

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA  
UNAN-MANAGUA  
RECINTO UNIVERSITARIO RUBEN DARIO  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA**



**TEMA PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO CIVIL:  
ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL CONCRETO PRESFORZADO**

**TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:  
BR. LORENA ESPERANZA MEZA QUINTANILLA**

**TUTOR:  
DR. ING. BAYARDO ALTAMIRANO**

Managua, Nicaragua

## DEDICATORIA

A:

Dios por permitirme la vida y por darme fortaleza cada día de mi vida permitiéndome terminar este trabajo con su inmensa bondad y amor.

Mi madre por darme la vida, amarme siempre, apoyarme, por su constante motivación para culminar mi carrera y ser el pilar más valioso de mi vida.

Mi padre por amarme, apoyarme y por todo su esfuerzo por darme un futuro mejor y estar presente siempre en mi vida.



TABLA DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	1
II.	Antecedentes.....	2
III.	Justificación.....	4
IV.	Objetivos.....	5
V.	Marco Teórico.....	6
5.1	Iniciadores del concreto presforzado.....	6
5.2	Aspectos fundamentales del concreto presforzado.....	7
5.2.1	Concreto presforzado. Definición.....	8
5.2.2	Estados de Carga.....	13
5.2.2.1	Estado Inicial.....	14
5.2.2.2	Estado Intermedio.....	14
5.2.2.3	Estado Final.....	14
5.2.3	Materiales.....	15
5.2.3.1	Tipos de acero utilizados para el concreto presforzado.....	15
5.2.3.2	Tipos de concreto utilizados para el concreto presforzado.....	17
5.3	Metodos de presforzado.....	18
5.3.1	Metodos del pretensado.....	18
5.3.1.1	Características.....	20
5.3.1.2	Ventajas.....	21
5.3.1.3	Desventajas.....	21
5.3.1.4	Tipos de Acero utilizados para el concreto pretensado.....	21
5.3.1.5	Tipos de Concreto utilizados para el concreto pretensado.....	22
5.3.2	Metodo del Postensado.....	23
5.3.2.1	Características.....	23
5.3.2.2	Ventajas.....	24

5.3.2.3Tipos de Concreto utilizados para concreto postensado.....	24
5.3.2.4Tipos de Acero utilizados para concreto postensado.....	24
5.4 Perdidas de Presfuerzo.....	26
5.4.1Perdida Parcial de la Fuerza de Presfuerzo.....	26
5.4.2Deslizamiento del Anclaje.....	27
5.4.3Friccion.....	29
5.4.4Acortamiento Elástico.....	32
5.4.5Contraccion.....	34
5.4.6Flujo Plástico.....	36
5.4.7Relajacion.....	38
5.4.8Estimacion Aproximada de la Suma Total de las Perdidas Diferidas.....	40
5.5Diseño.....	43
5.5.1Esfuerzos de Adherencia, Longitud de Transferencia y Longitud de Desarrollo.....	43
5.5.2Estado de Esfuerzos.....	45
5.5.3Proceso de Diseño.....	46
5.5.4Separacion y Recubrimiento del Acero.....	62
5.6Aplicaciones.....	64
5.6.1Puentes de Concreto Presforzado.....	64
5.6.1.1Importancia del uso de Concreto Presforzado.....	64
5.6.1.2Analisis y Diseño de Superestructuras de Puentes con Elementos Presforzados.....	66
5.6.2Muros de Concreto Presforzado.....	74

5.6.2.1Tipos Generales de Muros de Contención.....	75
5.6.3Estadios.....	75
5.6.4Tuneles de Arco.....	76
5.6.5Puente Telpaneca en Nicaragua.....	76
VI. Conclusión.....	80
VII.Bibliografía.....	81
VIII. Anexos.....	82

### I. Introducción.

En el presente trabajo se estudia el concreto presforzado; tanto en el método pretensado como en el método postensado.

En el primer capítulo se da a conocer a los iniciadores del concreto presforzado, los aportes realizados por cada uno de ellos y a los que lograron perfeccionar este tipo de concreto que hoy en día es utilizado en los diferentes trabajos de ingeniería.

En el segundo capítulo se explican los aspectos más importantes de dicho tema de relevada importancia así como la diversidad de estados de carga a los cuales el concreto puede estar sujeto.

En el tercer capítulo se dan a conocer las características del método pretensado como del método postensado así como otros aspectos importantes de ambos métodos.

En el cuarto capítulo se aprenden los diferentes tipos de pérdidas de presfuerzo caracterizando cada una de ellas.

En el quinto capítulo se da a conocer los esfuerzos de adherencia, así como los estados de esfuerzo como el proceso de diseño.

En el sexto capítulo se muestran las diversas aplicaciones que tiene el concreto presforzado en la construcción.

Además abordaremos los aspectos fundamentales que presenta el diseño de concreto pres forzado y los parámetros que este tiene que cumplir para alcanzar su máxima resistencia.

El concreto ha salido de la revolvedora hace más de una centuria y media, y sin reposar ha cubierto miles de kilómetros en todas las superficies del planeta, inclusive en las del océano. Se vertieron millares de toneladas de concreto (de solo dos millones de toneladas en 1910 a 1300 millones de toneladas en 1990) en forma de edificio, túneles, casas, puentes, museos, estaciones de tren, terminales aéreas. Betón, hormigón o concreto... este material es el favorito de muchos constructores.

### II. Antecedentes

El principio básico del pretensado fue aplicado a la construcción quizás hace siglos, cuando se ataban cintas o bandas metálicas alrededor de duelas de madera para formar los barriles. Cuando se apretaban los cinchos, estaban bajo una fuerza que creaba un esfuerzo de compresión entre las duelas y las habilitaban para resistir la tensión en arco, producida por la presión interna del líquido contenido.

El concreto presforzado fue patentado por primera vez en 1888 por Monier C.F.W. Doehring, quien expuso por primera vez, claramente, la idea de la pre compresión. Su procedimiento fallo entonces, por la deficiente calidad del concreto. Solicita una patente en la que describe unos elementos en forma de tablonos y paneles triangulares de mortero con alambres en tracción en su interior. Estos elementos servirían como protección contra el fuego de suelos de madera. Doehring pensó que una fuerza de tracción haría que ambos materiales: mortero y alambres, rompiesen simultáneamente dado que los alambres habían sido estirados previamente.

Además, Doehring desarrollo el proceso para su fabricación y confió en la buena adherencia entre alambres y mortero. En 1907, el especialista en estática M. Koenen, volvió sobre el principio de la pre compresión , en relación a necesidades constructivas del concreto armado, en el sector de los ferrocarriles, pero el resultado no fue el idóneo, ya que la pretensión de  $600 \text{ kg/cm}^2$  era muy pequeña para combatir las deformaciones por contracción y fluencia. Esta idea desafortunadamente fue abandonada a principios del siglo XX pues al descuidar las calidades de los materiales (concreto y acero), los elementos se comportaban de forma similar a los del concreto armado.

Después de los fracasos debido a la baja calidad de los materiales, la idea del concreto pre comprimido no surgirá otra vez sino hasta 1928, cuando el ingeniero francés, Eugene Freyssinet, puso en claro que la utilización de materiales de alta resistencia, era la condición previa necesaria para la nueva construcción, además aclaro el comportamiento plástico del concreto, haciendo distinción entre las deformaciones por contracción y fluencia. Aconsejo también una armadura de acero de alta calidad, que era tensada previamente hasta las proximidades de su límite crítico. Por estas razones, Eugene Freyssinet, es considerado el padre del concreto presforzado (en la actualidad sigue vigente una empresa de nombre Freyssinet, de venta y servicios de pres fuerzo).

Otro de los más destacados fue Tung Yen Lin quien en 1946 se une a la facultad en la Universidad de Berkeley y comienza su investigación innovadora en hormigón pretensado, lo que simplifica considerablemente el proceso de diseño



para el uso del material, que combina la resistencia a la tracción de los alambres de acero con la resistencia a la compresión del hormigón. Colegas dijeron que la investigación sobre hormigón pretensado encabezada por Lin fue clave para la popularización del material, que era relativamente desconocida en los Estados Unidos en ese momento.

Logrando en 1958 introducir el concepto de la construcción de un puente sobre el estrecho de Bering, conocido como el Puente de la Paz Internacional, así como el Centro de Convenciones Moscones en San Francisco, el puente de Gandu en Taiwán y el techo del Hipódromo Nacional en Caracas, Venezuela.

### **III. Justificación**

En la actualidad a nivel mundial el concreto presforzado se ha convertido en una técnica importante ya que actualmente y desde hace varios años este elemento puede que cueste más de lo normal pero puede brindar mayor seguridad en la estructura.

Este trabajo es importante debido a que da a conocer todos aquellos aspectos fundamentales que presenta el diseño del concreto presforzado en la construcción.

Así como también recopilar información de sus aplicaciones en Nicaragua.

## IV. Objetivos

Objetivo General:

- Dar a conocer los aspectos fundamentales del concreto presforzado y postensado.

Objetivos Específicos:

- Conocer de forma detallada los aportes realizados por los iniciadores del concreto presforzado y postensado.
- Ampliar los conocimientos sobre el diseño del concreto presforzado.
- Conocer aplicaciones del concreto presforzado y postensado.
- Ver un caso de aplicación en nuestro país.

## V. Marco Teórico

### 5.1 Iniciadores del concreto presforzado

El principio básico del pretensado fue aplicado a la construcción quizás hace siglos, cuando se ataban cintas o bandas metálicas alrededor de duelas de madera para formar los barriles. Cuando se apretaban los cinchos, estaban bajo una fuerza que creaba un esfuerzo de compresión entre las duelas y las habilitaban para resistir la tensión en arco, producida por la presión interna del líquido contenido.

Aunque con el tiempo se han hecho diversos intentos para disminuir el agrietamiento del hormigón bajo tracción, las contribuciones más importantes a su solución suelen atribuirse al ingeniero francés Eugene Freyssinet, quien convirtió en realidad práctica la idea de pretensar los elementos de hormigón. Según Freyssinet, pretensar un elemento estructural consiste en crear en él, mediante algún procedimiento específico, antes o durante la aplicación de las cargas externa, tensión o los disminuyan, manteniéndolos bajo las tensiones admisibles que pueden resistir el material.

1886: En este año es aplicado el principio anterior al hormigón cuando P.H. Jackson, un ingeniero de San Francisco, California, obtuvo las patentes para atar varillas de acero en piedras artificiales y en arcos de hormigón que servían como losas de pisos.

1888: Hacia este año, C.E.W. Doehring, de Alemania, aseguró una patente para hormigón reforzado con metal que tenía aplicado un esfuerzo de tensión antes de que fuera cargada la losa.

1908: C. R. Steiner, de los Estados Unidos, sugirió la posibilidad de reajustar las barras de refuerzo después de que hubiera tenido lugar cierta contracción y fluencia del hormigón, con el objeto de recuperar algunas de las pérdidas.

1925: R. E. Dill, de Nebraska, ensayó barras de acero de alta resistencia cubiertas para evitar la adherencia con el hormigón. Después de colocar el hormigón, se tensaban las varillas y se anclaban al hormigón por medio de tuercas en cada extremo.

1928: Se inicia el desarrollo moderno del hormigón pretensado en la persona de Eugene Freyssinet, de Francia, quien empezó usando alambres de acero de alta resistencia para el pretensado. Tales alambres contaban con una resistencia a la ruptura tan elevada como  $18000 \text{ kg/cm}^2$ , y un límite elástico de más de  $12600 \text{ kg/cm}^2$ .

1939: Freyssinet produjo cuñas cónicas para los anclajes de los extremos y diseño gatos de doble acción, los cuales tensaban los alambres y después presionaban los conos machos dentro de los conos hembra para anclarlos a las placas de anclaje. Este método consiste en estirar los alambres entre dos pilares situados a varias decenas de metros, poniendo obturadores entre las unidades, colocando el hormigón y cortando los alambres después de que el hormigón adquiera una resistencia de diseño específica.

1945: La escasez de acero en Europa durante la Segunda Guerra Mundial le dio ímpetu al desarrollo del hormigón pretensado, puesto que se necesita mucho menos acero para este tipo de construcción con respecto a las convencionales en hormigón armado.

El poco aprovechamiento de la sección en el concreto tradicional de un 40% hizo que se buscara como utilizar toda la sección sometiéndola a compresión. Solo pudo lograrse cuando la cantidad de los materiales se elevó considerablemente.

### 5.2 Aspectos fundamentales del concreto presforzado

Una definición muy difundida del concreto presforzado parte de eliminar los esfuerzos de tensión en el concreto mediante la introducción de esfuerzos artificiales de compresión antes de la aplicación de cargas externas y que, superpuestas con éstas, los esfuerzos de tensión totales permanentes; y para todas las hipótesis consideradas, queden comprendidas entre los límites que el material puede soportar indefinidamente.

En resumen, el presforzado se lleva a cabo tensando acero de alta resistencia para inducir esfuerzos de compresión en toda la sección de concreto.

Mediante un detallado estudio de repartición de los aceros de presfuerzo en la sección transversal, es posible garantizar que toda la sección se encuentre solicitada a esfuerzos de compresión. Al entrar en servicio el elemento debido a la flexión, tienen lugar en éste, esfuerzos de tensión y compresión que sumados con los esfuerzos resultantes del pretensado aplicado previamente, resultan en un diagrama de esfuerzos; en el que la sección transversal íntegramente trabaja a compresión.

Entre las ventajas más importantes del concreto presforzado se pueden citar las siguientes:

1. Es recomendable su uso en estructuras impermeables o en aquellas expuestas a agentes agresivos; hecho que tiene lugar por eliminarse las fisuras estando los elementos sometidos a esfuerzos de compresión bajo todas las hipótesis de cargas.

2. La escasa o nula fisuración posibilita que la sección del elemento trabaje íntegramente. Por consiguiente toda ella se considera útil o efectiva.
3. La sección se desempeña en el rango elástico; lo que de alguna manera redundará en una mayor flexibilidad en el elemento, al limitarse los efectos de fluencia y retracción.
4. Posibilita ahorro de acero al utilizar totalmente la armadura hasta cerca de su límite elástico (aceros de elevado límite elástico) y, como consecuencia: una reducción en la cuantía de acero de refuerzo.
5. Se consiguen reducciones considerables de las dimensiones de las secciones de los elementos, y por tanto: aligeramiento de la estructura, lo que a su vez redundará en una reducción de la masa dinámica y por tanto de los niveles en los esfuerzos de diseño.
6. El uso de concreto presforzado permite que los elementos cubran grandes claros con pequeños niveles de peralte, lo que trae como consecuencia una reducción en el consumo de materiales.
7. Al limitarse los niveles de fisuramiento se eleva la durabilidad de la construcción.

Asimismo, el concreto presforzado tiene algunas desventajas respecto al concreto armado, aunque es importante referir que en general no minoran su importancia y extendido uso en la construcción.

Entre las desventajas están que para su fabricación se requieren equipos e instalaciones especiales; que se necesitan materiales (acero y concreto) de altas prestaciones, lo que infiere por este concepto elevados costos; que se requiere personal calificado en el proceso de construcción y montaje; que es necesaria la consideración de elevados procesos de control de calidad, tanto en el proceso de producción como en el de la puesta en obra, y que por lo general se requiere el desarrollo de sofisticados proyectos de ingeniería, en los que se especifiquen a detalle estrictos procesos constructivos.

### 5.2.1 Concreto presforzado. Definición

El pres fuerzo significa la creación intencional de esfuerzos permanentes en una estructura o conjunto de piezas, con el propósito de mejorar su comportamiento y resistencia bajo condiciones de servicio y de resistencia. Los principios y técnicas del presforzado se han aplicado a estructuras de muchos tipos y materiales, la aplicación más común ha tenido lugar en el diseño del concreto estructural.

El concepto original del concreto presforzado consistió en introducir en vigas suficiente precompresión axial para que se eliminaran todos los esfuerzos de

tensión que actuarán en el concreto. Con la práctica y el avance en conocimiento, se ha visto que esta idea es innecesariamente restrictiva, pues pueden permitirse esfuerzos de tensión en el concreto y un cierto ancho de grietas.

El ACI (Instituto Americano del Concreto) propone la siguiente definición:

*Concreto presforzado: Concreto en el cual han sido introducidos esfuerzos internos de tal magnitud y distribución que los esfuerzos resultantes debido a cargas externas son contrarrestados a un grado deseado*

En elementos de concreto reforzado el presfuerzo es introducido comúnmente tensando el acero de refuerzo.

Dos conceptos o características diferentes pueden ser aplicados para explicar y analizar el comportamiento básico del concreto presforzado. Es importante que el diseñador entienda los dos conceptos para que pueda proporcionar y diseñar estructuras de concreto presforzado con inteligencia y eficacia.

*Primer concepto - Presforzar para mejorar el comportamiento elástico del concreto.* Este concepto trata al concreto como un material elástico y probablemente es todavía el criterio de diseño más común entre ingenieros.

El concreto es comprimido (generalmente por medio de acero con tensión elevada) de tal forma que sea capaz de resistir los esfuerzos de tensión.

Desde este punto de vista el concreto está sujeto a dos sistemas de fuerzas: presfuerzo interno y carga externa, con los esfuerzos de tensión debido a la carga externa contrarrestados por los esfuerzos de compresión debido al presfuerzo. Similarmente, el agrietamiento del concreto debido a la carga es contrarrestado por la precompresión producida por los tendones. Mientras que no haya grietas, los esfuerzos, deformaciones y deflexiones del concreto debido a los dos sistemas de fuerzas pueden ser considerados por separado y superpuestos si es necesario.

En su forma más simple, consideremos una viga rectangular con carga externa y presforzada por un tendón a través de su eje centroidal.

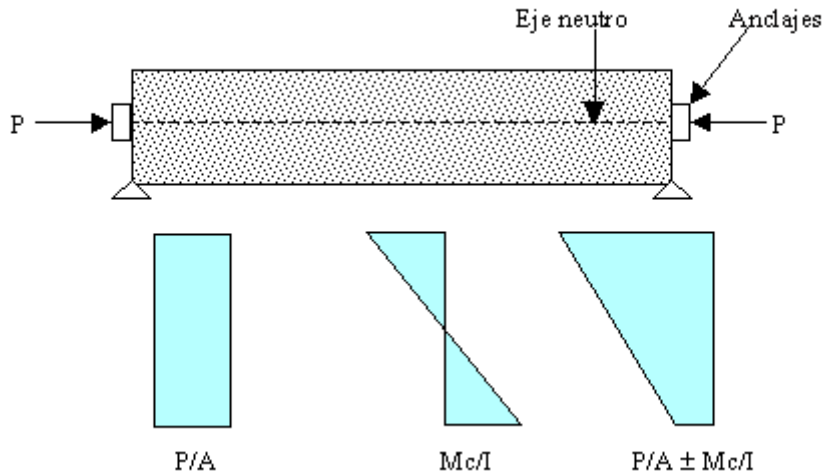


Fig.1 Distribución de esfuerzos a través de una sección de concreto presforzada concéntricamente.

