

DISEÑO Y APLICACIÓN DE SISTEMAS DE POSTENSADO DE LOSAS CON TENDONES NO ADHERIDOS EN ESTRUCTURAS DE USO HABITACIONAL Y COMERCIAL

Mario Andrés Montaña León ¹

Resumen

El postensado de losas es un sistema relativamente nuevo en nuestro medio. Debido a la explosión en el rubro de la construcción que ha experimentado en los últimos tiempos nuestro país, las empresas dedicadas a este campo se han visto en la necesidad de innovar y adoptar nuevas tecnologías en sus métodos y sistemas de construcción para llegar a estructuras más eficientes y conseguir así que las obras realizadas sean más económicas, seguras, estéticas además de reducir los tiempos en el proceso de construcción. Durante los últimos años, sobre todo en las ciudades de mayor crecimiento de Bolivia, el postensado de losas ha tenido gran acogida en el diseño y construcción de estructuras de edificios de departamentos del mismo modo en estructuras de uso comercial. En el exterior esta tecnología ya es utilizada hace muchos años, sino son décadas, en estructuras de uso industrial, hospitales, edificios de estacionamientos, educativas, gubernamentales, etc.; debido a las grandes ventajas que este tipo de estructuras ofrece.

A continuación se explicara detalladamente el método de la carga balanceada y se desarrollara un ejemplo de diseño de una losa postensada nervada armada en dos direcciones. Este método es uno de los más utilizados en la actualidad para el diseño de losas postensadas debido a su practicidad y mejor comportamiento estructural.

Palabras-clave: sistema de losas; losas postensadas; método de la carga balanceada.

¹ M.Sc. in C.M. de la Florida International University, Licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad Privada Boliviana, mmont063@fiu.edu

1. INTRODUCCIÓN

Para entender mejor como funciona una losa postensada se va a definir lo que es el pre-esfuerzo de un elemento estructural. Una de las mejores definiciones sobre el hormigón pre-esforzado es la dada el Comité de Pre-esforzado del ACI (Montaño, 2006) que dice: *“El concreto pre-esforzado es un concreto en el cual se han introducido esfuerzos internos de tal magnitud y distribución que los esfuerzos resultantes de las cargas externas dadas se equilibran hasta un grado deseado. En miembros de concreto reforzado se introduce, comúnmente, el pre-esfuerzo dando tensión al refuerzo de acero”*.

Para el análisis del comportamiento de un elemento pre-esforzado existen los siguientes principales conceptos:

El pre-esfuerzo transformara al hormigón en un elemento elástico.

El hormigón pre-esforzado es una combinación de hormigón y acero similar al hormigón reforzado.

El pre-esfuerzo introducido en un elemento estructural de hormigón lograra un balance de cargas.

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

En el desarrollo de este estudio se utilizará el postensado como pre-esfuerzo en las losas. El postensado es un tipo de pre-esfuerzo en el cual se tensan los tendones en el hormigón cuando este ya ha alcanzado una resistencia mínima, una vez tensados los tendones estos son anclados en un extremo del hormigón imprimiendo así en el elemento estructural las cargas internas requeridas. Estos tendones pueden transmitir esfuerzos al hormigón de dos formas: Los tendones adheridos al hormigón, transmiten esfuerzos al hormigón a lo largo de su longitud por la adherencia al hormigón. Cuando los tendones son no adheridos, transmiten los esfuerzos al hormigón una vez estos son tensados y anclados en sus extremos.

Las principales ventajas que se han obtenido gracias al uso de losas postensadas en estructuras de hormigón armado se pueden resumir en las siguientes:

- Notable reducción en la sección de las losas disminuyendo así la carga muerta en cada piso llegando a una menor carga final en fundaciones. Con un promedio de reducción del 50% en cada piso.
- Obtención de claros más largos permitiendo una mejor distribución de columnas en sótano y mayor libertad en el uso de los espacios en los ambientes interiores.
- Debido al balance de cargas logrado por los tendones de postensión las deflexiones a largo plazo de las losas son notablemente menores.

