (2.29 mm) music wire.

**3.2.2.3 HSM H500PL2-1.2 2/3 Wedges:** The two-piece wedges are manufactured from steel conforming to ASTM A106, Grade 12L14, and heat-treated to the HSM Wedge System Specification.

**3.2.2.4 HSM 0.50-inch Threaded End Caps:** The end caps are manufactured from steel conforming to ASTM A106, Grade 12L14.

## 4.0 INSTALLATION AND DESIGN

### 4.1 General:

The Precision SURE-LOCK<sup>®</sup> Post-Tension Anchorage and Coupling System components and the HSM Post-Tensioning Anchorage System components must be installed in accordance with the third edition of the Post-Tensioning Institute's Field Procedures Manual for Unbonded Tendons (PTI Field Procedures Manual) and Chapter 18 of ACI 318. The Precision SURE-LOCK<sup>®</sup> Post-Tension Anchorage and Coupling System components must only be used in combination with other Precision SURE-LOCK<sup>®</sup> components described in this report. The HSM Post-Tension Anchorage System components must only be used in combination with other HSM components described in this report. The resulting prestressed concrete must be designed in accordance with Chapter 18 of ACI 318, with the anchorage zones designed in accordance with Sections 18.13 and 18.14 of ACI 318.

### 4.2 Special Inspection:

Special inspection must be provided for the installation and stressing of the tendons, in accordance with Section 1705.3.3 of the 2012 IBC or Section 1704.4 of the 2009 or 2006 IBC, as applicable. The special inspector's duties include verification of concrete compressive strength at the time the tendons are stressed; checking compliance with the design engineer's requirements, including prestressing instructions; and checking elongation and jacking force parameters, and the sequence of tendon stressing, as well as end and edge distance and tendon spacing dimensions.

## 5.0 CONDITIONS OF USE

The Precision SURE-LOCK<sup>®</sup> Post-Tension Anchorage and Coupling System and the HSM Post-Tensioning

Anchorage System described in this report comply with, or are a suitable alternative to what is specified in, the code indicated in Section 1.0 of this report, subject to the following conditions:

- 5.1 The materials, fabrication and installation must comply with this report and the manufacturer's instructions (PTI Field Procedures Manual). In the event of a conflict between this report and the manufacturer's instructions, this report governs.
- 5.2 Where fire-resistance-rated construction is required, the minimum concrete cover on the tendons, anchor castings, wedges, and couplers must comply with Table 721.1(1), Item 4-1.1 or 4-1.2, of the 2012 IBC; or IBC Table 720.1(1), Item 4-1.1 or 4-1.2 of the 2009 and 2006 IBC, as applicable.
- 5.3 The design and installation of the anchor castings, wedges, and couplers, and the prestressed concrete, must be in accordance with Section 4.0 of this report.
- 5.4 Special inspection must be provided in accordance with Section 4.2 of this report.

## 6.0 EVIDENCE SUBMITTED

Data in accordance with the ICC-ES Acceptance Criteria for Post-tensioning Anchorages and Couplers of Prestressed Concrete (AC303), dated April 2011 (editorially revised March 2014).

## 7.0 IDENTIFICATION

Precision SURE-LOCK<sup>®</sup> Post-Tension Anchorage and Coupling System components are identified by markings and labeling. The SURE-LOCK<sup>®</sup> and SURE-LOCK<sup>®</sup> II Anchor Castings are identified by embossments with the product name designation and date lot codes (see Figure 1). Packages of the Precision SURE-LOCK<sup>®</sup> and SURE-LOCK<sup>®</sup> II anchor castings, wedges and splice chuck couplers are labeled with the company name (Precision-Hayes International) and address, part designation and tracing codes, and the evaluation report number (ESR-2381).

The HSM Post-Tensioning Anchorage System components are identified by their unique shape (refer to Figure 2). Additionally, cast iron components may be embossed with their designations. Containers of components must be identified by a label with the manufacturer's name (Precision-Hayes International) and address, the part designation, the serial number or date code for traceability, and the evaluation report number (ESR-2381).

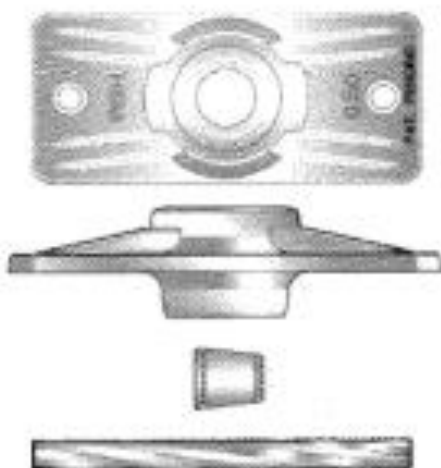
TABLE 1—MANUFACTURING LOCATIONS AND ASSOCIATED SYSTEMS

| MANUFACTURING FACILITY                                   | ASSOCIATED SYSTEMS   |
|--|--|
| Precision-Hayes International<br>Seagoville, Texas 75159 | Precision SURE-LOCK Post-Tension Anchorage and<br>Coupling System components (see Section 3.1)                       |
| Precision-Hayes International<br>Trenton, Texas 75490    | HSM Post-Tensioning Anchorage System<br>components (see Section 3.2)<br><br>Precision Sure-Lock Wedges (see 3.1.1.2) |

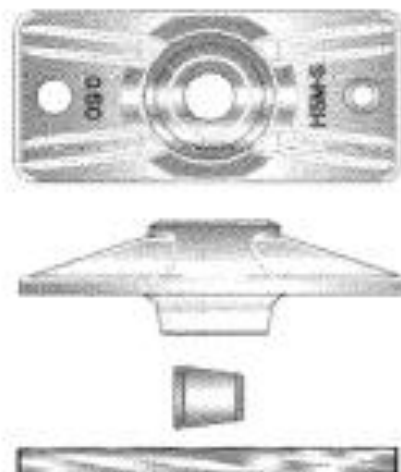


FIGURE 1—PRECISION SURE-LOCK® POST-TENSION ANCHORAGE AND COUPLING SYSTEM COMPONENTS

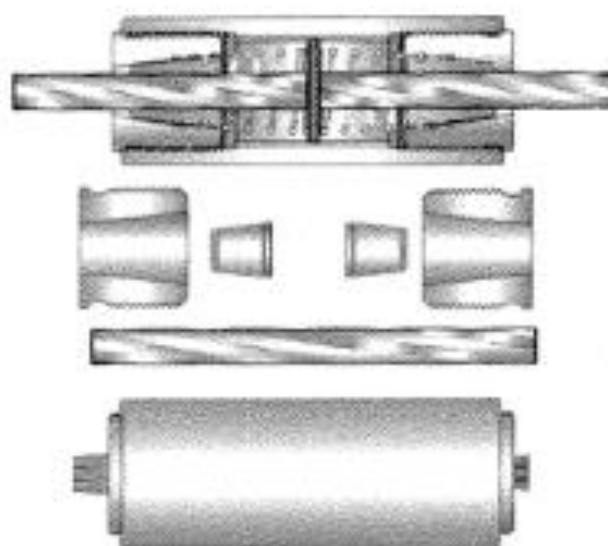
## HSM Post-Tensioning Anchorages and Coupler Systems



