



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**“Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento”**

TESIS

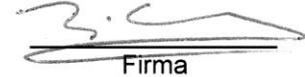
Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:  
**Daniel Rodríguez Naranjo**

Dirigido por:  
**Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández**  
**Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes**

**SINODALES**

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Presidente



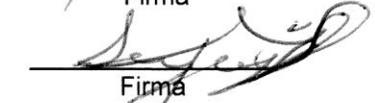
Firma

Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes  
Secretario



Firma

Dr. Aurelio Domínguez González  
Vocal



Firma

Dr. Moisés Guadalupe Arroyo Contreras  
Suplente

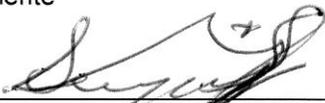


Firma

M. en C. Saúl Enrique Crespo Sánchez  
Suplente



Firma



Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad



Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Agosto de 2013  
México



## RESUMEN

En México, la fatiga en puentes es de especial interés por el hecho de que el inventario de puentes tiene una edad promedio cercana a los 40 años y, actualmente circulan tránsitos y cargas mucho mayores a las consideradas cuando fueron diseñadas tales estructuras. Desde el año 2009, cerca de un 70% de los puentes que se construyen en nuestro país son de concreto presforzado, por lo que cada día adquiere una mayor importancia el uso de este material en la infraestructura de México. Debido a estas razones, se propone un modelo metodológico para evaluar la evolución del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado bajo distintas condiciones de servicio y con diferentes condiciones de agrietamiento vertical en la viga más esforzada y con ello, pronosticar el deterioro que pueden sufrir estas estructuras a lo largo del tiempo y establecer medidas preventivas y planear estrategias de conservación para incrementar su vida útil. Para representar las condiciones reales de operación, las cargas vehiculares sobre el puente se simularon mediante el Método de Monte Carlo, utilizando datos estadísticos del tránsito y los pesos vehiculares en las carreteras mexicanas. Tales cargas fueron amplificadas por un factor de impacto, de acuerdo a las condiciones de superficie de rodamiento y se aplicaron al modelo de elemento finito de un puente tipo cuyas características son representativas del inventario de este país, para determinar los esfuerzos máximos en la viga más afectada, considerando varios escenarios de agrietamiento inicial y su posible crecimiento. Finalmente, se determinó la correlación entre el agrietamiento, el factor de impacto y el tráfico vehicular con el esfuerzo y el deterioro generado en el acero de presfuerzo, que rige el daño y por tanto la falla de tal elemento. Se observó que la fatiga en estas estructuras requiere de condiciones muy específicas para que sea determinante en su vida útil, aunque pueden ser susceptibles de agrietamientos por la presencia de defectos iniciales e iniciar otros mecanismos de deterioro en el acero de presfuerzo, que sumados a la fatiga pueden llevar a condiciones críticas el elemento estructural.



## SUMMARY

Fatigue in bridges is of special interest in Mexico because the bridges inventory is nearly 40 years old in average and nowadays there are much more and heavier vehicles than those considered when those structures were designed. Since 1999, prestressed concrete is used in near 70 percent of the bridges built in our country, and each day, the use of this material is more important in the Mexican infrastructure. Hence, a methodological model is proposed to evaluate the evolution of deterioration of a prestressed concrete bridge under different service conditions and initial cracking extensions at the center of the most stressed beam. Thereby, it is possible to prognosticate the deterioration of these structures and establish preventive actions or plan conservation strategies to increase its useful life. To represent real operation conditions, loading scenarios were simulated through Monte Carlo Method based on the load and traffic statistical distributions of Mexican highways. Those loads were amplified by an impact factor due to the surface road condition and were applied to a finite element model, which is representative to most bridges in Mexico, to calculate the maximum stresses in the beam of interest, considering different initial cracking scenarios and its possible growth. Finally, the influence of cracking size and traffic was correlated the stress and deterioration in the prestress steel, which is the most leading damage and most probable cause of damage for the beam. It was observed that fatigue in these structures requires very specific conditions to be determinant in its useful life, although it can be susceptible to cracking because of the presence of initial defects and to initiate other deterioration mechanisms in the prestressing steel, which in addition to fatigue, can lead the structural element to critical conditions.



## DEDICATORIAS

A Dios, que me brindó la vida, el apoyo, la fortaleza y las personas correctas en mi camino para cumplir esta nueva meta.

A mis padres, cuyo amor, esfuerzo y consejos me han permitido ser quien soy ahora y llegar hasta este punto de mi carrera.

A mis hermanos, que han respetado y apoyado mis decisiones y me han impulsado para cumplir con mis más importantes objetivos laborales, académicos y personales que me he planteado.

A mi novia y amigos, que han hecho mucho más especial mi camino y este logro en específico.



## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes y al M. en C. Saúl Enrique Crespo Sánchez, por la guía, apoyo y conocimiento que ofrecieron en todo momento para concluir satisfactoriamente este trabajo.

Al personal y compañeros tesistas de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, que amablemente brindaron su apoyo y valiosos consejos a lo largo de la elaboración de este proyecto.

Al Instituto Mexicano del Transporte y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, cuyo apoyo económico, en infraestructura y personal altamente capacitado, hicieron posible la ejecución de este trabajo de investigación.



## ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
I. INTRODUCCION	1
1.1 Hipótesis	6
1.2 Objetivo general	6
1.2.1 Objetivos particulares	7
II. REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1 Fatiga en vigas de concreto presforzado	10
2.2 Cálculo de esfuerzos en vigas de concreto presforzadas agrietadas	14
2.3 Agrietamiento de concreto por efectos de fatiga	18
2.4 Teoría de daño lineal o de Palmgren-Miner	21
2.5 Simulación Monte Carlo	22
2.6 Método de elemento finito	25
III. METODOLOGÍA	27
3.1 Identificación de características del puente de referencia	29
3.1.1 Características generales	29
3.1.2. Características estructurales	30
3.2 Modelación del puente tipo	33
3.3 Condiciones de tráfico vehicular	35
3.4 Simulación de escenarios de carga	37
3.5 Determinación del deterioro por fatiga	40



IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1 Distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes	45
4.2 Proyecciones de ciclos de carga	50
4.3 Crecimiento de grieta y deterioro en acero de presfuerzo	53
4.4 Conclusiones	60
LITERATURA CITADA	62
APÉNDICE A	A1
APÉNDICE B	A9
APÉNDICE C	A50
APÉNDICE D	A59
APÉNDICE E	A66
APÉNDICE F	A106



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
3.1	Resumen de las características geométricas y estructurales del puente tipo	30
3.2	Ubicación de las vigas en el modelo del puente tipo	35
4.1	Momento flexionante medio generado en las simulaciones de tráfico ante las distintas tasas de crecimiento vehicular y a diferentes edades	49
4.2	Proyecciones de tránsito diario para las diferentes tasas de crecimiento	50
4.3	Ciclos de carga generados diariamente, de acuerdo a las diferentes cantidades proyectadas de tránsito diario	51
4.4	Número de ciclos de carga diarios asociados a los diferentes períodos de servicio del puente, según las tasas de crecimiento consideradas	52
4.5	Proyección del número total de ciclos de carga para los diferentes períodos de servicio y tasas de crecimiento	52



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1.1	Momentos flexionantes máximos para cargas T3- S3 y T3-S2-R4 del Reglamento de Pesos y Dimensiones, HS-20 de las normas AASHTO y de pesos máximos registrados en aforos vehiculares de 1993 y 1996 (Rascón, 1999)	5
2.1	Esfuerzos en una sección transformada agrietada (Mast, 1998)	16
2.2	Distribuciones de frecuencia de carga Q y resistencia R de estructuras (Salmon, 1996)	25
3.1	Diagrama de flujo de la metodología del proyecto	28
3.2	Sección transversal del puente tipo	31
3.3	Dimensiones y ubicación del acero de refuerzo y presfuerzo de las vigas del puente tipo	32
3.4	Distribución del refuerzo por cortante y del acero de presfuerzo	32
3.5	Elementos finitos de la losa de tráfico del puente tipo	33
3.6	Distribución de las vigas en el diseño original y en el modelo del puente tipo	34
3.7	Ubicación de la viga analizada por efectos de fatiga	40
4.1	Distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes en el punto de interés para una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 2%, (a) tráfico actual (b) 10 años, (c) 20 años, (d) 30 años y (e) 40 años	46
4.2	Distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes en el punto de interés para una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 4%, (a) tráfico actual (b) 10 años, (c) 20 años, (d) 30 años y (e) 40 años	47
4.3	Distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes en el punto de interés para una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 6%, (a) tráfico actual (b) 10 años, (c) 20 años, (d) 30 años y (e) 40 años	48
4.4	Momento flexionante medio generado en las simulaciones de tráfico ante las distintas tasas de crecimiento vehicular y a diferentes edades	49
4.5	Ciclos de carga generados diariamente, de acuerdo a las diferentes cantidades proyectadas de tránsito diario	51
4.6	Proyección de crecimiento de grieta en la viga más esforzada del puente de referencia considerando condiciones promedio de la superficie de rodamiento y diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular	54



4.7	Proyección de crecimiento de grieta en la viga más esforzada del puente de referencia considerando una grieta inicial de 0.1 cm, condiciones pobres de la superficie de rodamiento y diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular	54
4.8	Proyección de deterioro del acero de presfuerzo considerando una grieta inicial de 0.1 cm, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular, calculando crecimiento de grieta.	55
4.9	Proyección de deterioro del acero de presfuerzo considerando una grieta inicial de 0.1 cm, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular, calculando crecimiento de grieta	55
4.10	Proyección de deterioro del acero de presfuerzo ante diferentes tamaños permanentes de grieta, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 4%	58
4.11	Proyección de deterioro del acero de presfuerzo ante diferentes tamaños permanentes de grieta, condiciones pobres de la superficie de rodamiento y una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 2%	58
4.12	Proyección de deterioro del acero de presfuerzo ante diferentes tamaños permanentes de grieta, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 4%	59
4.13	Proyección de deterioro del acero de presfuerzo ante diferentes tamaños permanentes de grieta, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 6%	59



## I. INTRODUCCIÓN

El diseño de toda estructura se basa en la premisa de que tal construcción debe ser capaz de cumplir con las funciones que está destinada a desempeñar, absorbiendo adecuadamente las solicitaciones que se presenten en cualquier etapa de su vida útil (Meli, 1985). Sin embargo todas ellas siempre serán susceptibles de sufrir un deterioro gradual y acumulativo a lo largo de su etapa de servicio, a un grado tal, que en años recientes, el monitoreo, reparación y restauración de estructuras existentes tales como edificios y puentes se ha convertido en uno de los más importantes retos en la ingeniería civil (Sain y Chandra Kishen, 2007).

Por sus condiciones de servicio, los puentes se encuentran sometidos a constantes ciclos de carga y descarga debido al paso de los vehículos que circulan sobre ellos, lo cual los hace susceptibles a sufrir deterioro por fatiga, un fenómeno que se presenta como un cambio micro estructural gradual y permanente en los materiales debido a la aplicación repetitiva de cargas. Su importancia radica en el hecho de que, aunque el esfuerzo nominal se encuentre por debajo del límite de fluencia del material, los esfuerzos locales cerca del extremo de una falla pueden ser lo suficientemente altos para causar su propagación, haciendo que eventualmente la estructura llegue a su colapso (Ray y Chandra Kishen, 2010).

Desde el año 2009, cerca de un 70% de los puentes que se construyen en México son de concreto presforzado (SIPUMEX, 2010), por lo que cada día adquiere una mayor importancia el uso de este material en la infraestructura de este país. Esta popularidad se debe a las condiciones mejoradas que ofrece con respecto al concreto reforzado, permitiendo librar claros mayores y usarlo en múltiples aplicaciones estructurales (Nilson, 1990); sin embargo, tal material también es susceptible de sufrir deterioro a través del tiempo.



Uno de los mecanismos de deterioro más importantes en estas estructuras es el de fatiga, que ha sido estudiado por múltiples investigadores (Paulson, 1983; Overman, 1984; Wollman et al., 1988; Muller y Dux, 1994; Heller, 2003; Hagenberger, 2004), encontrando dos aspectos muy importantes de este fenómeno: en la gran mayoría de los casos la falla de las vigas bajo estas cargas se relaciona con la fatiga en el acero de presfuerzo, además se ha reportado que la aplicación de cargas cíclicas no suele ser un problema para vigas de concreto presforzado, debido a que los ciclos de carga aplicados habitualmente a estos elementos provocan pequeños incrementos de los esfuerzos a tensión en el acero de presfuerzo, que no son capaces de generar deterioro; sin embargo, si ocurre agrietamiento vertical del concreto, el acero de presfuerzo es sujeto a significativos incrementos de magnitud de esfuerzos donde se localiza tal agrietamiento y las cargas cíclicas pueden resultar en fallas por fatiga en los tendones (Wollman et al., 1988).

El agrietamiento en las vigas de concreto presforzado se puede dar por causas muy diversas, ya sea durante su período de servicio o inclusive durante su fabricación. Se ha observado en algunas vigas de este material que se han formado grietas previas a la liberación de la fuerza pretensora, las cuales comienzan en el extremo superior y se extienden hacia el borde inferior, penetrando inclusive en varios casos a lo largo de todo el peralte (Wyffels et al., 2000). Por otro lado, también se puede desarrollar agrietamiento por flexión, generado por sobrecargas o inclusive por cargas regulares de servicio, considerando que se puede generar por efectos de fatiga si los elementos estructurales soportan cargas que producen esfuerzos de tensión en el concreto de aproximadamente  $6.0 \sqrt{f'_c}$  (Overman et al., 1984), que es el límite de esfuerzos en la fibra extrema del concreto pre-comprimido que permite el reglamento norteamericano para el diseño de puentes, elaborado por la American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO (AASHTO, 1993).



Por su parte, el agrietamiento de concreto por efectos de fatiga también ha sido abordado ampliamente (Perdikaris et al. 1987; Bazant y Xu, 1993; Slowik, 1996; Sain y Chandra, 2007; Ray y Chandra, 2010). Sus modelos de crecimiento de grieta han sido utilizados para predecir el deterioro por fatiga por efectos de tráfico en puentes (Crespo, 2011), sin embargo, ha sido únicamente para aquellos construidos con concreto reforzado, cuya ausencia de una fuerza de presfuerzo provoca un comportamiento y mecanismos de deterioro diferentes a los que se presentan en elementos de concreto presforzado.

En México, hasta hoy en día no se cuenta con un reglamento propio para el diseño y revisión de puentes. A partir de los años noventa se han hecho esfuerzos por crear una serie de recomendaciones sobre los vehículos de diseño y otras disposiciones para el diseño de éstas estructuras (Rascón et al., 1997), sin embargo, aún no han desembocado en la creación de un reglamento nacional, de modo que se utilizaron por mucho tiempo las cargas vehiculares establecidas en las normas AASHTO vigentes (Fernández y Ayala, 2000). Y por otro lado, el tamaño y la capacidad de los camiones o vehículos de carga han evolucionado considerablemente.

Esta situación llevó a que en México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en el año de 1980 publicara por primera vez un reglamento de pesos y dimensiones permisibles para los vehículos de carga que circulan por las carreteras de nuestro país, mismo que ha sufrido pequeñas modificaciones y actualizaciones a través de nuevas publicaciones, como la de 1995, que figuró como la Norma Oficial Mexicana NOM-12-SCT-2-1995 (SCT, 1995). El objetivo de esta acción fue la de regular el peso con el que circulan todos los vehículos en nuestro país e inclusive más tarde también se volvió un parámetro para el diseño de puentes en nuestro país (Fernández y Ayala, 2000). A pesar de lo anterior, el problema de la circulación de vehículos que exceden su peso autorizado no pudo



ser mitigado, al grado que en aforos del año de 1993, en carreteras de nuestro país, se encontró que alrededor de un 50% de los tractocamiones de configuraciones T3-S3 y T3-S2-R4, que son de los vehículos más comunes y pesados de las distintas clasificaciones, circulan con un peso superior al autorizado por el Reglamento de Pesos y Dimensiones (Rascón et al., 1997).

Todas estas circunstancias se conjugan afectando mayormente a todos aquellos puentes que fueron diseñados aún con el Reglamento AASHTO, ya que su vehículo de diseño, el denominado HS-20 produce momentos flexionantes por debajo de los ocasionados por vehículos tipo T3-S3 y T3-S2-R4 del Reglamento de Pesos y Dimensiones de nuestro país y mucho menores comparados con los que producen los tractocamiones más pesados que circulan por las carreteras del país de las configuraciones mencionadas (Figura 1.1). Es decir, estas estructuras están siendo sometidas a cargas que no fueron consideradas en el diseño, que, por tanto, pueden ocasionar un deterioro más acelerado del previsto inicialmente, haciendo de especial interés los efectos del deterioro por fatiga.

Ante el escenario descrito para este grupo de puentes de concreto presforzado en nuestro país, surge la necesidad de proponer un modelo a través del cual se pueda evaluar el deterioro por fatiga de estas estructuras ante distintos grados de agrietamiento en la sección transversal, así como su posible crecimiento debido a los ciclos de carga y su influencia en el daño por este mismo fenómeno en el acero de presfuerzo, propiciado por los altos esfuerzos cíclicos provocados por vehículos significativamente más pesados a las cargas consideradas en el diseño. De modo que sea posible planear de manera anticipada los programas de mantenimiento en estas estructuras según la predicción de vida por fatiga para las distintas condiciones posibles de agrietamiento en los elementos estructurales.

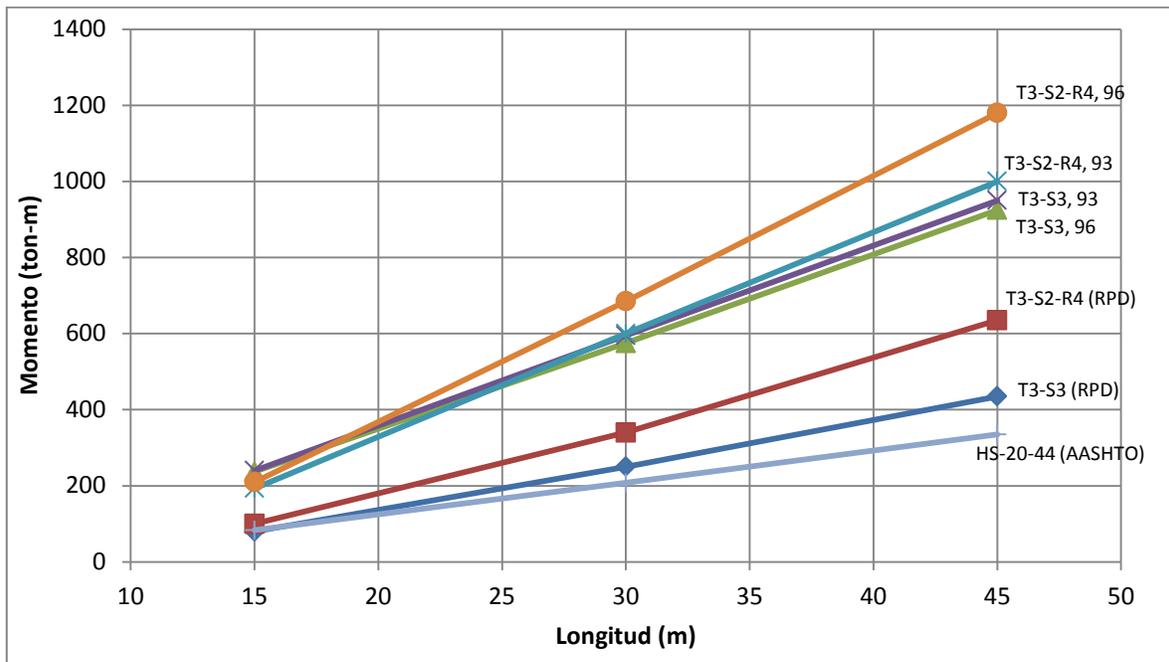


Figura 1.1 Momentos flexionantes máximos para cargas T3- S3 y T3-S2-R4 del Reglamento de Pesos y Dimensiones, HS-20 de las normas AASHTO y de pesos máximos registrados en aforos vehiculares de 1993 y 1996 (Rascón, 1999)

Existen múltiples técnicas de inspección no destructivas y se clasifican según el tipo de efecto que pueden identificar, la localización de éste o el tipo de energía que emplean para causar la respuesta de la pieza examinada; por lo que es necesario contar con la información y los conocimientos acerca de la técnica para elegir la más adecuada para cada caso (Carrión et al., 2003). Por otro lado, a pesar de que los costos, así como la duración o necesidad de operadores para cada técnica son muy variados, su aplicación conlleva una planificación, administración de información e interpretación de resultados que requieren de trabajo y de personal calificado para llevar a cabo la tarea de manera exitosa, por lo cual es necesario hacer de manera tan eficiente como sea posible la programación de estas actividades, de modo que se establezcan tiempos adecuados para minimizar el número de eventos y por ende los gastos, mediante la predicción adecuada del grado de deterioro de la estructura a través del tiempo.



La aplicación de modelos probabilísticos de deterioro, combinada con el uso de tecnologías no destructivas para la inspección de estructuras, constituye una poderosa herramienta en el mantenimiento y administración del sistema de infraestructura. Con la información obtenida y el análisis de las condiciones de operación, incluyendo las propiedades del material y el diseño, se establece qué tan crítico es el daño por fatiga en el acero de presfuerzo que provocaría el nivel de agrietamiento y en caso de no serlo, predecir su comportamiento y estimar cuánto transcurrirá para que lo sea. De esa manera se puede definir un tiempo de vida útil o establece un período de inspección que permite dar seguimiento al desarrollo de las grietas y fijar los programas de mantenimiento (Carrión et al., 2003).

## **1.1 Hipótesis**

Con base en modelos de vida por fatiga por alto número de ciclos de carga de acero de presfuerzo y fundamentos de Mecánica de la Fractura de concreto, es posible pronosticar el nivel de daño por fatiga de un puente de concreto presforzado suponiendo su agrietamiento inicial y condiciones de servicio, simulando escenarios de carga con el Método Monte Carlo basado en datos estadísticos de flujo vehicular en carreteras federales de nuestro país.

## **1.2 Objetivo general**

Establecer un modelo metodológico para la predicción del deterioro estructural de puentes de concreto presforzado por efectos de fatiga debido al tráfico vehicular en carreteras de México, suponiendo la presencia de agrietamiento vertical de su sección transversal.



### 1.2.1 Objetivos particulares

- Identificar los parámetros geométricos y estructurales que sean representativos del conjunto de puentes de concreto presforzado de la Red Federal de Carreteras de acuerdo a los códigos o criterios de diseño utilizados para establecer los requisitos que debe cumplir un modelo de diseño de puentes tipo en base a las normas vigentes.
- Obtener los esfuerzos críticos en la superestructura del puente diseñado ante diferentes escenarios de carga generados por Simulación Monte Carlo en base a estudios de aforo y pesos vehiculares en la Red Federal de Carreteras de nuestro país.
- Calcular el factor de intensidad de esfuerzos que se genera ante la presencia una grieta vertical utilizando un modelo de Mecánica de la Fractura.
- Evaluar el daño acumulado ocasionado por los ciclos de esfuerzos a través del uso de la Regla de Daño Lineal con base en un modelo de vida por fatiga de vigas de concreto presforzado y analizar otros modelos de Mecánica de la Fractura tomando en cuenta la presencia de agrietamiento.



## II. REVISIÓN DE LITERATURA

Se ha observado que la vida por fatiga de las vigas de concreto presforzado está regida por el comportamiento del acero de presfuerzo ante cargas cíclicas (Hagenberger, 2004), por lo que la mayoría de estudios son dirigidos específicamente a la fatiga de este material. Debido a que los puentes se someten a un gran número de ciclos de carga y descarga, que provocan esfuerzos relativamente pequeños comparados con la resistencia última del acero de presfuerzo, la teoría de deterioro por fatiga por alto número de ciclos ha sido aceptada y utilizada para estos elementos, manejada a través de las curvas S-N, según se puede ver más adelante.

Una de los métodos más utilizados para calcular el deterioro de un elemento a partir de su curva S-N es a través de la Regla de Daño Lineal, que establece que el daño es acumulativo y que la falla de un elemento que trabaja bajo un estado de carga de amplitud  $S_I$ , se produce cuando se alcanzan  $N_I$  ciclos. Si el número  $n_I$  de ciclos operando bajo ese nivel de cargas es  $n_I < N_I$ , no se producirá la falla, sino una fracción de daño  $D_I$  (Ruiz, 2003). Este método puede ser aplicado a estructuras cuyos ciclos de carga son de amplitud variable, como es el caso de los puentes vehiculares.

Sin embargo, se ha reportado que generalmente el deterioro por fatiga en el acero no representa un problema en elementos de concreto presforzado que no han sufrido de agrietamiento (Wollman et al., 1988), de modo que la presencia de grietas en el concreto afecta sustancialmente su vida útil por fatiga. Esto se debe principalmente a que, en la localización de la grieta, el acero de presfuerzo es sujeto a un incremento sustancial de esfuerzos ante la aplicación de cargas, ya que la sección transversal cambia totalmente su geometría y, por lo tanto, la ubicación de su eje neutro, de modo que el concreto deja de absorber tensiones en la zona inferior a tal eje (Wollman et al., 1988).



Debido a la importancia del agrietamiento en el deterioro por fatiga de este material compuesto, es necesario aplicar un modelo adecuado de crecimiento de grieta en el concreto, el cual tome en cuenta variables como la historia y secuencia de carga, el efecto de aceleración de las sobrecargas y el tamaño del espécimen, etc. Una vez determinado el tamaño de la grieta existente, se debe hacer el cálculo adecuado de esfuerzos a los diferentes niveles de la sección parcialmente agrietada.

Por otro lado, para simular la demanda a la que se encuentra sometido el puente, se observa que se tienen múltiples variables, tales como las configuraciones vehiculares, condiciones de carga y los pesos brutos vehiculares; así que, es necesario recurrir a un método de simulación que conjugue todas estas variables para obtener la distribución probabilística de las magnitudes de las cargas que imprime el tráfico vehicular. Un método apropiado para este propósito es el Monte Carlo, que consiste en simular un fenómeno estocástico en forma pseudo-aleatoria basada en información probabilística del mismo. Para esto, se desarrolla un programa de cómputo que realice tales pruebas pseudo-aleatorias y las repita  $N$  veces de modo que cada experimento sea independiente de los restantes y analice los resultados en forma estadística (Aranguren y Muzachiodi, 2003).

Para determinar las fuerzas internas de la estructura, generadas por la simulación de escenarios de carga, así como los elementos y los puntos en los que se presentan los ciclos de carga más altos se recurre al Método de Elemento Finito, con el cual se modela la estructura como un ensamble de elementos más pequeños y con geometría más simple y que permite analizar la estructura más fácilmente que hacerlo con la configuración original. El método implica aproximar una solución más compleja con la de un modelo que consiste en soluciones simples para elementos continuos ligados entre sí (Cook et al., 1989).



## 2.1 Fatiga en vigas de concreto presforzado

El deterioro por fatiga en vigas de concreto presforzado es un fenómeno que se ve afectado principalmente por el comportamiento del acero de presfuerzo ante cargas cíclicas, ya que los diseños generalmente consideran que la fatiga en estos miembros estructurales no está gobernada por la resistencia del concreto (Hagenberger, 2004), bajo condiciones normales de servicio. Es por ello que muchas investigaciones al respecto centran su atención en la fatiga de los cables de presfuerzo y por ende en la magnitud de los esfuerzos que ejercen las cargas cíclicas directamente sobre ellos.

Existen tres teorías principales que estudian la fatiga (Badiola, 2004):

- Fatiga de bajo número de ciclos; la cual se emplea, como su nombre lo dice, cuando se desarrolla un bajo número de ciclos de carga ( $<10^3$ ) antes de la falla del elemento. Utiliza el estudio de deformaciones, es decir establece curvas de deformación-ciclos ( $\epsilon$ -N), que formulan una predicción de vida útil a partir de la amplitud de tales deformaciones. Esta formulación es apropiada para situaciones en los que se desarrolla una deformación plástica, es decir, cuando se alcanzan niveles de tensión altos.
- Mecánica lineal de la fractura; en la que se considera que la grieta ya está iniciada y, por lo tanto, la vida se calcula como la propagación de tal grieta hasta llegar a la falla.
- Teoría clásica o teoría de alto número de ciclos (S-N); que se emplea cuando se desarrollan elevados números de ciclos ( $>10^3$ ) antes de la falla y que, por ende, se dan en el régimen elástico. Otras de sus principales características es que no se distingue entre una fase de iniciación y otra de propagación, sino que se obtiene la vida total hasta la falla del elemento, para ello utiliza curvas S-N, que estiman la vida a partir de la amplitud de tensiones y que son construidas en base a un gran número de datos experimentales.



Los puentes son estructuras sometidas a un gran número de ciclos de carga y descarga a lo largo de su vida útil, lo que hace ver que los esfuerzos que provoca el flujo vehicular sobre el acero de presfuerzo son relativamente pequeños, comparados con su resistencia última, lo cual se podrá ver más adelante con los resultados de esta investigación. De modo que se puede considerar que la teoría de alto número de ciclos, a través de las curvas S-N, resulta apropiada para calcular el deterioro en estas estructuras, específicamente en el acero de presfuerzo.

Las gráficas S-N relacionan los esfuerzos, S, contra el número de ciclos para llegar a la falla, N, graficados en escala logarítmica. Para construir las se aplica un gran número de esfuerzos a una probeta del material de interés, las cuales se pueden llevar hasta  $10^7$  ciclos e incluso  $5 \times 10^8$  ciclos para materiales no ferrosos, haciendo destacar que suelen hacerse para un esfuerzo medio  $\sigma_m$ , específico (Campbell, 2008). Sin embargo, los efectos de este esfuerzo medio son muy importantes y su aumento generalmente causa reducción en la vida por fatiga de los elementos (Liu y Mahadevan, 2005; Campbell, 2008).

Para tomar en cuenta el efecto de la tensión media sobre el comportamiento a fatiga del material de interés, se pueden utilizar las correcciones de Goodman, Gerber o Soderberg (Real et al. 2005), que relacionan la amplitud de tensiones  $\Delta\sigma$ , obtenida para una cierta tensión media  $\sigma_m$ , con la que causaría la misma vida a fatiga estando sometida a una tensión media igual a cero,  $\Delta\sigma_0$ , según la siguiente expresión:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_R} \right)^n \right] \quad (\text{Ec. 1})$$

donde  $\sigma_R$  es la resistencia del material a tensión y  $n$  toma el valor de 1 para la corrección de Goodman y 2 en la de Gerber. De ambas expresiones se ha observado que la más utilizada es la de Goodman, que adicionalmente considera



que las tensiones medias compresivas no afectan a la vida a fatiga, mientras el criterio de Gerber no es recomendado para materiales frágiles (Badiola, 2004).

Adicionalmente, cabe destacar que las pruebas suelen realizarse con probetas con características particulares, las cuales pueden diferir de las encontradas en un elemento cualquiera, afectando su vida por fatiga. Para relacionar el límite de resistencia a fatiga,  $\sigma_e$ , de un espécimen con los resultados de límite de resistencia a la fatiga obtenidos con probetas de ensayo,  $\sigma'_e$ , se usa una fórmula que incluye los distintos factores correspondientes a las diferentes características de los elementos (Badiola, 2004):

$$\sigma_e = [K_a \cdot K_b \cdot K_q \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_g \cdot K_c] \sigma'_e \quad (\text{Ec. 2})$$

donde  $K_a$  es el factor de superficie,  $K_b$  el de tamaño,  $K_q$  el de carga,  $K_d$  el de temperatura,  $K_e$  el de concentración de tensiones,  $K_g$  el de efectos diversos (esfuerzos residuales, temple superficial, corrosión, recubrimientos electrolíticos, metalizado por aspersion, etc.) y  $K_c$  es el de confiabilidad.

Por su parte, el comportamiento del acero de alta resistencia, usado para aplicar fuerzas de presfuerzo al concreto, ante pruebas de fatiga fue estudiado ampliamente por Paulson, que realizó más de 700 ensayos con cables sujetos únicamente en sus extremos (Paulson, 1983), cuyos resultados son expresados a través de una fórmula que representa el número de ciclos que soporta un cable ante la aplicación de cargas cíclicas a un nivel de esfuerzos dado:

$$\text{Log } N = 11.45 - 3.5 \log S_r \quad (\text{Ec. 3})$$

donde  $S_r$  es el nivel de esfuerzos aplicado sobre los cables de presfuerzo y  $N$  es el número de ciclos necesarios para llegar a la falla.

El modelo de Paulson (1983) se propuso considerando esfuerzos mínimos de entre 105 y 160 kilolibras sobre pulgada cuadrada, por lo cual pudiera resultar aceptable para el acero de presfuerzo dentro de las vigas de concreto presforzado, ya que se someten a rangos de esfuerzos iniciales muy similares, sin



embargo las condiciones para un cable aislado y uno embebido en concreto son diferentes, especialmente por la interacción entre ambos elementos, por lo cual Hagenberger (2004) se dio a la tarea de realizar pruebas en múltiples vigas y a recopilar datos de diversas investigaciones, con lo cual propuso un modelo que se ajusta satisfactoriamente al comportamiento del acero en estos elementos estructurales. Tal modelo se ilustra con la siguiente expresión:

$$\text{Log}(N) = 8.8 - 2.3\text{Log}(S_r) \quad (\text{Ec. 4})$$

y establece que el nivel de esfuerzos en el acero de presfuerzo,  $S_r$ , debe ser mayor de 5 kilolibras sobre pulgada cuadrada, ya que un esfuerzo menor se considera que no ocasiona daño por fatiga en la viga.

Como ya se había mencionado, la presencia de grietas en el concreto afecta sustancialmente la vida útil por fatiga en vigas de concreto presforzado, ya que, en la localización de la grieta, el acero de presfuerzo es sujeto a un incremento sustancial de esfuerzos ante la aplicación de cargas (Wollman et al., 1988), además de que en la localización de las grietas el acero y el concreto no se deforman a la par, de modo que se puede perder adhesión entre ellos en la zona cercana y los cables se pueden ver afectados al presentarse abrasión con el concreto en cada ciclo de carga.

Cabe destacar que las pruebas ejecutadas por Hagenberger (2004), así como la información que obtuvo de trabajos de otros investigadores son en su gran mayoría de vigas que fallaron a cargas cíclicas una vez que ya tenían un cierto grado de agrietamiento, por lo que su modelo propuesto de vida de vigas a fatiga considera intrínsecamente los fenómenos ocasionados por el agrietamiento del concreto que afectan al acero de manera secundaria a los esfuerzos provocados por los ciclos de carga. Es decir, este modelo es aceptable para calcular la vida útil por fatiga de elementos que tienen un agrietamiento previo, sin embargo, es muy importante calcular de manera adecuada los niveles de esfuerzos bajo los que trabajan los cables de presfuerzo ante cada carga, ya que



la vida por fatiga del elemento estructural está gobernado por el comportamiento a cargas cíclicas del acero de presfuerzo, tal como se expresa en el modelo de Hagenberger (2004), el cual relaciona el nivel de esfuerzos en tales cables contra el número de ciclos para llegar a la falla.

## 2.2 Cálculo de esfuerzos en vigas de concreto presforzadas agrietadas

El concreto presforzado pretensado es un mecanismo cuyo uso es recomendado principalmente para vigas con claros menores a los 27 metros debido a las ventajas económicas y constructivas que representa sobre todo para tales longitudes (Gaytán, 1999). En nuestro país la longitud promedio de los puentes de concreto presforzado en las carreteras federales no supera los 24 metros (SIPUMEX, 2010), por lo que el pretensado es una técnica que resulta favorable para la fabricación de las vigas que componen estos puentes.

El pretensado es una técnica que implica la transmisión de la fuerza de presfuerzo por adhesión entre el concreto y el acero, por lo que el cálculo del nivel de esfuerzos en los cables de una sección no agrietada parte de la premisa de que tanto el acero como el concreto que lo cubre tienen una deformación idéntica ante la aplicación de carga, es decir, siguen una ley de compatibilidad de deformaciones. Así que la determinación de tal esfuerzo implica una relación entre esfuerzos y deformaciones, de modo que se convierta el esfuerzo en el concreto ( $\sigma_c$ ) a un esfuerzo en el acero ( $\sigma_p$ ):

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_c \times \frac{E_p}{E_c} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde  $E_p$  y  $E_c$  son los módulos de elasticidad del acero y del concreto respectivamente.

A diferencia del concreto reforzado común, en vigas de concreto presforzado el cálculo de esfuerzos es más complejo, ya que la ubicación del eje



neutro y las propiedades de la sección efectiva dependen no sólo de la geometría de la sección transversal y las propiedades del material, sino también de la fuerza pretensora axial y de la carga (Nilson, 1990). Asimismo, es importante entender que el agrietamiento de estos elementos no causa cambios en los estados de esfuerzos cuando se presentan cargas que no son capaces de eliminar el esfuerzo de compresión causado por la fuerza de presfuerzo, de modo que para cargas mayores se considera que la porción de carga que provoca que el concreto llegue a un esfuerzo nulo actúa sobre una sección sin agrietamiento y la carga adicional es la que actúa sobre la sección agrietada (Wyffels et al., 2000).

De acuerdo con la técnica concebida por Mast (1998), se recurre a un proceso iterativo para calcular esfuerzos en una sección agrietada de concreto presforzado, en el cual se asume una profundidad “ $c$ ” del eje neutro de la sección, después se determinan las propiedades de la sección agrietada, revisando los esfuerzos en la localización asumida del eje neutro. En caso de que el esfuerzo no sea cero se vuelve a proponer otra localización del eje neutro, hasta que se llegue a tal esfuerzo nulo.

Para comenzar el análisis se asume una profundidad de prueba,  $c$ , del eje neutro de la sección transformada agrietada. Las fuerzas actuantes son la fuerza de presfuerzo,  $P$ , actuando al nivel de los tendones y un momento flexionante,  $M_{ext}$ , causado por cargas externas. Tales fuerzas deben ser convertidas a una fuerza axial,  $P_e$  y un momento flexionante interno,  $M_{int}$ , actuando en el centro de gravedad de la sección transformada agrietada (Figura 2.1). Este momento interno es igual al momento externo menos “ $P$ ” veces la distancia entre la ubicación de esta fuerza axial y el centro de gravedad de la sección transformada agrietada.

Posteriormente se calcula el esfuerzo resultante a la altura del eje neutro, el cual es igual a:

$$f_{na} = \frac{P_e}{A_{sa}} - \frac{M_{int}y_{na}}{I_{sa}} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde  $y_{na}$  es la distancia entre el centro de gravedad de la sección transformada agrietada y la profundidad del eje neutro,  $I_{sa}$  es el momento de inercia de la sección transformada agrietada y  $A_{sa}$  es igual al área de su sección transversal.

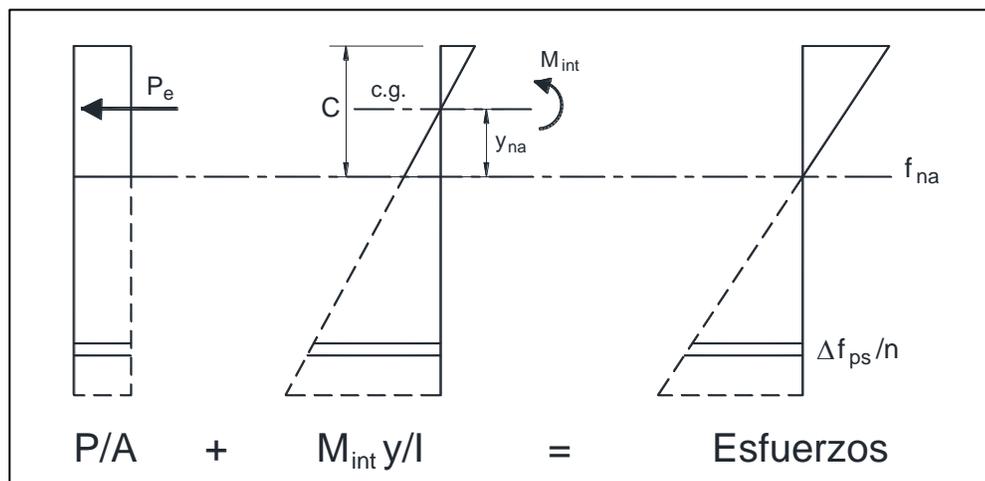


Figura 2.1 Esfuerzos en una sección transformada agrietada (Mast, 1998)

Tal esfuerzo debe ser igual a cero y en caso de no ser así se propone una nueva profundidad  $c$ .

Para un análisis de sección transformada el nivel de presfuerzo en tendones pretensados debe ser tomado como el esfuerzo que existiría en ellos para que el esfuerzo en el concreto adyacente, al mismo nivel de los cables, sea igual a cero.

En el caso de secciones compuestas la situación es un poco más complicada que para el caso de secciones simples, ya que el presfuerzo y una parte del momento flexionante causado por carga muerta es usualmente aplicado únicamente a la sección de la viga simple, lo cual crea esfuerzos sobre esta



sección, pero no en la sección transversal de la losa. Esto causa una discontinuidad en esfuerzos y deformaciones en la interfase de ambos elementos y esta discontinuidad permanece cuando se aplican cargas adicionales sobre la viga de sección compuesta. La solución es trabajar con propiedades de la viga compuesta y aplicar todas las fuerzas y momentos a la sección compuesta, lo cual requiere de modificar las fuerzas y momentos aplicados a la sección de la viga simple por una fuerza y momento equivalente, aplicado a una viga compuesta. Esta fuerza y momento equivalente deben producir esfuerzos en la porción de la viga simple de la sección compuesta que sean iguales a los esfuerzos actuales en la viga sin losa de tráfico.

Una vez localizada la profundidad del eje neutro de la sección agrietada, así como las propiedades de tal sección transformada es posible calcular los esfuerzos finales a las profundidades de interés. Específicamente el esfuerzo generado a la profundidad del acero de presfuerzo se define como:

$$\sigma_{pf} = M_{int} \left( \frac{d_p - y_t}{I_{sa}} \right) - \frac{P_e}{A_{sa}} \quad (\text{Ec. 7})$$

donde  $d_p$  es igual a la distancia de la fibra extrema superior de la sección compuesta a la profundidad del acero de presfuerzo y  $y_t$  es la distancia de tal fibra extrema superior al centro de gravedad de la sección transformada agrietada.

Finalmente, como ya se mencionó, este esfuerzo es multiplicado por la relación entre los módulos de elasticidad del acero y del concreto para conocer el esfuerzo final en el acero de presfuerzo. Asimismo, si se desea conocer la variación de esfuerzos entre sus estados de carga, es necesario calcular su esfuerzo inicial según las fórmulas convencionales para secciones de concreto presforzado y compararlo con este esfuerzo final.



### 2.3 Agrietamiento de concreto por efectos de fatiga

El agrietamiento del concreto en puentes vehiculares se puede dar por diversos motivos, entre ellos, los cambios de temperatura y la contracción del concreto, las sobrecargas o los eventos accidentales, o bien, por la fatiga, que ocasiona el paso de vehículos. De este modo, las estructuras son afectadas por los distintos mecanismos de deterioro y producen diferentes grados de agrietamiento a lo largo de su vida útil; lo que, en el caso de concreto presforzado, ocasiona que la evolución de las secciones agrietadas permitan distintos niveles de esfuerzos sobre los cables de presfuerzo, ante un nivel de carga dado durante distintas etapas de su vida útil, afectando directamente el avance del deterioro.

Uno de los primeros y más conocidos modelos de crecimiento de grieta ante cargas cíclicas es el desarrollado por Paris (Paris y Erdogan, 1960) que se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^n \quad (\text{Ec. 8})$$

donde  $a$  es la longitud de la grieta,  $N$  es el número de ciclos, los factores  $C$  y  $n$  son constantes del material y  $\Delta K_I$  es el valor de la amplitud cíclica del factor de intensidad de esfuerzos, es decir  $\Delta K_I = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n}$ . En la teoría de la mecánica de la fractura este valor está relacionado con las condiciones de carga,  $\sigma$ , el tamaño de grieta,  $a$ , y la geometría del componente,  $\beta$ ; según lo indica la siguiente expresión (Carrión et al., 2003):

$$K = \sigma\sqrt{\pi a\beta} \quad (\text{Ec. 9})$$

Cabe destacar que, según pruebas experimentales, el comportamiento de una grieta ante cargas cíclicas comienza de manera estable, pero llega a un punto en el que su crecimiento se vuelve inestable y es asociado al momento de fractura o falla total. Tal punto se define con un valor crítico de intensidad de esfuerzos,  $K_C$ , que depende de las propiedades del material. El tamaño de grieta crítico se



obtiene con las condiciones de carga, la geometría del componente y el valor de intensidad de esfuerzo crítico (Carrión et al., 2003).

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_c}{\sigma\beta} \right)^2 \quad (\text{Ec. 10})$$

El fenómeno del crecimiento de grieta por fatiga es un tema que sigue estudiándose por múltiples investigadores, lo cual ha generado la creación de nuevos modelos, que en general surgen a partir de la propuesta de Paris. Uno de esos modelos es el que establecieron Bažant y Xu (1993), haciendo un ajuste por el tamaño de la estructura:

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{\Delta K_I}{K_{Ic}} \right)^n \quad (\text{Ec. 11})$$

donde

$$K_{Ic} = K_{If} \left( \frac{\beta}{1+\beta} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \beta = \frac{d}{d_0} \quad (\text{Ec. 12})$$

donde, a su vez,  $K_{If}$  es la tenacidad a la fractura de una estructura infinitamente rígida,  $d$  es la dimensión característica de la estructura y  $d_0$  es una constante empírica, que es diferente para los casos de fatiga y para carga estática. En este caso se demostró que para concretos normales y de alta resistencia la constante  $C$  no necesita ser ajustada por tamaño si ya lo ha sido  $\Delta K_I$ .

De la misma manera se siguieron haciendo trabajos y propuestas de modelos de propagación de grietas; sin embargo no tomaban en cuenta la historia de cargas, lo cual es muy importante en puentes vehiculares, ya que los ciclos de carga a los que son sometidos son de rangos muy variables y existen sobrecargas por el paso de vehículos muy pesados que pueden afectar considerablemente el crecimiento de las grietas.

La influencia de la historia y secuencia de carga, el efecto de aceleración de las sobrecargas y los efectos del tamaño del espécimen son conjuntados en un modelo de crecimiento de grieta en concreto a fatiga en la propuesta de Slowik



(1996), en la cual se describe el incremento en la longitud de una grieta en una región anterior a la presencia de una sobrecarga significativa ( $K_I < K_{Ic}$ ) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{K_{I_{max}}^m \Delta K_I^n}{(K_{Ic} - K_{I_{sup}})^p} + f(a, \Delta\sigma) \quad (\text{Ec. 13})$$

donde  $K_{I_{sup}}$  es el máximo factor de intensidad de esfuerzos nunca alcanzado por la estructura en su anterior historia de carga,  $f(a, \Delta\sigma)$  es una función que toma en cuenta el repentino crecimiento de longitud de la grieta causado por una sobrecarga y puede ser obtenida para ciertas geometrías del espécimen cargándolo y descargándolo a múltiples niveles de carga en la región previa a una sobrecarga y calculando las longitudes equivalentes de la grieta a las correspondientes condiciones diferentes,  $K_{Ic}$  es la tenacidad a la fractura,  $m$ ,  $n$  y  $p$  son constantes del material y  $C$  es una constante que depende de la geometría y el tamaño del espécimen, la cual queda definida como:

$$C = \left(-2 + 25 \frac{L}{l_{ch}}\right) mm/ciclo \quad (\text{Ec. 14})$$

donde, a su vez,  $L$  es la longitud de ligamiento y  $l_{ch}$  es la longitud característica de la probeta:

$$l_{ch} = \frac{EG_f}{f_t^2} \quad (\text{Ec. 15})$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad del concreto,  $f_t$  es su resistencia a tensión y  $G_f$  es la energía específica de fractura.

Recientemente, el modelo de Slowik se ha modificado a través de la constante  $C$ , que representa la tasa de crecimiento a fatiga por cada ciclo de carga, la frecuencia  $f$ , con la que se aplican los ciclos de carga y  $f(a, \Delta\sigma)$ , que define el efecto de las sobrecargas en la propagación de la grieta (Sain y Chandra, 2007).



Sain y Chandra (2007) relacionaron el valor de la constante  $C$  y la frecuencia de aplicación de los ciclos de carga de la siguiente manera:

$$Cf = -0.0193 \left(\frac{L}{l_{ch}}\right)^2 + 0.0809 \left(\frac{L}{l_{ch}}\right) + 0.0209 \text{ mm/seg} \quad (\text{Ec. 16})$$

De modo que para una cierta frecuencia  $f$ , es posible determinar el valor  $C$  correspondiente.

En cuanto al valor de  $f(a, \Delta\sigma)$ , que originalmente no fue definido puntualmente por Slowik, es propuesto por Chandra y Sain (2007) con la siguiente expresión:

$$F = \left(\frac{\Delta K_I}{K_{IC}}\right) \Delta a \quad (\text{Ec. 17})$$

donde  $\Delta K_I$  es el cambio instantáneo en el factor de intensidad de esfuerzos del ciclo normal de carga al de la sobrecarga,  $\Delta a$  es el incremento en la longitud de la grieta con respecto a su valor inicial antes de la sobrecarga y  $K_{IC}$  es la tenacidad del concreto a la fractura

## 2.4 Teoría de daño lineal o de Palmgren-Miner

La Regla de Miner o de Daño Lineal fue propuesta por Palmgren en 1924 y desarrollada posteriormente por Miner en 1945; es la más difundida y una de las más sencillas teorías de fallo acumulativo, establece que la falla de un elemento que trabaja bajo un estado de carga de amplitud  $S_I$ , se produce cuando se alcanzan  $N_I$  ciclos. Si el número  $n_I$  de ciclos operando bajo ese nivel de cargas es  $n_I < N_I$ , no se producirá la falla, sino una fracción de daño  $D_I$  (Ruiz, 2003). De modo que esto puede ser aplicado directamente para aquellos elementos que son sometidos a una variación de esfuerzos de amplitud constante a través de las curvas S-N del material de interés.



Sin embargo, en estructuras reales las condiciones de los ciclos de carga y descarga generalmente son muy variables de un instante a otro, ya que se encuentran sujetas a múltiples cargas, frecuencias y esfuerzos medios. Para predecir la vida de este tipo de componentes también se hace uso de las teorías de daño acumulativo, recurriendo usualmente a la regla de Palmgren-Miner. Para el caso de rangos de cargas o esfuerzos de amplitud variable asume que la vida total del elemento puede ser estimada agregando directamente el porcentaje de vida consumido en cada uno de los niveles de esfuerzo (Campbell, 2008) y la falla se producirá cuando se induzca el 100% de daño:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = 1 \quad (\text{Ec. 18})$$

o bien:

$$\sum_{j=1}^{j=k} \frac{n_j}{N_j} = 1 \quad (\text{Ec. 19})$$

donde  $n_1, n_2 \dots n_k$  representan el número de ciclos a un específico nivel de esfuerzos, y  $N_1, N_2 \dots N_k$  representan el número de ciclos por vida a fatiga al mismo nivel de esfuerzos, obtenidos de la curva S-N correspondiente, ajustada según los criterios ya mencionados para el esfuerzo medio y los factores de corrección.

## 2.5 Simulación Monte Carlo

La simulación Monte Carlo es un método numérico que permite resolver problemas matemáticos mediante la creación de variables aleatorias, su uso real como herramienta de investigación proviene del trabajo en la bomba atómica durante la segunda guerra mundial. Tal trabajo involucró una simulación directa de los problemas probabilísticos teniendo relación con la difusión del neutrón de azar en material fisible (Aranguren y Muzachiodi, 2003).

