

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL POSTENSADO EN LAS PROPIEDADES
DINÁMICAS DE PUENTES DE CONCRETO**

DIEGO ANDRÉS GAMBOA SANTA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACION EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA**

2019

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL POSTENSADO EN LAS PROPIEDADES
DINÁMICAS DE PUENTES DE CONCRETO**

DIEGO ANDRÉS GAMBOA SANTA

Monografía para optar al título de Especialista en Estructuras

Director

ALVARO VIVIESCAS JAIMES

Ingeniero Civil, PH. D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACION EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mi familia, Padres, hermanos y todas las personas que estuvieron acompañándome en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros de especialización con quienes emprendimos una aventura hace 18 meses y hoy estamos a punto de culminar.

A todos los profesores que con su conocimiento y dedicación me han transmitido nuevas enseñanzas importantes para este trabajo y para nuestra vida.

Al Ingeniero Álvaro Viviescas Jaimes por su colaboración, apoyo y consejos que me ha brindado en todo este proceso.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVO	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
2. CONCRETO POSTENSADO.....	23
2.1 TIPOS DE MATERIALES USADO EN EL CONCRETO POSTENSADO	24
2.1.1 Concreto.	24
2.1.2 Acero.....	24
2.1.3 Ductos.....	25
2.1.4 Lechada de inyección.	26
2.1.5 Anclajes.	26
2.2 TIPOS DE PUENTES	27
2.2.1 Tipo de material	27
2.2.2 Sistema constructivo empleado	28
2.2.3 Método de trabajo	31
2.3 MÉTODOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DINÁMICA DE LA ESTRUCTURA DE UN PUENTE	34
2.3.1 Efectos ambientales.....	34
2.3.2 Impacto.	35
2.3.3 Vibradores.....	35
2.3.4 Liberación de cargas.....	35
2.4 PROPIEDADES DINÁMICAS	35
2.4.1 Amplitud.....	36
2.4.2 Frecuencia.	36

2.4.3 Período.	36
2.4.4 Modo de vibración.....	36
2.4.5 Amortiguamiento.....	37
3. ESTUDIOS Y ENSAYOS.....	38
3.1 PRUEBAS DE IMPACTO DINÁMICO EN SECCIONES RECTANGULARES HUECAS DE ACERO POSTENSADO; UNA INVESTIGACIÓN SOBRE EL EFECTO “ABLANDAMIENTO POR COMPRESIÓN” (COMPRESSION- SOFTENING).....	38
3.1.1 Objetivo del estudio.	38
3.1.2 Conclusiones del estudio.	39
3.2 EL EFECTO DE LA MAGNITUD DE LA FUERZA DE PRETENSADO Y LA EXCENRICIDAD EN LAS FRECUENCIAS DE FLEXIÓN NATURALES DE VIGAS DE HORMIGÓN PRETENSADO NO AGRIETADOS.	41
3.2.1 Objetivo del estudio.	41
3.2.2 Conclusiones del estudio.	42
3.3 EL EFECTO DE LA MAGNITUD DE LA FUERZA DE PRETENSADO EN LAS FRECUENCIAS DE FLEXIÓN NATURALES DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN PRETENSADO.	43
3.3.1 Objetivo del estudio.	43
3.3.2 Conclusiones del estudio.	44
3.4 EFECTO DE LA FUERZA DE PRESFUERZO SOBRE LAS FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN DE PUENTES DE HORMIGÓN.	44
3.4.1 Objetivo del estudio.	44
3.4.2 Conclusiones del estudio.	44
3.4.3 Debate sobre el estudio autor györgy deák. fuerza de pretensado no puede deducirse de la frecuencia natural.	45
3.4.4 Debate sobre el estudio por parte de los autores sudhir k. jain' y subhash c. goer.....	45
3.5 EFECTO DE "ABLANDAMIENTO POR COMPRESIÓN" (COMPRESSION- SOFTENING) DEBIDO A UNA FUERZA DE PRETENSADO.	46

3.5.1 Objetivo del estudio.	46
3.5.2 Conclusiones.	46
3.5.3 Debate sobre el estudio autores M. Saiidi, 'B. Douglas,' 0 y S. Feng".	47
3.6 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE PUENTES LOSAS TIPO.	48
3.7 ANÁLISIS DINÁMICO DE CABLES PRETENSADOS CON UNA FUERZA DE PRETENSIÓN INCIERTA.	48
3.7.1 Objetivo del estudio.	48
3.7.2 Conclusiones.	49
4. ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DE EXPERIMENTOS, ENSAYOS Y ESTUDIOS.....	50
5. CONCLUSIONES	52
6. RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Concreto Postensado	23
Figura 2. Acero	24
Figura 3. Ductos.....	26
Figura 4. Puente Viga	31
Figura 5. Puente en Ménsula.....	31
Figura 6. Puente en Arco	32
Figura 7. Puente Atirantado	33
Figura 8. Caso de carga axial externa	39
Figura 9. Caso de carga Postensado.....	39
Figura 10. Configuración Experimental.....	42

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL POSTENSADO EN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE PUENTES DE CONCRETO.*

AUTOR: DIEGO ANDRÉS GAMBOA SANTA.**

PALABRAS CLAVES: Postensado, Puentes de Concreto, Propiedades Dinámicas.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo consiste en el análisis de los diferentes ensayos que se realizan a estructuras de puentes construidos en concreto postensado con el fin de establecer la influencia de este en el comportamiento dinámico de dichas estructuras.

De forma rápida y concisa se explica los conceptos básicos de los materiales usados para la fabricación del concreto postensado, así como los tipos de puentes que se construyen en la actualidad mediante este proceso.

Las propiedades dinámicas de los puentes que se tuvieron en cuenta para analizar fueron periodo, frecuencia, modos, amplitud, de las cuales se hace una descripción y se define su importancia en el comportamiento de la estructura.

Después de hacer una revisión de los conceptos más importantes sobre concreto postensado y puentes, se hace un análisis de los diferentes ensayos y estudios realizados a estructuras de puentes construidas con este tipo de concreto, con el fin de hacer unas recomendaciones sobre el método constructivo y que sirva como apoyo a futuras construcciones.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras.
Director: Álvaro Viviescas Jaimes. Ingeniero Civil, PH. D.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF POST-TENSIONED INFLUENCE ON CONCRETE BRIDGES DYNAMIC PROPERTIES.*

AUTHOR: DIEGO ANDRES GAMBOA SANTA.**

KEYWORDS: Post-tensioning, Concrete Bridges, Dynamic Properties.

DESCRIPTION:

The present work consists of the analysis of the different tests that are carried out on bridge structures built in post-tensioned concrete in order to establish the influence of this on the dynamic behavior of these structures.

The basic concepts of the materials used for the manufacture of post-tensioned concrete are explained quickly and concisely, as well as the types of bridges that are currently being built using this process.

The dynamic properties of the bridges that were taken into account to analyze were period, frequency, modes, amplitude, of which a description is made and its importance is defined in the behavior of the structure.

After reviewing the most important concepts on post-tensioned concrete and bridges, an analysis is made of the different tests carried out on bridge structures built with this type of concrete, in order to make recommendations on the use of this type of structures and that serves as support for future constructions.