Debido al presfuerzo P, un esfuerzo uniforme se producirá a través de la sección que tiene un área A:

$$f = -P/A$$

Si M es el momento externo en una sección debido a la carga y al peso de la viga, entonces el esfuerzo en cualquier punto a través de la sección debido a M es:

$$f = \frac{My}{I}$$

dónde y es la distancia desde eje centroidal e I es el momento de inercia de la sección. Así la distribución resultante de esfuerzo está dada por:

$$f = -\frac{P}{A} \pm \frac{My}{I}$$

Como se muestra en la Figura anterior.

La trabe es más eficiente cuando el tendón es colocado excéntricamente con respecto al centroide de la sección, donde e es la excentricidad.



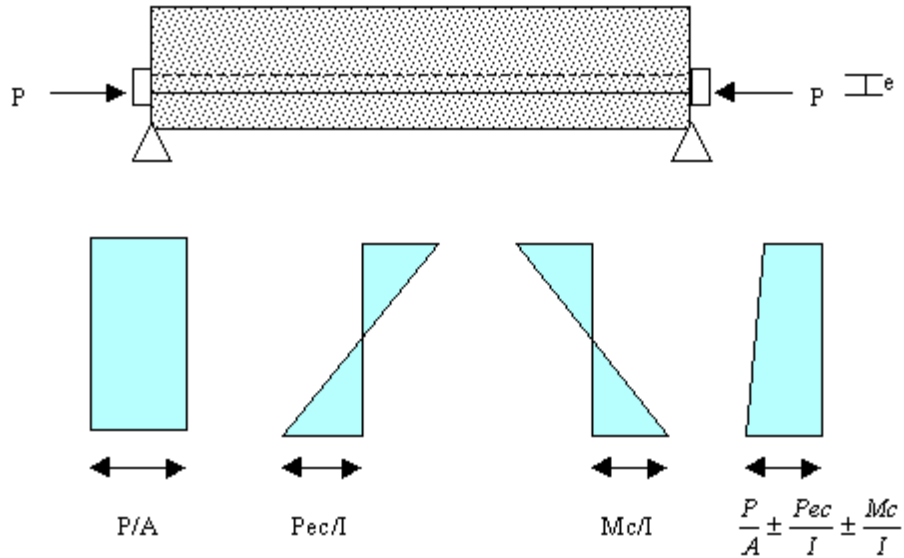


Fig. 2 Distribución de esfuerzo a través de una sección de concreto presforzado excéntricamente.

Debido a un presfuerzo excéntrico, el concreto es sujeto tanto a un momento como a una carga directa. El momento producido por el presfuerzo es  $Pe$ , y los esfuerzos debido a éste momento son:

$$f = \frac{Pey}{I}$$

Así, la distribución de esfuerzo resultante está dada por:

$$f = -\frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I}$$

Como se muestra en la figura anterior.

*Segundo concepto - presforzar para aumentar la resistencia última del elemento.* Este concepto es considerar al concreto presforzado como una combinación de acero y concreto, similar al concreto reforzado, con acero tomando tensión y concreto tomando compresión de tal manera que los dos materiales formen un par resistente contra el momento externo. Esto es generalmente un concepto fácil para ingenieros familiarizados con concreto reforzado.

En el concreto presforzado se usa acero de alta resistencia que tendrá que fluir (siempre y cuando la viga sea dúctil) antes de que su resistencia sea completamente alcanzada. Si el acero de alta resistencia es simplemente embebido en el concreto, como en el refuerzo ordinario de concreto, el concreto alrededor tendrá que agrietarse antes de que la resistencia total del acero se desarrolle.

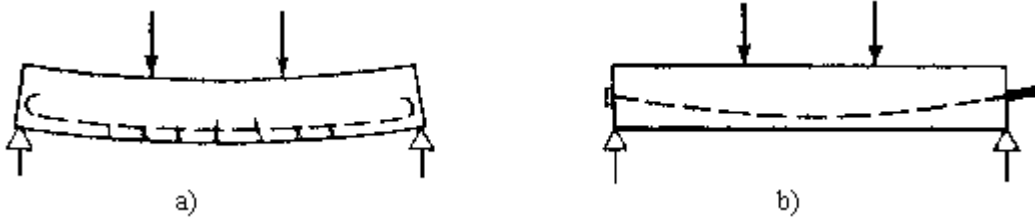


Fig.3 Viga de concreto

- a) Simplemente reforzada-grietas y deflexiones excesivas.
- b) Presforzada-sin grietas y con pequeñas deflexiones.

De aquí que es necesario pre-estirar o presforzar al acero. Presforzando y anclando al acero contra el concreto, se producen esfuerzos deseables. Estos esfuerzos permiten la utilización segura y económica de los dos materiales para claros grandes lo cual no puede lograrse en el concreto simplemente reforzado.

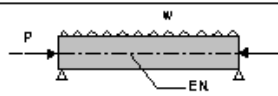
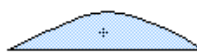

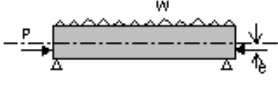


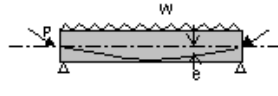

MOMENTOS FLEXIONANTES				
Viga	Condición	D.M.F. (w)	D.M.F. (P)	D.M.F. (total)
I			$0$	
II			$P \cdot e$	
III			$P \cdot e$	$0$

Fig.4 Momentos flexionantes a lo largo de vigas presforzadas simplemente apoyadas.

En la figura anterior se muestran como ejemplo los diagramas de momentos debidos a carga vertical y al presfuerzo para una viga simplemente apoyada. La carga vertical es la misma para los tres casos que se muestran; sin embargo, los diagramas de momento debidos a la fuerza de presfuerzo son distintos. La viga I tiene presfuerzo axial, es decir, el centro de gravedad de los torones se encuentra en el eje neutro de la sección. Aparentemente, no existe ventaja alguna al colocar presfuerzo axial. La viga II muestra un diagrama de momento constante debido a que el presfuerzo se aplica con excentricidad y su trayectoria es recta a lo largo de toda la viga; en los extremos no existe momento por cargas que disminuya la acción del presfuerzo, por lo que éste se deberá suprimir con encamisados o dispositivos similares. Por último, en la viga III se tiene una distribución de momentos debidos al presfuerzo similar a la curva debida a la carga vertical; el

presfuerzo así colocado contrarresta el efecto de las cargas en cada sección de la viga.

		ESFUERZOS													
Viga	Condición	AL CENTRO DEL CLARO				EN EL EXTREMO									
		Carga (W)	Presfuerzo Axial	Presfuerzo Excéntrico	Total	Carga (W)	Presfuerzo Axial	Presfuerzo Excéntrico	Total						
I			-		+	0	=		0	-		+	0	=	
II			-		+		=		0	-		+		=	
III			-		+		=		0	-		+	0	=	

Fig.5 Esfuerzos al centro del claro y en los extremos de vigas simplemente apoyadas con y sin presfuerzo.

En la figura anterior se muestra los diagramas de esfuerzo para las mismas vigas tanto al centro del claro como en los extremos. Al centro del claro se aprecia que el comportamiento de la primera viga mejora con el presfuerzo aunque sea sólo axial ya que las tensiones finales que se presentan en la fibra inferior son menores que para una viga sin presforzar; para las otras dos vigas estos esfuerzos son todavía menores por el momento provocado por el presfuerzo excéntrico. En los extremos, la primera y tercera viga presenta esfuerzos sólo de compresión, mientras que la viga II presenta esfuerzos de tensión y compresión, estos últimos mayores a los de las otras dos vigas debido a la existencia de presfuerzo excéntrico.

### 5.2.2 Estados de carga

Una de las peculiares consideraciones en el concreto presforzado es la diversidad de los estados de carga a los cuales el miembro o estructura es sujeto. Para estructuras coladas en sitio, el concreto presforzado tiene que diseñarse por lo menos para dos estados de carga: el estado inicial durante el presforzado y el estado final bajo las cargas externas. Para elementos prefabricados, un tercer estado por transporte debe revisarse. Durante cada uno de estos estados, hay diferentes etapas en las cuales la estructura puede estar bajo diferentes condiciones.

### 4.2.2.1 Estado inicial

El elemento está bajo presfuerzo pero no está sujeto a ninguna carga externa superpuesta. Este estado puede dividirse en los siguientes periodos:

Durante el tensado. Esta es una prueba crítica para la resistencia de los tendones. Generalmente, el máximo esfuerzo al cual los tendones estarán sujetos a través de su vida ocurre este periodo. Para el concreto las operaciones de presforzado imponen varias pruebas en la producción de la resistencia en los anclajes. Debido a que el concreto no tiene la resistencia especificada en el momento en que el presfuerzo es máximo, es posible la trituración del concreto en los anclajes si su resistencia no es adecuada.

En la transferencia del presfuerzo. Para elementos pretensados, la transferencia del presfuerzo se hace en una operación y en un periodo muy corto. Para elementos postensados, la transferencia es generalmente gradual, y el presfuerzo en los tendones puede ser transferido al concreto uno por uno. En ambos casos no hay carga externa en el elemento excepto su peso en el caso del postensado.

### 5.2.2.2 Estado Intermedio

Este es el estado durante la transportación y montaje. Ocurre solo para elementos prefabricados cuando son transportados al sitio y montados en su lugar. Es muy importante asegurar que los miembros sean manejados y soportados apropiadamente en todo momento. Por ejemplo, una viga simple diseñada para ser soportada en sus esquinas se romperá fácilmente si se levanta por el centro. No solo debe ponerse atención durante el montaje del elemento, sino también cuando se le agreguen las cargas muertas superpuestas.

### 5.2.2.3 Estado final

Como para otros tipos de estructuras, el diseñador debe considerar varias combinaciones de cargas vivas en diferentes partes de la estructura con cargas laterales tales como fuerzas de viento y sismo, y cargas por esfuerzos tal como aquellas producidas por asentamientos de apoyos y efectos de temperatura. Para estructuras presforzadas de concreto, especialmente los tipos no convencionales, es usualmente necesario investigar sus cargas últimas y de agrietamiento, su comportamiento bajo sus cargas reales de sostenimiento en adición a la carga de trabajo. Esto es como sigue:

Cargas permanentes. La curvatura o deflexión de un elemento presforzado bajo cargas permanentes generalmente es un factor controlante en el diseño, debido a que el efecto de la flexión aumentara su valor. De aquí que es deseable limitar la curvatura o deflexión bajo estas cargas.

Carga de trabajo. Para diseñar para la carga de trabajo hay una revisión en los esfuerzos y deformaciones excesivas. No es necesariamente una garantía de resistencia suficiente para las sobrecargas.

Carga de agrietamiento. El agrietamiento es un elemento de concreto presforzado significa un cambio repentino en los esfuerzos de cortante y unión. A veces es una medida de la resistencia a la fatiga.

Carga ultima. Las estructuras diseñadas bajo la base de esfuerzos de trabajo pueden no siempre tener un margen suficiente para sobrecargas. Esto es verdad, por ejemplo, para elementos de concreto presforzado bajo cargas directas de tensión. Debido a que es deseable que una estructura posea una capacidad mínima de sobrecarga, es necesario determinar su resistencia última. Generalmente, la resistencia última de una estructura está definida como la carga máxima que soporta antes del colapso.

### 5.2.3 Materiales

#### 5.2.3.1 Tipos de acero utilizados para el concreto presforzado

Los alambres redondos que se usan en la construcción de concreto presforzado postensado y ocasionalmente en obras pretensadas se fabrican en forma tal que cumplan con los requisitos de la especificación ASTM A-421, “Alambres sin Revestimiento, Relevados de Esfuerzo, para Concreto Presforzado”. Los alambres individuales se fabrican laminando en caliente lingotes de acero hasta obtener varillas redondas. Después del enfriamiento, las varillas se pasan a través de troqueles para reducir su diámetro hasta el tamaño requerido. En el proceso de esta operación de estirado, se ejecuta trabajo en frío sobre el acero, lo cual modifica grandemente sus propiedades mecánicas e incrementa su resistencia. Los alambres se consiguen en cuatro diámetros, tal como se muestra en la tabla siguiente:

Mínima resistencia de Tensión (N/mm <sup>2</sup> )		Mínimo esfuerzo para una elongación de 1% (N/mm <sup>2</sup> )		
Diámetro nominal (mm)	Tipo BA	Tipo WA	Tipo BA	Tipo WA
4.88	.	1725	.	1380
4.98	1655	1725	1325	1380
6.35	1655	1655	1325	1325
7.01	.	1622	.	1295

. “Estos tamaños no se suministran comúnmente para el alambre Tipo BA”

Los tendones están compuestos normalmente por grupos de alambres, dependiendo el número de alambres de cada grupo del sistema particular usado y de la magnitud de la fuerza pretensora requerida. Los tendones para prefabricados postensados típicos pueden consistir de 8 a 52 alambres individuales.

El cable trenzado se usa casi siempre en miembros pretensados, y a menudo se usa también en construcción postensada. El cable trenzado se fabrica de acuerdo con la especificación ASTM A-416, "Cable Trenzado, Sin Revestimiento, de Siete Alambres, Relevado de Esfuerzos, para Concreto Presforzado". Es fabricado con siete alambres firmemente torcidos alrededor de un séptimo de diámetro ligeramente mayor. El paso de la espiral del torcido es de 12 a 16 veces el diámetro nominal del cable. Los cables pueden obtenerse entre un rango de tamaños que va desde 6.35 mm hasta 0.60 mm de diámetro, se fabrican en dos grados: el grado 250 y 270 los cuales tienen una resistencia última mínima de 1720 y 1860 N/mm<sup>2</sup> respectivamente, estando estas basadas en el área nominal del cable.

A continuación se muestran en una tabla las propiedades del cable de siete alambres sin revestimiento que se deben cumplir:

En el caso de varillas de aleación de acero, la alta resistencia que se necesita se obtiene mediante la introducción de ciertos elementos de ligazón, principalmente manganeso, silicón y cromo durante la fabricación del acero. Las varillas se fabrican de manera que cumplan con los requisitos de la Especificación ASTM A-277, "Varillas de Acero de Alta Resistencia, Sin Revestimientos, para Concreto Presforzado". Las varillas de acero de aleación se consiguen en diámetros que varían de 12.7 mm hasta 34.93 mm de diámetro y en dos grados, el grado 145 y el 160, teniendo resistencias últimas mínimas de 1000 y 1100 N/mm<sup>2</sup> respectivamente tal como se muestra en la tabla:

Diámetro nominal (mm)	Área nominal de la varilla (mm <sup>2</sup> )		Resistencia a la ruptura (kN)	Mínima carga para una elongación de 0.7% (kN)
		Grado 145		
12.7	127		125	111
15.88	198		200	178
19.05	285		285	258
22.23	388		387	247
25.4	507		507	454
28.58	642		841	574
31.75	792		702	712
34.93	958		957	850

Diametro nominal (mm)	Area nominal de la varilla (mm <sup>2</sup> )		Resistencia a la ruptura (kN)	Mínima carga para una elongación de 0.7% (kN)
		Grado 180		
12.7	127		138	120
15.88	198		218	191
19.05	285		318	278
22.23	388		427	374
25.4	507		581	490
28.58	642		708	819
31.75	792		872	785
34.93	958		1050	908

Diámetro nominal (mm)	Resistencia a la ruptura (kN)		Área nominal del cable (mm <sup>2</sup> )	Carga mínima para una elongación de 1% (kN)
		Grado 250		
6.35	40.0		23.22	34.0
7.94	64.5		37.42	54.7
9.53	80.0		51.81	75.6
11.11	120.1		60.68	102.3
12.70	160.1		92.0	138.2
15.24	240.2		130.35	204.2
		Grado 270		
9.53	102.3		54.84	87.0
11.11	137.0		74.1	117.2
12.70	183.7		98.71	158.1
15.24	280.7		140.0	221.5

### 5.2.3.2 Tipos de concreto utilizados para el concreto presforzado

Generalmente se requiere un concreto de mayor resistencia para el trabajo de presforzado que para el reforzado. La práctica actual en puentes pide una resistencia a los cilindros de 28 días de 280 a 350 Kg/cm<sup>2</sup> para el concreto presforzado, mientras que el valor correspondiente para el concreto reforzado es de 170 Kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente. Un factor por el que es determinante la necesidad de concretos más resistentes, es que el concreto de alta resistencia esta menos expuesto a las grietas por contracción que aparecen frecuentemente en el concreto de baja resistencia antes de la aplicación del presfuerzo.

Es importante seguir todas las recomendaciones y especificaciones de cada proyecto a fin de cumplir con las solicitudes requeridas. Por lo general para obtener una resistencia de  $350 \text{ Kg/cm}^2$ , es necesario usar una relación de agua-cemento no mucho mayor que 0.45. Con el objeto de facilitar el colado, se necesitara un revenimiento de 5 a 10 cm.

Para obtener un revenimiento de 7.5 cm con una relación agua-cemento de 0.45 se requerirían alrededor de 10 sacos de cemento por metro cubico de concreto. Si es posible un vibrado cuidadoso, se puede emplear concreto con un revenimiento de 1.2 cm o cero, y serían suficientes poco menos de 9 sacos por metro cubico de concreto.

Puesto que con una cantidad excesiva de cemento se tiende a aumentar la contracción, es deseable siempre un factor bajo de cemento. Con este fin, se recomienda un buen vibrado siempre que sea posible, y para aumentar la maniobrabilidad pueden emplearse ventajosamente aditivos apropiados.

### 5.3 Métodos de presforzado

En el concreto presforzado existen dos categorías: pretensado o postensado, el de que el concreto este endurecido, a diferencia del postensado en el cual se primero recibe la precarga al tensar los tendones entre los anclajes del elemento, antes precarga luego de que el concreto este curado correctamente.

Los tendones los cuales son los elementos utilizados para el presfuerzo son generalmente cables torcidos con torones de diferentes diámetros, los cuales dependerán de las especificaciones de diseño requeridas por el constructor, en el caso del pretensado actuaran en el elemento por medio de una trayectoria recta, a diferencia que en el postensado que puede variar entre recta y curva.

Los sistemas de presfuerzo se entiende como los métodos y maquinarias utilizados para aplicar la precarga a un elemento, estos varían de acuerdo al método del pretensado que se utilizara, sin embargo habrán sistemas que pueden ser usados en ambos casos.

#### 5.3.1 Métodos del pretensado

El término pretensado se usa para describir cualquier método de presforzado en el cual los tendones se tensan antes de colocar el concreto.

Los tendones, que generalmente son de cable torcido con varios torones de varios alambres cada uno, se re-estiran o tensan entre apoyos que forman parte permanente de las instalaciones de la planta.

Se mide el alargamiento de los tendones, así como la fuerza de tensión aplicada por los gatos.