Debido a que la simulación de variables aleatorias a mano es un proceso muy laborioso y tardado, el método Monte Carlo se volvió práctico hasta que fueron creadas las computadoras (Sobol', 1994). La evolución acelerada de tales



máquinas durante las últimas décadas ha facilitado el desarrollo de las técnicas numéricas de este método en estadística, de modo que se pueden manejar modelos multidimensionales cada vez más complejos mediante los algoritmos estadísticos de las computadoras. La popularidad y ventaja del uso de este tipo de técnicas residen principalmente en el hecho de que, mediante la simulación de muy diversos escenarios, se eliminan los costos de construcción y operación para llevar a cabo múltiples experimentos e inclusive permiten llevar a cabo estudios donde la experimentación directa sería imposible (Getachew, 2003).

La idea del método consiste en realizar sorteos del fenómeno casual con ayuda de un procedimiento especialmente organizado que incluya la casualidad y genere un resultado aleatorio. Se elabora un programa que realice tales pruebas aleatorias y las repita  $N$  veces de modo que cada experimento sea independiente de los restantes y toma la media de los resultados (Aranguren y Muzachiodi, 2003). Su grado de error se puede calcular como:

$$\sqrt{D/N} \quad (\text{Ec. 20})$$

donde  $D$  es una constante y  $N$  el número de pruebas.

En este proyecto la función del método Monte Carlo es la de generar escenarios aleatorios de carga, para lo cual se utiliza específicamente una de sus múltiples funciones: la de obtener muestras de una variable aleatoria cuya ley de probabilidad es conocida. El primer paso consiste en generar un número aleatorio, lo cual se puede lograr con tablas de tales números, guardados en la memoria de la computadora o bien con técnicas generadoras de números pseudoaleatorios, como el de medios-cuadrados (Sobol', 1994), el cual eleva inicialmente un número de cuatro dígitos obteniendo uno nuevo de ocho y toma sus cuatro dígitos intermedios, los cuales vuelve a elevar al cuadrado para obtener nuevamente sus cuatro dígitos medios y sigue este proceso cuantas veces sea necesario. Enseguida, con tales números se genera la variable aleatoria de acuerdo a la distribución probabilística observada en los datos reales y que se va a simular con



el proceso. Para generar tal variable primeramente es necesario distinguir si es variable o discreta; en el caso de que sea discreta, basta con clasificar los rangos de cada valor dependiendo de su distribución estadística, entonces el dato de entrada es el número aleatorio generado previamente y dependiendo su ubicación dentro de esos rangos se selecciona el valor de la variable de salida. Por otro lado, si la variable es continua es necesario primeramente establecer su función de densidad de probabilidad y enseguida su función inversa, o algún método aleatorio, de modo que el número aleatorio generado, ajustado a un rango de 0 a 1, sea el dato de entrada y a través del método seleccionado se transforme en el valor correspondiente de la variable a simular.

En el caso de las estructuras se dice que éstas llegan a la falla cuando su resistencia  $R$  es menor a los efectos de las cargas aplicadas  $Q$ , de modo que si estas características cumplieran con distribuciones de probabilidad simples o conocidas sería una tarea fácil identificar la probabilidad de que tal estructura llegue a la falla, determinando la zona de intersección entre las curvas de las frecuencias de carga y resistencia (Figura 2.2). Sin embargo, ambas características dependen de múltiples variables (Salmon, 1996). Específicamente para puentes vehiculares las solicitaciones están en función del flujo vehicular (variable en el tiempo), los tipos de vehículos, sus condiciones de carga y su distribución a través de cada llanta, las características geométricas del puente, que juegan un papel importante en la presencia de uno o más vehículos pasando por el puente simultáneamente, etc. Esta complejidad en la determinación de las solicitaciones a las que se encuentra sometida la estructura no permite identificar directamente la distribución de frecuencia de las cargas aplicadas, así que se recurre al método Monte Carlo, que cumple la función de generar escenarios de carga a través de simulaciones que relacionan todas sus variables involucradas, para poder determinar la curva de cargas aplicadas y compararla con la resistencia de la estructura para finalmente determinar sus probabilidades de falla o deterioro.

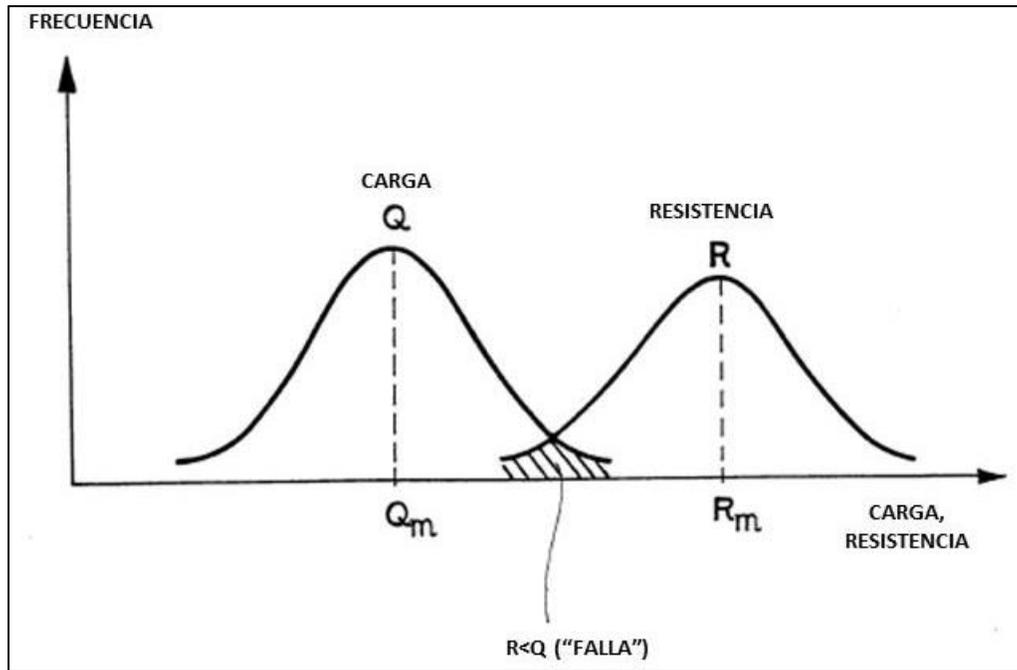


Figura 2.2 Distribuciones de frecuencia de carga Q y resistencia R de estructuras (Salmon, 1996)

## 2.6 Método de elemento finito

El método de elemento finito es una técnica numérica que da soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales que modelan problemas de física e ingeniería. Este método requiere que un problema definido en su espacio geométrico o dominio sea dividido en un número finito de regiones más pequeñas (Pepper y Heinrich, 2006). Este método constituye una poderosa y popular herramienta de análisis, permite atacar problemas de diversa índole, como el análisis de esfuerzos, conducción de calor, campos magnéticos y eléctricos, etc. El proceso implica un gran número de ecuaciones algebraicas, cuya cantidad y complejidad dependen del problema tratado y el grado de exactitud buscado, ya que los resultados tienen un grado de error que puede ser minimizado procesando más ecuaciones (Cook et al., 1989). En nuestros días esa tarea se vuelve factible



y tiene un costo razonable gracias a la evolución y capacidad actual de las computadoras.

Se puede decir que en general, el método de elemento finito modela una estructura como un ensamble de elementos más pequeños, los cuales tienen una geometría más simple y por lo tanto permiten analizar la estructura más fácilmente que hacerlo con la configuración original. Esto implica aproximar una solución más compleja con la de un modelo que consiste en soluciones simples para elementos continuos ligados entre sí (Cook et al., 1989).

El proceso general que sigue un análisis de elemento finito consiste en los siguientes pasos (Cook et al., 1989):

- Dividir la estructura en elementos finitos, cuyo número dependerá del grado de exactitud buscado y buscando formas geométricas más simples.
- Establecer las propiedades de cada elemento. En el caso de análisis de esfuerzos esto implica que se deben determinar las cargas nodales asociadas con todos los estados de deformación de los elementos que serán permitidos.
- Ensamblar los elementos para obtener el modelo de elemento finito de la estructura.
- Aplicar las cargas externas al modelo.
- Especificar las condiciones de frontera de la estructura, estableciendo desplazamientos nulos en los nodos correspondientes.
- Resolver simultáneas ecuaciones algebraicas lineales para determinar los grados de libertad de los nodos.
- Calcular las deformaciones de los elementos en los grados de libertad de los nodos y la interpolación de los desplazamientos de todo el elemento y finalmente calcular los esfuerzos correspondientes generados por tales deformaciones.



### III. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos de este proyecto se llevan a cabo varias actividades puntuales. De manera preliminar, se establecen las características del puente tipo de concreto presforzado para el cual se predice su nivel de deterioro, buscando que sus atributos sean representativos de la infraestructura existente en la red federal de carreteras de México. Con tales características se realiza su diseño en base al reglamento correspondiente y es modelado a través del método de elemento finito, con el propósito de que pueda ser analizado ante la posterior aplicación de cargas.

Por otro lado, se identifican las condiciones de tráfico a las que se ven sometidos los puentes en México, analizando aforos vehiculares realizados en carreteras nacionales, con el propósito de obtener la distribución de probabilidad de eventos definidos por las configuraciones vehiculares registradas y sus características y probabilidad de aparición, condiciones de carga y peso bruto vehicular. Con esta información se simulan escenarios de carga a través del método Monte Carlo, creando múltiples eventos de paso de vehículos, mediante un programa desarrollado para este propósito.

Posteriormente, cada escenario de carga es aplicado al modelo de elemento finito del puente tipo y, a través del programa comercial StaDyn (Doyle, 1991), se realiza el análisis estructural para identificar las fuerzas internas de la estructura así como los puntos más afectados y, por lo tanto, más susceptibles a sufrir daño por fatiga.

Por último, se calculan los esfuerzos provocados por tales fuerzas internas considerando el tamaño de grieta inicial, así como su posible crecimiento y el deterioro en el acero de presfuerzo de acuerdo a su modelo de vida por fatiga el número de ciclos de carga aplicados depende del tiempo que se desee simular y

se plantean diferentes escenarios de agrietamiento inicial de la sección transversal, de modo que se pueda identificar su efecto en el deterioro del elemento de concreto presforzado. Este proceso es resumido en la Figura 3.1:

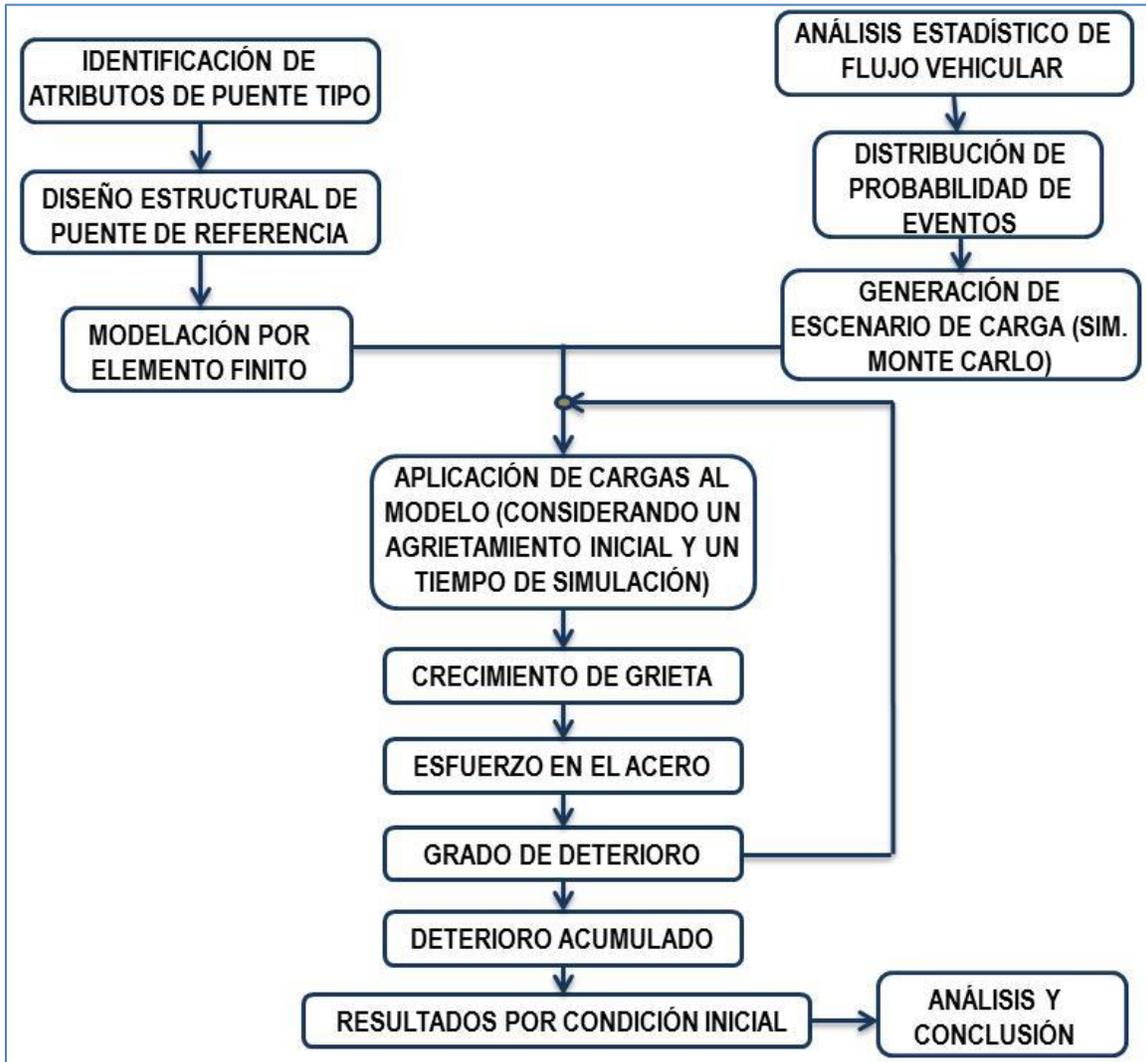


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología del proyecto

A continuación se desarrolla ampliamente cada uno de estos puntos y se muestra la información recabada a lo largo del proceso.



### **3.1 Identificación de características del puente de referencia**

Con el objetivo de tener un puente tipo para llevar a cabo la modelación, simulación de escenarios de carga y cálculo de deterioro a través del tiempo, entre otras tareas, es necesario primeramente contar con sus características geométricas y estructurales. Debido a que en este estudio no se está analizando un puente existente, sino más bien se trabaja con uno de referencia para llevar a cabo las actividades mencionadas, se identificaron las características representativas de los puentes de concreto presforzado en nuestro país. De modo que siendo típicos tales atributos, los resultados de esta investigación representan la situación y panorama de un buen grupo de estas estructuras en México.

#### **3.1.1 Características generales**

Para identificar las características representativas de estas estructuras se recurrió al Sistema de Puentes de México (SIPUMEX), el cual, entre otras funciones, sirve como un inventario de los puentes existentes en la red federal de carreteras de nuestro país. De acuerdo a su análisis estadístico fueron seleccionados uno a uno los atributos representativos y, por tanto, los correspondientes al puente tipo a analizar.

Antes que nada, se seleccionaron exclusivamente los puentes de concreto presforzado, de los cuales se encuentran registrados un total de 1836, que corresponden al 24.14% de un total de 7605 puentes en la red federal de carreteras de México. Enseguida se identificaron aquellos que fueron diseñados con la carga más desfavorable, es decir la que produce los momentos flexionantes de diseño menores, correspondiente a la generada por el vehículo HS-20 del reglamento norteamericano AASHTO. El grupo resultante de puentes que cumplen con estas características fue analizado estadísticamente para identificar sus atributos representativos, mostrados en la tabla 3.1.



Tabla 3.1 Resumen de las características geométricas y estructurales del puente tipo

<b>CARACTERÍSTICAS FINALES DEL PUENTE TIPO</b>	
<b>CONCEPTO</b>	<b>CARACTERÍSTICA REPRESENTATIVA</b>
<b>Carga de diseño</b>	Vehículo HS-20 (AASHTO)
<b>Tipo de sección transversal</b>	Losa-viga ("n" vigas)
<b>Número de claros</b>	1
<b>Longitud</b>	22 metros
<b>Ancho total</b>	10.30 metros

El análisis detallado de cada una de estas características, de acuerdo a la base de datos del Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) puede verse en el Apéndice A.

### 3.1.2. Características estructurales

Una vez que se han determinado las características del puente tipo se realiza su diseño estructural en base a las normas correspondientes, es decir, con el reglamento norteamericano AASHTO, de acuerdo a la configuración vehicular de la carga de diseño del puente tipo. Específicamente se decide utilizar la versión denominada "Standard Specification for Highway Bridges" de estas normas, del año de 1993, auxiliándose con las normas ACI 318-95, debido a la edad de buena parte de los puentes estudiados.

Como resultado del proceso de cálculo, que se puede ver ampliamente en el Apéndice B, la sección transversal queda con las características y dimensiones mostradas en la Figura 3.2.

El ancho de la superestructura permite la existencia de dos carriles y las vigas resultantes propuestas son AASHTO tipo III, cuyas dimensiones y distribución del acero de refuerzo y presfuerzo se muestran en la Figura 3.3.

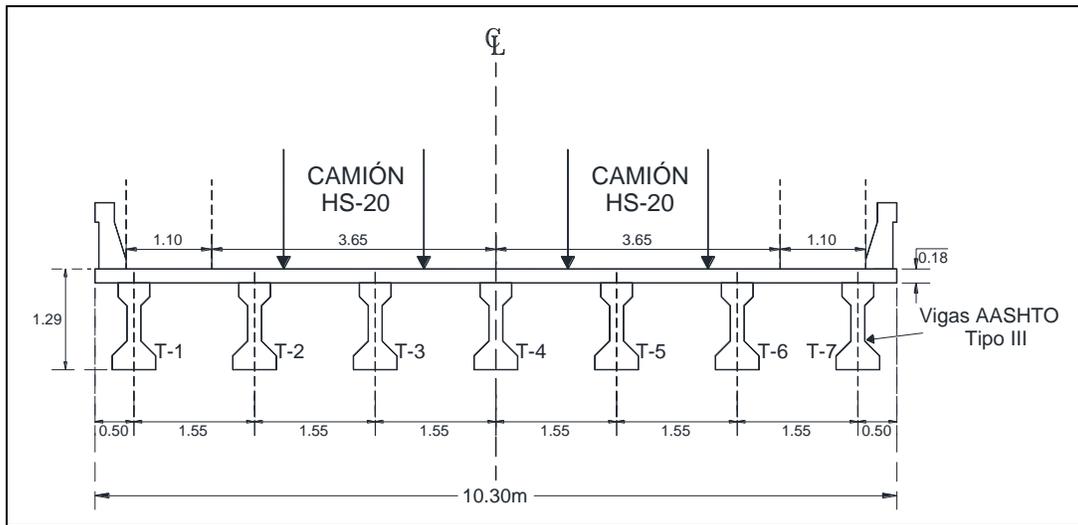


Figura 3.2 Sección transversal del puente tipo

Cabe destacar que se propuso un perfil de excentricidad constante del acero de presfuerzo, cuyo centroide se ubica a 35 centímetros del correspondiente a la viga, a lo largo de todo el claro. Por otro lado, el acero de refuerzo por cortante, así como el detalle de la distribución del acero de presfuerzo y el refuerzo longitudinal de la losa de tráfico se pueden observar en la Figura 3.4.

Además, el puente cuenta con diafragmas de concreto en cada extremo y en cada tercio de claro, cuyo ancho es de 30 cm y su peralte es de 74.5 cm y de 93.6 cm respectivamente.

Entre otras características, la resistencia a compresión del concreto de la losa de tráfico y los diafragmas interiores y exteriores es de  $280 \text{ kg/cm}^2$  (4000 psi), mientras la de la viga prefabricada es de  $350 \text{ kg/cm}^2$  (5000 psi). Por otro lado, el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo es de  $4200 \text{ kg/cm}^2$  (60000 psi) y la resistencia última del acero de presfuerzo es de  $19000 \text{ kg/cm}^2$  (270000 psi). Adicionalmente, se considera que el presfuerzo aplicado a los torones antes de colocar el concreto es del 70% de su resistencia última, que genera una fuerza





### 3.2 Modelación del puente tipo

Una vez que se cuenta con todas las características geométricas y estructurales del puente de referencia se realiza su modelo con el programa de elemento finito StaDyn, con el propósito de posteriormente poder llevar a cabo su análisis ante la simulación de los escenarios de tráfico y obtener las reacciones internas de sus elementos.

Considerando que la longitud del puente tipo es de 22.00 metros y su ancho total es de 10.30 metros, para modelar la losa de tráfico se consideraron 88 divisiones en dirección  $X$  a cada 25 cm ( $88 \times 0.25 = 22.00$  m) y 40 en dirección  $Y$  a cada 25.75 cm ( $40 \times 0.2575 = 10.30$  m). Este mallado consiste en rectángulos que a su vez son divididos en 2 elementos finitos triangulares tipo placa (Figura 3.5). De modo que la losa se compone de un total de 7040 piezas.

Por otro lado, las vigas se modelan cada una con 88 elementos finitos tipo “frame” de 25 centímetros de longitud, con el propósito de que se tengan intersecciones exactas con los nodos de la losa de tráfico. Así que se tiene un total de 616 elementos para conformar las siete vigas con las que cuenta el puente.

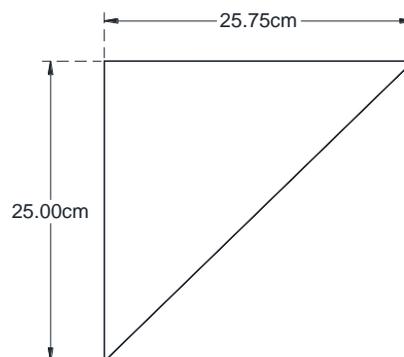


Figura 3.5 Elementos finitos de la losa de tráfico del puente tipo

Cabe destacar que la posición de las vigas no quedó de manera exacta con respecto al diseño original, debido a la discretización de la estructura, sin embargo el grado de aproximación es aceptable, ya que no difiere en más de 1.5 centímetros en la posición de cada viga (Figura 3.6).

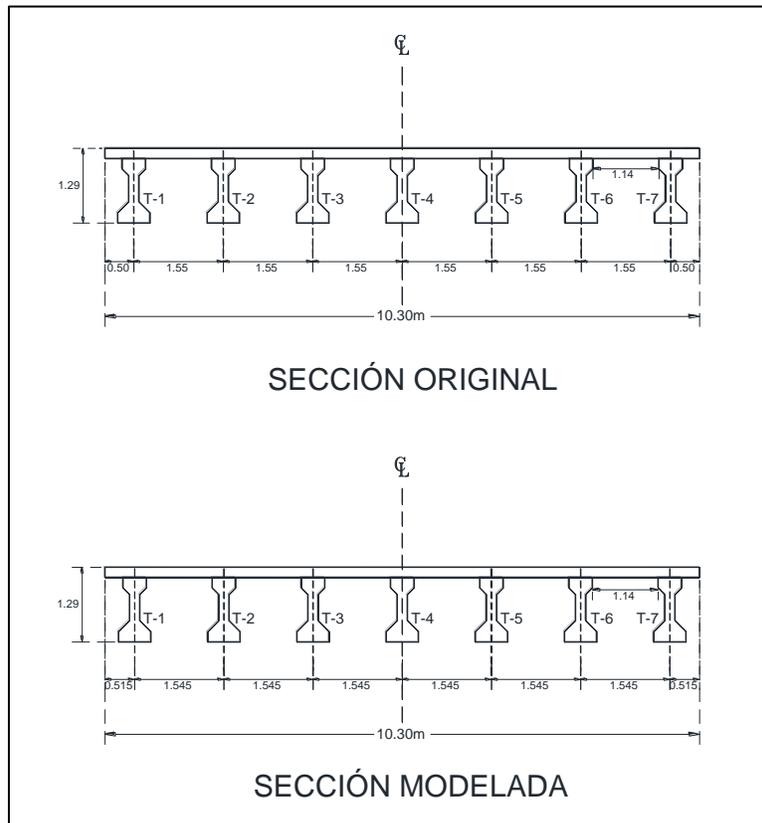


Figura 3.6 Distribución de las vigas en el diseño original y en el modelo del puente tipo

Adicionalmente, se crean los diafragmas de la superestructura, considerando, según el diseño, que se encuentran dos internos, a cada tercio del claro, que van desde la viga 1 hasta la 7 y los de ambos extremos, que tienen la misma longitud. Cada diafragma consta de 36 elementos tipo “frame” a cada 25.75 cm, acorde a la distribución de los elementos de la placa que conforma la losa de tráfico del puente. De esta manera, los cuatro diafragmas suman 144 elementos, por lo tanto el modelo del puente cuenta con 7,800 en total.



A este modelo se le agregan las cargas uniformes para simular el peso de la carga muerta causada por el asfalto y los parapetos y también se identifican los nodos que corresponden a la ubicación de los elementos de cada viga, para posteriormente ubicar cargas y los momentos flexionantes generados en ellas (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Ubicación de las vigas en el modelo del puente tipo

<b>VIGA</b>	<b>Eje Y (m)</b>	<b>Nodo inicial</b>	<b>Nodo final</b>
<b>1</b>	0.515	179	267
<b>2</b>	2.060	713	801
<b>3</b>	3.605	1247	1335
<b>4</b>	5.150	1781	1869
<b>5</b>	6.695	2315	2403
<b>6</b>	8.240	2849	2937
<b>7</b>	9.785	3383	3471

Finalmente se agregan las propiedades geométricas y estructurales de cada tipo de elemento (losa, vigas, diafragmas exteriores e interiores), incluyendo su densidad, módulos de elasticidad, área de la sección transversal, momentos de inercia, etc. Que requiere el programa para llevar a cabo los análisis estructurales.

### 3.3 Condiciones de tráfico vehicular

Antes de comenzar la simulación de los escenarios de carga es necesario identificar primeramente las condiciones de tráfico vehicular a las que se encuentra sometida la estructura. Para ello se toman los datos de un aforo vehicular de referencia, que en este caso es el realizado en el Puente Río Papaloapan ubicado en la carretera a cuota del tramo de La Tinaja a Cosoleacaque, en el estado de Veracruz. La elección de este aforo radica, entre otras cosas, en que cuenta con una gran cantidad de datos, incluyendo la configuración de los vehículos, distancia entre sus ejes, pesos bruto vehicular y peso por eje, etc.



En la tesis de maestría titulada “Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación Monte Carlo” el M. en C. Saúl Enrique Crespo Sánchez llevó a cabo el análisis estadístico del aforo mencionado, cuyos resultados se muestran en el Apéndice C. Los datos de interés para llevar a cabo las simulaciones de los escenarios de carga, tomados del trabajo mencionado son:

- *Configuraciones vehiculares más usuales*; para ser consideradas en los siguientes análisis y posteriormente en las simulaciones.
- *Peso bruto vehicular*, que se analiza clasificando primeramente los vehículos de carga en vacíos, excedidos y no excedidos, según lo reglamentado en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT. Después, para cada vehículo y clasificación se calcula el peso bruto promedio, o bien, una función de distribución acumulada que muestre un buen ajuste para representar la variación de los pesos en los que observa una gran dispersión.
- *Distribución y porcentaje de peso transmitido por cada eje*; identificado para cada tipo de vehículo, de modo que, ante una configuración y un peso dado, el vehículo pueda ser representado como un conjunto de cargas puntuales, cuyos parámetros sean la magnitud de cada una de ellas y su distancia entre sí.
- *Proyecciones de crecimiento de flujo vehicular y probabilidades de ocupación vehicular*, estimados según tasas de crecimiento de tráfico vehicular aproximadas a las observadas en carreteras de nuestro país. Esto permite considerar la posibilidad de que la estructura se encuentre ocupada por un vehículo en un cierto instante o bien, por más de un vehículo, generando ciclos de carga de magnitud mayor ante la ocurrencia de estos eventos. De modo que se considere la simulación de cualquiera de estos escenarios posibles.



### 3.4 Simulación de escenarios de carga

Para simular la aleatoriedad de los eventos de carga y descarga en el puente modelado se utiliza el método Monte Carlo, alimentado por los datos obtenidos del aforo vehicular analizado. Sin embargo, primeramente es necesario plantear las condiciones bajo las cuales se rigen los algoritmos para realizar tales simulaciones, las cuales se muestran a detalle en el Apéndice D. Los aspectos analizados en tal sección son:

- *Ubicación transversal de los vehículos*; que depende básicamente del ancho de los vehículos, número de carriles, así como la discretización del modelo del puente, ya que a través de ella se fijaron los nodos de los elementos, donde es posible aplicar cargas puntuales.
- *Ubicación longitudinal de los vehículos*; determinada a través de la simulación del paso de los diferentes tipos de vehículos, con una carga dada, a lo largo del puente, de modo que sea posible graficar los momentos flexionantes producidos en cada una de sus posiciones, en un punto crítico de una de las vigas (por ejemplo, a centro de claro), para identificar la posición o posiciones donde genera el máximo momento flexionante, así como el número de ciclos de carga (número de momentos máximos) que produce cada configuración vehicular. De este modo, en la simulación de ciclos de carga se ubica cada vehículo, representado por una serie de cargas puntuales, en su posición transversal correspondiente, así como en la posición(es) longitudinal(es) donde producen el(los) máximo(s) momento(s) flexionante(s) y se determina la magnitud de esta fuerza interna, para posteriormente calcular su efecto en el deterioro del elemento en cada ciclo de carga.

Una vez establecidos estos criterios es posible hacer la simulación de los escenarios de carga por medio del Método Monte Carlo, basado en la información



extraída del aforo vehicular analizado. Se comienza estableciendo el número de eventos o bien el tiempo a simular y se llevan a cabo las siguientes acciones:

- Selección del número de vehículos sobre el puente

Se genera una cifra aleatoria con valores de 0 a 1, cuyo valor establece tal número de vehículos, de acuerdo a las probabilidades de aparición para las diferentes proyecciones de crecimiento de tráfico, mostradas en el Apéndice C.

- Identificación de la configuración vehicular

Los porcentajes de aparición de los distintos tipos de vehículos observados (Apéndice C) son considerados como constantes a través del tiempo, de la misma manera que su condición de carga y peso bruto. Así que se definen los rangos, en una escala de 0 a 1, que corresponden a cada configuración vehicular, de modo que un nuevo número aleatorio dentro de tal escala define el tipo de vehículo que se presenta en el evento.

En el caso de presentarse dos vehículos se generan dos números aleatorios para definir las dos configuraciones vehiculares presentes.

- Determinación de la condición de carga del vehículo

Siguiendo la misma técnica de simulación de variables discretas se definen los rangos correspondientes a cada condición de carga (Vacío, excedido o no excedido) de acuerdo a los datos observados para cada tipo de vehículo (Apéndice C) y se generan los números aleatorios que definen tal condición, dependiendo el tipo de vehículo presente en el evento.

- Selección de peso bruto vehicular

En el caso de que la condición de carga del vehículo seleccionado tenga un peso promedio fijo se asigna directamente tal cantidad. Sin embargo, para los casos en los que están identificados con una cierta función de distribución de probabilidad, se generó otro número aleatorio, mediante el cual se obtiene



el peso bruto vehicular correspondiente empleando la técnica de función inversa del método Monte Carlo.

- Ubicación de los vehículos sobre el puente

Una vez que se ha seleccionado el tipo de vehículo así como su peso bruto, se determina el porcentaje de peso transmitido a cada uno de sus ejes y, por lo tanto, a cada una de sus llantas, de acuerdo a lo mostrado en el Apéndice C. En el caso de que pase un solo vehículo se ubica sobre el carril de baja velocidad, en su posición o posiciones en que provoca el mayor momento flexionante, para determinar su magnitud con el análisis de elemento finito.

Por otro lado, si están pasando dos vehículos, el más pesado se ubica en el carril de baja velocidad en su posición crítica, mientras el otro se ubica en el de alta velocidad en una posición aleatoria. Si el vehículo más pesado imprime dos ciclos de carga (configuración T3-S2 ó T3-S3) entonces se ubica en su segunda posición crítica y se simula el mismo avance en el vehículo más ligero. Para ambas posiciones se determinan los momentos flexionantes producidos.

Ahora bien, si pasan uno o dos vehículos ligeros simultáneamente, no se cuenta como un ciclo de carga, ya que el peso de esta configuración es muy pequeño y no produce deterioro por fatiga. En cambio, si pasan dos vehículos y sólo uno de ellos es ligero es necesario calcular los efectos producidos, ya que el vehículo de carga produce al menos un ciclo de esfuerzos.

Cuando se han hecho el suficiente número de iteraciones se determina el número de ciclos que produce el paso de los vehículos para ciertos períodos de tiempo y para cada cantidad de tránsito diario simulado. Además, se analizan estadísticamente los momentos flexionantes resultantes, de modo que se identifique la función de distribución de probabilidad que mejor se ajuste para cada flujo diario considerado. Este dato permite que en la siguiente fase se simulen los

escenarios de carga directamente como momentos flexionantes, los cuales generan los esfuerzos correspondientes y por tanto el deterioro por fatiga.

Cabe destacar que todo este proceso es iterativo y, por lo tanto, fue programado en Fortran. El código correspondiente es presentado en el Apéndice E.

### 3.5 Determinación del deterioro por fatiga

Para determinar el deterioro por fatiga se selecciona una de las vigas de concreto presforzado, específicamente la que se ve más afectada por los ciclos de carga. Analizando el hecho de que los vehículos más pesados circulan por el carril de baja velocidad se pudo detectar que es en este carril donde se ubica tal viga, identificada con el número 2 (Figura 3.7). Así que la obtención de momentos flexionantes y su análisis estadístico se efectúan para el centro de claro de esta viga, donde se registran sus máximas magnitudes.

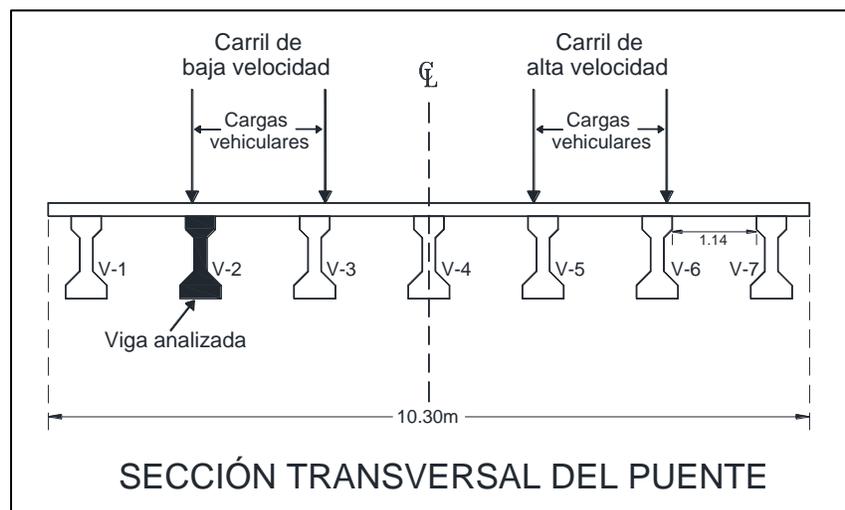


Figura 3.7 Ubicación de la viga analizada por efectos de fatiga



Una vez que se cuenta con la función de distribución de probabilidad de los momentos flexionantes generados por el tráfico vehicular, así como el número de ciclos de carga impresos por las diferentes cantidades de tránsito diario, es posible realizar una nueva generación de escenarios de carga, representados directamente como momentos flexionantes, regida por los períodos de tiempo que se desean simular.

Para llevar a cabo esta nueva simulación de ciclos de carga así como el cálculo de deterioro, se realiza otro programa cuyo código se muestra en el Apéndice F. Este programa lleva a cabo las siguientes funciones:

- Determinación del momento flexionante del ciclo de carga

Con base en la distribución estadística de esta fuerza interna se lleva a cabo una simulación Monte Carlo, que a través del método de función inversa determina momentos flexionantes aleatorios para cada evento. Ya que tal efecto es calculado para la aplicación de las cargas de los vehículos correspondientes aplicadas de manera estática, es necesario afectarlos por un factor de amplificación de carga o factor de impacto, que simula la aplicación dinámica de las cargas, debido al paso de los vehículos a una determinada velocidad.

De acuerdo a Deng y Cai (2010) las variables que afectan de manera más significativa el factor de impacto son la longitud del puente y las condiciones de la superficie de rodamiento. Debido a que la longitud del puente de referencia es constante se consideran dos escenarios posibles de la superficie de rodamiento: condiciones promedio y condiciones pobres, con el objetivo de analizar la influencia de este parámetro en el deterioro del puente. Dependiendo cuál de las dos condiciones se esté analizando en la simulación correspondiente, se determina el factor de impacto, IM, de acuerdo a la fórmula establecida por Deng y Cai (2010) y se aplica al



momento resultante de la simulación Monte Carlo para considerar los efectos de la aplicación de las cargas dinámicas:

$$IM = RSI \times \begin{cases} 0.33 + 0.01(16.76 - L) & L < 16.76m \\ 0.33 & L \geq 16.76m \end{cases} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde *RSI* es el índice de la superficie de rodamiento, que toma un valor de 0.7, 1, 1.5, 3 o 6, correspondiente a condiciones muy buenas, buenas, promedio, pobres o muy pobres de la superficie de rodamiento y *L* es igual a la longitud del claro del puente, medida en metros.

- Cálculo de esfuerzos en la sección transversal de la viga analizada  
De acuerdo a la técnica de Mast (1998), si el elemento trabaja como parcialmente agrietado, primeramente se ubica el eje neutro de la sección transversal de la viga de interés con su grieta inicial. Para encontrar su valor se hacen iteraciones con diferentes profundidades “*c*”, hasta encontrar el valor correcto. Después de comparar la profundidad del eje neutro con el tamaño de la grieta existente se calculan los esfuerzos normales generados por el momento flexionante a las diferentes profundidades de interés de la sección transversal de la viga estudiada, especialmente en el extremo inferior de la sección de concreto y al nivel del acero de refuerzo y presfuerzo.  
Además de la magnitud del momento flexionante el otro valor de entrada importante es el tamaño de la grieta. Para el caso de la primera corrida este valor es el del agrietamiento inicial propuesto y conforme se avanza en las simulaciones este valor cambia según el crecimiento calculado, ocasionado por efectos de fatiga en el concreto por los ciclos de carga.
- Determinación del crecimiento de grieta  
Una vez conocidos los incrementos de esfuerzos en el acero de refuerzo y presfuerzo ante la aplicación de cargas, así como el momento flexionante ocasionado, se determinan los factores de intensidad de esfuerzos



considerando la combinación entre las fuerzas de cerramiento generadas por el acero y el momento flexionante externo.

Para determinar los factores de intensidad de esfuerzos máximo  $K_{Imáx}$ , y superior  $K_{Isup}$  primeramente se identificaron los momentos flexionantes mínimos que ocasionan factores de intensidad de esfuerzos positivos para diferentes tamaños de grieta y de las simulaciones de escenarios de carga se tomaron los valores que superan tal valor para determinar su distribución de frecuencia, para cada tamaño de grieta considerado. Para cada una de las distribuciones resultantes se obtuvo el momento flexionante a 1 y 3 desviaciones estándar del momento medio, con el cual se obtiene el factor de intensidad de esfuerzos máximo  $K_{Imáx}$ , y superior  $K_{Isup}$  respectivamente.

Para finalmente determinar el crecimiento de grieta se identificó una tenacidad a la fractura  $K_{Ic}=1.45 \text{ MN/m}^{3/2}$  para el tipo de concreto usado en las vigas de concreto presforzado del puente analizado. Para los ciclos de carga en los que el factor de intensidad de esfuerzos supera tal valor se considera que la grieta crece por efectos de sobrecarga hasta una profundidad en la que la misma carga genera un factor menor al de fractura. En cambio, si el factor no alcanza el valor mencionado, se hace el cálculo de crecimiento de grieta por efectos de fatiga a través de la Ley de Slowik (Ec. 13), considerando las constantes  $m=2.0$ ,  $n=1.1$  y  $p=0.7$  y un parámetro  $C=3.2 \times 10^{-2} \text{ mm/ciclo}$  para probetas grandes (Slowik et al., 1996). Para comenzar el cálculo de crecimiento de grieta se considera que existe un defecto inicial equivalente a una grieta de 0.1 cm de profundidad, tomado como punto de referencia únicamente.

- Cálculo de deterioro por fatiga del acero de presfuerzo

Para finalmente calcular el deterioro del acero de presfuerzo se hace uso de la expresión de Hagenberger (2004) (Ec. 4), que se basa en el concepto de las curvas S-N de vida por fatiga y en los resultados de pruebas propias y de empresas privadas y otros investigadores.



Cabe destacar que no se hacen correcciones a la curva S-N correspondiente ya que su esfuerzo medio o el debido a la fuerza de presfuerzo es muy similar al considerado en el diseño del puente tipo de este proyecto. Además, no se registran condiciones óptimas de superficie, o diferentes tamaños de probetas, fenómenos de corrosión, concentración de esfuerzos, etc. en las pruebas, sino que se buscó simular las condiciones reales de elementos usados en la práctica, al igual que el puente tipo modelado, así que tampoco se hacen correcciones por este tipo de factores. Sin embargo, gracias a que aquí se establece esta metodología y es presentado el programa resultante, puede ser fácilmente incluida cualquier condición relevante, como corrosión, que pueda cambiar la curva de vida por fatiga, siempre y cuando se haga la correcta evaluación de este tipo de fenómenos y se esté consciente de todas las consecuencias que puede generar.

Una vez que se utiliza la curva S-N se conoce el número de ciclos que se requieren para llevar al elemento a la falla. Así que, para determinar el grado de deterioro generado, se recurre a la Regla de Daño Lineal o Regla de Palmgren-Miner (Ec. 18), tal deterioro es acumulativo ciclo a ciclo, de modo que al final de las simulaciones, para el tiempo considerado, es posible conocer el deterioro que acumuló la estructura durante ese tiempo en servicio.



## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes**

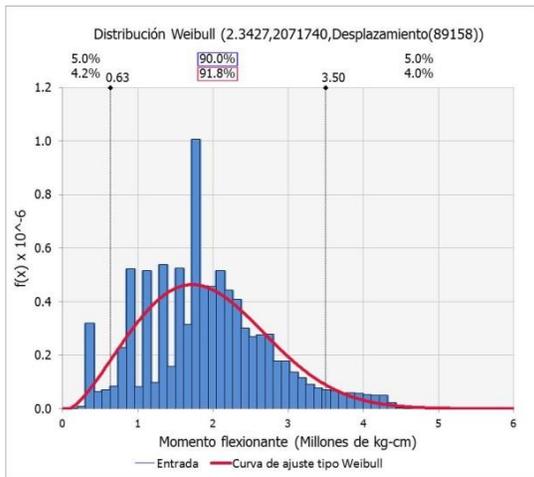
Una vez efectuada la simulación de escenarios de carga sobre el puente, se identificaron las funciones de las distribuciones de densidad de probabilidad que mostraron un mejor ajuste a las magnitudes de los momentos flexionantes generados en el punto de interés, ubicado al centro de claro de la viga 2 del puente, en la zona del carril de baja velocidad. En las figuras 4.1 a la 4.3 se muestran las curvas definidas por tales funciones, para las tasas de crecimiento de tráfico vehicular del 2, 4 y 6% y distintos períodos de tiempo.

Se puede observar que las curvas de ajuste de las distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes son muy similares para las proyecciones de tráfico de las distintas edades consideradas y para cada tasa de crecimiento. Esto se puede verificar con los parámetros que definen cada distribución, tipo Weibull, que se encuentran en la parte superior de cada gráfico, cuyos valores tienen variaciones mínimas entre ellos.

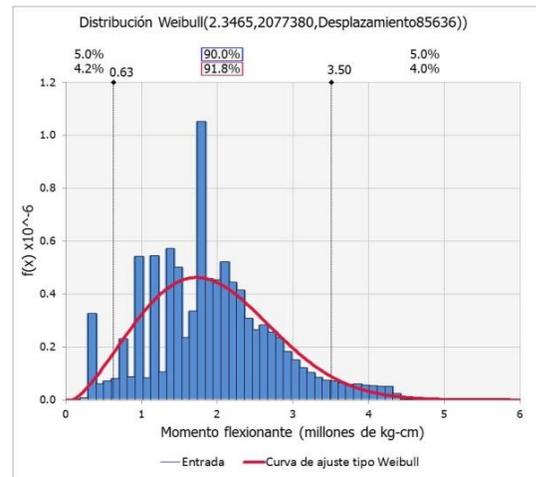
La similitud entre las magnitudes de los momentos flexionantes para distintas edades indica que, para esta estructura, a pesar de que crezca el tráfico y, por lo tanto, la probabilidad de aparición de más de un vehículo sobre el puente, la magnitud de los momentos flexionantes generados no aumenta significativamente, debido al alto porcentaje de vehículos ligeros, que generalmente se presentan cuando circula más de un auto sobre la estructura, generando aumentos muy pequeños con respecto al efecto que genera el otro vehículo que circula simultáneamente.



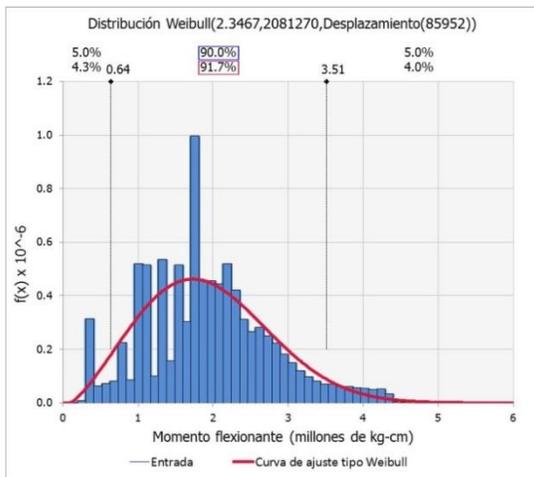
# Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



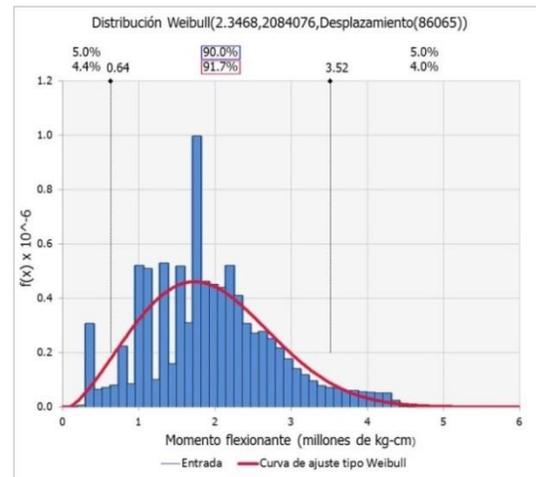
(a) Tráfico actual



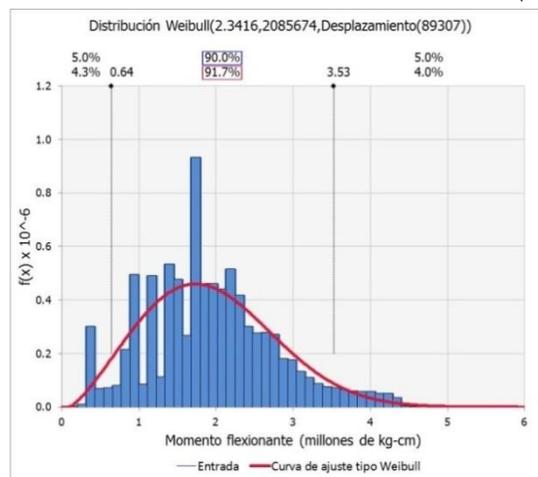
(b) 10 años



(c) 20 años



(d) 30 años

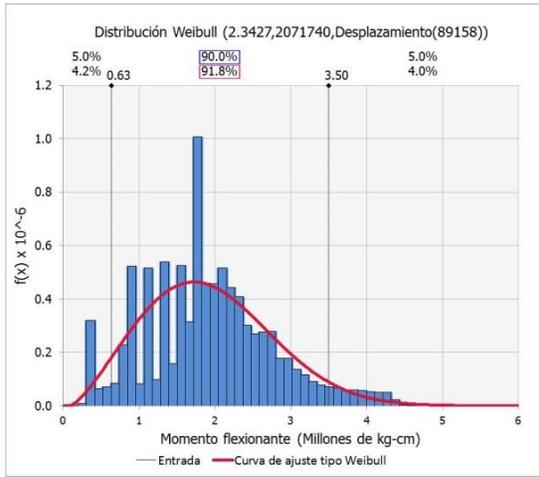


(e) 40 años

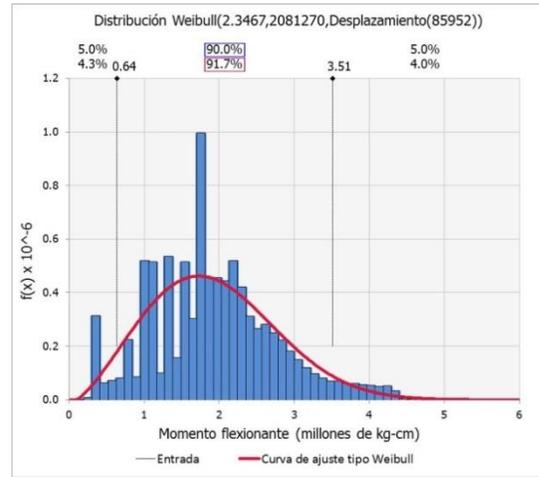
Figura 4.1 Distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes a 40 años con crecimiento de tráfico vehicular del 2%



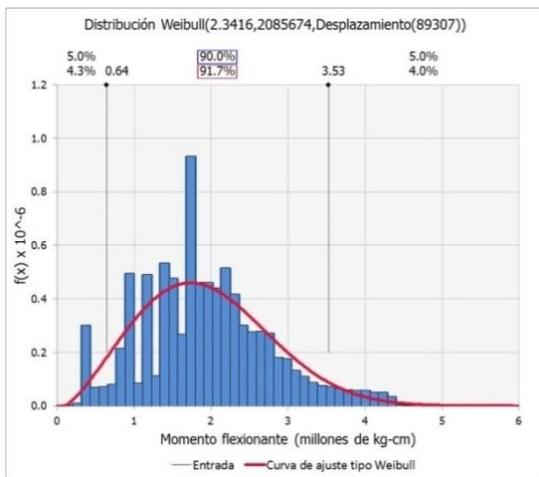
# Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presfuerzo con agrietamiento



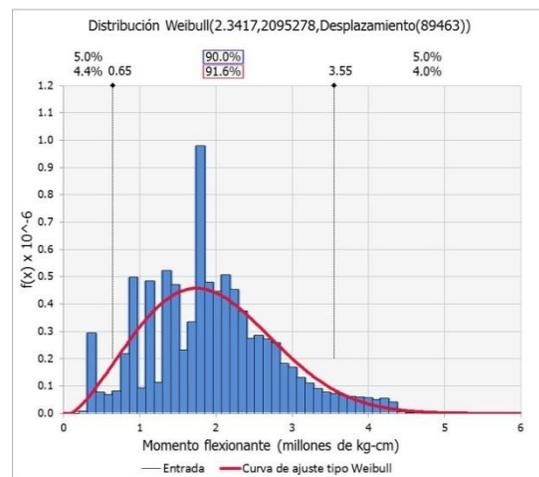
(a) Tráfico actual



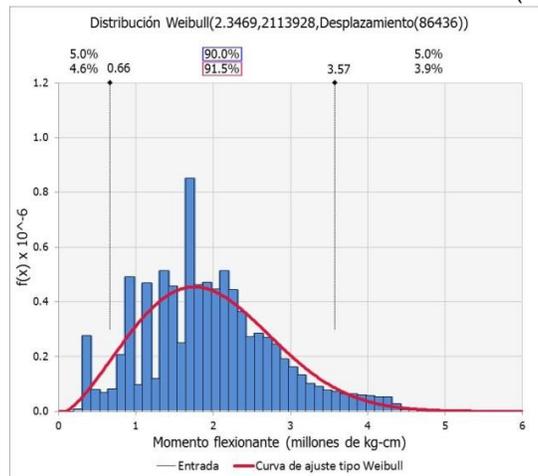
(b) 10 años



(c) 20 años



(d) 30 años



(e) 40 años

Figura 4.2 Distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes a 40 años con crecimiento de tráfico vehicular del 4%

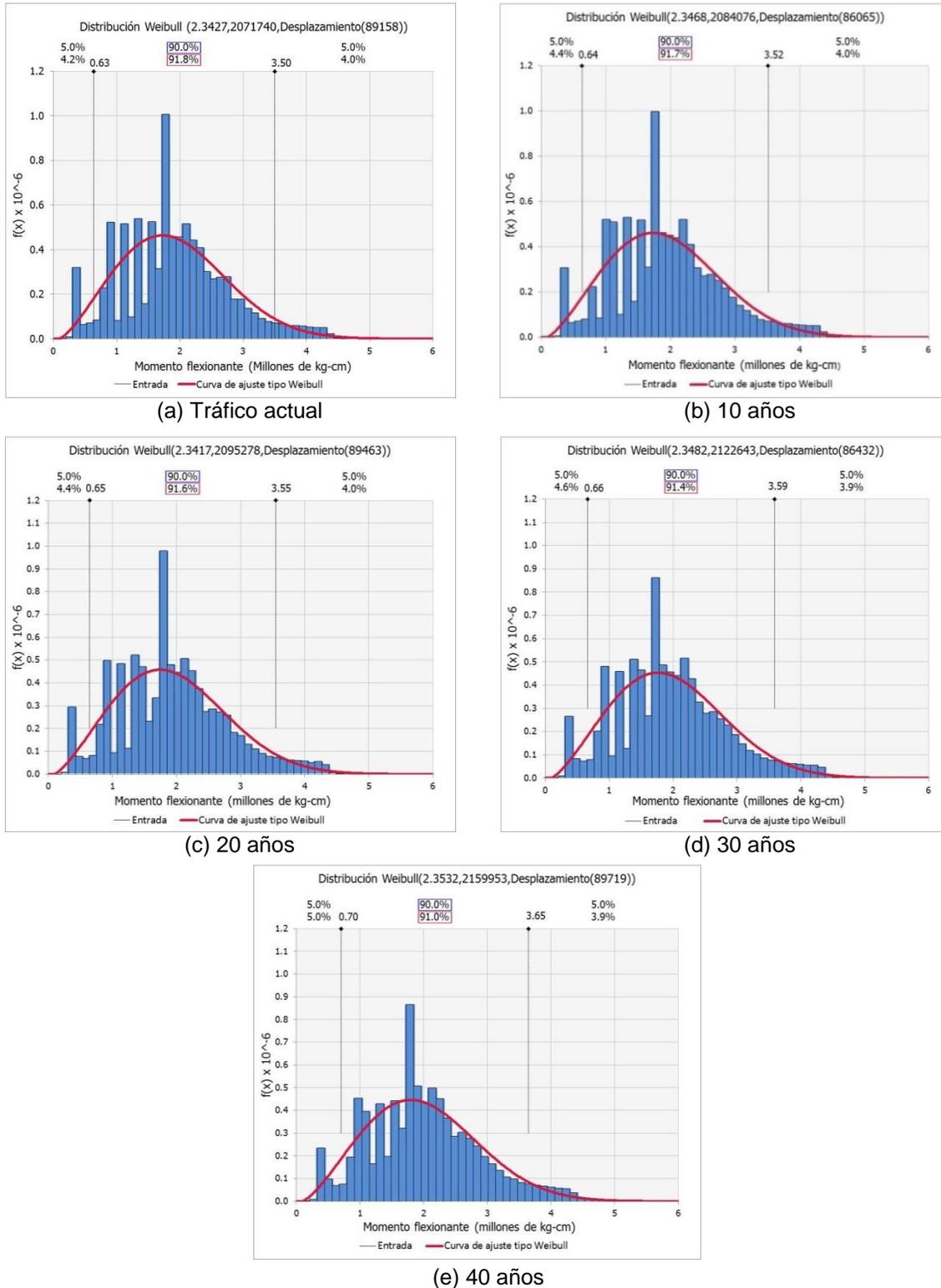


Figura 4.3 Distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes a 40 años con crecimiento de tráfico vehicular del 6%



Por otro lado, analizando el momento flexionante medio que se genera en las simulaciones para las distintas tasas de crecimiento vehicular y las edades de las proyecciones de tráfico, se observa un pequeño aumento conforme crece el número de vehículos, el cual es mayor ante la tasa de crecimiento vehicular más grande (Figura 4.4). Sin embargo, cabe destacar que este aumento es muy pequeño y poco significativo, tal y como se observó en las curvas de ajuste.