* Monograph

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras.
Director: Álvaro Viviescas Jaimes. Ingeniero Civil, PH. D.

INTRODUCCIÓN

En nuestro país actualmente se están realizando una gran cantidad de obras de infraestructura vial como puentes y viaductos, con el fin de minimizar los tiempos de recorrido e impulsar el crecimiento económico y de esta manera lograr un país más competitivo, fomentando así el desarrollo.

En la actualidad en muchas ocasiones al construir los puentes y viaductos, se siguen usando técnicas tradicionales de construcción, y se construyen estructuras de longitudes pequeñas. Las técnicas modernas consisten en unir ambos extremos del obstáculo a salvar con grandes puentes o viaductos, sin limitar longitudes ni alturas, además de disminuir tiempos de viaje y mejorando la seguridad.

Por esto es necesario aplicar una ingeniería moderna para la construcción de estos viaductos de grandes luces, y una forma es el uso del concreto postensado, que no solo nos permite colocar grandes elementos, sino también reduce el gasto en acero, concreto y encofrado.

La construcción de puentes en concreto postensado con el paso del tiempo toma cada vez más fuerza, razón por la cual se hace importante conocer y entender su funcionamiento, para así poder identificar posibles problemas en la estructura y proceder a realizar mantenimientos preventivos y reparaciones.

Es por ello que se decidió la elaboración de este trabajo, buscando como objetivo general analizar la influencia del postensado en las propiedades dinámicas de puentes de concreto, mediante el estudio de diversos ensayos realizados a este tipo de estructuras para dar recomendaciones sobre el uso y la gran utilidad del concreto postensado en los puentes.

En el primer capítulo se da a conocer los conceptos básicos del concreto postensado, materiales utilizados, así como el tipo de puentes donde se utiliza este método.

En el segundo capítulo se explican las propiedades dinámicas que se van a analizar con los diferentes tipos de ensayos que se realizan.

En el tercer capítulo se presentan los diversos ensayos, experimentos y estudios que se han realizado a elementos fabricados en concreto postensados y que son usados para la construcción de puentes.

En el cuarto capítulo se realiza un análisis de los diferentes ensayos recopilados sobre los elementos en concreto postensado.

Por último, se hacen unas recomendaciones y conclusiones sobre la influencia del postensado en las propiedades dinámicas de puentes de concreto.

1. OBJETIVO

1.1 OBJETIVO GENERAL

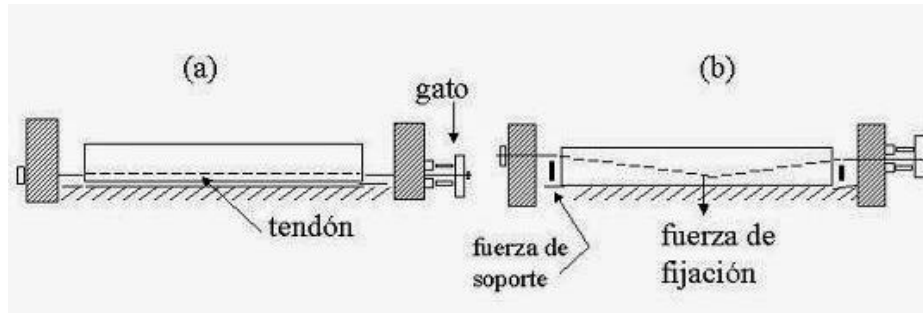
Analizar la influencia del postensado en las propiedades dinámicas de puentes de concreto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los principales conceptos sobre el concreto postensado.
- Establecer las propiedades dinámicas de un puente de concreto postensado.
- Analizar investigaciones, ensayos y procedimientos sobre la variación de las propiedades dinámicas fundamentales en puentes contruidos con concreto postensado.

2. CONCRETO POSTENSADO

Figura 1. Concreto Postensado



Fuente: TODAS LAS INGENIERÍAS. Concreto postensado y pretensado. 2015. Disponible en: <http://todaslasingenierias.blogspot.com/2015/01/concreto-postensado-y-pretensado.html>

El postensado es un método para reforzar el hormigón, que se utiliza ampliamente en la construcción y renovación de puentes.

Los tendones de acero de alta resistencia se colocan en conductos o mangas antes de colocar el concreto. Una vez que el concreto ha ganado resistencia, se aplica tensión, tirando de los tendones y anclando contra los bordes exteriores del concreto, antes de que se apliquen las cargas de servicio.¹

¹ MEZA QUINTANILLA, L. E. Aspectos fundamentales del concreto presforzado. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua). 2017

2.1 TIPOS DE MATERIALES USADO EN EL CONCRETO POSTENSADO

2.1.1 Concreto. 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.²

Los valores comunes de f'_c oscilan entre 350 y 500 kg/cm², siendo el valor estándar 350 kg/cm². Se requiere esta resistencia para poder hacer la transferencia del presfuerzo cuando el concreto haya alcanzado una resistencia de 280 kg/cm².³

2.1.2 Acero

Figura 2. Acero

Tipo	Diámetro		Forma
	mm	Pulg	
Alambre liso	2.0 ~ 9.0	0.06 ~ 0.360	
Torón de siete alambres	6.2 ~ 15.2	0.250 ~ 0.600	
Barra roscada	9.2 ~ 32.0	0.362 ~ 1.260	

Fuente: QUINTANILLA HUAYTA, Darío. Ensayos experimentales en vigas de concreto postensado con tendones adheridos y no adheridos. Lima – Perú. 2016. Disponible en: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7687/QUINTANILLA_DARIO_VI_GAS_CONCRETO_POSTPENSADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

² Ibíd.

³ Ibíd.

Los cables de post tensión 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.

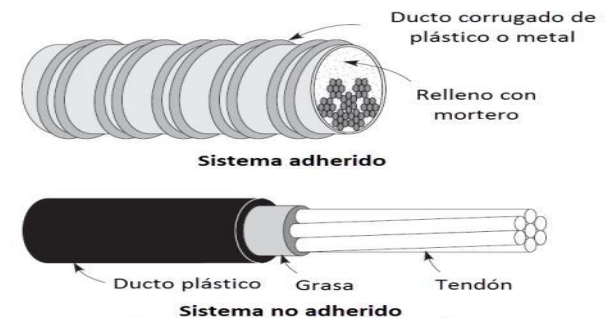
Los alambres se fabrican en diámetros de 3, 4, 5, 6, 7, 9.4 y 10 mm y las resistencias varían desde 16000 hasta 19000 kg/cm². Los alambres de 5, 6 y 7 mm pueden tener acabado liso, dentado y tridentado.⁴

2.1.3 Ductos. Los ductos son tubos huecos por donde se enhebran los cables de acero y pueden ser de diversos materiales. Generalmente se usan los metálicos y los plásticos.⁵

⁴ Ibíd.

⁵ Ibíd.

Figura 3. Ductos



Fuente: QUINTANILLA HUAYTA, Darío. Ensayos experimentales en vigas de concreto postensado con tendones adheridos y no adheridos. Lima – Perú. 2016. Disponible en: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7687/QUINTANILLA_DARIO_VIGAS_CONCRETO_POSTPENSADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

2.1.4 Lechada de inyección. Esta se utiliza para rellenar 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.⁶

2.1.5 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.⁷

⁶ Ibíd.