- Mejores condiciones estéticas en cielos falsos, debido a que las losas postensadas no tienen vigas entre columnas a diferencia de las losas clásicas de hormigón armado.
- Gracias a que las losas postensadas no cuentan con demasiado refuerzo convencional, el armado resulta más fácil para el personal de armado y amarre de fierro.
- Debido a las propiedades del postensado, una vez tensados los cables y anclados en el hormigón la losa ya está lista para resistir el peso del encofrado y armado de la siguiente losa reduciendo así notablemente los tiempos de armado y vaciado de losas en el cronograma general de la obra.

Para el ejemplo de diseño de esta losa postensada se adoptó la norma del ACI 318 (2005) para los fundamentos y parámetros de diseño ya que esta norma de diseño, junto con las diferentes otras normas afines, contienen toda la información necesaria para un diseño adecuado y completo. Otra razón por la se optó el Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318, 2005) es la gran cantidad de bibliografía, basada en esta norma, que se puede encontrar para el diseño de este tipo de losas y por la falta de una normativa actualizada y adaptada a nuestro medio en este campo.

2. EJEMPLO DE DISEÑO DE UNA LOSA POSTENSADA NERVADA EN DOS DIRECCIONES

2.1 Planta Tipo

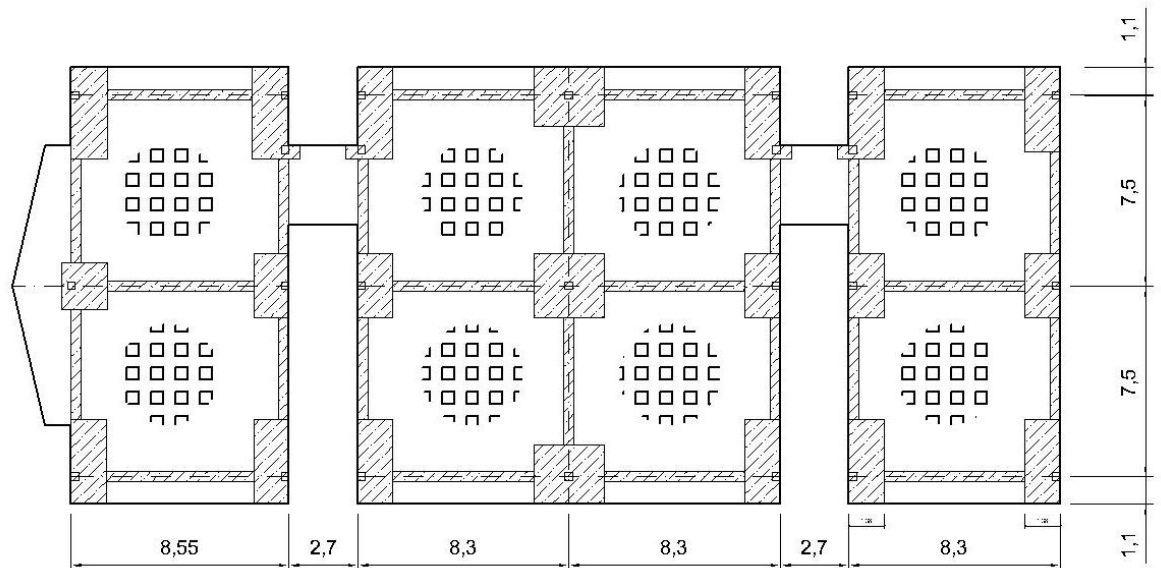


Figura 1 – Planta Tipo para el Diseño de la Losa Postensada (Montaño, 2006)

La planta tipo mostrada en la Fig. 1 pertenece al edificio “Venus” ubicado en la Plazuela Colón en la ciudad de Cochabamba, Bolivia. En este ejemplo se mostrará paso a paso el diseño de una franja de diseño de losa postensada. Como se puede ver, toda la losa es

nervada en dos direcciones. En las zonas de las columnas se previeron ábacos para resistir los esfuerzos de corte perimetral y corte unidireccional.

