

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES “ARAGÓN”

“TRABES PRESFORZADAS

PARA PUENTES CARRETEROS”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A

ALBERTO SANTILLÁN VEGA

ASESOR: M. EN I. PATROCINIO ARROYO HERNANDEZ

San Juan de Aragón, Edo. de México a 15 de Septiembre de 2010.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS.

EL SIMPLE HECHO DE PLASMAR UN NOMBRE O HACER REFERENCIA A ALGUIEN ES UNA FORMA LEGITIMA DE AGRADECER; SIN EMBARGO AGRADECER SIN MENCIONAR O TESTIFICAR EL NOMBRE DA MAYOR PLACER, Y ESTO LO ATRIBUYO A QUE NO HAY MEJOR TRIBUTO PARA ALGUIEN; QUE CON LA MERA LECTURA DE UNAS PALABRAS DESCUBRA QUE SON DIRIGIDAS A EL.

A LA PERSONA QUE TODOS SABEN QUE AGRADEZCO MI VIDA MISMA Y QUE POR FORTUNA SIEMPRE ESTA CONMIGO, A ELLA QUE AL ESCRIBIR ESTAS PALABRAS SE ME DIFICULTA HASTA EL SIMPLE HECHO DE HACERLO, A ELLA QUE CON EL TRANCURSO DEL TIEMPO ESTA EN MI CON TANTA FUERZA QUE NADIE LO IMAGINARIA, A ELLA A LA QUE LE DEBO CADA DIA DE MI VIDA, A ELLA QUE ANHELO ESTAR AQUÍ COMO NADIE Y QUE SE QUE ESTA AQUÍ A MI LADO, A ELLA QUE SEGURAMENTE ME ESTUVIERA REGAÑANDO POR ESTAR MAL VESTIDO, SIN CORBATA Y DESALINEADO...

PARA TI...

ESE GRAN AMOR MAGICO, INDESTRUCTIBLE, LATENTE, DESINTERESADO Y SINCERO.

PARA TI...

QUE SE QUE NO TENGO QUE GRITAR PARA QUE ESCUCHES LO QUE DICE MI CORAZON.

PARA TI...

QUE SIEMPRE ME DEFENDISTE CON TODA TU FUERZA.

PARA TI...

QUE CON TUS SONRISAS, TUS MIRADAS, TUS REGAÑOS, TUS FORMAS, TUS CUIDADOS, TUS COMIDAS... ME DEMOSTRASTE EL GRAN AMOR QUE SE PUEDE TENER POR ALGUIEN A

PESAR DE SUS DEFECTOS.

PARA TI MI PADRE Y MI MADRE.

A MIS PADRES;

QUE A PESAR DE TODAS SUS CONFUSIONES, QUE A PESAR DE TODOS SUS PROBLEMAS, QUE A PESAR DE TODOS MIS DESCUIDOS, QUE A PESAR DE SUS INESTABILIDADES... SIEMPRE ME HAN DEMOSTRADO ESTAR CONMIGO Y DESVIVIRSE POR AGRADARME, A ELLOS QUE ME HAN DADO SIN ESPERAR NADA A CAMBIO Y QUE YO CONVENIENTEMENTE LO HE ACEPTADO.

A ELLOS QUE CUANDO LOS VEO Y CONVIVO CON ELLOS ME DOY CUENTA DE LA TRISTEZA QUE LES EMBARGA, A ELLOS QUE A UNO LA VIDA LO EMBRIAGA Y A UNA LA VIDA LE CANSA...

GRACIAS POR DEMOSTRAR CON SUS PROPIAS VIDAS QUE LES DUELE EL NO HABER ESTADO POR COMPLETO EN LA MIA.

GRACIAS POR HACERME SABER CON SU TRATO EL CARIÑO QUE ME GUARDAN.



A MIS HERMANAS;
A ELLAS QUE AMO, QUE QUIERO Y QUE NO SE COMO DEMOSTRARSELOS, A ELLAS QUE SIEMPRE ME HACEN SABER QUE PIENSAN EN MI, A ELLAS A LAS QUE LES PUEDO DECIR LAS AMO Y SIEMPRE ESTARAN EN MI.

A LOS PADRES DE MI HIJA;
A ELLOS QUE SIN NINGUN INTERES ME HAN BRINDADO EL CARIÑO SANO QUE SE PUEDE SENTIR POR ALGUIEN QUE LLEGA TARDE A SUS VIDAS, A ELLOS QUE ME DEMUESTRAN A DIARIO LA FORMA EN COMO SE PUEDE QUERER, AMAR Y CUIDAR A UNA HIJA, A ELLOS QUE SIN PLANEARLO ME ENSEÑAN EL VERDADERO AMOR DE UNA FAMILIA, A ELLOS LES DOY GRACIAS POR QUE A PESAR DE MIS DEFECTOS ME TIENEN AFECTO.

A MIS TIOS;
A ELLOS QUE ESTUVIERON ALENTANDOME CON SUS PALABRAS, A ELLOS QUE CON SU EJEMPLO ME DEMOSTRARON HASTA DONDE SABER LLEGAR Y COMO HACERLO, A ELLOS QUE CON SUS DETALLES DE APOYO Y CARIÑO ME HACEN SENTIR PARTE DE SU FAMILIA, A ELLOS LES AGRADEZCO POR LA CONVIVENCIA DIARIA Y LAS PALABRAS DE ALIENTO CONSTANTE.

A MIS PRIMOS;
A TODOS Y ALGUNOS DE FORMA DIFERENTE, LES AGRADEZCO POR LA COMPETENCIA SANA ,
POR LA CONVIVENCIA COTIDIANA Y EL CARIÑO BRINDADO EN EL TRANCURSO DE LOS AÑOS, A ELLOS POR DEMOSTRAR QUE A PESAR DE LA DISTANCIA Y LEJANIA SE SIGUE ESTANDO; Y DA GUSTO EL ESTAR.

A MI HIJA;
A ELLA QUE SUPO LLEGAR CUANDO TENIA QUE HACERLO PARA SALVARME DE LO IMPENSABLE, A ELLA QUE ME ENSEÑA A DIARIO EL MOTIVO Y OBJETIVO DE LA VIDA, A ELLA QUE ME ALIENTA Y ME ENFOCA, A ELLA QUE DESPIERTA EN MI TERNURA, A ELLA EL UNICO TESTIMONIO DE MI EXISTENCIA, A TI *EQUIA* CONTINUIDAD TRANSFORMADA DEL SENTIMIENTO INAGOTABLE, A TI QUE A PARTIR DE TU EXISTENCIA SE ASENTUAN MAS MIS DEFECTOS CREANDO EN MI LA NECESIDAD DE MODIFICARLOS, A TI MI AMOR PLENO.

A MIS AMIGOS;
SE QUE COMO SIEMPRE LES FALLARE DE CIERTA FORMA, SOY PRIVILEGIADO POR SABER QUE CADA UNO DE USTEDES ME HA BRINDADO SU APOYO EN DIFERENTES ETAPAS DE MI VIDA, SE QUE NO ES FACIL LA CONVIVENCIA SIN EMBARGO SIEMPRE DIVERTIDO, GRACIAS POR TU APOYO, SE TE EXTRAÑA Y MUCHO.

A MI ASESOR, MAESTRO Y AMIGO;

A USTED, LA PERSONA QUE MAS ME A TENIDO PACIENCIENCIA, LA UNICA PERSONA QUE DUDO PERO QUE NUNCA PERDIO LA ESPERANZA DE QUE UN DIA ESTE TRABAJO FUERA

TERMINADO, NO HUBIERA SIDO FACIL TERMINAR ESTE TRABAJO SIN SU APOYO Y TIEMPO DESINTERESADO, NUNCA ANTES NADIE MAS APASIONADO, MAS EMOCIONADO, MAS DEDICADO POR SU TRABAJO, POR ESE GRAN PLACER QUE SIENTE POR EL MOTIVO DE ENSEÑAR Y TRANSMITIR SU EXPERIENCIA, MI MEJOR REFERENTE DE UN PROFESIONISTA Y GRAN AMIGO.

A TI;



I N D I C E

Introducción.

Objetivo.

Alcances.

1. <u>Consideraciones generales.</u>	Pág.
1.1. Desarrollo histórico de la técnica del presfuerzo.....	08
1.2. ¿Concreto presforzado o reforzado?.....	10
1.3. Técnicas de presfuerzo.....	13
1.4. Utilización del presfuerzo en puentes carreteros.....	16
1.5. Normativa en puentes.....	18
2. <u>Fundamentos de presfuerzo.</u>	
2.1. Teoría básica.....	20
2.2. Propiedades geométricas de la sección presforzada.....	24
2.3. Cálculo de esfuerzos.....	27
2.4. Cuantificación de pérdidas de presfuerzo.....	29
3. <u>Diseño del presfuerzo.</u>	
3.1. Solicitaciones estructurales.....	34
3.2. Selección de la sección geométrica.....	37
3.3. Determinación del presfuerzo.....	39
3.4. Evaluación de esfuerzos actuantes.....	42
3.5. Condiciones de servicio.....	44
3.6. Secciones de interés.....	46

4. [Caso de estudio: "Puente San Lorenzo."](#)..... 49

5. [Conclusion.](#)..... 66

Bibliografía

INTRODUCCIÓN

La aportación que brinda el presfuerzo a la ingeniería civil es muy amplia, debido a que esta técnica se anticipa como su nombre lo dice a solicitaciones de esfuerzos de servicio. El auge que tiene en puentes carreteros, se debe sobre todo a la gran versatilidad que brinda en los diseños y la reducción de dimensiones de los elementos al momento de librar el claro.

El empleo de trabes presforzadas como medio para salvar el claro, refleja la agudeza y conocimientos de la ingeniería, así como de soluciones que garantizan ahorro en costos, en tiempo de ejecución de obra y en mantenimiento de las mismas.

Por otro lado, es importante destacar que los materiales utilizados en la fabricación de dichas trabes, no limitan su aplicación en ambiente alguno.

Respecto al presfuerzo, físicamente podemos comprenderlo si alargamos una liga entre las manos y con una tercera se envuelve con fuerza, enseguida se suelta la liga y a esa sensación que se genera dentro de ella se le conoce como el principio de la técnica que nos ocupa.

Aunque la idea anterior es muy sencilla, implica una serie de desarrollos matemáticos que han permitido su empleo en ingeniería como se acota en los párrafos anteriores. Y es precisamente lo que me llamo la atención para desarrollar este trabajo, pues la idea primordial es que con la misma simpleza del aspecto físico, presente el rigor matemático que implica esta técnica en el análisis y diseño de trabes presforzadas para puentes carreteros.

Este trabajo se ha complementado con especificaciones de la normatividad vigente y por tal razón puede ser de gran apoyo para quien este interesado en el tema.

La consulta de este tema permitirá familiarizarse con la terminología relacionada con las traves presforzadas.

OBJETIVO.

Presentar la metodología empleada para el diseño de trabes presforzadas de secciones comúnmente empleadas en la construcción de puentes carreteros.

ALCANCES.

El desarrollo de este trabajo permitirá que estudiantes y profesionistas de ingeniería obtengan conocimientos teóricos respecto tanto al presfuerzo como a los puentes.

El tema en sí es interesante y pretende ser un gran apoyo para aquellos como en mi caso no conocíamos nada al respecto. Se consigue esto gracias a que la secuencia entre los capítulos nos lleva desde las definiciones más sencillas hasta el cálculo del presfuerzo que es en sí un poco más complicado y que a nivel licenciatura no se enfatiza.

En la realización de este tema se involucran consideraciones generales como primer capítulo donde encontramos; la historia del presfuerzo en México, comparativa entre concreto presforzado y reforzado, las diferentes técnicas del presfuerzo como el pretensado y el postensado, aplicación del presfuerzo en puentes y la normatividad vigente. Dentro del segundo capítulo se puntualiza en la teoría básica del presfuerzo, propiedades geométricas de las secciones, cálculo de esfuerzos y cuantificación de pérdidas de esfuerzo. En el tercer capítulo se maneja la metodología empleada para el diseño de trabes presforzadas en donde se contempla; solicitaciones estructurales, selección de la sección geométrica, determinación del presfuerzo, evaluación de esfuerzos actuantes, condiciones de servicio, secciones de interés y planos. La aplicación

de la técnica del presfuerzo se da en el capítulo cuarto, con un ejemplo que lleva de la mano al lector y de acuerdo con las unidades anteriores. Finalmente encontraremos las conclusiones a las que se llega con el proceso de esta tesis y que es una parte fundamental que permitirá de forma resumida contemplar las ventajas del uso de esta técnica utilizada en los puentes carreteros y formar un criterio ingenieril.