⁷ Ibíd.

2.2 TIPOS DE PUENTES

Un puente puede describirse como una estructura que proporciona una vía de paso sobre valles, ríos, carreteras, sirviendo también como una conexión entre carreteras, vías férreas, tuberías y/o líneas de distribución de diferentes productos.

Es importante resaltar y conocer las diferentes tipologías de puentes, ya que de esta manera podemos identificar que puentes son construidos en concreto postensado.

Los puentes se pueden agrupar dependiendo de su tipo de material, sistema constructivo y según el método de trabajo para recibir y transmitir las cargas.

2.2.1 Tipo de material

2.2.1.1 Puentes de madera: Los puentes de madera, aunque son rápidos de construir y de bajo coste, son poco resistentes y duraderos, ya que son muy sensibles a los agentes atmosféricos, como la lluvia y el viento, por lo que requieren un mantenimiento continuado y costoso. Su bajo coste (debido a la abundancia de madera, sobre todo en la antigüedad) y la facilidad para labrar la madera pueden explicar que los primeros puentes construidos fueran de madera.⁸

2.2.1.2 Puentes de piedra: Los puentes de piedra, de los que los romanos fueron grandes constructores, son tremendamente resistentes, compactos y duraderos, aunque en la actualidad su construcción es muy costosa. Los cuidados necesarios para su mantenimiento son escasos, ya que resisten muy bien los agentes climáticos. Desde el hombre consiguió dominar la técnica del arco este tipo de

⁸ FIGUEROA, Elisa Beatriz; MORALES AYALA, Claudia Beatriz y MORÁN CORTEZ, Julissa Marisela. Análisis comparativo del diseño de puentes con vigas de concreto presforzado utilizando las cargas vehiculares “Aashto Standard” y “Aashto Lrfd”. Ingeniero thesis, Universidad De El Salvador. 2014

puentes dominó durante siglos. Sólo la revolución industrial con las nacientes técnicas de construcción con hierro pudo amortiguar este dominio.⁹

2.2.1.3 Puentes metálicos: Los puentes metálicos son muy versátiles, permiten diseños de grandes luces, se construyen con rapidez, pero son caros de construir y además están sometidos a la acción corrosiva, tanto de los agentes atmosféricos como de los gases y humos de las fábricas y ciudades, lo que supone un mantenimiento caro.¹⁰

2.2.1.4 Puentes de concreto: Los puentes de hormigón armado son de montaje rápido, ya que admiten en muchas ocasiones elementos prefabricados, son resistentes, permiten superar luces mayores que los puentes de piedra, aunque menores que los de hierro, y tienen unos gastos de mantenimiento muy escasos, ya que son muy resistentes a la acción de los agentes atmosféricos.¹¹

2.2.2 Sistema constructivo empleado

2.2.2.1 Vaciado en sitio: La construcción mediante cimbras es el método tradicional más utilizado, originalmente las estructuras que conforman las cimbras se realizaban con madera, aunque en la actualidad se utilizan elementos metálicos para su ejecución. Hoy en día existen una serie de elementos metálicos estandarizados que se comercializan para la ejecución de estos elementos auxiliares, lo que facilita las tareas de montaje y desmontaje de las cimbras, ya que los diversos elementos tipo puntales y vigas poseen elementos de unión que permiten el rápido ensamblaje entre ellos.¹²

⁹ Ibíd.

¹⁰ Ibíd.

¹¹ Ibíd.

¹² BLOG, S. Ejecución de tableros en puentes: sistemas constructivos. 2019. [online] Blog.structuralia.com. Available at: <https://blog.structuralia.com/ejecucion-de-tableros-en-puentes-sistemas-constructivos>.

2.2.2.2 Tablero prefabricado: La construcción de tableros prefabricados es una construcción mixta que combina la utilización de electos prefabricados como vigas y prelosas con la ejecución de las losas parcialmente in situ.

La fabricación de los distintos elementos prefabricados suele ser realizada en establecimientos industriales especializados que poseen talleres y parques de fabricación totalmente equipados para la ejecución de las mismas y son transportados a la obra mediante camiones de grandes dimensiones. Debido a estas circunstancias la calidad de los acabados y las características geométricas y resistentes de estos elementos está muy controlada, hecho que se traduce en unos coeficientes y recubrimientos menores que los de la construcción in situ.¹³

2.2.2.3 Voladizos sucesivos: La construcción por vanos sucesivos implica ejecutar generalmente un vano y una parte del siguiente (del orden del 20% de la luz del este), por ello en estos puentes el primer vano suele tener una luz en torno al 80% de los centrales. La longitud del voladizo coincide con el punto de momento nulo del vano continuo, lo que hace que la zona de unión de fases sea óptima tanto desde el punto de vista estructural como para la unión de las fases de postensado.

Para la construcción de tableros ejecutados por vanos sucesivos pueden emplearse cimbras desmontables, cimbras trasladables o cimbras autolanzables, siendo estas últimas las que se utilizan más en la actualidad. Este tipo de construcción es aconsejable para puentes con luces repetitivas, gran cantidad de número de vanos, altura de pilas baja o media, condiciones de apoyo adversas sobre el terreno y preferiblemente para secciones de tablero uniforme.¹⁴

¹³ Ibid.

¹⁴ Ibid.

2.2.2.4 Tablero atirantado: Para la construcción de los puentes atirantados, el procedimiento constructivo más usual es el de voladizos sucesivos atirantando el tablero. Este sistema permite tanto la construcción del tablero por dovelas fabricadas in situ como mediante el uso de elementos prefabricados.

El proceso constructivo es similar al ya comentado en los puentes construidos por voladizos sucesivos, con la salvedad de que en este caso se agrega una tarea al final de la fase consistente en el montaje y puesta en tensión de los tirantes.¹⁵

2.2.2.5 Tablero puentes en arco: Existen diversos métodos para la construcción de los puentes arco, como por ejemplo la utilización de cimbras, la construcción con autocimbra, la ejecución mediante voladizos sucesivos e incluso la rotación del arco horizontal o vertical una vez construido.

En general es más habitual realizar la construcción de los puentes arco in situ, aunque también se utilizan elementos prefabricados.¹⁶

2.2.2.6 Tablero empujado: El procedimiento de ejecución consiste en la construcción de un tramo de 15 a 20 metros de longitud del tablero, que una vez tesado es empujado hacia delante mediante gatos hidráulicos dispuestos a tal fin. El procedimiento exige la utilización de un elemento auxiliar denominado “nariz” cuya función es permitir el apoyo de la dovela en la pila siguiente. La “nariz” es una viga metálica que se fija en el frente de la primera dovela.¹⁷

¹⁵ Ibid.