HSM 0.50-in. Ductile Anchor  
HSM H500PI.2-1.2 2/3 Wedge  
ASTM A416 270 ksi Strand



HSM-S 0.50-in. Ductile Anchor  
HSM H500PI.2-1.2 2/3 Wedge  
ASTM A416 270 ksi Strand

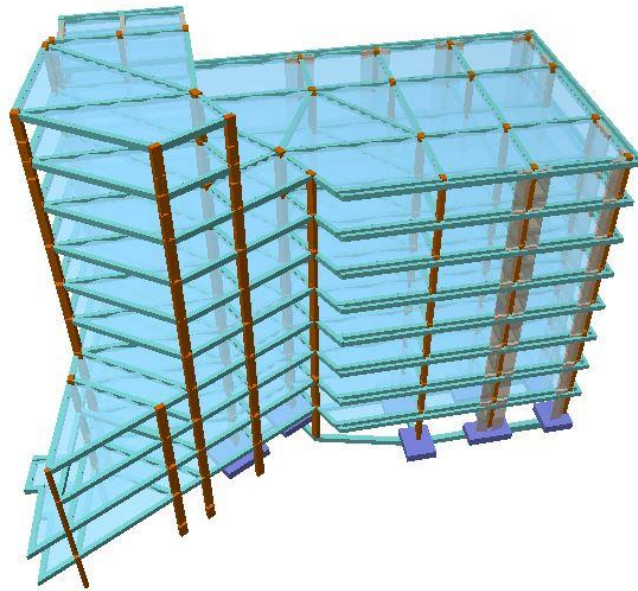


HSM 0.50-in. Threaded End Caps  
HSM 0.50-in. Threaded Connecting Tube  
HSM 0.50-in. System plastic partitioned barrier  
and system springs for wedge lock  
ASTM A416 270 ksi Strand

FIGURE 2—ANCHOR AND COUPLER COMPONENTS

**Apéndice B: Detalles del diseño proyecto no. 10**

## DISEÑO ESTRUCTURAL PROYECTO SMART



### DATOS GENERALES DE LA ESTRUCTURA

Se trata de una edificación para parqueaderos y zona social con sistema de resistencia sísmica de pórticos de concreto reforzado, combinados con muros estructurales armados en las dos direcciones principales de la edificación con capacidad especial de disipación de energía (DES). El sistema estructural de piso son placas macizas postensadas armadas en una dirección y placas macizas armadas en una dirección en el otro modelo.

El proyecto se encuentra localizado en una zona de amenaza sísmica alta con valores  $A_a=0.25$  y  $A_v=0.25$ . De acuerdo con las características de la estratificación, el suelo de cimentación se clasifica dentro del grupo C con coeficientes  $F_a=1.15$  y  $F_v=1.55$ . El coeficiente de importancia para este proyecto se definió como  $I=1.0$ .

Las cargas vivas utilizadas en el proyecto son:

Zona social= 500 Kgf/m<sup>2</sup>

Parqueos= 250 Kgf/m<sup>2</sup>

La capacidad portante del terreno 27.00 Ton/m<sup>2</sup>

## MATERIALES

### Concreto

- Vigas de Cimentación:
- Zapatas:  $F'c = 28 \text{ MPa} = 4.000 \text{ Psi}$
- Columnas:  $F'c = 28 \text{ MPa} = 4.000 \text{ Psi}$
- Muros:  $F'c = 28 \text{ MPa} = 4.000 \text{ Psi}$
- Losas:  $F'c = 28 \text{ MPa} = 4.000 \text{ Psi}$
- Escaleras:  $F'c = 21 \text{ MPa} = 3.000 \text{ Psi}$

### Acero de refuerzo y preesfuerzo

- Acero de refuerzo:  $F_y = 420 \text{ MPa} = 60.000 \text{ psi}$
- Acero de preesfuerzo:  $F_{py} = 1.700 \text{ MPa} - F_{pu} = 1.860 \text{ MPa}$

## NORMAS CONSIDERADAS

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (2010) - NSR10

Categoría de uso: Parqueaderos y zonas sociales

## ACCIONES CONSIDERADAS

### Sismo

Norma utilizada: NSR-10

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (2010)

Método de cálculo: Análisis dinámico espectral (NSR-10, A.3.4.2.2)

### Datos Generales del sismo

$A_a$ : Aceleración horizontal pico efectiva (NSR-10, A.2.2)

$A_v$ : Velocidad horizontal pico efectiva (NSR-10, A.2.2)

$A_a$ : 0.25 g

$A_v$ : 0.25 g

## Sistema estructural

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| <b>R<sub>0X</sub></b> : Coeficiente de disipación de energía básico (X) (NSR-10, A.3) | <b>R<sub>0X</sub></b> : <u>7.00</u> |
| <b>R<sub>0Y</sub></b> : Coeficiente de disipación de energía básico (Y) (NSR-10, A.3) | <b>R<sub>0Y</sub></b> : <u>7.00</u> |
| <b>F<sub>a</sub></b> : Coeficiente de irregularidad en altura (NSR-10, A.3.3.5)       | <b>F<sub>a</sub></b> : <u>0.80</u>  |
| <b>F<sub>p</sub></b> : Coeficiente de irregularidad en planta (NSR-10, A.3.3.4)       | <b>F<sub>p</sub></b> : <u>0.80</u>  |
| <b>F<sub>rX</sub></b> : Coeficiente por ausencia de redundancia (X) (NSR-10, A.3.3.8) | <b>F<sub>rX</sub></b> : <u>1.00</u> |
| <b>F<sub>rY</sub></b> : Coeficiente por ausencia de redundancia (Y) (NSR-10, A.3.3.8) | <b>F<sub>rY</sub></b> : <u>1.00</u> |
| Geometría en altura (NSR-10, A.3.3.4 y A.3.3.5): Irregular                            |                                     |
| <b>Estimación del periodo fundamental de la estructura:</b>                           |                                     |

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| <b>T<sub>aX</sub></b> : Periodo fundamental aproximado (X) | <b>T<sub>aX</sub></b> : <u>0.83 s</u> |
| <b>T<sub>aY</sub></b> : Periodo fundamental aproximado (Y) | <b>T<sub>aY</sub></b> : <u>0.45 s</u> |

## Coef. Amplificación:

El valor máximo de las ordenadas espectrales es 0.719 g.