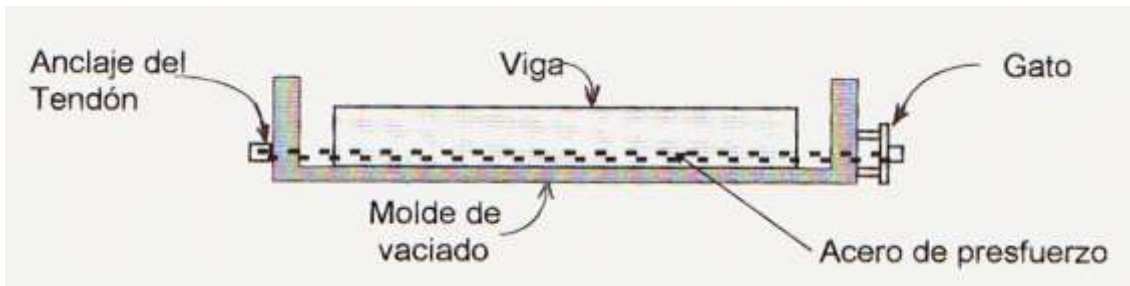


Fig. 6 Metodo Pretensado

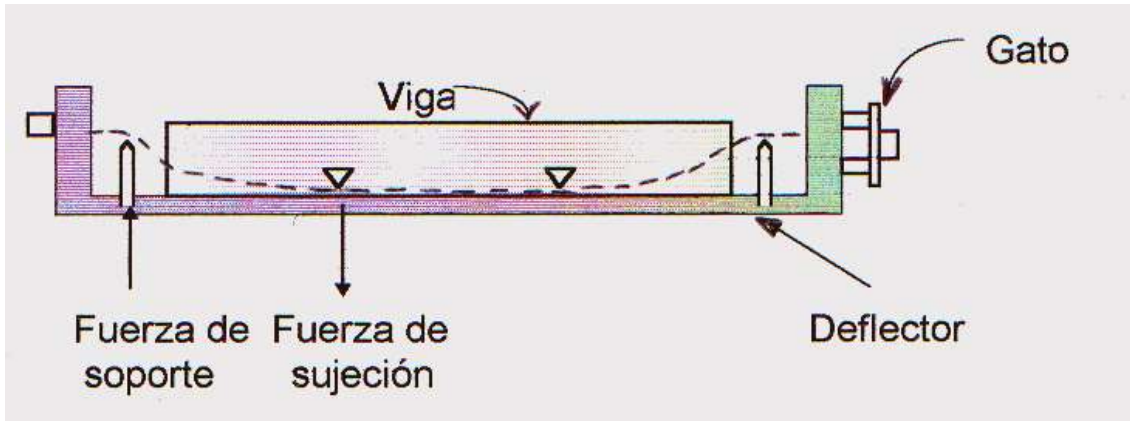


Fig. 7 Metodo Pretensado

Con la cimbra en su lugar, se vacía el concreto en torno al tendón esforzado.

A menudo se usa concreto de alta resistencia a corto tiempo, a la vez que curado con vapor de agua, para acelerar el endurecimiento del concreto.

Después de haberse logrado suficiente resistencia, se alivia la presión en los gatos, los torones tienden a acortarse, pero no los hacen por estar ligados por adherencia al concreto. En esta forma, la forma de presfuerzo es transferida al concreto por adherencia, en su mayor parte cerca de los extremos de la viga, y no se necesita de ningún anclaje especial.

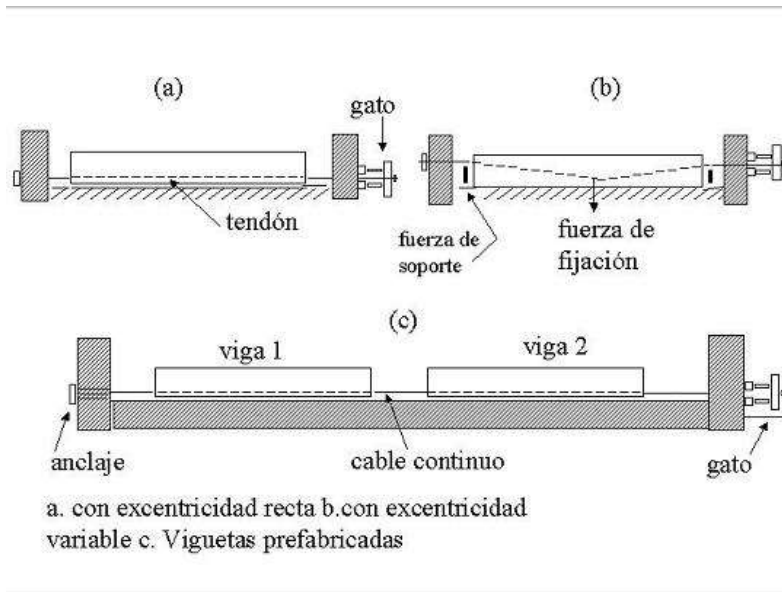


Fig. 8 Viguetas Prefabricadas

Este método produce un buen vínculo entre las armaduras y el concreto, el cual las protege de la oxidación, y permite la transferencia directa de la tensión por medio de la adherencia del concreto al acero.

La mayoría de los elementos pretensados tiene un tamaño limitado debido a que se requieren fuertes puntos de anclaje exteriores que estarán separados de la pieza a la distancia correspondiente a la que se deberán estirar las armaduras.

Consecuentemente, estos son usualmente prefabricados en serie dentro de plantas con instalaciones adecuadas, donde se logra la reutilización de moldes metálicos o de concreto y se pueden pretensar en una sola operación varios elementos.

Las piezas comúnmente realizadas con concreto pretensado son dinteles, paneles para cubiertas y entrepisos, vigas, viguetas y pilotes, aplicados a edificios, puentes, gimnasios y estadios principalmente.

### 5.3.1.1 Características

- Piezas prefabricadas.
- El presfuerzo se aplica antes que las cargas.
- El anclaje se da por adherencia.
- La acción del presfuerzo es interna.
- El acero tiene trayectorias rectas.
- Las piezas son generalmente simplemente apoyadas (elemento estático).

### 5.3.1.2 Ventajas

- Mejora el comportamiento estructural.
- Conlleva un uso más eficiente de los materiales, por lo que permite reducir el peso y el costo total de la estructura.
- Mayor resistencia frente a fenómenos de fatiga.
- Menores deformaciones.
- Disminuye las fisuras del concreto, aumentando su vida útil.
- Permite el uso óptimo de materiales de alta resistencia.
- Disminuyen las alturas y secciones de los elementos.
- Menos peso para pilares y fundaciones.
- Rapidez de ejecución.
- Poco personal en obra.

### 5.3.1.3 Desventajas:

- La inversión inicial es mayor de un diseño relativamente especializado de armaduras, uniones y apoyos.
- Se debe planear y ejecutar cuidadosamente el proceso constructivo, sobre todo en las etapas de montaje y colados en sitio.
- El cálculo suele ser más complejo.

### 5.3.1.4 Tipos de acero utilizados para el concreto pretensado.

Acero de presfuerzo.

El acero de presfuerzo es el material que va a provocar de manera activa momentos y esfuerzos que contrarresten a los causados por las cargas. Existen tres formas comunes de emplear el acero de presfuerzo: alambres paralelos atados en haces, cables torcidos en torones, o varillas de acero.

**Alambres:** Se fabrican individualmente laminando en caliente lingotes de acero hasta obtener alambres redondos que, después del enfriamiento, pasan a través de troqueles para reducir su diámetro hasta su tamaño requerido. El proceso de estirado se ejecuta en frío, lo que modifica notablemente sus propiedades mecánicas e incrementa su resistencia. Posteriormente se les libera de esfuerzos residuales mediante un tratamiento continuo de calentamiento hasta obtener las propiedades mecánicas prescritas. Los alambres se fabrican en diámetros de 3, 4, 5, 6, 7, 9.4 y 10 mm y las resistencias varían desde 16000 hasta 19000 kg/cm<sup>2</sup>. Los alambres de 5, 6 y 7 mm pueden tener acabado liso, dentado y tridentado.

**Torón:** El torón se fabrica con siete alambres firmemente torcido; sin embargo, las propiedades mecánicas comparadas con las de los alambres mejoran

notablemente, sobre todo la adherencia. El paso de la espiral o hélice de torcido es de 12 a 16 veces el diámetro nominal del cable. Los torones pueden obtenerse entre un rango de tamaños que va desde 3/8" hasta 0.6" de diámetro, siendo los más comunes los de 3/8" y de 1/2" con áreas nominales de 54.8 y 98.7 mm<sup>2</sup> respectivamente.

Varillas de acero de aleación. La alta resistencia en varillas de acero se obtiene mediante la introducción de algunos minerales de ligazón durante su fabricación. Adicionalmente se efectúa trabajo en frío en las varillas para incrementar aún más su resistencia. Después de estirarlas en frío se les libera de esfuerzos para obtener las propiedades requeridas. Las varillas de acero de aleación se producen en diámetros que varían de 1/2" hasta 1 3/8".

El uso de acero ordinario es común en elementos de concreto pretensado. La resistencia nominal de este acero es  $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ . Este acero es muy útil para:

Aumentar ductilidad.

Aumentar resistencia.

Resistir esfuerzos de tensión y compresión.

Resistir cortante y torsión.

Restringir agrietamiento por maniobras y cambios de temperatura.

Reducir deformaciones a largo plazo.

Confinar al concreto.

### 5.3.1.5 Tipos de concreto utilizados para el concreto pretensado.

Generalmente se requiere un concreto de mayor resistencia para el trabajo de pretensado que para el concreto armado. Un factor por el que es determinante la necesidad de concretos más resistentes, es que el concreto de alta resistencia está menos expuesto a las grietas por contracción que aparecen frecuentemente en el concreto de baja resistencia antes de la aplicación del presfuerzo.

Es importante seguir todas las recomendaciones y especificaciones de cada proyecto a fin de cumplir con las solicitudes requeridas. Puesto que con una cantidad excesiva de cemento se tiende a aumentar la contracción, es deseable siempre un factor bajo de cemento. Con este fin, se recomienda un buen vibrado siempre que sea posible, y para aumentar la maniobrabilidad pueden emplearse ventajosamente aditivos apropiados.

### 5.3.2 Método del postensado

#### 5.3.2.1 Características

El presfuerzo o postensado se define como un estado especial de esfuerzos y deformaciones que es inducido para mejorar el comportamiento estructural de un elemento.

Por medio del presfuerzo se aumenta la capacidad de carga y se disminuye la sección del elemento. Se inducen fuerzas opuestas a las que producen las cargas de trabajo mediante cable de acero de alta resistencia al ser tensado contra sus anclas.

La aplicación de estas fuerzas se realiza después del fraguado, utilizando cables de acero enductados para evitar su adherencia con el concreto.

Contrario al pretensado el postensado es un método de presfuerzo en el cual el tendón que va dentro de unos conductos es tensado después de que el concreto ha fraguado. Así el presfuerzo es casi siempre ejecutado externamente contra el concreto endurecido, y los tendones se anclan contra el concreto inmediatamente después del presfuerzo.

Este método puede aplicarse tanto para elementos prefabricados como colados en sitio.

Generalmente se colocan en los moldes de la viga conductos huecos que contienen a los tendones no esforzados, y que siguen el perfil deseado, antes de vaciar el concreto.

Cuando se hace el presfuerzo por postensado, generalmente se colocan en los moldes de las vigas ductos huecos que contienen a los tendones no esforzados, y que siguen el perfil deseado, antes de vaciar el concreto. Los tendones pueden ser alambres paralelos atados en haces, cables torcidos en torones, o varillas de acero. El ducto se amarra con alambres al refuerzo auxiliar de la viga (estribos sin reforzar) para prevenir su desplazamiento accidental, y luego se vacía el concreto. Cuando este ha adquirido suficiente resistencia, se usa la viga de concreto misma para proporcionar la reacción para el gato de esforzado.

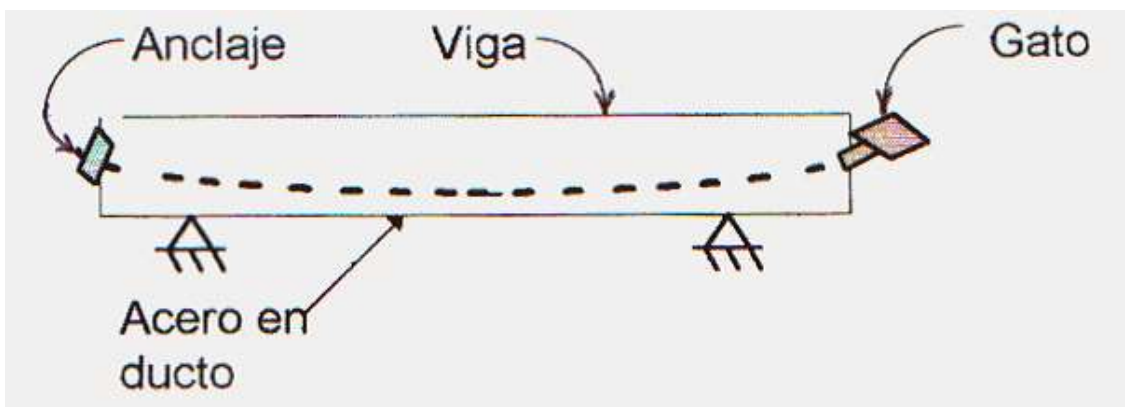


Fig. 9 Metodo Postensado

La tensión se evalúa midiendo tanto la presión del gato como la elongación del acero, los tendones se tensan normalmente todos a la vez o bien utilizando el gato monotoron. Normalmente se rellenan de mortero los ductos de los tendones después de que estos han sido reforzados. Se forza el mortero al interior del ducto en uno de los extremos, a alta presión, y se continua el bombeo hasta que la pasta aparece en el otro extremo del tubo. Cuando se endurece, la pasta une al tendón con la pared interior del ducto.

### 5.3.2.2 Ventajas

- Eficiencia en la utilización del concreto.
- Reducción de secciones hasta un 30%.
- Reducción de acero de refuerzo a cantidades mínimas.
- Aligeramiento de la estructura.
- Menor peso de estructura.
- Menos peso de cimientos.
- Disminuye los efectos de sismo.
- Dimensionar las fuerzas reactivas del presfuerzo con gran precisión.
- Controlar deflexiones de los elementos estructurales dentro de límites aceptables.

### 5.3.2.3 Tipos de Concreto utilizados para concreto postensado

El concreto utilizado en los elementos postensados debe cumplir con la resistencia requerida para que en las diferentes etapas de carga no se sobrepasen los esfuerzos admisibles, tanto de tensión como de compresión.

Una ventaja del postensado sobre el pretensado es que el concreto puede ganar resistencia fuera del molde, por lo que no es necesario obtener altas resistencias iniciales para optimizar la producción.

El concreto que se usa para presforzarse por tener mayor calidad y resistencia con respecto al utilizado en construcciones ordinarias.

Los valores comunes de  $f'$  oscilan entre 350 y 500  $\text{kg/cm}^2$ , siendo el valor estándar 350  $\text{kg/cm}^2$ . Se requiere esta resistencia para poder hacer la transferencia del presfuerzo cuando el concreto haya alcanzado una resistencia de 280  $\text{kg/cm}^2$ .

### 5.3.2.4 Tipos de Acero utilizados para concreto postensado

Los cables de postension consisten usualmente de conjuntos de torones de acero de alta resistencia. Esta es una característica importante pues el uso de aceros de resistencias de fluencia menores lleva a altos porcentajes de pérdida de fuerza.

Los alambres individuales se fabrican laminando en caliente lingotes de acero hasta obtener alambres redondos que, después del enfriamiento, pasan a través de troqueles para reducir su diámetro hasta su tamaño requerido. El proceso de estirado, se ejecuta en frío lo que modifica notablemente sus propiedades mecánicas e incrementa su resistencia.

Posteriormente se les libera de esfuerzos residuales mediante un tratamiento continuo de calentamiento hasta obtener las propiedades mecánicas prescritas. Los alambres se fabrican en diámetros de 3, 4, 5, 6, 7, 9.4 y 10 mm y las resistencias varían desde 16000 hasta 19000 kg/cm<sup>2</sup>. Los alambres de 5, 6 y 7 mm pueden tener acabado liso, dentado y tridentado.

### Ductos

Los ductos en los cuales se enhebran los cables pueden ser de diversos materiales. La Asociación Americana de Carreteras del Estado y Funcionarios de Transporte (AASHTO por sus siglas en inglés) tienen requerimientos básicos para ductos de algunos materiales, como los metálicos y los plásticos. En Productos de Concreto S.A. se utilizan ductos de fleje metálico en diversos diámetros según así lo requiera el cable a enhebrar.

### Lechada de inyección

Esta se utiliza para completar los ductos una vez que ha concluido la operación de tensado. La lechada debe ser lo suficientemente fluida como para garantizar el correcto llenado de toda la longitud del ducto.

Normalmente la lechada se compone de cemento más agua y se suele incluir un plastificante retardante, sin embargo si el ducto es muy grande puede emplearse un material de relleno como arena fina.

### Anclajes

Los anclajes tienen la función de transmitir la fuerza de tensado de los cables a la superficie de concreto endurecido. Estos pueden ser de dos tipos, anclajes muertos o fijos y anclajes vivos o activos. Los anclajes muertos son aquellos que quedan embebidos en la pieza de concreto y no permiten la operación de tensado a través de ellos.

Trabajan por adherencia y tiene la ventaja que suelen ser más económicos. Los anclajes vivos si permiten la labor de tensado y normalmente consisten en una placa o bloque de acero que reacciona contra el concreto.

## 5.4 Pérdidas de Presfuerzo

### 5.4.1 Pérdida Parcial de la Fuerza de Presfuerzo

A partir de la fuerza de tensado original en un elemento de concreto presforzado se presentaran pérdidas que deben considerarse para calcular fuerza de presfuerzo de diseño efectiva que deberá existir cuando se aplique la carga.

De cualquier modo, la fuerza efectiva no puede medirse fácilmente; solo se puede determinar convencionalmente la fuerza total en los tendones en el momento de presforzarlos (presfuerzo inicial). El presfuerzo efectivo es menor que el presfuerzo inicial y a la diferencia entre estos dos valores se le llama pérdida de la fuerza de presforzado.

Las pérdidas en la fuerza de presfuerzo se pueden agrupar en dos categorías: aquellas que ocurren inmediatamente durante la construcción del elemento, llamadas pérdidas instantáneas y aquellas que ocurren a través de un extenso periodo de tiempo, llamadas pérdidas diferidas o dependientes del tiempo. La fuerza de presfuerzo o fuerza de tensado del gato  $P_t$ , puede reducirse inmediatamente a una fuerza inicial  $P_i$  debido a las pérdidas por deslizamiento del anclaje, fricción, relajación instantánea del acero, y el acortamiento elástico del concreto comprimido. A medida que transcurre el tiempo, la fuerza se reduce gradualmente, primero rápidamente y luego lentamente, debido a los cambios de longitud provenientes de la contracción y el flujo plástico del concreto y debido a la relajación diferida del acero totalmente esforzado. Después de un periodo de muchos meses, o aun años, los cambios posteriores en los esfuerzos llegan a ser insignificantes, y se alcanza una fuerza pretensora constante definida como la fuerza pretensora efectiva o final  $P_f$ .