Además de lo anterior, este trabajo nos permite adquirir los conocimientos necesarios para poder dar un punto de vista respecto del porque utilizar el concreto presforzado en vez del concreto reforzado según sea el caso.

CAPITULO

I

SI CON UNA MIRADA VEO EN TUS OJOS, LO QUE NO SE PUEDE VER...
SI EN TUS PALABRAS ESCUCHO, LO QUE NO QUIERES DECIR...
SE ENTONCES QUE ESTOY DENTRO DE TI.

1. Consideraciones generales.

1.1 Desarrollo histórico de la técnica del presfuerzo.

El presfuerzo es una técnica muy antigua y debido a que anteriormente no se contaba con materiales de alta resistencia no fue posible su aplicación en los puentes, sino hasta el año de 1928 en Francia, E. Freyssinet, utilizó alambres de acero de alta resistencia para el presforzado.

No obstante, fue hasta finales de la segunda guerra mundial cuando la aplicación del concreto presforzado se vio impulsada precisamente hacia los puentes, por la necesidad de reconstruir numerosos de ellos que fueron destruidos en dicha guerra.

En nuestro país, la aplicación de esta tecnología es relativamente reciente y tiene sus inicios en el año de 1953 con la construcción del puente "Zaragoza" sobre el río Santa Catarina, en la ciudad de Monterrey. Cabe destacar la aportación talentosa y creativa de los ingenieros mexicanos respecto al sistema de anclaje del presfuerzo.

En 1957 se construyó el puente "río Tuxpan" sobre el acceso al puerto del mismo nombre, en el estado de Veracruz, un sistema innovador (único en su tiempo) basado en dovelas lanzadas en doble voladizo. Tiene claros tipo Gerber de 92 m de claro con articulaciones metálicas al centro de los claros.

Posteriormente, el desarrollo de la industria del presfuerzo y la prefabricación permitió el empleo cada vez mas frecuente de vigas presforzadas y prefabricadas en los puentes. Con estos elementos se evitaban las obras falsas y se reducían los tiempos de construcción. Al principio, este tipo de elementos se veía limitado en su aplicación por la falta de personal calificado y las dificultades inherentes a su transportación hacia el sitio de las obras, pero esas limitaciones fueron superadas al irse desarrollando el país.

Uno de los puentes más importantes en los que por primera vez se aplica en forma intensiva el uso de vigas prefabricadas presforzadas es el puente "río Coatzacoalcos" y que permite el paso de la carretera costera del golfo y del ferrocarril.

El uso del concreto presforzado en nuestro país se da que gracias a las altas resistencias alcanzadas tanto en el concreto como en el acero, lo que permite, por una parte, la aplicación de grandes fuerzas externas y por otra cubrir grandes claros, acortar costos y tiempos de construcción.

1.2 *¿Concreto presforzado o reforzado?*

El concreto como material de construcción siempre tendrá que trabajar conjuntamente con el acero, para constituir elementos de concreto reforzado o presforzado y mediante esta interesante dupla conseguir grandes estructuras capaces de resistir cargas mas variadas.

El concreto reforzado, es en la construcción un material de gran importancia, sin él difícilmente una obra cumple con las características deseables de funcionalidad, comodidad, etc. Sin embargo, con el surgimiento del concreto presforzado las comparaciones desde un punto de vista estructural surgen con la pregunta *¿Concreto presforzado o reforzado?*, por lo que para responderla, debemos de tomar en cuenta las particularidades de cada uno de ellos y sus efectos en la obra.

Se que en nuestro país el factor primordial que rige nuestras construcciones es el económico, de donde se desprende la primera consideraciones al momento de decidirnos por uno u otro tema; mientras en las estructuras de concreto reforzado se emplean materiales cuyas resistencias son menores¹ a las utilizadas para el concreto presforzado; si se pensara en utilizar concreto de alta resistencia para estas estructuras resultaría una sección menor siempre y cuando se llega a la resistencia requerida aunque la cantidad de acero de refuerzo aumentaría ocasionando con esto un diseño mas costoso. Los puentes construidos de concreto reforzado alcanzan claros cortos, por consiguiente a mayor cantidad de claros más elementos de apoyo, ocasionando con esto un costo mayor de obra.

Por lo que respecta al empleo del concreto presforzado en las estructuras, el acero y el concreto requeridos son de alta resistencia², logrando con esto secciones esbeltas, estéticas y de proporciones económicas y menores costos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los materiales de alta resistencia tienen un costo unitario mayor, y aunado a esto, el presfuerzo requiere materiales auxiliares, especiales, una mayor atención y supervisión tanto en el diseño como en su procedimiento constructivo.

¹ Y como consecuencias se tienen estructuras robustas y pesadas,

² Puesto que son estructuras con capacidades de cargas superiores a las del concreto reforzado y sujetas a solicitaciones que exijan mejor desempeño.

De acuerdo con lo anterior, el empleo del concreto presforzado resulta económico mientras las estructuras se construyan en serie e intervengan buenos diseñadores y trabajadores en su construcción y las plantas de presforzado cuenten con control de calidad.

En el ámbito de la seguridad es muy difícil el determinar cuando una estructura es más segura que otra, ya que la seguridad depende del diseño y cálculo, no obstante hay algo a favor del presfuerzo a diferencia del concreto reforzado: Las estructuras de concreto presforzado muestran una apreciable deflexión, permitiendo advertir y evitar accidentes, esto debido a que previo a las condiciones de servicio, estas estructuras, se someten a la acción de esfuerzos mayores y como consecuencia el concreto y el acero de las mismas, ya están probados; sin embargo esto no garantiza la seguridad de la estructura en etapa de servicio.

Otra comparativa del concreto de presfuerzo sobre el concreto reforzado es la casi nula corrosión³ en el primero: Debido a que la aparición de grietas en el concreto presforzado se produce antes de recibir las cargas de servicio⁴ y una vez aplicadas harán que estas grietas se cierren evitando así la corrosión. Mientras que en el concreto reforzado se presentan con las cargas de servicio y permanecen en la vida útil del puente.

Se tiene que destacar, que existen aplicaciones que solo son posibles gracias al empleo del presfuerzo como el caso de puentes de claros muy grandes sobre avenidas con tránsito intenso y cargas muy pesadas.

Enseguida se hace un balance de las ventajas y desventajas del concreto de presfuerzo:

Ventajas.

- Empleo de materiales de alta resistencia.
- Control de deflexiones y grietas.
- Mayor control de calidad.
- Rapidez en la construcción.
- Estructuras más eficientes y esbeltas.

³ Siempre y cuando el presfuerzo sea total y no tenga defectos de fabricación, de no ser así, la corrosión es un factor de riesgo todavía más crítico que en concreto reforzado.

⁴ Cuando la estructura se pretensa o postensa.

- Se logran claros más largos.
- Aplicaciones únicas.

Desventajas.

- Diseño y construcción especializados.
- Sensibilidad a altas temperaturas.
- Mayor inversión inicial.

1.3 Técnicas de presfuerzo.

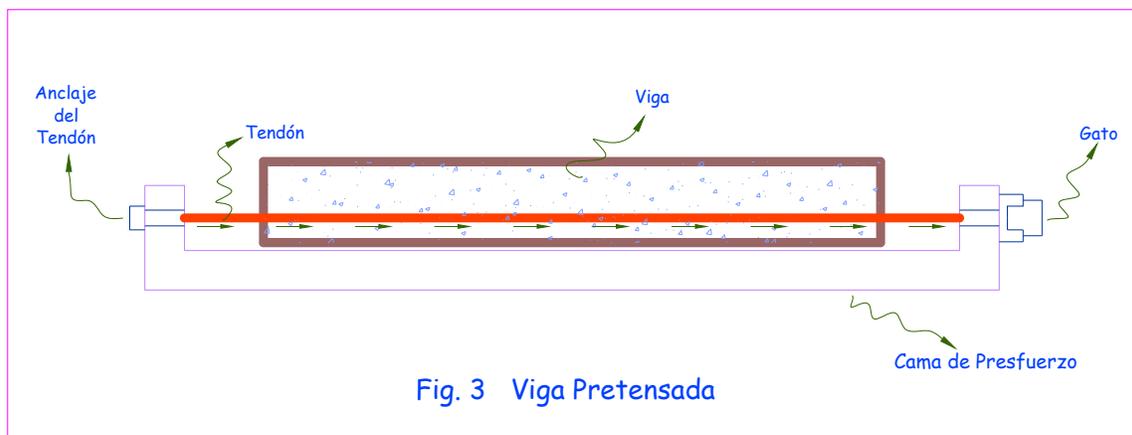
El **concreto presforzado** es una técnica que previamente induce esfuerzos internos permanentes⁵ a una estructura, con el fin de manipularlos para contrarrestar los esfuerzos producidos por las cargas de servicio, consiguiendo con esto, controlar efectos tales como grietas y deflexiones.

En el presfuerzo existen dos métodos de inducción de esfuerzos uno es el **Pretensado** y otro el **Postensado**.

Pretensado.

En este caso la transferencia de esfuerzos del acero al concreto se logra por adherencia.

El proceso de pretensado se lleva a cabo de la siguiente manera: un elemento estructural llamado cama de presfuerzo, en donde se coloca un tendón⁶ anclado a un extremo de esta y se estira por medio de un gato hidráulico que se encuentra en el otro extremo de la cama hasta un grado deseado, se coloca una cimbra con la forma de la trabe que encierra al tendón encima de la cama, se vacía el concreto de alta resistencia sobre la cimbra quedando el tendón ahogado, una vez que el concreto ha alcanzado cierta resistencia a la compresión y se ha logrado la adherencia entre tendón y concreto, se alivia la presión del gato, el tendón trata de regresar a su forma original, es cuando gracias a la adherencia con el concreto esta acción se ve impedida, dando así paso a la transferencia de esfuerzo de un material a otro.



⁵ Aunque varían en su intensidad con el tiempo.

⁶ Cable torcido con varios torones de varios alambres cada uno.

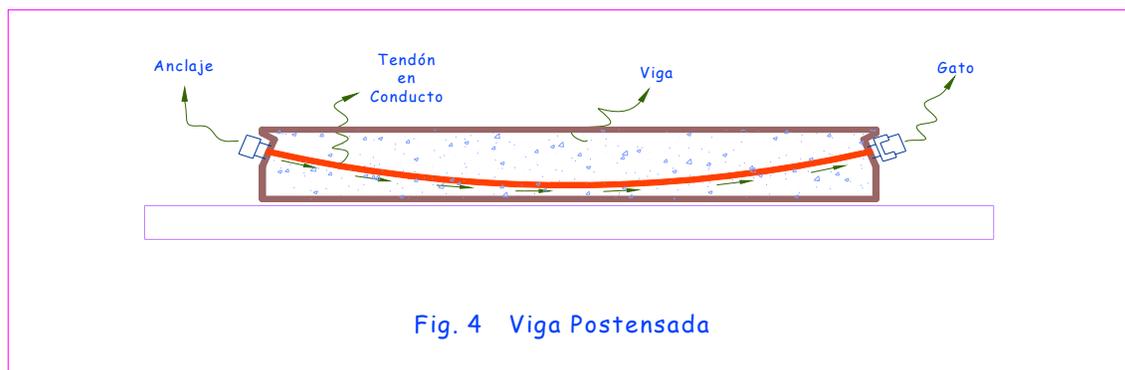
Ventajas.