### NSR-10 (A.2.6.1)

#### - Parámetros necesarios para la definición del espectro

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| <b>A<sub>a</sub></b> : Aceleración horizontal pico efectiva (NSR-10, A.2.2)  | <b>A<sub>a</sub></b> : <u>0.25 g</u> |
| <b>A<sub>v</sub></b> : Velocidad horizontal pico efectiva (NSR-10, A.2.2)  | <b>A<sub>v</sub></b> : <u>0.25 g</u> |
| <b>F<sub>a</sub></b> : Coeficiente de amplificación de la aceleración en zona de periodos cortos (NSR-10, Tabla A.2.4-3) | <b>F<sub>a</sub></b> : <u>1.15</u>   |
| Tipo de perfil de suelo (NSR-10, A.2.4)  | <b>Suelo</b> : <u>C</u>              |
| <b>A<sub>a</sub></b> : Aceleración horizontal pico efectiva (NSR-10, A.2.2)  | <b>A<sub>a</sub></b> : <u>0.25 g</u> |

**F<sub>v</sub>**: Coeficiente de amplificación de la aceleración en zona de periodos intermedios (NSR-10, Tabla A.2.4-4)

$$F_v : 1.55$$

Tipo de perfil de suelo (NSR-10, A.2.4)

$$\text{Suelo} : C$$

**A<sub>v</sub>**: Velocidad horizontal pico efectiva (NSR-10, A.2.2)

$$A_v : 0.25 \text{ g}$$

**I**: Coeficiente de importancia (NSR-10, A.2.5)

$$I : 1.00$$

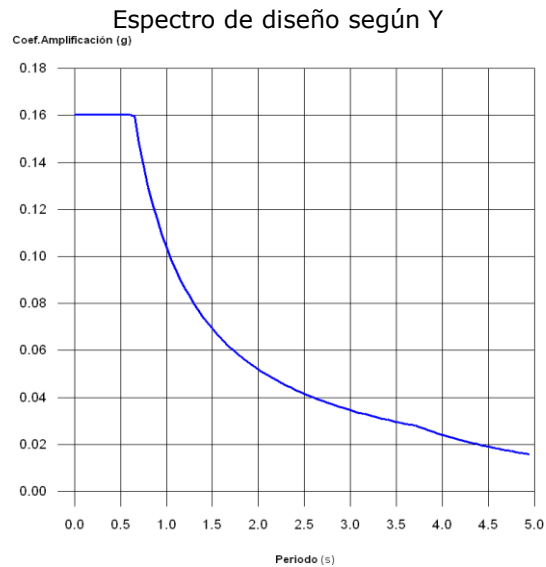
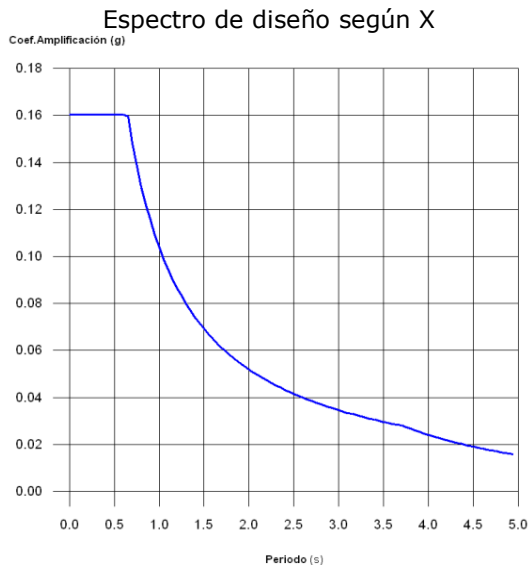
Tipo de edificación: I

**T<sub>c</sub>**: Periodo correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante y la parte descendente del mismo (NSR-10, A.2.6.1)

$$T_c : 0.65 \text{ s}$$

**T<sub>1</sub>**: Periodo correspondiente al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante (NSR-10, A.2.6.1)

$$T_1 : 3.72 \text{ s}$$



### Coeficientes de participación

| Modo   | T     | L <sub>x</sub> | L <sub>y</sub> | L <sub>gz</sub> | M <sub>x</sub> | M <sub>y</sub> | Hipótesis X(1)   | Hipótesis Y(1)   |
|--------|-------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|--|--|
| Modo 1 | 0.833 | 0.9583         | 0.0141         | 0.2855          | 85.63 %        | 0.02 %         | R = 4.48<br>A = 1.223 m/s <sup>2</sup><br>D = 21.5111 mm | R = 4.48<br>A = 1.223 m/s <sup>2</sup><br>D = 21.5111 mm |

| Modo   | T     | L <sub>x</sub> | L <sub>y</sub> | L <sub>gz</sub> | M <sub>x</sub> | M <sub>y</sub> | Hipótesis X(1)   | Hipótesis Y(1)   |
|--------|-------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|--|--|
| Modo 2 | 0.454 | 0.0054         | 0.1122         | 0.9937          | 0.12 %         | 50.62 %        | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 8.21394 mm | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 8.21394 mm |
| Modo 3 | 0.312 | 0.0081         | 0.0742         | 0.9972          | 0.11 %         | 30.74 %        | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 3.88955 mm | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 3.88955 mm |
| Modo 4 | 0.244 | 0.3983         | 0.0157         | 0.9171          | 10.67 %        | 0.02 %         | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 2.37018 mm | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 2.37018 mm |
| Modo 5 | 0.154 | 0.227          | 0.0218         | 0.9736          | 2.03 %         | 0.02 %         | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 0.94986 mm | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 0.94986 mm |
| Modo 6 | 0.119 | 0.0035         | 0.1001         | 0.995           | 0.01 %         | 6.45 %         | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 0.56744 mm | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 0.56744 mm |
| Modo 7 | 0.093 | 0.3386         | 0.2202         | 0.9148          | 1.03 %         | 0.43 %         | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 0.34157 mm | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 0.34157 mm |
| Modo 8 | 0.089 | 0.0051         | 0.0728         | 0.9973          | 0.01 %         | 2.15 %         | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 0.3148 mm  | R = 4.48<br>A = 1.574 m/s <sup>2</sup><br>D = 0.3148 mm  |
| Total  |       |                |                |                 | 99.61 %        | 90.45 %        |  |  |

**T:** Periodo de vibración en segundos.

**L<sub>x</sub>, L<sub>y</sub>:** Coeficientes de participación normalizados en cada dirección del análisis.

**L<sub>gz</sub>:** Coeficiente de participación normalizado correspondiente al grado de libertad rotacional.

**M<sub>x</sub>, M<sub>y</sub>:** Porcentaje de masa desplazada por cada modo en cada dirección del análisis.

**R:** Relación entre la aceleración de cálculo usando la ductilidad asignada a la estructura y la aceleración de cálculo obtenida sin ductilidad.