Para calcular las diferentes pérdidas de presfuerzo existen diferentes fórmulas en varios libros y en los diferentes códigos de distintos países.

Las pérdidas de presforzado en miembros construidos y presforzados en una sola etapa, pueden tomarse como:

- En miembros pretensados:

$$D_{PT} = D_{AE} + D_{CC} + D_{FP} + D_{RE}$$

- En miembros postensados

$$D_{PT} = D_{FR} + D_{DA} + D_{AE} + D_{CC} + D_{FP} + D_{RE}$$



Donde:

D = Delta

D PT = pérdida total (kg/cm<sup>2</sup>)

D FR = perdida debido a fricción (kg/cm<sup>2</sup>)

D DA = perdida debido al deslizamiento del anclaje (kg/cm<sup>2</sup>)

D AE = perdida debido al acortamiento elástico (kg/cm<sup>2</sup>)

D CC = perdida debido a la contracción (kg/cm<sup>2</sup>)

D FP = perdida debido al flujo plástico del concreto (kg/cm<sup>2</sup>)

D RE = perdida debido a la relajación del acero (kg/cm<sup>2</sup>)

En la siguiente tabla se muestran los diferentes tipos de pérdidas que existen y en qué etapa ocurren.

Tipo de pérdida	Etapa de ocurrencia	Elementos pretensados	Elementos postensados
Deslizamiento del anclaje	-----		En la transferencia
Acortamiento elástico del concreto	En la transferencia		Al aplicar los gatos
Relajación instantánea del acero	Antes de la transferencia	-----	
Fricción	-----		Al aplicar los gatos
Contracción del concreto	Después de la transferencia		Después de la transferencia
Flujo plástico del concreto	Después de la transferencia		Después de la transferencia
Relajación diferida del acero	Después de la transferencia		Después de la transferencia

Tabla. Tipos de pérdidas de presfuerzo

#### 5.4.2 Deslizamiento del Anclaje.

En los miembros postensados, cuando se libera la fuerza del gato, la tensión del acero se transfiere al concreto mediante anclajes. Existe inevitablemente una pequeña cantidad de deslizamiento en los anclajes después de la transferencia, a medida en que las cuñas se acomodan dentro de los tendones, o a medida en que se deforma el dispositivo de anclaje. La magnitud de la pérdida por deslizamiento en los anclajes dependerá del sistema particular que se use en el presfuerzo o en el dispositivo de anclaje.

Conocido el deslizamiento del dispositivo de anclaje especificado, la pérdida por deslizamiento en el anclaje se puede calcular con la expresión:

$$(\Delta) DA = (dL/L) * E_p \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

dL = cantidad de deslizamiento

E<sub>p</sub> = módulo de elasticidad del acero de presfuerzo

L = longitud del tendón

L deberá ser reducida a L<sub>1</sub> cuando exista fricción como sigue:

$$L_1 = \sqrt{\frac{\delta L E_p}{f_i \left( \frac{\mu \sum \alpha}{L} + K \right)^{2.4}}}$$

Donde:

F<sub>i</sub> = esfuerzo después de la transferencia.

μ = coeficiente de fricción por curvatura intencional (1/rad).

K = coeficiente de fricción secundario o de balance (1/m).

Alfa = suma de los valores absolutos de cambio angular de la trayectoria del acero de presfuerzo a la esquina del gato, o de la esquina más cercana del gato si el tendido se hace igual en ambas esquinas, en el punto bajo investigación (rad).

Los valores de μ y K se darán en las Tablas.

La pérdida por desplazamiento del cable en el anclaje será máxima en el anclaje mismo e ira disminuyendo a medida que la fricción contrarresta este deslizamiento, por lo que la trayectoria seguida por la recuperación de la tensión será simétrica a la de las pérdidas por fricción previamente calculada.

El valor del deslizamiento D<sub>I</sub> del sistema de anclaje y es proporcionado por el fabricante, pudiendo variar de 1 a 10 mm. La magnitud de este deslizamiento asumido por el diseño y usado para calcular la pérdida de deslizamiento deberá mostrarse en los documentos del contrato.

En los elementos pretensados se desprecian estas pérdidas, al ser pequeñas, se acostumbra tensar un poco más para absorber el deslizamiento.

### 5.4.3 Fricción

Una pérdida de la fuerza de presforzado ocurre entre los elementos postensados debido a la fricción entre los tendones y los ductos. La magnitud de esta fuerza es función de la forma del tendón o alineación, llamado efecto por curvatura, y de las desviaciones locales en el alineamiento llamado efecto por deformación no intencional. Los valores de los coeficientes de pérdida varían según el tipo de tendón y de la alineación del ducto.

En los miembros postensados, por lo general los tendones se anclan en un extremo y se estiran mediante los gatos desde el otro. A medida en que el acero se desliza a través del ducto, se desarrolla la resistencia friccionante, por lo que la tensión en el extremo anclado es menor que la tensión en el gato. Las fuerzas friccionantes se consideran función de dos efectos: la curvatura intencional (primaria) del tendón y la curvatura (secundaria) no intencional (o balanceo) de la trayectoria especificada del ducto.

Las pérdidas debidas a la fricción por deformaciones no intencionales del ducto se encontraran presentes aun para los casos de tendones rectos, debido a que en los casos reales el ducto no puede ser perfectamente recto y existe fricción entre los torones.

La cantidad de pérdidas depende del tipo de tendón y el ducto a emplearse, así como del cuidado que se tome durante la construcción.

Mientras el tendón se tensa en una esquina con la fuerza P, este tendrá fricción con el ducto de tal forma que el esfuerzo en el tendón variara desde el plano del gato hasta la longitud L del claro.

Se puede tensar por los dos lados, sin embargo, por lo general esto no resulta económico debido a que se incrementa el costo por el dispositivo de anclaje adicional, la mano de obra y el tiempo adicional.

Las pérdidas debido a la fricción entre el tendón de presforzado y los conductos huecos en elementos postensados se deberá calcular con la fórmula:

$$DFR = f_t (1 - e^{-(Kx + \mu\alpha)}) (kg/cm^2)$$

Donde:

Ft= esfuerzo en el acero de presfuerzo al aplicar los gatos (kg/cm<sup>2</sup>).

X= longitud de un tendón de presfuerzo de la esquina del gato a cualquier punto en consideración (m).

K= coeficiente de fricción secundario o de balance (1/m).

M= coeficiente de fricción primario por curvatura intencional (1/rad).

Los valores de K y m deberán basarse en datos experimentales para los materiales especificados y deberán mostrarse en los documentos del contrato. En la ausencia de tales datos, un valor dentro de los rangos de k y m especificados en la siguiente tabla pueden usarse. Estos valores dependen tanto del tipo del ducto como del tipo de acero.

Coeficientes de fricción para tendones postensados.

Tipo de tendones y cubierta	Coeficiente de deformación no intencional k (1/m)	Coeficiente primario m (1/rad)
-Tendones en ductos galvanizados rígidos y semirígidos	0.0007	0.05-0.25
Trenzas de 7 alambres		
-Tendones pre-engrasados, alambres y trenzas de 7 alambres	0.001 – 0.0066	0.05 - 0.15
-Tendones revestidos de mastique (resina)	0.0033 – 0.0066	0.05 - 0.15
Alambres y trenzas de 7 alambres		
-Tubos desviadores de acero rígido	0.0007	0.25 Lubricación probablemente requerida

Para tendones confinados a un plano vertical, a deberá tomarse como la sumatoria de los valores absolutos de los cambios angulares sobre la longitud x. Para tendones curvos en tres dimensiones, el cambio angular tridimensional total

a deberá obtenerse sumando, vectorialmente, el cambio angular vertical total a v y, el cambio angular horizontal total, a h.

Las pérdidas por fricción en acero postensado estarán basadas en los coeficientes (experimentalmente obtenidos) de balanceo y curvatura, y deberán verificarse durante las operaciones de los esfuerzos. Los valores de los coeficientes asumidos para el diseño, y los rangos aceptables de las fuerzas de los gatos y elongaciones del acero, deberán mostrarse en los planos. Estas pérdidas por fricción deberán calcularse como sigue:

$$\Delta P_0 = P_x e^{(\mu\alpha + Kx)} \text{ para } (Kx + m\alpha) > 0.3$$

$$\Delta FR = ft (1 - e^{-(\mu\alpha + Kx)}) \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta P_0 = P_x (1 + \mu\alpha + Kx) \text{ para } (m\alpha + Kx) < 0.3$$

$$\Delta FR = ft \left(1 - \frac{1}{(1 + \mu\alpha + Kx)}\right) \text{ kg/cm}^2$$

Donde:

$P_0$  = fuerza en el gato.

$P_x$  = fuerza en el punto x (en m) desde donde se aplica el gato.

Las pérdidas de fricción ocurren antes del anclaje y deberán estimarse para el diseño y revisarse durante operaciones de esfuerzos de tensado. Los ductos rígidos deberán tener suficiente resistencia para mantener su alineamiento correcto sin balanceo visible durante el colocado del concreto. Los ductos rígidos pueden fabricarse con juntas soldadas o trabadas. El galvanizado de las juntas no será requerido.

Los valores de K y m de la tabla deberán usarse cuando no estén disponibles los datos experimentales de los materiales usados.

Coeficientes de fricción para tendones postensados

Tipo de tendón	Tipo de ducto	K/m	m (1/rad)
Alambre o trenza sin galvanizar	Cubierta de metal brillante	0.0066	0.3
	Cubierta de metal galvanizado	0.0049	0.25
	Engrasado o revestido de asfalto enrollado	0.0066	0.30
	Galvanizado rígido	0.0007	0.25

Los valores extremos de los diferentes Códigos se muestran en la siguiente tabla:

Código	K	M
AASHTO LRFD	0.0007-0.0066	0.05-0.25
AASHTO ST	0.0007-0.0066	0.15-0.25
RCDF	0.0015-0.005	0.15-0.25
OHBDC	0.0016 – 0.0046	0.18-0.20
ACI	0.0007-0.0066	0.05-0.3

#### 5.4.4 Acortamiento Elástico.

Cuando la fuerza pretensora se transfiere a un miembro, existirá un acortamiento elástico en el concreto a medida en que se comprime. Este puede determinarse fácilmente por la propia relación esfuerzo-deformación del concreto. La cantidad de acortamiento elástico que contribuye a las pérdidas depende en el método de presforzado.

Para miembros pretensados, en los cuales el tendón se encuentra adherido al concreto al momento de transferencia, el cambio en la deformación del acero es el mismo que el de la deformación de compresión del concreto al nivel del centroide del acero. Para los miembros postensados en los cuales se tensan al mismo tiempo a todos los tendones, la deformación elástica del concreto ocurre cuando

se aplica la fuerza en el gato, y existe un acortamiento inmediato por lo que no existen pérdidas. No será el caso si los diversos tendones se tensan consecutivamente.

### Elementos pretensados

Si el tendón tiene una excentricidad 'e' al centro del claro de la viga, el esfuerzo que sufre el concreto en la sección, del centro del claro al nivel del acero de presfuerzo será:

$$f_{cgp} = -\frac{P_i}{A_{ss}} - \frac{P_i \cdot e^2}{I_{ss}} + \frac{M_{pp} \cdot e}{I_{ss}}$$

donde e es la excentricidad, M<sub>pp</sub> el momento debido al peso propio, I<sub>ss</sub> el momento de inercia de la sección simple y P<sub>i</sub> es la fuerza inmediatamente después de la transferencia y tiene un valor menor que la fuerza de tensado P<sub>t</sub>. La reducción del esfuerzo en el acero depende de los efectos de la relajación instantánea. Debido a que es difícil determinar exactamente el valor reducido P<sub>i</sub>, y debido a que las observaciones indican que la reducción es solamente unos puntos porcentuales, es posible usar el valor inicial de P<sub>t</sub>, o reducirlo el 10 %.

La pérdida debido al acortamiento elástico en miembros pretensados deberá tomarse como:

$$\Delta E = (E_p / E_{ci}) \cdot f_{cgp} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

donde:

f<sub>cgp</sub> = sumatoria de los esfuerzos del concreto en el centro de gravedad de los tendones pretensados debido a la fuerza de presfuerzo después de la transferencia y al peso propio del miembro en las secciones de momento máximo.

E<sub>ci</sub> = módulo de elasticidad del concreto en la transferencia, el cual se puede calcular como sigue:

$$E_{ci} = \frac{W^{3/2} \sqrt{f'_{ci}}}{7.3} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

donde w es el peso volumétrico del concreto en kg/m<sup>3</sup> y f'<sub>ci</sub> es la resistencia del concreto en el momento de la transferencia en kg/cm<sup>2</sup>.

### Elementos postensados

En elementos postensados, la pérdida por acotamiento elástico varía desde cero, si todos los tendones se tensan simultáneamente, hasta la mitad del valor calculado para el caso de pretensado, si varios pasos de tensado tienen lugar.

Cuando se tensan al mismo tiempo todos los tendones, la deformación elástica del concreto ocurre cuando se aplica la fuerza en el gato, y existe una compensación automática para las pérdidas por acotamiento elástico, las cuales por lo tanto no necesitan calcularse.

Para el caso en que se usan tendones múltiples y se tensan siguiendo una secuencia, existirán pérdidas. El primer tendón que se ancle sufrirá una pérdida de esfuerzo cuando se tense el segundo, el primero y el segundo sufrirán pérdida de esfuerzo cuando se tense el tercero, etc.

La pérdida debida al acortamiento elástico en miembros postensados puede tomarse como:

$$AE = \frac{N-1}{2N} \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

N = número de veces que se tensa.

Si se tensan todos los tendones simultáneamente, N=1 y por lo tanto el valor de D AE= 0. Cuando N es muy grande,

$$\frac{N-1}{2N} \approx 0.5$$

2N

Los valores de  $f_{cgp}$  pueden calcularse usando un esfuerzo en el acero reducido debajo del valor inicial por un margen dependiente en los efectos de la relajación y fricción. Para estructuras postensadas con tendones desunidos, el valor de  $f_{cgp}$  puede calcularse como el esfuerzo en el centro de gravedad del acero presforzado promediado a lo largo de la longitud del miembro.

### 5.4.5 Contracción

Las mezclas para concreto normal contienen mayor cantidad de agua que la que se requiere para la hidratación del cemento. Esta agua libre se evapora con el tiempo, la velocidad y la terminación del secado dependen de la humedad, la temperatura ambiente y del tamaño y la forma del espécimen del concreto. El secado del concreto viene aparejado con una disminución en su volumen,



ocurriendo este cambio con mayor velocidad al principio que al final, en que asintóticamente se alcanzan las dimensiones límite.

La contracción por secado del concreto provoca una reducción en la deformación del acero del presfuerzo igual a la deformación por contracción del concreto. La reducción de esfuerzo resultante en el acero constituye una componente importante de la pérdida del presfuerzo para todos los tipos de vigas de concreto presforzado.

La contracción del concreto se conoce como resultado de la pérdida de humedad. También se ha demostrado que el concreto se expandirá si, después de haberse secado o parcialmente secado, es sometido a humedad o si es sumergido en el agua. Se sabe que la contracción es afectada por las siguientes variables:

1. Agregados: Los agregados actúan para restringir la contracción de la pasta de cemento; de aquí que el concreto con un alto contenido de agregados es menos vulnerable a la contracción. Además, el grado de restricción de un concreto está determinado por las propiedades de los agregados: aquellos con alto módulo de elasticidad o con superficies ásperas son más resistentes al proceso de contracción.
2. Relaciones agua-cemento. Cuanto mayor es la relación agua-cemento, mayores son los efectos de la contracción.
3. Tamaño del elemento de concreto. Tanto el valor como la magnitud de la contracción disminuyen con un incremento en el volumen del elemento de concreto. Sin embargo, la duración de la contracción es mayor para elementos más grandes debido a que se necesita más tiempo para secarse hasta las regiones internas. Es posible que se necesite un año para que el proceso de secado inicie a una profundidad de 25 cm, y 10 años para iniciar a 60 cm más allá de la superficie externa.
4. Condiciones del medio ambiente. La humedad relativa del medio afecta notablemente la magnitud de la contracción; el valor de la contracción es más bajo en donde la humedad relativa es alta.
5. Cantidad de refuerzo. El concreto reforzado se contrae menos que el concreto simple; la diferencia relativa es función del porcentaje de refuerzo.
6. Aditivos. Este efecto varía dependiendo del tipo de aditivo. Un acelerador tal como cloruro de calcio, usado para acelerar el endurecimiento y la colocación del concreto, aumenta la contracción. También hay aditivos que impiden la contracción.
7. Tipo de cemento. El cemento Portland tipo III de resistencia rápida normalmente se contrae 10% más que un cemento Portland normal (tipo I) o cemento Portland modificado (tipo II).

Para elementos postensados, la pérdida de presfuerzo debido a la contracción es un poco menor debido a que ya ha tomado lugar un alto porcentaje de la contracción antes del postensado.

La pérdida de presfuerzo debido a la contracción debe tomarse como:

Para miembros pretensados:

$$DCC = (1193 - 10.5H) \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Para miembros postensados:

$$DCC = (948 - 9H) \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

H= el promedio anual de la humedad relativa del ambiente (%). En caso de no conocerse H se puede estimar según la siguiente tabla:

Tipo de clima	H
Muy húmedo	90%
Humedad intermedia	70%
Seco	40%

La contracción para elementos pretensados según el PCI es:

$$\Delta CC = (8.2 \times 10^{-6}) K_{cc} E_p (1 - 0.06 V/S) (100 - H) \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

V/S = relación volumen-superficie

### 5.4.6 Flujo Plástico

El flujo plástico es la propiedad de muchos materiales mediante la cual ellos continúan deformándose a través de lapsos considerables bajo un estado constante de esfuerzo o carga. La velocidad del incremento de la deformación es grande al principio, pero disminuye con el tiempo, hasta que después de muchos meses alcanza asintóticamente un valor constante.

En los miembros de concreto presforzado, el esfuerzo de compresión al nivel del acero es sostenido, y el flujo plástico resultante en el concreto es una fuente importante de pérdida de fuerza pretensora. Existe una interdependencia entre las

pérdidas dependientes del tiempo. En los miembros presforzados, la fuerza de compresión que produce el flujo plástico del concreto no es constante, sino que disminuye con el paso del tiempo, debido al relajamiento del acero y a la contracción del concreto, así como también debido a los cambios en longitud asociados con el flujo plástico en sí mismo.

Así la deformación resultante está en función de la magnitud de la carga aplicada, su duración, las propiedades del concreto incluyendo el proporcionamiento de la mezcla, las condiciones de curado, la edad a la que el elemento es cargado por primera vez y las condiciones del medio ambiente.