Tabla 4.1 Momento flexionante medio generado en las simulaciones de tráfico ante las distintas tasas de crecimiento vehicular y a diferentes edades

MOMENTO FLEXIONANTE MEDIO (kg-cm)			
TIEMPO (AÑOS)	TASA DE CRECIMIENTO DE TRÁFICO		
	2.00%	4.00%	6.00%
0	1926337.16	1926337.16	1926337.16
10	1927793.84	1931532.52	1934099.31
20	1931532.52	1938790.52	1947363.83
30	1934099.31	1947363.83	1968537.41
40	1938790.52	1960810.86	2004790.79

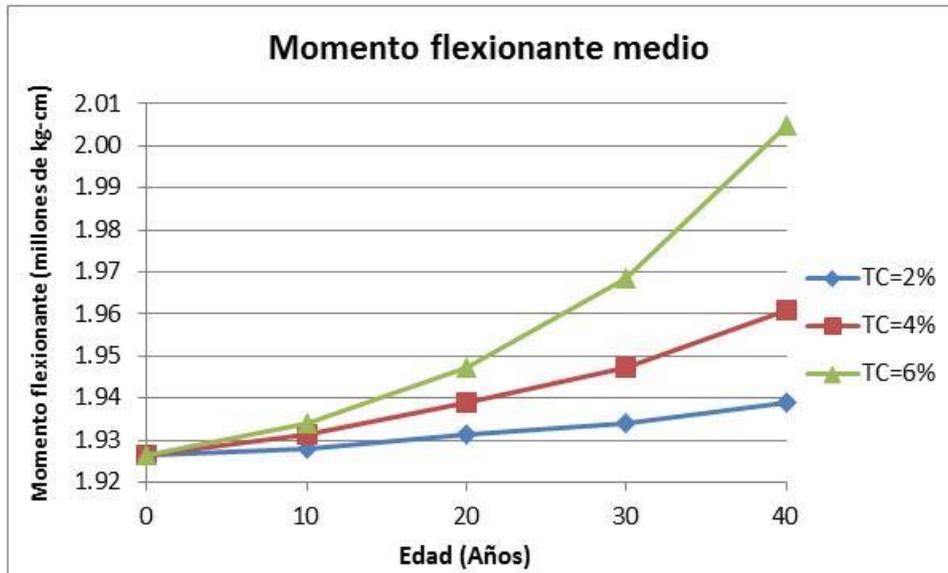


Figura 4.4. Momento flexionante medio generado en las simulaciones de tráfico ante las distintas tasas de crecimiento vehicular y a diferentes edades



## 4.2 Proyecciones de ciclos de carga

En la simulación de los escenarios de carga utilizados para obtener las distribuciones de momentos flexionantes, se tomaron consideraciones tales como el hecho de que el paso de vehículos ligeros no genera ciclos de carga, debido a su muy bajo peso, mientras el número de ciclos y la posición de los vehículos de carga para generarlos se tomó del análisis mostrado en el Apéndice C. De acuerdo a estas condiciones se simularon los ciclos de carga según el tipo de vehículo que aparece sobre el puente, de modo que fue posible identificar el número de ciclos que se generan por el paso de determinado número de vehículos. Para cada cantidad de tráfico diario analizado, relacionado con las tasas de crecimiento propuestas y las proyecciones a diferentes periodos de tiempo (Tabla 4.2), se obtuvo el número de ciclos que se generan cada día (Figura 4.5), de modo que en la posterior simulación, que arroja directamente momentos flexionantes, sea posible relacionar número de ciclos con periodos de tiempo de acuerdo a los números de vehículos proyectados.

Tabla 4.2 Proyecciones de tránsito diario para las diferentes tasas de crecimiento

PROYECCIONES DE NÚMERO DE VEHÍCULOS DIARIOS			
PERIODO (AÑOS)	TASA DE CRECIMIENTO		
	2%	4%	6%
0	4948	4948	4948
10	6032	7352	8963
20	7352	10925	16048
30	8963	16048	28419
40	10925	23755	50894

Ya que las etapas de análisis son a cada diez años, se asocia un número de ciclos de carga diarios a cada una de ellas (Tabla 4.4), correspondiente al promedio de los ciclos de carga respectivos a las proyecciones de tránsito diario entre las que se comprende tal etapa. Por ejemplo, para calcular el número de



ciclos diarios para una etapa de 0 a 10 años, se promedian los ciclos de carga correspondientes al tránsito diario de 0 y el de 10 años.

Tabla 4.3 Ciclos de carga generados diariamente, de acuerdo a las diferentes cantidades proyectadas de tránsito diario

Tránsito diario	Ciclos de carga diarios
4948	3,295
6032	4,008
7352	4,870
8963	5,924
10925	7,187
16048	10,462
23755	15,252
28419	18,088
50894	31,281



Figura 4.5 Ciclos de carga generados diariamente, de acuerdo a las diferentes cantidades proyectadas de tránsito diario



Tabla 4.4 Número de ciclos de carga diarios asociados a los diferentes períodos de servicio del puente, según las tasas de crecimiento consideradas

<b>CICLOS DE CARGA DIARIOS ASOCIADOS A LOS PERÍODOS DE TIEMPO</b>			
<b>PERIODO (AÑOS)</b>	<b>TASA DE CRECIMIENTO</b>		
	2%	4%	6%
<b>0-10</b>	3652	4083	4610
<b>10-20</b>	4439	6029	8193
<b>20-30</b>	5397	8825	14275
<b>30-40</b>	6556	12857	24685

Para determinar el número de ciclos que se simulan, de acuerdo a las diferentes edades y las distintas tasas de crecimiento de flujo de vehicular, únicamente se multiplicó el número de días para cada período por el número de ciclos que se generan diariamente. Las proyecciones del número de total de ciclos de carga para simular los diferentes períodos de servicio de la estructura se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Proyección del número total de ciclos de carga para los diferentes períodos de servicio y tasas de crecimiento

<b>PROYECCIONES DE NÚMERO DE CICLOS DE CARGA</b>			
<b>TIEMPO (AÑOS)</b>	<b>TASA DE CRECIMIENTO</b>		
	2%	4%	6%
<b>0</b>	0	0	0
<b>10</b>	13,329,800	14,901,125	16,824,675
<b>20</b>	29,532,150	36,905,150	46,729,125
<b>30</b>	49,231,200	69,114,575	98,832,875
<b>40</b>	73,158,775	116,042,625	188,931,300

Cabe destacar que la simulación final de aplicación de ciclos de carga a la estructura se representó directamente con momentos flexionantes, basados en las distribuciones de probabilidad respectivas a cada período y tasa de crecimiento, mostradas en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3. Dependiendo la edad a simular y la tasa de crecimiento considerada, se definió el número de ciclos a aplicar, según lo mostrado en la Tabla 4.5.



Por otro lado, se puede observar en los resultados de esta sección que la tasa de crecimiento de flujo vehicular puede jugar un papel muy importante en el deterioro por fatiga del puente de referencia, ya que el número de ciclos de carga totales que se generan, especialmente para una gran cantidad de tiempo en servicio, aumenta considerablemente para tasas de crecimiento mayores. Por ejemplo, en la tabla 4.4, se puede notar que, para un tiempo en servicio de 40 años, el número de ciclos generados ante una tasa de crecimiento del 6% anual casi triplica al correspondiente al 2% y aumenta en más del 60% el número de ciclos generados con la tasa de crecimiento del 4%. Esta situación, aunada al hecho de que el momento flexionante medio también es mayor para las tasas de crecimiento más grandes (Tabla 4.1), hace esperar que el deterioro por fatiga generado en el puente de referencia sea sustancialmente mayor para la tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 6%; la más grande considerada en las simulaciones.

### **4.3 Crecimiento de grieta y deterioro en acero de presfuerzo**

Para calcular el deterioro en la viga de concreto presforzado elegida, se consideraron 2 escenarios para las condiciones de la superficie de rodamiento (CSR): condiciones promedio y pobres; cuyos factores de impacto son de 1.495 y 1.99 respectivamente, según la Ecuación 21. En este caso, para cada una de estas condiciones, se supuso la presencia de una grieta transversal inicial de 0.1 cm, medida del lecho inferior de la viga al extremo superior de la grieta.

Como ya se había comentado en el capítulo 3, para cada ciclo de carga se calculó el crecimiento de la grieta transversal en el concreto y el deterioro por fatiga generado en el cable de presfuerzo. A continuación se muestra la evolución de la grieta para las condiciones de superficie de rodamiento y el tamaño de grieta inicial considerado (Figuras 4.6 y 4.7), así como el deterioro por fatiga del acero de presfuerzo y, por tanto, de la viga (Figuras 4.8 y 4.9).

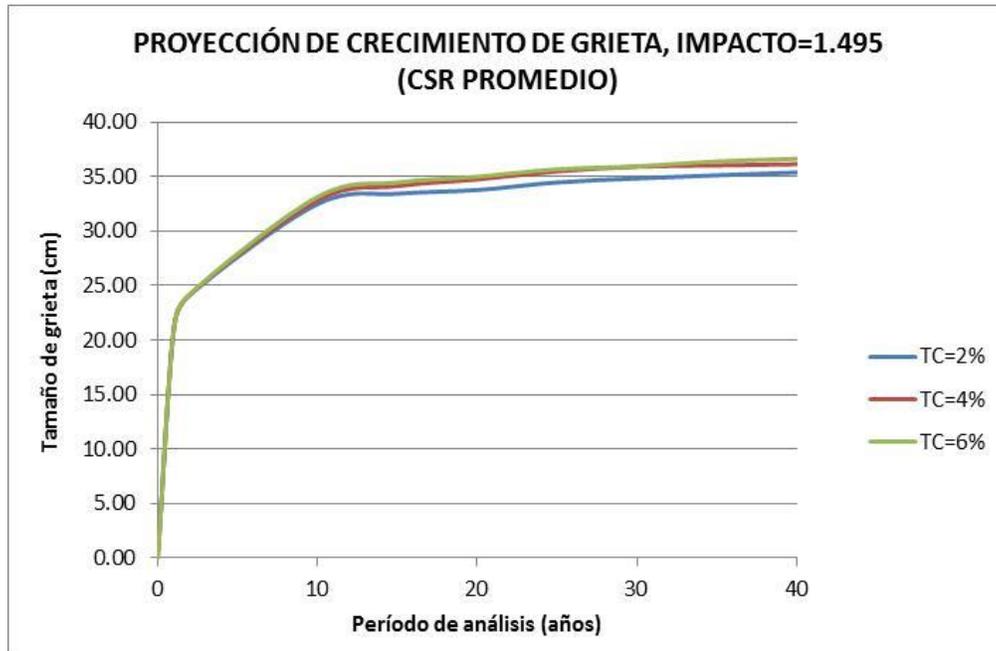


Figura 4.6 Proyección de crecimiento de grieta en la viga más esforzada del puente de referencia considerando una grieta inicial de 0.1 cm, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular

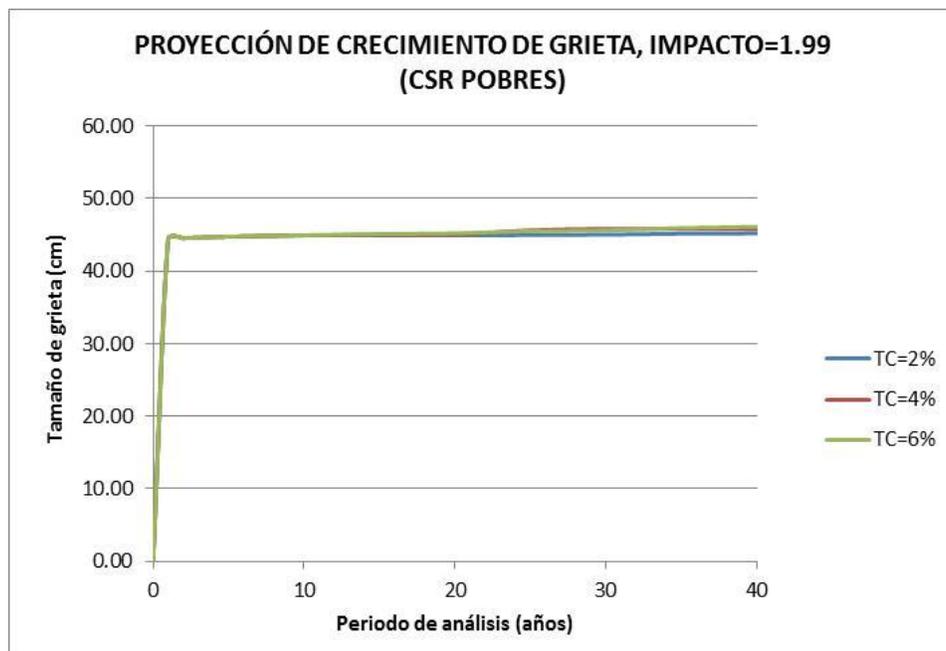


Figura 4.7 Proyección de crecimiento de grieta en la viga más esforzada del puente de referencia considerando una grieta inicial de 0.1 cm, condiciones pobres de la superficie de rodamiento y diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular

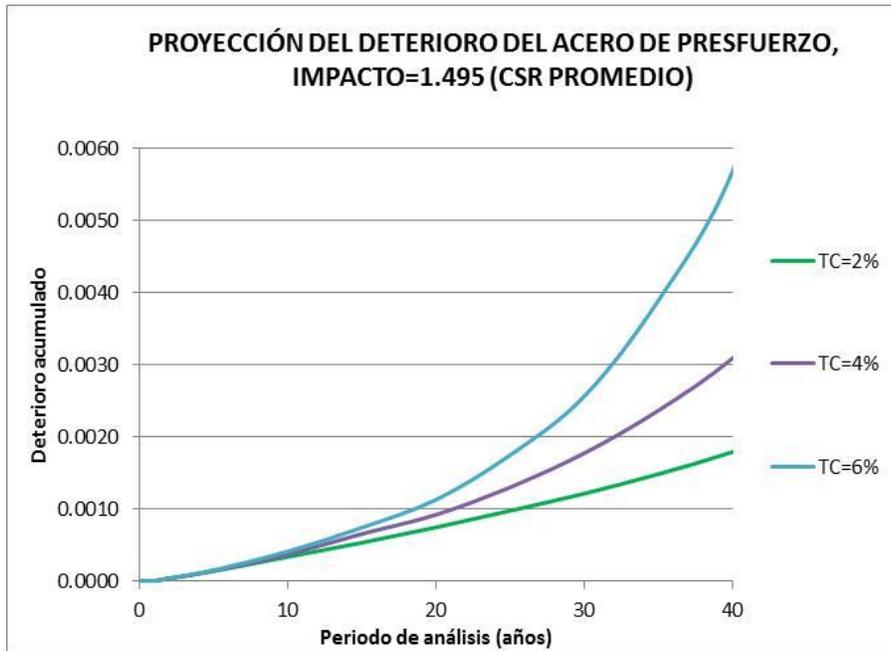


Figura 4.8 Proyección de deterioro del acero de presfuerzo considerando una grieta inicial de 0.1 cm, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular, calculando crecimiento de grieta.

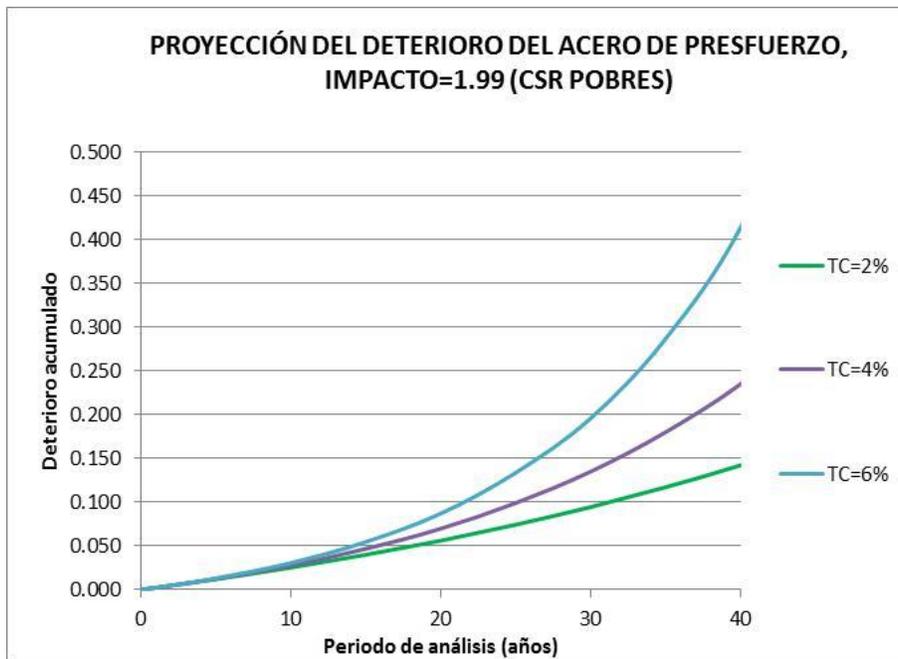


Figura 4.9 Proyección de deterioro del acero de presfuerzo considerando una grieta inicial de 0.1 cm, condiciones pobres de la superficie de rodamiento y diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular, calculando crecimiento de grieta.



Se observa un crecimiento acelerado de la grieta en los primeros años, lo cual se debe a las sobrecargas que generan factores de intensidad de esfuerzo superiores al de fractura hasta ciertas profundidades, produciendo un repentino crecimiento de grieta, que se detiene hasta llegar a un punto en el que los efectos por cargas vehiculares dejan de generar los factores de intensidad necesarios para llegar a la fractura. Este fenómeno se debe a que, conforme crece la grieta, el concreto íntegro ubicado en su frontera superior se empieza a alejar del lecho inferior de la viga, donde se producen los mayores esfuerzos de tensión por aplicación de cargas vehiculares, de modo que el momento flexionante tiene que ser cada vez mayor para producir tensiones en el extremo superior de la grieta, que se ubica cada vez más alejada de la zona con mayores esfuerzos de tensión. Así es que se llega a un punto en el que la magnitud de los máximos momentos flexionantes ya no es capaz de vencer la tenacidad de fractura en el extremo de tal grieta para hacerla crecer por efectos de sobrecarga.

Después de que se desarrollan los crecimientos por sobrecargas comienzan a bajar los factores de intensidad de esfuerzos conforme se llega a una profundidad mayor, lo cual comienza a generar propiamente el crecimiento de la grieta por efectos de fatiga, es decir, debido a factores de intensidad de esfuerzos menores al de fractura. Se puede ver que este crecimiento es mucho más lento e inclusive va disminuyendo aún más para mayores edades y tamaño de la grieta, aproximándose a valores que casi se conservan constantes. Por otro lado, para las condiciones de superficie promedio se desarrolla una zona, justo antes de los 10 años de período de análisis, en el que la pendiente de la curva mostrada disminuye su pendiente con respecto al primer año, pero sin llegar a la pendiente casi nula que se alcanza cuando se desarrollan crecimientos de grieta únicamente por fatiga. Este fenómeno se debe a que el factor de impacto correspondiente produce sobrecargas muy esporádicas, que adicionadas a las cargas que producen crecimiento por efectos de fatiga generan un segmento de la curva en el cual se logra una pendiente mayor a la de la zona de crecimiento por fatiga, pero



menor a la zona en la que gobierna el crecimiento por sobrecargas, que se presenta en el primer año de análisis.

Por otro lado, se determinó el deterioro del acero de presfuerzo para las diferentes tasas de crecimiento de tráfico vehicular y considerando diferentes tamaños constantes de grieta (sin calcular su crecimiento), con el objetivo de observar la influencia de este parámetro en el deterioro ocasionado en el acero de presfuerzo (Figuras 4.10 a la 4.13). Para las condiciones promedio de superficie de rodamiento únicamente se llevó a cabo el análisis para una tasa de crecimiento del 4%, ya que en los resultados anteriores se observó un deterioro por fatiga en el acero de presfuerzo casi insignificante para el factor de impacto correspondiente, mientras para las condiciones pobres de la superficie de rodamiento se determinó el deterioro para las tres tasas de crecimiento de tráfico vehicular consideradas.

Por un lado, en los resultados de este último análisis se puede observar que el deterioro aumenta de manera significativa para grietas de mayor tamaño, aunque, por otro lado, es importante mencionar que se llega a un tamaño de grieta en el cual deja de aumentar tal deterioro, independiente si la grieta sigue creciendo o se queda con tal longitud. Se puede observar que tales tamaños de grieta “límite” son muy similares a los que se alcanzan en las simulaciones de crecimiento de grieta (Figuras 4.6 y 4.7). Es decir, se está verificando el fenómeno, ya comentado en párrafos anteriores, de que el tamaño de grieta llega a un punto tal en el que los momentos flexionantes generados por cargas vehiculares dejan de producir esfuerzos e tensión en el extremo superior de la grieta, lo que hace que no tenga una apertura en su totalidad y el momento de inercia de la sección que sigue trabajando o que es permanecida cerrada por el efecto del presfuerzo, deje de disminuir, generando variaciones de esfuerzo en el acero de presfuerzo que dejan de aumentar y, por lo tanto, de generar un daño mayor ante la presencia de grietas más grandes.

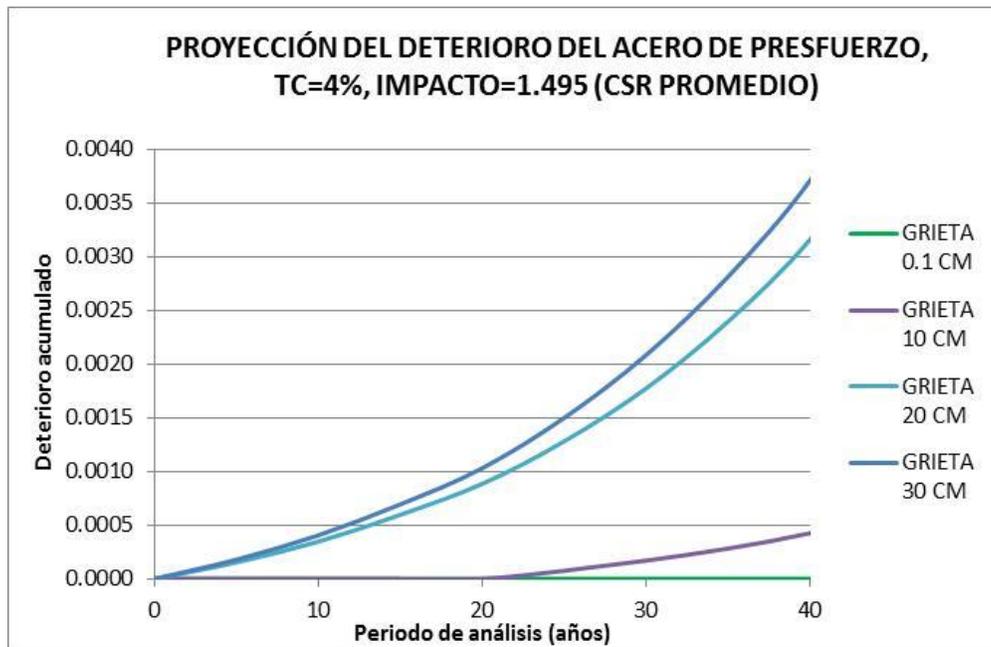


Figura 4.10 Proyección de deterioro del acero de presfuerzo ante diferentes tamaños permanentes de grieta, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 4%

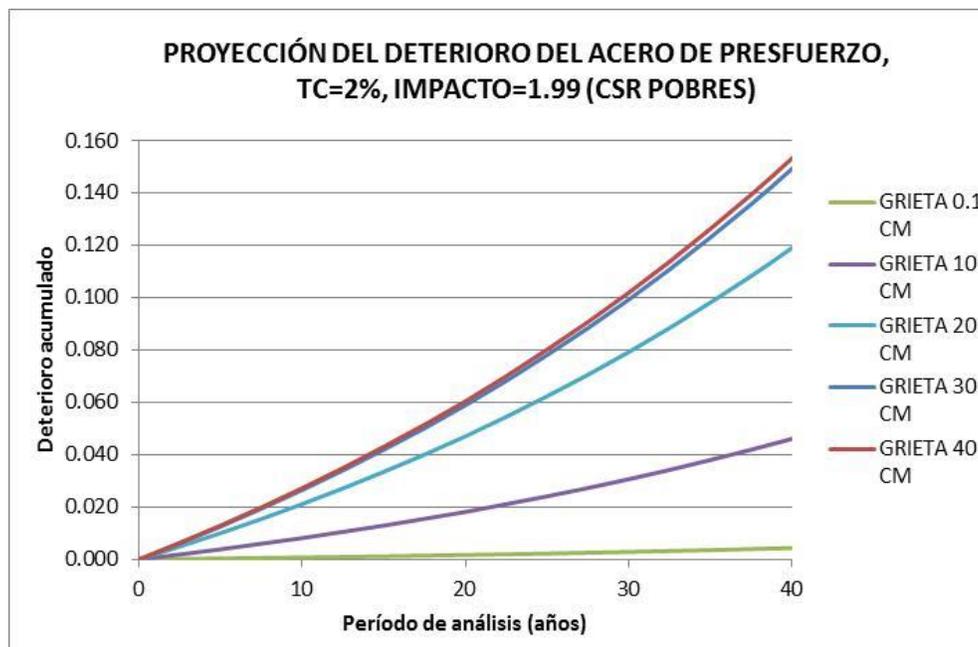


Figura 4.11 Proyección de deterioro del acero de presfuerzo ante diferentes tamaños permanentes de grieta, condiciones pobres de la superficie de rodamiento y una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 2%

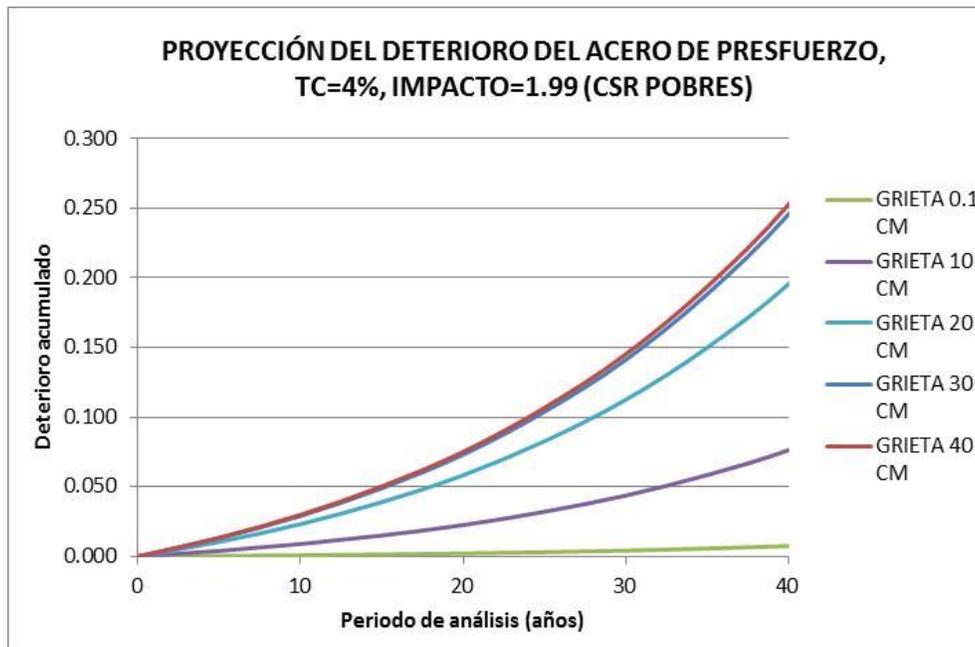


Figura 4.12 Proyección de deterioro del acero de presfuerzo ante diferentes tamaños permanentes de grieta, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 4%

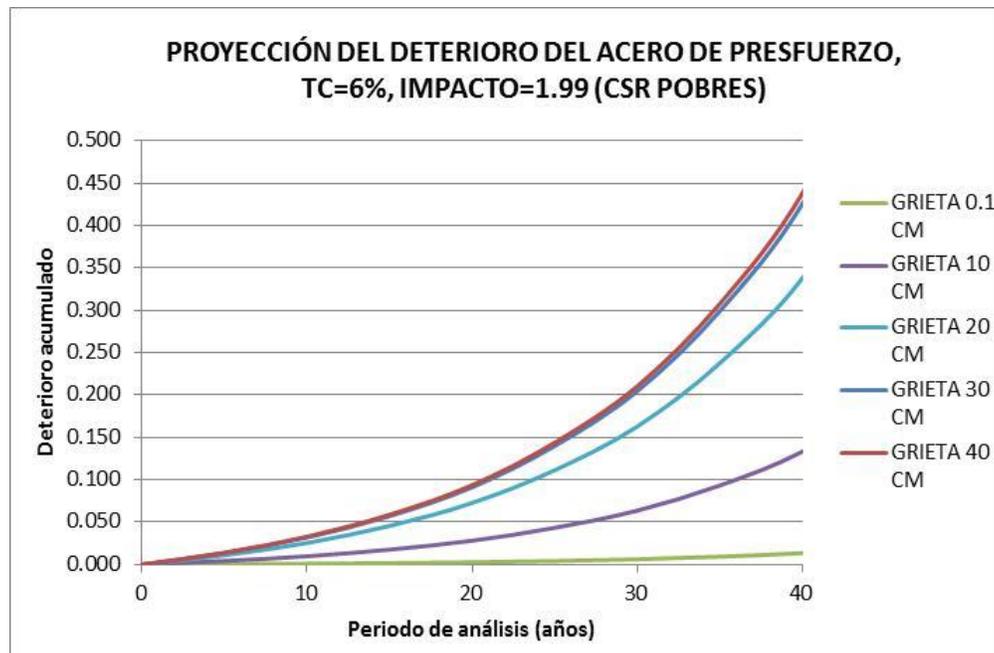


Figura 4.13 Proyección de deterioro del acero de presfuerzo ante diferentes tamaños permanentes de grieta, condiciones promedio de la superficie de rodamiento y una tasa de crecimiento de tráfico vehicular del 6%



#### 4.4 Conclusiones

La metodología planteada se basa en una programación modular y ejecución iterativa que permiten simular una gran variedad de escenarios de carga e incluir diversos modelos de deterioro del concreto presforzado; por lo cual, para los estudios de prognosis, se pueden considerar múltiples variables y efectos. El grado de versatilidad de esta metodología permite el uso de un programa de elemento finito para calcular los esfuerzos y momentos flexionantes ocasionados por las cargas vivas aplicadas al puente, cuya precisión depende del grado de calibración del modelo y de los métodos numéricos utilizados para resolver las ecuaciones que representan el sistema estructural. Si bien, esta alternativa proporciona resultados precisión aceptable, requiere de un alto consumo de tiempo de cómputo; por lo que es posible considerar otras alternativas de solución, como son los métodos aproximados basados en líneas de influencia.

El Método Monte Carlo para la simulación de condiciones de carga en estructuras sometidas a cargas variables en el tiempo, ofrece un esquema de solución versátil y relativamente simple, para representar, desde un punto de vista probabilístico, las diferentes variables estadísticas que influyen para la adecuada representación de los distintos eventos que se presentan. Para el problema particular de los puentes de concreto presforzado, se demuestra que es posible considerar las distintas variables involucradas, como cantidades de vehículos, probabilidad de ocupación del puente, condiciones de carga, peso transmitido por eje, etc., partiendo de análisis estadísticos previos, y utilizarlas para simular las demandas a las que se ven sometidas las estructuras, permitiendo relacionarlas con sus características de resistencia y pronosticar su posible deterioro. Sin embargo, los resultados arrojados por este estudio son altamente sensibles al número de datos de entrada y su tratamiento estadístico, por lo cual éstos deben ser estadísticamente validados para que las simulaciones generen información



que refleje adecuadamente las solicitaciones cotidianas en la estructura de interés y su evolución a través del tiempo.

Por otro lado, se pudo observar que, de acuerdo a las consideraciones y los resultados de este proyecto, el deterioro por fatiga en el acero de presfuerzo en puentes de concreto presforzado es un mecanismo de deterioro que requiere de condiciones muy específicas para sea determinante en la vida útil de la estructura, tales como la ocurrencia de altos factores de impacto por malas condiciones de la superficie de rodamiento o la presencia de grandes grietas verticales en el miembro estructural; ocasionando mayores variaciones de esfuerzos en el acero ante la aplicación de cargas cíclicas. Sin embargo, también se puede ver que, según el código de diseño y las condiciones de tráfico vehicular consideradas, estos puentes puede ser altamente susceptible a sufrir de agrietamientos por la presencia de defectos iniciales, lo cual no representa un riesgo en sí mismo, ya que la falla está regida finalmente por la del acero de presfuerzo; sin embargo, permite el inicio de otros mecanismos de deterioro, como la corrosión, que sumado a la fatiga, puede llevar a una condición crítica.

Es importante resaltar que los resultados de este proyecto deben ser tomados con cautela, ya que los modelos de deterioro no han sido validados totalmente y son únicamente una primera aproximación para la solución del problema bajo un mecanismo de deterioro predefinido. En este caso, el objetivo principal fue proponer una metodología para el cálculo de deterioro de puentes de concreto presforzado. Finalmente, se identificaron temas de investigación para desarrollar en un futuro que permitan determinar con mayor exactitud los factores de intensidad de esfuerzos en el concreto y modelos basados en mecánica de la fractura para sustituir los modelos basados en curvas S-N para el análisis de fatiga en cables de presfuerzo, así como, la validación de todos ellos.



## LITERATURA CITADA

- ACI Committee 224. Report ACI 224R-01, Control of Cracking of Concrete Structures. American Concrete Institute, 2008.
- Aktan H., Ovanesova A. V., Ahlborn T. y Kasper J. M. Causes and Cures for Prestressed Concrete Bridge Deterioration. Center for Structural Durability, Michigan Dot Center of Excellence, 2001.
- Aranguren S. M y Muzachiodi S. L. Implicancias del Data Mining, Primera Edición. Oro Verde: ISIPER/UTN, 2003.
- Badiola V. Diseño de Máquinas I. Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y Materiales. Ed. Navarra. España, 2004.
- Baran E., French C. y Shield C. Effects of Vertical Pre-Release Cracks on Prestressed Bridge Girders, Final Report, 2003-33. Minnesota Department of Transportation. EUA, 2003.
- Bažant Z. P. y Xu K. Size Effect in Fatigue Fracture of Concrete. ACI Materials Journal, V. 90, No. 5, Sep-Oct, 1993
- Bray D. E. y McBride D. Eds. Nondestructive Techniques, John Wiley and Sons, New York, 1992.
- Campbell F. C. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. ASM International. EUA, 2008.



- Carrión V. F. J., Lomelí G. M. G., Quintana R. J. A. y Martínez M. M. La Evaluación No Destructiva de Materiales Estructurales y Puentes, Publicación Técnica No. 231, Instituto Mexicano del Transporte. Qro., México, 2003.
- Chandra Murthy A.R., Palani G.S. e Iyer N.R. State-of-the-art on fracture analysis of concrete structural components. Sádáná Vol. 34, Parte 2. Abril, 2009.
- Cook R. D., Malkus D. S y Plesha M. E. Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Third Edition. University of Wisconsin, John Wiley & Sons, USA, 1989.
- Crespo S. S. Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación Monte Carlo. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. 2011.
- Deng L. y Cai C. S. Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridges. Engineering Structures 32. 2010.
- Doyle, J. F., 1991, Static and Dynamic Analysis of Structures with An Emphasis on Mechanics and Computer Matrix Methods, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Fernández Luis E. y Ayala A. Gustavo. Análisis y evaluación de las cargas vivas vehiculares en México y sus efectos en puentes. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D.F. 2000.



- Gaytan J. A. M. Evaluación Estructural y Económica de Vigas Tipo “AASHTO” para Puentes Carreteros. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 1999.
- Getachew A. Traffic Load Effects on Bridges, Statistical Analysis of Collected and Monte Carlo Simulated Vehicle Data. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003.
- Hagenberger, M. J. Consideration of Strand Fatigue for Loading Rating Prestressed Concrete Bridges. Doctor of Philosophy Dissertation. The University of Texas at Austin. EUA, 2004.
- Heller Bryan. Fatigue Response of Pretensioned Concrete Beams. M. S. E. Thesis, The University of Texas at Austin, Agosto, 2003.
- Liu Y. y Mahadevan S. Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals. International Journal of Fatigue, vol. 27. EUA, 2005.
- Mast R. F. Analysis of Cracked Prestressed Concrete Sections: A Practical Approach. PCI Journal, July-August, 1998.
- Meli R. Diseño Estructural. Editorial Limusa, Primera Edición. México, 1985.
- Muller J. F. y Dux P. F. Fatigue of Prestressed Concrete Beams with Inclined Strands. Journal of Structural Engineering. Vol. 120, No. 4. 1994
- Nilson A. H. Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. Editorial Limusa, primera edición, México, 1990.



- Overman T. R. Flexural Fatigue Behavior of Pretensioned Concrete Girders. M. S. Thesis, Department of Civil Engineering. The University of Texas at Austin, 1984.
- Overman T. R., Breen J. E. y Frank K. H. Fatigue Behavior of Pretensioned Concrete Girders, Research Report No. 300-2F. Texas State Department of Highways and Public Transportation. EUA, 1984.
- Paris, P.C., Erdogan, F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering, Vol. 85, 1960.
- Paulson C., Frank K. y Breen J. A Fatigue Study of Prestressing Strand. Research Report 300-1. Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin. Texas, 1983.
- Pepper D. W. y Heinrich J. C. The Finite Element Method, Basic Concepts and Applications, Second Edition. Taylor & Francis Group, USA, 2006.
- Perdikaris P. C. y Calomino A. M. Kinetics of Crack Growth in Plain Concrete. Proceedings of the International Conference on Fracture of Concrete and Rock, Houston, Junio 1987.
- Quintana R. J. Análisis del Método de Búsqueda Global para la Detección de Daño y Monitoreo Estructural de Puentes. Tesis de Doctorado. Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. México, D.F. 2009.
- Rascón Chávez Octavio A. Modelo de cargas vivas vehiculares para diseño estructural de puentes en México, Publicación Técnica No. 118. Instituto Mexicano del Transporte. Qro., México, 1999.



- Rascón Chávez Octavio A., Barousse Moreno Miguel y Ventura Suárez Gabriel. Análisis Normativo y Estadístico de Cargas Vivas en Puentes en México, Publicación Técnica No. 97. Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Qro, México, 1997.
- Ray S. y Chandra Kishen J.M. Fatigue crack propagation model for plain concrete – An analogy with population growth. Engineering Fracture Mechanics 77. 2010.
- Real E., Rodríguez C., Canteli A. F., Belzunce F. J. y Aenlle M. L. Efecto de la tensión media en el comportamiento a fatiga de barras corrugadas de acero inoxidable dúplex. Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 22. España, 2005.
- Ruiz C. J., Peláez V. J. y Martínez M. A. Teorías de daño acumulativo en la fatiga. Técnica Industrial 248, Marzo 2003.
- Sain T. y Chandra Kishen J.M. Prediction of Fatigue Strength in Plain and Reinforced Concrete Beams. ACI Structural Journal, September-October, 2007.
- Salmon C. G. y Johnson J. E. Steel Structures, Design and Behavior. Cuarta edición. HarperCollins College Publishers. EUA, 1996.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Autotransporte Federal. Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1995, sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. México, 1995.



- Slowik V., Plizzari G. A. y Saouma V. E. Fracture of Concrete under Variable Amplitude Fatigue Loading. ACI Materials Journal, Technical Paper. May-Jun, 1996.
- Sobol' I. M. A primer for the Monte Carlo method. CRC Press. EUA, 1994.
- Standard Specifications for Highway Bridges, AASHTO. Fifteenth edition, Washington, DC. EUA, 1993.
- Wollman G. P., Yates D. L., Breen J. E. y Kreger M. E. Fretting Fatigue in Post-tensioned Concrete. The University of Texas at Austin. EUA, 1988.
- Wyffels T., Catherine F. y Shield C. Effects of Pre-Release Cracks in High-Strength Prestressed Girders., Final Report 2000-25. Minnesota Department of Transportation. EUA, 2000.



## APÉNDICE A

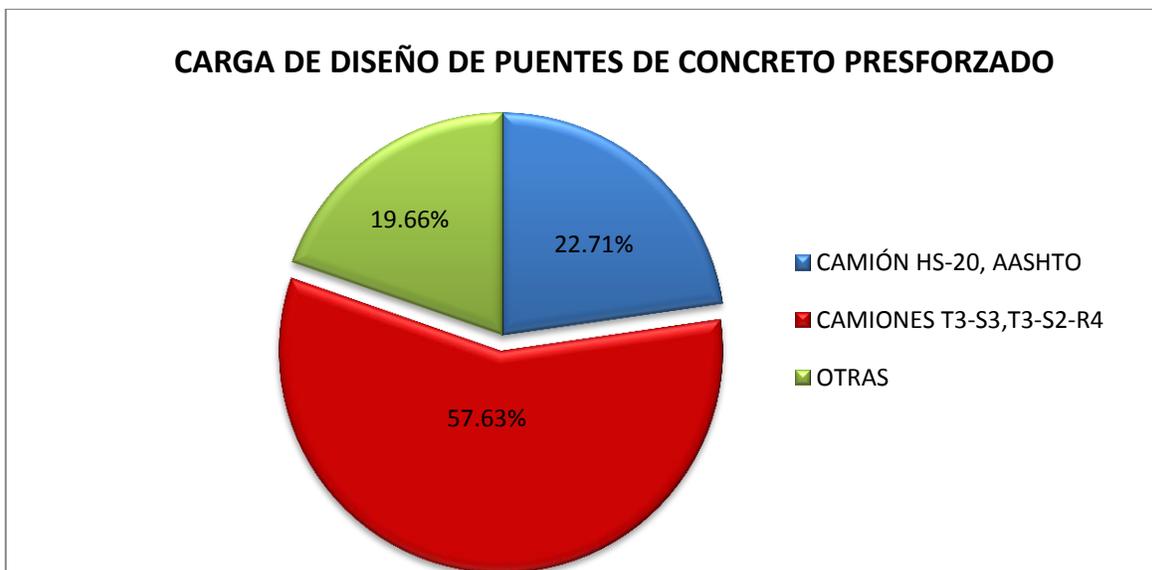
### Identificación de características del puente tipo de acuerdo a la base de datos del SIPUMEX



## Carga de diseño

La relevancia de la carga de diseño de estos puentes radica en que está directamente relacionada con las características estructurales del puente, por lo cual se vuelve primordial su identificación. Particularmente, en nuestro país se han diseñado puentes con las cargas establecidas en el reglamento norteamericano AASHTO, con la configuración vehicular denominada HS-20, así como las establecidas en el Reglamento de Pesos y Dimensiones de nuestro país, específicamente con las configuraciones denominadas T3-S3 y T3-S2-R4, según se observa a continuación:

CARGA DE DISEÑO DE PUENTES DE CONCRETO PRESFORZADO		
CARGA DE DISEÑO	CANTIDAD	PORCENTAJE
CAMIÓN HS-20, AASHTO	417	22.71%
CAMIONES T3-S3,T3-S2-R4, RPD	1058	57.63%
OTRAS	361	19.66%



Se puede ver que la carga de diseño que más predomina es la de las configuraciones vehiculares del Reglamento de Pesos y Dimensiones. Sin embargo, como ya se había mencionado, la configuración que produce los

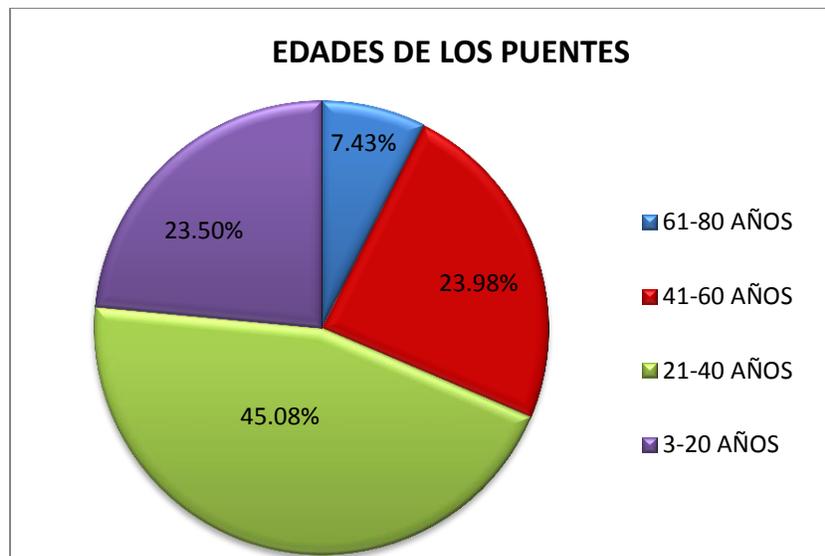


momentos flexionantes más pequeños es la del reglamento norteamericano AASHTO y, por lo tanto, es la que genera diseños más desfavorables. Considerando tal situación se decide seleccionar los puentes que fueron diseñados con esta última carga, a pesar de no representar la mayoría, ya que es de particular interés observar su comportamiento a fatiga, tomando en cuenta que tienen características estructurales más pobres y, por lo tanto, son los que podrían sufrir un mayor daño ante sus condiciones de uso.

### Edad

En la muestra restante de 417 puentes (diseñados con la configuración vehicular del reglamento AASHTO) se observan las siguientes edades de tales estructuras:

EIDADES DE LOS PUENTES		
RANGOS	CANTIDAD	PORCENTAJE
61-80 AÑOS	31	7.43%
41-60 AÑOS	100	23.98%
21-40 AÑOS	188	45.08%
3-20 AÑOS	98	23.50%



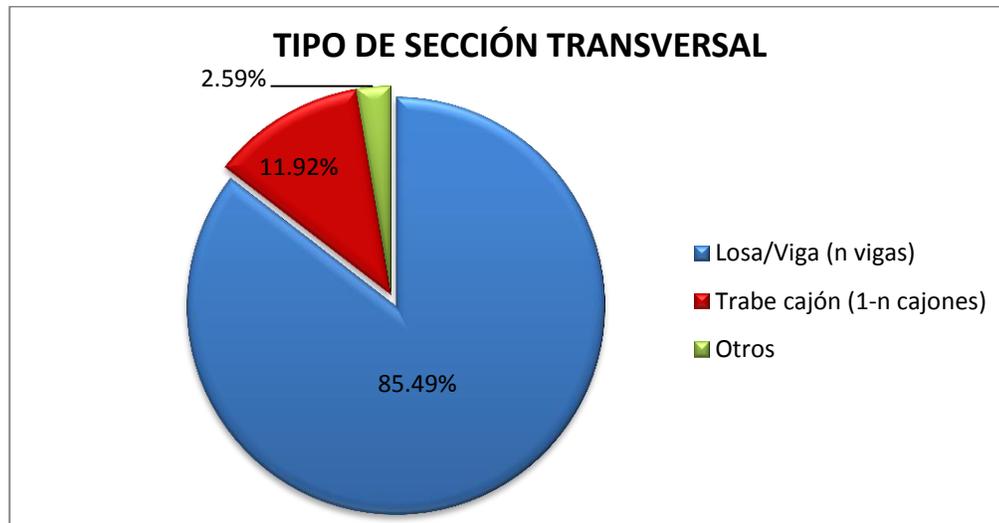


De los cuatro rangos de edades seleccionados se observa que dentro de tres de ellos quedan la gran mayoría de puentes, destacando aquellos con una antigüedad de 21 a 40 años, así que se deciden seleccionar todos los puentes de entre 3 y 60 años, con el objetivo principal de no reducir demasiado la muestra, que ahora queda con 386 puentes.