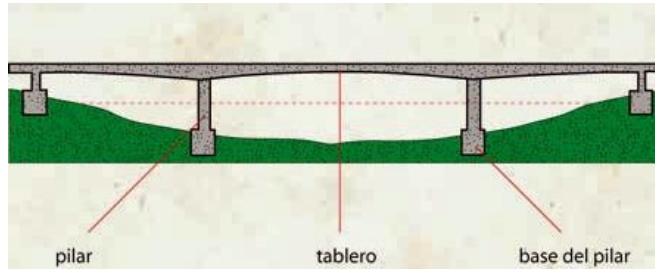
¹⁶ Ibid.

¹⁷ Ibid.

2.2.3 Método de trabajo

2.2.3.1 Puente viga

Figura 4. Puente Viga

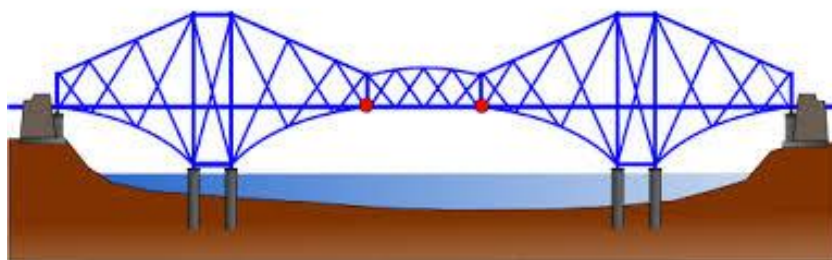


Fuente: CARDOSO, Marcela. Estructuras y puentes. Disponible en: <https://es.slideshare.net/dianamarcelacard/trabajo-de-informatica-estructuras-y-puentes2-18809296>

Es un puente cuyos vanos son soportados por vigas. Se emplean vigas en forma de I, en forma de caja hueca. Este puente es estructuralmente el más simple de todos los puentes. Se emplean en vanos cortos e intermedios con hormigón pretensado. (Figueroa et al., 2014)

2.2.3.2 Puente en ménsula

Figura 5. Puente en Ménsula



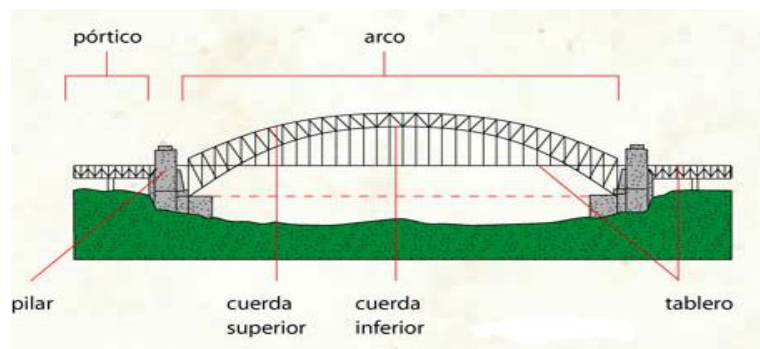
Fuente: WIKIWAND. Puente en ménsula. Disponible en: https://www.wikiwand.com/es/Puente_en_m%C3%A9nsula

Es un puente en el cual una o más vigas principales trabajan como ménsula o voladizo. Las grandes estructuras se construyen por la técnica de volados sucesivos, mediante ménsulas consecutivas que se proyectan en el espacio a partir de la ménsula previa.

Los pequeños puentes peatonales pueden construirse con vigas simples, pero los puentes de mayor importancia se construyen con grandes vigas tipo cajón de hormigón postensado.¹⁸

2.2.3.3 Puente en arco

Figura 6. Puente en Arco



Fuente: WEB DE PEDRO. Tema 5 Estructuras. 16 de junio de 2011. Disponible en: <http://webdepedro.blogspot.com/2011/06/tipos-de-estructuras.html>

Estos son puentes con apoyos a los extremos del vano, entre los cuales se halla una estructura con forma de arco por donde se transmiten las cargas. El tablero puede estar apoyado o colgado de esta estructura principal, dando origen a distintos tipos de puentes. Los puentes en arco trabajan transfiriendo el peso propio del

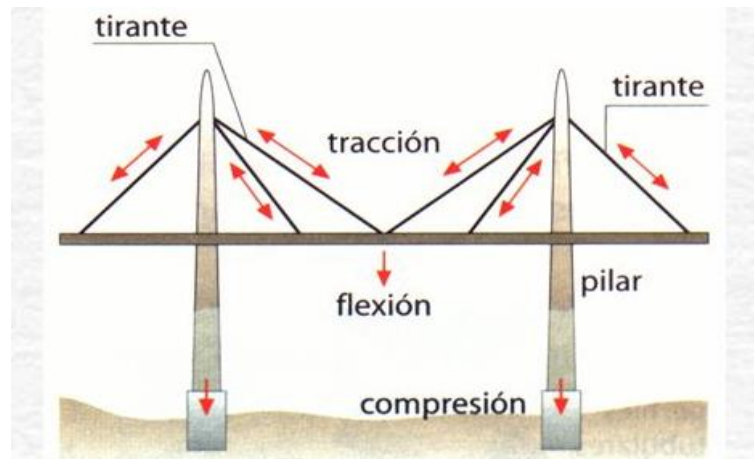
¹⁸ FIGUEROA, MORALES AYALA, y MORÁN CORTEZ, Óp. Cit.

ponte y las sobrecargas de uso hacia los apoyos mediante la compresión del arco, donde se transforma en un empuje horizontal y una carga vertical.

Normalmente la esbeltez del arco (relación entre la flecha máxima y la luz) es alta, haciendo que los esfuerzos horizontales sean mucho mayores que los verticales. Por este motivo son adecuados en sitios capaces de proporcionar una buena resistencia al empuje horizontal, es decir deben estar apoyados en zonas muy competentes.¹⁹

2.2.3.4 Puente atirantado

Figura 7. Puente Atirantado



Fuente: WEB DE PEDRO. Tema 5 Estructuras. 16 de junio de 2011. Disponible en: <http://webdepedro.blogspot.com/2011/06/tipos-de-estructuras.html>

¹⁹ Ibíd.

Es aquel cuyo tablero está suspendido de uno o varios pilones centrales mediante cables o tirantes. Se distingue de los puentes colgantes porque en estos los cables principales se disponen de pila a pila, sosteniendo el tablero mediante cables secundarios verticales, y porque los puentes colgantes trabajan principalmente a tracción, y los atirantados tienen partes a tracción y otras a compresión.

También hay variantes de estos puentes en que los tirantes van desde el tablero al pilar situado a un lado, y desde este, al suelo, o bien, estar unidos al pilar solo. De igual forma, según la disposición de sus tirantes se pueden clasificar como de plano central atirantado a de tirantes a sus extremos.²⁰

2.3 MÉTODOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DINÁMICA DE LA ESTRUCTURA DE UN PUENTE

Su clasificación se origina según la carga que genera la excitación de la estructura.