2.2 Predimensionamiento

Según Montaña (2006) es necesario realizar el predimensionamiento de la losa postensada nervada en dos direcciones siguiendo los criterios del Postensioning Manual del Precast Concrete Institute (PCI). La Tabla 1 nos muestra las relaciones Claro/Peralte sugeridas por el PCI para una relación CV/CM<1 (carga viva/carga muerta), que en este caso se cumple ya que la carga viva para nuestro proyecto será de 2 KN/m². (Según las tablas de la ASCM-07 (2002) la carga viva para estructuras de uso residencial es de 1,95 KN/m²).

Tabla 1 – Relaciones Claro/Peralte en Losas Postensadas (Postensioning Institute)

Relaciones Claro/Peralte Sugeridas en Losas Postensadas (CV/CM <1)	
Losa llena en una dirección con vigas	48
Losa plana en dos direcciones sin vigas	45
Losa plana en dos direcciones con ábacos	50
Losa llena en dos direcciones con vigas en ambas direcciones	55
Losa nervada en dos direcciones sin vigas	35
Losa nervada en una dirección con vigas	40

Siguiendo estos parámetros se puede ver que:

$$h = \frac{(8,55m + 7,5m)0.5}{35} = 0,22m \quad (1)$$

Adoptando un peralte de 0,20m para optimizar la altura de la losa así como también para realizar un ejemplo de diseño más completo y menos cercano a los valores mínimos de diseño que nos exige la norma ACI 318 (2005). En una iteración previa se tomo un peralte de 0,25m. Se comprobó que con este peralte no se llegaba a una compresión aceptable en el hormigón ya que se requerían menor cantidad de cables y una mayor cantidad de acero de refuerzo convencional.

2.3 Cargas, Propiedades de Los Materiales y Propiedades de La Sección Transversal de la Losa

Las propiedades de los materiales a ser utilizados en este ejemplo de diseño son los siguientes:

- Hormigón de resistencia nominal a la compresión de 28 N/mm². Mínimo requerido para el diseño y construcción de losas postensadas.
- Acero de Pre-esfuerzo de ½” o 12,7mm.
- Acero convencional de construcción con un límite nominal de fluencia de 500 N/mm².

En relación a las cargas gravitacionales:

- Carga Muerta (DL): 5 KN/m²
- Carga Viva (LL): 2 KN/m²

La sección transversal de la losa se muestra en la Fig. 2:

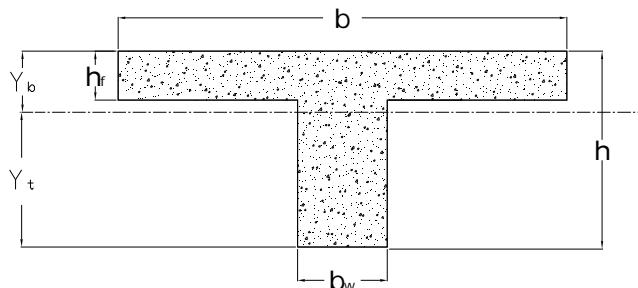


Figura 2 – Sección transversal de la losa

Considerando la simbología de la Fig. 2, se adoptó:

- $b_w = 100 \text{ mm.}$
- $h_f = 50 \text{ mm.}$
- $h = 200 \text{ mm.}$
- $b = 500 \text{ mm.}$
- $y_t = 137,50 \text{ mm.}$
- $y_b = 62,50 \text{ mm.}$

Asumiendo un metro de ancho, se tiene:

- $A = 40000 \text{ mm}^2.$
- $S = 11066700 \text{ mm}^3.$

2.4 Parámetros de Diseño

Los parámetros de diseño seguirán los criterios de la norma ACI 318 (2005) asumiendo una sección no fisurada.

Tensiones admisibles:

- La tensión admisible de servicio será de $-2,0\sqrt{f'c} = -3,35 \text{ N/mm}^2$
- La compresión admisible bajo cargas de servicio será de $0,45f'c = 12,6 \text{ N/mm}^2$

Tomando una resistencia nominal del hormigón a la compresión de 28 N/mm² que es la recomendada por el PTI (2004).