### Configuración estructural de la sección transversal

Las configuraciones estructurales de la sección transversal más utilizadas son las de losa-viga y las de trabe cajón, con los siguientes porcentajes:

TIPO DE SECCIÓN TRANSVERSAL		
SECCIÓN TRANSVERSAL	CANTIDAD	PORCENTAJE
Losa/Viga (n vigas)	330	85.49%
Trabe cajón (1-n cajones)	46	11.92%
Otros	10	2.59%



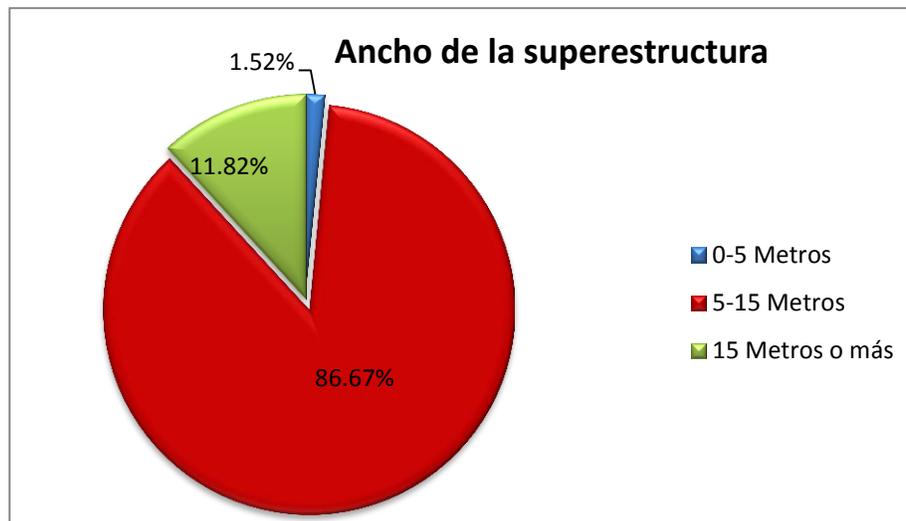
Se observa que predominan los puentes con la configuración losa-viga, así que de ellos se determinan finalmente las características geométricas.



## Ancho total de la superestructura

De la muestra restante de 330 puentes con la configuración losa-viga se analizan las propiedades geométricas del ancho total del puente, así como su longitud. Primeramente, se observa que el ancho más usual varía entre 5 y 15 metros:

ANCHO DE LA SUPERESTRUCTURA		
ANCHO TOTAL	CANTIDAD	PORCENTAJE
0-5 Metros	5	1.52%
5-15 Metros	286	86.67%
15 Metros o más	39	11.82%



La gran mayoría de los puentes de la muestra de interés tienen un ancho total de entre 5 y 15 metros, así que de los puentes que están en este rango se obtiene el promedio, que es de 10.30 metros.

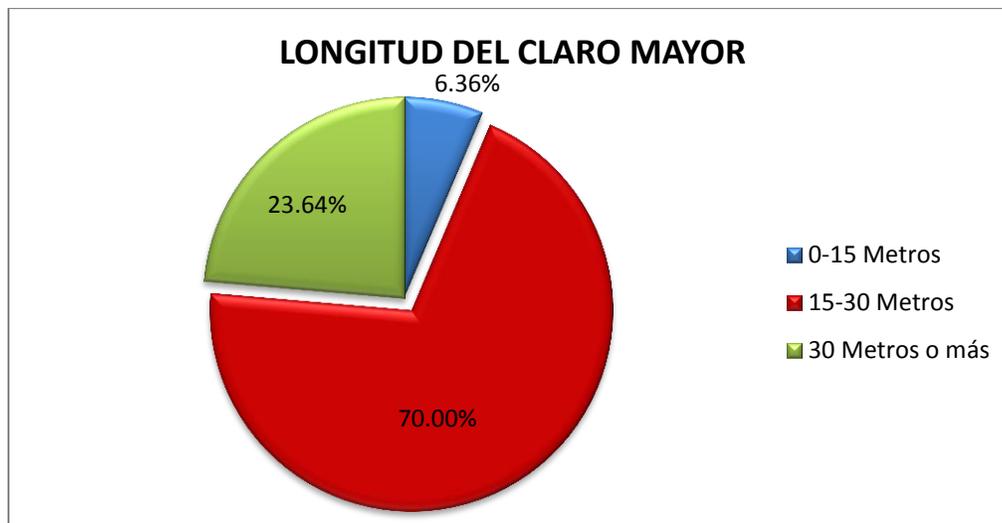
## Longitud de los claros

Con la misma muestra de 330 puentes se identifica la longitud representativa de los claros, aún sin hacer diferenciación entre el número de claros del puente, con el propósito de observar si existe una uniformidad en estos



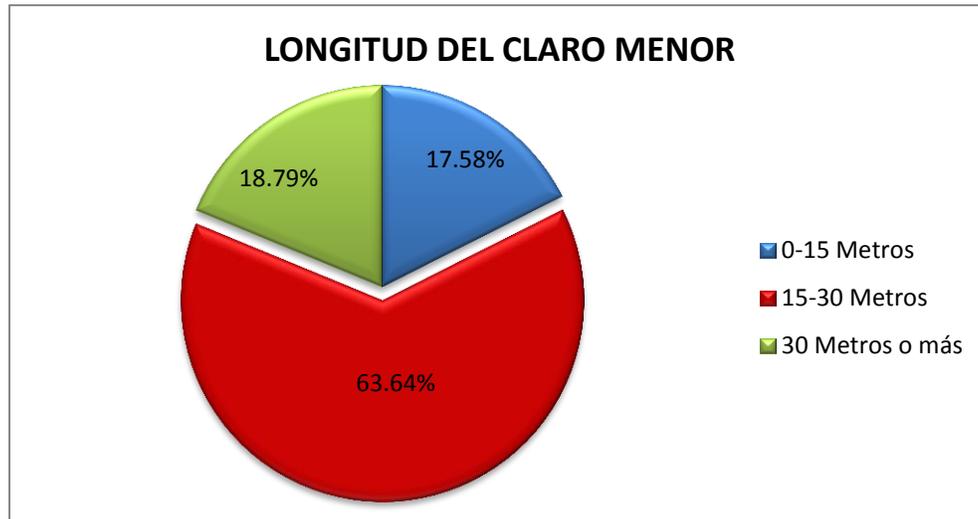
valores y considerando que la base de datos del SIPUMEX diferencia entre las longitudes del claro mayor y menor. Tales longitudes quedan de la siguiente manera:

LONGITUD DEL CLARO MAYOR		
LONG. DE CLARO MAYOR	CANTIDAD	PORCENTAJE
0-15 Metros	21	6.36%
15-30 Metros	231	70.00%
30 Metros o más	78	23.64%



LONGITUD DEL CLARO MENOR		
LONG. DE CLARO MENOR	CANTIDAD	PORCENTAJE
0-15 Metros	58	17.58%
15-30 Metros	210	63.64%
30 Metros o más	62	18.79%

Tanto para el claro mayor como para el claro menor la longitud representativa se ubica entre 15 y 30 metros y para esos grupos el promedio es de 21.98 y 21.57 metros para cada claro respectivamente. Tales longitudes son muy similares, así que sin importar el número de claros del puente correspondiente puede decirse que la longitud representativa de cada uno de ellos se ubica entre tales valores.

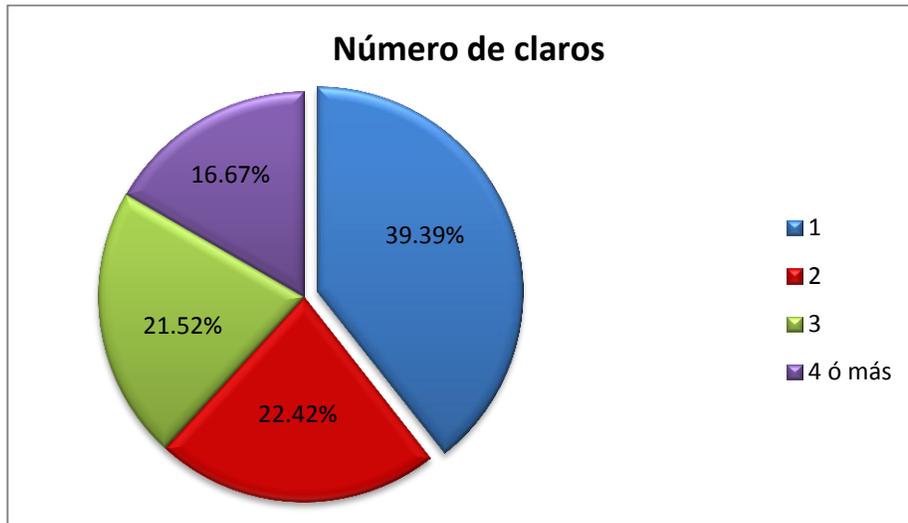


### Número de claros

Por último, para puntualizar las características del puente a modelar a continuación se identifican los números de claros de los puentes de la última muestra:

NÚMERO DE CLAROS		
CLAROS	CANTIDAD	PORCENTAJE
1	130	39.39%
2	74	22.42%
3	71	21.52%
4 ó más	55	16.67%

Se observa que la mayor parte de los puentes de la última muestra cuentan con un solo claro, el cual tiene una longitud representativa próxima a la determinada en el inciso anterior.





## **APÉNDICE B**

### **Diseño estructural del puente tipo**



Del análisis de la base de datos del Sistema de Puentes de México (SIPUMEX), se determinaron las características representativas de aquellas estructuras diseñadas con las cargas establecidas en el reglamento norteamericano AASHTO. Los principales atributos geométricos y estructurales identificados son los siguientes:

<b>Características principales del puente tipo</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Característica representativa</b>
<b>Carga de diseño</b>	Vehículo HS-20 (AASHTO)
<b>Tipo de sección transversal</b>	Losa-viga ("n" vigas)
<b>Número de claros</b>	1
<b>Longitud</b>	22 metros
<b>Ancho total</b>	10.30 metros

Cabe destacar que los porcentajes de puentes de cada material fueron determinados del gran total del inventario, con el objetivo de identificar cuántos han sido construidos con concreto presforzado. El resto de los atributos se determinaron específicamente con aquellos puentes construidos con este material y diseñados con las cargas del reglamento norteamericano AASHTO, que son objeto de estudio de este proyecto, debido a que tienen un diseño más desfavorable por considerar cargas menores en la etapa del análisis estructural.

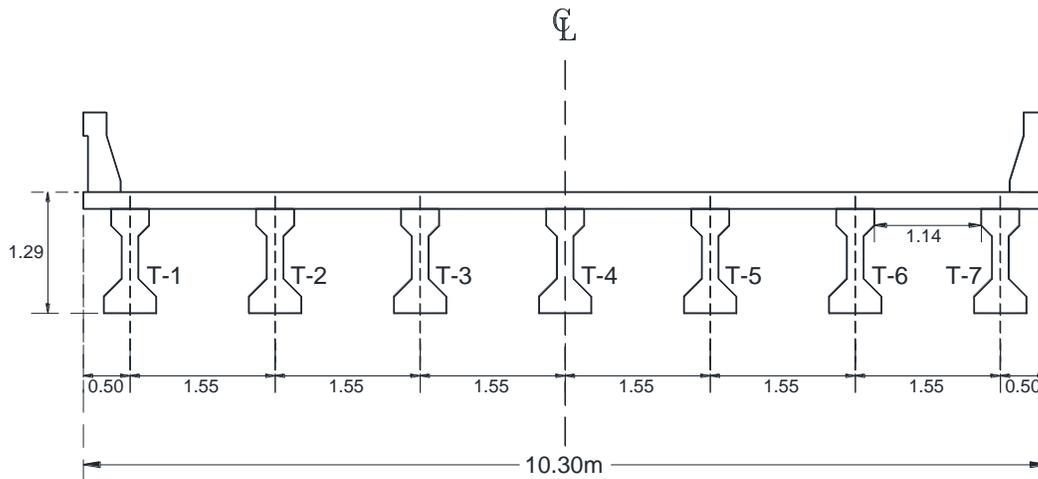
Se puede observar que la configuración representativa de estos puentes es de un sistema losa-viga, con 4 o más vigas de sección constante, apoyadas simplemente. De las propiedades geométricas se obtuvieron promedios, los cuales serán redondeados a cantidades cerradas para elaborar el modelo. Para el caso de la longitud, cuyos promedios se encuentran entre 21.57 y 21.98 metros, se redondeará a una cantidad de 22.00 metros (72.18 pies) y el ancho total del puente tomará con la cantidad resultante del promedio: 10.30 metros (33.79 pies).

Por otro lado, la edad predominante de los puentes diseñados con las cargas de interés no es tan marcada en un grupo con un rango pequeño de edades, de modo que se puede ver que van desde los 3 hasta los 60 años de antigüedad, teniendo un promedio de 30 años de edad. La importancia de este dato radica principalmente en las diferencias de los reglamentos de diseño a través del tiempo. En el caso de las normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), consideradas por mucho tiempo en el diseño de puentes en nuestro país, se dio uno de los cambios más importantes a partir de la versión de 1998, que emplea la metodología del Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD), con factores desarrollados a partir de la teoría de la confiabilidad en base al conocimiento estadístico de las cargas y el comportamiento de las estructuras, con la nueva filosofía de definir estados límites, los cuales incluyen la resistencia, fatiga, fractura, serviciabilidad y la existencia de algún evento extremo, tomando al puente en su totalidad, incluyendo

al suelo (Rascón et al., 1997). En cambio, antes de esta versión, los cambios no fueron tan radicales entre ediciones anteriores, así que se decidió utilizar la versión denominada “Standard Specification for Highway Bridges” de 1993 para realizar el diseño del puente a modelar, auxiliándose con las normas ACI 318-95.

## Análisis y diseño de la losa de tráfico

Primeramente se hace una propuesta preliminar del sistema estructural, el cual consiste de una losa con un peralte de 18 cm (7.09 pulg), soportada con un sistema de 7 vigas AASHTO tipo III, usadas ampliamente en los puentes de carreteras federales de nuestro país, separadas por una distancia de 1.55 metros centro a centro:



### - Espesor mínimo

Se revisa el peralte de la losa de acuerdo al espesor mínimo marcado en la sección 8.9.2 del reglamento AASHTO:

$$t_s = \frac{S + 10}{30} \geq 0.542 \quad (ft)$$

donde  $S$  es la distancia libre entre las vigas, medida en pies. Así que:

$$t_s = \frac{3.74 + 10}{30} = 0.458 < 0.542 \quad \therefore \quad t_s = 0.542 \text{ ft} = 6.5 \text{ pulg}$$

Por lo tanto el espesor propuesto de 7.09 pulg es adecuado.

### - Cálculo de momento flexionante por carga muerta

Las cargas soportadas por la losa corresponden a su peso propio y al transmitido por la carpeta asfáltica inicial, así como la posible colocación de una



capa futura por fines de mantenimiento, y se determinan para una franja de 1 pie de ancho de losa:

Cargas muertas soportadas por la losa			
Elemento	Peso específico (lb/ft <sup>3</sup> )	Espesor (pulg)	Carga (lb/ft)
Losa	150.00	7.09	88.63
Carpeta asfáltica	150.00	3.00	37.50
Carpeta (mantenimiento)	150.00	2.00	25.00
<b>TOTAL</b>			<b>151.13</b>

De acuerdo al reglamento ACI 318-95 (Sección 8.3.3), los momentos positivos y negativos actuantes en un claro interior de una viga con múltiples apoyos simples son los siguientes:

$$M(+)=\frac{wl^2}{16} ; M(+)=\frac{wl^2}{10}$$

De manera que se tomará el mayor para calcular el momento actuante en una franja de 1 pie de ancho de la losa:

$$M_D = \frac{wl^2}{10} = \frac{151.13(5.085)^2}{10} = 390.78 \text{ lb} - \text{pie}$$

- Cálculo de momento flexionante por carga viva

Para losas continuas con más de tres soportes y refuerzo perpendicular al tráfico, el reglamento AASHTO en su sección 3.24.3.1, establece la siguiente ecuación para calcular el momento actuante debido al paso del camión de diseño:

$$M_L = 0.8 \frac{(S + 2)}{32} P_{HS-20}$$

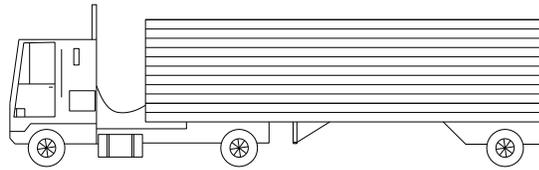
Donde  $S$  es la distancia libre entre vigas, medida en pies y  $P_{HS-20}$  es la carga impresa por las llantas que soportan mayor peso del vehículo denominado HS-20.

Considerando la configuración del vehículo de diseño HS 20-44, indicado por las normas AASHTO, la carga  $P_{HS-20}$  es igual a 0.5(16,000 lbs) y el momento buscado es:

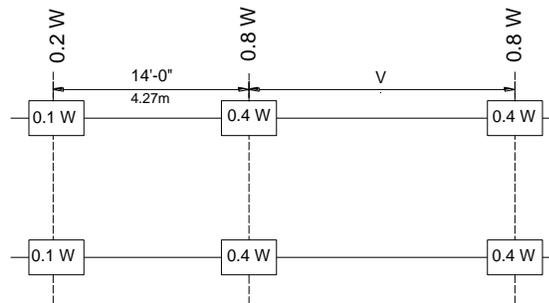
$$M_L = 0.8 \frac{(3.74 + 2)}{32} (16,000) = 2296 \text{ lb} - \text{pie}$$



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presfuerzoado con agrietamiento



HS20-44	8,000 Lbs 3,632 Kgs	32,000 Lbs 14,526 Kgs	32,000 Lbs 14,526 Kgs
HS15-44	6,000 Lbs 2,724 Kgs	24,000 Lbs 10,896 Kgs	24,000 Lbs 10,896 Kgs



W = Peso combinado de los dos primeros ejes  
V = Espacio variable (14'-30')

Según la sección 3.8.2.1 de estas normas, el factor de impacto ocasionado por el comportamiento dinámico de la aplicación de la carga es:

$$I = \frac{50}{L + 125} \leq 0.30$$

Donde  $L$  es la longitud del claro donde es aplicada la carga, que en este caso será  $L=S$ , así que:

$$I = \frac{50}{3.74 + 125} = 0.388 > 0.30 \quad \therefore \quad I = 0.30$$

Y el momento total por carga viva, incluyendo impacto es:

$$M_{(L+I)} = (1 + I)(M_L) = 1.30(2296 \text{ lb} - \text{pie}) = 2985 \text{ lb} - \text{pie}$$

- Cálculo de momento último

En la sección 3.22.1 de las normas de la AASHTO se establecen las combinaciones de carga que deben ser utilizadas en estas estructuras. Según ese criterio se tiene que:

$$M_u = 1.3\{M_D + 1.67(M_{(L+I)})\}$$

$$M_u = 1.3\{390.78 \text{ lb} - \text{pie} + 1.67(2985 \text{ lb} - \text{pie})\} = 6,988.56 \text{ lb} - \text{pie}$$

$$M_u = \mathbf{83,862.79 \text{ lb} - \text{pulg}}$$



- Cálculo de acero de refuerzo por flexión

Para calcular el acero de refuerzo de la losa de tráfico primeramente se establecen las características de los materiales a utilizar. Considerando que para la losa se usa concreto colado in situ y que es común utilizar acero grado 60, sus resistencias de compresión y límite de fluencia son respectivamente:

$$f'_c = 4,000 \text{ lb/pulg}^2$$

$$f_y = 60,000 \text{ lb/pulg}^2$$

Con las características de los materiales y el momento último se calcula la cuantía de acero:

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85f'_c}} \right)$$

Donde:

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2}$$

Se hace la consideración que para flexión  $\phi = 0.9$  y que la AASHTO establece en su sección 8.22 que los recubrimientos mínimos para un clima medio son:

Recubrimiento superior: 2 pulg.

Recubrimiento inferior: 1 pulg.

De este modo, proponiendo un recubrimiento de 1.5 pulg y varillas del No. 4:

$$d = (7.09 - 1.5 - 0.25) \text{ pulg} = 5.34 \text{ pulg}$$

Para una franja de 1 pie de ancho ( $b = 1 \text{ pie} = 12 \text{ pulg}$ ):

$$R_n = \frac{83,863 \text{ lb} - \text{pulg}}{0.9(12 \text{ pulg})(5.34 \text{ pulg})^2} = 272.31 \text{ lb/pulg}^2$$

Y la cuantía de acero es:

$$\rho = \frac{0.85(4,000)}{60,000} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2(272.31)}{0.85(4,000)}} \right) = 4.736 \times 10^{-3}$$

Tal cuantía es revisada con los requerimientos de acero mínimo y máximo establecidos en las normas AASHTO, indicados en su sección 8.16.3.2:

$$\rho_{min} = \frac{3\sqrt{f'_c}}{f_y} = \frac{3\sqrt{4,000}}{60,000} = 3.162 \times 10^{-3}$$



$$\rho_{m\acute{a}x} = 0.75 \left( \frac{0.85\beta_1 f'_c}{f_y} \left( \frac{87,000}{87,000 + f'_c} \right) \right) = 0.75 \left( \frac{0.85(0.85)(4,000)}{60,000} \left( \frac{87,000}{87,000 + 4,000} \right) \right)$$

$$\rho_{m\acute{a}x} = 0.0345$$

Ya que:

$$3.162 \times 10^{-3} < 4.736 \times 10^{-3} < 0.0345$$

Se considera apropiada la cuantía de acero calculada. Por lo tanto el área de acero superior e inferior para una franja de 1 pie de ancho es:

$$A_s = \rho b d = 4.736 \times 10^{-3} (12)(5.34) = 0.303 \text{ plg}^2$$

Tomando en cuenta que el área de una varilla del No. 4 es de 0.1963 pulg<sup>2</sup> la separación a la que se encontrarán estas varillas es:

$$\text{Separación} = \frac{12}{\left( \frac{0.303}{0.1969} \right)} = 7.8 \text{ pulg}$$

Así que se decide utilizar acero longitudinal por flexión en los lechos inferior y superior consistente en varillas del número 4 a cada 7.5 pulg.

#### - Cálculo de acero transversal

Para calcular el acero transversal del lecho inferior, paralelo al tráfico se recurre a la sección 3.24.10.2 del reglamento AASHTO, que indica que transversalmente se debe usar el siguiente porcentaje de acero longitudinal:

$$\text{Porcentaje} = \frac{220}{\sqrt{S}} \leq 67\%$$

Así que:

$$\text{Porcentaje} = \frac{220}{\sqrt{3.74}} = 113.76\% > 67\% \quad \therefore \text{Porcentaje} = 67\%$$

Si también se colocan varillas del No. 4 transversalmente, su separación será:

$$\text{Separación}_{trans} = \frac{7.5}{0.67} = 11.19 \sim 11 \text{ pulg}$$

Así que transversalmente en el lecho inferior se colocarán varillas del No. 4 a cada 11 pulgadas.

En el lecho superior únicamente se refuerza transversalmente por temperatura. Según la sección 8.20 del reglamento AASHTO:

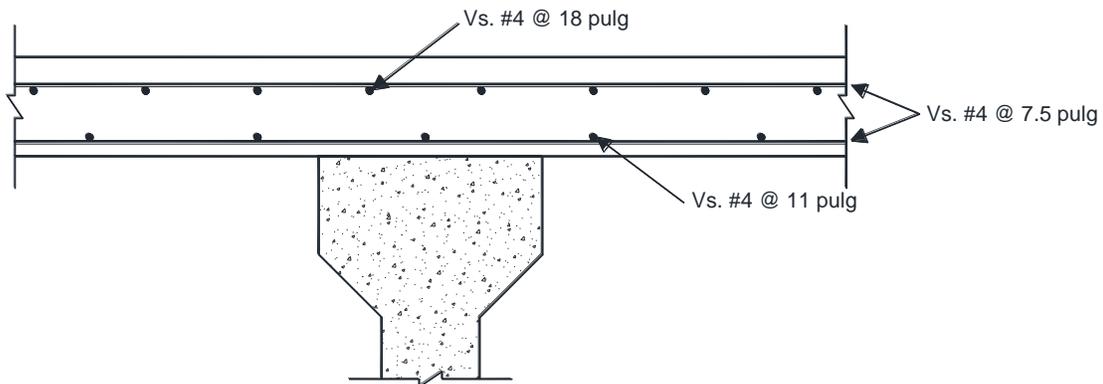
$$A_{s,temp} \geq 0.125 \text{ plg}^2$$



Si se usan varillas del número 4:

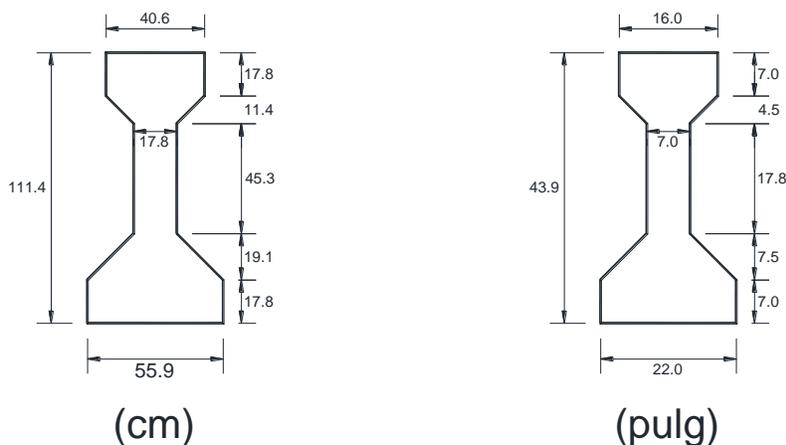
$$Separación_{trans} = \frac{12}{\left(\frac{0.125}{0.1969}\right)} = 18.9 \text{ pulg} > 18 \text{ pulg}$$

Ya que la separación se restringe a un máximo de 18 pulg, se usará este último valor. Así que en el lecho superior transversalmente se colocarán varillas del No. 4 a cada 18 pulgadas.



### Análisis y diseño de las vigas

Como ya se había mencionado, se propone que la losa esté soportada por vigas AASHTO tipo III, cuyas características geométricas se presentan a continuación:



Dimensiones viga AASHTO tipo III



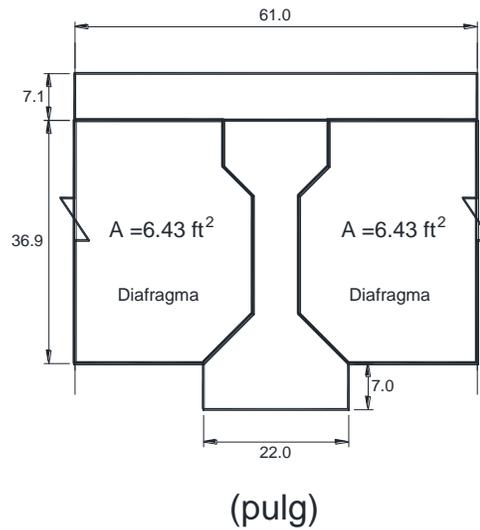
<b>Propiedades geométricas viga AASHTO tipo III</b>		
	<b>cm<sup>2</sup></b>	<b>in<sup>2</sup></b>
<b>Área</b>	3,613.00	560.02
	<b>cm<sup>4</sup></b>	<b>in<sup>4</sup></b>
<b>I<sub>x</sub></b>	5,220,000.00	125,411.00
	<b>cm</b>	<b>in</b>
<b>C<sub>b</sub></b>	51.50	20.28
<b>C<sub>t</sub></b>	59.90	23.58
	<b>cm<sup>3</sup></b>	<b>in<sup>3</sup></b>
<b>S<sub>b</sub></b>	101,359.22	6,185.32
<b>S<sub>t</sub></b>	87,145.24	5,317.93

- Cálculo de cortantes y momentos flexionantes por carga muerta

Para calcular los efectos en las vigas se considerará una de las interiores, que soporta toda la franja de losa de 1.55 m (5.08 pies) de ancho. Así que parte de la carga muerta que soporta, incluyendo su peso propio, la losa de tráfico y carpeta asfáltica, así como un área de parapeto, correspondiente al área total de los parapetos de ambos extremos del puente divididos equitativamente entre todas las vigas, es:

<b>Cargas muertas soportadas por las vigas</b>					
<b>Elemento</b>	<b>Peso específico (lb/ft<sup>3</sup>)</b>	<b>Espesor (pulg)</b>	<b>Ancho (ft)</b>	<b>Área trans. (ft<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga (lb/ft)</b>
<b>Losa</b>	150.00	7.09	5.09	3.00	451.10
<b>Carpeta asfáltica</b>	150.00	5.00	5.09	1.27	318.13
<b>Viga (P.P.)</b>	150.00	-	-	3.89	583.35
<b>Parapetos</b>	150.00	-	-	0.73	109.05
				<b>TOTAL</b>	<b>1461.63</b>

Por otro lado, se propone que existan dos diafragmas en dirección perpendicular el eje de las vigas, en cada tercio del claro del puente, con un ancho de 30.48 cm = 1 ft y con la siguiente vista frontal del área tributaria que afecta a cada viga:



### Dimensiones de diafragma interior

Así que tales diafragmas generarán un cortante igual a:

$$P = 150lb/ft^3(2 \times 6.43ft^2)(1ft) = 1,929lb$$

Debido a la longitud significativa de la viga (72.18 pies), se decide calcular los efectos ocasionados por las cargas muertas a cada décimo de la longitud de la viga, iniciando en el apoyo y terminando al centro de claro, para más adelante revisar que se cumpla con las condiciones de diseño en cada punto de ella y colocar el refuerzo adecuado:

Ubicación		Cortantes (kips)			
		Carga muerta (DL)			
Décimo	Long. (ft)	P.P. Viga (lb)	P.P. Losa (lb)	P.P. Carpeta+ Parapeto + Diafragma (lb)	Total DL (kip)
<b>0 L</b>	0.00	21053.38	16279.90	17345.42	<b>54.68</b>
<b>0.1 L</b>	7.22	16842.70	13023.92	14262.14	<b>44.13</b>
<b>0.2 L</b>	14.44	12632.03	9767.94	11178.85	<b>33.58</b>
<b>0.3 L</b>	21.65	8421.35	6511.96	8095.57	<b>23.03</b>
<b>0.4 L</b>	28.87	4210.68	3255.98	3083.28	<b>10.55</b>
<b>0.5 L</b>	36.09	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>

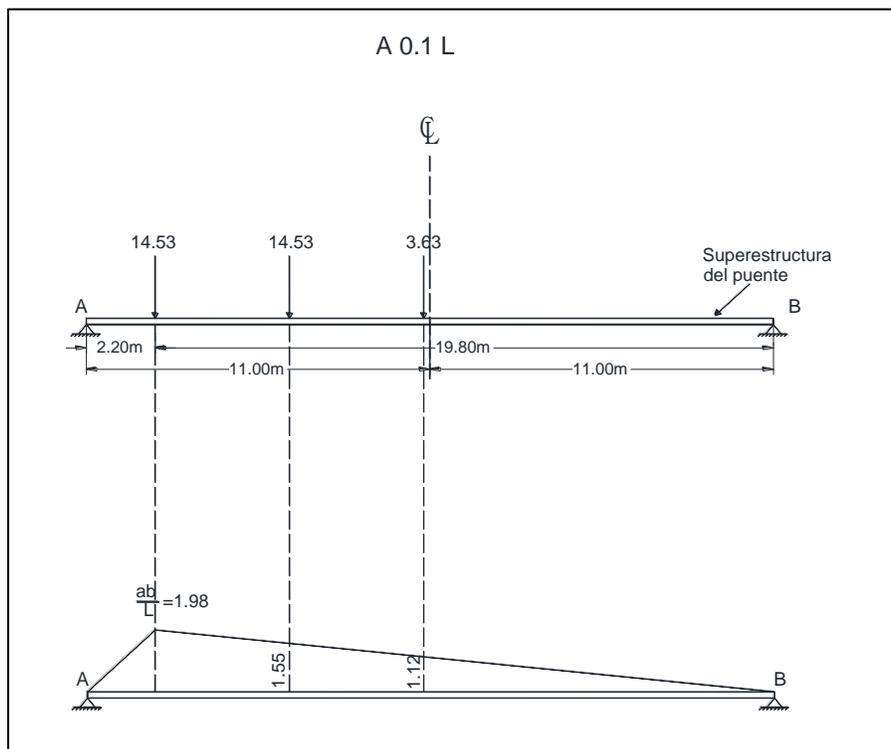


Ubicación		Momentos flexionantes (kip-ft)			
		Carga muerta (DL)			
Décimo	Long. (ft)	Viga ( $M_{dg}$ )	Losa + Viga ( $M_{dg}+M_{ds}$ )	P.P. Carpeta + Parapeto + Diafragma ( $M_{da}$ )	Total DL (kip-ft)
0 L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1 L	7.22	136.76	242.52	114.07	356.59
0.2 L	14.44	243.14	431.15	205.88	637.03
0.3 L	21.65	319.12	565.88	275.44	841.32
0.4 L	28.87	364.70	646.72	313.46	960.18
0.5 L	36.09	379.90	673.66	324.59	998.25

- Cálculo de cortantes y momentos flexionantes por carga viva

A través del método de líneas de influencia se calcula el momento y cortante total que ocasiona la configuración vehicular denominada HS-20 a cada décimo de un claro de 72.18 pies, correspondiente a la longitud del puente de referencia.

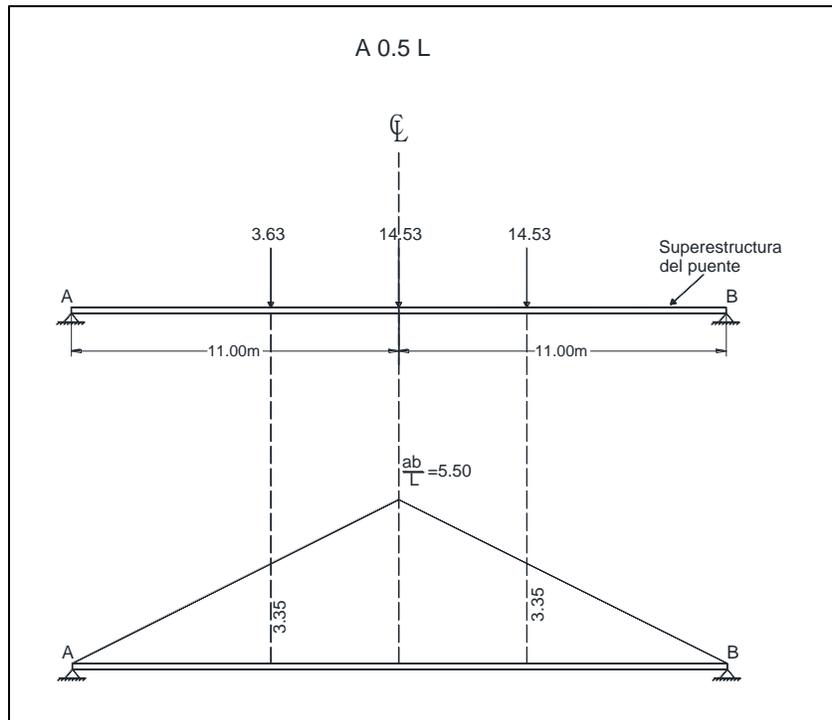
Por ejemplo, para calcular el momento flexionante que produce el vehículo en el primer décimo de la longitud del claro es:





<b>Momento flexionante A 0.1 L</b>			
<b>Carga (kip)</b>	<b>Altura línea</b>	<b>Momento (kip-ft)</b>	<b>Acumulado</b>
<b>32</b>	6.51	208.32	208.32
<b>32</b>	5.09	162.88	371.20
<b>8</b>	3.69	29.52	400.72
<b>Mom. Máx. (kip-ft):</b>			<b>400.72</b>

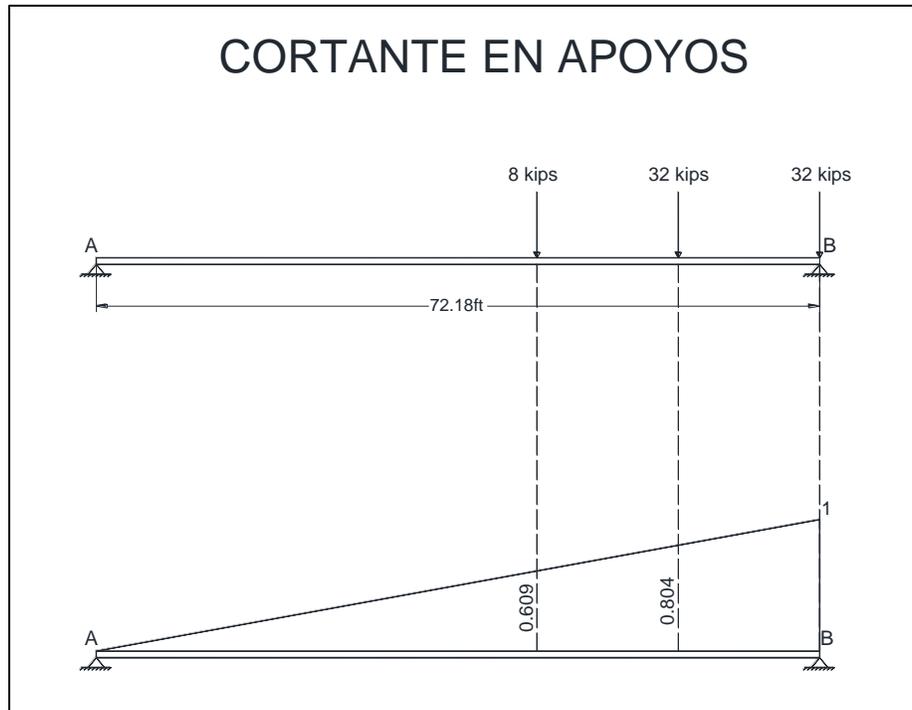
Y se hace lo mismo de manera sucesiva hasta llegar a la mitad del claro:



<b>Momento flexionante A 0.5 L</b>			
<b>Carga (kip)</b>	<b>Altura línea</b>	<b>Momento (kip-ft)</b>	<b>Acumulado</b>
<b>8</b>	10.97	87.76	87.76
<b>32</b>	18.05	577.6	665.36
<b>32</b>	11.02	352.64	1018.00
<b>Mom. Máx. (kip-ft):</b>			<b>1018.00</b>



Asimismo, el cálculo del cortante en el apoyo se hace también por líneas de influencia de la siguiente manera:



Cortante en apoyos			
Carga (kip)	Altura línea	Cortante (kip)	Acumulado
8	0.609	4.87	4.87
32	0.804	25.73	30.60
32	1.000	32.00	62.60
Total (kip):			62.6

Lo cual se hace también de manera sucesiva a cada décimo hasta llegar al centro del claro. Cabe destacar que por la simetría de los elementos mecánicos, con respecto al centro de claro, únicamente se analizan 6 puntos elegidos, entre el apoyo (0 L) y el centro del claro (0.5 L), según se verá en las tablas que se presentan más adelante.

Para determinar la cantidad de peso ó porcentaje de efecto transmitido por una fila de llantas del vehículo de diseño a cada viga se hace uso de un factor de distribución de carga, establecido en la sección 3.23.1 de las normas AASHTO. En este caso, para un puente de dos ó más carriles con un sistema de losa de concreto sobre vigas de concreto presforzado tipo "1" corresponde el factor:

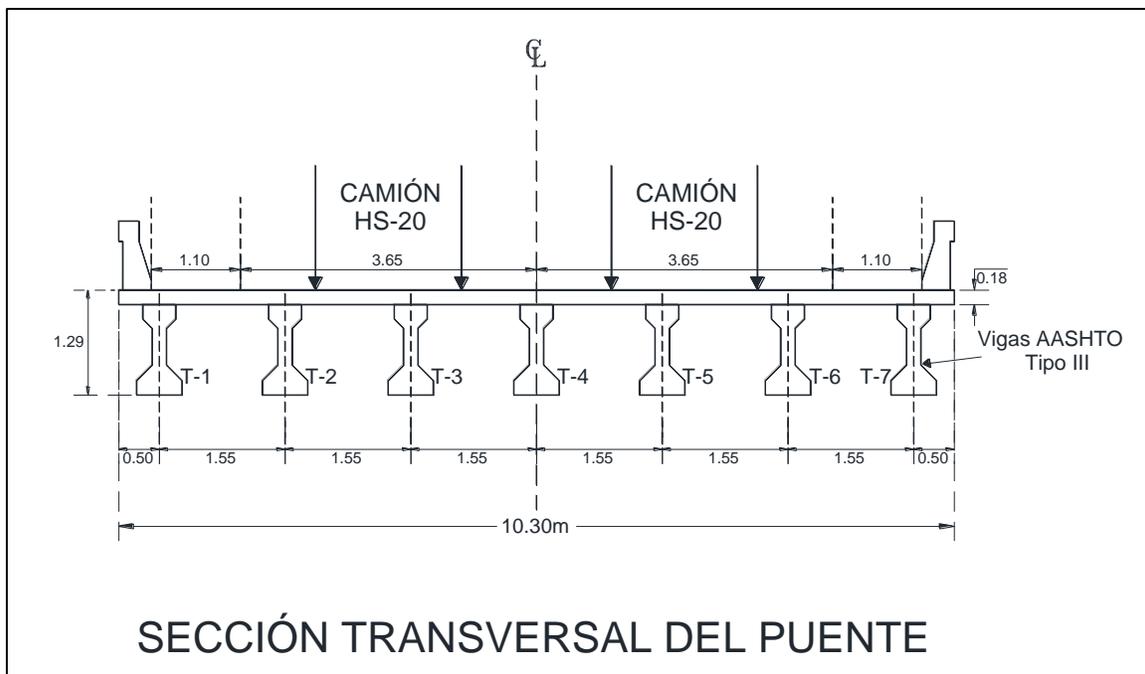
$$f = \frac{S}{5.5}$$

Donde  $S$  es la separación entre las vigas, medidas centro a centro y en pies. De modo que:

$$f = \frac{1.55/0.3048}{5.5} = 0.9246$$

Tal factor multiplica a los valores de los cortantes y momentos obtenidos para los distintos claros, una vez que han sido afectados por un factor de 0.5, ya que el factor de distribución es para los efectos generados por una fila de llantas del camión de diseño, es decir, para un solo lado de los ejes y por tanto, la mitad del peso del vehículo.

Por otro lado, debe considerarse un factor de presencia múltiple que depende del número de carriles del puente diseñado. Para este caso se cuenta con un puente de dos carriles según se puede ver en la figura siguiente y el factor de presencia múltiple, según la sección 3.12.1 del reglamento AASHTO, es de 1.0, es decir, se considera el 100 por ciento de carga aplicada.



Adicionalmente, debido a que la aplicación de la carga ocurre de forma dinámica por el paso de los vehículos a determinadas velocidades, debe ser considerado un factor de impacto, que aumenta la carga estática aplicada por los vehículos de diseño. Según la sección 3.8.2 de las normas AASHTO, el factor de impacto es:

$$I = \frac{50}{L + 125} \leq 0.30$$



Donde  $L$  es la longitud del puente, medida en pies. Así que para este caso tal factor será:

$$I = \frac{50}{72.18 + 125} = 0.2536$$

Y, por lo tanto, los cortantes y momentos obtenidos se multiplicarán por 1.2536.

El concentrado de los cortantes y momentos flexionantes generados por el vehículo de diseño en cada uno de los puntos de interés del claro del puente, así como su afectación por los factores de distribución, presencia múltiple e impacto se resumen en las siguientes tablas:

Ubicación		Cortantes (kips)						
		Carga viva (LL)						
Décimo	Long. (ft)	HS-20 (kip)	Factor dist.	Sub-total (kip)	Factor presencia mult.	Total LL (kip)	Impacto	Total LL+I (kip)
0 L	0.00	62.68	0.9246	28.98	1.00	<b>28.98</b>	25.36%	<b>36.33</b>
0.1 L	7.22	55.45	0.9246	25.63	1.00	<b>25.63</b>	25.36%	<b>32.14</b>
0.2 L	14.44	48.26	0.9246	22.31	1.00	<b>22.31</b>	25.36%	<b>27.97</b>
0.3 L	21.65	40.90	0.9246	18.91	1.00	<b>18.91</b>	25.36%	<b>23.70</b>
0.4 L	28.87	34.00	0.9246	15.72	1.00	<b>15.72</b>	25.36%	<b>19.70</b>
0.5 L	36.09	26.64	0.9246	12.32	1.00	<b>12.32</b>	25.36%	<b>15.44</b>

Ubicación		Momentos (kip-ft)						
		Carga viva (LL)						
Décimo	Long. (ft)	HS-20 (kip-ft)	Factor de dist.	Sub-total (kip-ft)	Factor presencia múlt.	Total LL (kip-ft)	Impacto	Total LL+I (kip-ft)
0 L	0.00	0.00	0.9246	0.00	1.00	<b>0.00</b>	25.36%	<b>0.00</b>
0.1 L	7.22	400.72	0.9246	185.25	1.00	<b>185.25</b>	25.36%	<b>232.23</b>
0.2 L	14.44	696.96	0.9246	322.20	1.00	<b>322.20</b>	25.36%	<b>403.92</b>
0.3 L	21.65	888.08	0.9246	410.56	1.00	<b>410.56</b>	25.36%	<b>514.68</b>
0.4 L	28.87	998.88	0.9246	461.78	1.00	<b>461.78</b>	25.36%	<b>578.89</b>
0.5 L	36.09	1018.00	0.9246	470.62	1.00	<b>470.62</b>	25.36%	<b>589.97</b>

- Cálculo de acero de presfuerzo

Para calcular la cantidad de acero de presfuerzo se considera un diseño de presfuerzo parcial, común en el diseño de puentes de concreto presfuerzo en nuestro país, en el que se permiten tensiones en el lecho inferior de las vigas.



Según la sección 9.15.2.2 del reglamento AASHTO los esfuerzos de tensión permisibles en la fibra extrema inferior del concreto de las vigas ante las cargas de servicio es:

$$f_{bg} \leq 6\sqrt{f'_c}$$

Considerando que la resistencia a compresión,  $f'_c$ , del concreto con el que es construida la viga es de 5,000 psi, mayor a la del concreto utilizado usualmente en miembros de concreto reforzado, el esfuerzo de tensión máximo permitido en la fibra extrema inferior es:

$$f_{bg} \leq 6\sqrt{5,000} = 424.26 \text{ psi} = 0.42426 \text{ ksi}$$

Y para calcular la fuerza de presfuerzo necesaria para que el miembro, bajo las cargas de servicio, alcance un esfuerzo de tensión menor al indicado se hace la sumatoria de esfuerzos provocados en el lecho inferior de la viga debido a cada una de las fuerzas actuantes (compresión por fuerza de presfuerzo + compresión por excentricidad de fuerza de presfuerzo + tensión por carga muerta + tensión por carga viva), según la siguiente expresión:

$$f_{bg} = -\frac{P_f}{A_g} - \frac{P_f e_g}{S_{bg}} + \frac{M_{dg} + M_{ds}}{S_{bg}} + \frac{M_{da} + M_{L+I}}{S_{bc}}$$

Donde:

$P_f$  = Fuerza de presfuerzo

$A_g$  = Área de la sección transversal de la viga

$e_g$  = Excentricidad del centroide del acero de presfuerzo con respecto al eje neutro de la viga

$S_{bg}$  = Módulo de sección inferior de la viga

$M_{dg}$  = Momento flexionante por peso propio de la viga

$M_{ds}$  = Momento flexionante por peso propio de la losa de tráfico

$M_{da}$  = Momento flexionante por el peso de la carpeta asfáltica

$M_{L+I}$  = Momento flexionante causado por la carga viva, incluyendo impacto

$S_{bc}$  = Módulo de sección inferior de la sección compuesta (viga + losa de tráfico)

Cabe destacar que tal fórmula incluye todas las cargas debido a que ese es el estado en el que alcanza el mayor esfuerzo de tensión en su fibra extrema inferior y se calcula para el centro de claro, donde se alcanzan los mayores momentos flexionantes por carga muerta y viva.

Debido a que las cargas por peso de la carpeta asfáltica y la carga viva más sus efectos por impacto actúan sobre una sección compuesta constituida por la trabe y una franja de losa, es necesario calcular las propiedades geométricas de tal sección, adicionalmente a las de la viga simple. Tales propiedades se calculan para una de las vigas centrales, que soportan mayores cargas.