- La fabricación de la viga pretensada se da en la planta.
- El anclaje se da por adherencia.
- El acero de presfuerzo tiene trayectoria recta en la mayoría de los casos, ya que resulta muy complicado darle al tendón una forma curva.⁷
- La acción del presfuerzo es interna.
- Mayor aplicación en vigas simplemente apoyadas.
- Requiere una longitud adecuada de transferencia.
- Gran parte de la contracción tiene lugar antes del montaje.
- Menor flujo plástico.⁸
- Reducción al mínimo la obra falsa.

Postensado.

En este método la transferencia de esfuerzos del acero se da por medio de anclajes que actúa contra del concreto.

Esto se logra por medio de conductos que se colocan a través de la cimbra, se vacía el concreto de alta resistencia quedando ahogados los ductos, una vez que el concreto se ha endurecido y se ha curado alcanzando con esto una resistencia requerida, se introducen tendones dentro de los ductos, las puntas del tendón quedaran ancladas a los extremos⁹ de la trabe, un extremo fijo y en el otro un dispositivo que servirá para estirar el tendón hasta un grado deseado y que impedirá que este regrese a su forma original, logrando con esto que los esfuerzos del acero se transfieran al concreto .



⁷ Se necesitaría sujetar el tendón con piezas especiales que resistan a su vez los esfuerzos aplicados al pretensado.

⁸ Debido a que el presfuerzo se aplica a mayor edad.

⁹ Estos tienen un armado que evita el estallamiento del concreto cuando se alivia el gato.

Ventajas.

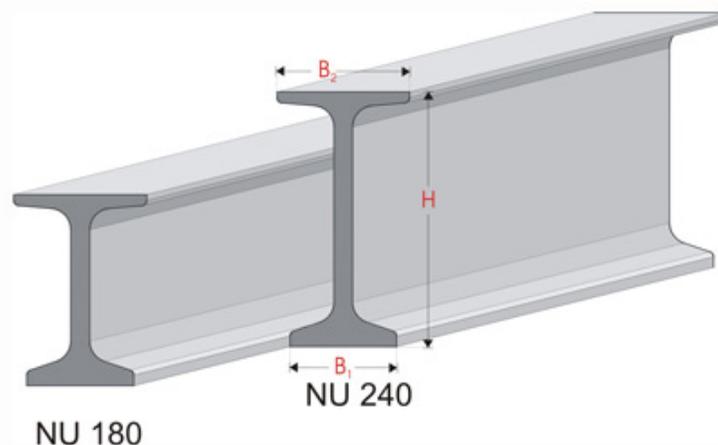
- Fabricación en planta o in-situ.
- El anclaje se da por medio de dispositivos mecánicos en contra del concreto.
- El acero de presfuerzo se da en trayectorias rectas o curvas.
- La acción del presfuerzo es externa.
- Su aplicación admite continuidad entre apoyos permitiendo con esto elementos hiperestáticos.
- Menor cantidad de juntas.
- Facilita la construcción de curvas horizontales, verticales y de transición.
- Es fácil obtener secciones transversales grandes, complejas y claros variables.

1.4 Utilización del presfuerzo en puentes carreteros.

En la construcción siempre se trabaja en contra del tiempo¹⁰, motivo por el cual se ha encontrado en el concreto presforzado un gran auxiliar que facilita el cumplimiento de plazos de ejecución de obra, con la certeza y amplia confianza que responderá a expectativas tales como económicas, de seguridad y resistencia.

El concreto presforzado por su versatilidad ha logrado ocupar un gran lugar en las diferentes construcciones¹¹. Los puentes no han sido la excepción sino por el contrario, es donde el presfuerzo ha alcanzado un mayor desarrollo de sus técnicas.

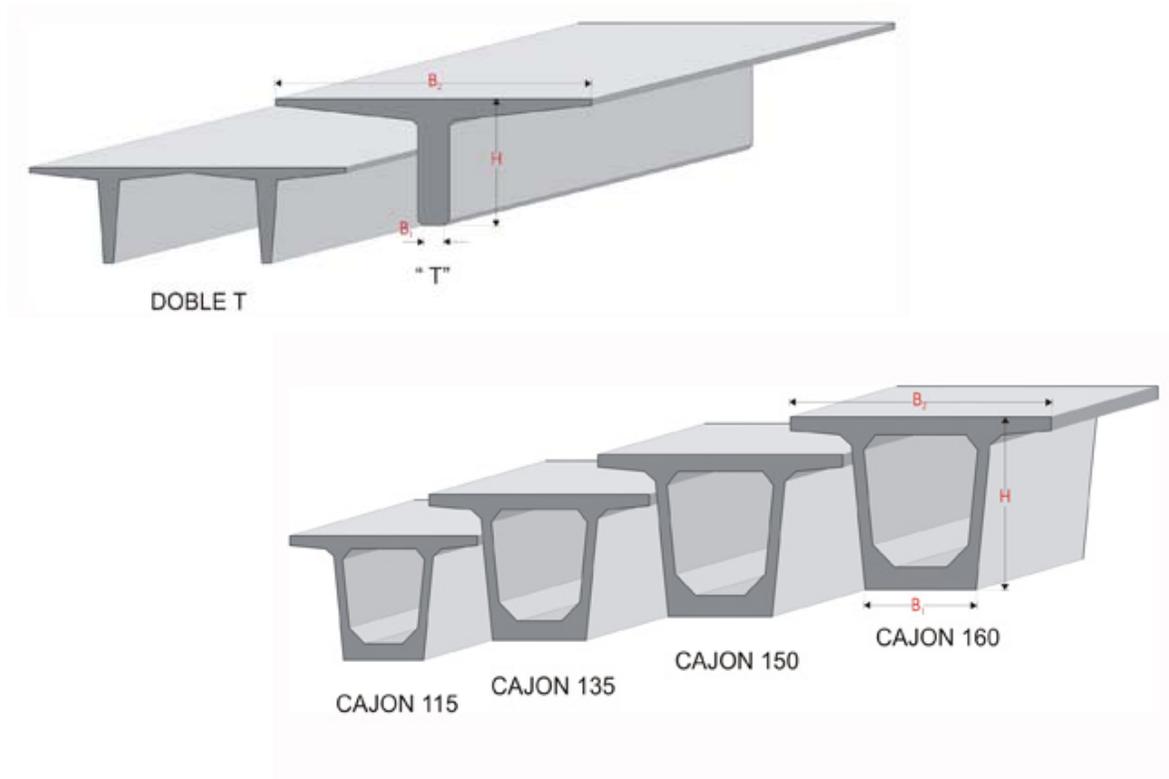
Básicamente en los puentes, el concreto presforzado se emplea en la superestructura y con menor frecuencia¹² se usa en pilas, columnas, pilotes, puntales y elementos de suspensión. Respecto a la superestructura, se utiliza en los sistemas de losa y travesaños, las primeras pueden ser planas macizas y aligeradas y las segundas *trabe T*, *trabe I*, *travesaños especiales (Nebraska, Florida)* y *vigas cajón*, por lo general son simplemente apoyadas y diseñadas para actuar en secciones compuestas. Estos cuerpos son los encargados de transferir las solicitaciones ocasionadas por cargas muertas, cargas vivas e impactos a la subestructura.



¹⁰ Principal factor que interviene en el costo de la obra.

¹¹ Edificios, losas de cimentación, pilotes, cascarones, tanques de almacenamiento, entre otros.

¹² Ya que el usar cualquier técnica del presfuerzo para elementos que se presentan en cantidades menores en los puentes no sería rentable.



El presfuerzo en puentes permite cubrir cualquier tipo de claro en múltiples ambientes naturales, como por ejemplo, lo podemos encontrar en viaductos de ciudades atestadas de tráfico o en estructuras aisladas con tránsito menor, y todo esto gracias a su diversidad, su bajo costo en serie, su poco o casi nulo mantenimiento, su gran durabilidad y las formas estéticas que logra.



1.5 Normativa en puentes.

En la construcción como en cualquier ambiente es muy importante la seguridad y nunca se podrá subordinar ante nada, de aquí la importancia de estandarizar las obras para facilitar su revisión pasando desde su planeación hasta su conservación.

En nuestro país ya sea por ubicación geográfica o por conveniencia se adoptan normas de nuestro más cercano y poderoso vecino, Estados Unidos de América quien por su economía de primer mundo siempre se encuentra a la vanguardia en todos los ámbitos, los puentes carreteros no han sido la excepción, y su construcción siempre se ha regido por especificaciones y manuales, sin embargo, con la diversidad de estos, se llegaba a confusiones de elección, por lo que se adopto solo una y que rige hasta nuestros días, las normas de la AASHTO.¹³

Las normas AASHTO han publicado un manual que engloba todas las particularidades de los puentes carreteros, con el fin de homogenizar todas sus construcciones. Las Standard Specification for Highway Bridges contienen un apartado relacionado a las vigas presforzadas tema de esta tesis.

Dichas normas y especificaciones en México han sido estudiadas por el Instituto Mexicano del Transporte en colaboración con la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, con el objetivo de ajustarlas a nuestras diferentes condiciones, por lo que todas las construcciones de puentes carreteros con elementos presforzados tendrán que regirse por las normas IMT que son extraídas de las normas AASTHO.

¹³ American Association of State Highway and Transportation Officials.

CAPITULO

II

NO ME IMPORTA PERDERTE
LO IMPORTANTE ES QUE TE TUVE Y TE PERDI...

2. Fundamentos de presfuerzo.

2.1 Teoría básica.

Para entender el comportamiento del concreto presforzado y manipular su desempeño, es necesario involucrarnos en el conocimiento de sus *materiales*, sus *esfuerzos* y su *eficiencia*.

a) *Materiales.*

En la construcción de elementos de concreto presforzado, es muy importante contar con materiales de calidad y alta resistencia, puesto que estas estructuras están sujetas a esfuerzos críticos, incluso desde su elaboración.

En el caso del *concreto*¹⁴ las resistencias que se manejan para la elaboración de elementos de concreto presforzado oscilan entre 350 a 570 Kg/cm², a diferencia del concreto usado en elementos reforzados donde las resistencias alcanzan los 250 Kg./cm² como limite. Para conseguir un concreto de alta resistencia y su comportamiento sea el esperado hay que tener mucho cuidado en la selección de los materiales que lo conforman.

Por otro lado, el *acero* empleado en los tendones resiste diferentes esfuerzos que oscilan entre 11 250 a 19 000 Kg/cm², esto se logra gracias a aleaciones de carbón, manganeso y sílice, y a métodos de fabricación que ayudan a aumentar la resistencia a la tensión del acero por medio de templados o formados en frío.

La resistencia a la ruptura del acero de alta resistencia se determina por medio de ensayos, pero usualmente se considera un valor en lo que respecta al límite elástico o punto de fluencia no es tan fácil de obtener, ya que ambos no están ni definidos.

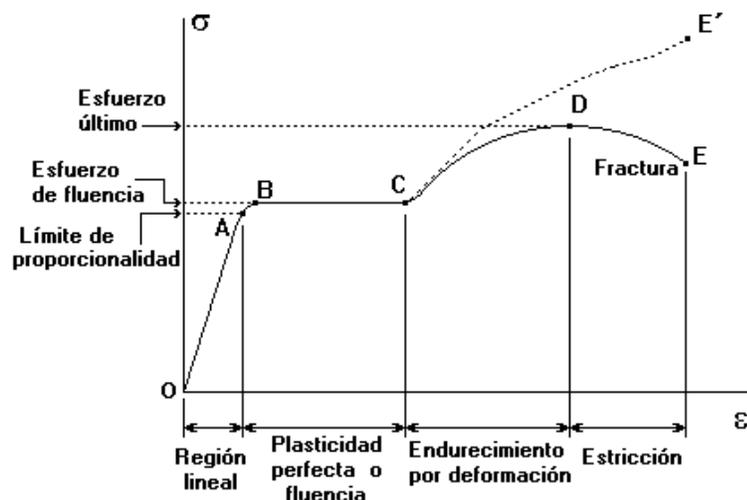
¹⁴ Material heterogéneo, Compuesto por agregados pétreos, cement Portland, agua y aditivos.

El acero que se ocupa en los elementos presforzados deben satisfacer las especificaciones de la ASTM (American Society for Testing Materials), las cuales indican: las varillas de refuerzo comunes que le dan forma a la trabe y que a su vez se aprovechan como refuerzo del alma y como refuerzo longitudinal suplementario con el fin de controlar la presencia de grietas ocasionadas por contracciones y variación de temperatura, satisfacen las especificaciones A-15, A-16, A-29, A-322, Y A-305 de la ASTM.