**A:** Aceleración de cálculo, incluyendo la ductilidad.

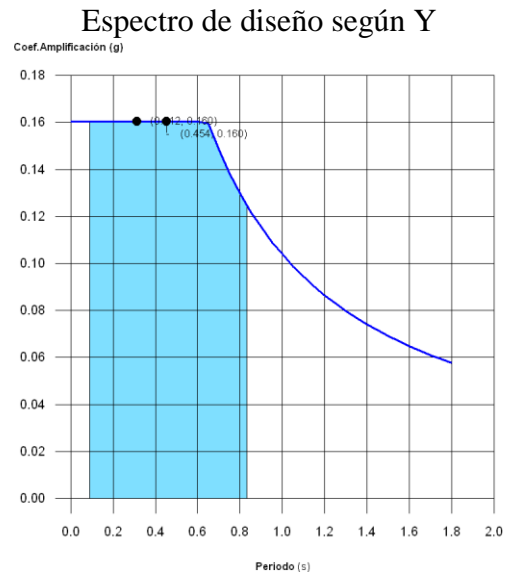
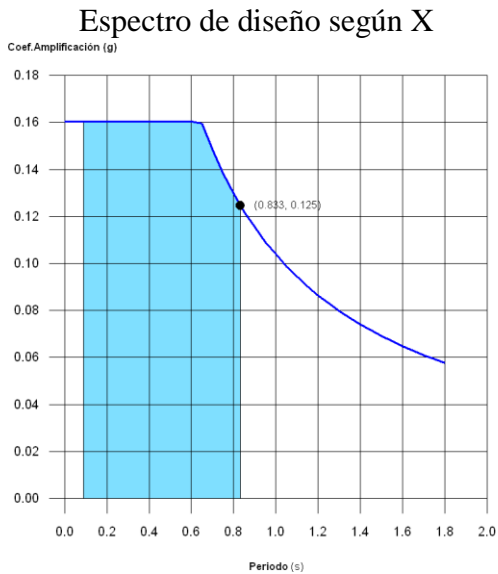
**D:** Coeficiente del modo. Equivale al desplazamiento máximo del grado de libertad dinámico.

### Representación de los periodos modales

Se representa el rango de periodos abarcado por los modos estudiados, con indicación de los modos en los que se desplaza más del 30% de la masa:

| Hipótesis Sismo X1 |       |       |
|--------------------|-------|-------|
| Hipótesis modal    | T (s) | A (g) |
| Modo 1             | 0.833 | 0.125 |

| Hipótesis Sismo Y1 |       |       |
|--------------------|-------|-------|
| Hipótesis modal    | T (s) | A (g) |
| Modo 2             | 0.454 | 0.160 |
| Modo 3             | 0.312 | 0.160 |



### Cargas consideradas

| Planta  | Cargas Vivas (kN/m <sup>2</sup> ) | Cargas muertas (kN/m <sup>2</sup> ) |
|---------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| N+20.80 | 5.0                               | 2.0                                 |
| N+19.22 | 5.0                               | 2.0                                 |
| N+18.20 | 5.0                               | 2.0                                 |
| N+17.13 | 5.0                               | 2.0                                 |
| N+15.60 | 5.0                               | 2.0                                 |
| N+13.00 | 2.5                               | 0.1                                 |
| N+10.40 | 2.5                               | 0.1                                 |
| N+7.80  | 2.5                               | 0.1                                 |
| N+5.20  | 2.5                               | 0.1                                 |
| N+2.60  | 2.5                               | 0.1                                 |
| N+0.00  | 2.5                               | 0.1                                 |
| N-2.60  | 2.5                               | 0.1                                 |
| N-5.80  | 0.0                               | 0.0                                 |
| N-6.80  | 0.0                               | 0.0                                 |

## Centro de masas, centro de rigidez y excentricidades de cada planta

| Planta  | c.d.m.<br>(m)  | c.d.r.<br>(m) | ex<br>(m) | ey<br>(m) |
|---------|----------------|---------------|-----------|-----------|
| N+20.80 | (3.55, -11.39) | (3.62, -9.27) | -0.07     | -2.11     |
| N+19.22 | (3.65, -3.03)  | (3.65, -3.38) | 0.00      | 0.36      |
| N+18.20 | (3.58, -9.68)  | (3.65, -3.63) | -0.07     | -6.05     |
| N+17.13 | (3.65, -3.01)  | (3.65, -3.42) | 0.00      | 0.41      |
| N+15.60 | (14.85, -7.84) | (4.82, -4.72) | 10.03     | -3.12     |
| N+13.00 | (14.69, -7.51) | (6.83, -6.01) | 7.86      | -1.50     |
| N+10.40 | (14.69, -7.51) | (6.83, -6.01) | 7.86      | -1.50     |
| N+7.80  | (14.68, -7.50) | (6.83, -6.01) | 7.86      | -1.50     |
| N+5.20  | (13.90, -8.07) | (6.81, -6.20) | 7.09      | -1.86     |
| N+2.60  | (14.28, -7.80) | (6.79, -6.39) | 7.49      | -1.41     |
| N+0.00  | (13.45, -8.36) | (6.79, -6.39) | 6.66      | -1.96     |
| N-2.60  | (13.36, -8.31) | (6.86, -6.36) | 6.50      | -1.94     |
| N-5.80  | (8.95, -3.81)  | (4.83, -6.05) | 4.13      | 2.24      |

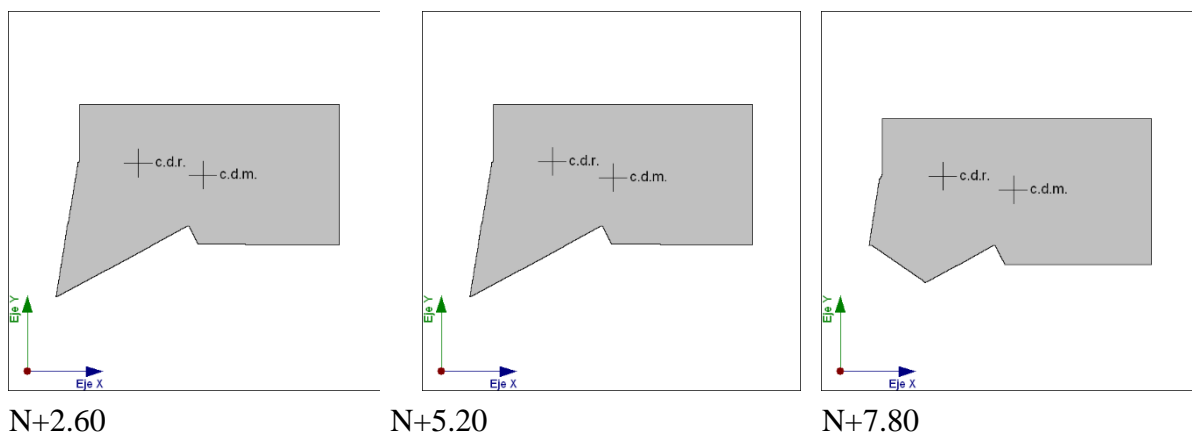
**c.d.m.:** Coordenadas del centro de masas de la planta (X,Y)

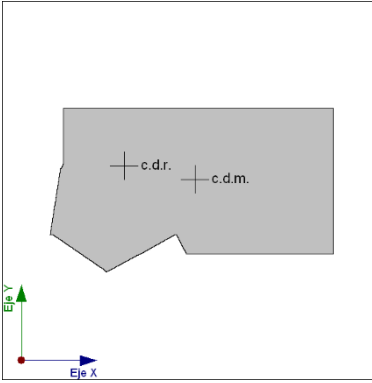
**c.d.r.:** Coordenadas del centro de rigidez de la planta (X,Y)