Por la separación centro a centro entre las vigas se considera que cada viga central trabaja de manera conjunta con una franja de losa de 1.55 metros de



ancho, sin embargo sus resistencias a compresión y, por tanto, sus módulos de elasticidad no son iguales, así que el ancho de la franja de losa,  $b$ , se ajusta a un valor equivalente,  $b_{tr}$ , según la siguiente expresión:

$$b_{tr} = nb$$

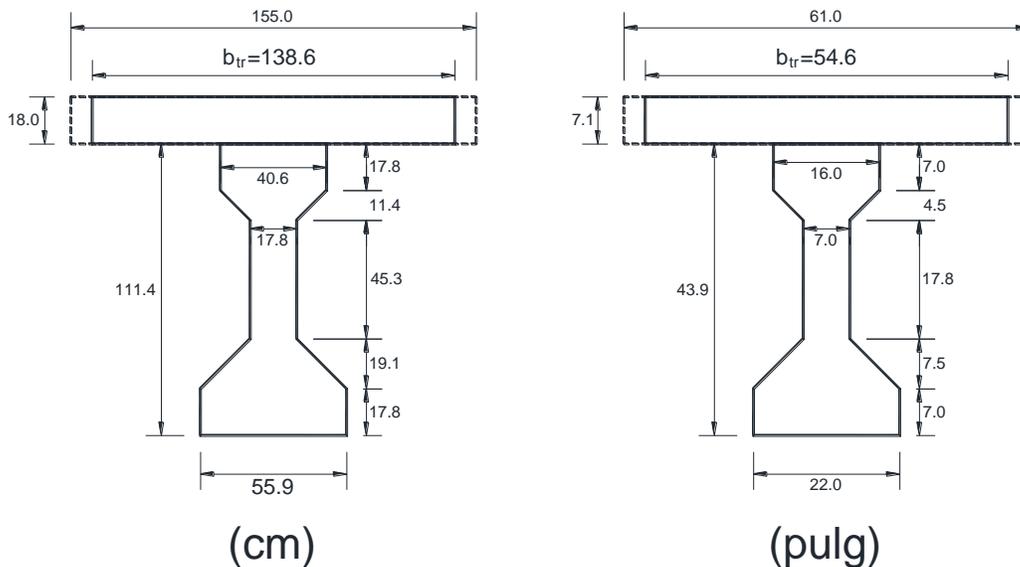
Donde:

$$n = \frac{E_c}{E_{cp}}$$

Donde, a su vez,  $E_c$  y  $E_{cp}$  son los módulos de elasticidad de la losa y de la viga respectivamente. Así que:

$$b_{tr} = \frac{6\sqrt{4,000}}{6\sqrt{5,000}}(155) = 138.64 \text{ cm}$$

Y con tal ancho equivalente de la losa se calculan las propiedades geométricas de la sección compuesta:



Dimensiones de sección compuesta



Propiedades geométricas de sección compuesta		
	cm <sup>2</sup>	pulg <sup>2</sup>
Área	6,108.50	946.82
	cm <sup>4</sup>	pulg <sup>4</sup>
Ix	12,294,336.70	295,372.62
	cm	pulg
C <sub>bc</sub>	79.64	31.35
C <sub>tc (viga)</sub>	31.76	12.50
	cm <sup>3</sup>	pulg <sup>3</sup>
S <sub>bc</sub>	154,373.89	9,420.47
S <sub>tc (viga)</sub>	387,101.28	23,622.37

Finalmente se supone que el centroide del acero de presfuerzo se coloca a 6.5 pulgadas de la base de la viga, así que la excentricidad, con respecto a su centroide, es:

$$e_g = c_i - 6.5 = 20.28 - 6.5 = \mathbf{13.78 \text{ pulg}}$$

Con los datos de las propiedades de la viga y la sección compuesta, así como la excentricidad y los momentos flexionantes calculados se determina la fuerza de presfuerzo necesaria para no sobrepasar el esfuerzo de tensión límite en el lecho inferior de la viga al centro de claro, donde se producen los mayores momentos flexionantes:

$$f_{bg} = -\frac{P_f}{A_g} - \frac{P_f e_g}{S_{bg}} + \frac{M_{dg} + M_{ds}}{S_{bg}} + \frac{M_{da} + M_{L+I}}{S_{bc}}$$

$$0.4242 \text{ ksi} = -\frac{P_f}{560.02 \text{ pulg}^2} - \frac{P_f(13.78 \text{ pulg})}{6185.32 \text{ pulg}^3} + \frac{673.66(12) \text{ kip} - \text{pulg}}{6185.32 \text{ pulg}^3} + \frac{914.56(12) \text{ kip} - \text{pulg}}{9420.47 \text{ pulg}^3}$$

$$0.4242 \text{ ksi} = -\frac{1.7856 \times 10^{-3} P_f}{\text{pulg}^2} - \frac{2.2278 \times 10^{-3} P_f}{\text{pulg}^2} + 1.30695 \text{ ksi} + 1.16498 \text{ ksi}$$

$$0.4242 \text{ kip} = -1.7856 \times 10^{-3} P_f - 2.2278 \times 10^{-3} P_f + 1.30695 \text{ kip} + 1.16498 \text{ kip}$$

$$2.04773 \text{ kip} = 4.0134 \times 10^{-3} P_f$$

$$P_f = \frac{2.04773 \text{ kip}}{4.0134 \times 10^{-3}} = 510.22 \text{ kips}$$

Según la sección 9.15.1 del reglamento AASHTO el máximo esfuerzo inicial que se puede aplicar al acero de presfuerzo con la acción del gato hidráulico



es de  $0.75 f_{pu}$ . Suponiendo que se utiliza un acero de grado 270 ( $f_{pu}=270$  ksi) el esfuerzo inicial es de:

$$f_{pi} = 0.75(270 \text{ ksi}) = 202.5 \text{ ksi}$$

Ya que la fuerza de presfuerzo sufre una serie de pérdidas debido al acortamiento elástico y plastificación del concreto, relajamiento del acero de presfuerzo, etc. la viga alcanza los esfuerzos de tensión más críticos en sus fibras extremas inferiores cuando ha sufrido todas estas pérdidas. Según la sección 9.16.2.2 de las normas AASHTO las pérdidas de presfuerzo que sufren los miembros fabricados con concreto de resistencia a compresión  $f'_c = 5,000$  psi a lo largo de su vida útil, considerando concreto de peso normal, fuerza de presfuerzo usual y diseños comunes, es de aproximadamente 45,000 psi; así que, después de todas las pérdidas, los cables estarán esforzados a una magnitud:

$$f_{pe} = (202.5 - 45) \text{ ksi} = 157.5 \text{ ksi}$$

Se calcula la cantidad de acero de presfuerzo considerando todas sus pérdidas, de modo que en ninguna etapa de su vida la viga supere el límite de tensión permisible en sus fibras extremas inferiores:

$$A_{ps} = \frac{P_f}{f_{pe}} = \frac{510.22 \text{ kips}}{157.5 \text{ ksi}} = 3.239 \text{ pulg}^2$$

Tomando en cuenta que el parámetro de referencia de pérdida de fuerza de presfuerzo es algo conservador se proponen **21 torones de ½ pulgada de diámetro**, con un área transversal individual de  $0.153 \text{ pulg}^2$ :

$$A_{ps} = 21(0.153 \text{ pulg}^2) = 3.213 \text{ pulg}^2$$

Una vez que se ha retirado la fuerza aplicada por el gato hidráulico a los torones para que el presfuerzo sea transmitido a la viga, existen pérdidas por acortamiento elástico del concreto y un porcentaje de relajamiento del acero, el cual tiene que ser determinado para calcular el estado de esfuerzos de la viga en sus primeras etapas de servicio y revisar que estén dentro de lo permitido en las normas.

Según las expresiones de la sección 9.16.2.1 de las especificaciones AASHTO se determinan las pérdidas de presfuerzo por los distintos mecanismos:

- Acortamiento elástico del concreto:

$$ES = \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cir}$$

Donde:

$E_p$  = Módulo de elasticidad del acero de presfuerzo

$E_{ci}$  = Módulo de elasticidad del concreto

$f_{cir}$  = Esfuerzo a la altura del centro de gravedad del acero de presfuerzo ocasionada por la fuerza de presfuerzo y el peso propio de la viga, ksi

$$f_{cir} = \frac{P_{si}}{A} + \frac{P_{si}e_g^2}{I} - \frac{M_g e_g}{I}$$



Donde, a su vez:

$P_{si}$  = Presfuerzo después de pérdidas iniciales

$A$  = Área transversal de la viga

$I$  = Momento de inercia de la sección transversal de la viga

$e_g$  = Excentricidad del acero de presfuerzo con respecto al eje neutro de la viga

$M_g$  = Momento flexionante debido a peso propio de la viga

Debido a que el valor  $P_{si}$  de la expresión anterior requiere del cálculo de pérdidas iniciales se supone un valor de manera aproximada, en este caso se proponen pérdidas del 5.8%, resultando un aproximado de fuerza pretensora inicial de:

$$P_{si} = 0.942(3.213 \text{ pulg}^2)(0.75(270 \text{ ksi})) = 612.89 \text{ kips}$$

De acuerdo a los datos determinados en los incisos anteriores se calcula la pérdida por acortamiento elástico:

$$f_{cir} = \frac{612.89 \text{ kips}}{560.02 \text{ pulg}^2} + \frac{612.89 \text{ kips}(13.78 \text{ pulg})^2}{125,411 \text{ pulg}^2} - \frac{12(379 \text{ kip} - \text{ pulg})(13.78 \text{ pulg})}{125,411 \text{ pulg}^2}$$

$$f_{cir} = 1.523 \text{ ksi}$$

$$ES = \frac{27,000 \text{ ksi}}{57\sqrt{5,000 \text{ ksi}}}(1.523 \text{ ksi}) = \mathbf{10.202 \text{ ksi}}$$

- Plastificación del concreto:

$$CR_c = 12 f_{cir} - 7 f_{c ds}$$

Donde:

$f_{c ds}$  = Esfuerzo en el concreto a la altura del centroide del acero de presfuerzo, debido a cargas muertas sobrepuestas

$$f_{c ds} = \frac{M_s e_g}{I_g} + \frac{M_a e_c (\text{sec. comp.})}{I_c}$$

Aplicando esta expresión se tiene que:

$$f_{c ds} = \frac{12(293.76 \text{ kip} - \text{ pulg})(13.78 \text{ pulg})}{125,411 \text{ pulg}^4} + \frac{12(324.59 \text{ kip} - \text{ pulg})(31.35 - 6.5) \text{ pulg}}{295,372 \text{ pulg}^4}$$

$$f_{c ds} = 0.715 \text{ ksi}$$

$$CR_c = 12(1.523 \text{ ksi}) - 7(0.715 \text{ ksi}) = \mathbf{13.271 \text{ ksi}}$$

- Deshidratación del concreto:

$$SH = 17,000 - 150RH \text{ (psi)}$$

Donde:

$RH$  = Humedad relativa, en este caso se considera  $RH = 50\%$



Por lo tanto:

$$SH = 17,000 - 150(50) = 9,500 \text{ psi} = \mathbf{9.5 \text{ ksi}}$$

- Relajamiento del acero:

$$CR_s = 5,000 - 0.10ES - 0.05(SH + CR_c)$$

Así que:

$$CR_s = 5,000 - 0.10(10,202\text{psi}) - 0.05(9,500\text{psi} + 13,271\text{psi})$$

$$CR_s = \mathbf{2,841.25 \text{ psi} = 2.8412 \text{ ksi}}$$

Las pérdidas obtenidas corresponden tanto a las inmediatas, como a las que se dan a lo largo de la vida útil del elemento. Para calcular las pérdidas iniciales se considera el acortamiento elástico y un 50% de las pérdidas por relajamiento del acero, de acuerdo a la recomendación dada en el Manual de Diseño de Puentes del TxDOT de 2001:

$$\text{Pérdida de presfuerzo inicial} = \frac{\left(ES + \frac{1}{2}CR_s\right)(100)}{0.75 f_{pu}}$$

$$\text{Pérdida de presfuerzo inicial} = \frac{\left(10.202\text{ksi} + \frac{1}{2}(2.8412\text{ksi})\right)(100)}{0.75(270\text{ksi})} = \mathbf{5.74\% \approx 5.8\%}$$

Así que la propuesta de una pérdida de presfuerzo inicial del 5.8% puede ser considerada como correcta.

Por otro lado, con el propósito de hacer más exacta la determinación de los esfuerzos en la viga se calcula la pérdida total de fuerza de presfuerzo en el elemento:

$$\Delta f_s = SH + ES + CR_c + CR_s$$

$$\Delta f_s = (9.5 + 10.202 + 13.271 + 2.8412)\text{ksi} = \mathbf{35.81\text{ksi}}$$

Para revisar los estados de esfuerzos en las vigas diseñadas se consideran básicamente tres estados críticos: fabricación de la viga, donde actúan la fuerza de presfuerzo y el peso propio de la viga y es necesario revisar los esfuerzos de tensión en el lecho superior; colado de la losa sobre las vigas, donde actúan las fuerzas anteriores más el peso de la losa, el cual es soportado en su totalidad por la viga, ya que el concreto recién colado no aporta resistencia al elemento; y por último su condición final, en la cual se consideran adicionalmente el peso de la carpeta asfáltica así como las cargas vivas impresas por los vehículos, actuando ahora en una sección compuesta, conformada por la sección de la viga original más la losa. Así que primeramente se determina la fuerza de presfuerzo que actúa en cada etapa, según las pérdidas recién calculadas. Para la primera se considera la fuerza  $P_i$  únicamente con las pérdidas iniciales y para las



últimas dos se considera el escenario más desfavorable en el que se han tenido todas las pérdidas y se alcanza la fuerza de presfuerzo  $P_i$ :

$$P_i = 0.942 (0.75 f_{pu}) (A_{ps}) = 0.942(0.75(270ksi))(3.213pulg^2)$$

$$P_i = 612.90 \text{ kips}$$

$$P_f = (0.75 f_{pu} - \Delta f_s)(A_{ps}) = (0.75(270ksi) - 35.81ksi)(3.213 pulg^2)$$

$$P_f = 535.57 \text{ kips}$$

De acuerdo a las consideraciones citadas en los tres estados de carga del elemento se calculan los esfuerzos en el concreto de la viga tanto en el lecho superior,  $f_t$ , como en el lecho inferior,  $f_b$ , según las siguientes expresiones:

- Condiciones iniciales (transferencia de la fuerza de presfuerzo a la viga):

Esfuerzo en extremo superior:

$$f_t = -\frac{P_i}{A_g} + \frac{P_i e_g}{S_{tg}} - \frac{M_{dg}}{S_{tg}}$$

Esfuerzo en extremo inferior:

$$f_b = -\frac{P_i}{A_g} - \frac{P_i e_g}{S_{bg}} + \frac{M_{dg}}{S_{bg}}$$

- Colado de losa sobre las vigas:

Esfuerzo en extremo superior:

$$f_t = -\frac{P_f}{A_g} + \frac{P_f e_g}{S_{tg}} - \frac{M_{dg} + M_{ds}}{S_{tg}}$$

Esfuerzo en extremo inferior:

$$f_b = -\frac{P_f}{A_g} - \frac{P_f e_g}{S_{bg}} + \frac{M_{dg} + M_{ds}}{S_{bg}}$$

- Condiciones finales (aplicación de cargas vivas y peso de carpeta asfáltica):

Esfuerzo en extremo superior:

$$f_t = -\frac{P_f}{A_g} + \frac{P_f e_g}{S_{tg}} - \frac{M_{dg} + M_{ds}}{S_{tg}} - \frac{M_{da} + M_{L+I}}{S_{tc}}$$

Esfuerzo en extremo inferior:

$$f_b = -\frac{P_f}{A_g} - \frac{P_f e_g}{S_{bg}} + \frac{M_{dg} + M_{ds}}{S_{bg}} + \frac{M_{da} + M_{L+I}}{S_{bc}}$$

Donde, para los tres estados:

$P_i$  = Fuerza de presfuerzo después de pérdidas iniciales

$P_f$  = Fuerza de presfuerzo después de todas las pérdidas

$A_g$  = Área de la sección transversal de la viga

$e_g$  = Excentricidad del centroide del acero de presfuerzo al centroide de la sección transversal de la viga



- $S_{tg}$  = Módulo de sección superior del área transversal de la viga  
 $S_{bg}$  = Módulo de sección inferior del área transversal de la viga  
 $M_{dg}$  = Momento flexionante por peso propio de la viga  
 $M_{ds}$  = Momento flexionante por peso propio de la losa de tráfico  
 $M_{da}$  = Momento flexionante por peso de la carpeta asfáltica  
 $M_{L+I}$  = Momento flexionante por carga viva más impacto  
 $S_{tc}$  = Módulo de sección superior del área transversal de la sección compuesta  
 $S_{bc}$  = Módulo de sección inferior del área transversal de la sección compuesta

Cabe destacar que se considera que el acero de presfuerzo es ubicado con excentricidad constante a lo largo de todo el claro, así que se tendrá un solo valor  $e_g$ . Los resultados para cada etapa y en cada punto de interés de la viga se resumen en la siguiente tabla:

Revisión de esfuerzos en las distintas etapas y en distintos puntos						
Estado	Distancia al apoyo					
Condiciones iniciales	0 L	0.1 L	0.2 L	0.3 L	0.4 L	0.5 L
<b>P<sub>i</sub> (kips)</b>	612.90	612.90	612.90	612.90	612.90	612.90
<b>e<sub>g</sub> (in)</b>	13.78	13.78	13.78	13.78	13.78	13.78
<b>M<sub>dg</sub> (kip-ft)</b>	0.00	136.76	243.14	319.12	364.70	379.90
<b>f<sub>t</sub> (ksi)</b>	0.4937	0.1851	-0.0549	-0.2264	-0.3292	-0.3635
<b>f<sub>b</sub> (ksi)</b>	-2.4599	-2.1946	-1.9882	-1.8408	-1.7523	-1.7228
<b>Losa recién colocada</b>						
<b>P<sub>f</sub> (kips)</b>	535.57	535.57	535.57	535.57	535.57	535.57
<b>M<sub>dg</sub>+M<sub>ds</sub> (kip-ft)</b>	0.00	242.52	431.15	565.88	646.72	673.66
<b>f<sub>t</sub> (ksi)</b>	0.4314	-0.1158	-0.5414	-0.8455	-1.0279	-1.0887
<b>f<sub>b</sub> (ksi)</b>	-2.1495	-1.6790	-1.3131	-1.0517	-0.8948	-0.8426
<b>Condiciones finales</b>						
<b>P<sub>f</sub> (kips)</b>	535.57	535.57	535.57	535.57	535.57	535.57
<b>M<sub>da</sub>+M<sub>LL</sub> (kip-ft)</b>	0.00	346.30	609.80	790.12	892.35	914.56
<b>f<sub>t</sub> (ksi)</b>	0.4314	-0.2917	-0.8512	-1.2469	-1.4812	-1.5533
<b>f<sub>b</sub> (ksi)</b>	-2.1495	-1.2379	-0.5363	-0.0452	0.2419	0.3224

Adicionalmente se revisa que todos los esfuerzos estén dentro del rango de lo permitido, para ello se recurre a la sección 9.15 de las normas AASHTO, que establece los siguientes límites, según la etapa de carga de la viga:

- Transferencia de la fuerza de presfuerzo:

Tensión máxima no especificada

Compresión máxima =  $0.6 f_{ci}$  donde  $f_{ci}$  es la resistencia a compresión del concreto cuando se le transfiere la fuerza de presfuerzo



- Condición final:

$$\text{Tensión máxima} = 6\sqrt{f'_c} \text{ (psi)}$$

$$\text{Compresión máxima} = 0.4 f'_c$$

Considerando que durante la transferencia el concreto tiene una resistencia a la compresión  $f'_c = 4,000$  psi y recordando que su resistencia última es de  $f'_c = 5,000$  psi, tales límites quedan de la siguiente manera:

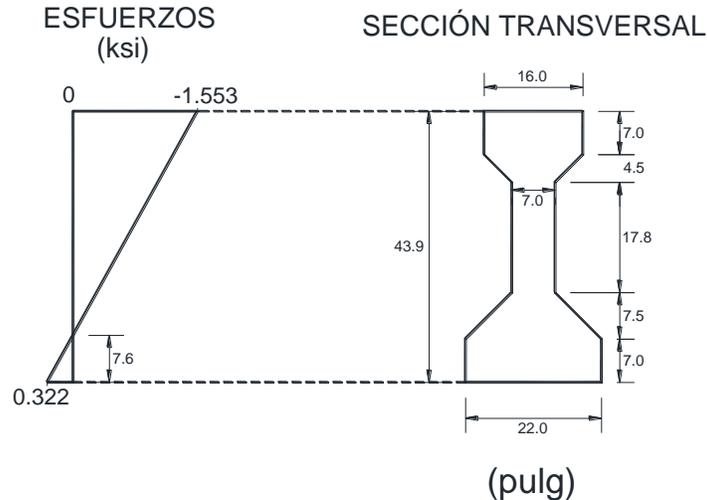
Esfuerzos límite		
Etapas	Tensión (ksi)	Compresión (ksi)
<b>Transferencia</b>	No especificada	-2.40
<b>Condición final</b>	0.4243	-2.00

Se puede ver los esfuerzos más críticos son los presentados en las fibras superiores e inferiores de los apoyos, en la condición inicial o de transferencia, sin embargo el esfuerzo de compresión sobrepasa el límite en un porcentaje mínimo (2.5%) y el de tensión no es especificado en las normas, así que se considera adecuado ya que además se aproxima al límite fijado en la condición final, siempre y cuando se coloque acero de refuerzo en ambas zonas para soportar esfuerzos de tensión o compresión adicional a la resistencia que ofrece el concreto. Por otra parte se presentan tensiones al centro de claro en la condición final aunque no sobrepasan el límite establecido en las normas, sin embargo requieren de acero de refuerzo para limitar el agrietamiento. Por lo tanto se considera adecuada esta configuración del acero de presfuerzo.

- Cálculo de acero de refuerzo

Para calcular la cantidad de acero de refuerzo en el lecho inferior de la viga primeramente se determina la tensión que debe soportar, para lo cual se analiza el diagrama de esfuerzos de la sección transversal al centro de claro en su estado más desfavorable, es decir, en la condición final, según se determinó en el inciso anterior:

## ESTADO DE ESFUERZOS A CENTRO DE CLARO



El acero de refuerzo debe soportar una fuerza de tensión igual al área del bloque de tensiones del diagrama de esfuerzos que actúa en la zona del patín inferior de la sección transversal:

$$T = \frac{1}{2} ((0.322 \text{ ksi})(7.6 \text{ pulg})(22 \text{ pulg})) = 26.92 \text{ kips}$$

Considerando que se utiliza un acero de refuerzo grado 60 ( $f_s = 60 \text{ ksi}$ ), el área requerida de acero es de:

$$A_s = \frac{T}{f_s} = \frac{26.92 \text{ kips}}{60 \text{ ksi}} = 0.4486 \text{ pulg}^2$$

Para lograr una mayor resistencia a momento último y por facilidad de armado se propone utilizar **2 varillas del No. 6 y 2 del número 4**, que suman un área de:

$$A_s = 2(0.442) + 2(0.1963) = 1.2762 \text{ pulg}^2$$

Que cubre fácilmente el área de acero de refuerzo necesaria y sigue siendo menor al área de acero de presfuerzo, para no cambiar el comportamiento del elemento.

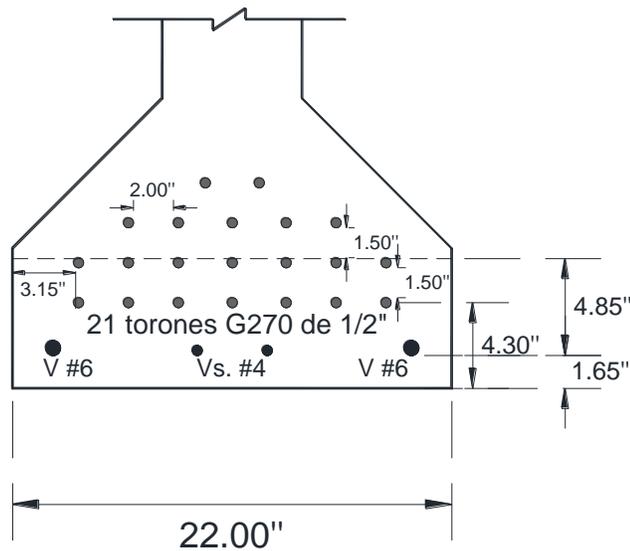
- Distribución del acero de refuerzo y presfuerzo:

Las normas AASHTO, en sus secciones 9.25.1 y 9.25.2, establecen las condiciones para distribuir el acero de refuerzo y presfuerzo en la sección transversal de la viga, las cuales se resumen de la siguiente manera:



- El espacio mínimo entre cables de presfuerzo debe ser de al menos 3 veces su diámetro o  $1 \frac{1}{3}$  el tamaño del agregado.
- La cubierta del acero de presfuerzo y refuerzo debe ser de al menos 1.5 pulgadas.

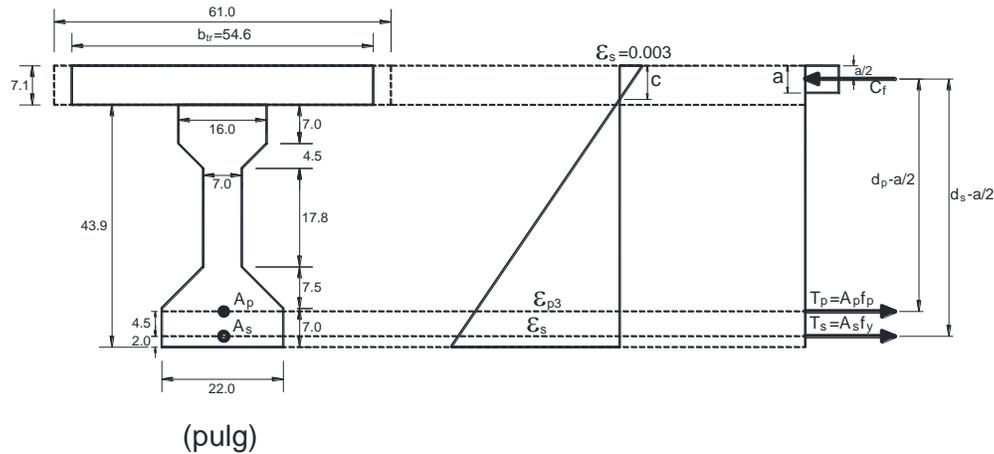
Haciendo estas consideraciones, además de la excentricidad constante del acero de presfuerzo y su distancia a la base, de 6.5 pulg, se propone la distribución del acero a lo largo de la viga:



### Ubicación del acero de refuerzo y presfuerzo a lo largo de todo el claro

- Revisión por resistencia última

Para calcular la resistencia última de la viga se supone una distribución aproximada de esfuerzos antes de la falla según se muestra en el siguiente diagrama, suponiendo que el concreto debajo del eje neutro estará agrietado y no ofrecerá resistencia a tensión:



### Estado de esfuerzos y deformaciones a carga última

Se puede observar que a carga última los esfuerzos en las fibras superiores de la sección serán de compresión y serán equilibrados por la resistencia a tensión del acero de refuerzo y de presfuerzo.

El primer paso es determinar el ancho “efectivo” del patín,  $b_f$ , respetando las restricciones que establece el ACI y considerando que la losa, al estar conectada a través de acero con la viga presforzada, trabaja como el patín de la sección compuesta:

$$b_f \leq \frac{1}{4} \text{ del claro} = \frac{1}{4} (72.18(12)) \text{ pulg} = 216 \text{ pulg}$$

O bien:

$$b_f \leq 16h_f + \text{ancho de apoyo}$$

Donde  $h_f$  es la altura del patín y el ancho de apoyo es el del ancho superior de la viga, así que:

$$b_f \leq 16(7.1) + 16 = 129.44 \text{ pulg}$$

Ya que el **ancho real del patín es de 61.02 pulg, menor** a cualquiera de las dos restricciones se considera esta última dimensión como la que rige para calcular la resistencia última.

Tomando en cuenta que existe un equilibrio entre las fuerzas internas de tensión y compresión se calcula la resistencia a tensión que pueden aportar el acero de refuerzo y presfuerzo, para compararlos con la resistencia máxima a compresión que ofrece la losa de tráfico o patín de la sección compuesta, con el propósito de averiguar si es capaz de equilibrar las fuerzas internas por sí misma y por lo tanto trabaja como una sección rectangular o bien, si necesita de la aportación de una sección de la viga original y trabaja como una sección “T”.



Considerando el escenario crítico de que el acero de presfuerzo fluya, se toma el esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria  $\epsilon_p = 0.01$  según la curva esfuerzo deformación de este material, de modo que  $f_p = f_{py} = 230$  ksi (Norma ASTM A 416) y la resistencia a tensión del acero de presfuerzo es:

$$T_p = A_p f_p = 3.213 \text{ pulg}^2 (230 \text{ ksi}) = 738.99 \text{ kips}$$

Y la fuerza a tensión que puede soportar el acero de refuerzo, de grado 60, es:

$$T_s = A_s f_s = 1.2762 \text{ pulg}^2 (60 \text{ ksi}) = 76.57 \text{ kips}$$

Por lo tanto la fuerza a tensión soportada por el acero de refuerzo y presfuerzo para llevarlos a la fluencia es:

$$T_t = T_p + T_s = 738.99 \text{ ksi} + 76.57 \text{ ksi} = \mathbf{815.56 \text{ ksi}}$$

Por otro lado, la resistencia a compresión del patín es:

$$C_f = t_f b_f (0.85 f'_c) = 7.09 \text{ pulg} (61.02 \text{ pulg}) (0.85 (4 \text{ ksi})) = \mathbf{1,470.95 \text{ ksi}}$$

Se observa que la resistencia a compresión del patín es mucho mayor que la resistencia a tensión del acero, así que se concluye que sólo trabajará una porción de él para equilibrar estas últimas fuerzas y, por lo tanto, trabajará como una sección rectangular, haciendo válida la aproximación del diagrama de estado de esfuerzos de la sección mostrado en la figura superior.

Para calcular con exactitud el nivel de esfuerzos y, por tanto, la fuerza de tensión que soportará el acero de presfuerzo ante carga última se determinan las deformaciones unitarias que sufre en sus tres condiciones principales de carga:

a) Fuerza pretensora únicamente

La fuerza pretensora ocasiona un esfuerzo de tensión y, por lo tanto, una deformación unitaria en el acero de presfuerzo, el cual se calcula para la etapa en que ha sufrido todas las pérdidas, según lo siguiente:

$$\epsilon_{p1} = \frac{P_f}{A_p} \left( \frac{1}{E_p} \right) = \frac{535.57 \text{ kips}}{3.213 \text{ pulg}^2} \left( \frac{1}{27,000 \text{ ksi}} \right) = \mathbf{0.00617}$$

b) Descarga de las fibras de concreto a la profundidad del centroide del acero de presfuerzo

Para proceder a la condición de carga última, en la que se calcula una deformación “última” a partir de la correspondiente a un esfuerzo nulo en la sección de concreto, primeramente se considera una situación intermedia, en la que se descarga el concreto situado a la profundidad del centroide del acero de presfuerzo. Para llegar a este estado se aplica una carga externa que provocará mayor tensión al acero de presfuerzo y por lo tanto otra elongación, igual y



contraria a la que sufre el concreto situado a su profundidad debido a la fuerza pretensora, así que esa deformación unitaria es:

$$\varepsilon_{p2} = \frac{P_f}{E_c A_g} \left( 1 + \frac{e_g^2}{r_g^2} \right)$$

De acuerdo a las propiedades de la viga:

$$\varepsilon_{p2} = \frac{535.57 \text{ kips}}{57 \sqrt{5,000 \text{ ksi}} (560.02 \text{ pulg}^2)} \left( 1 + \frac{(13.8 \text{ pulg})^2}{\frac{125,411}{560.02} \text{ pulg}^2} \right) = \mathbf{0.00044}$$

### c) Carga última

Después de que se lleva a las fibras de concreto a la profundidad del centroide del acero de presfuerzo a un esfuerzo nulo se aplica la carga que lleve a la viga al colapso, cuyo estado de deformaciones queda de la manera en que se muestra en el diagrama anterior, considerando deformaciones planas y lineales de la sección transversal y que la viga llega a la falla cuando el concreto de las fibras superiores alcanza una deformación límite  $\varepsilon_c = 0.003$ . Bajo estas condiciones se determina la deformación unitaria del acero en esta tercer etapa.

Primeramente se determina la profundidad “a” del bloque de compresión, considerando que las fuerzas internas actuantes en la sección transversal están en equilibrio:

$$T_p + T_s - C_c = 0$$

Para hacer una primera aproximación se supone que el acero de presfuerzo llega a la fluencia, de modo que  $f_p = f_{py} = 230 \text{ ksi}$  y considerando que el acero de refuerzo es de grado 60 y llega a la fluencia:

$$T_p = A_p f_p = 3.213 \text{ pulg}^2 (230 \text{ ksi}) = 738.99 \text{ kips}$$

$$T_s = A_s f_s = 1.2762 \text{ pulg}^2 (60 \text{ ksi}) = 76.57 \text{ kips}$$

Así que:

$$738.99 \text{ kips} + 76.57 \text{ kips} - C_c = 0$$

$$ab_f (0.85 f'_c) = 815.56 \text{ kips}$$

Donde  $a$  es la profundidad del bloque equivalente de compresión y  $b_f$  es el ancho del patín, según se demostró en párrafos anteriores. De modo que el valor  $a$  buscado es:

$$a = \frac{815.56 \text{ kips}}{61.02 \text{ pulg} (0.85) (4 \text{ ksi})} = 3.93 \text{ pulg}$$



Y el valor de la profundidad  $c$ , del bloque de compresión del diagrama de deformaciones es:

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

Donde el coeficiente  $\beta_1$  para un concreto con una resistencia de compresión de 4,000 psi, según el reglamento ACI 318-95 es de 0.85. Por lo tanto:

$$c = \frac{3.93 \text{ pulg}}{0.85} = 4.625 \text{ pulg}$$

Así que por triángulos semejantes se obtiene la deformación del acero de presfuerzo en esta etapa de carga, según el diagrama de deformaciones:

$$\varepsilon_{p3} = \left( \frac{d_p - c}{c} \right) 0.003 = \left( \frac{(7.1 + 43.9 - 6.5 - 4.625) \text{ pulg}}{4.625 \text{ pulg}} \right) 0.003 = \mathbf{0.0259}$$

Por lo tanto la deformación total del acero de presfuerzo después de todas las etapas de carga es:

$$\varepsilon_{ps} = \varepsilon_{p1} + \varepsilon_{p2} + \varepsilon_{p3} = 0.00617 + 0.00044 + 0.0259$$

$$\varepsilon_{ps} = \mathbf{0.0325}$$

Para obtener el esfuerzo de fluencia del acero de presfuerzo se considera una deformación de 0.01, se puede observar que según las características de la viga la deformación de este acero a carga última sobrepasa fácilmente este límite, así que llegará a su esfuerzo de fluencia ante esta sollicitación. Por lo tanto es adecuada la consideración de que llegan a la fluencia tanto el acero de refuerzo como el de presfuerzo y la profundidad del bloque de compresión es la adecuada. De este modo el momento nominal resistente de la sección es:

$$M_n = A_p f_p \left( d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_s \left( d_s - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_n = 3.213 \text{ pulg}^2 (230 \text{ ksi}) \left( 51 - 6.5 - \frac{3.93}{2} \right) \text{ pulg} + 1.276 \text{ pulg}^2 (60 \text{ ksi}) \left( 51 - 2.0 - \frac{3.93}{2} \right) \text{ pulg}$$

$$M_n = 35,034 \text{ kips} - \text{pulg} = 2,919.50 \text{ kips} - \text{ft}$$

Y el momento resistente es:

$$M_R = \phi M_n = \mathbf{0.9(2,919.50 \text{ kips} - \text{ft})} = \mathbf{2,627.55 \text{ kips} - \text{ft}}$$

Para verificar si este momento resistente es adecuado se calcula el momento actuante último al que será sometida la estructura, usando los factores de amplificación de la sección 3.22.1 de las normas AASHTO:

$$M_u = 1.3 \{ M_D + 1.67 (M_{(L+I)}) \}$$



De acuerdo a los momentos por carga muerta y carga viva más impacto determinados en las secciones anteriores se calculan los momentos últimos:

Ubicación		Momentos totales (kips-ft)		Momento último (kips-ft)
Décimo	Long. (ft)	Carga muerta, DL	Viva+Impacto, LL+I	
0 L	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1 L	7.22	356.59	232.23	967.74
0.2 L	14.44	637.03	403.92	1705.04
0.3 L	21.65	841.32	514.68	2211.08
0.4 L	28.87	960.18	578.89	2505.01
0.5 L	36.09	998.25	589.97	2578.56

Se observa que el momento máximo actuante es al centro del claro, con una magnitud de 2,578.56 kip-ft, menor al momento resistente de 2,627.55 kips-ft, por lo que pasa la revisión por resistencia última.

- Cálculo y revisión de deformaciones

La estructura sufrirá de diferentes grados de deformación dependiendo de su etapa y condición de servicio, para cada una de las cuales debe cumplir con un límite, con el objetivo de cumplir con su estado límite de servicio, de modo que se puedan controlar agrietamientos y las deflexiones no sean tan grandes como para ocasionar otros problemas estructurales o inclusive una sensación de inseguridad en los usuarios. Para este caso se utilizará el límite marcado en el reglamento del ACI 318-95 para estructuras que soporten a elementos no estructurales no propensos a dañarse por grandes deformaciones, que define una deflexión máxima permitida de:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{240}$$

Donde  $L$  es la longitud o claro del elemento estructural. De modo que para este puente se permite una deflexión máxima de:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{(72.178)(12)pulg}{240} = 3.61 \text{ pulg}$$

Para comparar las deflexiones generadas en las etapas significativas de la vida útil del puente se calculan por separado las deflexiones a centro de claro ocasionadas por las distintas fuerzas que actúan en la estructura:



- Deflexión por fuerza pretensora inicial, actuante únicamente en la viga (sección simple)

$$\Delta_{pi(ss)} = -\frac{1 P_i e L^2}{8 E_c I_{ss}}$$

Donde:

$P_i$  = Magnitud de la fuerza pretensora inicial

$e$  = Excentricidad del acero de presfuerzo con respecto al centroide de la sección de la viga

$L$  = Longitud de la viga o puente

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto

$I_{ss}$  = Momento de inercia de la sección simple (viga únicamente)

- Deflexión por fuerza pretensora final, actuante en la sección compuesta

$$\Delta_{pf(sc)} = -\frac{1 P_f e L^2}{8 E_c I_{sc}}$$

Donde:

$P_f$  = Magnitud de la fuerza pretensora final

$I_{sc}$  = Momento de inercia de la sección compuesta (viga + losa de tráfico)

- Deflexión por peso propio de la viga, actuante en la sección simple

$$\Delta_{dg(ss)} = \frac{5 w_{dg} L^4}{384 E_c I_{ss}}$$

Donde:

$w_{dg}$  = Carga distribuida generada por el peso propio de la viga

$I_{ss}$  = Momento de inercia de la sección simple (viga únicamente)

- Deflexión por peso propio de la viga, actuante en la sección compuesta

$$\Delta_{dg(sc)} = \frac{5 w_{dg} L^4}{384 E_c I_{sc}}$$

Donde:

$w_{dg}$  = Carga distribuida generada por el peso propio de la viga

$I_{sc}$  = Momento de inercia de la sección compuesta (viga + losa de tráfico)

- Deflexión por peso de la losa de tráfico, actuante en la sección compuesta

$$\Delta_{ds(sc)} = \frac{5 w_{ds} L^4}{384 E_c I_{sc}}$$

Donde:

$w_{ds}$  = Carga distribuida generada por el peso propio de la losa de tráfico

$I_{sc}$  = Momento de inercia de la sección compuesta (viga + losa de tráfico)



- Deflexión por peso de la carpeta asfáltica y peso distribuido de los parapetos, actuante en la sección compuesta

$$\Delta_{da(sc)} = \frac{5}{384} \frac{w_{da} L^4}{E_c I_{sc}}$$

Donde:

$w_{da}$  = Carga distribuida generada por el peso propio de la carpeta asfáltica y el peso distribuido de los parapetos

$I_{sc}$  = Momento de inercia de la sección compuesta (viga + losa de tráfico)

- Deflexión por peso de los diafragmas, actuante en la sección compuesta

$$\Delta_{diaf(sc)} = \frac{23 P_{diaf} L^3}{648 E_c I_{sc}}$$

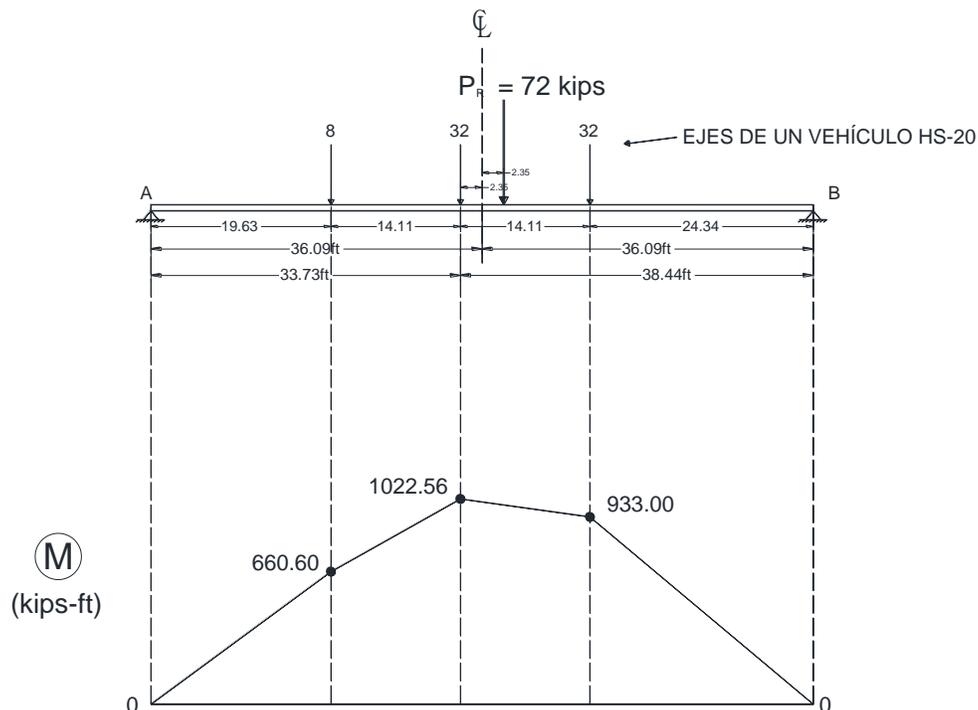
Donde:

$P_{diaf}$  = Carga ejercida por el peso propio del diafragma

$I_{sc}$  = Momento de inercia de la sección compuesta (viga + losa de tráfico)

- Deflexión por aplicación de carga viva, actuante en la sección compuesta

Para determinar la deflexión causada por la carga viva, aplicada mediante una configuración vehicular HS-20, primeramente, por el concepto de las líneas de influencia, se identifica la posición crítica del vehículo en el claro del puente y se determina su diagrama de momentos:





A diferencia de las otras deflexiones, que tienen su valor mayor al centro del claro, en el caso de la carga viva o vehicular es necesario ubicar el punto con la mayor deflexión por el método de área momento, que queda a 0.53 ft del centro del claro, y su magnitud respectiva es:

$$\Delta_{HS-20} = \frac{510,615}{E_c I_{sc}}$$

Sin embargo tal deflexión es la que ocasiona todo el peso del vehículo HS-20 sin incluir impacto, así que la deformación ocasionada en una viga será la correspondiente a este valor, multiplicado por el factor de presencia múltiple, el de distribución de carga y el de impacto, ya determinados en incisos anteriores. Por lo tanto:

$$\Delta_{ll(sc)} = c \Delta_{HS-20}$$

Donde:

$$c = \text{Factor presencia mult. (Factor de dist.) (Factor de impacto)}$$

$$c = 1.0((0.5)(0.9246))(1.2536) = 0.5795$$

Finalmente:

$$\Delta_{ll(sc)} = 0.5795 \Delta_{HS-20} = 0.5795 \frac{510,615}{E_c I_{sc}}$$

$$\Delta_{ll(sc)} = \frac{295,921}{E_c I_{sc}}$$

Donde:

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto

$I_{sc}$  = Momento de inercia de la sección compuesta (viga + losa de tráfico)

Recapitulando las características de la estructura, así como el peso generado por sus elementos estructurales se tiene que:

Datos	
<b>f'c (psi)</b>	5000.00
<b>Long. (ft)</b>	72.178
<b>P.P. Trabe (lb/ft)</b>	583.37
<b>P.P. Losa (lb/ft)</b>	453.00
<b>P.P. Carpeta (lb/ft)</b>	127.50
<b>P.P. Diafragma (lb)</b>	1929.00
<b><math>E_c</math> (klb/ft<sup>2</sup>)</b>	580393.25



Y de acuerdo a sus fórmulas correspondientes, las deformaciones a centro de claro quedan de la siguiente manera:

Deformaciones por cada carga	
$\Delta_{pi (ss)}$ (pulg)	-1.567
$\Delta_{pf (sc)}$ (pulg)	-0.581
$\Delta_{dg (ss)}$ (pulg)	0.705
$\Delta_{dg (sc)}$ (pulg)	0.299
$\Delta_{ds (sc)}$ (pulg)	0.231
$\Delta_{da (sc)}$ (pulg)	0.219
$\Delta_{ddiaf (sc)}$ (pulg)	0.037
$\Delta_{II (sc)}$ (pulg)	0.430

Se observa que el signo negativo indica deflexiones hacia arriba, mientras el positivo son deflexiones hacia abajo, de acuerdo a la convención de signos usual del análisis estructural.

Para determinar las condiciones críticas de deflexión se consideran dos escenarios: uno cuando el presfuerzo es aplicado en la sección simple de la viga, actuando únicamente el presfuerzo inicial y el peso propio de la viga, ocasionando la máxima deflexión hacia arriba en la vida útil de la viga, cuya magnitud queda dada por:

$$\Delta_i = \Delta_{pi (ss)} + \Delta_{dg (ss)}$$

$$\Delta_i = -1.567 \text{ pulg} + 0.705 \text{ pulg} = -\mathbf{0.862 \text{ pulg}}$$

El otro escenario crítico es cuando se aplican todas las cargas a la viga y adicionalmente ha sufrido la totalidad de pérdidas de la fuerza pretensora. La magnitud de esta deflexión es:

$$\Delta_f = \Delta_{pf (sc)} + \Delta_{dg (sc)} + \Delta_{ds (sc)} + \Delta_{da (sc)} + \Delta_{ddiaf (sc)} + \Delta_{II (sc)}$$

$$\Delta_f = (-0.581 + 0.299 + 0.231 + 0.219 + 0.037 + 0.430) = \mathbf{0.635 \text{ pulg}}$$

Tanto la deflexión inicial como la final se encuentran muy por debajo de la máxima deflexión permitida, de 3.61 pulg, así que la estructura pasa la revisión por deflexiones.



- Cálculo de resistencia a cortante y distribución de estribos

De acuerdo a la sección 9.20.2 de las normas AASHTO la resistencia a cortante que aporta el concreto de la sección transversal es el menor de los valores  $V_{ci}$  y  $V_{cw}$ :

$$V_{ci} = 0.6\sqrt{f'_c}b'd + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{m\acute{a}x}}$$

$$V_{cw} = (3.5\sqrt{f'_c} + 0.3F_{pe})b'd + V_p$$

Donde

$$M_{cr} = \frac{I}{Y_t} (6\sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d)$$

Y a su vez:

$f_{pe}$  = Esfuerzos de compresión en fibra extrema inferior de concreto ocasionados únicamente por la fuerza pretensora

$f_d$  = Esfuerzos en la fibra extrema inferior de concreto ocasionados por la carga muerta generada por peso propio sin factorizar

$Y_t$  = Distancia del centroide a la fibra extrema a tensión

$b'$  = Ancho de la viga en su sección más delgada

$d$  = Distancia del centroide del acero de presfuerzo al paño superior de la viga

$M_{m\acute{a}x}$  y  $V_i$  = Máximo cortante y momento factorizado, causado por carga externa, obtenidos de la combinación más desfavorable

$V_d$  = Fuerza cortante por carga muerta generada por peso propio de la viga sin factorizar

$V_p$  = Componente vertical de la fuerza de presfuerzo (en este caso será cero, debido a la excentricidad constante del acero de presfuerzo)

Cabe destacar que para hacer estos cálculos se considera únicamente la sección simple ó sección de la viga de acuerdo a las normas AASHTO, de modo que las propiedades geométricas corresponden a este elemento, así como su resistencia a compresión y módulo de elasticidad.

Para calcular los esfuerzos  $f_{pe}$  y  $f_d$  se usan los valores obtenidos en los incisos anteriores, quedando lo siguiente:

	Distancia al apoyo					
	0 L	0.1 L	0.2 L	0.3 L	0.4 L	0.5 L
<b>M<sub>dg</sub> (kip-ft)</b>	0.00	136.76	243.14	319.12	364.70	379.90
<b>P<sub>f</sub> (kips)</b>	535.19	535.19	535.19	535.19	535.19	535.19
<b>f<sub>pe</sub> (ksi)</b>	-2.1480	-2.1480	-2.1480	-2.1480	-2.1480	-2.1480
<b>f<sub>d</sub> (ksi)</b>	0.0000	0.2653	0.4717	0.6191	0.7076	0.7370



Por su parte, se recapitulan los datos de la viga, necesarios para calcular los otros términos:

Datos:	
<b>f'c (psi)</b>	5000
<b>f<sub>sy</sub> (psi)</b>	60000
<b>Long. (ft)</b>	72.178
<b>b' (pulg)</b>	7.008
<b>d (pulg)</b>	37.360

A continuación se calculan los términos de las ecuaciones anteriores para finalmente identificar la resistencia del concreto a cortante,  $V_c$ :

Revisión por cortante							
Dist. al apoyo	$f_{pe} - f_d$ (psi)	$M_{cr}$ (lb-plg)	$M_{m\acute{a}x}$ (lb-plg)	$V_i$ (lb)	$V_{ci}$ (lb)	$V_{cw}$ (lb)	$V_c$ (lb)
<b>0 L</b>	2,148.00	15,910,244.35	0.00	100,157.91	N/A	233,508.37	<b>233,508.37</b>
<b>0.1 L</b>	1,882.66	11,960,161.79	7,721,013.00	87,053.00	162,799.15	233,508.37	<b>162,799.15</b>
<b>0.2 L</b>	1,676.29	11,264,768.04	13,517,397.58	73,998.41	85,406.69	233,508.37	<b>85,406.69</b>
<b>0.3 L</b>	1,528.88	10,246,523.90	17,379,490.93	60,729.94	55,334.08	233,508.37	<b>55,334.08</b>
<b>0.4 L</b>	1,440.44	9,328,637.65	19,681,727.35	48,040.23	38,088.36	233,508.37	<b>38,088.36</b>
<b>0.5 L</b>	1,410.96	8,825,477.12	20,252,591.77	34,771.76	26,260.33	233,508.37	<b>26,260.33</b>

Con la resistencia del concreto se procede a calcular la resistencia que debe aportar el acero transversal, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_u \leq \phi(V_c + V_s)$$

$$\therefore V_s = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi}$$

Donde:

$V_u$  = Cortante total actuante factorizado

$\phi$  = Factor de resistencia a cortante (0.85)

Y tal resistencia aportada por el acero debe cumplir con la condición:

$$V_s \leq 8\sqrt{f'_c} b' d$$



Revisión por cortante					
Dist. al apoyo	V <sub>c</sub> (lb)	V <sub>u</sub> (lb)	V <sub>s</sub> (lb)	Restric. V <sub>s</sub>	Cond. V <sub>s</sub>
0 L	233,508.37	148,691.17	0.00	148,104.46	PASA
0.1 L	162,799.15	125,879.61	0.00	148,104.46	PASA
0.2 L	85,406.69	103,118.37	35,909.05	148,104.46	PASA
0.3 L	55,334.08	80,143.25	38,952.09	148,104.46	PASA
0.4 L	38,088.36	57,746.88	29,849.15	148,104.46	PASA
0.5 L	26,260.33	34,771.76	14,647.62	148,104.46	PASA

Posteriormente se propone colocar estribos con un área mínima transversal:

$$A_{v \min} = \frac{50 b' s}{f_{sy}}$$

Se puede observar que en este caso se proponen estribos con varillas del número 3 que pasan la restricción, según se muestra más adelante. La separación entre estos elementos debe ser:

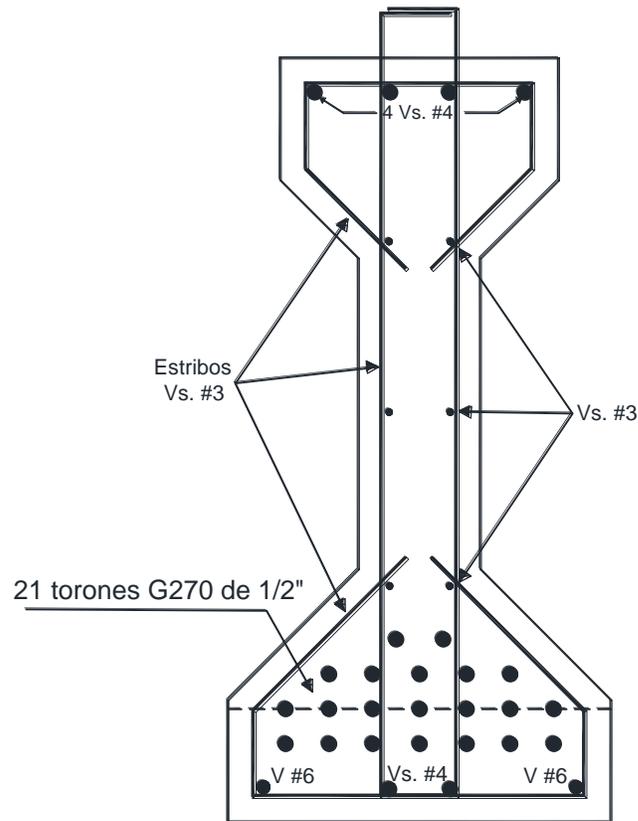
$$S = \frac{A_v f_{sy} d}{V_s} < \begin{cases} 0.75 h \\ 24 \text{ pulg} \end{cases}$$

La separación entre estribos queda de la siguiente manera:

Revisión por cortante								
Dist. al apoyo	V <sub>s</sub> (lb)	A(pulg <sup>2</sup> ) Vs#3	S (pulg)	A <sub>v</sub> MIN (pulg <sup>2</sup> )	Restricciones			
					CONDICIÓN N	S <sub>máx1</sub> (pulg)	S <sub>máx2</sub> (pulg)	S <sub>final</sub> (pulg)
0 L	0.00	0.22	N/A	0.07	PASA	24.00	32.89	12.50
0.1 L	0.00	0.22	N/A	0.07	PASA	24.00	32.89	12.50
0.2 L	35,909.05	0.22	13.79	0.07	PASA	24.00	32.89	12.50
0.3 L	38,952.09	0.22	12.71	0.07	PASA	24.00	32.89	12.50
0.4 L	29,849.15	0.22	16.59	0.07	PASA	24.00	32.89	12.50
0.5 L	14,647.62	0.22	33.80	0.07	PASA	24.00	32.89	12.50

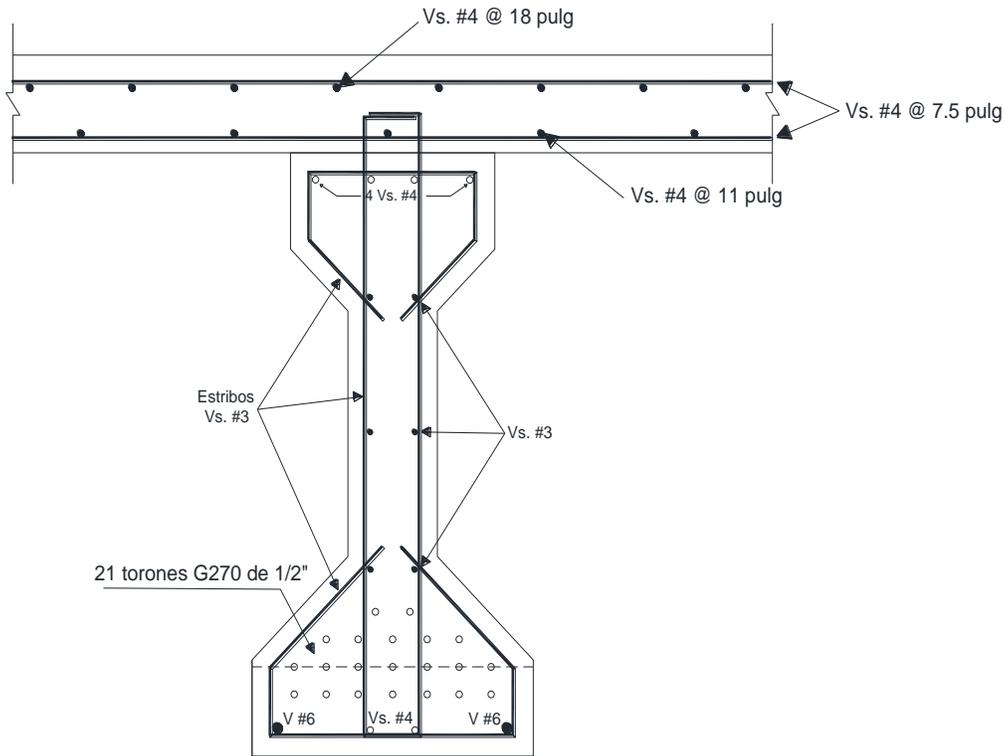


Por lo tanto es necesario colocar estribos de varilla del número 3 a cada 12.50 pulgadas. El arreglo que se utilizará para tales estribos, ilustrando el acero de refuerzo y presfuerzo es el siguiente, respetando las distancias establecidas en incisos anteriores para la distribución del acero:



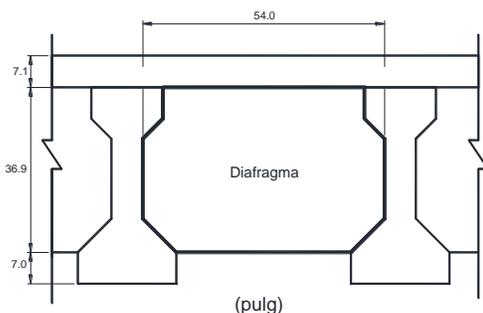
Cabe destacar que se utiliza acero transversal en el alma de la viga para darle forma y sostener los estribos durante su armado y en el lecho superior se considera también acero de refuerzo para soportar los esfuerzos de tensión generados en los extremos apoyados, a causa de la fuerza pretensora, así como también por fines constructivos.