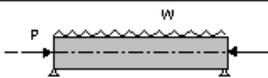
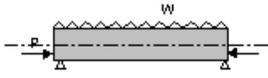
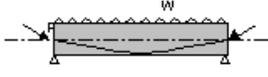
El acero que transmite un grado muy alto de esfuerzo compresivo (ver apartado 1.3) al concreto de dos maneras diferentes que parte longitudinalmente en la trabe siguiendo trayectorias tanto curvas como rectas y transfiriendo los esfuerzos de tensión del acero ocasionados intencionalmente al concreto comprimiéndolo, causando una visible contra flecha que se estabilizara cuando la trabe sea sujeta a sus condiciones de servicio, satisfacen las especificaciones; la A-421 de la ASTM para los alambres sin recubrimiento aliviado de esfuerzo para el concreto presforzado y la A-416 de la ASTM para cables sin recubrimiento de siete alambres aliviado de esfuerzos para concreto presforzado.

b) Esfuerzos.

Los esfuerzos en el presfuerzo se generan de manera intencional y deben de controlarse de acuerdo con las curvas de esfuerzo-deformación, con él propósito de asegurar el comportamiento para las condiciones de carga a las que se sujetara la estructura.



Se pretende que dichos esfuerzos sean permanentes, sin embargo no lo son, debido a la existencia de pérdidas ocasionadas por el deslizamiento del anclaje, el acortamiento elástico del concreto, la relajación instantánea del acero, la fricción entre el concreto y el acero, la contracción del concreto, el flujo plástico del concreto y por la relajación diferida del acero.

		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 =		

Obviamente, el presfuerzo aplicado a la estructura debe de absorber dichas pérdidas para conseguir así que no se presenten en el concreto deformaciones no planeadas como las elásticas, las laterales, las plásticas y por contracción, así como, las deformaciones elásticas y por relajación en el acero.

c) Eficiencia.

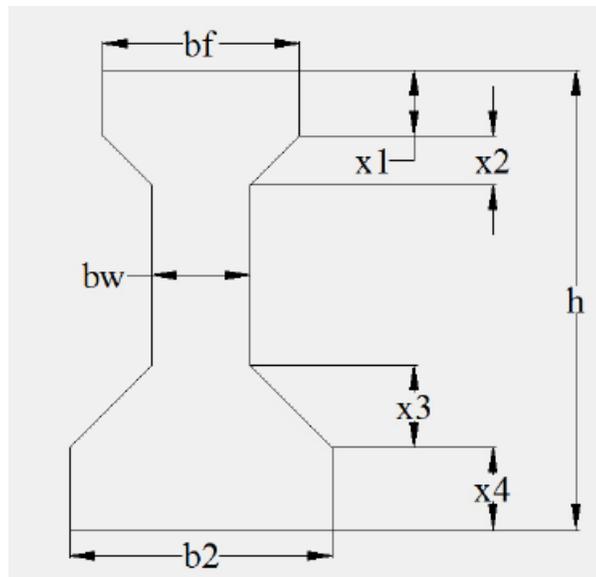
Se entiende como eficiencia en el presfuerzo, su capacidad de contrarrestar cargas externas hasta un grado deseado y esto se consigue gracias a dos factores a considerar; presforzar para mejorar el comportamiento elástico del concreto y para aumentar la resistencia última del elemento.

En el primer factor se contempla al concreto como material elástico por lo que es sometido a una tensión alta por medio del acero con el objetivo de que contrarreste esfuerzos tensionantes para lograr con esto aunado a una colocación excéntrica del presfuerzo absorber momentos que de otra manera sería imposible. La segunda característica considera la combinación del acero con el concreto como un par íntegro logrando con esto y la excentricidad del presfuerzo casi desaparecer las grietas de las estructuras provocadas por las cargas externas a diferencias del concreto reforzados.

Es decir la eficiencia del concreto presforzado se da gracias al empleo de materiales de alta calidad ocupados y dispuestos de manera tal, que faciliten el alcance de elementos de gran capacidad de carga y excelente comportamiento estructural (agrietamiento y deformaciones bajas).

2.2 Propiedades geométricas de la sección presforzada.

Las estructuras a presforzar pueden presentar formas muy variadas, sin embargo hay ya secciones tipificadas dentro de las cuales en el caso de puentes carreteros frecuentemente se usan las vigas AASHTO y de sección Cajón que tienen dimensiones estandarizadas lo que permite uniformizar y facilitar el proceso constructivo, así como el análisis y el diseño de dichas estructuras.



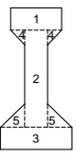
Tipo	b_f (in.)	x_1 (in.)	x_2 (in.)	b_2 (in.)	x_3 (in.)	x_4 (in.)	b_w (in.)	h (in.)
AASHTO 1	12	4	3	16	5	5	6	28
AASHTO 2	12	6	3	18	6	6	6	36
AASHTO 3	16	7	4.5	22	7.5	7	7	45
AASHTO 4	20	8	6	26	9	8	8	54
AASHTO 5	42	5	7	28	10	8	8	63
AASHTO 6	42	5	7	28	10	8	8	72

Una vez seleccionado el tipo de viga a emplear en una estructura, se revisa de acuerdo a secuencias de cálculo ampliamente documentadas, esto con la finalidad de saber si la sección será eficiente para las condiciones de trabajo a las que será sometida. Se determinan las propiedades geométricas de la Sección Simple¹⁵ y de la Sección Compuesta¹⁶.

Dentro de las propiedades Y características geométricas a determinar se encuentran; el Área de la sección transversal (A_T), la altura total de la sección transversal (h), la distancia superior e inferior al centroide de la sección (Y_s y Y_i), la inercia de la sección (I_x y I_y) y los módulos de sección superior e inferior de la sección (S_s y S_i).

Para la Sección Simple:

Determinación de Propiedades Geométricas

Croquis	Figura	b (m)	h (m)	Área (m ²)	y (m)	A*y (m ³)	d _y (m)	A*d _y ² (m ⁴)	I _o (m ⁴)
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
				sumatoria		sumatoria		sumatoria	sumatoria

$$A_t = \sum Area \quad 2.2.1.$$

$$h = \text{altura total de trabe} \quad 2.2.2.$$

$$Y_i = \sum A * y / A_t \quad 2.2.3.$$

$$Y_s = h - Y_i \quad 2.2.4.$$

$$I_x = \sum I_o + \sum A * d_y^2 \quad 2.2.5.$$

$$S_s = I_x / Y_s \quad 2.2.6.$$

$$S_i = I_x / Y_i \quad 2.2.7.$$

¹⁵ Vista transversal solo de la viga AASHTO.

¹⁶ Vista transversal de la viga AASHTO y de la parte tributaria de losa que le corresponde a cada viga.

Para la Sección Compuesta:

A) Determinación del Ancho contribuyente de losa

Se toman las siguientes consideraciones de las cuales el ancho que rige será el de menor valor:

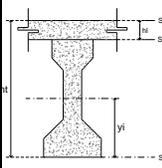
- 1).- Longitud del Claro/4
- 2).- Distancia centro a centro de trabes
- 3).- $12t + b$ $t =$ espesor de losa y $b =$ espesor de alma o almas.

B) Determinación del Ancho efectivo de losa ($b_{efectivo}$).

Esto se realiza, ya que la resistencia del concreto empleado para la fabricación de losa frecuentemente es diferente al empleado en la trabe. Por lo tanto se busca homogenizar tales resistencias mediante el artificio de sección transformada concreto a concreto en este caso. Siempre y cuando la resistencia que rija sea la de la trabe¹⁷, para lo que se ocupa la siguiente fórmula:

$$b_{efectivo} = \left(\sqrt{f'c \text{ losa}} / \sqrt{f'c \text{ trabe}} \right) * b \quad \text{2.2.8.}$$

Determinación de Propiedades Geométricas

Croquis	Figura	b (m)	h (m)	Área (m ²)	y (m)	A*y (m ³)	d _y (m)	A*d _y ² (m ⁴)	I _o (m ⁴)
	Trabe								
	Losa	$b_{efectivo}$							
				sumatoria		sumatoria		sumatoria	sumatoria

Las fórmulas para la obtención de las propiedades geométricas son exactamente las mismas que para la sección simple.

¹⁷ Si fuera el $f'c$ de la losa solo se intercambian.

2.3 Cálculo de esfuerzos

Primero es indispensable conocer las cargas que actuarán en la trabe, ya que estas nos determinaran los elementos mecánicos¹⁸ que se generaran y a partir de estos se determinaran los esfuerzos para finalmente evaluar los esfuerzos a los que estará sometida la trabe. Enseguida se presfuerza la trabe de tal manera que sobrepase los esfuerzos actuantes para estar del lado de la seguridad.

Las cargas consideradas para la determinación de los esfuerzos actuantes son:

Carga Muerta.

Se considera así a todo el peso propio de la superestructura que depende del diseño del puente y dentro de estas encontramos la debida a la trabe, a la losa, a los diafragma y a la adicional (pavimento, banquetta, guarnición, parapeto, etc).

Carga Viva (Transversal y Longitudinal).

Es toda aquella que transita por el puente y son debidas al paso de los vehículos, sus cargas y las personas. Estas cargas se encuentran tipificadas tanto en pesos por ejes de vehículos como en distancias entre ellos. Y para conocer los elementos mecánicos más críticos es necesario combinar y ubicar de manera conveniente dichas cargas a lo largo¹⁹ y ancho²⁰ del claro.

Una vez que ya se tienen los elementos mecánicos se procede a conocer los esfuerzos por medio de la siguiente formula: (+) para Compresión y (-) para Tensión.

$$f = \left[\frac{P}{A} \pm \frac{P * e}{I} y \right] \quad 2.3.1.$$

¹⁸ Cortantes (V) y Momentos (M).

¹⁹ Se conoce que el Momento Máximo se encuentra cuando la Carga Viva se ubica a una equidistancia al centro del claro y el Cortante Máximo cuando la Carga Viva se ubica en un extremo del claro.

²⁰ La carga se ubica transversalmente en la posición más crítica para conocer el factor que afectara a los elementos mecánicos.

en donde:

f = Esfuerzo en las fibras superior o inferior, en kg/cm^2 .

P = Pesos de cargas muertas y vivas, en T.

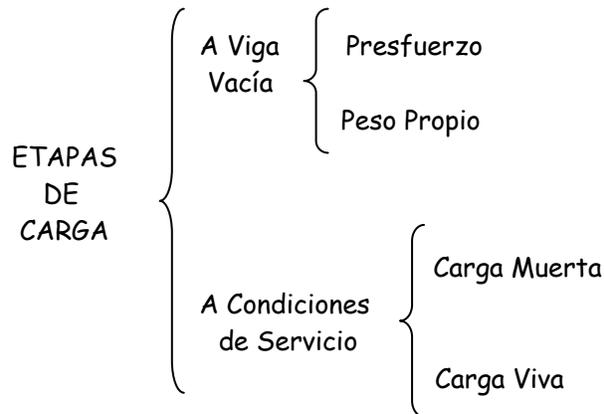
A = Área de la sección transversal simple o compuesta, en m^2 .

e = Distancia al centro de gravedad (excentricidad), en cm.

I = Momento de inercia de la sección, en m^4 .

Y = Distancia superior o inferior, en cm.

Para definir los esfuerzos a los que esta sometida la trabe, es necesario analizar la misma en sus diferentes etapas de carga, que a saber:



El término a Viga Vacía se refiere a que la trabe se encuentra en su fase primaria, es decir, cuando solo se le ha aplicado el presfuerzo. Y el de Condiciones de Servicio, es cuando actúan sobre ella todas las cargas a las que se sujetara.

2.4 Cuantificación de pérdidas de presfuerzo.

Debido a que la tensión que recibe el concreto en el presfuerzo sufre un proceso progresivo de reducción²¹, que no se puede despreciar, es importante determinar la magnitud de la fuerza del presfuerzo para cada estado de sollicitación, desde el estado de transferencia hasta estados de cargas de servicio y evitar de esta forma las deflexiones.