Limites de compresión:

- Compresión mínima = 0,8 N/mm²
- Compresión máxima = 3,5 N/mm²

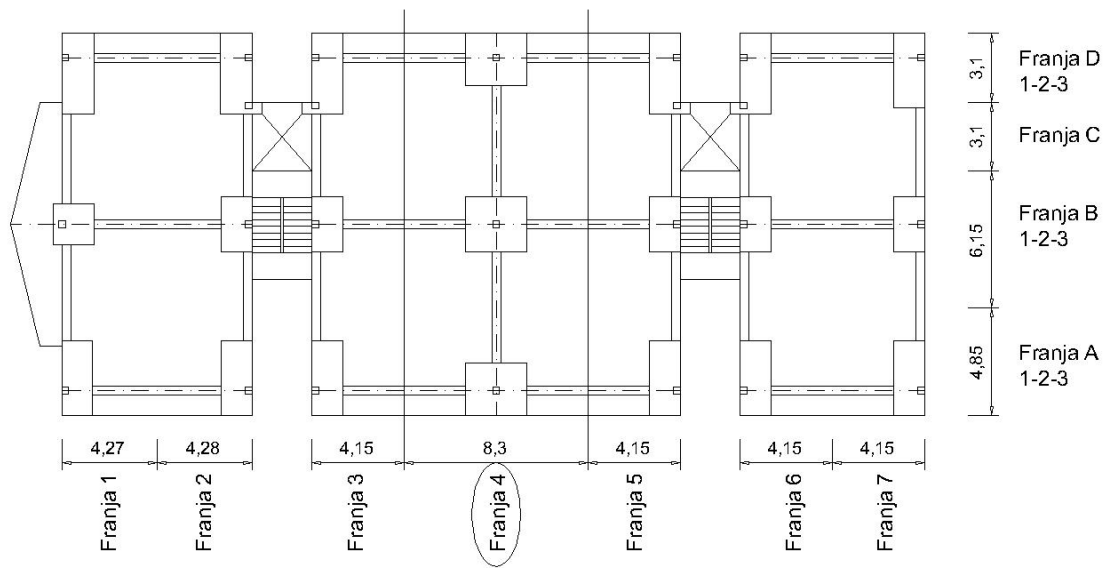


Figura 3 – Franjas de diseño de la planta tipo. (Montaño, 2006)

2.5 Parámetros de Postensado

El ejemplo de diseño se realizara sobre la franja 4 mostrada en la Fig. 3. Esta es una franja central con un ancho de 8,30m. Consta de 4 tramos, dos centrales de 7,50m y dos volados exteriores de 1,10m.

La carga a ser balanceada por el postensado será del 100% de la carga muerta:

$$w_b = 100\%DL = 5KN / m^2 \quad (2)$$

Debido a que el recubrimiento en el hormigón será de 30 mm, el a máximo (que es la distancia entre el punto inferior de la trayectoria del perfil del cable al punto superior en un tramo determinado) será:

$$a = 200 - 2x30 = 140mm \quad (3)$$

Una vez determinados el ancho de la franja de diseño y la carga a ser balanceada se puede calcular la fuerza efectiva en el cable de postensado. Para esto se utilizará tendones de baja relajación de 1,3 cm de diámetro con una resistencia nominal $f_{ps}=1890$ N/mm² con pérdidas a largo plazo de 210 N/mm².

$$F_{se} = A_{ps}(0,7f_{ps} - 210) = 99(0,7x1890 - 210) = 110,187KN \quad (4)$$

La fuerza de postensado necesaria será:

$$F = \frac{w_b L^2}{8a} = \frac{5x7,5^2}{8x0,14} = 251,12KN / m \quad (5)$$

El numero de cables para el ancho de banda diseñado:

$$\#cables = \frac{8,3 * 251,12}{110,187} = 18,9 \rightarrow 19 \quad (6)$$

Se comprueba la fuerza de postensado sobre el área de la franja de diseño:

$$\frac{F}{A} = \frac{19 \cdot 110,187 \cdot 1000}{8,3 \cdot 80000} = 3,153 \text{ N / mm}^2 \quad \checkmark \quad (7)$$

Se ajusta el perfil del tendón para tener una carga balanceada uniforme en toda la franja de 5KN/m².