**ex:** Excentricidad del centro de masas respecto al centro de rigidez (X)

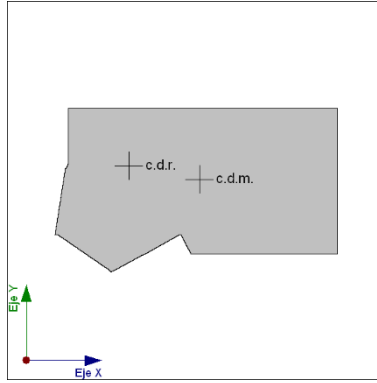
**ey:** Excentricidad del centro de masas respecto al centro de rigidez (Y)

## Representación gráfica del centro de masas y del centro de rigidez por planta

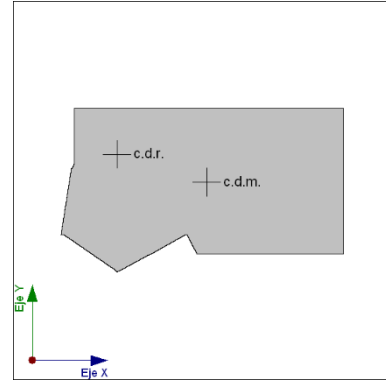




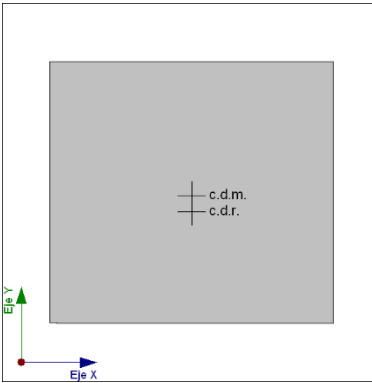
N+10.40



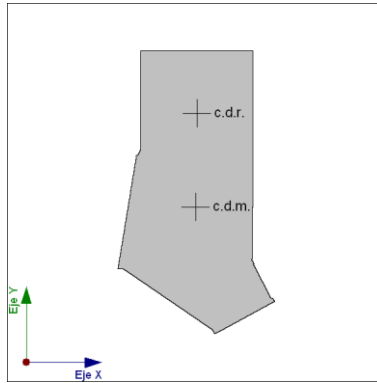
N+13.00



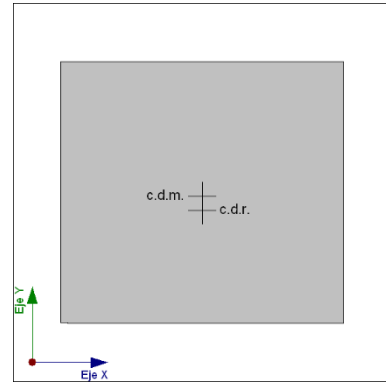
N+15.60



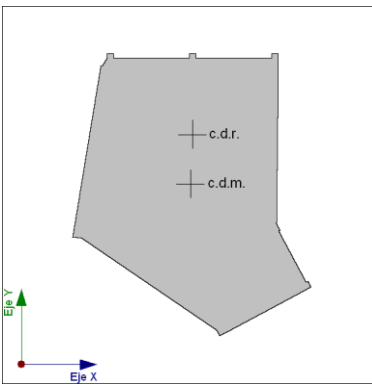
N+17.13



N+18.20



N+19.22



N+20.80

### Corrección por cortante basal

#### Cortante dinámico CQC

El cortante basal dinámico ( $V_d$ ), por dirección e hipótesis sísmica, se obtiene mediante la combinación cuadrática completa (CQC) de los cortantes en la base por hipótesis modal.

| Hipótesis sísmica (X) | Hipótesis modal | V <sub>x</sub><br>(kN) | V <sub>d,x</sub><br>(kN) |
|-----------------------|-----------------|------------------------|--------------------------|
| Sismo X1              | Modo 1          | 2294.615               | 2328.140                 |
|                       | Modo 2          | 4.061                  |                          |
|                       | Modo 3          | 6.999                  |                          |
|                       | Modo 4          | 368.126                |                          |
|                       | Modo 5          | 69.990                 |                          |
|                       | Modo 6          | 0.277                  |                          |
|                       | Modo 7          | 35.467                 |                          |
|                       | Modo 8          | 0.369                  |                          |

| Hipótesis sísmica (Y) | Hipótesis modal | V <sub>y</sub><br>(kN) | V <sub>d,y</sub><br>(kN) |
|-----------------------|-----------------|------------------------|--------------------------|
| Sismo Y1              | Modo 1          | 0.500                  | 2129.387                 |
|                       | Modo 2          | 1755.892               |                          |
|                       | Modo 3          | 1066.188               |                          |
|                       | Modo 4          | 0.570                  |                          |
|                       | Modo 5          | 0.644                  |                          |
|                       | Modo 6          | 223.603                |                          |
|                       | Modo 7          | 14.993                 |                          |
|                       | Modo 8          | 74.589                 |                          |

V<sub>d,x</sub>: Cortante basal dinámico en dirección X, por hipótesis sísmica

V<sub>d,y</sub>: Cortante basal dinámico en dirección Y, por hipótesis sísmica

### Cortante basal estático

El cortante sísmico en la base de la estructura se determina para cada una de las direcciones de análisis:

V<sub>s,x</sub>: Cortante sísmico en la base (X) (NSR-10, A.4.3.1)

V<sub>s,x</sub>: 2455.284 kN

S<sub>d,x</sub>(T<sub>a</sub>): Aceleración espectral horizontal de diseño (X)

S<sub>d,x</sub>(T<sub>a</sub>): 0.125 g

T<sub>a,x</sub>: Periodo fundamental aproximado (X)

T<sub>a,x</sub>: 0.83 s

V<sub>s,y</sub>: Cortante sísmico en la base (Y) (NSR-10, A.4.3.1)

V<sub>s,y</sub>: 3162.536 kN

$S_{d,Y}(T_a)$ : Aceleración espectral horizontal de diseño (Y)

$T_{aY}$ : Periodo fundamental aproximado (Y)

$S_{d,Y}(T_a) : \frac{0.160}{g}$

$T_{aY} : \frac{0.45}{s}$

**W**: Peso sísmico total de la estructura

**W** : 19712.222 kN

El peso sísmico total de la estructura es la suma de los pesos sísmicos de todas las plantas.

$w_i$ : Peso sísmico total de la planta "i"

Suma de la totalidad de la carga permanente y de la fracción de la sobrecarga de uso considerada en el cálculo de la acción sísmica.

| Planta                           | $w_i$<br>(kN)    |
|----------------------------------|------------------|
| N+20.80                          | 648.017          |
| N+19.22                          | 396.452          |
| N+18.20                          | 827.627          |
| N+17.13                          | 487.103          |
| N+15.60                          | 3354.923         |
| N+13.00                          | 2752.111         |
| N+10.40                          | 2752.111         |
| N+7.80                           | 2753.282         |
| N+5.20                           | 2910.279         |
| N+2.60                           | 2830.317         |
| <b><math>W = \sum w_i</math></b> | <b>19712.222</b> |

### Verificación de la condición de cortante basal

Cuando el valor del cortante dinámico total en la base ( $V_d$ ), obtenido después de realizar la combinación modal, para cualquiera de las direcciones de análisis, es menor que el 90 % del cortante basal sísmico estático ( $V_s$ ), todos los parámetros de la respuesta dinámica se multiplican por el factor de modificación:  $0.90 \cdot V_s / V_d$ .