La pérdida por flujo plástico debe calcularse con la siguiente formula:

$$DFP = 12 f_{cgp} - 7 f_{c ds} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

$f_{c ds}$  = esfuerzo en el concreto en el centro de gravedad de los torones debido a cargas muertas que son aplicadas en el miembro después del presforzado.

Los valores del  $f_{c ds}$  deberán calcularse en la misma sección o secciones para los cuales  $f_{c gp}$  es calculada.

La pérdida por flujo plástico debe calcularse con la siguiente formula:

$$\Delta F P = K_{fp} \frac{E_p}{E_c} (f_{c gp} - f_{c ds}) \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

$K_{fp} = 2.0$  para miembros pretensados y  $1.6$  para miembros postensados.

$E_c$  = Modulo de elasticidad del concreto a los 28 días.

Para concreto de peso ligero deben modificarse los valores de  $K_{cr}$ , reduciéndolos en un 20%.

Finalmente que la perdida de presfuerzo debido al flujo plástico debe calcularse como sigue:

$$\Delta F P = [1.37 - 0.77 (0.01H)^2] K_{fp} \frac{E_p}{E_c} (f_{c gp} - f_{c ds}) \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$K_{fp} = 2.0$  para miembros pretensados y  $1.6$  para miembros postensados.

$H$  = el promedio anual de la humedad relativa del ambiente (%)

### 5.4.7Relajacion

Cuando al acero del presfuerzo se le esfuerza hasta los niveles que son usuales durante el tensado inicial y al actuar las cargas de servicio, se presenta una propiedad que se conoce como relajamiento. El relajamiento se define como la pérdida de esfuerzo en un material esforzado mantenido con longitud constante.

En los miembros de concreto presforzado, el flujo plástico y la contracción del concreto así como las fluctuaciones de las cargas aplicadas producen cambios en la longitud del tendón. Sin embargo, cuando se calcula la pérdida en el esfuerzo del acero debida al relajamiento, se puede considerar la longitud constante. El relajamiento continúa indefinidamente, aunque a una velocidad decreciente. Debe de tomarse en cuenta en el diseño ya que produce una pérdida significativa en la fuerza pretensora.

La magnitud del relajamiento varía dependiendo del tipo y del grado del acero, pero los parámetros más significativos son el tiempo y la intensidad del esfuerzo inicial.

En miembros pretensados, la pérdida por relajación en el acero de presfuerzo, inicialmente esforzado arriba de 0.5 f<sub>sr</sub>, debe tomarse como:

En la transferencia:

Para trenzas aliviadas de esfuerzo:

$$RE1 = \frac{\log(t)}{10} \left( \frac{ft}{f_{py}} - 0.55 \right) ft \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Para trenzas de baja relajación:

$$RE1 = \frac{\log(t)}{40} \left( \frac{ft}{f_{py}} - 0.55 \right) ft \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

T= tiempo estimado en días desde el esforzado hasta la transferencia (horas).

Ft= esfuerzo en el tendón al final del esforzado (kg/cm<sup>2</sup>)

Fpy= resistencia del acero de presfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>)

Los rangos de los valores de fpy están dados como sigue:

Para tendones aliviados de esfuerzo: f<sub>py</sub>= 0.85f<sub>sr</sub>

Para tendones de baja relajación:  $f_{py} = 0.90f_{sr}$

Las pérdidas debido a la relajación del acero de presfuerzo pueden tomarse como:

Para pretensado con trenzas aliviadas de esfuerzo

$$DRE2 = 1408 - 0.4\Delta AE - 0.2(\Delta CC + \Delta FP) \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Para postensado con trenzas aliviadas de esfuerzo

$$DRE2 = 1408 - 0.3\Delta FR - 0.4\Delta AE - 0.2(\Delta CC + \Delta FP) \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Para acero de presfuerzo de baja relajación se deberá usar el 30% de DRE2 de las ecuaciones anteriores.

La pérdida por relajación en el acero de presfuerzo debe tomarse como:

En la transferencia:

En miembros pretensados, la pérdida por relajación en el acero de presfuerzo de baja relajación, inicialmente esforzado arriba de  $0.5f_{sr}$ , puede tomarse como:

$$\Delta RE1 = \frac{\log(t)}{45} \left( \frac{f_t}{f_{py}} - 0.55 \right) f_t \text{ (} \frac{kg}{cm^2} \text{)}$$

Después de la transferencia:

La pérdida de presfuerzo debido a la relajación después de la transferencia, RE2, puede calcularse para trenzas de baja relajación como sigue:

$$\Delta RE2 = \left( \frac{f_i}{f_{sr}} - 0.55 \right) \left( 0.34 - \frac{\Delta FP + \Delta CC}{1.25f_{sr}} \right) \frac{f_{sr}}{3} \geq 0.002f_{sr} \text{ (} \frac{kg}{cm^2} \text{)}$$

Donde:

$F_i$  = esfuerzo en el acero después de la transferencia.

### 5.4.8 Estimación Aproximada de la Suma Total de las Pérdidas Diferidas.

Una estimación aproximada de las pérdidas de presfuerzo dependientes del tiempo resultantes del flujo plástico y contracción del concreto y relajación del acero en miembros presforzados y parcialmente presforzados puede tomarse para:

- Miembros pretensados no en segmentos con longitudes arriba de 50 m y esfuerzo en el concreto de 10 a 30 días y,
- Miembros pretensados esforzados después de alcanzar una resistencia de  $f_{ci}=245 \text{ kg/cm}^2 = 24 \text{ MPa}$ .

Siempre que ellos:

1. Estén hechos de concreto de densidad normal
2. El curado del concreto es húmedo o con vapor
3. El presforzado es por barras o trenzas con propiedades normales y bajas de relajación y,
4. Son colocados en condiciones de exposición y temperaturas promedios.

La relación parcial de presforzado o índice de presfuerzo, IP, deberá tomarse como se especifica en la ecuación siguiente:

$$IP = \frac{A_{ps} F_{py}}{A_{ps} F_{py} + A_s F_y}$$

Donde:

IP = índice de presfuerzo.

$A_s$  = área de refuerzo de tensión no presforzado

$A_{ps}$  = área del acero de presfuerzo

$f_y$  = resistencia especificada de las barras de refuerzo

$f_{py}$  = resistencia del acero de presfuerzo

Para miembros hechos de concreto estructural de baja densidad, los valores especificados en la tabla deberán aumentarse en  $357 \text{ kg/cm}^2$  (35 MPa).

Para trenzas de baja relajación, los valores especificados en la tabla pueden reducirse en:

- 285.6 kg/cm<sup>2</sup> (28 MPa) para traveses cajón
- 418.2 kg/cm<sup>2</sup> (41 MPa) para vigas rectangulares, losas sólidas y vigas I, y
- 561 kg/cm<sup>2</sup> (55 MPa) para T's simples, dobles T, núcleos huecos y losas huecas

Para condiciones inusuales de exposición, estimaciones más exactas deberán de obtenerse de acuerdo a métodos apoyados por la investigación o experiencia

Las pérdidas debido al acortamiento elástico deberán sumarse a las pérdidas dependientes del tiempo para determinar las pérdidas totales.

Las estimaciones aproximadas de la suma total de las pérdidas dependientes del tiempo dadas en la tabla 2.7 reflejan valores y tendencias obtenidas de un análisis computarizado de pasos sucesivos de un gran número de puentes y elementos de edificios diseñados para un rango común de las siguientes variables:

- El coeficiente último de flujo plástico del concreto con rango de 1.6 a 2.4.
- El coeficiente último de contracción con rango de 0.0004 a 0.0006 (mm/mm).
- Humedad relativa con rango de 40 a 100%.
- Curado del concreto húmedo o con vapor.
- Índice de presfuerzo de 0.2 a 1.0.

Pérdidas dependientes del tiempo.

Tipo de la sección de la viga	Nivel	Para alambres y trenzas con f <sub>sr</sub> =16500, 17600 ó 17100 kg/cm <sup>2</sup>
Vigas rectangulares y losas sólidas	Límite superior	200 + 28(IP)
	Promedio	180 + 28(IP)
Traveses cajón	Límite superior	145 + 28(IP)
	Promedio	130 + 28(IP)
Vigas I	Promedio	$270 \left( 1 - 0.15 \frac{f'c - 41}{41} \right) + 41(IP)$
T simple, doble T, núcleos huecos y losas huecas	Límite superior	$270 \left( 1 - 0.15 \frac{f'c - 41}{41} \right) + 41(IP)$
	Promedio	$230 \left( 1 - 0.15 \frac{f'c - 41}{41} \right) + 41(IP)$

Puede observarse en la Tabla anterior que, para los casos de trenzas de resistencia alta, existe un límite superior y un límite promedio estimados. El límite superior es recomendado cuando se tiene una combinación desfavorable de parámetros, tal como baja resistencia a la compresión del concreto, baja humedad relativa y condiciones de curado con agua. Para elementos presforzados con barras, la diferencia entre el límite promedio y el límite superior se encuentra tan insignificante para justificar una expresión diferente.

Según la tabla siguiente en lugar de un método detallado para estimar las pérdidas, las siguientes estimaciones de las pérdidas totales pueden usarse para elementos presforzados o estructuras de diseño común. Estos valores de pérdida están basados usando concreto de peso normal, a niveles de presfuerzo normales, y condiciones promedio de exposición. Para claros demasiado largos, o para diseños inusuales, deberá usarse un método refinado.

Estimación de las pérdidas totales

Tipo de acero de presfuerzo	Pérdida Total	
	$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$	$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$
Pretensado	-----	3150 $\text{kg/cm}^2$
Trenzas		
Postensado	2250 $\text{kg/cm}^2$	2300 $\text{kg/cm}^2$
Alambres o Trenzas	1550 $\text{kg/cm}^2$	1620 $\text{kg/cm}^2$
Barras		



### 5.5 Diseño

El diseño de elementos de concreto presforzado consiste en proponer el elemento que funcional y económicamente sea óptimo, para determinadas acciones y características geométricas de la obra, esto es proporcionarle presfuerzo y refuerzo para que tenga un comportamiento adecuado durante todas sus etapas ante cargas de servicio y cargas últimas. Es claro que ante esta perspectiva, el elemento o sección típica a utilizar no es una incógnita sino un dato que el diseñador de acuerdo a sus conocimientos y experiencia debe proporcionar.

Debido a que las trabes cajón tienen un borde superior e inferior, deben ser diseñadas como viga T para momentos positivos y negativos.

El aumento del grueso de la losa inferior mediante chaflanes en áreas de momento negativo es común, como lo es el aumento de grosor de las almas de las trabes adyacentes a los soportes para controlar el cortante.

#### 5.5.1 Esfuerzos de Adherencia, Longitud de Transferencia y Longitud de Desarrollo.

En las vigas de concreto presforzado las fuerzas actuantes tienden a producir el deslizamiento de los tendones a través del concreto que los rodea. Esto produce esfuerzos de adherencia o esfuerzos cortantes que actúan en la cara de contacto entre el acero y el concreto.

Para las vigas pretensadas, cuando se libera la fuerza externa del gato, la fuerza pretensora se transfiere del acero al concreto cerca de los extremos del elemento mediante la adherencia a través de una distancia que se conoce como la longitud de transferencia. Dentro de la longitud, el crecimiento del presfuerzo es gradual desde cero hasta el nivel del presfuerzo efectivo.

La longitud de transferencia depende de varios factores, incluyendo el esfuerzo de tensión del acero, la configuración de la sección transversal del acero (por ejemplo, alambres contra cables), la condición en que se encuentre la superficie del acero, y la rapidez con la que se libere la fuerza del gato. Los alambres de acero que se encuentran ligeramente oxidados requerirán longitudes de transferencia menores que aquellos que se encuentren limpios y brillantes. Las pruebas indican que si la fuerza del gato se libera súbitamente, la longitud requerida de transferencia sería sustancialmente más grande que la que se requeriría si la fuerza se aplica gradualmente. La resistencia del concreto tiene muy poca influencia.

El presfuerzo final o efectivo  $f_r$  es esencialmente constante a medida en que la viga es cargada gradualmente hasta el nivel de su carga de servicio. Sin embargo, si

esta estuviera que sobrecargarse existirá un gran incremento en el esfuerzo del acero hasta que se alcance el esfuerzo de falla por flexión  $f_{ps}$  que puede ser cercano a la resistencia de tensión del acero  $f_{sr}$ . Un sobreesfuerzo más allá de la carga de servicio produce esfuerzos algo menores dentro de la longitud original de transferencia, tal como se sugiere en la figura. Para alcanzar el esfuerzo de falla  $f_{sr}$  en el acero se requiere de una longitud de desarrollo mucho más grande que la longitud original de transferencia, tal como se muestra.

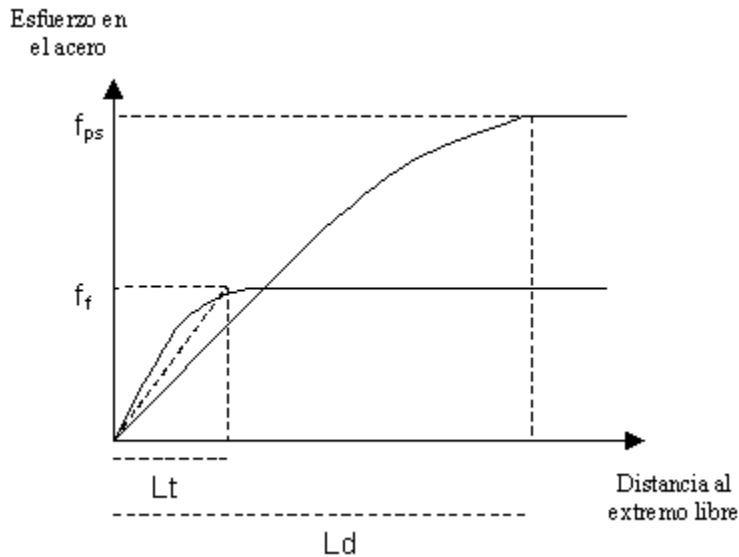


Fig. 10 Longitudes de transferencia y desarrollo para cables de pretensado

Los torones de pretensado de tres o siete alambres deberán estar adheridos, más allá de la sección crítica, en una longitud en cm, no menor que:

$$Ld = 0.014 (f_{sp} - 0.6 f_i) d_b$$

Donde:

$f_{sp}$  = esfuerzo en el torón cuando se alcanza la resistencia del elemento ( $\text{kg/cm}^2$ )

$f_i$  = presfuerzo final o efectivo en el torón ( $\text{kg/cm}^2$ )

$d_b$  = diámetro del torón (cm)

Esta revisión puede limitarse a las secciones más próximas a las zonas de transferencia del miembro, y en las cuales sea necesario que se desarrolle la resistencia de diseño. Cuando la adherencia del torón no se extienda hasta el extremo del elemento y en condiciones de servicio existan esfuerzos de tensión por flexión en el concreto en la zona precomprimida se debe duplicar la longitud de

desarrollo del torón dada por la formula anterior. La longitud de desarrollo de alambres lisos de presfuerzo se supondrá de 100 diámetros.

### 5.5.2 Estado de Esfuerzos

En cada una de las etapas por las que pasa un elemento presforzado, deben revisarse los esfuerzos que actúan en el elemento. La siguiente expresión engloba las distintas acciones y las características geométricas de la sección en las distintas etapas. El esfuerzo en cada fibra de cada sección,  $f$ , está dado por :

$$f = \frac{P}{A_{SS}} \pm \frac{Pe y_{SS}}{I_{SS}} \pm \frac{M_{pp} y_{SS}}{I_{SS}} \pm \frac{M_f y_{SS}}{I_{SS}} \pm \frac{M_{cm} y_{SC}}{I_{SC}} \pm \frac{M_{cv} y_{SC}}{I_{SC}}$$

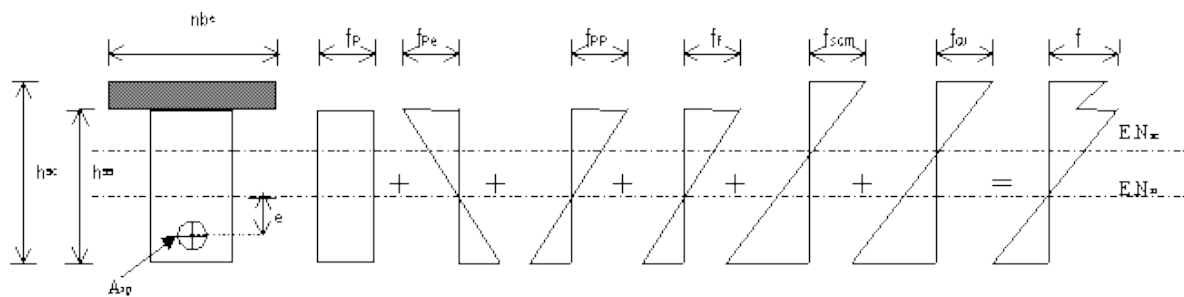


Fig.11 Esfuerzos en cualquier sección de la viga tanto en la etapa simple como en la compuesta.

Donde las acciones están dadas por:

$P$ = fuerza de presfuerzo efectiva

$e$ = excentricidad del presfuerzo

$M_{pp}$  = momento por peso propio

$M_f$  = momento debido al firme

$M_{cma}$  = momento debido a la sobrecarga muerta

$M_{cv}$  = momento debido a la carga viva

Las propiedades geométricas:

$A$ = área de la sección

$I$ = momento de inercia de la sección

$y$ = distancia a la fibra donde se calculan los esfuerzos

Los subíndices  $s_s$  y  $s_c$  se refieren a sección simple y sección compuesta, respectivamente.

### 5.5.3 Proceso de Diseño

A continuación se muestra un diagrama de flujo que muestra el proceso de diseño de un elemento presforzado:

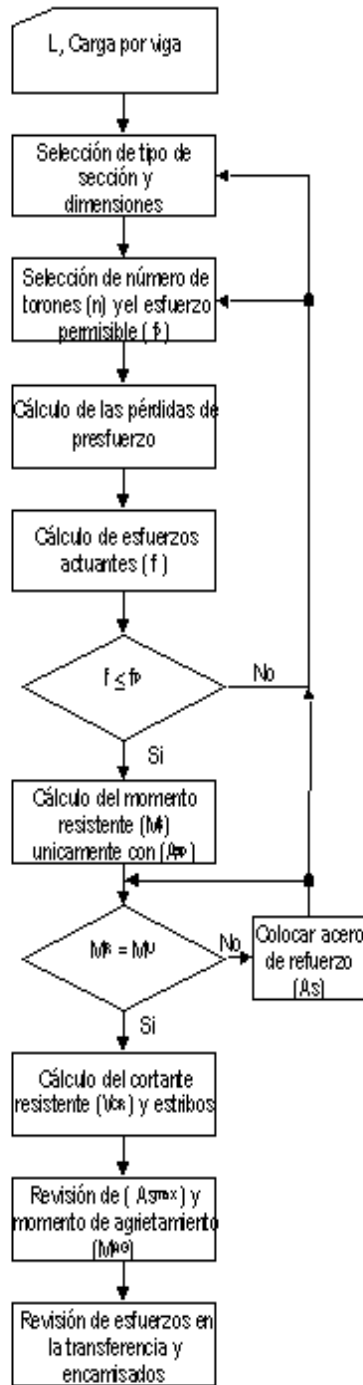


Fig. 12 Proceso de Diseño

El proceso de diseño de puentes presforzados abarca las siguientes etapas:

Proposición de la sección y del presfuerzo

Revisión Elástica

Revisión por Resistencia Última

Revisión por Cortante

Revisión por Acero Mínimo

Revisión por Acero Máximo

Revisión de Deflexiones

### Proposición de la Sección y del Presfuerzo



Fig.13 Sección tipo cajón

Para la proposición de la sección y presfuerzo se pueden tomar las siguientes recomendaciones:

Peralte de la estructura

Para asegurar una adecuada rigidez que limite las deflexiones, se recomienda que la relación peralte-claro en traveses cajón sea:

Material	Relación peralte-claro	
	Tramos simples	Tramos continuos
Concreto reforzado	L/16.67	L/18.18
Concreto presforzado	L/22.22	L/25

Estos valores son tentativos y pueden variar de acuerdo a la resistencia del concreto, requerimientos de claro, consideraciones estéticas, prácticas constructivas, carga y otros factores.