Para los tramos centrales (7,50m)

$$a = \frac{w_b L^2}{8F} = \frac{5 \cdot 7,5^2}{8 \cdot 251,12} \cdot 1000 = 140 \text{ mm} \quad (8)$$

Para los tramos en volado (1,10m)

$$a = \frac{w_b L^2}{8F} = \frac{5 \cdot 1,1^2}{8 \cdot 251,12} \cdot 1000 = 3 \text{ mm} \quad (9)$$

2.6 Comprobación de los Esfuerzos bajo Cargas de Servicio

Se realizó la comprobación de los esfuerzos bajo cargas de servicio mediante la modelación de la losa en el programa SAFE. Gracias a las características de este programa se pudo realizar el análisis por bandas para encontrar los esfuerzos específicamente de la franja de diseño 4.

Los momentos obtenidos debido a la carga no balanceada por el postensado se calculan sumando algebraicamente el momento obtenido por la carga total (CV + CM) y el momento obtenido por la carga balanceada por el postensado.

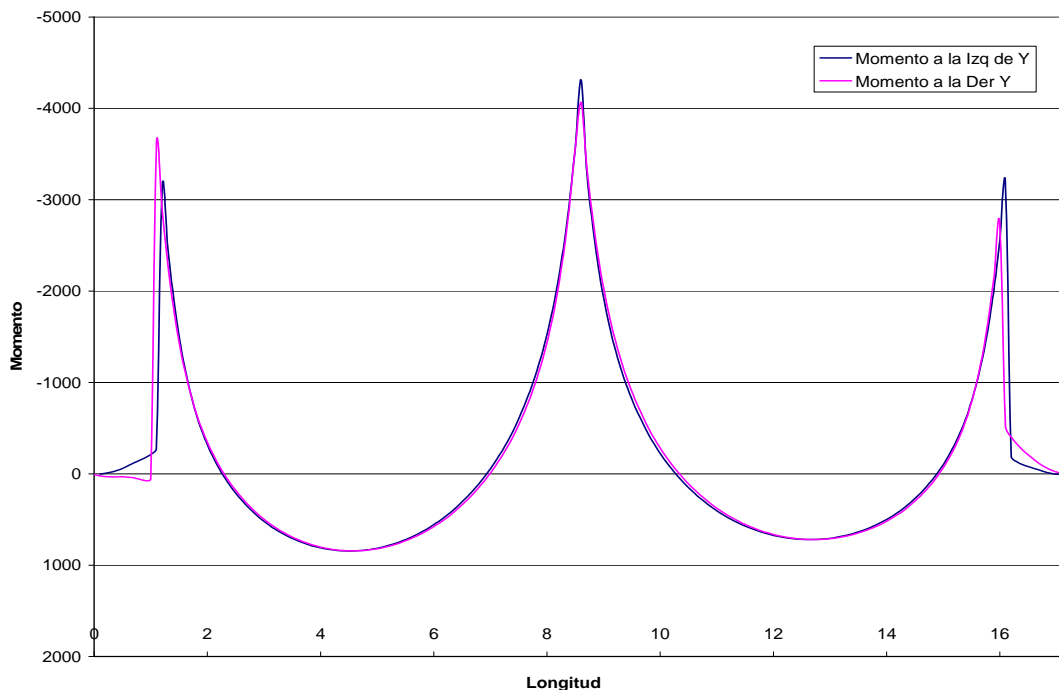


Figura 4 – Diagrama de Momentos por Carga no Balanceada de la Franja 4

Por la Fig. 4 se puede resumir en la Tabla 2 los momentos máximos obtenidos junto a las caras de las columnas:

Tabla 2 – Momentos Máximos por Carga no Balanceada de la Franja 4

Tramo	Izq. KN-m	Central KN-m	Derecha KN-m
1	-	-	-1,170
2	-16,620	8,450	-32,750
3	-30,800	7,200	-14,750
4	-20,00	-	-

A partir de estos momentos de cargas de servicio no balanceadas se puede calcular las tensiones de tracción (-) y compresión (+) netas en el hormigón.

$$f_{cs,ts} = \frac{F}{A} \pm \frac{M_{nb}}{S} \quad (10)$$

Para las tensiones de tracción:

Tabla 3 – Esfuerzos de Tracción en la Franja 4

Tramo	Izq. N/mm2	Central N/mm2	Derecha N/mm2
1	-	-	3,259
2	4,655	2,389	6,112
3	5,936	2,502	4,486
4	3,334	-	-

Para las tensiones de compresión:

Tabla 4 – Esfuerzos de Compresión en la Franja 4

Tramo	Izq. N/mm2	Central N/mm2	Derecha N/mm2
1	-	-	3,047
2	1,651	3,916	0,194
3	0,370	3,804	1,820
4	2,972	-	-

Como se puede observar en los valores obtenidos toda la sección de la losa está sometida a compresión debido a la tensión de los cables de postensado. Los esfuerzos de tracción son computados en las fibras superiores en los extremos de cada tramo y en las fibras inferiores en el centro del tramo y los esfuerzos de compresión son computados en las fibras inferiores en los extremos de cada tramo y en las fibras superiores en el centro del tramo.

Los parámetros admisibles para tracción y compresión en el hormigón son los siguientes:

$$\text{Tracción admisible: } -2,0\sqrt{f'c} = -3,347 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Compresión admisible: } 0,45f'c = 12,6 \text{ N/mm}^2$$

2.7 Cálculo del Acero de Refuerzo para Condiciones de Servicio

Ya que los resultados obtenidos para las tensiones de tracción y compresión no son mayores a los admisibles el acero de refuerzo se calcula como sigue a continuación.

Para los momentos negativos:

$$A_s = 0,004A = 0,004(52500\text{mm}^2) = 210\text{mm}^2 / m \quad (11)$$

Y para los momentos positivos:

$$A_s = 0,004A = 0,004(27500\text{mm}^2) = 110\text{mm}^2 / m \quad (12)$$

La Fig. 5 detalla esta situación:

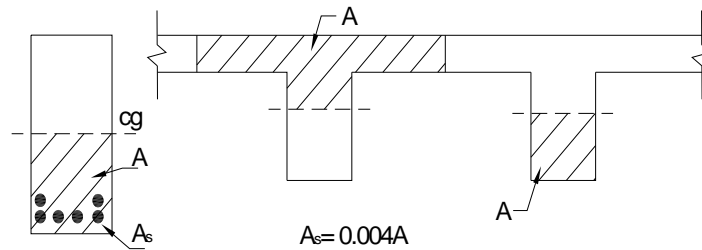


Figura 5 – Armadura Adherente Mínima para Elementos Solicitados a Flexión (Portland Cement Association, 2002)

2.8 Cálculo del Acero no Postensado con Cargas de Diseño

La combinación de cargas para obtener los esfuerzos más desfavorables para una losa postensada es:

$$M_u = 1,2CM + 1,6CV + 1,0M_2 \quad (13)$$

En la expresión anterior M_2 son los momentos secundarios producidos debido a las deformaciones causadas por las cargas que el postensado de los cables aplica al hormigón.

$$M_2 = M_{bal} - F * e \quad (14)$$

donde:

M_{bal} es el momento producido por la carga balanceada de los cables de postensado.

F es la fuerza de postensado.

e es la distancia entre el centroide de la sección transversal del elemento y el centro de gravedad del cable de postensado.