En esencia la pérdida de presfuerzo se agrupa en dos categorías; la primera es inmediata y se debe al acortamiento elástico del concreto, al anclaje y la fricción entre el concreto y el acero. La segunda es función del tiempo y es debida al flujo plástico y contracción del concreto, así como a los cambios de temperatura y relajación del acero.

Finalmente la pérdida total de presfuerzo se obtiene al sumar todas las pérdidas parciales de la siguiente forma:

$$PT = RET + Crc + SH + Es \quad 2.4.1.$$

en donde:

- PT = Perdida Total de Presfuerzo, en kg/cm^2
- RET = Perdida de Relajación de Esfuerzos del Acero, en Kg/cm^2
- Crc = Perdida por Flujo Plástico, en Kg/cm^2
- SH = Perdida de Presfuerzo por Contracción, en kg/cm^2
- Es = Perdida por Acortamiento Elástico, en kg/cm^2

a) Pérdida por Relajación del Acero (RET).

Se llama relajación del acero a la deformación que éste sufre como consecuencia de la acción de una carga sostenida, este fenómeno ocasiona una disminución en la magnitud de los esfuerzos generados por el hilo de presfuerzo, y se divide en dos: una instantánea (REi) y otra diferida (REd), la primera se da en el momento del tensado y la segunda se presenta a lo largo del tiempo, entonces:

$$RET = REi + REd \quad 2.4.2.$$

²¹ Que normalmente comprende un periodo de cinco años.

Para el cálculo de la pérdida de relajación instantánea se cuenta con la siguiente expresión:

$$REi = \frac{\log(t)}{10} \left(\frac{f_{pj}}{f_{py}} - 0.55 \right) f_{pj} \quad 2.4.3.$$

Para lo cual:

t = Tiempo desde el tensado del acero hasta su transferencia, en hr.

f_{pj} = Esfuerzo que presenta el tendón al final del tensado, en kg/cm^2 .

f_{py} = Esfuerzo de fluencia del acero, en kg/cm^2 .

El valor de (f_{py}) es proporcionado por el fabricante o también se puede calcular para torones aliviados de esfuerzo como: $f_{py} = 0.85f_{sr}$ y para torones de baja relajación $f_{py} = 0.9f_{sr}$ en estos últimos (REi) deberá dividirse entre 4.

Por lo que respecta al cálculo de la pérdida por relajación diferida (después de la transferencia) se emplean las siguientes expresiones:

$$REd = 1406 - 0.4Es - 0.2(SH + C_{rc}) \quad 2.4.4. \text{ Para pretensados}$$

$$REd = 1406 - 0.3FR - 0.4Es - 0.2(SH + C_{rc}) \quad 2.4.5. \text{ Para postensados}$$

en donde:

FR = Pérdida por fricción, en kg/cm^2 .

Es = Pérdida por acortamiento elástico, en kg/cm^2 .

SH = Pérdida por contracción, en kg/cm^2 .

C_{rc} = Pérdida por flujo plástico, en kg/cm^2 .

y para aceros de baja relajación se debe de usar el 25 por ciento de REd .

b) Pérdida por Flujo Plástico (C_{rc}).

Se conoce así a la pérdida en el concreto, debida a la deformación inducida por esfuerzos de cargas sostenidas durante periodos determinados, se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$C_{rc} = 12f_{cir} - 7f_{cds} \quad 2.4.6.$$

en donde:

f_{cds} = 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, en kg/cm^2 .

f_{cir} = Esfuerzo en el concreto, en kg/cm^2 .

c) Pérdida por Contracción del Concreto (SH).

La contracción por secado del concreto produce una deformación que depende de la humedad, de la temperatura, del ambiente, del tipo de materiales y se determina con ayuda de la siguiente expresión:

$$SH = \varepsilon SH_t \bullet E_{ps} \quad 2.4.7.$$

en donde:

SH = Pérdida de presfuerzo por contracción, en kg/cm^2 .

εSH_t = Contracción en el tiempo, en cm/cm .

E_{ps} = Módulo de elasticidad del acero, en kg/cm^2 .

d) Pérdida por acortamiento elástico (Es).

Es una deformación en el concreto, debida a la compresión axial que transfiere la fuerza tensionante del torón cuando esta es liberada, se manifiesta como un acortamiento longitudinal del concreto y la pérdida correspondiente a la tensión inducida. Se calcula conforme la siguiente ecuación:

$$Es = \frac{\left[\left(\frac{P}{Ac} + \frac{Pe^2}{I} - \frac{M_{sw} * e}{I} \right) \right]}{\left[\left(\frac{E_{ci}}{E_{si}} + \frac{A_s}{Ac} + \frac{A_s * e^2}{I} \right) \right]} \quad 2.4.8.$$

en donde:

E_s = Pérdida por acortamiento elástico, en kg/cm^2 .

P = Fuerza inicial de presfuerzo, en kg.

A_c = Área de la sección transversal, en cm^2 .

e = Excentricidad, en cm.

M_{sw} = Momento originado por peso propio, en kg/cm .

E_{ci} = Módulo de elasticidad del concreto al aplicarse el presfuerzo, en kg/cm^2 .

E_{si} = Módulo de elasticidad el Acero de presfuerzo, en kg/cm^2 .

A_s = Área del Acero de presfuerzo (torones), en cm .

A_c = Área de trabe, en cm .

I = Momento de inercia de la sección, en cm^4 .

CAPITULO

III

LA HONESTIDAD, RESPETO, SINCERIDAD Y HUMILDAD,
SON LOS VALORES QUE DEBE DE TENER UN SER HUMANO;
PARA LOGRAR SER UN GRAN HOMBRE...

3. Diseño del presfuerzo.

Se tendrá que tomar en cuenta que en nuestro país no existe a la fecha un reglamento que considere el análisis y diseño de puentes. Lo que si existe es una propuesta de Norma para el Reglamento del Distrito Federal que actualmente se encuentra en revisión y que es complemento a las Normas Técnicas de dicho reglamento. Por lo que es responsabilidad del Ingeniero escoger las solicitaciones y los métodos de análisis y diseño óptimos congruentes a la problemática a la que se enfrente de acuerdo con la situación nacional.

El diseño del presfuerzo considera ciertos parámetros de los cuales se parte para conocer la viabilidad del elemento en cuestión ante solicitaciones de cargas de servicio.

Motivo por el cual a continuación se presenta y desarrolla la metodología a seguir para el diseño de trabes presforzadas.

3.1 Solicitaciones estructurales

En los puentes presforzados la superestructura se diseña fundamentalmente para resistir cargas vivas vehiculares más a parte la carga muerta y la subestructura para resistir cargas accidentales como el viento y el sismo.

Las **Cargas Muertas** son las cargas permanentes, es decir todas aquellas cargas que se encontraran sobre el puente durante toda su vida útil, como el peso propio de las trabes, de la losa, de los diafragmas y de la carpeta asfáltica. Para el cálculo de los pesos de la carga muerta solo se multiplica el volumen de los elementos por su peso volumétrico, para después obtener los elementos mecánicos a los que se sujetara la estructura.

Por otro lado dentro de las cargas vivas encontramos dos tipos: la carga viva peatonal y la carga viva vehicular.

Para el cálculo de la *Carga Viva Peatonal* se toman los siguientes parámetros:

Para claros menores a 7.5 m.....415 kg/m²

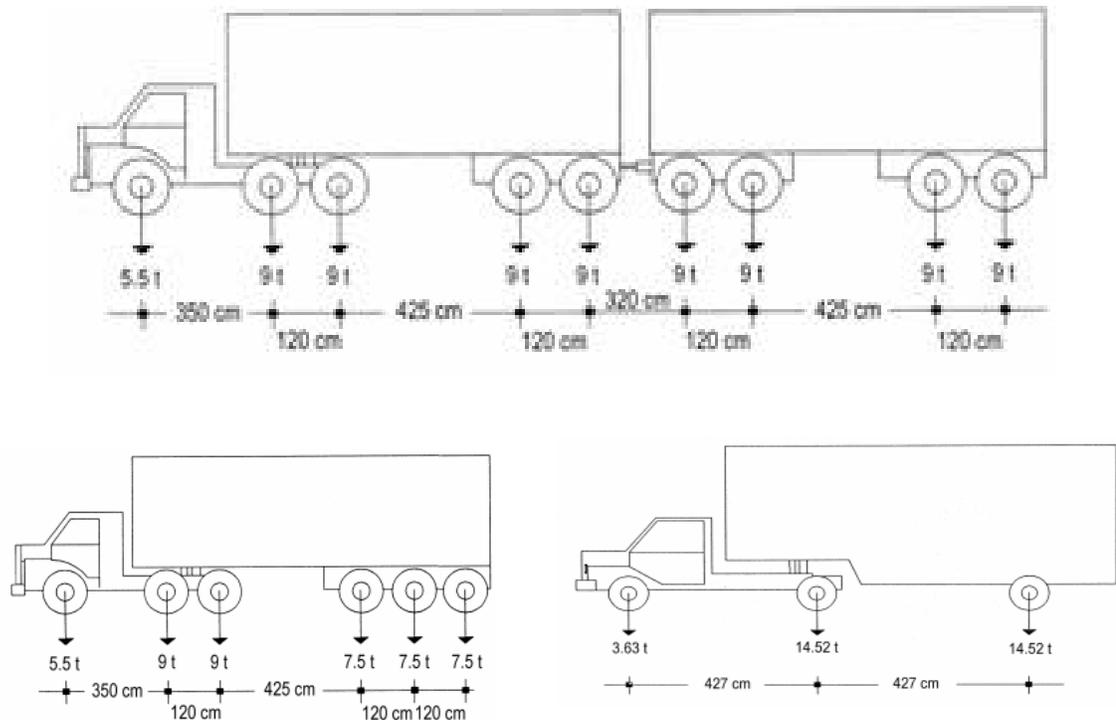
Para claros de 7.5 m hasta 30 m.....300 kg/m²

Para claros mayores a 30 m se utilizara la siguiente expresión:

$$CV = \left(1435 + \frac{43800}{L} \right) \left(\frac{16.70 - W}{149.10} \right) \quad 3.1.1.$$

Donde: CV = Carga Viva Peatonal que no será mayor a 300 kg/m²
 L = Longitud de banqueta m
 W = Ancho de Banqueta m

En el caso de la *Carga Viva Vehicular* es la SCT²² en la Ley General de Vías de Comunicación en donde se enmarcar tres sistemas de cargas para el proyecto estructural de puentes dentro de los cuales encontramos para un carril el T3-S2-R4 o el T3-S3 y la carga HS-20 en los demás carriles.



²² Secretaria de Comunicaciones y transporte.

Para el cálculo de los elementos mecánicos de la carga viva vehicular seguimos ciertas condicionantes; es decir para conocer el Cortante Máximo que genera el vehículo sobre la trabe es necesario ubicarlo en un extremo del claro, por otro lado el Momento Máximo Máximorum se obtiene ubicando el vehículo al centro del claro con una excentricidad de sus cargas definida. No hay que olvidar que la carga viva vehicular afecta transversalmente la estructura, por lo cual se obtiene un factor de carga viva transversal, el método a utilizar para esto depende del proyectista.

Las fuerzas provocadas por la carga viva se deben de incrementar para tener en cuenta la vibración y la aplicación súbita de cargas. El incremento se calcula por medio de la siguiente ecuación dada por la AASHTO.

$$I = \frac{15.24}{L + 38} \quad 3.1.2.$$

Donde: I = Factor de Impacto, no excederá del 30%
 L = Longitud del Claro, m.

3.2 Selección de la sección geométrica

Como ingenieros, siempre que se habla de un proyecto de un puente, lo primero que se nos viene a la mente es el tamaño, tanto en la altura como en el largo, ya que esto es fundamental para establecer el tipo de estructura a usar. Como tema de este trabajo nos enfocaremos a la elección del tipo de viga que es parte primordial de la superestructura de cualquier puente.