Presfuerzo

Se puede hacer una estimación inicial de la cantidad de presfuerzo analizando los esfuerzos finales del elemento e igualándolos con los esfuerzos permisibles.

Analizaremos los esfuerzos inferiores debido a que por lo general son más críticos.

Sección Simple

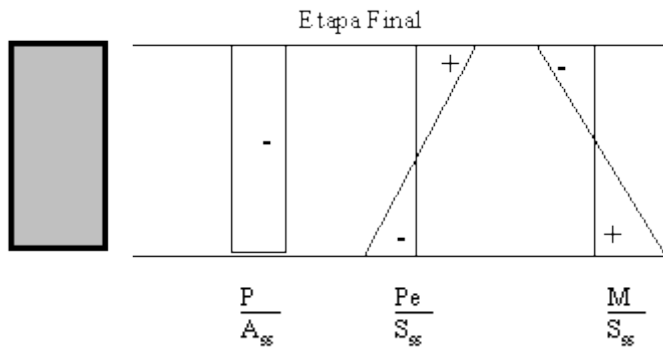


Fig. 14 Etapa Final

$$-\frac{P}{A} - \frac{P \times e}{S_i} + \frac{M}{S_i} = f_p$$

$$P = \left( \frac{M}{S_i} - f_p \right) \left( \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{e}{S_i}} \right)$$

## Sección Compuesta

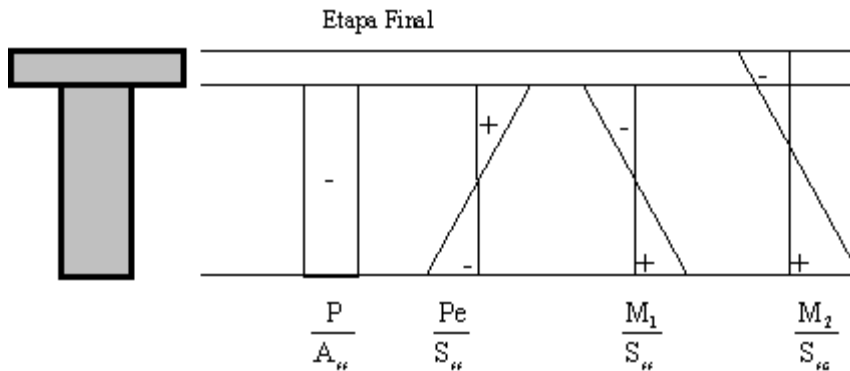


Fig. 15 Etapa Final

$$-\frac{P}{A_{ss}} - \frac{Pe}{S_{ss}} + \frac{M_1}{S_{ss}} + \frac{M_2}{S_{sc}} = f_p^+$$

$$P = \frac{\left( \frac{M_1}{S_{ss}} + \frac{M_2}{S_{sc}} - f_p^+ \right)}{\left( \frac{1}{A_{ss}} + \frac{e_{ss}}{S_{ss}} \right)}$$

## Revisión Elástica

### Revisión de esfuerzos permisibles

En el método de diseño por carga de servicio o diseño por esfuerzos permisibles, las cargas de trabajo o sin factorizar proporcionan la base para el cálculo de la resistencia del concreto. En flexión, los esfuerzos máximos calculados elásticamente no pueden exceder los esfuerzos de trabajo permisibles.

El método de esfuerzo permisible implica que se satisface automáticamente el estado límite último si no se exceden los esfuerzos permisibles.

Generalmente, en la práctica actual, las dimensiones del concreto y la fuerza pretensora para las vigas se escogen en forma tal de no exceder los límites de esfuerzos especificados a medida en que la viga pasa del estado descargado al estado de servicio. Tanto el concreto como el acero se pueden considerar elásticos en este rango. Después de que se han seleccionado tentativamente las



dimensiones del miembro sobre estas bases, si fuera necesario se deberá revisar las deflexiones bajo los estados de carga de interés y la resistencia última del miembro.

Esta proposición es razonable, considerando que uno de los objetivos más importantes del presfuerzo es mejorar el comportamiento bajo cargas de servicio. El criterio del comportamiento bajo cargas de servicio es el que determina la magnitud de la fuerza pretensora a usarse, aunque los requisitos de resistencia pueden determinar el área total del acero a tensión.

### ESFUERZOS PERMISIBLES

Esfuerzos permisibles en el concreto

Esfuerzos inmediatamente después de la transferencia y antes de que ocurran las pérdidas por contracción y flujo plástico

Compresión----- $0.6 f'c$

Tensión en miembros sin refuerzo en la zona de tensión----- $\sqrt{f'c}$

Esfuerzos bajo cargas muertas y vivas de servicio

Compresión ----- $0.45 f'c$

Tensión----- $1.6\sqrt{f'c}$

Esfuerzos permisibles en el acero de presfuerzo

Debido a la fuerza aplicada en el gato

0.8 f<sub>sr</sub>

Inmediatamente después de la transferencia

0.7 f<sub>sr</sub>

### ETAPAS A REVISAR

Se deben de revisar las siguientes etapas críticas:

Etapas Final

En esta etapa actúan todas las cargas sobre el elemento, incluyendo a las cargas vivas. Los esfuerzos máximos se deberán comparar con los permisibles.

El esfuerzo en la cara inferior es:

$$f_i = -\frac{P_f}{A_{ss}} - \frac{P_f \times e}{S_{ssi}} + \frac{M_1}{S_{ssi}} + \frac{M_2}{S_{sci}} \leq 1.6\sqrt{f'c}$$

Los esfuerzos en la cara superior se consideran sobre la sección simple:

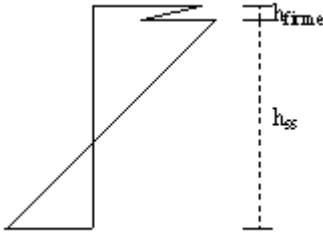


Fig. 16 Sección Simple

$$f_s = -\frac{P_f}{A_{ss}} + \frac{P_f \times e}{S_{ssi}} - \frac{M_1}{S_{ssi}} - \frac{M_2}{S_{sci}} \left( \frac{y_{scs} - h_{firme}}{y_{scs}} \right) \leq 0.45f'c$$

Transferencia

Esta etapa es cuando se transfiere el presfuerzo al elemento y solo estarán actuando los esfuerzos debido al presfuerzo y el peso propio del elemento, los cuales deberán compararse contra los esfuerzos permisibles de tensión y compresión.

$$f_i = -\frac{P_i}{A_{ss}} - \frac{P_i \times e}{S_{ssi}} + \frac{M_{pp}}{S_{ssi}} \leq \sqrt{f'c}$$

$$f_s = -\frac{P_i}{A_{ss}} + \frac{P_i \times e}{S_{ssi}} - \frac{M_{pp}}{S_{ssi}} \leq 0.6f'c$$

El elemento se deberá revisar desde el centro del claro hasta los extremos. En las secciones en donde sobrepase los esfuerzos permisibles, cierto número de tendones se podrá encamisar o enductar. Los tendones encamisados no actúan sobre el elemento. Se deberá revisar el momento resistente en donde se encamise.

### Transporte

Para los elementos prefabricados se debe de revisar la etapa de transporte. Esto es para elementos que tengan una longitud mayor a la de la superficie de transporte ya que esta longitud sobrante estará en cantiliver provocando un momento que podría causar la rotura del elemento.

El diseñador deberá de calcular este momento y agregar acero de refuerzo al elemento si es necesario.

### REVISION POR RESISTENCIA ÚLTIMA

El método de diseño por resistencia o método de factor de carga es esencialmente un diseño de estados límites con énfasis en los estados límites últimos, revisando los estados límite de serviciabilidad después de que el diseño original este completo.

En este criterio, las cargas de trabajo en el diseño son multiplicadas por factores de carga y la estructura es diseñada para resistir hasta su capacidad ultima las cargas factorizadas. Los factores de carga asociados con un tipo de carga son ajustados para reflejar el grado de variación e incertidumbre de esa carga.

Expresado en forma sencilla, factor de carga es la cantidad por la que deben multiplicarse las cargas para obtener la máxima capacidad de la estructura. Para combinaciones de carga comunes (CM + CV), se especifica un factor de carga de 1.4. Para combinaciones de carga excepcionales (CM + CV + CA), se aplicara un factor de carga de 1.1.

El momento último actuante será:

$$M_u = F_c M_s < M_r$$

Donde:

$F_c$  = Factor de Carga

$M_s$  = Momento de servicio

$M_r$  = Momento resistente

La resistencia de los elementos a ciertos efectos se tiene aplicando alguna teoría acertada. La resistencia obtenida s afecta de un factor de reducción, que afecta a diversos valores de acuerdo al tipo de efecto:

Para Flexión:  $FR = 0.9$

Para Cortante: FR=0.8

Para flexo compresión: FR=0.75.

Se establece que cuando la resistencia del concreto no es mayor que 350 kg/cm<sup>2</sup>, y el presfuerzo efectivo o final no es menor que la mitad del esfuerzo resistente, f<sub>sr</sub>, del acero de presfuerzo, el esfuerzo en el acero de presfuerzo f<sub>sp</sub> cuando se alcanza la resistencia puede calcularse para secciones con presfuerzo total como:

$$f_{sp} = f_{sr} \left[ 1 - 0.5 \left( P_p \frac{f_{sr}}{f'_c} - q' \right) \right]$$

## REVISION POR CORTANTE

Cortante Vertical

El cortante total resistente del elemento es:

$$V_R = V_{CR} + V_S$$

Donde:

V<sub>CR</sub> = cortante que resiste el concreto

V<sub>S</sub> = cortante que resiste el acero

$$V_s = \frac{A_v F_y F_R d_p}{s}$$

A<sub>v</sub> = Área de los estribos verticales

s = separación de estribos

$$s = \frac{A_v F_y F_R d_p}{V_u - V_{CR}}$$

Secciones con presfuerzo total

El cortante que resiste el concreto en secciones con presfuerzo total se calculara con la siguiente formula:

$$V_{CR} = F_R b d \left[ 0.15 \sqrt{f'^* c} + 50 \frac{V}{M} d_p \right]$$

$$V_{CR \max} = 2 F_R b d \sqrt{f'^* c}$$

$$V_{CR \min} = 0.5 F_R b d \sqrt{f'^* c}$$

Se deberá calcular el cortante actuante o de servicio y se multiplicara por su factor de carga. Este valor deberá ser menor que el cortante que resiste el concreto:

$$V_U = F_C V_S = 1.4 V_S < V_{CR}$$

Si no se cumple esto, se deberá agregar acero de refuerzo para resistir el cortante excedente.

#### Secciones con presfuerzo parcial

En secciones con presfuerzo parcial y en secciones con presfuerzo total donde los tendones no estén adheridos o situados en la zona de transferencia, se aplicaran las fórmulas de cortante para elementos reforzados.

$$\text{si } \rho < 0.01, \quad V_{CR} = F_R b d (0.2 + 30\rho) \sqrt{f' * c}$$

$$\text{si } \rho \geq 0.01, \quad V_{CR} = 0.5 F_R b d \sqrt{f' * c}$$

Donde  $\rho$  = cuantía de acero de refuerzo.

#### Cortante Horizontal

Fuerzas cortantes horizontales actúan entre las superficies de elementos compuestos sujetos a flexión. Estas fuerzas horizontales son debido al gradiente de momento resultante de las fuerzas cortantes verticales. Es necesario transferir totalmente estas fuerzas horizontales a los elementos de soporte para que el elemento no falle en esa parte. Los elementos resistentes a la fuerza cortante horizontal son la fricción que existe entre los elementos y conectores entre estos. Por lo general los estribos existentes serán suficientes para resistir estas fuerzas, de lo contrario deberán de agregarse conectores adicionales.

A continuación se muestra un método de diseño para el cortante horizontal.

$$\text{Si } a \geq t_f \Rightarrow F_h = f'' c b t_f$$

$$\text{Si } a \leq t_f \Rightarrow F_h = f'' c b a$$

$$F_h = T_{sp} = A_{sp} \times f_{sp} = C$$

$$\text{si } F_h > 2.8 \times F_R \times b_v \times L_{vh} \Rightarrow \text{Necesita conectores}$$

Donde:

$b$  = ancho total

$t_f$ = espesor de la sección compuesta menos la sección simple

$a$ = ancho del bloque de compresión

$b_v$  = ancho de la superficie de contacto

$L_{vh}$ = longitud del cortante horizontal

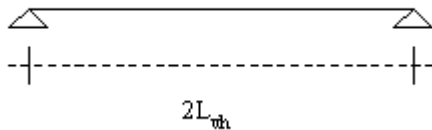


Fig.17 Longitud del cortante horizontal

Área de acero transversal ( $A_v$ ):

La menor de:

$$A_{v\min1} = \frac{F_h \times F_{h\min}}{F_R \times 70 \times b_v \times L_{vh} \times f_y}$$

$$A_{v\min2} = \frac{8.4 \times b_v \times L_{vh}}{f_y}$$

La mayor de:

$$A_{v\max2} = \frac{3.5 \times b_v \times L_{vh}}{f_y}$$

Donde:

$$F_{h\min} \leq \begin{cases} F_h \\ 0.25f'c \times L_{vh} \times b_v \\ 70 b_v \times L_{vh} \end{cases}$$

## REVISION POR ACERO MINIMO

### Momento de Agrietamiento

Cuando recién se aplica la fuerza del gato al elemento y el cable se estira entre los apoyos, el esfuerzo en el acero es  $f_t$ . Después de la transferencia de la fuerza al miembro del concreto, ocurre una reducción inmediata del esfuerzo hasta su nivel  $f_i$ , debido al acortamiento elástico del concreto. Al mismo tiempo, comienza a actuar el peso propio a medida que la viga se empieza a combar hacia arriba. Aquí suponemos que todas las pérdidas dependientes del tiempo ocurren antes de la

aplicación de las cargas sobrepuestas, en forma tal que el esfuerzo se continúa reduciendo hasta su nivel efectivo o final de presfuerzo,  $f_i$ .

A medida en que se agregan las cargas muertas y vivas sobrepuestas, ocurre un pequeño incremento en el esfuerzo del acero.

Suponiendo que se mantiene una adherencia perfecta entre el acero y el concreto, este incremento debe ser  $n_p$  veces el incremento en el esfuerzo en el concreto al nivel del acero. El cambio es entre el 3 o 4% del esfuerzo inicial y se desprecia por lo general en los cálculos.

A menos que la viga se haya agrietado antes de la aplicación de las cargas debido a la contracción u otras causas, no existe una modificación substancial en el comportamiento hasta la carga de descompresión, en donde la compresión en la parte inferior del miembro se reduce a cero. El esfuerzo en el acero continúa incrementándose poco y en forma lineal hasta que se alcanza la carga de agrietamiento. Bajo esta carga, ocurre un súbito incremento en el esfuerzo del acero, a medida en que la tensión que era tomada por el concreto se transfiere al acero. En un elemento con agrietamiento previo o que haya sido colado en diversos segmentos, la curva cambia de pendiente en la carga de descompresión.

Posteriormente al agrietamiento, el esfuerzo en el acero se incrementa mucho más rápidamente que antes. Después de alcanzado el esfuerzo de fluencia  $f_{py}$ , el acero se deforma desproporcionadamente, pero soporta crecientes esfuerzos debido a la forma de curva esfuerzo-deformación, y la curva esfuerzo contra carga continúa hacia arriba reduciendo gradualmente su pendiente. El esfuerzo del acero en la falla  $f_{ps}$  puede ser igual a la resistencia a la tensión  $f_{sr}$ , pero por lo general se encuentra algo por debajo de ese valor dependiendo de la geometría de la viga, la proporción de acero y de las propiedades de los materiales.

El momento que produce el agrietamiento puede hallarse fácilmente para una viga típica, escribiendo para el esfuerzo en el concreto en la cara inferior, basándose en la sección homogénea, e igualando al módulo de ruptura:

Módulo de ruptura:  $F_r = 2\sqrt{f'_c}$

Sección Simple

$$-\frac{P}{A} - \frac{P \times e}{S_i} + \frac{M_{agr}}{S_i} = 2\sqrt{f'_c}$$

$$M_{agr} = \left[ 2\sqrt{f'_c} + \frac{P}{A} + \frac{P \times e}{S_i} \right] S_i$$

En la cual  $M_{agr}$  es el momento de agrietamiento (incluyendo el momento debido al peso propio y al de las cargas muertas y vivas sobrepuestas) y  $f_r$  es el módulo de ruptura.

Sección Compuesta

$$-\frac{P}{A} - \frac{P \times e}{S_{iss}} + \frac{M_1}{S_{iss}} + \frac{M_2}{S_{isc}} = 2\sqrt{f'_c}$$

De la ecuación anterior la incógnita es  $M_2$ . Despejando:

$$M_2 = \left[ 2\sqrt{f'_c} - \frac{M_1}{S_{iss}} + \frac{P \times e}{S_{iss}} + \frac{P}{A} \right] S_{isc}$$

Donde  $M_{agr} = M_1 + M_2$

En todo elemento se deberá garantizar que la resistencia última a flexión se presente después del agrietamiento. Para ello se deberá de proveer refuerzo suficiente a tensión y así obtener un momento resistente mayor que el momento de agrietamiento:

$$M_R \geq (1.5 - 0.3 I_p) M_{agr}$$

Dependiendo del índice de presfuerzo,  $I_p$ , el factor entre paréntesis de la ecuación anterior tiene como límites 1.5, para elementos reforzados sin presfuerzo y 1.2 para elementos presforzados.