2.3.1 Efectos ambientales. Para este caso se tiene en cuenta únicamente los efectos producidos por el medio ambiente.

Entre estos factores también se incluyen los inducidos por el ser humano, tráfico vehicular sobre el puente, ambientales como el viento, microsismos, sismos y oleaje. Esta técnica es la más usada por su bajo costo y practicidad, además de no interrumpir el tráfico vehicular.²¹

²⁰ *Ibíd.*

²¹ CARRIÓN, Francisco; LOZANO-GUZMÁN, Alejandro; DE JESÚS FABELA GALLEGOS, Manuel; VÁZQUEZ, David; ROMERO NAVARRETE, José Antonio. Evaluación de puentes mediante el análisis de vibraciones: investigaciones recientes. 2019

2.3.2 Impacto. En este procedimiento la estructura del puente es golpeada por martillos de impacto, que consta de cargas proporcionales a la masa de este mismo.²²

2.3.3 Vibradores. En este método se usan vibradores que permiten controlar la señal de excitación, aunque influye en la operación del puente, pues se debe suspender el tráfico vehicular.²³

2.3.4 Liberación de cargas. Se ubican cargas suspendidas en el centro del vano, para producir una vibración significativa, siendo una técnica de bajo costo y aplicable a puentes largos.²⁴

2.4 PROPIEDADES DINÁMICAS

Entre los parámetros dinámicos más importantes para identificar en el análisis de la estructura de un puente se encuentran: las frecuencias naturales, formas modales y amortiguamiento.

La importancia de ellos es que nos permiten calibrar modelos numéricos, detectar modificación en el comportamiento debido a daños u otras razones y predecir el comportamiento bajo efectos ambientales.

²² Ibid.

²³ Ibid.

²⁴ Ibid.

2.4.1 Amplitud. Es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasi periódicamente en el tiempo. Es la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.

2.4.2 Frecuencia. Es un parámetro esencial para describir el comportamiento de la vibración de una estructura en el campo elástico lineal. La oscilación real de una estructura se compone de las acciones respectivas de las formas de los modos individuales.²⁵

2.4.3 Período. Es el mínimo lapso que separa dos instantes en los que el sistema se encuentra exactamente en el mismo estado: mismas posiciones, mismas velocidades, mismas amplitudes. Así el periodo de oscilación de una onda es el tiempo empleado por la misma en completar una longitud de onda.

En términos breves es el tiempo que dura un ciclo de la onda en volver a comenzar. Por ejemplo, en una onda, el periodo es el tiempo transcurrido entre dos crestas o valles sucesivos.

2.4.4 Modo de vibración. Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico. La mayoría de los sistemas tienen muchos modos de vibración y es la tarea del análisis modal determinar la forma de esos modos. La vibración de un elemento es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración.

²⁵ WENZEL, H. Ambient vibration monitoring. Encyclopedia of Structural Health Monitoring. 2009

2.4.5 Amortiguamiento. Las estructuras tienen un amortiguamiento, el cual es la capacidad de la estructura de disipar energía después de que esta ha sido sometida a una fuerza externa, este se manifiesta como un decremento continuo de las vibraciones después de la excitación hasta que se alcanza un equilibrio estático.

Las propiedades de amortiguamiento dependen de las frecuencias y representan un valor significativo para la identificación dinámica del sistema. ²⁶

²⁶ NOBLE, D., NOGAL, M., O'CONNOR, A. J., & PAKRASHI, V. The effect of prestress force magnitude on the natural bending frequencies of prestressed concrete structures. 2014

3. ESTUDIOS Y ENSAYOS

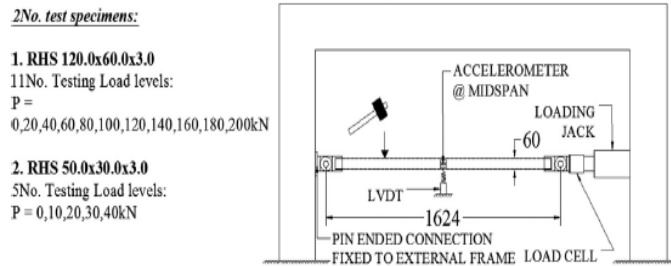
3.1 PRUEBAS DE IMPACTO DINÁMICO EN SECCIONES RECTANGULARES HUECAS DE ACERO POSTENSADO; UNA INVESTIGACIÓN SOBRE EL EFECTO “ABLANDAMIENTO POR COMPRESIÓN” (COMPRESSION-SOFTENING)

3.1.1 Objetivo del estudio. El objetivo del estudio fue realizar pruebas con martillo de impacto y realizar un análisis modal experimental en acero externamente cargado axialmente en perfiles huecos rectangulares (PHR), y sus homólogos postensados.

El propósito de la investigación es determinar bajo qué condiciones la teoría de ablandamiento por compresión (compression-softening) es válida. La suposición de que una carga axial externa es dinámicamente equivalente a una fuerza de post-tensado externo también se estudia en el documento.²⁷

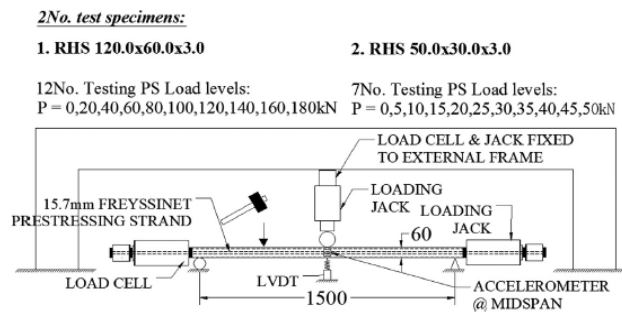
²⁷ NOBLE, D., NOGAL, M., & PAKRASHI, V. Dynamic impact testing on post-tensioned steel rectangular hollow sections; An investigation into the “compression-softening” effect. Journal of Sound and Vibration, 355, 2015. 246-263

Figura 8. Caso de carga axial externa



Fuente: NOBLE, D.; NOGAL, M., & PAKRASHI, V. Dynamic impact testing on post-tensioned steel rectangular hollow sections; An investigation into the “compression-softening” effect. Journal of Sound and Vibration, 355, 2015. 246-263.

Figura 9. Caso de carga Postensado



Fuente: NOBLE, D.; NOGAL, M., & PAKRASHI, V. Dynamic impact testing on post-tensioned steel rectangular hollow sections; An investigation into the “compression-softening” effect. Journal of Sound and Vibration, 355, 2015. 246-263.

3.1.2 Conclusiones del estudio. Los resultados se obtuvieron después de reunir y analizar 1750 mediciones diferentes de respuesta dinámica, incluyendo los casos de secciones delgadas y robustas que han sido postensadas y externamente cargadas axialmente.

Las principales conclusiones derivadas del fueron las siguientes:

- Una sección delgada cargada axialmente muestra un buen ajuste al efecto de “ablandamiento por compresión” (compression-softening). Una sección delgada postensada se desvía del efecto de “ablandamiento por compresión”, sin embargo, sí muestra una tendencia decreciente de frecuencia fundamental de flexión, con el aumento de carga del postensado.
- Una sección maciza cargada axialmente no sigue la tendencia del efecto de “compresión de ablandamiento”. Se aprecia una tendencia creciente significativa en el período con el aumento de nivel de carga axial. Una sección maciza postensada también se desvía de la teoría de “ablandamiento por compresión” (compression-softening), sin embargo, se observó una tendencia a la disminución del período significativa.
- Una carga postensada es fenomenológicamente diferente de una carga axial externa y no es equivalente a una carga axial externa.
- Una carga de post-tensado no causa pandeo de Euler.
- El ablandamiento por compresión (compression-softening) no es válido para estructuras pre- y pos- tensadas.
- En todos los casos, se presenta una disminución en la relación de amortiguamiento, con el aumento de nivel de carga axial.
- La precisión en la predicción de la frecuencia fundamental está relacionada con la complejidad de la respuesta dinámica de la señal, y la proporción de respuesta dinámica atribuida al modo fundamental.