Geometría en altura (NSR-10, A.3.3.4 y A.3.3.5): Irregular

| Hipótesis sísmica | Condición de cortante basal mínimo  | Factor de modificación |
|-------------------|---|------------------------|
| Sismo X1          | $V_{d,X1} \geq 0.90 \cdot V_{s,X}$<br>2328.140 kN <sup>3</sup><br>2209.756 kN | N.P.                   |
| Sismo Y1          | $V_{d,Y1} \geq 0.90 \cdot V_{s,Y}$<br>2129.387 kN <sup>3</sup><br>2846.282 kN | 1.34                   |

$V_{d,x}$ : Cortante basal dinámico en dirección X, por hipótesis sísmica

$V_{s,x}$ : Cortante basal estático en dirección X, por hipótesis sísmica

$V_{d,y}$ : Cortante basal dinámico en dirección Y, por hipótesis sísmica

$V_{s,y}$ : Cortante basal estático en dirección Y, por hipótesis sísmica

**N.P.:** No procede

### Cortante sísmico combinado por planta

El valor máximo del cortante por planta en una hipótesis sísmica dada se obtiene mediante la Combinación Cuadrática Completa (CQC) de los correspondientes cortantes modales.

Si la obra tiene vigas con vinculación exterior o estructuras 3D integradas, los esfuerzos de dichos elementos no se muestran en el siguiente listado.

### Cortante sísmico combinado y fuerza sísmica equivalente por planta

Los valores que se muestran en las siguientes tablas no están ajustados por el factor de modificación calculado en el apartado 'Corrección por cortante basal'.

Hipótesis sísmica: Sismo X1

| Planta  | $Q_x$<br>(kN) | $F_{eq,x}$<br>(kN) | $Q_y$<br>(kN) | $F_{eq,y}$<br>(kN) |
|---------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|
| N+20.80 | 157.230       | 157.230            | 20.154        | 20.154             |
| N+19.22 | 231.976       | 79.928             | 29.697        | 10.897             |
| N+18.20 | 369.972       | 142.351            | 46.608        | 17.341             |
| N+17.13 | 456.575       | 90.026             | 55.956        | 9.629              |
| N+15.60 | 964.567       | 534.178            | 87.593        | 43.089             |
| N+13.00 | 1328.551      | 385.259            | 109.497       | 26.150             |
| N+10.40 | 1627.483      | 338.024            | 125.177       | 20.740             |
| N+7.80  | 1878.399      | 307.911            | 136.011       | 20.787             |
| N+5.20  | 2054.463      | 222.549            | 145.363       | 17.771             |

| Planta | Q <sub>x</sub><br>(kN) | F <sub>eq,x</sub><br>(kN) | Q <sub>y</sub><br>(kN) | F <sub>eq,y</sub><br>(kN) |
|--------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| N+2.60 | 2328.140               | 411.523                   | 158.380                | 30.264                    |
| N+0.00 | 2328.140               | 0.000                     | 158.380                | 0.000                     |
| N-2.60 | 2328.140               | 0.000                     | 158.380                | 0.000                     |
| N-5.80 | 62.956                 | 2265.219                  | 245.802                | 237.497                   |

Hipótesis sísmica: Sismo Y1

| Planta  | Q <sub>x</sub><br>(kN) | F <sub>eq,x</sub><br>(kN) | Q <sub>y</sub><br>(kN) | F <sub>eq,y</sub><br>(kN) |
|---------|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| N+20.80 | 49.602                 | 49.602                    | 162.733                | 162.733                   |
| N+19.22 | 35.481                 | 40.108                    | 245.146                | 92.461                    |
| N+18.20 | 59.133                 | 34.407                    | 380.084                | 140.164                   |
| N+17.13 | 57.724                 | 41.808                    | 457.858                | 80.761                    |
| N+15.60 | 69.650                 | 41.346                    | 883.594                | 535.470                   |
| N+13.00 | 60.079                 | 43.006                    | 1227.031               | 373.652                   |
| N+10.40 | 76.594                 | 59.212                    | 1514.092               | 310.021                   |
| N+7.80  | 110.759                | 45.027                    | 1744.990               | 261.781                   |
| N+5.20  | 126.293                | 19.943                    | 1912.870               | 194.785                   |
| N+2.60  | 121.890                | 105.150                   | 2129.387               | 283.690                   |
| N+0.00  | 121.890                | 0.000                     | 2129.387               | 0.000                     |
| N-2.60  | 121.890                | 0.000                     | 2129.387               | 0.000                     |
| N-5.80  | 5.974                  | 121.728                   | 1334.640               | 1170.010                  |

**Combinaciones**

■ **Nombres de las hipótesis**

PP Peso propio

CM Cargas muertas

Qa Sobrecarga de uso

SX Sismo X

SY Sismo Y

**E.L.U. de rotura. Concreto**

■ **E.L.U. de rotura. Concreto en cimentaciones**

| <b>Comb.</b> | <b>PP</b> | <b>CM</b> | <b>Qa</b> | <b>SX</b> | <b>SY</b> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1            | 1.400     | 1.400     |           |           |           |
| 2            | 1.200     | 1.200     |           |           |           |
| 3            | 1.200     | 1.200     | 1.600     |           |           |
| 4            | 1.200     | 1.200     |           | -0.300    | -1.000    |
| 5            | 1.200     | 1.200     | 0.500     | -0.300    | -1.000    |
| 6            | 1.200     | 1.200     |           | 0.300     | -1.000    |
| 7            | 1.200     | 1.200     | 0.500     | 0.300     | -1.000    |
| 8            | 1.200     | 1.200     |           | -1.000    | -0.300    |
| 9            | 1.200     | 1.200     | 0.500     | -1.000    | -0.300    |
| 10           | 1.200     | 1.200     |           | -1.000    | 0.300     |
| 11           | 1.200     | 1.200     | 0.500     | -1.000    | 0.300     |
| 12           | 1.200     | 1.200     |           | 0.300     | 1.000     |
| 13           | 1.200     | 1.200     | 0.500     | 0.300     | 1.000     |
| 14           | 1.200     | 1.200     |           | -0.300    | 1.000     |
| 15           | 1.200     | 1.200     | 0.500     | -0.300    | 1.000     |
| 16           | 1.200     | 1.200     |           | 1.000     | 0.300     |
| 17           | 1.200     | 1.200     | 0.500     | 1.000     | 0.300     |
| 18           | 1.200     | 1.200     |           | 1.000     | -0.300    |
| 19           | 1.200     | 1.200     | 0.500     | 1.000     | -0.300    |
| 20           | 0.900     | 0.900     |           |           |           |
| 21           | 0.900     | 0.900     |           | -0.300    | -1.000    |
| 22           | 0.900     | 0.900     |           | 0.300     | -1.000    |
| 23           | 0.900     | 0.900     |           | -1.000    | -0.300    |
| 24           | 0.900     | 0.900     |           | -1.000    | 0.300     |
| 25           | 0.900     | 0.900     |           | 0.300     | 1.000     |
| 26           | 0.900     | 0.900     |           | -0.300    | 1.000     |
| 27           | 0.900     | 0.900     |           | 1.000     | 0.300     |
| 28           | 0.900     | 0.900     |           | 1.000     | -0.300    |