El primer factor que interviene directamente en la toma de decisión en la selección de la viga es el claro. Los puentes que se construyen en nuestro país son de claros medios, generalmente estos puentes están hechos de elementos prefabricados de concreto presforzado empleando secciones I de la AASHTO, Sección Cajón y Sección "T", sobre estas se cuela la losa de concreto reforzado que esta integrada a la trabe presforzada dando lugar así a una sección compuesta, logrando con esto aumentar sensiblemente la capacidad de la estructura.

Las trabes dentro del diseño de un puente son el elemento más importante estructuralmente hablando, de igual manera su selección. Como ya se comentó dicha selección parte del largo del claro, obviamente no hay que olvidar que esta es una preselección, y posteriormente se deberá revisar para ver si resiste los esfuerzos de servicio a los que estará solicitada. Es decir el dimensionamiento del elemento debe basarse en su comportamiento ante cargas de servicio comparando los esfuerzos permisibles con los esfuerzos actuantes, tomando en cuenta las pérdidas.

Una vez definida la sección con el presfuerzo correspondiente se tendrá que verificar diferentes condiciones de servicio y de resistencia, en donde encontramos esfuerzos en la transferencia, encamisados y deflexiones, y por otro lado el momento ultimo, cortante, y aceros mínimos y máximos.

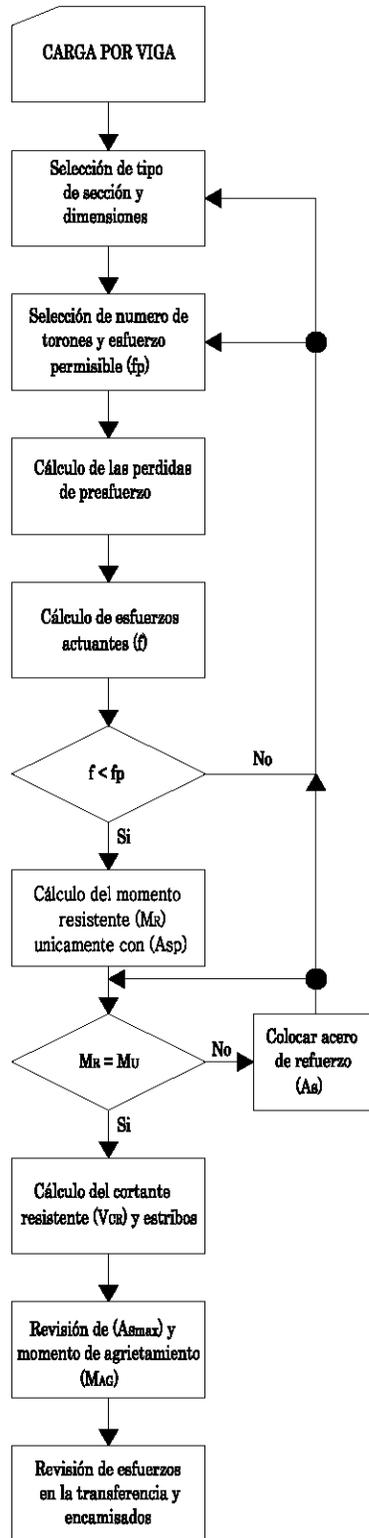


Diagrama de flujo del diseño de un elemento Preforzado.

3.3 Determinación del presfuerzo.

En el capítulo 2 se hace uso de una tabla que nos permite recopilar los diferentes esfuerzos por los que pasa la trabe desde su construcción hasta su servicio, de tal forma que nos permite visualizar de forma más sencilla y clara cuando el esfuerzo inducido contrarresta los esfuerzos provocados por la gravedad. En dicha tabla arrojaremos los esfuerzos calculados para el presfuerzo por lo que la utilizaremos en este apartado de nuevo.

Como ya sabemos el presfuerzo se induce a través del acero al concreto, lo primero que debemos hacer es ubicar en donde se colocara el acero dentro de la trabe, como no conocemos la cantidad de acero (torones) a utilizar se procede a colocar una masa de acero imaginaria para el cálculo, la cual nos permitirá conocer una cierta excentricidad del acero para después determinar una área de acero y con ella evaluar y conocer ahora si la cantidad de torones que tendrá nuestra trabe, para lo cual utilizaremos las siguientes expresiones.

Lo primero que se propone es (y') que es la distancia desde la base del patín inferior hacia el centroide del acero, con esto se podrá determinar (e) que es la distancia desde el centroide del acero hasta el centroide de la trabe, y que es dada por la siguiente expresión.

$$e = y_i - y' \quad 3.3.1.$$

Para el cálculo de (P), se utiliza la expresión de la escuadria de donde se despeja.

$$Sf_i = \frac{P}{A} + \frac{Pe}{S_i} \quad 3.3.2.$$

Despejando:

$$P = \left[\frac{Sf_i}{\frac{1}{A} + \frac{e}{S_i}} \right] \quad 3.3.3.$$

Ahora se procede a conocer el área de acero con la siguiente expresión.

$$A_{sp} = \frac{P * 10^3}{0.6.f_y} \quad 3.3.4.$$

El tamaño comercial de los torones es de $\frac{1}{2}$ " y cuenta con un área de:

$$a = 0.9871 \text{cm}^2 \quad 3.3.5.$$

De donde obtenemos en # de torones a usar:

$$\# \text{Torones} = \frac{A_{sp}}{a} \quad 3.3.6.$$

Una vez que se ha calculado la cantidad de acero (torones) se acomodan dentro de la trabe sobre el patín inferior, es lógico que haya varias camas por la cantidad de torones a colocar, por lo que se tendrá que recalcular (y') y esto para conocer ahora si la verdadera (e) excentricidad del acero, que a su vez nos servirá para revisar si dichos torones contrarrestan los esfuerzos provocados por las cargas de servicio.

La expresión que se utilizara para obtener (P) será la siguiente:

$$P = \left[\left(\frac{\# \text{Tor}}{a} \right) (0.6.f_y) \right] \quad 3.3.7.$$

Se encontrara el esfuerzo (f_i) que soportan los torones y necesariamente este tendrá que ser mayor que ($S_f i$).

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe}{S} \quad 3.3.8.$$

De donde encontramos que para la Tensión (-) y para la Compresión (+).

$$f_s = \frac{P}{A} - \frac{Pe}{S_s} \quad \gamma \quad f_i = \frac{P}{A} + \frac{Pe}{S_i}$$

Es a este nivel es cuando nos damos cuenta si aumentamos la cantidad²³ de torones o no, siempre y cuando se cumpla con la condición de:

$$f_i > S f_i \quad 3.3.9.$$

Si no se llegara a esta condición se tendrá que recalcular desde la excentricidad del acero y verificar de nuevo los esfuerzos hasta que pasen por dicha condición.

Donde:

y' = Distancia de base de patín inferior a centroide de acero, en m.

y_i = Distancia de base de patín inferior al centro de trabe, en m.

e = Excentricidad del acero, en m.

P = Peso del acero, en t.

$S f_i$ = Esfuerzo en condiciones de servicio, en t/m².

A = Área de la sección, en m².

S_i = Modulo de inercia inferior, en m³.

A_{sp} = Área de acero de presfuerzo, en cm².

f_y = Resistencia de acero de presfuerzo, en kg/cm².

a = Área por torón, en cm².

f_i = Esfuerzo del presfuerzo, en t/m².

²³ Se recomienda aumentar el número de torones en pares.

3.4 Evaluación de esfuerzos actuantes

El acero de presfuerzo soporta ciertos esfuerzos solo que no se puede diseñar y analizar al límite, ya que no tendríamos ningún colchón de seguridad, por lo que dicha resistencia se vera disminuida a un 25 %, así mismo se tendrá que contemplar las perdidas de esfuerzo a las que el acero se ve afectado.

Lo anterior es más entendible con la siguiente expresión que nos ayudaran a revisar los esfuerzos.

$$P_i = (\#Tor)(a)(f_{yi} - RET - ES) \quad 3.4.1.$$

Una vez conocido el valor de P_i lo utilizaremos para conocer los esfuerzos que se presentan tanto en la fibra superior (tensión) como en la inferior (compresión) con la siguiente expresión.

$$f = \left(\frac{P}{A}\right) \pm \left(\frac{Pe}{S}\right) \pm \left(\frac{M_{ppt}}{S}\right) \quad 3.4.2.$$

Esto nos permitirá conocer si la trabe de concreto los soportara, de donde se establece la siguiente condición.

$$f_i < 0.6f'_c \quad 3.4.3.$$

Para ayudar y restar esfuerzo a la trabe de concreto se calcularan longitudes de desadherencia de los torones, una vez desadheridos se revisaran de nuevo los esfuerzos. Los torones ya no son necesarios a una distancia (x) medida a partir del eje de apoyos para una viga simplemente apoyada.

$$x = \frac{L}{2} - \sqrt{\frac{n}{N} \left(\frac{L}{2}\right)} \quad 3.4.4.$$

$$Le = 50F$$

La desadherencia de los torones se da en grupos para lo cual utilizamos la siguiente expresión.

$$n = \frac{N - T_{cor}}{5} \quad 3.4.5.$$

Una vez que ya se desadherieron cierto numero de torones se vuelven a revisar los esfuerzos, donde el calculo se realizara solo con los torones restantes, para lo cual nos ayudamos de las siguientes expresiones.

$$M = \left[1 - \left(\frac{\frac{L-x}{2}}{\frac{L}{2}} \right)^2 \right] M_{cc} \quad 3.4.6.$$

Este valor del momento flexionante se multiplicara por los diferentes esfuerzos que ocurren en las diferentes etapas de la trabe.

Ahora se conocerá la carga de servicio.

$$P = (N - n)(a)(0.75 f_y - (PT + RET)) \quad 3.4.7.$$

Con lo anterior se lograran saber los esfuerzos actuantes a los que se vera sometida la trabe y deberá de cumplir con la siguiente condicionante:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe}{S} \quad 3.4.8.$$

$$f < 0.6 f'c$$

*La desadherencia de los torones continuara hasta que la combinación de los esfuerzos estén dentro de los parámetros pertinentes para cumplir con las condiciones de servicio que marca la AASTHO.

Donde:

P_i = Peso de torón involucrando pérdidas, en t-m.

f_{yi} = Resistencia de acero de presfuerzo menos un 25%, en kg/cm^2 .

RET = Pérdida por relajación del acero de presfuerzo, en kg/cm^2 .

ES = Pérdida por acortamiento elástico, en kg/cm^2 .

M_{ppt} = Momento del peso propio de trabe, en t-m.

f_i = Esfuerzo fibra inferior de trabe, en t/m^2 .

f'_c = Resistencia del concreto, en kg/cm^2 .

x = Distancia en que los torones no son necesarios, en m.

L_e = Longitud de desadherencia, en cm.

L = Claro de la trabe, en m.

F = Diámetro del torón, en cm.

N = Número total de torones, en pza.

n = Número de torones desadheridos, en pza.

T_{cor} = Número de torones corridos, en pza.

M = Momento flexionante, en t-m.

M_{cc} = Momento al centro del claro, en t-m.

P = Carga de servicio, en t.

PT = Pérdidas totales, en kg/cm^2 .

3.5 Condiciones de servicio

Como es conocido una construcción debe tener ciertas características dentro de las cuales encontramos:

La seguridad; es de suma importancia que una estructura note confiabilidad para sus usuarios ya que esto va hacer determinante para su uso.

La economía; obviamente no se debe de confundir lo económico con la baja calidad ya sea de los materiales o del procedimiento constructivo.

La factibilidad; toda construcción busca un interés global que beneficie a gran escala varios sectores, por lo que de nada serviría una mala ubicación y diseño de la obra.

Todo lo anterior mencionado tendrá que interactúan para lograr el objetivo del proyecto.

Con lo que respecta a las trabes presforzadas tema de este trabajo, dichas características deberán de prevalecer.

Durante el proceso constructivo y la vida útil de la trabe se presentaran deflexiones y grietas, estas se ocasionaran bajo cargas de servicio criticas que por ningún motivo deberán de rebasar los valores que en cada caso se consideren aceptables.