La principal conclusión es que la ecuación de ablandamiento por compresión (compression-softening) debe ser eliminada de la discusión de todas las formas de estructuras postensadas, como el efecto de una carga axial externa y una carga de postensado en la dinámica de estructuras postensadas, ya que son diferentes en un nivel fenomenológico.

Se requiere más investigación para determinar exactamente cómo se comporta la frecuencia fundamental de estructuras de concreto pre y post-tensadas con el aumento de la fuerza de post-tensado, sin embargo, con base en los resultados anteriores, la frecuencia fundamental de las estructuras de hormigón pre y post-tensadas no se comporta de acuerdo con el efecto de “ablandamiento por compresión” (compression-softening).²⁸

3.2 EL EFECTO DE LA MAGNITUD DE LA FUERZA DE PRETENSADO Y LA EXCENTRICIDAD EN LAS FRECUENCIAS DE FLEXIÓN NATURALES DE VIGAS DE HORMIGÓN PRETENSADO NO AGRIETADOS.

3.2.1 Objetivo del estudio. El propósito de la investigación fue determinar la relación entre la magnitud de la fuerza de postensado y la frecuencia fundamental de flexión de vigas postensadas de hormigón.

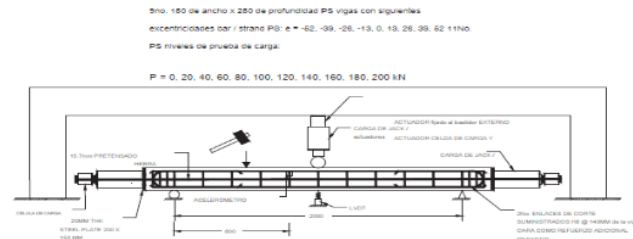
Se presentan los resultados para 9 vigas de hormigón, incluyendo el resultado de ensayos de flexión de tres puntos estáticos, se obtienen conclusiones de la comparación de los resultados estáticos con los dinámicos. En este documento también se calculan los cambios en la relación de amortiguamiento con el aumento de la fuerza de postensado y se lleva a cabo un análisis estadístico sobre los datos para determinar su significado.

Por último, también se lleva a cabo un análisis del efecto combinado de la fuerza magnitud post-tensado y la excentricidad.²⁹

²⁸ NOBLE, NOGAL, & PAKRASHI, 2015. Op. Cit.

²⁹ NOBLE, D., NOGAL, M., & PAKRASHI, V. The effect of prestress force magnitude and eccentricity on the natural bending frequencies of uncracked prestressed concrete beams. *Journal of Sound and Vibration*, 365, 2016. 22-44

Figura 10. Configuración Experimental



Fuente: NOBLE, D.; NOGAL, M., & PAKRASHI, V. Dynamic impact testing on post-tensioned steel rectangular hollow sections; An investigation into the “compression-softening” effect. Journal of Sound and Vibration, 355, 2015. 246-263.

3.2.2 Conclusiones del estudio. Los resultados se obtuvieron después de reunir y analizar los datos de los ensayos sobre las nueve vigas. Las conclusiones del estudio se resumen de la siguiente manera:

- El efecto de “ablandamiento por compresión” (compression-softening) no es válido para las estructuras de hormigón postensado. A partir de las pruebas estáticas y dinámicas llevadas a cabo, no se ha encontrado evidencia de una tendencia a la disminución en la frecuencia fundamental de flexión con el aumento en la magnitud de la fuerza de postensado.
- A partir de los datos estáticos obtenidos, la predicción estática equivalente de la frecuencia fundamental de flexión sugiere que existe una tendencia de aumento en la frecuencia fundamental de flexión con el aumento de magnitud de la carga post-tensado.
- Sin embargo, a partir de los datos dinámicos obtenidos, no hay ninguna indicación de cualquier relación entre magnitud de la carga post-tensado y la frecuencia fundamental de flexión.
- Los resultados son concluyentes con respecto a la relación entre el cambio en el coeficiente de amortiguamiento crítico, ξ , y la magnitud de la fuerza de postensado.

- Recientemente, el interés en la variabilidad de las propiedades dinámicas de puentes (es decir, la frecuencia natural, forma modal, factor de amortiguamiento) causados por efectos ambientales tales como la temperatura, humedad, viento y otros factores está aumentando.³⁰

3.3 EL EFECTO DE LA MAGNITUD DE LA FUERZA DE PRETENSADO EN LAS FRECUENCIAS DE FLEXIÓN NATURALES DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN PRETENSADO.

3.3.1 Objetivo del estudio. Este ensayo describe y analiza las pruebas de martillos de impacto realizado sobre una viga de hormigón postensado en varios niveles de la fuerza de tensado. El objetivo es investigar cómo varían las frecuencias naturales con la magnitud de la fuerza de pretensado. Se lleva a cabo un análisis modal experimental y se identificaron las frecuencias naturales experimentales mediante el empleo de la transformada de Fourier. Esto se repitió variando los valores de fuerza postensada en diferentes lugares de impacto.

Si se puede establecer la relación entre la fuerza de pretensado y la frecuencia natural para estructuras de hormigón pretensado, entonces la variación de la frecuencia natural durante la vida de diseño de una estructura debido a la pérdida de pretensado se puede estimar. Este problema es particularmente pertinente en el ámbito de las torres de aerogeneradores de hormigón postensado y en el campo de las vigas de puente de hormigón pre y postensado.³¹

³⁰ NOBLE, NOGAL, & PAKRASHI, 2016. Óp. Cit.

³¹ NOBLE, NOGAL, O'CONNOR, & PAKRASHI, 2014. Óp. Cit.

3.3.2 Conclusiones del estudio. A partir del análisis modal experimental llevado a cabo en la viga de hormigón postensado con excentricidad cero, y el análisis de regresión posterior, se puede concluir, a partir de un punto de vista estadístico que, para una hebra de pretensado perfilada recta, no se observó ningún cambio en la frecuencia de flexión natural, y que la predicción de la frecuencia natural es independiente de la magnitud de la fuerza de pretensado.³²

3.4 EFECTO DE LA FUERZA DE PRESFUERZO SOBRE LAS FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN DE PUENTES DE HORMIGÓN.

3.4.1 Objetivo del estudio. Los autores llevan a cabo pruebas de campo y de laboratorio, y los resultados obtenidos permiten concluir que las frecuencias medidas no están particularmente afectados por la intensidad de la fuerza; las pequeñas variaciones observadas muestran una tendencia opuesta con la predicción teórica contenida y probablemente se pueden atribuir a la contracción.³³

3.4.2 Conclusiones del estudio. En conclusión, el efecto de la tensión previa en la viga de flexión sobre las frecuencias de vibración es insignificante. Fenómenos de diferente origen, tales como agrietamiento, pueden producir efectos más sensibles en un resultado cualitativamente similar real, el cual puede ser probando sobre cables excéntricos.