Incluyendo la losa de tráfico, el armado de la superestructura del puente tipo queda de la siguiente manera:

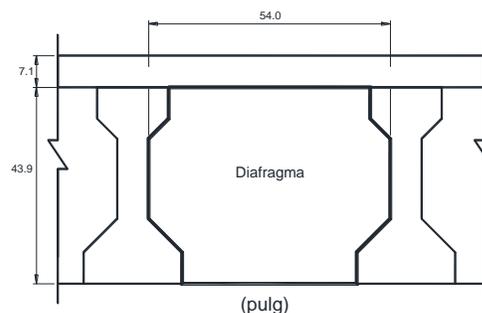


### Diseño de diafragmas

Según la sección 9.10.2 dice que deben usarse diafragmas al inicio y final del claro y en los puntos de momento máximo para claros mayores a 40 pies. Así que se decide utilizar diafragmas en los extremos y a cada tercio del claro del puente.



Diafragma interior



Diafragma exterior



Los diafragmas tienen 1 pie de ancho y las dimensiones que se muestran en la figura anterior. El concreto es colado in situ y se utiliza acero de refuerzo grado 60. Sus resistencias de compresión y límite de fluencia son respectivamente:

$$f'_c = 4,000 \text{ lb/pulg}^2$$

$$f_y = 60,000 \text{ lb/pulg}^2$$

Estos elementos soportan únicamente su propio peso y tienen una longitud muy corta en relación con su peralte, así que refuerzan con acero mínimo, de acuerdo a la sección 8.16.3.2 de las normas AASHTO:

$$\rho_{min} = \frac{3\sqrt{f'_c}}{f_y} = \frac{3\sqrt{4,000}}{60,000} = 3.162 \times 10^{-3}$$

Para los diafragmas interiores:

$$A_s = \rho_{min}bd = 3.162 \times 10^{-3}(12)(36.9) = 1.4 \text{ pulg}^2 = \mathbf{5 \text{ varillas del número 5}}$$

Para los diafragmas exteriores:

$$A_s = \rho_{min}bd = 3.162 \times 10^{-3}(12)(43.9) = 1.66 \text{ pulg}^2 = \mathbf{6 \text{ varillas del número 5}}$$

Tal armado es utilizado para lecho inferior y superior. Por otro lado, para el refuerzo transversal se recurre también al acero mínimo, colocando estribos con un área mínima transversal:

$$A_{vmin} = \frac{50 b's}{f_{sy}}$$

Suponiendo el uso de estribos a cada 14 pulgadas:

$$A_{vmin} = \frac{50 b's}{f_{sy}} = \frac{50(12)(14)}{60,000} = 0.14 \text{ pulg}^2$$

Así que se utilizan estribos del número 3 a cada 14 pulgadas para diafragmas interiores y exteriores.



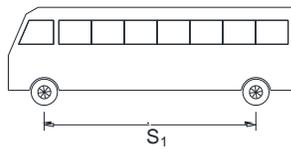
## APÉNDICE C

**Condiciones de tráfico vehicular de acuerdo a análisis estadístico de aforo  
en Puente Río Papaloapan, ubicado en la carretera a cuota del tramo de La  
Tinaja a Cosoleacaque, en el estado de Veracruz**

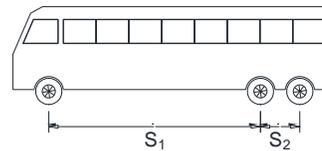
## Configuraciones vehiculares

Se observó que predomina la presencia de vehículos ligeros, mientras la gran mayoría de los vehículos de carga que se registraron durante el aforo corresponden a las configuraciones vehiculares B2, B3, C2, C3, T3-S2, T3-S3 Y T3-S2-R4:

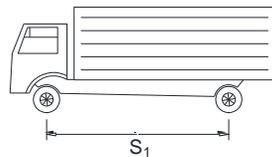
VEHÍCULO B2



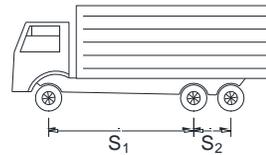
VEHÍCULO B3



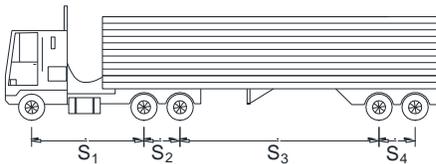
VEHÍCULO C2



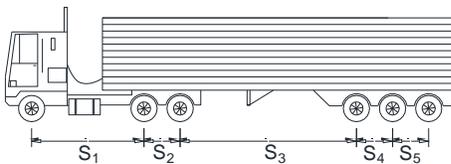
VEHÍCULO C3



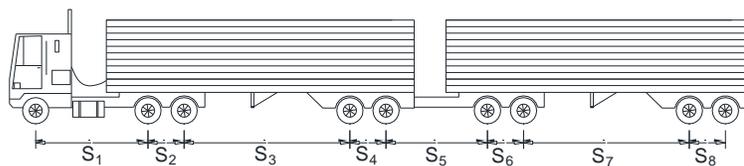
VEHÍCULO T3-S2



VEHÍCULO T3-S3



VEHÍCULO T3-S2-R4





Por otro lado, de la tesis de doctorado “Análisis del Método de Búsqueda Global para la Detección de Daño y Monitoreo Estructural de Puentes” del Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez se tiene que el promedio de vehículos que transitan por estas vías por día, incluyendo los dos cuerpos de dos carriles cada uno, es de 9895, de los cuales se registraron los siguientes porcentajes de aparición de cada tipo de vehículo:

Tipo de Vehículo	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	B2	B3	V. ligeros
Porcentaje	6.37	5.53	14.32	4.45	14.56	2.40	0.60	51.74

### Peso Bruto Vehicular

Para determinar o tipificar los pesos brutos vehiculares de las distintas configuraciones primeramente se hizo una clasificación según sus condiciones de carga. Se distinguieron tres clasificaciones:

- Vehículos vacíos
- Vehículos no excedidos: cuyo peso bruto vehicular es menor al máximo permitido, indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT.
- Vehículos excedidos: cuyo peso bruto vehicular es mayor al máximo permitido, indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT.

Los porcentajes de aparición para cada una de estas clasificaciones, para cada configuración vehicular, son:

Configuración vehicular	Condición de carga		
	Vacíos	Excedidos	No excedidos
<b>C2</b>	34.50%	0.37%	65.13%
<b>C3</b>	19.65%	4.82%	75.53%
<b>T3-S2</b>	22.86%	26.31%	50.83%
<b>T3-S3</b>	35.35%	39.81%	24.84%
<b>T3-S2-R4</b>	30.51%	34.44%	35.05%

Se observa que no se clasificaron los vehículos ligeros ni los del tipo B2 y B3, esto se debe a que su peso es pequeño comparado con las otras configuraciones y no sufren variaciones significativas entre ellos. Así que para los vehículos ligeros se consideró un peso constante de 3 ton y para los vehículos B2 y B3 17.5 y 21.5 ton respectivamente.



Para las clasificaciones mostradas en el cuadro anterior se determinó ya sea un peso promedio o bien una función de distribución de probabilidad (FDP) más apropiada, para el caso en que el rango de pesos brutos vehiculares presentados tenga variaciones significativas:

Configuración vehicular	Pesos Brutos Vehiculares promedio (ton)		
	Vacíos	Excedidos	No excedidos
<b>C2</b>	4.20	20.80	FDP
<b>C3</b>	8.00	28.00	FDP
<b>T3-S2</b>	19.88	FDP	FDP
<b>T3-S3</b>	25.70	FDP	FDP
<b>T3-S2-R4</b>	40.00	FDP	FDP

Las funciones de distribución acumulada que mostraron un mejor ajuste para representar la variación de los pesos brutos vehiculares de cada una de las clasificaciones indicadas se ilustran a continuación:

- Vehículos C2 no excedidos

Distribución Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{7377.4}\right)^{2.0866}}$$

Desplazamiento: 2248.5

- Vehículos C3 no excedidos

Distribución Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{38647}\right)^{9.6876}}$$

Desplazamiento: -18409

- Vehículos T3-S2 excedidos

Distribución Extreme Value:

$$F(x) = \frac{1}{e^{e^{\left(\frac{x-47424.2}{3017.3}\right)}}$$

Desplazamiento: 0

- Vehículos T3-S2 no excedidos

Distribución Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{41796}\right)^{8.7745}}$$

Desplazamiento: -3908.8



- Vehículos T3-S3 excedidos  
Distribución Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{9001.8}\right)^{1.2731}}$$

Desplazamiento: 48220.1

- Vehículos T3-S3 no excedidos  
Distribución Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{108575}\right)^{22.219}}$$

Desplazamiento: -66506

- Vehículos T3-S2-R4 excedidos  
Distribución Uniforme:

$$F(x) = \frac{x - 66532}{99627 - 66532}$$

- Vehículos T3-S2-R4 no excedidos  
Distribución Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{13827}\right)^{1.5072}}$$

Desplazamiento: 37562

### Peso por eje de cada tipo de vehículo

Debido a que cada vehículo tiene una configuración y número distinto de ejes es necesario identificar cuál es el peso que transmite cada uno de ellos a través de sus respectivas llantas, de modo que pueda ser representado apropiadamente mediante un conjunto de cargas puntuales aplicadas a la estructura en estudio. De acuerdo a los datos del aforo analizado, se determinó el porcentaje del peso bruto vehicular total que es transmitido por cada eje según el tipo de vehículo:

Tipo de Vehículo	Porcentaje del peso total								
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Eje 7	Eje 8	Eje 9
<b>B2</b>	50.00%	50.00%	--	--	--	--	--	--	--
<b>C2</b>	40.00%	60.00%	--	--	--	--	--	--	--
<b>B3</b>	25.00%	37.50%	37.50%	--	--	--	--	--	--
<b>C3</b>	25.00%	37.50%	37.50%	--	--	--	--	--	--
<b>T3-S2</b>	15.00%	21.25%	21.25%	21.25%	21.25%	--	--	--	--
<b>T3-S3</b>	12.00%	20.00%	20.00%	16.00%	16.00%	16.00%	--	--	--
<b>T3-S2-R4</b>	8.00%	11.50%	11.50%	11.50%	11.50%	11.50%	11.50%	11.50%	11.50%



## Distribución de los ejes de cada configuración vehicular

Además del peso transmitido por cada eje es necesario determinar la distancia promedio entre ellos para ubicarlos correctamente. De acuerdo al número de ejes y la configuración de los vehículos, las distancias usuales identificadas en el aforo analizado se resumen en el siguiente cuadro:

Tipo de Vehículo	Distancia entre ejes (m)							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
B2	5.25	--	--	--	--	--	--	--
C2	5.25	--	--	--	--	--	--	--
B3	4.00	1.25	--	--	--	--	--	--
C3	4.00	1.25	--	--	--	--	--	--
T3-S2	4.25	1.25	12.50	1.25	--	--	--	--
T3-S3	4.25	1.25	11.25	1.25	1.25	--	--	--
T3-S2-R4	5.50	1.25	8.50	1.25	2.50	1.25	8.50	1.25

Otro parámetro importante es el del ancho de los vehículos o dicho de otra manera, la longitud de sus ejes, para identificar la ubicación de las llantas, que son las que finalmente transmiten la carga a la superficie de rodamiento del puente. De acuerdo a las normas AASHTO (1993), empleadas en el diseño del puente de referencia, el ancho del vehículo de diseño HS-20 es de 1800 mm, medidos de centro a centro del conjunto de dos llantas en cada extremo del eje. Por otro lado, la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT (1995) empleada, establece que el ancho máximo permitido para los vehículos de carga es de 2.60 metros, sin contar elementos salientes, como espejos retrovisores. Según tales datos se decide fijar un ancho de 2.06 metros para los vehículos simulados, considerando que se trata de una distancia intermedia entre ambos parámetros y que permitirá localizar las cargas transmitidas por tales vehículos sobre nodos existentes en la placa que conforma la losa de tráfico del modelo.

## Proyecciones de crecimiento de flujo vehicular y probabilidades de ocupación vehicular

Finalmente, para complementar los datos de flujo vehicular para alimentar las simulaciones de los escenarios de carga, es necesario determinar las probabilidades de que en un instante dado se encuentre ocupado el puente, además de determinar cuántos vehículos estarán pasando en ese momento.

Las probabilidades de ocupación del puente están directamente relacionadas con el número de vehículos que circulan sobre él, por ello fue necesario realizar proyecciones del crecimiento del flujo vehicular, ya que las simulaciones abarcan grandes períodos de tiempo. De acuerdo a Crespo (2011), la tasa de crecimiento promedio anual del tránsito en el tramo carretero aforado es



de aproximadamente 4%, aunque consideró otros dos posibles escenarios: una tasa de crecimiento del 2% y otra del 6%. Tomando en cuenta que el promedio de los vehículos que circulan diariamente por los dos cuerpos de dos carriles cada uno en el tramo estudiado es de 9896 (Quintana, 2009), se decide utilizar un número de 4948 vehículos diarios para el puente modelado, que cuenta únicamente con dos carriles. Ante tal tráfico diario inicial, las proyecciones de crecimiento de tráfico quedan de la siguiente manera:

<b>PROYECCIONES DE TRÁNSITO DIARIO</b>			
<b>TIEMPO (AÑOS)</b>	<b>TASA DE CRECIMIENTO</b>		
	<b>2%</b>	<b>4%</b>	<b>6%</b>
<b>0</b>	4948	4948	4948
<b>10</b>	6032	7324	8861
<b>20</b>	7352	10842	15869
<b>30</b>	8963	16048	28419
<b>40</b>	10925	23755	50894

Considerando que cada vehículo circule con una velocidad promedio de 25 m/s (90 km/hr) y que la longitud del puente de referencia es de 22 metros, se tiene que un vehículo tarda un total de 0.88 segundos en cruzar la estructura. Por otro lado se calcula el tiempo aproximado que tardaría en pasar cada vehículo si su flujo fuera uniforme, es decir, dividiendo el tiempo que conforma un día entre el número de vehículos que circulan en ese periodo. Para ello se toman los números de vehículos generados en el cuadro anterior, ignorando aquellos valores que se encuentren muy próximos a otro, para no redundar en datos muy similares.

<b>FLUJO DIARIO VEHICULAR</b>	<b>TIEMPO ENTRE PASE DE VEHÍCULOS (SEG)</b>
<b>4948</b>	17.461
<b>6032</b>	14.323
<b>7352</b>	11.751
<b>8963</b>	9.639
<b>10925</b>	7.908
<b>16048</b>	5.383
<b>23755</b>	3.637
<b>28419</b>	3.040
<b>50894</b>	1.697

Para calcular la probabilidad  $p$ , de que un evento sea positivo, es decir, de que se encuentre un vehículo sobre el puente bajo estas consideraciones, se plantea que los eventos se simularán a cada 0.11 segundos (8 períodos para



cumplir la duración del cruce de un vehículo), de modo que para cada número de vehículos diarios únicamente se divide esta cantidad entre el tiempo calculado en el cuadro anterior. Debido a la naturaleza de estos eventos es posible calcular la probabilidad de aparición de 1 ó más vehículos mediante una distribución binomial, de acuerdo a las siguientes expresiones:

No. De vehículos	Expresión correspondiente
0	$(1 - p)^8$
1	$8(1 - p)^7(p)$
2	$28(1 - p)^6(p)^2$
3	$56(1 - p)^5(p)^3$
4	$70(1 - p)^4(p)^4$
5	$56(1 - p)^3(p)^5$
6	$28(1 - p)^2(p)^6$
7	$8(1 - p)^1(p)^7$

Las probabilidades de aparición de los distintos números de vehículos para cada flujo vehicular considerado quedan, de acuerdo a las fórmulas mostradas, de la siguiente manera:

TRÁNSITO DIARIO	4948	6032	7352	8963	10925	16048	23755	28419	50894
$p$	0.0063	0.0077	0.0094	0.0114	0.0139	0.0204	0.0302	0.0362	0.0648
No. De vehiculos	PROBABILIDADES DE APARICIÓN (%)								
0	95.0701	94.0189	92.7526	91.2274	89.3996	84.7771	78.2170	74.4666	58.5130
1	4.8216	5.8209	7.0111	8.4243	10.0881	14.1460	19.5147	22.3637	32.4326
2	0.1070	0.1577	0.2319	0.3403	0.4980	1.0327	2.1301	2.9384	7.8648
3	0.0014	0.0024	0.0044	0.0079	0.0140	0.0431	0.1329	0.2206	1.0898
4	1.07E-05	2.36E-05	5.17E-05	0.0001	0.0002	0.0011	0.0052	0.0104	0.0944
5	5.45E-08	1.46E-07	3.91E-07	1.05E-06	2.8E-06	1.87E-05	0.0001	0.0003	0.0052
6	1.73E-10	5.66E-10	1.85E-09	6.04E-09	1.97E-08	1.95E-07	2.02E-06	5.84E-06	0.0002
7	3.13E-13	1.25E-12	4.99E-12	1.99E-11	7.95E-11	1.16E-09	1.8E-08	6.26E-08	3.59E-06



Sin embargo, considerando que el claro del puente es corto y que las probabilidades de aparición de más de dos vehículos son pequeñas, únicamente se consideran escenarios en los que se presenten uno o dos vehículos, cuyos porcentajes de ocurrencia, basados en los valores del cuadro anterior, son:

<b>PROBABILIDAD DE APARICIÓN (%)</b>		
<b>TRÁNSITO DIARIO</b>	<b>NÚMERO DE VEHÍCULOS</b>	
	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>4948</b>	97.802	2.1977
<b>6032</b>	97.322	2.6773
<b>7352</b>	96.739	3.2603
<b>8963</b>	96.029	3.9704
<b>10925</b>	95.166	4.8331
<b>16048</b>	92.925	7.0742
<b>23755</b>	89.586	10.413
<b>28419</b>	87.586	12.413
<b>50894</b>	78.175	21.824



## APÉNDICE D

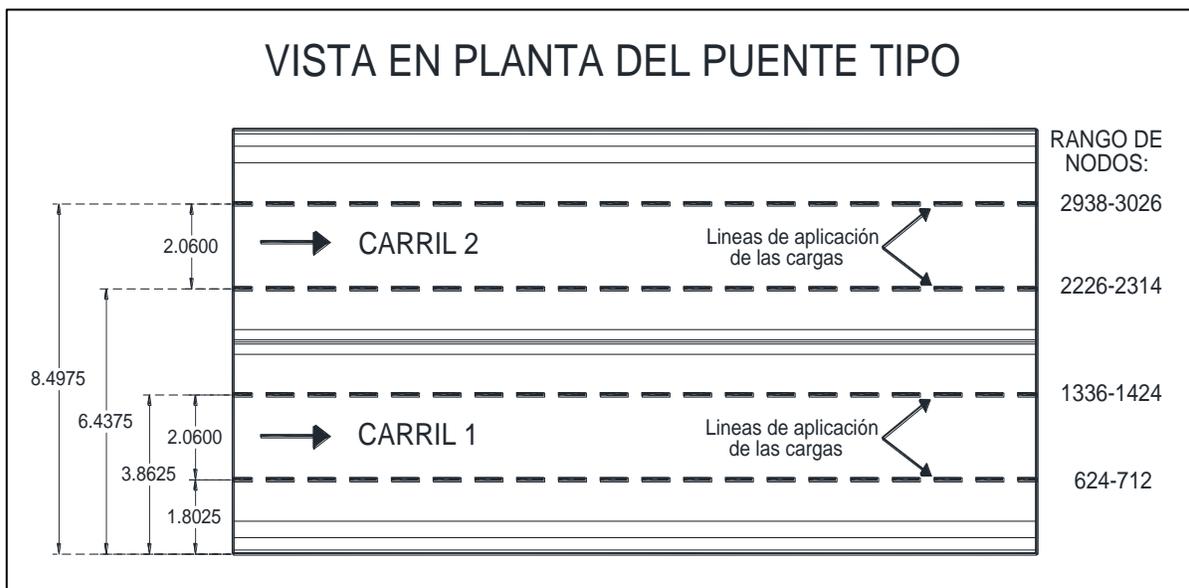
### Consideraciones para la simulación de escenarios de carga



## Ubicación transversal de los vehículos

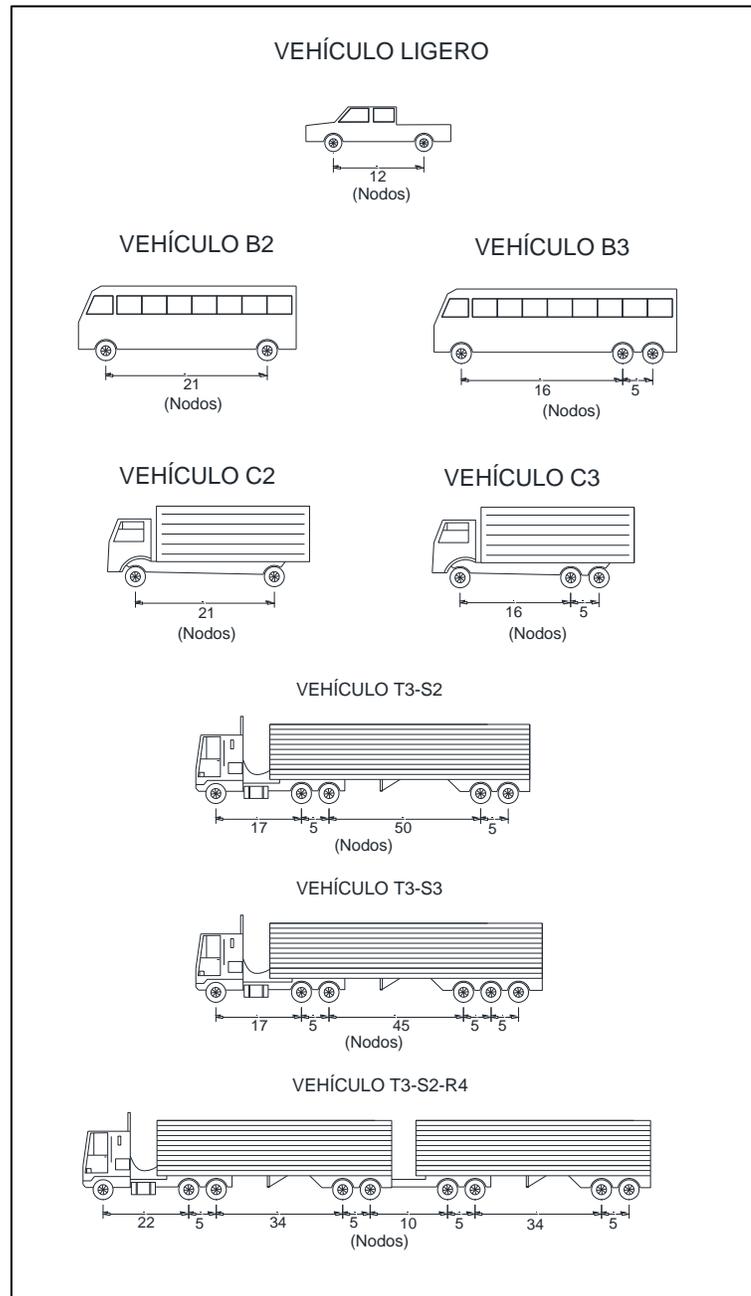
Se considera que los dos carriles del puente tipo son de un mismo sentido, es decir, cuenta con un carril de baja y otro de alta velocidad. De este modo cuando circula un solo vehículo de carga se ubica sobre el carril de baja velocidad y cuando pasan dos vehículos al mismo tiempo se ubica el más pesado en el carril de baja y el más ligero en el de alta.

Por otro lado, se definen las líneas de aplicación de las cargas en el modelo, respetando el ancho propuesto de 2.06 metros para todos los vehículos y cuidando que coincida cada una con líneas de nodos de la placa de la losa de tráfico modelada, de modo que la ubicación de las cargas puntuales pueda ser exactamente sobre ellos. Además, se identifican los números de los nodos que comprende cada una de esas líneas, para aplicarles posteriormente tales cargas:



## Ubicación longitudinal de los vehículos

Ya que las cargas tienen que ser aplicadas exactamente sobre los nodos generados con el mallado de la losa de tráfico del modelo, primeramente se representa la distancia entre los ejes de cada tipo de vehículo como un número de nodos, considerando que, de acuerdo al modelo, hay una distancia de 25 centímetros entre cada uno de ellos:

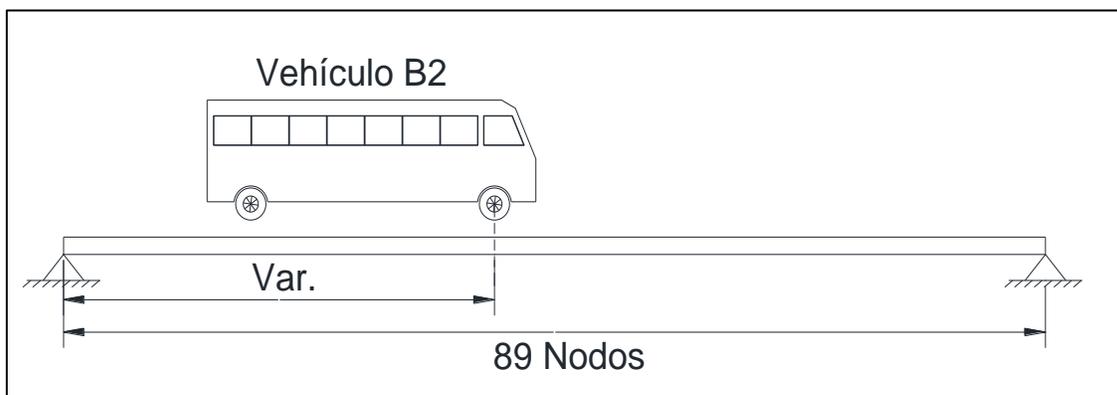


Por otro lado, debido a que la distribución de los ejes y su porcentaje de carga cambia entre las distintas configuraciones vehiculares, cada una de ellas genera un comportamiento diferente de las fuerzas internas generadas en la estructura conforme el vehículo circula a lo largo del puente. Por ello se hacen análisis del puente tipo con el programa de elemento finito StaDyn, aplicando las cargas que transmite cada tipo de vehículo con un peso dado en distintas posiciones, simulando un avance gradual del automotor, específicamente sobre el carril 1. Los momentos flexionantes generados son revisados al centro de claro de

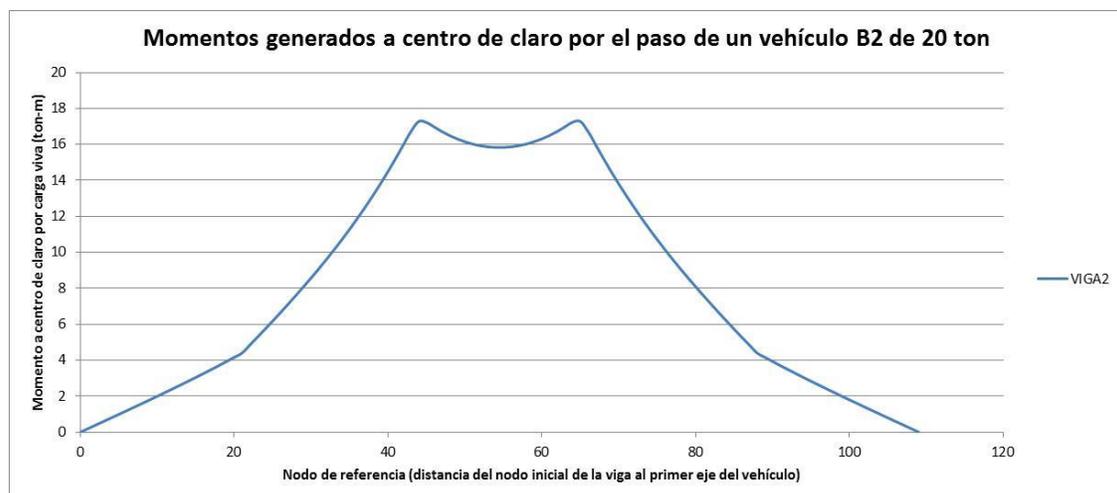
una de las vigas que se encuentra en tal carril y se grafican, buscando dos datos principales: el número de ciclos de carga que genera el vehículo a su paso y las posiciones en las que produce los efectos máximos, llegando a los siguientes resultados para cada configuración:

- Vehículo B2

La distancia de referencia para ilustrar el avance de cualquier tipo de vehículo sobre la superestructura del puente es medida entre el primer eje o eje frontal y el nodo inicial del puente, que longitudinalmente cuenta con 89 nodos a cada 25 centímetros. Tal distancia es medida en número de nodos, ya que el avance es de un nodo para cada análisis:

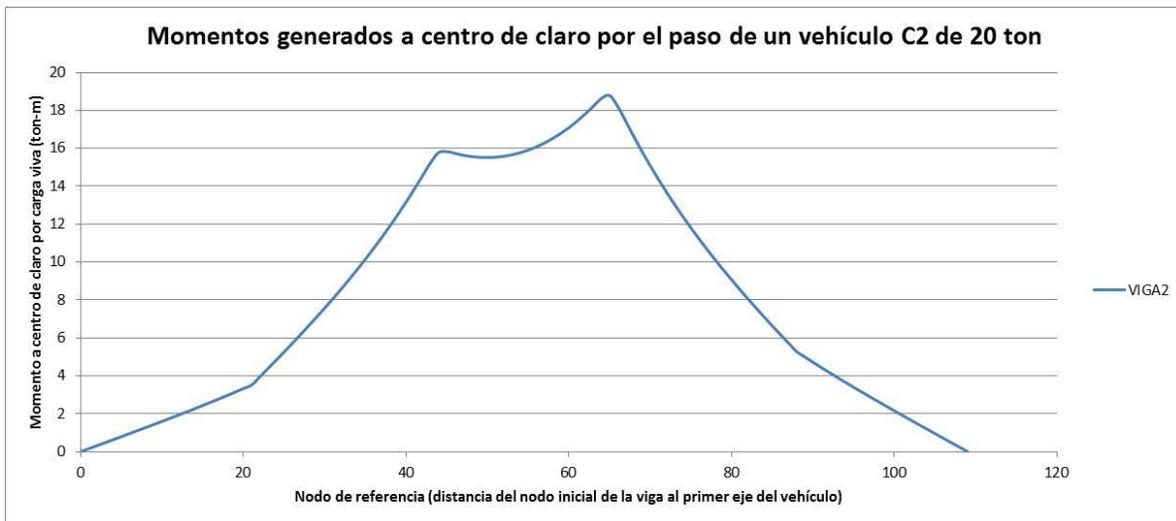


En la gráfica generada se observa que hay dos máximos de la misma magnitud, específicamente cuando el eje delantero está en el nodo 44 y 65. Sin embargo, la disminución del momento flexionante entre ambas posiciones es mínima, así que se considera que este vehículo genera un solo ciclo y se puede colocar en cualquiera de estas dos posiciones para obtener la magnitud de tal ciclo de carga:



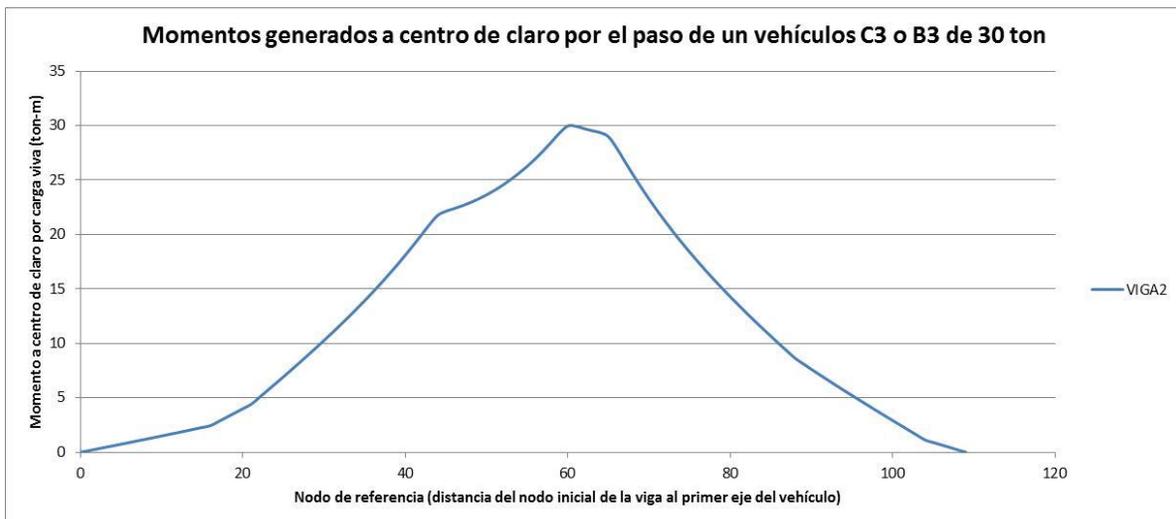
- Vehículo C2

Se observan dos máximos, en las posiciones de los nodos 45 y 65, sin una disminución importante del momento flexionante entre ambas posiciones. Debido a que la distribución de peso es diferente para cada eje de este vehículo, la magnitud de ambos máximos es distinta. Se considera que esta configuración produce sólo un ciclo de carga, cuya amplitud es determinada para la posición en que el eje delantero se ubica a 65 nodos del eje inicial del puente, donde produce el mayor momento flexionante:



- Vehículos B3 y C3

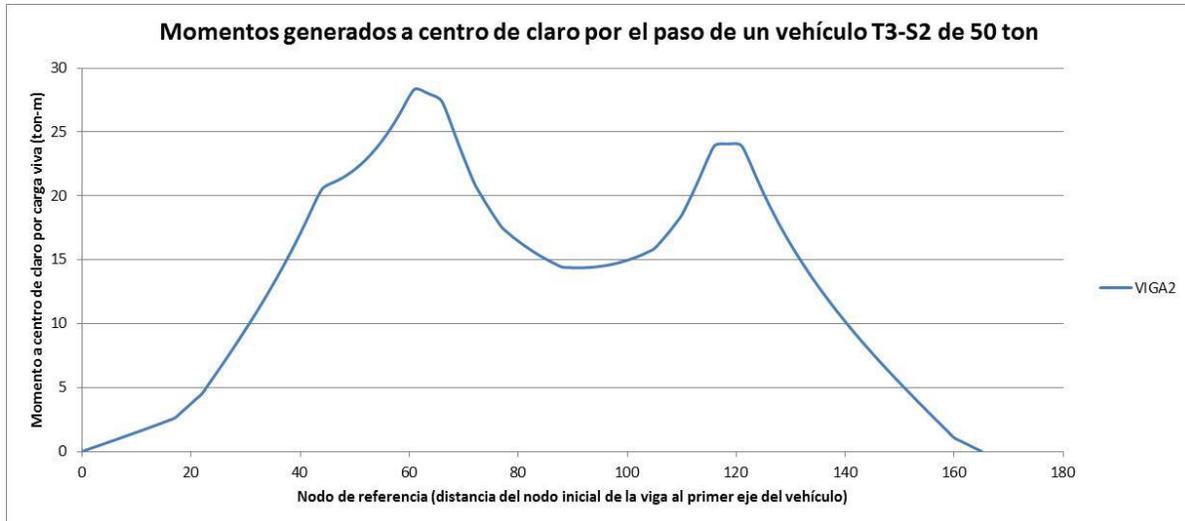
Se distingue un solo máximo, es decir, estos vehículos producen un solo ciclo de carga, cuya magnitud se calcula específicamente para la posición referenciada con el nodo 60:





- Vehículo T3-S2

El paso de este vehículo genera dos ciclos de carga muy notorios, cuyos máximos se alcanzan en las posiciones del eje delantero a 61 y 120 nodos del inicio del puente. De este modo, cuando se simula el paso de uno de estos vehículos sobre el puente, se calculan los momentos flexionantes en ambas posiciones para obtener la amplitud de los dos ciclos de carga que genera esta configuración.

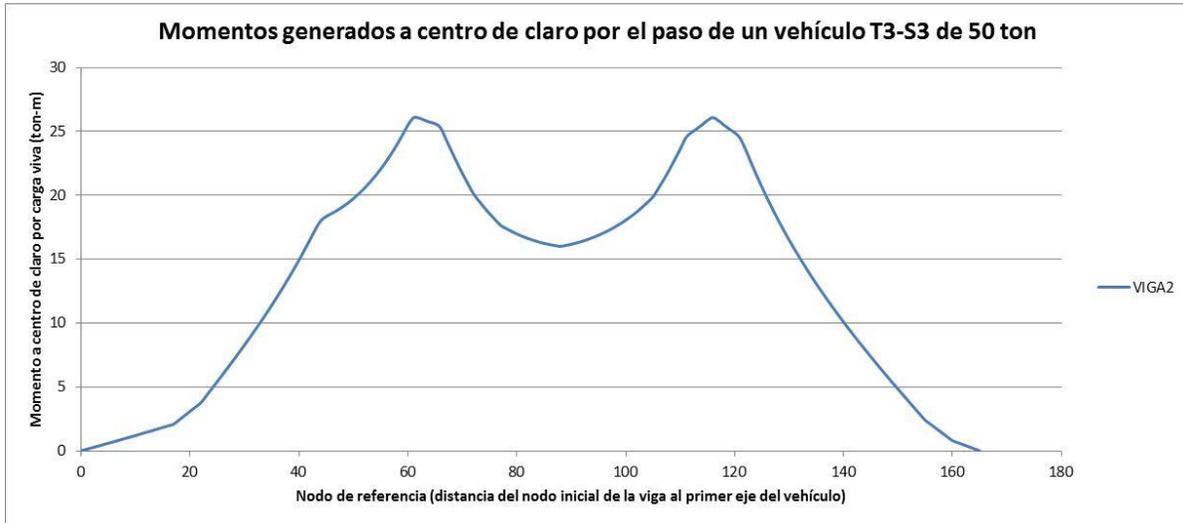


En el caso de que se encuentre un segundo vehículo sobre el puente se considera el mismo avance que para el vehículo T3-S2 para obtener la magnitud del segundo ciclo de carga.



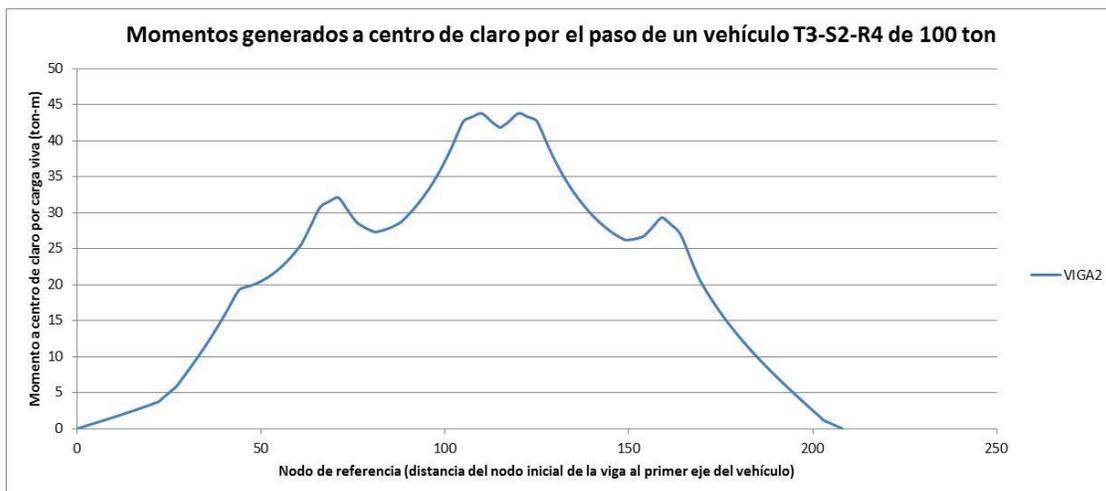
- Vehículo T3-S3

Este vehículo también genera dos ciclos de carga a su paso por el puente, con los máximos ubicados en los nodos de referencia 61 y 116. Los criterios para calcular la amplitud de los ciclos cuando pasan 1 o 2 vehículos es el mismo que para la configuración T3-S2.



- Vehículo T3-S2-R4

El paso de este vehículo genera cuatro valores máximos, sin embargo, la disminución del momento flexionante entre cada uno de los puntos donde se ubican es muy pequeña, de modo que se considera que esta configuración produce solamente un ciclo, cuya amplitud es la correspondiente al mayor momento flexionante generado, del nodo de referencia 110 o 120, que tienen el mismo valor:





## APÉNDICE E

### Programa en lenguaje Fortran para generación de escenarios de carga por simulación Monte Carlo



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
=====
C  PROGRAMA PARA GENERAR ESCENARIOS DE CARGA POR SIMULACIÓN MONTE CARLO
C  EN EL PUENTE DE ANÁLISIS
C=====

      USE MSFLIB

C=====
C  DECLARACIÓN DE VARIABLES TIPO REAL, ENTERA O CARACTER
C=====

      REAL C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7, CPP1, CPP12, CPP2, CPP22, CPP3, CPP32,
      $CPP4, CPP42, CPP5, CPP52, CPP6, CPP62, CPP7, CPP72, CPP8, CPP82, PBV,
      $CPP9, CPP92, PBVREFT3S2R4, PBVREFT3S31, PBVREFT3S32, PBVREFT3S21,
      $PBVREFT3S22, PBVREFC3, PBVREFC2, PBVREFB3, PBVREFB2, MOMREFT3S2R4,
      $MOMREFT3S31, MOMREFT3S32, MOMREFT3S21, MOMREFT3S22, MOMREFC3,
      $MOMREFC2, MOMREFB3, MOMREFB2, MY, PBV1, PBV2, PROB1V
      INTEGER IT, NE1, NE2, NE3, NE4, NE5, NE6, NE7, NE8, NE9, N1, N2, N3, N4,
      $N5, N6, N7, N8, N9, N12, N22, N32, N42, N52, N62, N72, N82, N92, NR, NODOMMAX,
      $NVEH, R, T, X, COC2, COC3, COT3S2, COT3S3, COT3S2R4, COB2, COB3, COVL,
      $CO1VC2, CO1VC3, CO1VT3S2, CO1VT3S3, CO1VT3S2R4, CO1VB2, CO1VB3,
      $CICLOS, NR1, NR2, RCC1, RCC2, RCC3, RCC4, RCC5, RPB1, RPB2, RPB3, RPB4, RPB5,
      $RPB6, RPB7, RPB8, INI
      CHARACTER*8 RUTA
      CHARACTER*19 FXFY
      CHARACTER*43 MXYZ
      CHARACTER*7 DATOS
      CHARACTER*150 L
      CHARACTER*11 V
      CHARACTER*11 V1
      CHARACTER*11 V2
      CHARACTER*15 CC
      CHARACTER*15 CC1
      CHARACTER*15 CC2

      DIMENSION L(30000)

C=====
C  ESTABLECIMIENTO DE NÚMERO SEMILLA PARA GENERACIÓN DE VARIABLES ALEATORIAS
C  PARA SIMULACIONES
C=====

      T=10000      !PARA NÚMERO DE VEHÍCULOS (1 O 2)
      R=1000       !PARA TIPO DE VEHÍCULO
      X=50000      !PARA POSICIÓN DE UN SEGUNDO VEHICULO SOBRE EL PUENTE

      RCC1=15000!PARA CONDICIÓN DE CARGA DE VEHICULO C2
      RCC2=25000!PARA CONDICIÓN DE CARGA DE VEHICULO C3
      RCC3=35000!PARA CONDICIÓN DE CARGA DE VEHICULO T3-S2
      RCC4=45000!PARA CONDICIÓN DE CARGA DE T3-S3
      RCC5=55000!PARA CONDICIÓN DE CARGA DE T3-S2-R4

      RPB1=20000!PARA PBV DE VEHÍCULO C2 NO EXCEDIDO
      RPB2=30000!PARA PBV DE VEHÍCULO C3 NO EXCEDIDO
      RPB3=40000      !PARA PBV DE VEHÍCULO T3-S2 EXCEDIDO
      RPB4=50000      !PARA PBV DE VEHÍCULO T3-S2 NO EXCEDIDO
      RPB5=60000!PARA PBV DE VEHÍCULO T3-S3 EXCEDIDO
      RPB6=70000!PARA PBV DE VEHÍCULO T3-S3 NO EXCEDIDO
      RPB7=80000!PARA PBV DE VEHÍCULO T3-S2-R4 EXCEDIDO
      RPB8=90000!PARA PBV DE VEHÍCULO T3-S2-R4 NO EXCEDIDO

C=====
C  CREACIÓN DE ARCHIVOS PARA GUARDAR LOS DATOS OBTENIDOS DE LAS
C  CORRIDAS Y SE INICIALIZAN LOS CONTADORES DE VEHÍCULOS, POR TIPO
C=====

      OPEN(12, FILE='RESULTRESUM', STATUS='UNKNOWN')

      COC2=0
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
COC3=0
COT3S2=0
COT3S3=0
COT3S2R4=0
COB2=0
COB3=0
COVL=0

CO1VC2=0
CO1VC3=0
CO1VT3S2=0
CO1VT3S3=0
CO1VT3S2R4=0
CO1VB2=0
CO1VB3=0
```

```
C=====
C ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS PARA LLEVAR A CABO LAS SIMULACIONES
C Y SU ESCRITURA EN EL ARCHIVO DE RESULTADOS
C=====
```

```
WRITE(*,*) 'HASTA QUE ITERACION DESEAS LLEGAR?'
READ(*,*) IT
WRITE(*,*) 'EN QUE ITERACIÓN DESEAS EMPEZAR?'
READ(*,*) INI
WRITE(*,*) 'CUAL ES LA PROBABILIDAD DE ENCONTRAR 1 VEHICULO?'
READ(*,*) PROB1V
```

```
WRITE(12,*) 'PROB. DE ENCONTRAR 1 VEHICULO:'
WRITE(12,*) PROB1V
WRITE(12,*) ' '
WRITE(12,*) 'NUMERO DE ITERACION FINAL:'
WRITE(12,5027) IT
WRITE(12,*) 'NUMERO DE ITERACION INICIAL:'
WRITE(12,5027) INI
WRITE(12,*) ' '
```

```
NODOMMAX=757 !NODO CORRESPONDIENTE AL PUNTO DE ESTUDIO
DO 999 J=0,IT !INICIA CICLO PARA HACER LAS CORRIDAS
```

```
C=====
C GENERACIÓN DE NUMEROS ALEATORIOS PARA SELECCIONAR NUMERO DE VEHICULOS
C=====
```

```
U=ran(T)

IF((U.LT.PROB1V).AND.(U.GE.0)) THEN
  NVEH=1
ELSE
  IF((U.LT.1).AND.(U.GE.PROB1V)) THEN
    NVEH=2
  END IF
END IF
```

```
C=====
C INICIAN LAS INSTRUCCIONES PARA EL CASO EN HAYA SOLO UN VEHÍCULO SOBRE EL PUENTE
C=====
```

```
IF(NVEH.EQ.1) THEN
```

```
C=====
C GENERACION DE NUMEROS ALEATORIOS PARA SELECCIONAR EL TIPO DE VEHICULO Y
C PESOS BRUTOS VEHICULARES, DE ACUERDO A LAS DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS
C DEL AFORO VEHICULAR ANALIZADO
C=====
```

```
S=RAN(R)
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
IF ((S.LT.0.0637) .AND. (S.GE.0)) THEN                                !RANGO DE PROBABILIDAD DE
V='C2'                                                                !APARICIÓN DE VEHÍCULOS C2
IF (J.GE.INI) THEN
  COC2=COC2+1                                                         !CONTADOR DEL TOTAL DE ESTOS VEHÍCULOS
  CO1VC2=CO1VC2+1                                                    !SE CUENTA CUANDO SOLO PASA 1 VEHICULO
END IF
NR=6
CICLOS=1
RCC12=RAN(RCC1)                                                       !NÚMERO ALEATORIO PARA CONDICIÓN DE CARGA
IF ((RCC12.LT.0.345) .AND. (RCC12.GE.0)) THEN
  CC='VACIO'
  PBV=4200
ELSE IF ((RCC12.LT.0.3487) .AND. (RCC12.GE.0.345)) THEN
  CC='EXCEDIDO'
  PBV=20800
ELSE
  CC='NO EXCEDIDO'
  RPB12=ran(RPB1)
  PBV=(7377.4*(-LOG(1-RPB12))**(1/2.0866))+2248.5                    !FUNCIÓN INVERSA CORRESPONDIENTE
END IF

ELSE IF ((S.LT.0.119) .AND. (S.GE.0.0637)) THEN                      !RANGO DE PROBABILIDAD DE
V='C3'                                                                !APARICIÓN DE VEHÍCULOS C3
IF (J.GE.INI) THEN
  COC3=COC3+1
  CO1VC3=CO1VC3+1
END IF
NR=1
CICLOS=1
RCC22=RAN(RCC2)
IF ((RCC22.LT.0.1965) .AND. (RCC22.GE.0)) THEN
  CC='VACIO'
  PBV=8000
ELSE IF ((RCC22.LT.0.2445) .AND. (RCC22.GE.0.1965)) THEN
  CC='EXCEDIDO'
  PBV=28000
ELSE
  CC='NO EXCEDIDO'
  RPB22=RAN(RPB2)
  PBV=(38647*(-LOG(1-RPB22))**(1/9.6876))-18409
END IF