Los momentos máximos obtenidos en la cara de la columna para las cargas últimas de diseño ($1,2CM + 1,6CV$) están resumidos en la Tabla 5. Los momentos secundarios obtenidos se muestran en la Tabla 6 y los momentos últimos de diseño se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 5 – Momentos Máximos en la Franja 4 para $1,2CM + 1,6CV$

Tramo	Izq. (KN-m)	Central (KN-m)	Derecha (KN-m)
1	-	-	-4,000
2	-77,000	3,880	-149,000
3	-141,000	33,500	-67,800
4	-7,790	-	-

Tabla 6 – Momentos secundarios en la Franja 4

Tramo	Izq. KN-m	Central KN-m	Derecha KN-m
1	-	-	-
2	33,439	5,895	73,439
3	68,839	8,995	28,539
4	-	-	-

Tabla 7 – Momentos últimos de diseño en la Franja 4 (1,2CM + 1,6CV + 1,0M₂)

Tramo	Izq. KN-m	Central KN-m	Derecha KN-m
1	-	-	-4,000
2	-43,561	44,695	-75,561
3	-72,161	42,495	-39,261
4	-0,7790	-	-

Para efectos de este ejemplo de diseño se calculara paso a paso la armadura necesaria para el tramo número 1 de la franja 4 y se mostraran los resultados obtenidos para los tramos siguientes en la Tabla 8.

Se calcula el área de la armadura de postensado en el ancho de la franja 4.

$$A_{ps} = \frac{19 \text{ cables} * 99 \text{ mm}^2 / \text{cable}}{8,3 \text{ m}} = 226,63 \text{ mm}^2 / \text{m} \quad (15)$$

A_s = Acero existente mínimo calculado anteriormente = $210 \text{ mm}^2 / \text{m}$

Luego se calcula la cuantía del refuerzo de postensado.

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{A_g} = \frac{226,63}{80000} = 0,0028 \quad (16)$$

Se calcula la tensión en la armadura de postensado a la resistencia nominal

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f'_c}{100\rho_p} = 1101,87 + 70 + \frac{28}{100 * 0,0028} = 1270,71 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad (17)$$

Siendo f_{se} el esfuerzo de compresión final en el tendón después de las pérdidas de tensión en la armadura de postensado y f'_c la resistencia nominal del hormigón a compresión.

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y}{0,85 f'_c b} = \frac{226,63 * 1270,71 + 210 * 500}{0,85 * 28 * 1000} = 16,51 \text{ mm} \quad (18)$$

Calculamos la altura del bloque rectangular de tensiones equivalentes, a.

Se comprueba que la deformación específica neta de tracción en el acero sea mayor al límite inferior establecido por el ACI para secciones controladas por tracción.

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{16,51}{0,85} = 19,41, \text{ entonces:}$$

$$\varepsilon_t = \frac{0,003(d-c)}{c} = \varepsilon_t = \frac{0,003(170-19,41)}{19,41} = 0,023 > 0,005 \checkmark \text{ Controlada por tracción.} \quad (19)$$

Y finalmente se verifica que la resistencia nominal al momento de esta sección sea mayor al momento último de diseño. En el caso de losas postensadas se obtiene la resistencia nominal de la sección transversal de la losa tomando en cuenta la armadura postensada y no postensada.

$$\phi M_n = 0,9(A_{ps} f_{ps} + A_s f_y) \left(d - \frac{a}{2} \right) = \frac{0,9}{1000} (226,63 * 1270,71 + 210 * 500) \left(170 - \frac{16,51}{2} \right) = 59,770 \text{ KN-m} \quad (20)$$

$$\frac{Mu}{\phi M_n} = \frac{4,000}{59,770} = 0,067 \checkmark \quad (21)$$

En el caso de que la última comprobación no sea cumplida es necesario aumentar la sección de armadura no postensada para que la resistencia nominal de la sección transversal de la losa multiplicada por el factor de minoración sea mayor al momento último de diseño.