³² *Ibíd.*

³³ SAIIDI, M., DOUGLAS, B., & FENG, S. Prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges. *Journal of structural Engineering*, 120(7), 1994. 2233-2241

Estas conclusiones son válidas sólo para la consideración en el que se analizó el comportamiento de flexión de la viga, pero esto no significa que las pruebas dinámicas no pueden proporcionar información acerca de la fuerza de pretensado si se analizan los diferentes modos de vibración.³⁴

3.4.3 Debate sobre el estudio autor györgy deákö. En la opinión del debatiente, en el caso de unidades no agrietados o grietas cerradas, la fuerza de pretensado no controla de manera importante la rigidez del miembro, en consecuencia, la magnitud de la fuerza de pretensado no puede deducirse de la frecuencia natural.

Por el contrario, es posible comprobar la fuerza de pretensado mediante la medición de la frecuencia natural de la unidad en un estado agrietada.³⁵

3.4.4 Debate sobre el estudio por parte de los autores sudhir k. jain' y subhash c. goer. Sudhir y Subhash aprecian el trabajo experimental reportado por los autores sobre el efecto de la fuerza de pretensado en la frecuencia de vibración de puentes de hormigón. Sin embargo, no están de acuerdo con los autores en relación con el cambio en la frecuencia debido al efecto “ablandamiento por compresión” (compression-softening) de la fuerza de pretensado.³⁶

³⁴ Ibid.

³⁵ Ibid.

³⁶ Ibid.

3.5 EFECTO DE "ABLANDAMIENTO POR COMPRESIÓN" (COMPRESSION-SOFTENING) DEBIDO A UNA FUERZA DE PRETENSADO.

3.5.1 Objetivo del estudio. El objetivo del estudio es aplicar una fuerza axial externa de compresión sobre una viga, con lo cual sucede que, las deflexiones laterales de la viga aumentan y las frecuencias naturales de vibración disminuyen con el aumento en las cargas laterales.

Esto es bien conocido. Sin embargo, los resultados no pueden aplicarse a la situación en la que la fuerza axial es aplicada por el pretensado de los cables que están anclados a las caras extremas de la viga, haciendo la fuerza axial una fuerza interna del sistema.

A medida que la forma del modo fundamental de una viga simplemente apoyada uniforme, con y sin la fuerza axial, es sinusoidal, se puede obtener un valor exacto de la frecuencia fundamental igualando la energía cinética máxima a la máxima energía potencial bajo vibración libre.³⁷

3.5.2 Conclusiones. La fuerza de pretensado no causa el efecto de "ablandamiento por compresión" (compression-softening).

La discusión anterior demuestra que no hay una "predicción teórica" de la variación en la frecuencia natural con pérdida de tensión. Por lo tanto, el único efecto importante de la pérdida tensión sobre las frecuencias naturales de la viga es través de la apertura de micro fisuras en el hormigón.

³⁷ DALL'ASTA, A., & DEZI, L. Discussion of "prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges" by M. Saiidi, B. Douglas, and S. Feng. Journal of structural engineering, 122(4), 1996. 458-458.

Eso, por supuesto, es consistente con las observaciones de los autores que, con la pérdida de tensión, la viga se hizo más flexible y su frecuencia natural disminuyó.³⁸

3.5.3 Debate sobre el estudio autores M. Saiidi, 'B. Douglas,' 0 y S. Feng". Se presenta un argumento válido sobre el efecto de la fuerza de pretensado en la frecuencia de vibración. Este no debe basarse en la misma ecuación que se utiliza para una viga cargada externamente. Dos ecuaciones para la frecuencia de vigas pretensadas derivados en las discusiones. Ambos son aplicables a elementos sólidos, homogéneo, no agrietados.

Aunque implica la inclusión del momento de inercia del cable de pretensado. Cuando se descuida este término, la ecuación muestra la misma tendencia, aunque en menor medida. La derivación teórica por Jain, muestra que la vibración de vigas pretensadas es independiente de la fuerza de pretensado, dando a los autores la impresión de que la rigidez de compresión no puede existir.

El hecho es que la frecuencia de vibración, tanto de la muestra de laboratorio y el puente real aumentó con un aumento de la fuerza. Esta tendencia también se observó por Hop (1991) en la prueba dinámica de pretensado de tranvías de hormigón. Los datos de los ensayos estáticos reportados por Hop (1991) también apoyan el efecto de rigidización por compresión.

El cierre de microfisuras no es modelado por las ecuaciones presentadas por los autores y, por esta razón, las ecuaciones presentadas son más de carácter teórico y no pueden explicar la respuesta observada.³⁹

³⁸ Ibid.

³⁹ Ibid.

3.6 ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE PUENTES LOSAS TIPO.

Los autores realizaron un estudio sobre la respuesta dinámica de la superestructura de un puente con vehículos en movimiento. Las conclusiones son muy interesantes y útiles, en particular, el hecho de que los factores de amplificación dinámicos para múltiples vehículos son, en general, inferiores a los de un solo vehículo.

Por otro lado, los autores consideran que hay un punto que no ha sido suficientemente aclarado, y es que, al realizar el análisis de vibración libre, también se deben tener en cuenta la presencia de masas suspendidas y no sólo la del elemento estructural.⁴⁰

3.7 ANÁLISIS DINÁMICO DE CABLES PRETENSADOS CON UNA FUERZA DE PRETENSIÓN INCIERTA.

3.7.1 Objetivo del estudio. El objeto del estudio es realizar un análisis dinámico a cables pretensados como elementos finitos con una pretensión incierta. El modelo teórico modelado es bidimensional. El problema dinámico se formula refiriendo el movimiento al marco de inercia, lo que conduce a una forma cuadrática simple desacoplada para la energía cinética.

El efecto de la pretensión estocástica aplicada externamente se describe aproximadamente por medio de un incierto componente 'axial' de la tensión resultante, que se supone constante a lo largo del cable en su configuración de

⁴⁰ ROSSI, R. E.; HUMAR, J. L., & KASHIF, A. H. Discussion and Closure: Dynamic Response Analysis of Slab-Type Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 122(4), 1996. 460-461

carga muerta. El llamado enfoque de perturbación mejorada se emplea para resolver este problema estocástico, obteniendo dos sistemas acoplados de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales.⁴¹

3.7.2 Conclusiones. El efecto de la pretensión estocástica se incluye aproximadamente en la formulación de elementos finitos al asumir un valor incierto del componente de esfuerzo axial constante a lo largo del cable en la configuración inicial deformada. Este supuesto permite evitar el análisis dinámico no lineal bajo cargas estocásticas, ya que la aleatoriedad del problema se desplaza a la estructura.

El problema es el análisis dinámico no lineal de una estructura estocástica sometida a determinadas excitaciones, el cual se resuelve empleando un enfoque de perturbación mejorada, el cual es un algoritmo iterativo eficiente.⁴²

⁴¹ SOFI, A., BORINO, G., & MUSCOLINO, G. Dynamic analysis of prestressed cables with uncertain pretension. *Meccanica*, 37(1-2), 2002. 67-84

⁴² *Ibíd.*

4. ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DE EXPERIMENTOS, ENSAYOS Y ESTUDIOS

Las pruebas por efectos ambientales es el método más usado por economía y practicidad, además de no interrumpir el tráfico vehicular. Se utiliza generalmente en puentes de grandes claros por su flexibilidad.