### REVISION POR ACERO MAXIMO

El diseñador debe garantizar que el elemento presentara una falla dúctil. Para ello, debe revisar que la deformación en los aceros sea al menos 33 por ciento mayor que la deformación de fluencia:

$$e_{sp} \geq 1.33 e_{sy}$$

El valor de  $e_{sp}$  debe incluir la deformación inicial del presfuerzo.

$$\epsilon_{sp} = \epsilon_i + \epsilon_p$$

Donde:

$E_{sp}$  = deformación unitaria del acero de presfuerzo cuando se alcanza el momento resistente de la sección.

$E_{yp}$  = Deformación unitaria específica de fluencia del acero de presfuerzo



$E_i$  = Deformación unitaria debida al presfuerzo efectivo en el momento de descompresión.

$E_p$  = deformación del acero de presfuerzo

### REVISION POR DEFLEXIONES

La predicción de la deflexión en miembros presforzados es complicada por la reducción gradual de la fuerza de presfuerzo debida a las pérdidas. En un miembro típico, la aplicación de la fuerza de presfuerzo producirá una flecha hacia arriba. El efecto de la contracción, del flujo plástico y del relajamiento, reduce gradualmente la flecha producida por la fuerza inicial. Sin embargo, el efecto del flujo plástico es doble. Mientras que produce una pérdida del presfuerzo tendiente a reducir la flecha, las deformaciones que provoca en el concreto aumentan la contraflecha. Por lo general, el segundo efecto es el que predomina, y la contraflecha aumenta con el tiempo a pesar de la reducción de la fuerza presforzante.

Cuando es importante obtener las deflexiones como en el caso de puentes de grandes claros, el método más satisfactorio consiste en el procedimiento basado en la sumatoria de las deflexiones que ocurren en intervalos discretos de tiempo. De esta manera, los cambios dependientes del tiempo en la fuerza pretensora, en las propiedades de los materiales, y en las cargas, se pueden tomar en cuenta con precisión. Pero en la mayoría de los casos es suficiente establecer limitaciones en la relación claro a peralte basándose en experiencias previas o en limitaciones de códigos y si se deben calcular deflexiones, el método aproximado descrito a continuación es suficiente para los elementos y casos más comunes.

Aun cuando en ciertos casos la deflexión para estados intermedios puede ser importante, los estados a considerarse normalmente son el estado inicial, cuando a la viga se le aplica la fuerza pretensora inicial  $P_i$  y su peso propio, y una o más combinaciones de carga de servicio, cuando la fuerza pretensora es reducida por las pérdidas hasta  $P_f$  y cuando las deflexiones son modificadas por el flujo plástico del concreto sujeto a cargas sostenidas.

Las deflexiones de corta duración  $D_{pi}$  debidas a la fuerza pretensora inicial  $P_i$  se pueden hallar basándose en la variación de la curvatura a lo largo del claro, usando los principios del área de momentos. Por lo general,  $D_{pi}$  es hacia arriba, y para condiciones normales, el peso propio del miembro se

supone inmediatamente después del presfuerzo. La deflexión inmediata  $\Delta_o$  hacia abajo debida al peso propio, el cual por lo general es uniformemente distribuido, se halla fácilmente por los métodos convencionales. La deflexión neta después del presfuerzo es:

$$\Delta_p = -\Delta_{pi} + \Delta_o$$

Al considerar los efectos de larga duración debidas a la fuerza presforzante,  $P_f$ , después de las pérdidas se puede calcular como la suma de las curvaturas inicial más los cambios debidos a la reducción del presfuerzo y debidos al flujo plástico del concreto. La deflexión final del miembro bajo la acción de  $P_f$ , considerando que el flujo plástico ocurre bajo una fuerza pretensora constante, e igual al promedio de sus valores inicial  $P_i$  y final  $P_f$  es

$$\Delta = -\Delta_{pf} - \frac{\Delta_{pi} + \Delta_{pf}}{2} C_u$$

donde el primer término (deflexión debido a la fuerza final efectiva  $P_f$ ) se halla fácilmente mediante proporción directa:

$$\Delta_{pf} = \Delta_{pi} \frac{P_f}{P_i}$$

donde  $C_u$  es el coeficiente de flujo plástico.

La deflexión de larga duración debida al peso propio se modifica también por el flujo plástico, y puede obtenerse aplicando el coeficiente del flujo plástico al valor instantáneo. De esta forma, la deflexión total del miembro, después de ocurridas las pérdidas y las deflexiones por flujo plástico, cuando actúan el presfuerzo efectivo y el peso propio, viene dada por:

$$\Delta = -\Delta_{pf} - \frac{\Delta_{pi} + \Delta_{pf}}{2} C_u + \Delta_o (1 + C_u)$$

La deflexión debida a las cargas sobrepuestas puede agregarse ahora, introduciendo el coeficiente por flujo plástico para tomar en cuenta el efecto de larga duración de las cargas muertas sostenidas, para obtener la deflexión neta bajo toda la carga de servicio:

$$\Delta = -\Delta_{RF} - \frac{\Delta_{pi} + \Delta_{RF}}{2} C_u + (\Delta_{CM} + \Delta_{CV})(1 + C_u) + \Delta_I$$

donde  $D_{CM}$  y  $D_{CV}$  son las deflexiones inmediatas debidas a las cargas muerta y viva sobrepuestas, respectivamente.

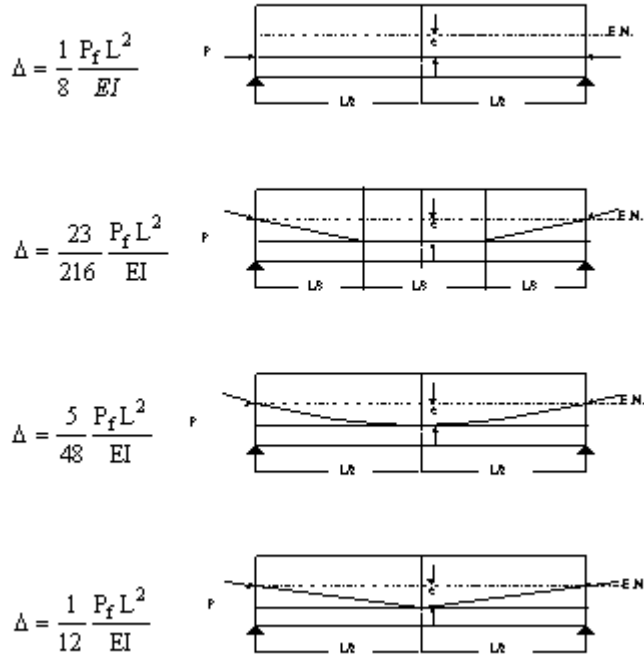


Fig. 18 Deflexiones al centro del claro para algunos tipos de elementos pretensados simplemente apoyados.

### DEFLEXIONES PERMISIBLES

#### Cargas a largo plazo

Se establece lo siguiente: el desplazamiento vertical en el centro de traveses en el que se incluyen efectos a largo plazo, es igual a

$$D = L / 240 + 0.5 \text{ (cm)}$$

además, en miembros en los cuales sus desplazamientos afecten a elementos no estructurales, como muros de mampostería, los cuales no

sean capaces de soportar desplazamientos apreciables, se considerará como estado límite a un desplazamiento vertical, medido después de colocar los elementos no estructurales igual a

$$D = L / 480 + 0.3 \text{ (cm)}$$

Para elementos en voladizo los límites anteriores se duplicarán.

Carga viva

Para puentes se exigen que, para claros simples o continuos, la deflexión debida a la carga viva más impacto no debe sobrepasar  $L/800$  excepto para puentes en áreas urbanas usados en parte por peatones, en los cuales la relación no debe ser mayor de  $L/1000$  de preferencia.

### 5.5.4 Separación y Recubrimiento del Acero

Debe tenerse especial cuidado en el adecuado recubrimiento de los tendones de presfuerzo ya que este es muy vulnerable a la corrosión y oxidación. Se estiman los siguientes valores mínimos de recubrimiento libre para elementos expuestos a la intemperie:

Dos veces el diámetro del torón o de la varilla ó 3 veces el diámetro de la barra más gruesa si es un paquete de varillas

En columnas y trabes 4 cm; en losas 3 cm y en losas prefabricadas y cascarones 2 cm

En elementos estructurales que no van a quedar expuestos a la intemperie se podrán emplear la mitad de los valores anteriores. Por el contrario, si los elementos estructurales son colados contra el suelo, el recubrimiento libre será el mínimo entre los dos requisitos ya mencionados y 3 ó 5 cm si se usa o no plantilla, respectivamente. Los recubrimientos anteriores se deben incrementar a criterio del ingeniero en miembros expuestos a agentes agresivos como sustancias o vapores industriales, terrenos particularmente corrosivo, etc.

La separación libre,  $S_i$ , entre tendones para pretensado en los extremos del miembro no debe ser menor de:

$$S_i \geq 4 \varnothing_a \text{ para alambres}$$

$$S_i \geq 3 \varnothing_t \text{ para torones}$$

También se cumplirá con lo prescrito para el tamaño máximo de agregados. En la zona central del claro, se permite una separación vertical menor y hacer paquetes de tendones, siempre y cuando se tengan las suficientes precauciones para lograr un adecuado funcionamiento del presfuerzo.

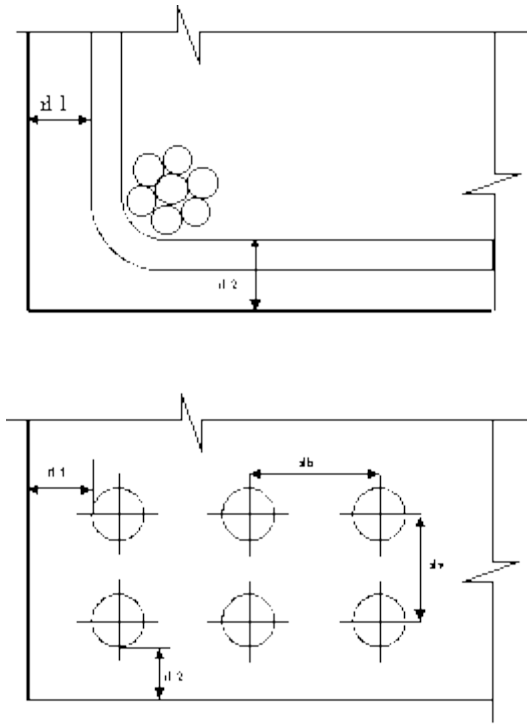


Fig. 19 Recubrimiento y Separación libre de varillas y torones

Donde

- slh = separación libre horizontal
- slv = separación libre vertical
- rlh = recubrimiento libre horizontal
- rlv = recubrimiento libre vertical

### 5.6 Aplicaciones

El concreto presforzado es importante especialmente en superestructuras que puede que cuesten un poco más de lo normal pero pueden brindar mayor seguridad en la estructura. Los ejemplos de la aplicación del concreto presforzado son:

En traves, losas y columnas: Para resistir las flexiones y cortantes.

Puentes construidos por voladizos: Para rigidizar la fase ya construida y para resistir las flexiones y cortantes en la fase de servicio.

Puentes Empujados: Para unir dovelas entre si y para resistir las flexiones y cortantes durante el empujado y en servicio.

Puentes por dovela prefabricadas: Para unir dovelas entre si y para tomar flexiones y cortantes en servicio.

Puentes y otras estructuras atirantadas: Para soportar el peso de la superestructura con el terreno y evitar hundimientos y colapsos del mismo.

#### 4.6.1 Puentes de Concreto Presforzado

Un puente es una construcción, por lo general artificial, que permite salvar un accidente geográfico o cualquier otro obstáculo físico como un rio, un cañón, un valle, un camino, una vía férrea, un cuerpo de agua o cualquier obstrucción. El diseño de cada puente varía dependiendo de su función y la naturaleza del terreno sobre el que el puente es construido. Los puentes pueden ser clasificados por la forma en que las cuatro fuerzas de tensión, compresión, flexión y tensión cortante o cizalladura están distribuidas en toda su estructura. La mayor parte de los puentes emplea todas las fuerzas principales en cierto grado, pero solo unas pocas predominan. Existen seis tipos principales de puentes: puentes viga, en ménsula, en arco, colgantes, atirantados y apuntalados. El resto de tipos son derivados de estos.

##### 5.6.1.1 Importancia del uso de Concreto Presforzado

El concreto presforzado ha demostrado ser técnicamente ventajoso y económicamente competitivo tanto para puentes de claros medios donde se emplean elementos pretensados estándar producidos en serie, como para puentes de grandes claros como los empujados y los atirantados. En la actualidad, prácticamente todos los puentes se construyen con esta técnica y es una de las áreas más exitosas del concreto presforzado. La rapidez de construcción, la

eficiencia de los elementos y el menor peralte obtenido con respecto a otras soluciones son algunas de las ventajas que justifican esta alta competitividad.

### Soluciones típicas

Entre los sistemas que se utilizan para puentes de concreto presforzado tenemos:

Losas extruidas o alveolares pretensadas con losa colada en sitio.

Vigas T, I o cajón con losa colada en sitio.

Vigas postensadas con losa, ambas coladas en sitio. Vigas de sección cajón, de una sola pieza o en dovelas, pretensadas o postensadas.

Las losas extruidas o alveolares pueden ser utilizadas en claros cortos, menores que 8m, aunque tienen una gran desventaja; al no tener acero de refuerzo, pueden presentar una falla frágil por cortante ante cargas extraordinarias. Por ello, deben considerarse factores de carga mucho mayores para evitar que una vez que se rebase el cortante resistente del concreto ocurra la falla del puente.

Al igual que para las losas extruidas prefabricadas, sobre las superestructuras formadas por vigas pretensadas T, I de AASHTO o cajón, se cuela en sitio la losa. Para claros cortos, menores que 25m, la sección T es muy efectiva, y para claros mayores, las secciones I o cajón con aletas son más eficientes. La trabe cajón con aletas debe su gran eficiencia a tres factores principales:

Mayor rigidez tensional que evita, en la mayoría de los casos, el uso de diafragmas intermedios.

Ancho inferior para albergar más torones y así proporcionar mayor excentricidad al presfuerzo aumentando los esfuerzos y el momento resistente de la sección.

La presencia de las aletas elimina el uso de la cimbra para colar la losa y permite el empleo de un menor peralte de la misma (15cm) comparado con el requerido para una viga I (18 cm).

Los puentes con sistemas postensados son cada vez menos empleados, sobre todo en ciudades, por el tiempo que debe permanecer la cimbra obstaculizando el tráfico vehicular. Sin embargo, es un sistema eficiente en zonas de difícil acceso para elementos largos o en sitios lejanos a las plantas de fabricación donde se encarece el transporte y el montaje. Cuando el elemento postensado se fabrica en el sitio, la losa se cuela al mismo tiempo que la trabe; cuando se fabrica a pie de obra, la losa se colara en una segunda etapa sobre el elemento ya montado.

Por último, secciones prefabricadas tipo cajón de grandes dimensiones de una sola pieza o en dovelas, son muy eficientes debido a su bajo peso y a su rigidez. Estas secciones se usan en puentes atirantados y empujados. El metro elevado de la ciudad de México (Línea B) está estructurado con elementos prefabricados y presforzados de 20m de longitud por 8m de ancho. Fueron fabricados a pie de obra y cuentan con presfuerzo longitudinal y transversal, este último para resistir la flexión en las aletas.

### 5.6.1.2 Análisis y Diseño de Superestructuras de Puentes con Elementos Presforzados

Es responsabilidad del diseñador escoger las solicitaciones y los métodos de análisis y diseño óptimos, acordes a la situación nacional. No es válido combinar partes de distintos reglamentos sin estar conscientes que cada uno de ellos ha sido concebido de manera independiente y que las combinaciones sin conocer las bases que los crearon pueden arrojar resultados inconsistentes.

#### Solicitaciones

La superestructura de un puente se diseña fundamentalmente para resistir carga vivas vehiculares. Cargas accidentales como viento y sismo deben ser resistidas por la subestructura.

#### Carga muerta

Son las cargas permanentes que actúan sobre la estructura. Se debe incluir dentro de la carga muerta el peso propio de las traveses, la losa y la carpeta asfáltica. Con fines de cuantificar la carga muerta, el espesor de la carpeta asfáltica no debe tomarse menor que 10 cm para considerar futuras repavimentaciones donde no exista sustitución de material. El peso volumétrico del asfalto no se tomara menor que  $2 \text{ T/m}^3$ .

Por la poca carga que representa para el puente, es común desprestigiar el peso de los diafragmas. Las cargas de las banquetas, guarniciones y parapetos pueden considerarse como repartidas en todas las traveses; si bien es cierto que las traveses extremas soportaran estas cargas, también lo es que las mismas no pasara viva. Debido a que siempre debe procurarse fabricar todas las vigas de un puente iguales y que el diseño de las vigas está regido por la carga viva, las vigas extremas, aunque tengan mucha carga muerta, estarán ligeramente sobradas en su diseño.



### Carga viva

Existen dos tipos de carga viva, las debidas al paso de peatones y las ocasionadas por el paso de vehículos.

-Carga viva peatonal. Esta carga podrá calcularse de la siguiente manera

Claros menores a 7.5m -----415 kg/m<sup>2</sup>

Claros de 7.5m hasta 30m-----300 kg/m<sup>2</sup>

-Carga viva vehicular. Además de conocer las cargas de diseño y las características de cada camión, es importante conocer las dimensiones del carril de diseño, ya que de el dependerá el número de camiones que circularan por el puente.

### Diseño de los elementos de la superestructura

Como se ha mencionado, la mayor parte de los puentes de claro medio que se construyen en el país están hechos con superestructuras de elementos prefabricados de concreto presforzado empleando secciones I de AASHTO, Cajón T y doble T, sobre las que se cuela una losa de concreto reforzado.

Esta losa, integrada a la trabe presforzada, dará lugar a la sección compuesta que aumenta sensiblemente la capacidad de la sección.

### Vigas

Las vigas son el elemento estructural más importante en el diseño de un puente., La recomendación general sobre que sección utilizar para determinados claros a cubrir se da en la siguiente tabla, donde se presentan límites razonables de aplicabilidad de las secciones más comunes. El peralte de estas secciones variara, según el claro y disponibilidad en el mercado, entre L/18 Y L/23.

Deben diseñarse para resistir solo las cargas verticales muertas y vivas, tal como se indicó en la sección de solicitaciones. El dimensionamiento del elemento debe basarse en su comportamiento ante cargas de servicio comparando los esfuerzos permisibles contra los actuantes, tomando en cuenta las pérdidas. Una vez definida la sección con el presfuerzo correspondiente, se deberán verificar distintas condiciones de servicio, como los esfuerzos en la transferencia, encamisados y deflexiones, así como revisar condiciones de resistencia como el momento último, aceros mínimos y máximo y cortante, entre otros.






Sección	Claro (m)
	$L < 8$
	6 a 20
	10 a 25
	15 a 35
	20 a 40



Fig. 20 Factores de Distribución de carga para puentes de concreto presforzado según AASHTO.