ELSE IF ((S.LT.0.2622) .AND. (S.GE.0.119)) THEN                      !RANGO DE PROBABILIDAD DE
V='T3S2'                                                            !APARICIÓN DE VEHÍCULOS T3S2
IF (J.GE.INI) THEN
  COT3S2=COT3S2+1
  CO1VT3S2=CO1VT3S2+1
END IF
NR=2
CICLOS=2
RCC32=RAN(RCC3)
IF ((RCC32.LT.0.2286) .AND. (RCC32.GE.0)) THEN
  CC='VACIO'
  PBV=19880
ELSE IF ((RCC32.LT.0.4904) .AND. (RCC32.GE.0.2286)) THEN
  CC='EXCEDIDO'
  RPB32=ran(RPB3)
  PBV=-3017.3*LOG(LOG(1/RPB32))+47424.2
ELSE
  CC='NO EXCEDIDO'
  RPB42=ran(RPB4)
  PBV=(41796*(-LOG(1-RPB42))**(1/8.7745))-3908.8
END IF

ELSE IF ((S.LT.0.3067) .AND. (S.GE.0.2622)) THEN                    !RANGO DE PROBABILIDAD DE
V='T3S3'                                                            !APARICIÓN DE VEHÍCULOS T3S3
IF (J.GE.INI) THEN
  COT3S3=COT3S3+1
  CO1VT3S3=CO1VT3S3+1
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
END IF
NR=6
CICLOS=2
RCC42=RAN(RCC4)
IF ( (RCC42.LT.0.3503) .AND. (RCC42.GE.0) ) THEN
  CC='VACIO'
  PBV=25700
ELSE IF ( (RCC42.LT.0.7484) .AND. (RCC42.GE.0.3503) ) THEN
  CC='EXCEDIDO'
  RPB52=ran(RPB5)
  PBV=(9001.8*(-LOG(1-RPB52))**(1/1.2731))+48220.1
ELSE
  CC='NO EXCEDIDO'
  RPB62=ran(RPB6)
  PBV=(108575*(-LOG(1-RPB62))**(1/22.219))-66506
END IF

ELSE IF ( (S.LT.0.4523) .AND. (S.GE.0.3067) ) THEN
  V='T3S2R4'
  IF (J.GE.INI) THEN
    COT3S2R4=COT3S2R4+1
    CO1VT3S2R4=CO1VT3S2R4+1
  END IF
  NR=51
  CICLOS=1
  RCC52=RAN(RCC5)
  IF ( (RCC52.LT.0.3051) .AND. (RCC52.GE.0) ) THEN
    CC='VACIO'
    PBV=40000
  ELSE IF ( (RCC52.LT.0.6495) .AND. (RCC52.GE.0.3051) ) THEN
    CC='EXCEDIDO'
    RPB72=ran(RPB7)
    PBV=RPB72*(99627-66532)+66532
  ELSE
    CC='NO EXCEDIDO'
    RPB82=ran(RPB8)
    PBV=(13827*(-LOG(1-RPB82))**(1/1.5072))+37562
  END IF
  !RANGO DE PROBABILIDAD DE
  !APARICIÓN DE VEHÍCULOS T3S2R4

ELSE IF ( (S.LT.0.4763) .AND. (S.GE.0.4523) ) THEN
  V='B2'
  CC='ESTANDAR'
  IF (J.GE.INI) THEN
    COB2=COB2+1
    CO1VB2=CO1VB2+1
  END IF
  NR=6
  CICLOS=1
  PBV=17500
  !RANGO DE PROBABILIDAD DE
  !APARICIÓN DE VEHÍCULOS B2

ELSE IF ( (S.LT.0.4823) .AND. (S.GE.0.4763) ) THEN
  V='B3'
  CC='ESTANDAR'
  IF (J.GE.INI) THEN
    COB3=COB3+1
    CO1VB3=CO1VB3+1
  END IF
  NR=1
  CICLOS=1
  PBV=21500
  !RANGO DE PROBABILIDAD DE
  !APARICIÓN DE VEHÍCULOS B3

ELSE IF ( (S.LT.1) .AND. (S.GE.0.4823) ) THEN
  V='VL'
  IF (J.GE.INI) THEN
    COVL=COVL+1
  END IF
  !RANGO DE PROBABILIDAD DE
  !APARICIÓN DE VEHÍCULOS LIGEROS
END IF
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
C=====
C  EMPIEZA CONDICIONAL PARA QUE SE INICIEN LOS CILOS DE ANÁLISIS HASTA LA ITERACIÓN
C  DESEADA, PARA QUE SE EMPIECE A ANALIZAR A UN CIERTO CICLO
C=====

      IF (J.LT.INI) THEN
      GOTO 999
      ELSE

C=====
C  APERTURA DE ARCHIVOS DONDE SE CONCENTRAN LOS DATOS DE CADA TIPO DE VEHICULO
C  (NÚMERO DE EJES, DISTRIBUCIÓN DE CARGA, DISTANCIA ENTRE EJES)
C=====

      IF (V.EQ.'T3S2R4') THEN
      IF (CO1VT3S2R4.LE.1) THEN
      OPEN (2, FILE='T3S2R4', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
      ELSE
      GOTO 200
      END IF
      ELSE IF (V.EQ.'T3S3') THEN
      IF (CO1VT3S3.LE.1) THEN
      OPEN (2, FILE='T3S3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
      ELSE
      GOTO 200
      END IF
      ELSE IF (V.EQ.'T3S2') THEN
      IF (CO1VT3S2.LE.1) THEN
      OPEN (2, FILE='T3S2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
      ELSE
      GOTO 200
      END IF
      ELSE IF (V.EQ.'C3') THEN
      IF (CO1VC3.LE.1) THEN
      OPEN (2, FILE='C3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
      ELSE
      GOTO 200
      END IF
      ELSE IF (V.EQ.'C2') THEN
      IF (CO1VC2.LE.1) THEN
      OPEN (2, FILE='C2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
      ELSE
      GOTO 200
      END IF
      ELSE IF (V.EQ.'B3') THEN
      IF (CO1VB3.LE.1) THEN
      OPEN (2, FILE='B3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
      ELSE
      GOTO 200
      END IF
      ELSE IF (V.EQ.'B2') THEN
      IF (CO1VB2.LE.1) THEN
      OPEN (2, FILE='B2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
      ELSE
      GOTO 200
      END IF
      ELSE
      GOTO 999      !SI PASA UN VEHÍCULO LIGERO NO SE HACE ANÁLISIS
      END IF

C=====
C  LECTURA DEL ARCHIVO QUE DICTA LOS DATOS SEGÚN EL VEHÍCULO SELECCIONADO
C=====

      READ (2, 5000) RUTA, DATOS, FXFY, MXYZ
      READ (2, *) C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9
      READ (2, *) NE1, NE2, NE3, NE4, NE5, NE6, NE7, NE8, NE9
      CLOSE (2)
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
=====
C   INICIAN CICLOS PARA MOVER LOS CAMIONES T3S3 Y T3S2 A SUS DOS PUNTOS CRÍTICOS
C   =====

DO 300 K=1,CICLOS

IF (V.EQ.'T3S3') THEN
  NR=NR+55          !EL NODO DE REFERENCIA SE UTILIZA PARA UBICAR, EN ESTE
ELSE              !CASO EL VEHÍCULO EN SU POSICIÓN(ES) CRÍTICA(S)
  NR=NR+59
END IF

N1=624+NR-NE1     !SE UBICA CADA EJE EN SU POSICIÓN CORRESPONDIENTE
N12=1336+NR-NE1
N2=624+NR-NE2
N22=1336+NR-NE2
N3=624+NR-NE3
N32=1336+NR-NE3
N4=624+NR-NE4
N42=1336+NR-NE4
N5=624+NR-NE5
N52=1336+NR-NE5
N6=624+NR-NE6
N62=1336+NR-NE6
N7=624+NR-NE7
N72=1336+NR-NE7
N8=624+NR-NE8
N82=1336+NR-NE8
N9=624+NR-NE9
N92=1336+NR-NE9

=====
C   LECTURA DEL ARCHIVO PUENTE, QUE CONTIENE TODOS LOS DATOS DEL PUENTE DE
C   ACUERDO AL FORMATO PARA SER LEÍDO POR EL PROGRAMA DE ANÁLISIS StaDyn. NO TRAE
C   LA ASIGNACIÓN DE CARGAS EXTERNAS
C   =====

OPEN(3,FILE='PUENTE',STATUS='unknown')    !SE ABRE EL ARCHIVO DE DATOS
I=1
3  READ(3,5000,end=5)L(I)                   !MATRIZ DONDE SE ALMACENAN LOS DATOS
   I=I+1
   GOTO 3
5  CONTINUE
   CLOSE(3)

=====
C   OBTENCION DEL VALOR DEL PESO PROPIO EN LOS NODOS DONDE SE APLICARÁN
C   CARGAS EXTERNAS (PARA NO BORRARLOS CUANDO SE APLIQUE LA CARGA EXTERNA)
C   =====

OPEN(4,FILE='AUXPP',STATUS='unknown')     !SE CREA UN ARCHIVO AUXILIAR PARA
WRITE(4,5000)L(11480+N1)                   !GUARDAR LOS RENGLONES CON SUS
WRITE(4,5000)L(11480+N12)                  !CARGAS ORIGINALES
WRITE(4,5000)L(11480+N2)
WRITE(4,5000)L(11480+N22)
WRITE(4,5000)L(11480+N3)
WRITE(4,5000)L(11480+N32)
WRITE(4,5000)L(11480+N4)
WRITE(4,5000)L(11480+N42)
WRITE(4,5000)L(11480+N5)
WRITE(4,5000)L(11480+N52)
WRITE(4,5000)L(11480+N6)
WRITE(4,5000)L(11480+N62)
WRITE(4,5000)L(11480+N7)
WRITE(4,5000)L(11480+N72)
WRITE(4,5000)L(11480+N8)
WRITE(4,5000)L(11480+N82)
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE(4,5000)L(11480+N9)
WRITE(4,5000)L(11480+N92)
CLOSE(4)

OPEN(4,FILE='AUXPP',ACCESS='SEQUENTIAL',STATUS='OLD')
READ(4,5021)CPP1           !SE LEEN LAS CARGAS POR PESO PROPIO EN LOS
READ(4,5021)CPP12        !PUNTOS DE APLICACIÓN DE CARGA EXTERNA
READ(4,5021)CPP2
READ(4,5021)CPP22
READ(4,5021)CPP3
READ(4,5021)CPP32
READ(4,5021)CPP4
READ(4,5021)CPP42
READ(4,5021)CPP5
READ(4,5021)CPP52
READ(4,5021)CPP6
READ(4,5021)CPP62
READ(4,5021)CPP7
READ(4,5021)CPP72
READ(4,5021)CPP8
READ(4,5021)CPP82
READ(4,5021)CPP9
READ(4,5021)CPP92
CLOSE(4)

C=====
C  ESCRITURA DE ARCHIVO PARA CORRER EL PROGRAMA DE ANÁLISIS StaDyn, INCLUYENDO
C  LAS CARGAS EXTERNAS POR CARGAS VEHICULARES
C=====

OPEN(5,FILE='prueba2corr',STATUS='UNKNOWN')

C=====
C  SE LLAMA A UNA SUBROUTINA PARA HACER LA TAREA DE ESCRIBIR LAS CARGAS EXTERNAS
C  SUS VARIABLES DE ENTRADA SON LAS UBICACIONES Y PESOS DE LOS EJES Y CARGAS
C  POR PESO PROPIO EN LOS PUNTOS DE APLICACIÓN DE CARGA EXTERNA
C=====

CALL ESCRITCARGA (V, NR, N1, N12, N2, N22, N3, N32, N4, N42, N5, N52, N6, N62,
$N7, N72, N8, N82, N9, N92, FXY, MXYZ, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9,
$CPP1, CPP12, CPP2, CPP22, CPP3, CPP32, CPP4, CPP42, CPP5, CPP52, CPP6, CPP62,
$CPP7, CPP72, CPP8, CPP82, CPP9, CPP92, PBV, L)

CLOSE(5)

C=====
C  LECTURA Y EJECUCIÓN DEL ARCHIVO PARA CORRER EL StaDyn, ESTE ARCHIVO CONTIENE
C  LOS COMANDOS CORRESPONDIENTES PARA QUE REALICE EL ANÁLISIS AUTOMÁTICAMENTE
C=====

result = systemQQ('C:\bin\stadyn<correstadyn')

C=====
C  LECTURA DEL ARCHIVO DE DATOS DE SALIDA O RESULTADOS GENERADOS EN EL StaDyn
C=====

OPEN(6,FILE='stadyn.out',STATUS='OLD')

I=1
6  READ(6,5000,end=7)L(I)           !MATRIZ PARA ALMACENAR DATOS DE SALIDA DEL StaDyn
   I=I+1
   GOTO 6
7  CONTINUE

CLOSE(6)
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
C=====
C  OBTENCION DEL MOMENTO FLEXIONANTE GENERADO POR LAS CARGAS EXTERNAS EN UN
C  PUNTO DE INTERÉS (NODOMMAX) DE CUALQUIER VIGA. CONTENIDO EN DATOS DE SALIDA
C  DEL StaDyn
C=====

OPEN(7,FILE='AUXRESULTINM',STATUS='UNKNOWN')          !CREACIÓN DE ARCHIVO PARA
WRITE(7,5024)                                           !GUARDAR DATOS DEL ANÁLISIS DEL NODO DE INTERÉS

IF((NODOMMAX.LT.267).AND.(NODOMMAX.GE.179))THEN
  WRITE(7,5000)L(24776+1+2*(NODOMMAX-179))             !LA CONSTANTE 24776 ES EL RENGLÓN
ELSE IF((NODOMMAX.LT.801).AND.(NODOMMAX.GE.713))THEN !INMEDIATO ANTERIOR A LOS
  WRITE(7,5000)L(24776+177+2*(NODOMMAX-713))          !RESULTADOS DE LOS NODOS DE LAS VIGAS
ELSE IF((NODOMMAX.LT.1335).AND.(NODOMMAX.GE.1247))THEN
  WRITE(7,5000)L(24776+353+2*(NODOMMAX-1247))
ELSE IF((NODOMMAX.LT.1869).AND.(NODOMMAX.GE.1781))THEN
  WRITE(7,5000)L(24776+529+2*(NODOMMAX-1781))
  WRITE(*,*)L(24776+529+2*(NODOMMAX-1781))
ELSE IF((NODOMMAX.LT.2403).AND.(NODOMMAX.GE.2315))THEN
  WRITE(7,5000)L(24776+705+2*(NODOMMAX-2315))
ELSE IF((NODOMMAX.LT.2937).AND.(NODOMMAX.GE.2849))THEN
  WRITE(7,5000)L(24776+881+2*(NODOMMAX-2849))
ELSE IF((NODOMMAX.LT.3471).AND.(NODOMMAX.GE.3383))THEN
  WRITE(7,5000)L(24776+1057+2*(NODOMMAX-3383))
ELSE
  WRITE(7,*) 'SE SELECCIONÓ UN NODO QUE NO PERTENECE A NINGUNA VIGA'
END IF

CLOSE(7)

C=====
C  LECTURA Y REGISTRO DE LOS RESULTADOS GENERADOS POR CADA TIPO DE VEHÍCULO
C  INCLUYE SU PESO Y MOMENTO FLEXIONANTE OCASIONADO, DE MODO QUE SIRVA DE
C  REFERENCIA PARA OBTENER REACCIONES CUANDO PASE NUEVAMENTE CON OTRO PESO
C  SIN LA NECESIDAD DE VOLVER A CORRER EL StaDyn, AHORRANDO RECURSOS.
C=====

OPEN(7,FILE='AUXRESULTINM',STATUS='OLD')
READ(7,5022)MY
CLOSE(7)

IF(V.EQ.'T3S2R4')THEN
  PBVREFT3S2R4=PBV
  MOMREFT3S2R4=MY-13277400
ELSE IF(V.EQ.'T3S3')THEN
  IF(K.EQ.1)THEN
    PBVREFT3S31=PBV
    MOMREFT3S31=MY-13277400
  ELSE
    PBVREFT3S32=PBV
    MOMREFT3S32=MY-13277400
  END IF
ELSE IF(V.EQ.'T3S2')THEN
  IF(K.EQ.1)THEN
    PBVREFT3S21=PBV
    MOMREFT3S21=MY-13277400
  ELSE
    PBVREFT3S22=PBV
    MOMREFT3S22=MY-13277400
  END IF
ELSE IF(V.EQ.'C3')THEN
  PBVREFC3=PBV
  MOMREFC3=MY-13277400
ELSE IF(V.EQ.'C2')THEN
  PBVREFC2=PBV
  MOMREFC2=MY-13277400
ELSE IF(V.EQ.'B3')THEN
  PBVREFB3=PBV
  MOMREFB3=MY-13277400
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE IF (V.EQ. 'B2') THEN
  PBVREFB2=PBV
  MOMREFB2=MY-13277400
END IF
```

```
WRITE (12, 5026) MY
```

```
300 CONTINUE
```

```
=====
C   OBTENCIÓN DE MOMENTOS PARA CUANDO HA PASADO MÁS DE UNA VEZ UN MISMO TIPO DE
C   VEHÍCULO. DE ACUERDO A SU PESO Y MOMENTO DE REFERENCIA DE CADA TIPO DE
C   VEHÍCULO SE CALCULA EL MOMENTO QUE OCASIONA UN VEHÍCULO DE ESE TIPO, PERO
C   CON UN PESO DIFERENTE, YA QUE SU RELACIÓN ES LINEAL
=====
```

```
200 DO 400 K=1, CICLOS
```

```
IF (V.EQ. 'T3S2R4') THEN
  IF (CO1VT3S2R4.GT.1) THEN
    MY=13277400+(PBV/PBVREFT3S2R4)*MOMREFT3S2R4
  ELSE
    GOTO 400
  END IF
ELSE IF (V.EQ. 'T3S3') THEN
  IF (CO1VT3S3.GT.1) THEN
    IF (K.EQ.1) THEN
      MY=13277400+(PBV/PBVREFT3S31)*MOMREFT3S31
    ELSE
      MY=13277400+(PBV/PBVREFT3S32)*MOMREFT3S32
    END IF
  ELSE
    GOTO 400
  END IF
ELSE IF (V.EQ. 'T3S2') THEN
  IF (CO1VT3S2.GT.1) THEN
    IF (K.EQ.1) THEN
      MY=13277400+(PBV/PBVREFT3S21)*MOMREFT3S21
    ELSE
      MY=13277400+(PBV/PBVREFT3S22)*MOMREFT3S22
    END IF
  ELSE
    GOTO 400
  END IF
ELSE IF (V.EQ. 'C3') THEN
  IF (CO1VC3.GT.1) THEN
    MY=13277400+(PBV/PBVREFC3)*MOMREFC3
  ELSE
    GOTO 400
  END IF
ELSE IF (V.EQ. 'C2') THEN
  IF (CO1VC2.GT.1) THEN
    MY=13277400+(PBV/PBVREFC2)*MOMREFC2
  ELSE
    GOTO 400
  END IF
ELSE IF (V.EQ. 'B3') THEN
  IF (CO1VB3.GT.1) THEN
    MY=13277400+(PBV/PBVREFB3)*MOMREFB3
  ELSE
    GOTO 400
  END IF
ELSE IF (V.EQ. 'B2') THEN
  IF (CO1VB2.GT.1) THEN
    MY=13277400+(PBV/PBVREFB2)*MOMREFB2
  ELSE
    GOTO 400
  END IF
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



END IF

WRITE(12,5026) MY

400 CONTINUE

```
C=====
C  COMIENZA EL PROCESO PARA EL PASO DE DOS VEHÍCULOS
C=====
```

ELSE

```
DO 500 K=1,NVEH                                !CICLO PARA IDENTIFICACIÓN DE VEHICULOS 1 Y 2
                                                !Y SU CONDICIÓN DE CARGA Y PESO BRUTO
```

S=RAN(R)

```
IF((S.LT.0.0637).AND.(S.GE.0)) THEN            !RANGO DE VEHÍCULOS C2
```

```
IF(J.GE.INI) THEN
```

```
  COC2=COC2+1
```

```
END IF
```

```
RCC12=RAN(RCC1)
```

```
IF((RCC12.LT.0.345).AND.(RCC12.GE.0)) THEN
```

```
  CC='VACIO'
```

```
  PBV=4200
```

```
ELSE IF((RCC12.LT.0.3487).AND.(RCC12.GE.0.345)) THEN
```

```
  CC='EXCEDIDO'
```

```
  PBV=20800
```

```
ELSE
```

```
  CC='NO EXCEDIDO'
```

```
  RPB12=ran(RPB1)
```

```
  PBV=(7377.4*(-LOG(1-RPB12))**(1/2.0866))+2248.5
```

```
END IF
```

```
IF(K.EQ.1) THEN
```

```
  V1='C2'
```

```
                                !ASIGNACIÓN DE CARACTERÍSTICAS A VEHÍCULO 1
```

```
  CC1=CC
```

```
  PBV1=PBV
```

```
ELSE
```

```
  V2='C2'
```

```
                                !ASIGNACIÓN DE CARACTERÍSTICAS A VEHÍCULO 2
```

```
  PBV2=PBV
```

```
  CC2=CC
```

```
END IF
```

```
ELSE IF((S.LT.0.119).AND.(S.GE.0.0637)) THEN  !RANGO DE VEHÍCULOS C3
```

```
IF(J.GE.INI) THEN
```

```
  COC3=COC3+1
```

```
END IF
```

```
RCC22=RAN(RCC2)
```

```
IF((RCC22.LT.0.1965).AND.(RCC22.GE.0)) THEN
```

```
  CC='VACIO'
```

```
  PBV=8000
```

```
ELSE IF((RCC22.LT.0.2445).AND.(RCC22.GE.0.1965)) THEN
```

```
  CC='EXCEDIDO'
```

```
  PBV=28000
```

```
ELSE
```

```
  CC='NO EXCEDIDO'
```

```
  RPB22=ran(RPB2)
```

```
  PBV=(38647*(-LOG(1-RPB22))**(1/9.6876))-18409
```

```
END IF
```

```
IF(K.EQ.1) THEN
```

```
  V1='C3'
```

```
  PBV1=PBV
```

```
  CC1=CC
```

```
ELSE
```

```
  V2='C3'
```

```
  PBV2=PBV
```

```
  CC2=CC
```

```
END IF
```

```
ELSE IF((S.LT.0.2622).AND.(S.GE.0.119)) THEN  !RANGO DE VEHÍCULOS T3S2
```

```
IF(J.GE.INI) THEN
```

```
  COT3S2=COT3S2+1
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
END IF
RCC32=RAN(RCC3)
IF((RCC32.LT.0.2286).AND.(RCC32.GE.0)) THEN
  CC='VACIO'
  PBV=19880
ELSE IF((RCC32.LT.0.4904).AND.(RCC32.GE.0.2286)) THEN
  CC='EXCEDIDO'
  RPB32=ran(RPB3)
  PBV=-3017.3*LOG(LOG(1/RPB32))+47424.2
ELSE
  CC='NO EXCEDIDO'
  RPB42=ran(RPB4)
  PBV=(41796*(-LOG(1-RPB42))**(1/8.7745))-3908.8
END IF
IF(K.EQ.1) THEN
  V1='T3S2'
  PBV1=PBV
  CC1=CC
ELSE
  V2='T3S2'
  PBV2=PBV
  CC2=CC
END IF
ELSE IF((S.LT.0.3067).AND.(S.GE.0.2622)) THEN           !RANGO DE VEHÍCULOS T3S3
  IF(J.GE.INI) THEN
    COT3S3=COT3S3+1
  END IF
  RCC42=RAN(RCC4)
  IF((RCC42.LT.0.3503).AND.(RCC42.GE.0)) THEN
    CC='VACIO'
    PBV=25700
  ELSE IF((RCC42.LT.0.7484).AND.(RCC42.GE.0.3503)) THEN
    CC='EXCEDIDO'
    RPB52=ran(RPB5)
    PBV=(9001.8*(-LOG(1-RPB52))**(1/1.2731))+48220.1
  ELSE
    CC='NO EXCEDIDO'
    RPB62=ran(RPB6)
    PBV=(108575*(-LOG(1-RPB62))**(1/22.219))-66506
  END IF
  IF(K.EQ.1) THEN
    V1='T3S3'
    PBV1=PBV
    CC1=CC
  ELSE
    V2='T3S3'
    PBV2=PBV
    CC2=CC
  END IF
ELSE IF((S.LT.0.4523).AND.(S.GE.0.3067)) THEN           !RANGO DE VEHÍCULOS T3S2R4
  IF(J.GE.INI) THEN
    COT3S2R4=COT3S2R4+1
  END IF
  RCC52=RAN(RCC5)
  IF((RCC52.LT.0.3051).AND.(RCC52.GE.0)) THEN
    CC='VACIO'
    PBV=40000
  ELSE IF((RCC52.LT.0.6495).AND.(RCC52.GE.0.3051)) THEN
    CC='EXCEDIDO'
    RPB72=ran(RPB7)
    PBV=RPB72*(99627-66532)+66532
  ELSE
    CC='NO EXCEDIDO'
    RPB82=ran(RPB8)
    PBV=(13827*(-LOG(1-RPB82))**(1/1.5072))+37562
  END IF
  IF(K.EQ.1) THEN
    V1='T3S2R4'
    PBV1=PBV
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```

CC1=CC
ELSE
V2='T3S2R4'
PBV2=PBV
CC2=CC
END IF
ELSE IF ((S.LT.0.4763).AND.(S.GE.0.4523)) THEN           !RANGO DE VEHÍCULOS B2
IF (J.GE.INI) THEN
COB2=COB2+1
END IF
PBV=17500
CC='ESTANDAR'
IF (K.EQ.1) THEN
V1='B2'
PBV1=PBV
CC1=CC
ELSE
V2='B2'
PBV2=PBV
CC2=CC
END IF
ELSE IF ((S.LT.0.4823).AND.(S.GE.0.4763)) THEN           !RANGO DE VEHÍCULOS B3
IF (J.GE.INI) THEN
COB3=COB3+1
END IF
PBV=21500
CC='ESTANDAR'
IF (K.EQ.1) THEN
V1='B3'
PBV1=PBV
CC1=CC
ELSE
V2='B3'
PBV2=PBV
CC2=CC
END IF
ELSE IF ((S.LT.1).AND.(S.GE.0.4823)) THEN                 !RANGO DE VEHÍCULOS LIGEROS
IF (J.GE.INI) THEN
COVL=COVL+1
END IF
PBV=3000
CC='ESTANDAR'
IF (K.EQ.1) THEN
V1='VL'
PBV1=PBV
CC1=CC
ELSE
V2='VL'
PBV2=PBV
CC2=CC
END IF
END IF

```

500 CONTINUE

```

IF ((V1.EQ.'VL').AND.(V2.EQ.'VL')) THEN                 !CUANDO PASAN DOS VEHÍCULOS
GOTO 999                                               !LIGEROS NO SE HACE ANÁLISIS, YA QUE NO
END IF                                               !GENERAN UN CICLO DE CARGA SIGNIFICATIVO
IF (PBV1.GE.PBV2) THEN                               !SE SUPONE QUE EL VEHÍCULO MÁS PESADO
V=V1                                               !CIRCULA POR EL CARRIL DE BAJA VELOCIDAD
ELSE
V=V2
END IF

```

```

C=====
C  CONDICIONALES PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE CICLOS QUE OCASIONA EL VEHÍCULO
C  MÁS PESADO Y EL NODO DE REFERENCIA, NR, INICIAL (CRÍTICO PARA EL VEHÍCULO EN
C  CARRIL DE BAJA Y ALEATORIO PARA EL SEGUNDO VEHÍCULO).
C=====

```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
IF (V.EQ. 'T3S2R4') THEN
  NR1=51
  CICLOS=1
ELSE IF (V.EQ. 'T3S3') THEN
  NR1=6
  CICLOS=2
ELSE IF (V.EQ. 'T3S2') THEN
  NR1=2
  CICLOS=2
ELSE IF (V.EQ. 'C3') THEN
  NR1=1
  CICLOS=1
ELSE IF (V.EQ. 'C2') THEN
  NR1=6
  CICLOS=1
ELSE IF (V.EQ. 'B3') THEN
  NR1=1
  CICLOS=1
ELSE IF (V.EQ. 'B2') THEN
  NR1=6
  CICLOS=1
ELSE IF (V.EQ. 'VL') THEN
  NR1=2
  CICLOS=1
END IF
```

```
C=====
C  CONDICIONALES PARA DETERMINAR EL NR (ALEATORIO) PARA EL VEHÍCULO MÁS LIGERO
C=====
```

```
IF (PBV1.LT.PBV2) THEN                                !EL VEHÍCULO MÁS LIGERO CIRCULA
  V=V1                                                  !POR EL CARRIL DE ALTA VELOCIDAD
ELSE
  V=V2
END IF
```

```
W=RAN(X)                                               !LA POSICIÓN DEL SEGUNDO VEHÍCULO ES ALEATORIA
NR2=W*88                                               !88 ES EL NÚMERO DE NODOS ENTRE CADA VIGA
```

```
C=====
C  EMPIEZA CONDICIONAL PARA QUE SE INICIEN LOS CILOS DE ANÁLISIS HASTA LA ITERACIÓN
C  DESEADA
C=====
```

```
IF (J.LT.INI) THEN
  GOTO 999
ELSE
```

```
C=====
C  INICIAN CICLOS PARA MOVER LOS CAMIONES T3S3 Y T3S2 A SUS DOS PUNTOS CRÍTICOS
C=====
```

```
DO 600 K=1,CICLOS
```

```
IF (PBV1.GE.PBV2) THEN
  V=V1
ELSE
  V=V2
END IF
```

```
IF (V.EQ. 'T3S3') THEN
  IF (K.EQ.1) THEN                                     !SI ES EL PRIMER CICLO SE UBICA EN SU
  NR=NR1+55                                           !PRIMERA POSICIÓN CRÍTICA
  ELSE
  NR=NR1+110                                          !EN EL SEGUNDO CICLO SE UBICA EN SU
  END IF                                              !SEGUNDA POSICIÓN CRÍTICA
ELSE
  IF (K.EQ.1) THEN
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```

NR=NR1+59
ELSE
NR=NR1+118
END IF
END IF

IF (V.EQ.'T3S2R4') THEN
OPEN (2, FILE='T3S2R4', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
ELSE IF (V.EQ.'T3S3') THEN !DEPENDIENDO EL TIPO DE VEHÍCULO SE ABRE
OPEN (2, FILE='T3S3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD') !EL ARCHIVO CON SUS DATOS
ELSE IF (V.EQ.'T3S2') THEN !GENERALES
OPEN (2, FILE='T3S2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
ELSE IF (V.EQ.'C3') THEN
OPEN (2, FILE='C3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
ELSE IF (V.EQ.'C2') THEN
OPEN (2, FILE='C2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
ELSE IF (V.EQ.'B3') THEN
OPEN (2, FILE='B3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
ELSE IF (V.EQ.'B2') THEN
OPEN (2, FILE='B2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
ELSE IF (V.EQ.'VL') THEN
OPEN (2, FILE='VL', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
END IF

C=====
C LECTURA DEL ARCHIVO DE DATOS SEGÚN EL VEHÍCULO SELECCIONADO
C=====

READ (2, 5000) RUTA, DATOS, FXY, MXYZ
READ (2, *) C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9
READ (2, *) NE1, NE2, NE3, NE4, NE5, NE6, NE7, NE8, NE9
CLOSE (2)

C=====
C CÁLCULO DEL NÚMERO DE NODO DONDE SE APLICA CADA CARGA, DEPENDIENDO EL TIPO
C DE VEHÍCULO Y SU POSICIÓN CRÍTICA DETERMINADA PREVIAMENTE
C=====

N1=624+NR-NE1
N12=1336+NR-NE1
N2=624+NR-NE2
N22=1336+NR-NE2
N3=624+NR-NE3
N32=1336+NR-NE3
N4=624+NR-NE4
N42=1336+NR-NE4
N5=624+NR-NE5
N52=1336+NR-NE5
N6=624+NR-NE6
N62=1336+NR-NE6
N7=624+NR-NE7
N72=1336+NR-NE7
N8=624+NR-NE8
N82=1336+NR-NE8
N9=624+NR-NE9
N92=1336+NR-NE9

C=====
C LECTURA DEL ARCHIVO PUENTE, QUE CONTIENE TODOS LOS DATOS DEL PUENTE DE
C ACUERDO AL FORMATO PARA SER LEÍDO POR EL PROGRAMA DE ANÁLISIS StaDyn. NO TRAE
C LA ASIGNACIÓN DE CARGAS EXTERNAS
C=====

OPEN (3, FILE='PUENTE', STATUS='unknown')
I=1
11 READ (3, 5000, end=8) L(I) !MATRIZ DONDE ALMACENA TODOS LOS RENGLONES
I=I+1
GOTO 11

```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



8 CONTINUE  
CLOSE (3)

```
=====
C SE LEEN Y GUARDAN LOS PESOS PROPIOS EN LOS PUNTOS DE APLICACIÓN DE CARGA
C PARA QUE NO SEAN BORRADOS Y SE CONSIDEREN EN EL ANÁLISIS
=====
```

```
OPEN(4, FILE='AUXPP', STATUS='unknown')
WRITE(4, 5000) L(11480+N1)           !CREA UN NUEVO ARCHIVO, AUXILIAR QUE
WRITE(4, 5000) L(11480+N12)        !GUARDA LOS RENGLONES A MODIFICAR
WRITE(4, 5000) L(11480+N2)         !CON SUS CARGAS ORIGINALES
WRITE(4, 5000) L(11480+N22)
WRITE(4, 5000) L(11480+N3)
WRITE(4, 5000) L(11480+N32)
WRITE(4, 5000) L(11480+N4)
WRITE(4, 5000) L(11480+N42)
WRITE(4, 5000) L(11480+N5)
WRITE(4, 5000) L(11480+N52)
WRITE(4, 5000) L(11480+N6)
WRITE(4, 5000) L(11480+N62)
WRITE(4, 5000) L(11480+N7)
WRITE(4, 5000) L(11480+N72)
WRITE(4, 5000) L(11480+N8)
WRITE(4, 5000) L(11480+N82)
WRITE(4, 5000) L(11480+N9)
WRITE(4, 5000) L(11480+N92)
CLOSE(4)
```

```
OPEN(4, FILE='AUXPP', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
READ(4, 5021) CPP1                 !SE ABRE EL ARCHIVO AUXILIAR Y SE EXTRAE DE
READ(4, 5021) CPP12                !CADA RENGLÓN LA CARGA POR PESO PROPIO
READ(4, 5021) CPP2
READ(4, 5021) CPP22
READ(4, 5021) CPP3
READ(4, 5021) CPP32
READ(4, 5021) CPP4
READ(4, 5021) CPP42
READ(4, 5021) CPP5
READ(4, 5021) CPP52
READ(4, 5021) CPP6
READ(4, 5021) CPP62
READ(4, 5021) CPP7
READ(4, 5021) CPP72
READ(4, 5021) CPP8
READ(4, 5021) CPP82
READ(4, 5021) CPP9
READ(4, 5021) CPP92
CLOSE(4)
```

```
=====
C ESCRITURA DE ARCHIVO PARA CORRER EL PROGRAMA DE ANÁLISIS StaDyn, INCLUYENDO
C LAS CARGAS EXTERNAS GENERADAS ÚNICAMENTE POR EL VEHÍCULO MÁS PESADO
=====
```

```
OPEN(5, FILE='prueba2corr', STATUS='UNKNOWN')
IF (PBV1.GE.PBV2) THEN             !SE IDENTIFICA EL VALOR MÁS ALTO DE PESO
  PBV=PBV1                          !BRUTO VEHICULAR SELECCIONADO PREVIAMENTE
ELSE                                  !Y SE ASIGNA A ESTE VEHÍCULO (EL MÁS PESADO)
  PBV=PBV2
END IF
```

```
=====
C SE LLAMA A LA SUBROUTINA QUE HACE LA TAREA DE ESCRIBIR LAS CARGAS EXTERNAS
=====
```

```
CALL ESCRITCARGA (V, NR, N1, N12, N2, N22, N3, N32, N4, N42, N5, N52, N6, N62,
$N7, N72, N8, N82, N9, N92, FXFY, MXYZ, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9,
$CPP1, CPP12, CPP2, CPP22, CPP3, CPP32, CPP4, CPP42, CPP5, CPP52, CPP6, CPP62,
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



\$CPP7, CPP72, CPP8, CPP82, CPP9, CPP92, PBV, L)  
CLOSE (5)

!SE TERMINAN DE ESCRIBIR LAS CARGAS DEL  
!PRIMER VEHÍCULO

C=====

C COMIENZA LA ESCRITURA DE LAS CARGAS DEL SEGUNDO VEHÍCULO (CARRIL DE ALTA)

C=====

```
IF (V.EQ.'T3S3') THEN                !CUANDO HAY DOS CICLOS Y DOS VEHÍCULOS, SU
  IF (K.EQ.1) THEN                    !AVANCE SIMULTÁNEO DEPENDE DE LAS POSICIONES
    NR=NR2                             !CRÍTICAS DEL VEHÍCULO MÁS PESADO
  ELSE
    NR=NR2+55
  END IF
ELSE
  IF (K.EQ.1) THEN
    NR=NR2
  ELSE
    NR=NR2+59
  END IF
END IF

IF (PBV1.LT.PBV2) THEN                !SE IDENTIFICA EL VEHÍCULO MÁS LIGERO, QUE
  V=V1                                 !CIRCULA POR EL CARRIL DE ALTA VELOCIDAD
ELSE
  V=V2
END IF

IF (V.EQ.'T3S2R4') THEN                !DEPENDIENDO EL TIPO DE VEHÍCULO SE ABRE
  IF (NR.GT.207) THEN                 !EL ARCHIVO CON SUS CARACTERÍSTICAS
    GOTO 700
  ELSE
    OPEN (2, FILE='T3S2R4', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
  END IF
ELSE IF (V.EQ.'T3S3') THEN
  IF (NR.GT.164) THEN
    GOTO 700
  ELSE
    OPEN (2, FILE='T3S3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
  END IF
ELSE IF (V.EQ.'T3S2') THEN
  IF (NR.GT.164) THEN
    GOTO 700
  ELSE
    OPEN (2, FILE='T3S2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
  END IF
ELSE IF (V.EQ.'C3') THEN
  IF (NR.GT.108) THEN                 !SI EL VEHÍCULO "AVANZA" DEMASIADO SALE DEL
    GOTO 700                          !PUENTE Y NO SE REGISTRAN SUS CARGAS
  ELSE
    OPEN (2, FILE='C3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
  END IF
ELSE IF (V.EQ.'C2') THEN
  IF (NR.GT.108) THEN
    GOTO 700
  ELSE
    OPEN (2, FILE='C2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
  END IF
ELSE IF (V.EQ.'B3') THEN
  IF (NR.GT.108) THEN
    GOTO 700
  ELSE
    OPEN (2, FILE='B3', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
  END IF
ELSE IF (V.EQ.'B2') THEN
  IF (NR.GT.108) THEN
    GOTO 700
  ELSE
    OPEN (2, FILE='B2', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
END IF
ELSE IF (V.EQ.'VL') THEN
  IF (NR.GT.100) THEN
    GOTO 700
  ELSE
    OPEN (2, FILE='VL', ACCESS='SEQUENTIAL', STATUS='OLD')
  END IF
END IF
END IF

C=====
C  LECTURA DEL ARCHIVO QUE CONTIENE LOS DATOS DEL VEHÍCULO SELECCIONADO
C=====

READ (2, 5000) RUTA, DATOS, FXFY, MXYZ
READ (2, *) C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9
READ (2, *) NE1, NE2, NE3, NE4, NE5, NE6, NE7, NE8, NE9
CLOSE (2)

C=====
C  CÁLCULO DEL NÚMERO DE NODO DONDE SE APLICA CADA CARGA
C=====

N1=2226+NR-NE1
N12=2938+NR-NE1
N2=2226+NR-NE2
N22=2938+NR-NE2
N3=2226+NR-NE3
N32=2938+NR-NE3
N4=2226+NR-NE4
N42=2938+NR-NE4
N5=2226+NR-NE5
N52=2938+NR-NE5
N6=2226+NR-NE6
N62=2938+NR-NE6
N7=2226+NR-NE7
N72=2938+NR-NE7
N8=2226+NR-NE8
N82=2938+NR-NE8
N9=2226+NR-NE9
N92=2938+NR-NE9

C=====
C  LECTURA DEL ARCHIVO prueba2corr, QUE CONTIENE TODOS LOS DATOS DEL PUENTE DE
C  ACUERDO AL FORMATO PARA SER LEÍDO POR EL PROGRAMA DE ANÁLISIS StaDyn. YA
C  INCLUYE LAS CARGAS EXTERNAS PROVOCADAS POR EL VEHÍCULO EN EL CARRIL DE BAJA
C=====

OPEN (5, FILE='prueba2corr', STATUS='unknown')
I=1
9 READ (5, 5000, end=10) L(I) !MATRIZ DONDE ALMACENA TODOS LOS RENGLONES
  I=I+1
  GOTO 9
10 CONTINUE
CLOSE (5)

C=====
C  SE LEEN Y GUARDAN LOS PESOS PROPIOS EN LOS PUNTOS DE APLICACIÓN DE CARGA
C  PARA NO SEAN BORRADOS Y SE CONSIDEREN EN EL ANÁLISIS
C=====

OPEN (4, FILE='AUXPP', STATUS='unknown')
WRITE (4, 5000) L (11480+N1)
WRITE (4, 5000) L (11480+N12)
WRITE (4, 5000) L (11480+N2)
WRITE (4, 5000) L (11480+N22)
WRITE (4, 5000) L (11480+N3)
WRITE (4, 5000) L (11480+N32)
WRITE (4, 5000) L (11480+N4)
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE(4,5000)L(11480+N42)
WRITE(4,5000)L(11480+N5)
WRITE(4,5000)L(11480+N52)
WRITE(4,5000)L(11480+N6)
WRITE(4,5000)L(11480+N62)
WRITE(4,5000)L(11480+N7)
WRITE(4,5000)L(11480+N72)
WRITE(4,5000)L(11480+N8)
WRITE(4,5000)L(11480+N82)
WRITE(4,5000)L(11480+N9)
WRITE(4,5000)L(11480+N92)
CLOSE(4)
```

```
OPEN(4,FILE='AUXPP',ACCESS='SEQUENTIAL',STATUS='OLD')
READ(4,5021)CPP1
READ(4,5021)CPP12
READ(4,5021)CPP2
READ(4,5021)CPP22
READ(4,5021)CPP3
READ(4,5021)CPP32
READ(4,5021)CPP4
READ(4,5021)CPP42
READ(4,5021)CPP5
READ(4,5021)CPP52
READ(4,5021)CPP6
READ(4,5021)CPP62
READ(4,5021)CPP7
READ(4,5021)CPP72
READ(4,5021)CPP8
READ(4,5021)CPP82
READ(4,5021)CPP9
READ(4,5021)CPP92
CLOSE(4)
```

```
C=====
C   ESCRITURA DE ARCHIVO PARA CORRER EL PROGRAMA DE ANÁLISIS StaDyn, INCLUYENDO
C   LAS CARGAS EXTERNAS GENERADAS POR EL VEHÍCULO MÁS PESADO Y TAMBIÉN EL
C   MÁS LIGERO, INCLUIDO EN ESTE ÚLTIMO PASO
C=====
```

```
OPEN(5,FILE='prueba2corr',STATUS='UNKNOWN')
IF(PBV1.LT.PBV2)THEN           !SE IDENTIFICA EL VALOR MÁS BAJO DE PESO
PBV=PBV1                       !BRUTO VEHICULAR SELECCIONADO PREVIAMENTE
ELSE                             !Y SE ASIGNA A ESTE VEHÍCULO (EL MÁS LIGERO)
PBV=PBV2
END IF
```

```
C=====
C   SE LLAMA A LA SUBROUTINA QUE HACE LA TAREA DE ESCRIBIR LAS CARGAS EXTERNAS
C=====
```

```
CALL ESCRITCARGA (V,NR,N1,N12,N2,N22,N3,N32,N4,N42,N5,N52,N6,N62,
$N7,N72,N8,N82,N9,N92,FXFY,MXYZ,C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,
$CPP1,CPP12,CPP2,CPP22,CPP3,CPP32,CPP4,CPP42,CPP5,CPP52,CPP6,CPP62,
$CPP7,CPP72,CPP8,CPP82,CPP9,CPP92,PBV,L)
```

```
CLOSE(5)                       !SE TERMINAN DE ESCRIBIR LAS CARGAS DEL
                                !SEGUNDO VEHÍCULO
```

```
C=====
C   LECTURA Y EJECUCIÓN DEL ARCHIVO PARA CORRER EL STADYN
C=====
```

```
700 result = systemQQ('C:\bin\stadynd<correstadyn') !CORRE EL PROGRAMA STADYN SEGÚN
                                !LOS COMANDOS ESCRITOS EN 'correstadyn'
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
C=====
C   LECTURA DEL ARCHIVO DE DATOS DE SALIDA DEL STADYN
C=====

      OPEN(6,FILE='stodyn.out',STATUS='OLD')
      I=1
14    READ(6,5000,end=15)L(I)
      I=I+1
      GOTO 14
15    CONTINUE
      CLOSE(6)

C=====
C   OBTENCION DEL MOMENTO FLEXIONANTE GENERADO POR LAS CARGAS EXTERNAS EN
C   UN PUNTO DE INTERÉS DE CUALQUIER VIGA (EL NODO SE IDENTIFICA COMO "NODOMMAX")
C=====

      OPEN(7,FILE='AUXRESULTINM',STATUS='UNKNOWN')           !EN UN ARCHIVO AUXILIAR
      WRITE(7,5024)                                           !SE GUARDA EL RENGLÓN CON LOS DATOS
                                                             !DEL NODO DE INTERÉS
      IF((NODOMMAX.LT.267).AND.(NODOMMAX.GE.179))THEN        !RANGO DE NODOS DE VIGA 1
      WRITE(7,5000)L(24776+1+2*(NODOMMAX-179))
      ELSE IF((NODOMMAX.LT.801).AND.(NODOMMAX.GE.713))THEN  !RANGO DE NODOS DE VIGA 2
      WRITE(7,5000)L(24776+177+2*(NODOMMAX-713))
      ELSE IF((NODOMMAX.LT.1335).AND.(NODOMMAX.GE.1247))THEN !RANGO DE NODOS DE VIGA 3
      WRITE(7,5000)L(24776+353+2*(NODOMMAX-1247))
      ELSE IF((NODOMMAX.LT.1869).AND.(NODOMMAX.GE.1781))THEN !RANGO DE NODOS DE VIGA 4
      WRITE(7,5000)L(24776+529+2*(NODOMMAX-1781))
      WRITE(*,*)L(24776+529+2*(NODOMMAX-1781))
      ELSE IF((NODOMMAX.LT.2403).AND.(NODOMMAX.GE.2315))THEN !RANGO DE NODOS DE VIGA 5
      WRITE(7,5000)L(24776+705+2*(NODOMMAX-2315))
      ELSE IF((NODOMMAX.LT.2937).AND.(NODOMMAX.GE.2849))THEN !RANGO DE NODOS DE VIGA 6
      WRITE(7,5000)L(24776+881+2*(NODOMMAX-2849))
      ELSE IF((NODOMMAX.LT.3471).AND.(NODOMMAX.GE.3383))THEN !RANGO DE NODOS DE VIGA 7
      WRITE(7,5000)L(24776+1057+2*(NODOMMAX-3383))
      ELSE
      WRITE(7,*) 'SE SELECCIONÓ UN NODO QUE NO PERTENECE A NINGUNA VIGA'
      END IF
      CLOSE(7)

C=====
C   LECTURA Y REGISTRO DE LOS RESULTADOS
C=====

      OPEN(7,FILE='AUXRESULTINM',STATUS='OLD')
      READ(7,5022)MY
      CLOSE(7)

      IF(PBV1.GE.PBV2)THEN                                     !SE REGISTRA EN EL ARCHIVO DE RESULTADOS
      WRITE(8,5025) J,NVEH,V1,V2,CC1,CC2,PBV1,PBV2,MY        !EL NÚMERO DE ITERACIÓN,
      ELSE                                                    !LOS VEHÍCULOS PRESENTES, EL TIPO, SUS
      WRITE(8,5025) J,NVEH,V2,V1,CC2,CC1,PBV2,PBV1,MY        !CONDICIONES DE CARGA,
      END IF                                                  !PESOS Y MOMENTO FLEXIONANTE PRODUCIDO
                                                             !EN EL NODO DE INTERÉS

600  CONTINUE

      END IF                                     !TERMINA CONDICIONAL PARA INICIAR EN LA ITERACIÓN DESEADA
      END IF

999  CONTINUE

C=====
C   REGISTRO DE NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS POR TIPO
C=====

      WRITE(12,*) ' '
      WRITE(12,*) 'NO. TOTAL DE VEHÍCULOS'
      WRITE(12,*) 'C2:'
      WRITE(12,5027)COC2
      WRITE(12,*) 'C3:'
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE (12,5027)COC3
WRITE (12,*)'T3-S2:'
WRITE (12,5027)COT3S2
WRITE (12,*)'T3-S3:'
WRITE (12,5027)COT3S3
WRITE (12,*)'T3S2R4:'
WRITE (12,5027)COT3S2R4
WRITE (12,*)'B2:'
WRITE (12,5027)COB2
WRITE (12,*)'B3:'
WRITE (12,5027)COB3
WRITE (12,*)'VEHÍCULOS LIGEROS:'
WRITE (12,5027)COVL
```

CLOSE (12)

=====

C FORMATOS DEL PROGRAMA PRINCIPAL

=====

```
5000 FORMAT (A)
5010 FORMAT (I6, ' ', A, F12.4, ' ', A)
5020 FORMAT (3X, 'IT.', 2X, 'NO.VEH.', 2X, 'VEH1', 6X, 'VEH2', 7X, 'CC1', 11X, 'CC2', 11X, 'PBV1', 6X,
$ 'PBV2', 8X, 'My')
5021 FORMAT (31X, F9.3)
5022 FORMAT (/ , 64X, F13.2)
5023 FORMAT (I7, I5, ' ', A9, 9X, A14, 15X, F8.0, 10X, F13.2)
5024 FORMAT ('ELEM', 2X, 'NODO', 8X, 'Fx', 11X, 'Fy', 7X, 'Fz', 11X, 'Mx', 11X, 'My', 15X, 'Mz')
5025 FORMAT (I7, I5, ' ', A7, 4X, A7, A14, 2X, A13, F8.0, 2X, F8.0, F13.2)
5026 FORMAT (F13.2)
5027 FORMAT (I7)
5028 FORMAT (F13.2, 3X, I6)
```

END !FIN DEL PROGRAMA PRINCIPAL

=====

C SUBROUTINA PARA MODIFICAR ARCHIVO ORIGINAL DEL PUENTE PARA INTRODUCIR LAS  
C CARGAS EXTERNAS PRODUCIDAS POR EL PASO DE VEHÍCULOS

=====

=====

C DECLARACIÓN DEL NOMBRE DE LA SUBROUTINA Y SUS VARIABLES DE ENTRADA

=====

```
SUBROUTINE ESCRITCARGA (V, NR, N1, N12, N2, N22, N3, N32, N4, N42, N5, N52,
$N6, N62, N7, N72, N8, N82, N9, N92, FXY, MXYZ, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9,
$CPP1, CPP12, CPP2, CPP22, CPP3, CPP32, CPP4, CPP42, CPP5, CPP52, CPP6, CPP62,
$CPP7, CPP72, CPP8, CPP82, CPP9, CPP92, PBV, L)
```

```
INTEGER N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9, N12, N22, N32, N42, N52, N62, N72,
$N82, N92, NR
CHARACTER*19 FXY
CHARACTER*43 MXYZ
CHARACTER*150 L
CHARACTER*11 V
DIMENSION L(30000)
```