En cuanto las propiedades dinámicas del puente, las excitaciones con frecuencias altas no son muy probables de encontrar. Para puentes simplemente apoyados se encuentran modos de tipo vertical, torsional, pero modos transversales es difícil de que se presenten debido a la poca excitación transversal.

La evidencia de estos ensayos demuestra que, en la mayoría de los casos al medir en sitio, la frecuencia natural de las estructuras de los puentes, comparada con otros resultados teóricos, la frecuencia fundamental aumenta de acuerdo con la magnitud de la fuerza aplicada de pretensado externamente.

Los modos de vibración detectados de forma experimental son una herramienta muy valiosa también para la detección de daños locales.

En algunos casos mediante los ensayos por vibración ambiental no se logran identificar los modos de vibración ni la frecuencia fundamental, por la falta de excitación de la estructura, lo que genera que los resultados obtenidos no sean exactos o nos brinden una información irreal.

Para ensayos realizados en laboratorio en vigas compuestas pretensadas de apoyos simples, a las cuales se han realizado diferentes tipos de pretensado, los resultados de las pruebas dinámicas muestran que las frecuencias naturales de las

vigas tipo cajón con bandas de acero corrugado aumentan con el aumento de la fuerza externa.

También es importante aclarar que, en muchos estudios realizados en laboratorio, se indica que la fuerza de pretensado no afecta la frecuencia natural, más bien se le atribuye estos cambios en la frecuencia natural a daños o fisuras presentadas en la estructura analizada.

En cuanto el coeficiente de amortiguamiento hay evidencia según varios estudios que varía de acuerdo a la carga axial aplicada en el pretensado, esta variación se representa en una disminución del amortiguamiento respecto al aumento de la magnitud de la fuerza aplicada.

La predicción de las propiedades dinámicas de las estructuras, como la frecuencia natural, modos de vibración y amortiguamiento, están directamente relacionados con los equipos utilizados y su precisión y calibración. Por ello es de vital importancia que cada vez que se usen equipos para este tipo de estudios, estén calibrados y el grado de precisión sea suficiente para tener datos más reales y así poder realizar un análisis bien detallado.

También en este análisis se encontró que, para realizar estudios dinámicos más reales sobre el comportamiento de las estructuras, se requiere de equipos muy sofisticados, y por ende de costos muy elevados, motivo por el cual este tipo de estudios no presentan gran demanda.

5. CONCLUSIONES

- El uso del postensado en la construcción de puentes se ha convertido en algo muy común, pues permite algunas ventajas como la rapidez de la ejecución de los trabajos, disminución en la sección, y es por ello la importancia que ha adquirido el análisis del comportamiento dinámico de los mismos.
- Al revisar estudios, pruebas y ensayos realizado a estructuras construidas con concreto postensado se evidencia que algunas propiedades dinámicas varían de acuerdo a la carga axial, aplicada en el postensado.
- Para algunos casos de los estudios realizados no se logró determinar si las propiedades dinámicas se ven influenciadas por la magnitud de la carga axial de pretensado, pues se presentaron fisuras y daños, lo que llevo a inferir que estas variaciones eran ocasionadas por estos mismos.
- Se pudo también observar que la disposición y/o excentricidad del acero en la sección del concreto postensado afecta el comportamiento dinámico de las estructuras, por ello es importante que lo hecho en el análisis teórico se lleve al proceso constructivo lo más real posible.

6. RECOMENDACIONES

- Es importante que, en el proceso constructivo de las estructuras de los puentes en concreto postensado, se tenga un estricto control sobre los materiales utilizados, así como de los procedimientos, pues cualquier omisión en algún caso, puede ocasionar desperfectos en dicha estructura y afectar notablemente el comportamiento dinámico del mismo.
- Sería de gran ayuda la implementación de estudios en nuestro país, sobre el comportamiento de las estructuras de puentes en concreto postensado, que ayuden a implementar mejoras en los procesos constructivos, buscando evitar errores y fallos, que puedan ocasionar tragedias.
- Otra opción para analizar el comportamiento y la salud de las estructuras de los puentes es realizar la modelación mediante prototipos a escala, para llevarlos a laboratorios y poder tener resultados que ayuden a comprender la influencia del concreto postensado en las propiedades dinámicas.

BIBLIOGRAFÍA

BLOG, S. Ejecución de tableros en puentes: sistemas constructivos. 2019. [online] Blog.structuralia.com. Available at: <https://blog.structuralia.com/ejecucion-de-tableros-en-puentes-sistemas-constructivos>.

CARRIÓN, Francisco; LOZANO-GUZMÁN, Alejandro; DE JESÚS FABELA GALLEGOS, Manuel; VÁZQUEZ, David; ROMERO NAVARRETE, José Antonio. Evaluación de puentes mediante el análisis de vibraciones: investigaciones recientes. 2019

DALL'ASTA, A., & DEZI, L. Discussion of “prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges” by M. Saiidi, B. Douglas, and S. Feng. Journal of structural engineering, 122(4), 1996. 458-458.

FIGUEROA, Elisa Beatriz; MORALES AYALA, Claudia Beatriz y MORÁN CORTEZ, Julissa Marisela. Anàlisis comparativo del diseño de puentes con vigas de concreto presforzado utilizando las cargas vehiculares “Aashto Standard” y “Aashto Lrfd”. Ingeniero thesis, Universidad De El Salvador. 2014

LAURA, P. A. A.; ROSSI, R. E.; HUMAR, J. L., & KASHIF, A. H. Discussion and Closure: Dynamic Response Analysis of Slab-Type Bridges. Journal of Structural Engineering, 122(4), 1996. 460-461.

MEZA QUINTANILLA, L. E. Aspectos fundamentales del concreto presforzado. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua). 2017

NOBLE, D., NOGAL, M., & PAKRASHI, V. Dynamic impact testing on post-tensioned steel rectangular hollow sections; An investigation into the “compression-softening” effect. *Journal of Sound and Vibration*, 355, 2015. 246-263.

NOBLE, D., NOGAL, M., & PAKRASHI, V. The effect of prestress force magnitude and eccentricity on the natural bending frequencies of uncracked prestressed concrete beams. *Journal of Sound and Vibration*, 365, 2016. 22-44.

NOBLE, D., NOGAL, M., O'CONNOR, A. J., & PAKRASHI, V. The effect of prestress force magnitude on the natural bending frequencies of prestressed concrete structures. 2014

SAIDI, M., DOUGLAS, B., & FENG, S. Prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges. *Journal of structural Engineering*, 120(7), 1994. 2233-2241.

SOFI, A., BORINO, G., & MUSCOLINO, G. Dynamic analysis of prestressed cables with uncertain pretension. *Meccanica*, 37(1-2), 2002. 67-84.

WENZEL, H. Ambient vibration monitoring. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. 2009