### Losa

La losa de concreto armado que se coloca sobre los elementos presforzados para formar la sección compuesta tiene un espesor de 15 a 20 cm dependiendo del elemento estructural sobre el que descansa. Esta losa, además de aumentar la capacidad de la sección, cumple la función de rigidizar a la superestructura tanto en el sentido vertical, para repartir las cargas vivas uniformemente a todas las travesaños, como en el horizontal, para evitar movimientos relativos entre las vigas y hacer las funciones de un diafragma rígido. El espesor de la losa deberá incrementarse por concepto de desgaste si esta será, además, la superficie de rodamiento.

La losa debe estar perfectamente ligada a las travesaños, por lo que estas estarán provistas de conectores y contarán con una superficie de contacto limpia, húmeda y rugosa. Los conectores podrán ser los mismos estribos de la viga de manera que se doblen en obra para formar la sección compuesta. En el caso de vigas T y

Cajón con aletas, además de los estribos del alma, las varillas de las aletas deberán salir en los extremos de las mismas para formar otro grupo de conectores.

Para el análisis y diseño de la losa se le considera como una viga continua perpendicular a las traes presforzadas donde hay momentos positivos y negativos. El acero longitudinal debe especificarse por temperatura.

En general, el peralte de la losa es de 18 a 20cm, pero para trabes tipo T o Cajón con Aletas que en ningún caso el espesor de ese patín será menor que 5cm, el peralte de la losa podrá ser de 15cm. En este caso, para el cálculo del momento resistente de la losa en momento negativo se podrá utilizar el peralte total de la losa más el espesor del patín de la T o las aletas de la trabe cajón, para el momento resistente positivo el peralte total será solo el de la losa.

Para soportar las fuerzas debidas a impactos se proveerá suficiente refuerzo a lo largo de la base del parapeto que a su vez es soportado por la losa y por la viga extrema del puente.

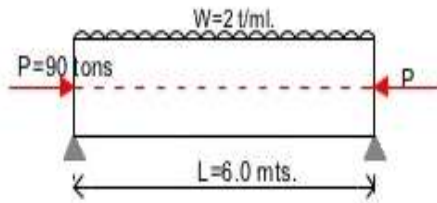
### Diafragmas

Los diafragmas proporcionan rigidez lateral a las trabes y a la superestructura en general. Estos consisten en trabes transversales a los elementos presforzados, generalmente de concreto reforzado, que se ubican en los extremos del puente y en puntos intermedios del mismo. Los diafragmas extremos unen a las vigas entre si y con la losa, y le dan una gran rigidez al puente. Los diafragmas intermedios tienen como función primordial restringir el pandeo lateral de las vigas principales garantizando el trabajo en conjunto y un adecuado funcionamiento a flexión.

La cantidad y separación de diafragmas intermedios estará en función de la rigidez lateral y la longitud del claro del puente. En general, claros mayores a 10m con vigas I o T deberán llevar al menos un diafragma intermedio, con espaciamientos de alrededor de 5m entre ellos. Debido a su gran rigidez lateral, las vigas presforzadas tipo cajón con aletas pueden prescindir de diafragmas, al menos hasta claros de 30m.

Las vigas deberán contar con preparaciones adecuadas como ductos para el paso de varillas o torones para postensar, varillas ahogadas en la trabe que se desdoblan en obra, placas para soldar diafragmas metálicos, entre otros.

Caso 1. Presfuerzo Axial



a) Propiedades geométricas

$$\text{Área} = bh = 15 \cdot 60 = 900 \text{ cm}^2$$

$$I = \frac{1}{12} bh^3 = \frac{1}{12} \cdot 15 \cdot 60^3 = 270000 \text{ cm}^4$$

$$S = \frac{I}{c} = \frac{270000}{30} = 9000 \text{ cm}^3$$

o

$$S = \frac{bh^2}{6} = \frac{15 \cdot 60^2}{6} = 9000 \text{ cm}^3$$

b) Elementos mecánicos

$$M = \frac{wl^2}{8} = \frac{2 \cdot 6^2}{8} = 9 \text{ ton.m}$$

$$M = 900000 \text{ kg cm}$$

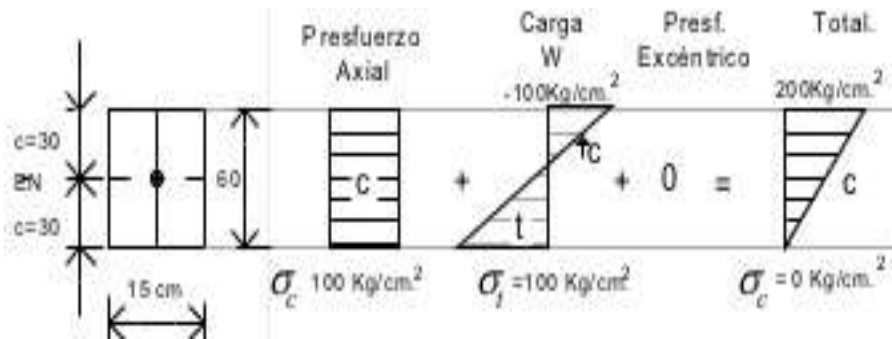
Estado de Esfuerzos

c) Esfuerzos debido al presfuerzo axial

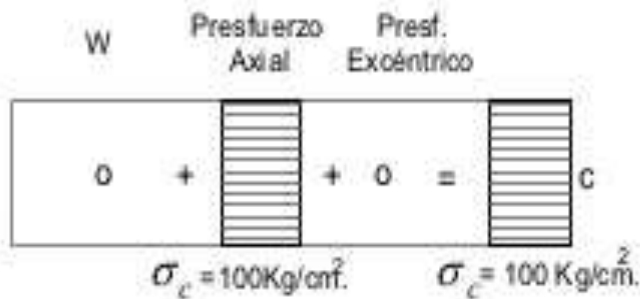
$$\sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{9000 \text{ kg}}{900 \text{ cm}^2} = 100 \text{ kg/cm}^2 \quad f_i = f_s = -\frac{P}{A} \pm \frac{M}{S}$$

d) Esfuerzos debido a W

$$f_t = f_c = \pm \frac{Mc}{I} = \pm \frac{Mc}{I} = \pm \frac{M}{S} = \frac{900000}{9000} = \pm 100 \text{ kg/cm}^2$$

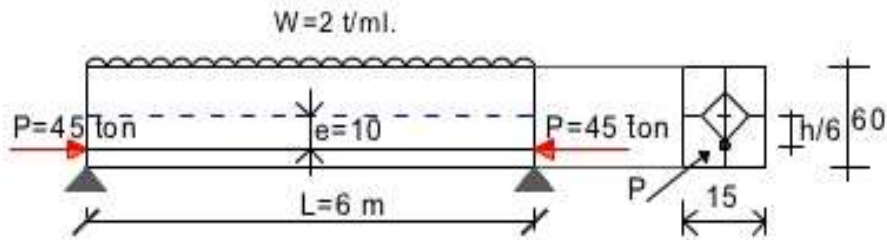


Estados de Esfuerzos en el Extremo



Solo actúa la fuerza presforzante ya que el Momento en el extremo es 0.

Caso 2. Viga con Presfuerzo en el Limite Núcleo Central

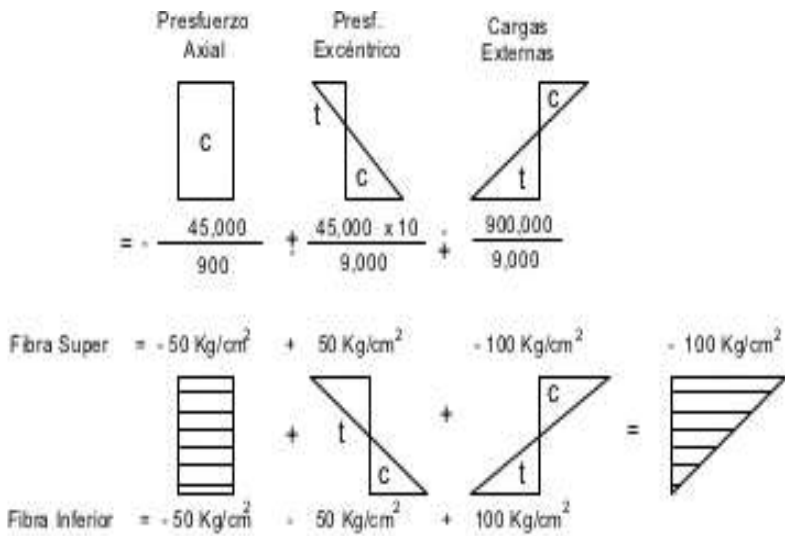


Estado de Esfuerzos en L/2

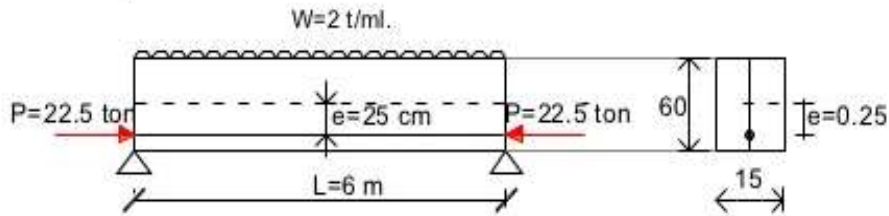
$$f_i = f_s = -\frac{P}{A} \pm \frac{Pe}{S} \mp \frac{M}{S} \rightarrow \text{Ecuación de la escuadría}$$

$f_i$  = Esfuerzo en la fibra inferior

$f_s$  = Esfuerzo en la fibra superior



Caso 3. Presfuerzo ubicado a 5cm. de la fibra inferior

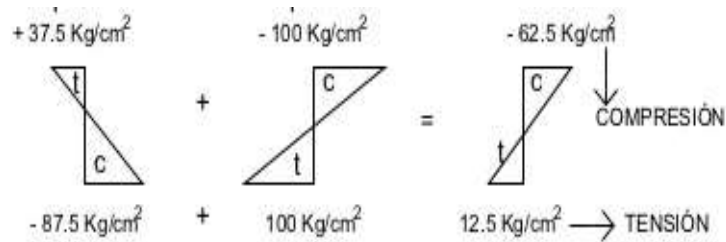


Esfuerzos al centro del claro

$$f_i = f_s = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe}{S} \mp \frac{M}{S}$$

$$= \frac{22500}{900} \pm \frac{22500 \cdot 25}{9000} \mp \frac{900000}{9000}$$

$$= -25 \text{ kg/cm}^2 \pm 62.5 \text{ kg/cm}^2 \mp 100 \text{ kg/cm}^2$$



### 5.6.2 Muros de Concreto Presforzado

Los muros de contención tienen como finalidad resistir las presiones laterales ó empuje producido por el material retenido detrás de ellos, su estabilidad la deben fundamentalmente al peso propio y al peso del material que está sobre su fundación. Los muros de contención se comportan básicamente como voladizos empotrados en su base. Designamos con el nombre de empuje, las acciones producidas por las masas que se consideran desprovistas de cohesión, como arenas, gravas, cemento, trigo, etc. En general los empujes son producidos por terrenos naturales, rellenos artificiales o materiales almacenados.

Se define como muro: “Toda estructura continua que de forma activa o pasiva produce un efecto estabilizador sobre una masa de terreno”.

El carácter fundamental de los muros es el de servir de elemento de contención de un terreno, que en unas ocasiones es un terreno natural y en otras un relleno artificial.

En la situación anterior, el cuerpo del muro trabaja esencialmente a flexión y la compresión vertical debida a su propio peso es generalmente despreciable.

Sin embargo, en ocasiones el muro desempeña una segunda misión que es la de transmitir cargas verticales al terreno, desempeñando una función de cimiento. La carga vertical puede venir de una cubierta situada sensiblemente a nivel del terreno o puede ser producida también por uno o varios forjados apoyados sobre el muro y por pilares que apoyan en su coronación transmitiéndole las cargas de las plantas superiores.

Las formas de funcionamiento del muro de contención y del de sótano, son considerablemente diferentes. En el primer caso el muro se comporta como un voladizo empotrado en el cimiento, mientras que en el segundo el muro se apoya o ancla en los forjados, y a nivel de cimentación el rozamiento entre cimiento y suelo hace que sea innecesaria casi siempre la disposición de ningún otro apoyo. El cuerpo del muro funciona en este segundo caso como una losa de uno o varios vanos y a ese funcionamiento se superpone con frecuencia el de la pieza como viga de cimentación de gran canto.

#### Designaciones

- Puntera: Parte de la base del muro (cimiento) que queda debajo del intradós y no introducida bajo el terreno contenido.
- Tacón: Parte del cimiento que se introduce en el suelo para ofrecer una mayor sujeción.
- Talón: Parte del cimiento opuesta a la puntera, queda por debajo del trasdós y bajo el terreno contenido.



- Alzado o cuerpo: Parte del muro que se levanta a partir de los cimientos de este, y que tiene una altura y un grosor determinados en función de la carga a soportar.
- Intradós: Superficie externa del alzado.
- Trasdós: Superficie interna del alzado, está en contacto con el terreno contenido.

### 5.6.2.1 Tipos Generales DE Muros de Contención

#### Muros de hormigón armado

“Son muros armados interiormente con barras de acero diseñado para poder soportar esfuerzos de tracción”.

Tipos:

- Muros de semigravedad.
- Similar al de gravedad pero ligeramente armado.
- Muros ménsula o en “L”.

En estos muros el momento al vuelco, producido por el empuje de las tierras, es contrarrestado por el peso de las tierras sobre la zapata.

Son los de empleo más corriente y aunque su campo de aplicación depende, lógicamente, de los costes relativos de excavación, hormigón, acero, encofrados y relleno, puede en primera aproximación pensarse que constituyen la solución más económica hasta alturas de 10 ó 12 metros.

#### Muros con contrafuertes

Constituyen una solución evolucionada de la anterior, en la que al crecer la altura y por lo tanto los espesores del hormigón, compensa el aligerar las piezas. Esto conduce a encofrados mucho más complicados y a un hormigonado más difícil y por lo tanto mucho más costoso, al manejarse espesores más reducidos. Sin embargo, a partir de los 10 ó 12 m de altura es una solución que debe tantearse para juzgar su interés.

### 5.6.3 Estadios

Un estadio es una infraestructura urbana que puede ser utilizada para deportes, concierto u alguna otra actividad que requiera mucho espacio, son diseñadas para que las personas permanezcan de pie o sentadas.

Existen diferentes tipos de materiales de los que se puede construir un estadio, como son de madera, acero o concreto. Los estadios que requieren de mucha capacidad son los que se construyen de concreto presforzado, lo que son las gradas y los túneles de acceso y muros de contención si son necesarios.

### 5.6.4Tuneles de Arco

En terrenos con problemas de estabilidad, una alternativa es construir falsos túneles, que consisten en realizar la excavación a cielo abierto del cajón del túnel, para luego colocar arcos prefabricados de concreto que conforman la estructura, los cuales son cubiertos con material de relleno, el cual se compacta de manera simétrica a lo largo del túnel. Los arcos se ensamblan generando entrabe entre las piezas, sus juntas se sellan y se realiza el vaciado de una viga que proporciona monoliticidad al conjunto. Los arcos pueden ser de una sola sección o de dos secciones que se apoyan en una cimentación o riel de concreto, la cual también puede ser prefabricada. En la clave el prefabricado trae unos cercos de acero, que se unen con el de la pieza enfrentada y con las juntas de las piezas que las suceden, para luego fundir una viga de amarre, generando una estructura monolítica que soporta cargas por el concepto del arco.

### 5.6.5Puente Telpaneca en Nicaragua.

Situado en dicho municipio ubicado a 218 Km de Managua, es el puente más grande de la zona norte de Nicaragua.

La obra consta de 150 m de largo, con un ancho de 11 m, a doble carril, con una altura de 15 metros desde su base.

Este puente está compuesto por cinco claros de 30 m cada uno en la parte de subestructura por dos estribos a los dos lados extremos y cuatro pilas al centro, la superestructura se trabajó con vigas de acero postensadas; tecnología nueva que está implementando el MTI (Ministerio de Transporte e Infraestructura) con un total de 25 vigas y la losa de rodamiento que tiene 11 m de ancho para tener 2 carriles de circulación.

El diseño se hizo en base al nivel máximo de agua que es de 21 m.

Dicho puente pasara al nivel máximo, que en este caso es el Mitch que se toma para el diseño de los puentes.

Se edificó aislado del municipio realizándose un bypass de más o menos 700 m de longitud con un movimiento de tierra de más o menos 230000 metros cúbicos que es por donde pasara la carretera.

Este nuevo puente viene a aliviar el problema que se daba cuando había crecidas del río en invierno y además porque ahora el transporte pesado y el intermunicipal ya no van a pasar por el casco urbano del pueblo de Telpaneca, sino que se va a dirigir directamente al puente,

A continuación se podrá observar imágenes durante el proceso de ejecución de dicho puente:



Fig. 21 Puente Telpaneca



Fig. 22 Puente Telpaneca



Fig. 23 Puente Telpaneca



Fig. 24 Puente Telpaneca





Fig. 25 Puente Telpaneca



Fig. 26 Puente Telpaneca ya finaliza

## VI. Conclusion

Al haber finalizado este trabajo se concluye que el estudio del concreto presforzado es de gran importancia conociendo sus aspectos fundamentales tanto en el método presforzado como del postensado así como también reconociendo los grandes aportes que brindaron los precursores de dicho concreto lográndolo mediante la calidad de los materiales que lo conformaban.

Tomando en cuenta sus características y que cumplan con las normativas; ya que el uso del mismo es muy útil e indispensable en el ámbito de la construcción ya que cada día son más los casos en los que se está tratando de adquirir mayor eficiencia y utilidad al concreto motivando a una mayor investigación para ir mejorando en cuanto a calidad para obtener un concreto más resistente para la edificación de grandes estructuras.

## VII. Bibliografía

Ing. Bayardo Altamirano. Apuntes de Puentes

procedimientosconstruccion.blogs.upv.es

Nilson, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto. México, Limusa Noriega, 1988

Gonzales, Cuevas Oscar . Robles, Fernandez-Villegas Fco. Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado. México, Limusa Noriega, 1955

Concreto Pretensado, Bianco Accardi Giovanni, 1990

Teodoro E. Harmsen. Diseño de Estructuras de Concreto Armado

Estructuras de Concreto Postensado. Manual Técnico PC- Postensado

Orozco Zepeda, F. E. , Temas Fundamentales del Concreto Presforzado. Editado por Instituto Mexicano del Cement y del Concreto, A. C. 2006

ANIPPAC. Manual de Diseño de Estructuras Presforzadas y Prefabricadas, 2000

American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO. LRFD Bridge Design Specifications. Washington, D.C., 1994.

American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO. Standard Specifications for Highway Bridges. Washington D.C., 1996

Lin, Tung-Yen. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Mexico, Continental, 1968

ASTM C469-65. American Society for Testing Materials. Estándar Method of Test for Static Youngs Modulus of Elasticity and Poissons Ratio in Compressions of Cilyndrical Concrete Specimens Filadelfia, 1965

**VIII. Anexos**





Viga presforzada en el proceso de ejecución.



Colocacion de losa sobre viga presforzada.