En un miembro presforzado al aplicar la fuerza presforzante produce una flecha hacia arriba, el efecto de las perdidas y cargas de servicio reduce gradualmente la fuerza inicial, provocando con esto deflexiones, se dice que en el presfuerzo no existen y esto se debe no a que no se presentan sino a que se controlan de tal forma que no son mayores al presfuerzo y no son visibles en la trabe.

Por otro lado las grietas se suelen presentar como síntomas de esfuerzos flexionantes y cortantes excesivos sobre la trabe, no se pueden evitar por el contrario nos sirven para darnos cuenta del comportamiento del puente.

El gran problema de las grietas es que sirven de guía para la filtración del agua, ocasionando con esto la corrosión y expansión del acero. Para evitar esto las grietas se llegan a calafatear o sellar.

3.6 Secciones de interés

Toda estructura una vez que se encuentra en su estado de trabajo, presenta deformaciones a consecuencia de esfuerzos inducidos por las diferentes cargas a las que esta sometida.

Se dice común mente que todos tenemos un punto débil. En el caso de las trabes presforzadas no es que se encuentren puntos débiles entre ellas si no que a lo largo de ellas existen secciones que nos indican como esta trabajando y a que magnitud, todo esto y con la experiencia en campo de diferentes inspecciones a distintos puentes nos hemos dado cuenta que trabes trabajan mas dependiendo de su ubicación en el puente.

Es decir, la ubicación dentro del puente es más desfavorable para las trabes extremas que para las centrales, también por otro lado si nos enfocamos a lo largo de las trabes las secciones que presentan indicadores de cómo y de que forma se están presentando los esfuerzos son los extremos y el centro del claro.

La única forma de percatarnos físicamente de lo anterior mencionado es por medio de grietas o fisuras que se manifiestan sobre la trabe, en la sección de los extremos de la trabe se presentaran grietas por esfuerzos cortantes con características bien definidas como son: grietas diagonales a 45 grados que parten de la base del patín inferior hacia el patín superior en dirección del apoyo al centro del claro, el espesor como la longitud esta en función de la intensidad de los esfuerzos. Por otro lado en la sección del centro del claro las grietas que se presentan corresponden a esfuerzos flexionantes y sus características particulares son las siguientes: grietas a 90 grados que parten del patín inferior hacia el patín superior, sus dimensiones se dan en función de la magnitud de los esfuerzos, permitiendo con esto evaluar la dimensión de los daños por esfuerzos cortantes y flexionantes.

CAPITULO

IV

SI CON EL PASO DE LOS AÑOS, NOS DAMOS LA ESPALDA,
NO TE PREOCUPES, ACELERA EL PASO QUE FALTARA MENOS,
PARA QUE ESTES ENFRENTA DE MI..

4. Caso de estudio: "Puente San Lorenzo."

Debido a la necesidad de conectar los Estados de Coahuila y Nuevo León mediante una vía carretera denominada Camino rural Paredón - Icamole con Origen en Paredón, Coah., la cual disminuya considerablemente el tiempo de recorrido de una gran cantidad de vehículos pesados; nos encontramos que dicho trazo en el tramo Paredón - Icamole, cruza el río "San Lorenzo" en el kilometro 1 + 440, donde inevitablemente se tendrá que salvar el cruce a través de un puente.



Para tal efecto se realizaron los estudios Geológico, Topo hidráulicos, Hidrológicos y de Transito y tomando en cuenta las recomendaciones y conclusiones de cada uno de ellos, el paso que sigue es el diseño de los elementos estructurales del puente, pero en este trabajo solo nos enfocaremos al diseño y análisis de las traveses presforzadas.

Datos Generales para Diseño de Trabe Presforzada

Propiedades del Puente

Longitud Total por claro	25.600 m.
Claro	25.000 m.
No. de Claros	4.000
Ancho Total	8.000 m.
Ancho de Calzada	7.200 m.
No. de Carriles	2.000
Tipo de Pavimento	Asfalto
Peso Volumétrico del Pavimento	2.200 ton./m. ³
Ancho de Pavimento	7.200 m.
*Espesor del Pavimento	0.120 m.
No. de Banquetas	0.000
Ancho de Banqueta	0.000 m.
Peso de Banqueta por @ m. l.	0.000 ton./m.
No. de Guarniciones	2.000
Ancho de Guarnición	0.400 m.
Peso de Guarnicion por @ m. l.	0.300 kg
No. de Parapetos	2.000
Peso de Parapeto por @ m. l.	0.250 ton./m.
Carga Viva Peatonal	0.000 ton./m. ²
Tipo de Carga Viva Vehicular	T3-S3 + HS-20

Losa

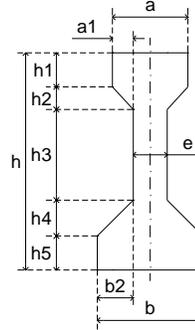
Espesor de Losa	0.200 m
Ancho Efectivo entre trabes	1.700 m
Concreto f'c	250.000 kg./cm ²
Acero de Refuerzo fy	4200.000 kg./cm ²
Acero de Refuerzo fs	2100.000 kg./cm ²

En base a las características anteriores se llegó a la conclusión de utilizar el siguiente tipo de trabe.

TRABE

Tipo de Trabe AASHTO IV

Nb. de Trabes	5.000
Separación entre Trabes	1.700 m
a	0.500 m
a1	0.150 m
b	0.660 m
b2	0.230 m
e	0.200 m
h	1.350 m
h1	0.200 m
h2	0.150 m
h3	0.570 m
h4	0.230 m
h5	0.200 m



Concreto $f'c$	350.000	kg./cm ²
Acero de Refuerzo f_y	4200.000	kg./cm ²
Acero de Refuerzo f_s	2000.000	kg./cm ²
Acero de Preesfuerzo f_y	19000.000	kg./cm ²

Determinación de Propiedades Geométricas

Croquis	Figura	b (m.)	h (m.)	Área (m. ²)	y (m.)	A*y (m. ³)	d _y (m.)	A*d _y ² (m. ⁴)	I ₀ (m. ⁴)
	1	0.500	0.200	0.1000	1.250	0.1250	0.6351	0.040339	0.000333
	2	0.200	0.950	0.1900	0.675	0.1283	0.0601	0.000687	0.014290
	3	0.660	0.200	0.1320	0.100	0.0132	-0.5149	0.034992	0.000440
	4	0.150	0.150	0.0225	1.100	0.0248	0.4851	0.005295	0.000014
	5	0.230	0.230	0.0529	0.277	0.0146	-0.3382	0.006051	0.000078
		0.4974				0.3058		0.087364	0.015155

Propiedades Geométricas Para la Sección Simple			
Área=	0.4974	h=	1.3500 m
		y _s =	0.7351 m
		y _i =	0.6149 m
		I _x =I ₀ +A*d _y ² =	0.1025 m ⁴
		S _s =	0.1395 m ³
		S _i =	0.1667 m ³

Determinando Ancho Contribuyente de Losa

$$L = 25.00m$$

$$L/4 = 6.25m$$

$$d = c.a.c. = 1.70m$$

$$12t + b' = 2.60m$$

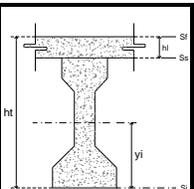
*Nota: El ancho que rige será el menor a 1.80 m.

Determinando Ancho Efectivo de Losa

$$b_{real} = 1.437m$$

Este ancho efectivo de losa nos servirá para definir la sección compuesta.

Determinación de Propiedades Geométricas

Croquis	Figura	b (m.)	h (m.)	Área (m. ²)	y (m.)	A*y (m. ³)	d _y (m.)	A*d _y ² (m. ⁴)	I _o (m. ⁴)
	Losa	1.437	0.200	0.2874	1.450	0.4167	0.5293	0.080514	0.000958
	Trabe	-	-	0.4974	0.615	0.3058	-0.3058	0.046514	0.102519
				0.7848			0.7225		0.127027

Propiedades Geométricas Para la Sección Compuesta			
Área=	0.7848	h _f =	1.5500 m
		y _s =	0.4293 m
		y _i =	0.9207 m
		I _x =I _o +A*d _y ² =	0.2305 m ⁴
		S _s =	0.5369 m ³
		S _i =	0.2504 m ³

Donde:

h = Altura de la sección, en m.

Y_s = Distancia superior al centroide de la sección, en m.

Y_i = Distancia inferior al centroide de la sección, en m.

I_x = Inercia de la sección, en m⁴

S_s = Módulo de inercia superior, en m³

S_i = Módulo de inercia inferior, en m³

Análisis de Carga Muerta y Viva Por Trabe

Carga Muerta

Trabe

$w=$	1.194	ton./m.	(Peso Propio)
$V_{max}=$	14.922	ton.	
$M_{max}=$	93.263	ton. m.	

Losa

$w=$	0.816	ton./m.	(Peso Propio)
$V_{max}=$	10.200	ton.	
$M_{max}=$	63.750	ton. m.	

Diafragma

área=	1.590	m ²	
$p=$	1.145	ton.	
$V_{max}=$	0.572	ton.	
$M_{max}=$	7.153	ton. m.	

Carga Muerta Adicional

Pavimento=	1.901	ton./m.	
Banqueta=	0	ton./m.	
Guarnición=	1.440	ton./m.	
Parapeto=	0.500	ton./m.	
$w_{c.m.a.}=$	3.841	ton./m.	(total)
$w_{c.m.a.}=$	0.768	ton./m.	(por @ trabe)
$V_{max}=$	9.602	ton.	
$M_{max}=$	60.013	ton. m.	

Carga Viva (T3-S3 +HS-20)

$V_{max}=$	68.210	ton.
$M_{max}=$	395.306	ton. m.

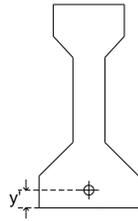
Elementos Mecánicos por Trabes afectado por los respectivos factores de distribución transversal e impacto

$V_{max}=$	24.295	ton.
$M_{max}=$	140.800	ton. m.

Determinación de los esfuerzos actuantes.

Concepto	Esfuerzos (ton./m. ²)		Combinación	
	f _s	f _i	f _s	f _i
Preesfuerzo	-530.38	1856.17		
Peso Propio Trabe	668.76	-559.35	138.38	1296.82
Losa y Diafragma	508.42	-425.25	646.80	871.57
C. M. Adicional	111.78	-239.70	758.58	631.87
Carga Móvil	262.25	-562.38	1020.83	69.50
		-1786.68		

Calculando la excentricidad del acero de Preesfuerzo



Proponiendo y'

$$y' = 0.100 \text{ m}$$

$$e = 0.515$$

$$P = -350.44 \text{ ton./m.}^2$$

$$A_{\text{preesfuerzo}} = 30.74 \text{ cm}^2$$

Tamaño Comercial de Torones

$$F = 1.2700 \text{ cm}$$

$$a = 0.9871 \text{ cm}^2$$

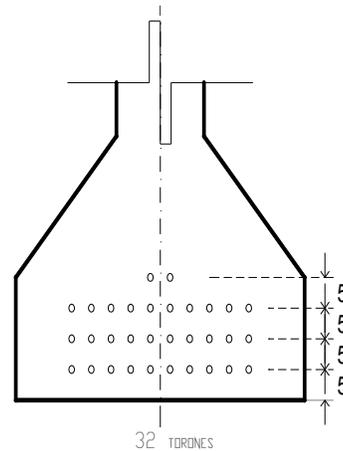
$$\# \text{ de Torones} = 31.1418$$

$$\text{Aproximadamente} = 32 \text{ torones}$$

$$y'_{32 \text{ torones}} = 13.750 \text{ cm.}$$

$$e = 0.477 \text{ cm}$$

$$P = 360.094 \text{ ton.}$$



Esfuerzos por preesfuerzo.

$$f_s = -508.672$$

$$f_i = 1754.928 < -1786.678$$

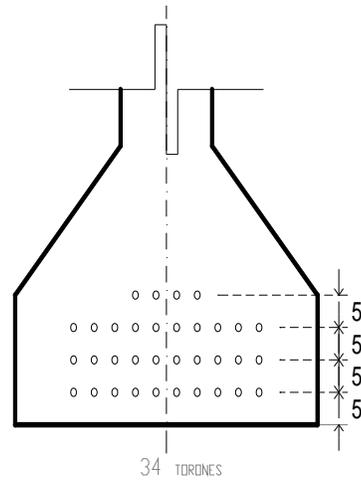
$$f_i < S f_i$$

Por lo tanto es necesario aumentar área de preesfuerzo.