## DATOS GENERALES DE PLANTAS

| Piso     | Nivel   | Planta | Altura entre piso [m] | Cota [m] |
|----------|---------|--------|-----------------------|----------|
| Piso 11  | N+20.80 | 13     | 1.58                  | 20.80    |
| Piso 10  | N+19.22 | 12     | 1.02                  | 19.22    |
| Piso 9   | N+18.20 | 11     | 1.07                  | 18.20    |
| Piso 8   | N+17.13 | 10     | 1.53                  | 17.13    |
| Piso 7   | N+15.60 | 9      | 2.60                  | 15.60    |
| Piso 6   | N+13.00 | 8      | 2.60                  | 13.00    |
| Piso 5   | N+10.40 | 7      | 2.60                  | 10.40    |
| Piso 4   | N+7.80  | 6      | 2.60                  | 7.80     |
| Piso 3   | N+5.20  | 5      | 2.60                  | 5.20     |
| Piso 2   | N+2.60  | 4      | 2.60                  | 2.60     |
| Piso 1   | N+0.00  | 3      | 2.60                  | 0.00     |
| Sótano 1 | N-2.60  | 2      | 3.20                  | -2.60    |
| Sótano 2 | N-5.80  | 1      | 1.00                  | -5.80    |
| Sótano 3 | N-6.80  | 0      |                       | -6.80    |

## DIMENSIONES, COEFICIENTES DE EMPOTRAMIENTO Y COEFICIENTES DE PANDEO PARA CADA PLANTA

Las columnas y los muros se modelaron de tal modo que cumplieran todas las solicitaciones correspondientes, según cargas y norma NSR-10. Las variaciones fueron mínimas, ya que el dimensionamiento de los elementos verticales se mantuvo en ambos modelos, pero se produjo una mínima variación en cuantías entre el modelo de losas postensadas, donde el acero es menor con respecto al de losas macizas. A continuación se muestra el dimensionamiento que se tuvo en cuenta para ambos modelos en cada una de las columnas y muros.

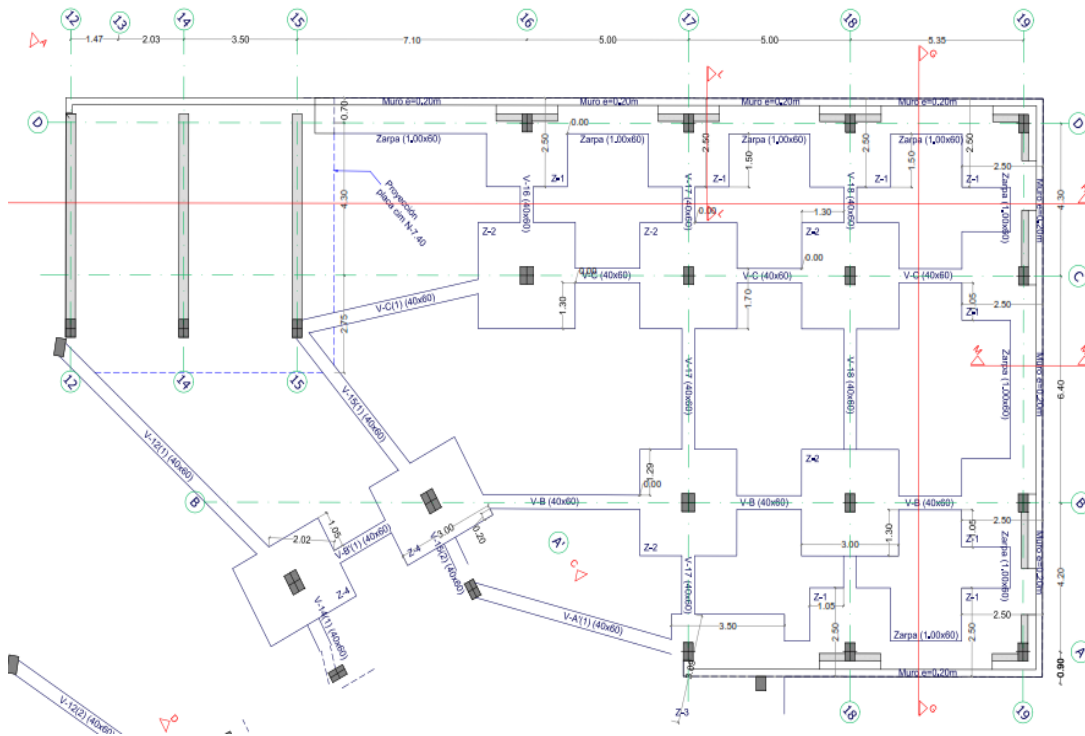
| Pilar                | Dimensiones |
|----------------------|-------------|
|                      | (cm)        |
| C-16, B-17           | 40x50       |
| C-17, C-18, C-19,    | 30x50       |
| B'-14, B'-15, B''13, | 30x50       |
| A'-13                | Diám.: 0.30 |
| B-16                 | 40x60       |

|       |             |
|-------|-------------|
| A"15  | 40x60       |
| E-18  | 50x30       |
| I-18  | 50x30       |
| J-18  | 50x30       |
| B'-13 | 30x50       |
| D-13  | 40x50       |
| Muros | Espesor: 30 |

## ELEMENTOS DE CIMENTACIÓN

- Tensión admisible en situaciones persistentes: 0.270 MPa
- Tensión admisible en situaciones accidentales: 0.270 MPa

El proyecto fue modelado con una cimentación tipo superficial, con zapatas aisladas y vigas de amarre o cimentación. Para el comparativo, se mantuvieron iguales las dimensiones de las vigas de amarre o cimentación y se variaron las dimensiones y el refuerzo de las zapatas según cumplimiento de resistencia. En el modelo de losas macizas se obtuvieron los siguientes resultados:



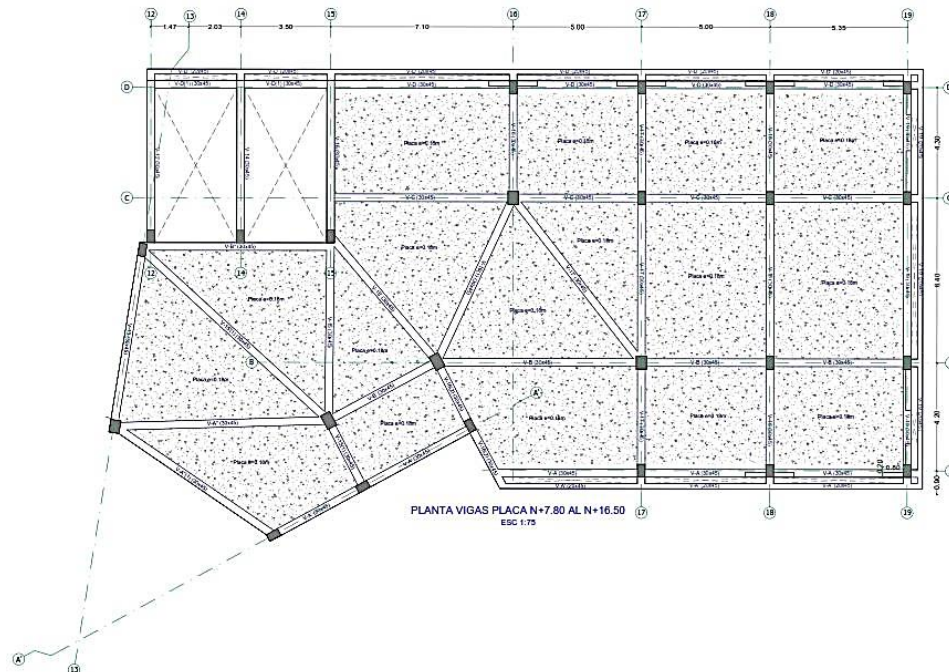
| <b>Cuadro de Zapatas</b> |                         |                  |                      |                      |
|--------------------------|-------------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Referencia</b>        | <b>Dimensiones [cm]</b> | <b>Canto [m]</b> | <b>Armado inf. X</b> | <b>Armado Inf. Y</b> |
| A17                      | 250x300                 | 60               | 15#6 c/20            | 13#6 c/20            |
| A18                      | 250x250                 | 60               | 13#6 c/20            | 13#6 c/20            |
| A19                      | 250x250                 | 60               | 13#6 c/20            | 13#6 c/20            |
| B16                      | 300x350                 | 60               | 18#6 c/20            | 15#6 c/20            |
| B17                      | 300x300                 | 60               | 15#6 c/20            | 15#6 c/20            |
| B18                      | 300x300                 | 60               | 15#6 c/20            | 15#6 c/20            |
| B19                      | 250x250                 | 60               | 13#6 c/20            | 13#6 c/20            |
| C16                      | 300x300                 | 60               | 15#6 c/20            | 15#6 c/20            |
| C17                      | 300x300                 | 60               | 15#6 c/20            | 15#6 c/20            |
| C18                      | 300x300                 | 60               | 15#6 c/20            | 15#6 c/20            |
| C19                      | 250x250                 | 60               | 13#6 c/20            | 13#6 c/20            |
| D16                      | 250x250                 | 60               | 13#6 c/20            | 13#6 c/20            |
| D17 y D18                | 250x250                 | 60               | 13#6 c/20            | 13#6 c/20            |
| D19                      | 250x250                 | 60               | 13#6 c/20            | 13#6 c/20            |
| A"15                     | 300x350                 | 60               | 18#6 c/20            | 15#6 c/20            |

Y para el modelo con losas postensadas se obtuvieron los siguientes resultados:

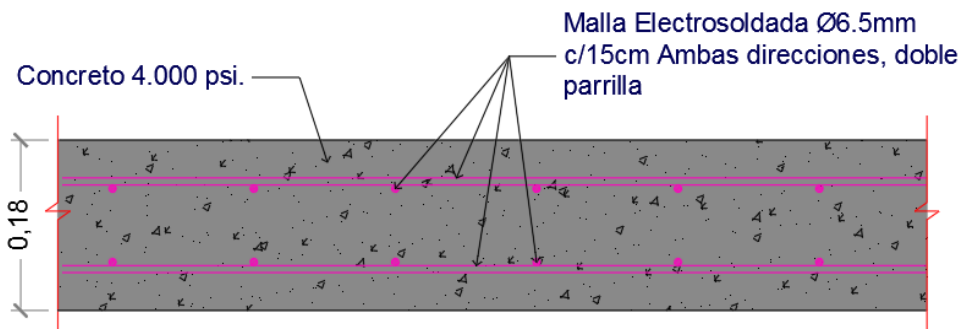
| <b>Cuadro de Zapatas</b> |                         |                  |                      |                      |
|--------------------------|-------------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Referencia</b>        | <b>Dimensiones [cm]</b> | <b>Canto [m]</b> | <b>Armado inf. X</b> | <b>Armado Inf. Y</b> |
| A17                      | 200x240                 | 60               | 9#6 c/26             | 7#6 c/26             |
| A18                      | 300x150                 | 60               | 5#6 c/26             | 11#6 c/26            |
| A19                      | 220x200                 | 60               | 7#6 c/26             | 8#6 c/26             |
| B16                      | 300x250                 | 60               | 10#7 c/23            | 11#6 c/26            |
| B17                      | 300x300                 | 60               | 17#6 c/17            | 12#7 c/25            |
| B18                      | 270x250                 | 60               | 8#7 c/29             | 10#6 c/26            |
| B19                      | 310x180                 | 60               | 7#6 c/26             | 12#6 c/26            |
| C16                      | 300x300                 | 60               | 12#7 c/25            | 21#5 c/14            |
| C17                      | 250x250                 | 60               | 15#5 c/16            | 9#6 c/26             |
| C18                      | 270x250                 | 60               | 9#7 c/28             | 10#6 c/26            |
| C19                      | 310x180                 | 60               | 7#6 c/26             | 12#6 c/26            |
| D16                      | 300x180                 | 60               | 7#6 c/26             | 11#6 c/26            |
| D17 y D18                | 300x150                 | 60               | 5#6 c/26             | 11#6 c/26            |
| D19                      | 200x240                 | 60               | 9#6 c/26             | 7#6 c/26             |
| A"15                     | 330x330                 | 60               | 19#6 c/17            | 19#6 c/17            |

## LOSAS

Para el modelo de losas macizas se obtuvieron óptimos resultados y cumplimiento de solicitaciones con losas macizas de 18 cm de espesor, las vigas descolgadas se calcularon de 30 cm x 45 cm y se despiezaron según los requerimientos por carga y sismo.



El refuerzo de la losa se hace con una doble malla electro soldada 6,5 mm en ambas direcciones con algunos refuerzos adicionales en varilla No. 3. A continuación se presenta un detalle típico de la losa.



## Modelo de losas postensadas

En el modelo de losas postensadas se tuvieron en cuenta las mismas cargas del modelo anterior, se distribuyeron 2 torones no adheridos cada metro en toda la losa en una dirección, la de armado, y se modelaron vigas de 30 cm x 35 cm con diferentes configuraciones de cable en cada una de las vigas según solicitación. Las dimensiones de las vigas cambian con respecto al modelo anterior, debido a los cables, ya que las fuerzas inducidas por los cables aportan en la resistencia de las cargas de las vigas, ya sean en la misma dirección de armado de la losa o en vigas cargueras. Adicional, en la losa se dejan unos refuerzos por ductilidad y temperatura que son cuantías mínimas por norma, se colocan varillas No. 4 en positivos y negativos cada 45 cm para cumplir este requisito.