Tabla 8 – Calculo del Acero no Postensado para la Franja 4

Tramo	Parámetro	Izq.	Central	Derecha
1	d, mm	-	-	170
	Aps, mm ² /m	-	-	226,63
	As, mm ² /m	-	-	210
	Pp	-	-	0,0028
	fps, N/mm ²	-	-	1270,71
	a, mm	-	-	16,5
	Et	-	-	0,023
	ΦMn, Kn-m	-	-	59,770
	Mu/ΦMn	-	-	0,066
2	d, mm	170	170	170
	Aps, mm ² /m	226,63	226,63	226,63
	As, mm ² /m	210	110	550
	Pp	0,0028	0,0028	0,0028
	fps, N/mm ²	1270,71	1270,71	1270,71
	a, mm	16,5	14,4	23,65
	Et	0,023	0,027	0,015
	ΦMn, Kn-m	59,770	52,210	85,410
	Mu/ΦMn	0,73	0,86	0,88
3	d, mm	170	170	170
	Aps, mm ² /m	226,63	226,63	226,63
	As, mm ² /m	550	110	210
	Pp	0,0028	0,0028	0,0028
	fps, N/mm ²	1270,71	1270,71	1270,71
	a, mm	23,65	14,4	16,5
	Et	0,015	0,027	0,023
	ΦMn, Kn-m	85,410	52,210	59,770
	Mu/ΦMn	0,84	0,81	0,66
4	d, mm	170	-	-
	Aps, mm ² /m	226,63	-	-
	As, mm ² /m	210	-	-
	Pp	0,0028	-	-
	fps, N/mm ²	1270,71	-	-
	a, mm	16,5	-	-
	Et	0,023	-	-

ΦM_n , Kn-m	59,770	-	-
$M_u/\Phi M_n$	0,13	-	-

Una vez calculada la armadura de flexión para la losa es necesario realizar la verificación de la resistencia al corte perimetral y unidireccional. En caso de que los ábacos previstos en la losa no tengan la suficiente resistencia nominal al corte ya sea este perimetral o unidireccional es necesario realizar el cálculo de la armadura de corte para estas secciones o diseñar capiteles con una sección resistente al corte.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Haciendo una comparación de costos entre una losa postensada nervada armada en dos direcciones y la losa originalmente diseñada originalmente para la construcción del edificio “Venus” con hormigón armado se proyecta una reducción en el costo de la losa de un 14% (Montaño, 2006).
- Se presume también que al utilizar elementos estructurales, las cargas que llegaran a la fundación mediante las columnas serán menores. Reduciendo así, la sección de las fundaciones llegando también a una disminución en el presupuesto general de la obra.
- Se reduce la altura de cada entrepiso en un 50%. Es decir 20cm en cada losa, lo que nos lleva a una reducción en la altura total del edificio de 2.40m.
- Una vez conseguido el diseño de esta losa podemos ver que al no tener vigas los espacios son mucho más limpios y estéticos cumpliendo así con una de las premisas del uso de las losas postensadas.
- Debido al pre-esfuerzo introducido en las losas que balancean el 100% de la carga muerta de servicio las deflexiones en la losa serán mínimas aun en claros más largos que los propuestos en este ejemplo de diseño.
- Siguiendo los métodos constructivos y las recomendaciones del PTI (2004) se puede llegar a una disminución en el cronograma de obras ya que gracias al postensado las losas alcanzan una mayor resistencia en menor tiempo. Se ha observado que en proyectos realizados con este tipo de losas es posible vaciar una losa entre 7 y 10 días en promedio.
-

4. REFERENCIAS

AALAMI, BIJON O. and BOMMER, ALAN. **Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors**. First Edition, Post-Tensioning Institute.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCM 7-2002. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**. Revision of ASCE 7-98, ASCE.

MONTAÑO, M. A. (2006) **Diseño Estructural del Edificio Venus II con entrepisos de losas pos-tensadas nervuradas en dos direcciones**. Tesis de pre-grado. Universidad Privada Boliviana, 2006.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (2002). **Notes on ACI 318-02, Building Code Requirements for Structural Concrete with Design Applications**. Eight Edition, Portland Cement Association.

POST-TENSIONING INSTITUTE (2004). **Design of Post-Tensioning Slabs Using Unbounded Tendons.** Third Edition, Post-Tensioning Institute.