Nbta.- Se propone colocar dos tornes mas.



$$\begin{aligned} \#_{\text{de torones}} &= 34 \\ y'_{34 \text{ torones}} &= 14.118 \text{ cm.} \\ e &= 0.474 \text{ cm} \\ P &= 382.600 \text{ ton.} \end{aligned}$$



Esfuerzos por preesfuerzo.

$$\begin{aligned} f_s &= -530.38 \\ f_i &= 1856.17 > -1786.678 \end{aligned}$$

Por lo tanto se acepta área de preesfuerzo.

Calculo de las Perdidas

Perdidas en la Transferencia:

a) Relajacion del Acero de Preesfuerzo (R.E.T.) .

$t_1=$	1/24	dias
$t_2=$	3/4	dias
$f_{pu}=$	19000	kg./cm ²
$f_{st}=$	0.75*f _{pu}	
$f_{py}=$	0.90*f _{pu}	
$f_{st}=$	14250	kg./cm ²
$f_{py}=$	17100	kg./cm ²

$$R.E.T.= f_{st} \{ [\log 24 t_2 - \log 24 t_1] / 45 \} - [(f_{st}/f_{py}) - 0.55]$$

$$((f_{st}/f_{py}) - 0.55) \geq 0.05$$

$((f_{st}/f_{py}) - 0.55) = 0.2833 > 0.05$ se calcula segun formula
R.E.T. = 112.63

b) Acortamiento Elastico

$$E_s = (E_s/E_{ci}) * f_{cir}$$

$$E_s = \frac{\frac{P}{A_c} + \frac{Pe^2}{I} - \frac{M_{sw}}{I} e}{\frac{E_{ci}}{E_s} + \frac{A_s}{A_c} + \frac{A_s}{I} e^2}$$

P=	474470.07	kg.
A _c =	4974.00	cm ²
A _s =	33.56	cm ²
I=	10251890.03	cm ⁴
e=	47.37	cm
M _{sw} =	9326250	kg./cm ²
E _s =	1968587.00	kg./cm ²
f' c _i =	315.00	kg./cm ²
f' c _i =	4480.37	Psi.
w=	2400.00	kg./cm ³
w=	150.00	lb./ft. ³
E _{ci} =	4057960.52	Psi.
E _{ci} =	285301.72	Kg./cm ²

$E_s =$ 981.9 Kg./cm.²
 13966.3 Psi

$Per =$ 1094.55 Kg./cm.²
 7.7 %

Perdidas Finales:

a) Contracción del Concreto:

$$S_{TF} = 17000 - 150(R_{TF}) \quad \text{Psi.}$$

$$R_{TF} = 75$$

$$S_{TF} = 5750 \quad \text{Psi.}$$

$$404.24 \quad \text{Kg./cm.}^2$$

b) Flujo Plástico del Concreto

$$C_{rc} = 12f_{cir} - 7f_{c ds}$$

$$P_i = 441515.35 \quad \text{kg.}$$

$$P_i / A_c = 88.76 \quad \text{Kg./cm}^2$$

$$\frac{P_i * e^2}{I} = 96.63 \quad \text{Kg./cm}^2$$

$$\frac{M_{sw} * e}{I} = 43.09 \quad \text{Kg./cm}^2$$

$$f_{cir} = 142.31 \quad \text{Kg./cm}^2$$

$$f_{c ds} = \frac{M_{ld} * e}{I_{ss}} + \frac{M_{cma} * e_{sc}}{I_{sc}}$$

$$e_{sc} = y_i - y_y$$

$$e_{sc} = 77.95 \quad \text{cm}$$

$$f_{c ds} = 53.06 \quad \text{Kg./cm}^2$$

$$C_{rc} = 1336.30 \quad \text{Kg./cm.}^2$$

$$19006.74 \quad \text{Psi}$$

c) Relajacion del acero a largo plazo.

$$Crs = 5000 - 0.1Es - 0.05(SH + Crs)$$

$$\begin{array}{l} Crs = \quad 2632.82 \quad Psi \\ \quad \quad 185.105 \quad Kg./cm.^2 \end{array}$$

Perdidas Totales

$$P.T. = SH + Crs + Crs + Es$$

$$P.T. = \quad 2907.57 \quad Kg./cm.^2$$

Como Porcentaje

$$\quad \quad 20.40 \quad \%$$

Revisión de Esfuerzos

Se revisaran los esfuerzos temporales al momento de aplicar el preesfuerzo

#TORONES=	34	
α_{TORON} =	0.9871	cm. ²
f_{yi} =	$0.75f_{yTORONES}$	
f_{yi} =	14250	Kg./cm. ²
RET=	112.63	Kg./cm. ²
ES=	981.92	Kg./cm. ²

$$P_i = \#_{TORONES} * \alpha_{TORON} * (f_{yi} - RET - ES) / 10^3$$

P_i =	441.52	tn.
$M_{P.PROPIO TRABE}$ =	93.26	tn. m.
e =	0.477	m.
A =	0.497	m. ²
SS =	0.139	m. ³
SI =	0.167	m. ³

Esfuerzos Iniciales

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{P \cdot e}{S} \pm \frac{M_{P.PROPIO}}{S}$$

f_S =	45.07 tn./m. ²	
f_I =	1592.38 tn./m. ²	< $0.6f'_c = 2100 \text{ tn./m.}^2$

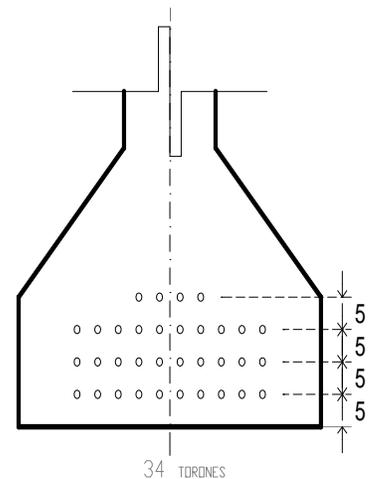
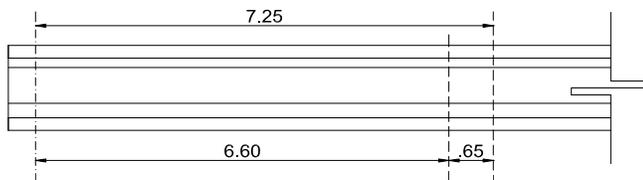
Calculo de longitudes de desadherencias

$$x = \frac{L}{2} - \sqrt{\frac{n}{N} \cdot \frac{L}{2}}$$

L=	25	m
N=	34	torones
T _{CORRIDOS} =	12	torones corridos #4 de 6 torones
n=	6	torones por desadherir

Para 6 torones #1 y #2 desadheridos

x=	7.25	m.
L. ADHERENCIA DE TORONES=	50 ϕ	
L. ADHERENCIA DE TORONES=	63.5	≈ 65 cm.



Revisión de Esfuerzos

$$M = \left[1 - \left(\frac{\frac{L}{2} - x}{\frac{L}{2}} \right)^2 \right] M_{c.c.}$$

M= 0.824 *M.C.C.

Centroide de Torones

y= 6.18 cm

Excentricidad

e= 0.553 m.

P_{SERVICIO}= 310.378 tn.

f_S= -607.00 tn./m.²

f_I= 1653.62 tn./m.² < 0.6f'_c=2100 tn./m.²

Concepto	Esfuerzos (ton./m.2)		Combinación	
	fs	fi	fs	fi
Preesfuerzo	-607.00	1653.62		
Peso Propio Trabe	550.74	-460.64	-56.26	1192.98
Losa y Diafragma	418.70	-350.21	362.44	842.77
C. M. Adicional	92.05	-197.40	454.49	645.37
Carga Móvil	215.97	-463.13	670.47	182.24

Para 6 torones #1 y 2 desadheridos

$$x = 7.25 \text{ m.}$$

Revisión de Esfuerzos

$$M = \left[1 - \left(\frac{\frac{L}{2} - x}{\frac{L}{2}} \right)^2 \right] M_{c.c.}$$

$$M = 0.824 \text{ *MC.C.}$$

Centroide de Torones

$$y = 5.294 \text{ cm}$$

Excentricidad

$$e = 0.562 \text{ m.}$$

$$P_{SERVICIO} = 310.378 \text{ tn.}$$

$$fS = -626.64 \text{ tn./m.}^2$$

$$fI = 1670.05 \text{ tn./m}^2 < 0.6f'_c = 2100 \text{ tn./m.}^2$$

TRABES PRESFORZADAS PARA PUENTES CARRETEROS

Concepto	Esfuerzos (ton./m.2)		Combinación	
	fs	fi	fs	fi
Preesfuerzo	-626.64	1670.05		
Peso Propio Trabe	550.74	-460.64	-75.90	1209.40
Losa y Diafragma	418.70	-350.21	342.80	859.20
C. M. Adicional	92.05	-197.40	434.86	661.80
Carga Móvil	215.97	-463.13	650.83	198.66

Nota:

- tensión
- + compresión

Compresiones en la columna de esfuerzos combinados

CONCLUSIONES

AQUEL QUE LOGRA REALIZAR UN SUEÑO,
REFLEJA LA GRANDEZA DE UN HOMBRE...

5. Conclusiones.

A. Las trabes presforzadas:

- Como alternativa de solución en los puentes carreteros son idóneas; esto debido a que los materiales empleados para su construcción alcanzan altas resistencias, se logra controlar previamente las deflexiones ocasionadas por cargas de servicio, durante su construcción se obtiene un mayor control de calidad, se reducen los tiempos de ejecución de obra considerablemente, sus formas son muy esbeltas y no por ello pierden resistencia.
- Alcanzan claros entre 8 y 40 m, gracias a los diferentes tipos y formas en las que se adecuan.
- Si bien es cierto que las trabes presforzadas son desarrolladas para garantizar que soporten los esfuerzos de servicio, no hay que descuidar y a su vez contemplar que habrá que manejar ciertos parámetros para compensar las pérdidas que se presentan en su proceso progresivo de reducción de tensión.

B. Del presfuerzo.

El presfuerzo utilizado en las trabes es muy versátil, debido a que se puede aplicar antes "pretensado" o después "postensado" del colado. Permitiendo con esto su fabricación en planta o in situ de la obra.

C. De la Normativa-

La normatividad vigente se basa en especificaciones extranjeras, sin embargo el Instituto Mexicano del Transporte ha desarrollado diferentes lineamientos y parámetros para llevar a cabo el cálculo del presfuerzo, aunque a la fecha su aplicación no se ha extendido completamente.

D. Caso de Estudio-

En lo que respecta al Puente "San Lorenzo", las trabes presforzadas miden 25 m, contemplando cuatro claros y cinco apoyos, siendo una estructura esbelta y resistente a las cargas solicitadas, por tal motivo resulto eficiente y de acuerdo al cálculo la selección de la trabe AASHTO Tipo IV, como la idónea.

BIBLIOGRAFÍA

A. Fuentes, “*Hormigón Pretensado*”, Editores Técnicos Asociados, S. A., España 1978.

American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., “*Standard Specifications For Highway Bridges*”, 16 th E. D., U.S.A. 1996.

Ben C. Gerwick jr., “*Construccion De Estructuras De Concreto Presforzado*”, Editorial Limusa, U.S.A. 1978.

Galindo Solorzano Amilcar, “*Diseño de Puentes en México*”, S. C. T. Direccion General de Servicio Técnicos, México 1994.

Mc Cormac, Jack, “*Diseño de Concreto Reforzado*”, Editorial Alfa Omega, Clenson University, U. S. A. 1970.

Michael P. Collins, Denis Michael, “*Prestressed Concrete Structures*”, Editorial Prentice Hall, New Jersey, U.S.A. 1991.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaria de Infraestructura, “*Normas Técnicas para el proyecto de puentes carreteros*”, Direccion General de Servicios Técnicos. México 1996.

T. Y. Lin, “*Concreto presforzado*”, Editorial Diana, México 1979.