=====

C COMIENZAN LOS CONDICIONALES PARA UN VEHÍCULO T3S2R4. SE LEEN TODOS LOS  
C RENGLONES (15167) DEL ARCHIVO SIN CARGAS Y SE IDENTIFICAN Y MODIFICAN  
C LOS RENGLONES DONDE SE UBICAN LAS CARGAS APLICADAS POR LOS EJES,  
C DEPENDIENDO EL NODO DE REFERENCIA (NR) Y CUÁNTOS Y QUÉ EJES ESTÉN  
C DENTRO DEL PUENTE

=====

```
IF (V.EQ. 'T3S2R4') THEN !15167 ES TOTAL DE RENGLONES EN EL
DO 100 I=1, 15167 !ARCHIVO DE DATOS DEL PUENTE
IF ((NR.LT.22).AND. (NR.GE.0)) THEN !11480 ES EL RENGLON INMEDIATO ANTERIOR
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
IF (I.EQ.11480+N1) THEN                                !A DONDE ESTÁN ESCRITAS LAS CARGAS
  WRITE (5,5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ          !SE ESCRIBE LA CARGA EN EL RENGLON
  GOTO 100                                             !11480+N1, INCLUYE LA CARGA POR PESO PROPIO
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN                          !Y LAS OTRAS FUERZAS Y MOMENTOS EN CEROS
  WRITE (5,5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ       !SE ESCRIBE LA CARGA EN EL RENGLON
  GOTO 100                                             !11480+N12
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.27) .AND. (NR.GE.22)) THEN            !EN ESTE CASO LOS DOS EJES FRONTALES
  IF (I.EQ.11480+N1) THEN                              !ESTÁN DENTRO DEL PUENTE
    WRITE (5,5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
    WRITE (5,5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
    WRITE (5,5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
    WRITE (5,5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.61) .AND. (NR.GE.27)) THEN           !CASO CON TRES EJES FRONTALES
  IF (I.EQ.11480+N1) THEN                              !DENTRO DEL PUENTE
    WRITE (5,5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
    WRITE (5,5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
    WRITE (5,5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
    WRITE (5,5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.66) .AND. (NR.GE.61)) THEN           !CASO CON CUATRO EJES FRONTALES
  IF (I.EQ.11480+N1) THEN                              !DENTRO DEL PUENTE
    WRITE (5,5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
    WRITE (5,5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
    WRITE (5,5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
    WRITE (5,5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
    GOTO 100
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
  WRITE (5,5010) N42, FXY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
  GOTO 100
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.76) .AND. (NR.GE.66) ) THEN
  IF (I.EQ.11480+N1) THEN
    WRITE (5,5010) N1, FXY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
    WRITE (5,5010) N12, FXY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
    WRITE (5,5010) N2, FXY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
    WRITE (5,5010) N22, FXY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32, FXY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4, FXY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42, FXY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5, FXY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52, FXY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.81) .AND. (NR.GE.76) ) THEN
  IF (I.EQ.11480+N1) THEN
    WRITE (5,5010) N1, FXY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
    WRITE (5,5010) N12, FXY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
    WRITE (5,5010) N2, FXY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
    WRITE (5,5010) N22, FXY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32, FXY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4, FXY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42, FXY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5, FXY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE (5, 5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
WRITE (5, 5010) N6, FXFY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
WRITE (5, 5010) N62, FXFY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
GOTO 100
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.89) .AND. (NR.GE.81)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5, 5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5, 5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
WRITE (5, 5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
WRITE (5, 5010) N42, FXFY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
WRITE (5, 5010) N5, FXFY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
WRITE (5, 5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
WRITE (5, 5010) N6, FXFY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
WRITE (5, 5010) N62, FXFY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N7) THEN
WRITE (5, 5010) N7, FXFY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
WRITE (5, 5010) N72, FXFY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
GOTO 100
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.111) .AND. (NR.GE.89)) THEN
IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5, 5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5, 5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
  WRITE (5,5010) N4, FXY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
  WRITE (5,5010) N42, FXY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
  WRITE (5,5010) N5, FXY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
  WRITE (5,5010) N52, FXY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
  WRITE (5,5010) N6, FXY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
  WRITE (5,5010) N62, FXY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N7) THEN
  WRITE (5,5010) N7, FXY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
  WRITE (5,5010) N72, FXY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
  GOTO 100
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.115).AND.(NR.GE.111)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32, FXY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4, FXY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42, FXY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5, FXY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52, FXY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
    WRITE (5,5010) N6, FXY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
    WRITE (5,5010) N62, FXY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N7) THEN
    WRITE (5,5010) N7, FXY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
    WRITE (5,5010) N72, FXY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.116).AND.(NR.GE.115)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32, FXY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
    GOTO 100
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
  WRITE (5,5010) N4, FXY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
  WRITE (5,5010) N42, FXY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
  WRITE (5,5010) N5, FXY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
  WRITE (5,5010) N52, FXY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
  WRITE (5,5010) N6, FXY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
  WRITE (5,5010) N62, FXY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N7) THEN
  WRITE (5,5010) N7, FXY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
  WRITE (5,5010) N72, FXY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N8) THEN
  WRITE (5,5010) N8, FXY, C8*PBV+CPP8, MXYZ
  GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N82) THEN
  WRITE (5,5010) N82, FXY, C8*PBV+CPP82, MXYZ
  GOTO 100
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ( (NR.LT.120) .AND. (NR.GE.116) ) THEN
  IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4, FXY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42, FXY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5, FXY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52, FXY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
    WRITE (5,5010) N6, FXY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
    WRITE (5,5010) N62, FXY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N7) THEN
    WRITE (5,5010) N7, FXY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
    WRITE (5,5010) N72, FXY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N8) THEN
    WRITE (5,5010) N8, FXY, C8*PBV+CPP8, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N82) THEN
    WRITE (5,5010) N82, FXY, C8*PBV+CPP82, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ( (NR.LT.150) .AND. (NR.GE.120) ) THEN
  IF (I.EQ.11480+N4) THEN
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE (5,5010) N4, FXY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
WRITE (5,5010) N42, FXY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
WRITE (5,5010) N5, FXY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
WRITE (5,5010) N52, FXY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
WRITE (5,5010) N6, FXY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
WRITE (5,5010) N62, FXY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N7) THEN
WRITE (5,5010) N7, FXY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
WRITE (5,5010) N72, FXY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N8) THEN
WRITE (5,5010) N8, FXY, C8*PBV+CPP8, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N82) THEN
WRITE (5,5010) N82, FXY, C8*PBV+CPP82, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N9) THEN
WRITE (5,5010) N9, FXY, C9*PBV+CPP9, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N92) THEN
WRITE (5,5010) N92, FXY, C9*PBV+CPP92, MXYZ
GOTO 100
ELSE
WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ( (NR.LT.155) .AND. (NR.GE.150) ) THEN
IF (I.EQ.11480+N5) THEN
WRITE (5,5010) N5, FXY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
WRITE (5,5010) N52, FXY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
WRITE (5,5010) N6, FXY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
WRITE (5,5010) N62, FXY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N7) THEN
WRITE (5,5010) N7, FXY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
WRITE (5,5010) N72, FXY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N8) THEN
WRITE (5,5010) N8, FXY, C8*PBV+CPP8, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N82) THEN
WRITE (5,5010) N82, FXY, C8*PBV+CPP82, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N9) THEN
WRITE (5,5010) N9, FXY, C9*PBV+CPP9, MXYZ
GOTO 100
ELSE IF (I.EQ.11480+N92) THEN
WRITE (5,5010) N92, FXY, C9*PBV+CPP92, MXYZ
GOTO 100
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.165) .AND. (NR.GE.155)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N6) THEN
    WRITE (5,5010) N6, FXY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
    WRITE (5,5010) N62, FXY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N7) THEN
    WRITE (5,5010) N7, FXY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
    WRITE (5,5010) N72, FXY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N8) THEN
    WRITE (5,5010) N8, FXY, C8*PBV+CPP8, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N82) THEN
    WRITE (5,5010) N82, FXY, C8*PBV+CPP82, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N9) THEN
    WRITE (5,5010) N9, FXY, C9*PBV+CPP9, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N92) THEN
    WRITE (5,5010) N92, FXY, C9*PBV+CPP92, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.170) .AND. (NR.GE.165)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N7) THEN
    WRITE (5,5010) N7, FXY, C7*PBV+CPP7, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N72) THEN
    WRITE (5,5010) N72, FXY, C7*PBV+CPP72, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N8) THEN
    WRITE (5,5010) N8, FXY, C8*PBV+CPP8, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N82) THEN
    WRITE (5,5010) N82, FXY, C8*PBV+CPP82, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N9) THEN
    WRITE (5,5010) N9, FXY, C9*PBV+CPP9, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N92) THEN
    WRITE (5,5010) N92, FXY, C9*PBV+CPP92, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.204) .AND. (NR.GE.170)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N8) THEN
    WRITE (5,5010) N8, FXY, C8*PBV+CPP8, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N82) THEN
    WRITE (5,5010) N82, FXY, C8*PBV+CPP82, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N9) THEN
    WRITE (5,5010) N9, FXY, C9*PBV+CPP9, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N92) THEN
    WRITE (5,5010) N92, FXY, C9*PBV+CPP92, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE IF ( (NR.LT.209) .AND. (NR.GE.204) ) THEN
  IF (I.EQ.11480+N9) THEN
    WRITE (5,5010) N9, FXY, C9*PBV+CPP9, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE IF (I.EQ.11480+N92) THEN
    WRITE (5,5010) N92, FXY, C9*PBV+CPP92, MXYZ
    GOTO 100
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
END IF
100 CONTINUE
```

```
C=====
C   COMIENZA CASO EN QUE CIRCULA UN VEHÍCULO TIPO T3S3
C=====
```

```
ELSE
  IF (V.EQ. 'T3S3') THEN
    DO 101 I=1,15167
      IF ( (NR.LT.17) .AND. (NR.GE.0) ) THEN
        IF (I.EQ.11480+N1) THEN
          WRITE (5,5010) N1, FXY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
          WRITE (5,5010) N12, FXY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE
          WRITE (5,5000) L(I)
        END IF
      ELSE IF ( (NR.LT.22) .AND. (NR.GE.17) ) THEN
        IF (I.EQ.11480+N1) THEN
          WRITE (5,5010) N1, FXY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
          WRITE (5,5010) N12, FXY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
          WRITE (5,5010) N2, FXY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
          WRITE (5,5010) N22, FXY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE
          WRITE (5,5000) L(I)
        END IF
      ELSE IF ( (NR.LT.67) .AND. (NR.GE.22) ) THEN
        IF (I.EQ.11480+N1) THEN
          WRITE (5,5010) N1, FXY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
          WRITE (5,5010) N12, FXY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
          WRITE (5,5010) N2, FXY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
          WRITE (5,5010) N22, FXY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
          WRITE (5,5010) N3, FXY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
          WRITE (5,5010) N32, FXY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
          GOTO 101
        ELSE
          WRITE (5,5000) L(I)
        END IF
      ELSE IF ( (NR.LT.72) .AND. (NR.GE.67) ) THEN
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
  WRITE (5,5010) N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
  WRITE (5,5010) N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
  WRITE (5,5010) N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
  WRITE (5,5010) N3,FXFY,C3*PBV+CPP3,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
  WRITE (5,5010) N32,FXFY,C3*PBV+CPP32,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
  WRITE (5,5010) N4,FXFY,C4*PBV+CPP4,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
  WRITE (5,5010) N42,FXFY,C4*PBV+CPP42,MXYZ
  GOTO 101
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.77).AND.(NR.GE.72)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N1) THEN
    WRITE (5,5010) N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
    WRITE (5,5010) N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
    WRITE (5,5010) N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
    WRITE (5,5010) N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3,FXFY,C3*PBV+CPP3,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32,FXFY,C3*PBV+CPP32,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4,FXFY,C4*PBV+CPP4,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42,FXFY,C4*PBV+CPP42,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5,FXFY,C5*PBV+CPP5,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52,FXFY,C5*PBV+CPP52,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.89).AND.(NR.GE.77)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N1) THEN
    WRITE (5,5010) N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
    WRITE (5,5010) N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
    WRITE (5,5010) N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
  WRITE (5,5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
  WRITE (5,5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
  WRITE (5,5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
  WRITE (5,5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
  WRITE (5,5010) N42, FXFY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
  WRITE (5,5010) N5, FXFY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
  WRITE (5,5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
  WRITE (5,5010) N6, FXFY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
  WRITE (5,5010) N62, FXFY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
  GOTO 101
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.106).AND.(NR.GE.89)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N2) THEN
    WRITE (5,5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
    WRITE (5,5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42, FXFY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5, FXFY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
    WRITE (5,5010) N6, FXFY, C6*PBV+CPP6, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
    WRITE (5,5010) N62, FXFY, C6*PBV+CPP62, MXYZ
    GOTO 101
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.111).AND.(NR.GE.106)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 101
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
  WRITE (5,5010) N32,FXFY,C3*PBV+CPP32,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
  WRITE (5,5010) N4,FXFY,C4*PBV+CPP4,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
  WRITE (5,5010) N42,FXFY,C4*PBV+CPP42,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
  WRITE (5,5010) N5,FXFY,C5*PBV+CPP5,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
  WRITE (5,5010) N52,FXFY,C5*PBV+CPP52,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
  WRITE (5,5010) N6,FXFY,C6*PBV+CPP6,MXYZ
  GOTO 101
ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
  WRITE (5,5010) N62,FXFY,C6*PBV+CPP62,MXYZ
  GOTO 101
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.156).AND.(NR.GE.111)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4,FXFY,C4*PBV+CPP4,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42,FXFY,C4*PBV+CPP42,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5,FXFY,C5*PBV+CPP5,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52,FXFY,C5*PBV+CPP52,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
    WRITE (5,5010) N6,FXFY,C6*PBV+CPP6,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
    WRITE (5,5010) N62,FXFY,C6*PBV+CPP62,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.161).AND.(NR.GE.156)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5,FXFY,C5*PBV+CPP5,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52,FXFY,C5*PBV+CPP52,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N6) THEN
    WRITE (5,5010) N6,FXFY,C6*PBV+CPP6,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
    WRITE (5,5010) N62,FXFY,C6*PBV+CPP62,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.166).AND.(NR.GE.161)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N6) THEN
    WRITE (5,5010) N6,FXFY,C6*PBV+CPP6,MXYZ
    GOTO 101
  ELSE IF (I.EQ.11480+N62) THEN
    WRITE (5,5010) N62,FXFY,C6*PBV+CPP62,MXYZ
    GOTO 101
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE
  WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
END IF
101 CONTINUE
```

```
C=====
C   COMIENZA CASO EN QUE CIRCUA UN VEHÍCULO TIPO T3S2
C=====
```

```
ELSE
IF (V.EQ. 'T3S2') THEN
DO 102 I=1, 15167
IF ((NR.LT.17) .AND. (NR.GE.0)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 102
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.22) .AND. (NR.GE.17)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 102
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.72) .AND. (NR.GE.22)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5, 5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5, 5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 102
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.77) .AND. (NR.GE.72)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 102
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5, 5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5, 5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
WRITE (5, 5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
WRITE (5, 5010) N42, FXFY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
GOTO 102
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.89) .AND. (NR.GE.77)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5, 5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5, 5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
WRITE (5, 5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
WRITE (5, 5010) N42, FXFY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
WRITE (5, 5010) N5, FXFY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
WRITE (5, 5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
GOTO 102
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.106) .AND. (NR.GE.89)) THEN
IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5, 5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5, 5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
WRITE (5, 5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
  WRITE (5,5010) N42, FXFY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
  GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
  WRITE (5,5010) N5, FXFY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
  GOTO 102
ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
  WRITE (5,5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
  GOTO 102
ELSE
  WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.111) .AND. (NR.GE.106)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N3) THEN
    WRITE (5,5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
    WRITE (5,5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42, FXFY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5, FXFY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.161) .AND. (NR.GE.111)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N4) THEN
    WRITE (5,5010) N4, FXFY, C4*PBV+CPP4, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N42) THEN
    WRITE (5,5010) N42, FXFY, C4*PBV+CPP42, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5, FXFY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
ELSE IF ((NR.LT.166) .AND. (NR.GE.161)) THEN
  IF (I.EQ.11480+N5) THEN
    WRITE (5,5010) N5, FXFY, C5*PBV+CPP5, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE IF (I.EQ.11480+N52) THEN
    WRITE (5,5010) N52, FXFY, C5*PBV+CPP52, MXYZ
    GOTO 102
  ELSE
    WRITE (5,5000) L(I)
  END IF
END IF
102 CONTINUE
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
C=====
C   COMIENZA CASO EN QUE CIRCULA UN VEHÍCULO TIPO C3
C=====
```

```
ELSE
IF (V.EQ. 'C3') THEN
DO 103 I=1,15167
IF ((NR.LT.16) .AND. (NR.GE.0)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010) N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5,5010) N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
GOTO 103
ELSE
WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.21) .AND. (NR.GE.16)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010) N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5,5010) N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010) N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010) N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
GOTO 103
ELSE
WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.89) .AND. (NR.GE.21)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010) N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5,5010) N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010) N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010) N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5,5010) N3,FXFY,C3*PBV+CPP3,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5,5010) N32,FXFY,C3*PBV+CPP32,MXYZ
GOTO 103
ELSE
WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.105) .AND. (NR.GE.89)) THEN
IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010) N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010) N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5,5010) N3,FXFY,C3*PBV+CPP3,MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5,5010) N32,FXFY,C3*PBV+CPP32,MXYZ
GOTO 103
ELSE
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.110) .AND. (NR.GE.105)) THEN
IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5, 5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 103
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5, 5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 103
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
END IF
103 CONTINUE
```

```
=====
C COMIENZA CASO EN QUE CIRCULA UN VEHÍCULO TIPO B3
=====
```

```
ELSE
IF (V.EQ. 'B3') THEN
DO 104 I=1, 15167
IF ((NR.LT.16) .AND. (NR.GE.0)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 104
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.21) .AND. (NR.GE.16)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 104
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.89) .AND. (NR.GE.21)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5, 5010) N1, FXFY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5, 5010) N12, FXFY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5, 5010) N2, FXFY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5, 5010) N22, FXFY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5, 5010) N3, FXFY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5, 5010) N32, FXFY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 104
ELSE
WRITE (5, 5000) L(I)
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
END IF
ELSE IF ( (NR.LT.105) .AND. (NR.GE.89) ) THEN
IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010) N2, FXY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010) N22, FXY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5,5010) N3, FXY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5,5010) N32, FXY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 104
ELSE
WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ( (NR.LT.110) .AND. (NR.GE.105) ) THEN
IF (I.EQ.11480+N3) THEN
WRITE (5,5010) N3, FXY, C3*PBV+CPP3, MXYZ
GOTO 104
ELSE IF (I.EQ.11480+N32) THEN
WRITE (5,5010) N32, FXY, C3*PBV+CPP32, MXYZ
GOTO 104
ELSE
WRITE (5,5000) L(I)
END IF
END IF
```

104 CONTINUE

```
C=====
C COMIENZA CASO EN QUE CIRCULA UN VEHÍCULO TIPO C2
C=====
```

```
ELSE
IF (V.EQ.'C2') THEN
DO 105 I=1,15167
IF ( (NR.LT.21) .AND. (NR.GE.0) ) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010) N1, FXY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 105
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5,5010) N12, FXY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 105
ELSE
WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ( (NR.LT.89) .AND. (NR.GE.21) ) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010) N1, FXY, C1*PBV+CPP1, MXYZ
GOTO 105
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5,5010) N12, FXY, C1*PBV+CPP12, MXYZ
GOTO 105
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010) N2, FXY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 105
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010) N22, FXY, C2*PBV+CPP22, MXYZ
GOTO 105
ELSE
WRITE (5,5000) L(I)
END IF
ELSE IF ( (NR.LT.110) .AND. (NR.GE.89) ) THEN
IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010) N2, FXY, C2*PBV+CPP2, MXYZ
GOTO 105
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE (5,5010)N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
GOTO 105
ELSE
WRITE (5,5000)L(I)
END IF
END IF
```

105 CONTINUE

```
=====
C      COMIENZA CASO EN QUE CIRCULA UN VEHÍCULO TIPO B2
=====
```

```
ELSE
IF (V.EQ.'B2') THEN
DO 106 I=1,15167
IF ((NR.LT.21).AND.(NR.GE.0)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010)N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
GOTO 106
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5,5010)N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
GOTO 106
ELSE
WRITE (5,5000)L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.89).AND.(NR.GE.21)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010)N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
GOTO 106
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5,5010)N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
GOTO 106
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010)N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
GOTO 106
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010)N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
GOTO 106
ELSE
WRITE (5,5000)L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.110).AND.(NR.GE.89)) THEN
IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010)N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
GOTO 106
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010)N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
GOTO 106
ELSE
WRITE (5,5000)L(I)
END IF
END IF
```

106 CONTINUE

```
=====
C      COMIENZA CASO EN QUE CIRCULA UN VEHÍCULO LIGERO
=====
```

```
ELSE
IF (V.EQ.'VL') THEN
DO 107 I=1,15167
IF ((NR.LT.12).AND.(NR.GE.0)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010)N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
GOTO 107
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
WRITE (5,5010)N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
GOTO 107
ELSE
WRITE (5,5000)L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.89).AND.(NR.GE.12)) THEN
IF (I.EQ.11480+N1) THEN
WRITE (5,5010)N1,FXFY,C1*PBV+CPP1,MXYZ
GOTO 107
ELSE IF (I.EQ.11480+N12) THEN
WRITE (5,5010)N12,FXFY,C1*PBV+CPP12,MXYZ
GOTO 107
ELSE IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010)N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
GOTO 107
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010)N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
GOTO 107
ELSE
WRITE (5,5000)L(I)
END IF
ELSE IF ((NR.LT.100).AND.(NR.GE.89)) THEN
IF (I.EQ.11480+N2) THEN
WRITE (5,5010)N2,FXFY,C2*PBV+CPP2,MXYZ
GOTO 107
ELSE IF (I.EQ.11480+N22) THEN
WRITE (5,5010)N22,FXFY,C2*PBV+CPP22,MXYZ
GOTO 107
ELSE
WRITE (5,5000)L(I)
END IF
END IF
107 CONTINUE

END IF
```

```
C=====
C   FORMATOS DE SUBROUTINA DE ESCRITURA DE CARGAS
C=====
```

```
5000 FORMAT (A)
5010 FORMAT (I6,'      ',A,F12.4,'      ',A)

END
```



## APÉNDICE F

**Programa en lenguaje Fortran para predicción de crecimiento de grieta y deterioro en acero de presfuerzo de acuerdo a las distribuciones de probabilidad de momentos flexionantes máximos presentados en la viga de análisis**



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
C=====
C PROGRAMA PARA CALCULAR EL DETERIORO EN UNA VIGA DE CONCRETO PRESFORZADO
C CON UNA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD CONOCIDA DE APLICACIÓN
C DE MOMENTOS FLEXIONANTES
C=====

      REAL IMP,MVI,A,CF,TCT,DSP,DSPKSI,NFALLA,DINM,DACUM,S,SCCI,SCCIKSI,
      $SCCF,Ps,Pp,MINT2,Mmax,Msup,Psmx,Ppmax,MINT2max,Pssup,Ppsup,
      $MINT2sup,KI,KImax,KIsup,DAIT,DK,m,nl,p,C,KIC,DA

      INTEGER R,ITI,AI,AF,NVEH,RESP

      R=10500

      WRITE(*,*) 'HASTA QUE EDAD QUIERES SIMULAR (ANIOS)?'
      READ(*,*) AF
      WRITE(*,*) 'A QUE EDAD COMIENZA LA ESCRITURA DE DATOS (ANIOS)?'
      READ(*,*) AI
      WRITE(*,*) 'CUAL ES LA TASA DE CRECIMIENTO DE TRAFICO DIARIO(<1)?'
      READ(*,*) TCT
      WRITE(*,*) 'CUAL ES EL FACTOR DE IMPACTO(IMP>1)?'
      READ(*,*) IMP
      WRITE(*,*) ' LONGITUD DE GRIETA INICIAL (CM):'
      READ(*,*) A

      CF=129.4-A                                !PROF FIJA DE LA SECCIÓN ÍNTEGRA, IGUAL AL
                                                !PERALTE TOTAL MENOS LONG DE LA GRIETA

      SCCI=- (242934.55/3767.23) - ((242934*31.48*(CF-81.41))/5172596.4) +           !CÁLCULO DE
      $( (9654480*(CF-81.41))/5172596.4) + ((3622920*(CF-52.55))/13113265)         !ESFUERZOS EN
                                                !EXTREMO SUPERIOR DE GRIETA
      SCCIKSI=SCCI*14.22342/1000

      OPEN(11,FILE='RESULTSFSA.txt',STATUS='UNKNOWN')                             !CREACIÓN DE ARCHIVO
                                                !PARA GUARDAR RESULTADOS

      WRITE(11,*) 'TASA DE CRECIMIENTO:'
      WRITE(11,*) TCT
      WRITE(11,*) 'FACTOR DE IMPACTO:'
      WRITE(11,*) IMP
      WRITE(11,*) 'LONGITUD DE GRIETA INICIAL (CM):'
      WRITE(11,*) A
      WRITE(11,*) ' '
      WRITE(11,*) 'EDAD INICIAL (AÑOS):'
      WRITE(11,*) AI
      WRITE(11,*) 'EDAD FINAL (AÑOS):'
      WRITE(11,*) AF
      WRITE(11,*) ' '
      WRITE(11,*) 'ESFUERZO INICIAL EN EXTREMO SUPERIOR DE LA GRIETA (KSI):'
      WRITE(11,*) SCCIKSI
      WRITE(11,*) ' '

      IF(AI.EQ.0) THEN
        ITI=0
      ELSE
        ITI=0
        DO 10 I=1,AI                                !CICLOS PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE CORRIDAS
        IF (TCT.EQ.0.02) THEN                          !QUE IMPLICAN LAS EDADES SIMULADAS
          NVEH=365*4948*((1.02)**(I-1))
          IF (I.LE.10) THEN                               !EL NUMERO DE VEHICULOS ES MULTIPLICADO
            ITI=ITI+665.86*(NVEH/1000)                   !POR EL NUMERO DE CICLOS DE CARGA NORMALIZADO,
          ELSE IF ((I.GT.10).AND.(I.LE.20)) THEN         !OBTENIDO DE LAS SIMULACIONES DE ESCENARIOS
            ITI=ITI+664.38*(NVEH/1000)                   !DE CARGA PARA LAS DISTINTAS CONDICIONES
          ELSE IF ((I.GT.20).AND.(I.LE.30)) THEN         !DE TRÁFICO VEHÍCULAR
            ITI=ITI+662.37*(NVEH/1000)
          ELSE IF ((I.GT.30).AND.(I.LE.40)) THEN
            ITI=ITI+660.89*(NVEH/1000)
          ELSE IF ((I.GT.40).AND.(I.LE.50)) THEN
            ITI=ITI+657.88*(NVEH/1000)
        10 CONTINUE
      END IF
    
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
END IF
END IF
IF (TCT.EQ.0.04) THEN
  NVEH=365*4948*((1.04)**(I-1))
  IF (I.LE.10) THEN
    ITI=ITI+665.86*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.10).AND.(I.LE.20)) THEN
    ITI=ITI+662.37*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.20).AND.(I.LE.30)) THEN
    ITI=ITI+657.88*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.30).AND.(I.LE.40)) THEN
    ITI=ITI+651.93*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.40).AND.(I.LE.50)) THEN
    ITI=ITI+642.03*(NVEH/1000)
  END IF
END IF
END IF
IF (TCT.EQ.0.06) THEN
  NVEH=365*4948*((1.06)**(I-1))
  IF (I.LE.10) THEN
    ITI=ITI+665.86*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.10).AND.(I.LE.20)) THEN
    ITI=ITI+660.89*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.20).AND.(I.LE.30)) THEN
    ITI=ITI+651.93*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.30).AND.(I.LE.40)) THEN
    ITI=ITI+636.46*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.40).AND.(I.LE.50)) THEN
    ITI=ITI+614.64*(NVEH/1000)
  END IF
END IF
END IF
10 CONTINUE

END IF

ITF=0
DO 20 I=1,AF                                !CICLOS PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE CORRIDAS
!QUE IMPLICAN LAS EDADES SIMULADAS
IF (TCT.EQ.0.02) THEN
  NVEH=365*4948*((1.02)**(I-1))
  IF (I.LE.10) THEN
    ITF=ITF+665.86*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.10).AND.(I.LE.20)) THEN
    ITF=ITF+664.38*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.20).AND.(I.LE.30)) THEN
    ITF=ITF+662.37*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.30).AND.(I.LE.40)) THEN
    ITF=ITF+660.89*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.40).AND.(I.LE.50)) THEN
    ITF=ITF+657.88*(NVEH/1000)
  END IF
END IF
IF (TCT.EQ.0.04) THEN
  NVEH=365*4948*((1.04)**(I-1))
  IF (I.LE.10) THEN
    ITF=ITF+665.86*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.10).AND.(I.LE.20)) THEN
    ITF=ITF+662.37*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.20).AND.(I.LE.30)) THEN
    ITF=ITF+657.88*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.30).AND.(I.LE.40)) THEN
    ITF=ITF+651.93*(NVEH/1000)
  ELSE IF ((I.GT.40).AND.(I.LE.50)) THEN
    ITF=ITF+642.03*(NVEH/1000)
  END IF
END IF
IF (TCT.EQ.0.06) THEN
  NVEH=365*4948*((1.06)**(I-1))
  IF (I.LE.10) THEN
    ITF=ITF+665.86*(NVEH/1000)
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE IF ((I.GT.10).AND.(I.LE.20)) THEN
  ITF=ITF+660.89*(NVEH/1000)
ELSE IF ((I.GT.20).AND.(I.LE.30)) THEN
  ITF=ITF+651.93*(NVEH/1000)
ELSE IF ((I.GT.30).AND.(I.LE.40)) THEN
  ITF=ITF+636.46*(NVEH/1000)
ELSE IF ((I.GT.40).AND.(I.LE.50)) THEN
  ITF=ITF+614.64*(NVEH/1000)
END IF
END IF

20 CONTINUE

WRITE(11,*) ' '

WRITE(11,*) ' ITERACION    MV+I (KG-CM)    Scf (Kg/cm2)    Dsp (Ksi)
$ DET.          KI (MN..)    KImax          KIsup          A (cm) '

C=====
C  INICIA EL PROCESO PARA DETERMINAR MOMENTOS FLEXIONANTES Y EL DETERIORO
C  CAUSADO
C=====

WRITE(*,*) 'DESEAS CALCULAR ESFUERZOS? (1=SI/2=NO) '
READ(*,*) RESP

IF (RESP.EQ.1) THEN
  WRITE(*,*) 'EN QUE ITERACION QUIERES EMPEZAR?'
  READ(*,*) ITI
  DACUM=0!EL DAÑO INICIAL ACUMULADO ES DE CERO

  DO 140 N=1,ITF                                !CICLO PARA HACER LAS ITERACIONES
  S=RAN(R)
  IF (N.GT.ITI) THEN
    WRITE(*,*) N
  END IF
  IF (S.EQ.1) THEN
    S=0.9999999
  END IF

  IF (TCT.EQ.0.02) THEN
    IF (N.LE.13167610) THEN
      MVI=IMP*(2071740*((-LOG(1-S))**(1/2.3427))+89158)
      IF (MVI.GT.IMP*5511600) THEN                !EL MOMENTO SE LIMITA AL MÁXIMO OBSERVADO
        MVI=IMP*5511600                          !EN LAS SIMULACIONES DE ESCENARIOS DE CARGA
      END IF                                       !LOS LIMITES SE DAN POR NUMERO DE CORRIDAS
    ELSE IF ((N.GT.13167610).AND.(N.LE.29183238)) THEN
      MVI=IMP*(2077380*((-LOG(1-S))**(1/2.3465))+85636)
      IF (MVI.GT.IMP*5245500) THEN
        MVI=IMP*5245500
      END IF
    ELSE IF ((N.GT.29183238).AND.(N.LE.48647223)) THEN
      MVI=IMP*(2081270*((-LOG(1-S))**(1/2.3467))+85952)
      IF (MVI.GT.IMP*5477000) THEN
        MVI=IMP*5477000
      END IF
    ELSE IF ((N.GT.48647223).AND.(N.LE.72320616)) THEN
      MVI=IMP*(2084076*((-LOG(1-S))**(1/2.3468))+86065)
      IF (MVI.GT.IMP*5501900) THEN
        MVI=IMP*5501900
      END IF
    ELSE IF ((N.GT.72320616).AND.(N.LE.101100000)) THEN
      MVI=IMP*(2085674*((-LOG(1-S))**(1/2.3416))+89307)
      IF (MVI.GT.IMP*5762000) THEN
        MVI=IMP*5762000
      END IF
    END IF
  END IF

```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
END IF
END IF

IF (TCT.EQ.0.04) THEN
  IF (N.LE.14437969) THEN
    MVI=IMP*(2071740*((-LOG(1-S))**(1/2.3427))+89158)
    IF (MVI.GT.IMP*5511600) THEN
      MVI=IMP*5511600
    END IF
  ELSE IF ((N.GT.14437969).AND.(N.LE.35697853)) THEN
    MVI=IMP*(2081270*((-LOG(1-S))**(1/2.3467))+85952)
    IF (MVI.GT.IMP*5477000) THEN
      MVI=IMP*5477000
    END IF
  ELSE IF ((N.GT.35697853).AND.(N.LE.66954146)) THEN
    MVI=IMP*(2085674*((-LOG(1-S))**(1/2.3416))+89307)
    IF (MVI.GT.IMP*5762000) THEN
      MVI=IMP*5762000
    END IF
  ELSE IF ((N.GT.66954146).AND.(N.LE.112803035)) THEN
    MVI=IMP*(2095278*((-LOG(1-S))**(1/2.3417))+89463)
    IF (MVI.GT.IMP*5588600) THEN
      MVI=IMP*5588600
    END IF
  ELSE IF ((N.GT.112803035).AND.(N.LE.179750000)) THEN
    MVI=IMP*(2113928*((-LOG(1-S))**(1/2.3469))+86436)
    IF (MVI.GT.IMP*5643100) THEN
      MVI=IMP*5643100
    END IF
  END IF
END IF

IF (TCT.EQ.0.06) THEN
  IF (N.LE.15850593) THEN
    MVI=IMP*(2071740*((-LOG(1-S))**(1/2.3427))+89158)
    IF (MVI.GT.IMP*5511600) THEN
      MVI=IMP*5511600
    END IF
  ELSE IF ((N.GT.15850593).AND.(N.LE.44024856)) THEN
    MVI=IMP*(2084076*((-LOG(1-S))**(1/2.3468))+86065)
    IF (MVI.GT.IMP*5501900) THEN
      MVI=IMP*5501900
    END IF
  ELSE IF ((N.GT.44024856).AND.(N.LE.93796883)) THEN
    MVI=IMP*(2095278*((-LOG(1-S))**(1/2.3417))+89463)
    IF (MVI.GT.IMP*5588600) THEN
      MVI=IMP*5588600
    END IF
  ELSE IF ((N.GT.93796883).AND.(N.LE.180815104)) THEN
    MVI=IMP*(2122643*((-LOG(1-S))**(1/2.3482))+86432)
    IF (MVI.GT.IMP*5731700) THEN
      MVI=IMP*5731700
    END IF
  ELSE IF ((N.GT.180815104).AND.(N.LE.331400000)) THEN
    MVI=IMP*(2159953*((-LOG(1-S))**(1/2.3532))+89719)
    IF (MVI.GT.IMP*5927700) THEN
      MVI=IMP*5927700
    END IF
  END IF
END IF
END IF
```





Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
Mmax=IMP*3027498
Msup=IMP*4308735
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.5) .AND. (A.LT.6) ) THEN
IF (MVI.GT.3295800) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*3428397
Msup=IMP*4551795
ELSE
Mmax=IMP*3042396
Msup=IMP*4316884
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.6) .AND. (A.LT.7) ) THEN
IF (MVI.GT.3412200) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*3487802
Msup=IMP*4586896
ELSE
Mmax=IMP*3062109
Msup=IMP*4330196
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.7) .AND. (A.LT.8) ) THEN
IF (MVI.GT.3532200) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*3548156
Msup=IMP*4619250
ELSE
Mmax=IMP*3153766
Msup=IMP*4388103
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.8) .AND. (A.LT.9) ) THEN
IF (MVI.GT.3655900) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*3601604
Msup=IMP*4646341
ELSE
Mmax=IMP*3185564
Msup=IMP*4403641
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.9) .AND. (A.LT.10) ) THEN
IF (MVI.GT.3782800) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*3650209
Msup=IMP*4673120
ELSE
Mmax=IMP*3221538
Msup=IMP*4422781
END IF
GOTO 30
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE
  GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.10) .AND. (A.LT.11) ) THEN
  IF (MVI.GT.3912500) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*3710322
      Msup=IMP*4707803
    ELSE
      Mmax=IMP*3260451
      Msup=IMP*4445114
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.11) .AND. (A.LT.12) ) THEN
  IF (MVI.GT.4045200) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*3775833
      Msup=IMP*4744018
    ELSE
      Mmax=IMP*3300421
      Msup=IMP*4469484
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.12) .AND. (A.LT.13) ) THEN
  IF (MVI.GT.4180000) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*3840866
      Msup=IMP*4776294
    ELSE
      Mmax=IMP*3342862
      Msup=IMP*4496892
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.13) .AND. (A.LT.14) ) THEN
  IF (MVI.GT.4317100) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*3906901
      Msup=IMP*4798686
    ELSE
      Mmax=IMP*3401783
      Msup=IMP*4535551
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.14) .AND. (A.LT.15) ) THEN
  IF (MVI.GT.4456500) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*3969141
      Msup=IMP*4814443
    ELSE
      Mmax=IMP*3453564
      Msup=IMP*4566897
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.15) .AND. (A.LT.16) ) THEN
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
IF (MVI.GT.4597800) THEN
  IF (IMP.EQ.1.495) THEN
    Mmax=IMP*4025061
    Msup=IMP*4818346
  ELSE
    Mmax=IMP*3510196
    Msup=IMP*4599293
  END IF
  GOTO 30
ELSE
  GOTO 140
END IF
ELSE IF ((A.GE.16).AND.(A.LT.17)) THEN
  IF (MVI.GT.4741200) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4074535
      Msup=IMP*4813497
    ELSE
      Mmax=IMP*3562476
      Msup=IMP*4626539
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ((A.GE.17).AND.(A.LT.18)) THEN
  IF (MVI.GT.4886300) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4118404
      Msup=IMP*4800923
    ELSE
      Mmax=IMP*3607228
      Msup=IMP*4649272
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ((A.GE.18).AND.(A.LT.19)) THEN
  IF (MVI.GT.5032900) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4155673
      Msup=IMP*4785033
    ELSE
      Mmax=IMP*3649499
      Msup=IMP*4672711
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ((A.GE.19).AND.(A.LT.20)) THEN
  IF (MVI.GT.5186800) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4192625
      Msup=IMP*4766112
    ELSE
      Mmax=IMP*3702840
      Msup=IMP*4703524
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ((A.GE.20).AND.(A.LT.21)) THEN
  IF (MVI.GT.5343500) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4228699
      Msup=IMP*4748377
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE
  Mmax=IMP*3760107
  Msup=IMP*4735673
END IF
GOTO 30
ELSE
  GOTO 140
END IF
ELSE IF ((A.GE.21).AND.(A.LT.22)) THEN
  IF (MVI.GT.5501800) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4264411
      Msup=IMP*4731192
    ELSE
      Mmax=IMP*3818969
      Msup=IMP*4765898
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ((A.GE.22).AND.(A.LT.23)) THEN
  IF (MVI.GT.5662100) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4299226
      Msup=IMP*4720276
    ELSE
      Mmax=IMP*3883497
      Msup=IMP*4791234
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ((A.GE.23).AND.(A.LT.24)) THEN
  IF (MVI.GT.5824400) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4338604
      Msup=IMP*4719053
    ELSE
      Mmax=IMP*3932577
      Msup=IMP*4806392
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ((A.GE.24).AND.(A.LT.25)) THEN
  IF (MVI.GT.5988500) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4389348
      Msup=IMP*4738981
    ELSE
      Mmax=IMP*3986580
      Msup=IMP*4816934
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ((A.GE.25).AND.(A.LT.26)) THEN
  IF (MVI.GT.6154700) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4449009
      Msup=IMP*4787403
    ELSE
      Mmax=IMP*4033608
      Msup=IMP*4818071
    END IF
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
GOTO 30
ELSE
  GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.26) .AND. (A.LT.27) ) THEN
  IF (MVI.GT.6323500) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4543832
      Msup=IMP*4916292
    ELSE
      Mmax=IMP*4076670
      Msup=IMP*4813068
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.27) .AND. (A.LT.28) ) THEN
  IF (MVI.GT.6494500) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*4814689
      Msup=IMP*5360576
    ELSE
      Mmax=IMP*4115832
      Msup=IMP*4801899
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.28) .AND. (A.LT.29) ) THEN
  IF (MVI.GT.6668600) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5077480
      Msup=IMP*5615790
    ELSE
      Mmax=IMP*4150264
      Msup=IMP*4787587
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.29) .AND. (A.LT.30) ) THEN
  IF (MVI.GT.6845700) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5153602
      Msup=IMP*5625209
    ELSE
      Mmax=IMP*4182779
      Msup=IMP*4771240
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.30) .AND. (A.LT.31) ) THEN
  IF (MVI.GT.7026500) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5183846
      Msup=IMP*5622473
    ELSE
      Mmax=IMP*4212793
      Msup=IMP*4756028
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
ELSE IF ( (A.GE.31) .AND. (A.LT.32) ) THEN
  IF (MVI.GT.7211800) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5243502
      Msup=IMP*5665219
    ELSE
      Mmax=IMP*4244460
      Msup=IMP*4740661
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.32) .AND. (A.LT.33) ) THEN
  IF (MVI.GT.7402300) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5380016
      Msup=IMP*5762000
    ELSE
      Mmax=IMP*4277321
      Msup=IMP*4726100
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.33) .AND. (A.LT.34) ) THEN
  IF (MVI.GT.7599450) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5495148
      Msup=IMP*5762000
    ELSE
      Mmax=IMP*4311721
      Msup=IMP*4718596
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.34) .AND. (A.LT.35) ) THEN
  IF (MVI.GT.7750000) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5612744
      Msup=IMP*5762000
    ELSE
      Mmax=IMP*4348990
      Msup=IMP*4721632
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.35) .AND. (A.LT.36) ) THEN
  IF (MVI.GT.7750000) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5732856
      Msup=IMP*5762000
    ELSE
      Mmax=IMP*4402712
      Msup=IMP*4747301
    END IF
    GOTO 30
  ELSE
    GOTO 140
  END IF
ELSE IF ( (A.GE.36) .AND. (A.LT.37) ) THEN
  IF (MVI.GT.7750000) THEN
    IF (IMP.EQ.1.495) THEN
      Mmax=IMP*5762000
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*4469324
Msup=IMP*4810869
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.37) .AND. (A.LT.38) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*4596961
Msup=IMP*5001847
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.38) .AND. (A.LT.39) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*4999703
Msup=IMP*5569863
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.39) .AND. (A.LT.40) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*5115921
Msup=IMP*5626265
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.40) .AND. (A.LT.41) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*5180281
Msup=IMP*5622121
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.41) .AND. (A.LT.42) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*5238657
Msup=IMP*5660556
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.42) .AND. (A.LT.43) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*5388827
Msup=IMP*5762000
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.43) .AND. (A.LT.44) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*5510369
Msup=IMP*5762000
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.44) .AND. (A.LT.45) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*5620576
Msup=IMP*5762000
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE IF ( (A.GE.45) .AND. (A.LT.46) ) THEN
IF (MVI.GT.7750000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*5732987
Msup=IMP*5762000
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
END IF
ELSE
IF (MVI.GT.7500000) THEN
IF (IMP.EQ.1.495) THEN
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
ELSE
Mmax=IMP*5762000
Msup=IMP*5762000
END IF
GOTO 30
ELSE
GOTO 140
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



END IF

```
C=====
C  CÁLCULO DE ESFUERZOS Y FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS POR LA APLICACIÓN
C  DEL MOMENTO INDICADO, ASÍ COMO LOS MÁXIMO Y SUPERIOR, A TRAVÉS DE UNA SUBROUTINA
C=====

30 CALL CALCESFUERZOS (MVI,CF)

OPEN(5,FILE='AUXESFSA',STATUS='OLD')      !SE ABRE EL ARCHIVO RESULTANTE, QUE
READ(5,5050)SCCF,DSP,Ps,Pp,MINT2          !GENERA LA SUBROUTINA Y SE LEEN LOS
                                           !VALORES RESULTANTES DE INTERÉS
CLOSE(5)

C=====
C  CÁLCULO DE CRECIMIENTO DE GRIETA POR EFECTO DE SOBRECARGAS (KI>KIC)
C=====

CALL CALCFACINT (A,Ps,Pp,MINT2)           !SE LLAMA A LA SUBROUTINA DE
                                           !CÁLCULO DE KI
OPEN(6,FILE='AUXFACINT',STATUS='OLD')     !SE LEE EL FACTOR KI RESULTANTE
READ(6,5080)KI CLOSE(6)

IF(KI.GE.1.45)THEN                        !SE HACE EL CÁLCULO PARA FACTORES QUE
DAIT=60                                   !SOBREPASEN UN KIC=1.45 MN/M^3/2

DO 40 I=1,15                              !SE COMIENZAN TANTEOS PARA IDENTIFICAR LA
CF=129.4-A                                 !PROF DE GRIETA EN LA QUE DEJA DE ALCANZARSE
CALL CALCESFUERZOS (MVI,CF)                !LA TENACIDAD DE FRACTURA ANTE EL
OPEN(5,FILE='AUXESFSA',STATUS='OLD')      !MOMENTO APLICADO
READ(5,5051)Ps,Pp,MINT2
CLOSE(5)

CALL CALCFACINT (A,Ps,Pp,MINT2)
OPEN(6,FILE='AUXFACINT',STATUS='OLD')
READ(6,5080)KI
CLOSE(6)

DK=KI-1.40                                !SE BUSCA QUE EL FACTOR DE INTENSIDAD LLEGUE A UN
IF (ABS(DK).GT.0.01)THEN                  !VALOR DE APROX 1.40 MN/M^3/2, MENOR A KIC
DAIT=DAIT/2
IF (DK.GT.0)THEN
A=A+DAIT
ELSE
A=A-DAIT
END IF
ELSE
GOTO 50
END IF
40 CONTINUE
GOTO 50
END IF

C=====
C  CÁLCULO DE CRECIMIENTO DE GRIETA POR EFECTOS DE FATIGA
C=====

CALL CALCESFUERZOS (Mmax,CF)              !SE CALCULAN ESFUERZOS CON EL Mmax
OPEN(5,FILE='AUXESFSA',STATUS='OLD')
READ(5,5070)Psmax,Ppmax,MINT2max
CLOSE(5)

CALL CALCFACINT (A,Psmax,Ppmax,MINT2max)  !SE CALCULA KImax

OPEN(6,FILE='AUXFACINT',STATUS='OLD')
READ(6,5080)KImax
CLOSE(6)
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
IF (KImax.GT.1.35) THEN                                !EL VALOR DEL FACTOR MÁXIMO SE LIMITA
  KImax=1.35                                          !PARA QUE NUNCA SOBREPASE LA TENACIDAD DE FRACTURA
END IF

CALL CALCESFUERZOS (Msup,CF)                          !SE CALCULAN ESFUERZOS CON EL Msup,
OPEN (5, FILE='AUXESFSA', STATUS='OLD')
READ (5, 5070) Pssup, Ppsup, MINT2sup
CLOSE (5)

CALL CALCFACTORINT (A, Pssup, Ppsup, MINT2sup)        !SE CALCULA KIsup,
OPEN (6, FILE='AUXFACINT', STATUS='OLD')
READ (6, 5080) KIsup
CLOSE (6)

IF (KIsup.GT.1.40) THEN                                !EL VALOR DEL FACTOR SUPERIOR SE LIMITA
  KIsup=1.40                                          !PARA QUE NUNCA SOBREPASE LA TENACIDAD DE FRACTURA
END IF

IF (KI.GT.0) THEN                                     !APLICACIÓN DE LEY DE SLOWIK CON LAS
  m=2.0                                               !CONSTANTES CORRESPONDIENTES
  n1=1.1
  p=0.7
  C=0.0032
  KIC=1.45
  DA=C * ((KImax**m) * (KI**n1)) / ((KIC-KIsup)**p)
  A=A+DA
END IF

C=====
C  CÁLCULO DE LA VARIACIÓN EN ESFUERZOS DEL ACERO DE PRESFUERZO Y SU DETERIORO
C=====

50  DSPKSI=DSP*14.22342/1000                          !EL ESFUERZO EN EL ACERO SE TRANSFORMA A KSI

IF (DSPKSI.GE.5) THEN                                !CUANDO DSPKSI SEA MENOR A 5 KSI NO HAY DAÑO
  NFALLA=10** (8.8-2.3*LOG10 (DSPKSI))
  DINM=1/NFALLA
ELSE
  DINM=0
END IF

DACUM=DACUM+DINM

WRITE (11, 5091) N, MVI, SCCF, DSPKSI, DACUM, KImax, KIsup, KI, A

ELSE
  GOTO 140
END IF

140  CONTINUE

END IF

CLOSE (11)

C=====
C  FORMATOS DEL PROGRAMA PRINCIPAL
C=====

5050  FORMAT (1X, F9.4, 1X, F9.4, 1X, F9.3, 1X, F10.3, 1X, F9.4)
5051  FORMAT (21X, F9.3, 1X, F10.3, 1X, F9.4)
5060  FORMAT (I10, 2X, F11.2, 2X, F10.5, 2X, F10.5, 2X, F15.10)
5070  FORMAT (21X, F9.4, 1X, F9.4, 1X, F11.1)
5080  FORMAT (F9.5)
5091  FORMAT (I10, 2X, F11.2, 2X, F10.5, 2X, F10.5, 2X, F15.10, 2X, F9.5, 2X, F9.5,
$2X, F9.5, 2X, F9.6)

END
```



## Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de concreto presforzado con agrietamiento



```
=====
C      INICIA SUBROUTINA PARA CALCULAR ESFUERZOS, USA COMO DATOS DE ENTRADA EL
C      MOMENTO POR CARGA VIVA MÁS IMPACTO,MVI, Y EL PERALTE NO AGRIETADO DE LA
C      SECCIÓN, CF
=====

      SUBROUTINE CALCESFUERZOS (MVI,CF)

      REAL MVI,CF,Dscb,Dscb,Dsp,Dss,PE,YP,C,DC,A4,DFS4,I4,ASA,ADFS,YT,
      $YNA,ISS,ISC,ITSA,MCM,MINT,DS,A3,DFS3,I3,scbi,scbi,spi,ssi,sccf,
      $scbf,spf,ssf,spii,Dsp2,sp2,Pp,Ps,MINT2

      OPEN(5,FILE='AUXESFSA',STATUS='UNKNOWN')           !CREACIÓN DE ARCHIVO PARA
      IF(CF.EQ.129.4) THEN                                !GUARDAR RESULTADOS
        Dscb=(76.85*MVI)/13113265
        Dscb=Dscb
        Dsp=(475.23*MVI)/13113265
        Dss=(514.37*MVI)/13113265
      ELSE
        IF(MVI.LE.4230000) THEN
          spii=-119.4709                                !ESFUERZO A NIVEL DE ACERO DE PRESF. ANTES DE
          scbi=-24.635                                  !APLICAR CARGAS VIVAS
          spi=-31.808
          ssi=-27.956
          Dscb=(76.85*MVI)/13113265
          Dscb=Dscb
          Dsp=(475.23*MVI)/13113265
          Dss=(514.37*MVI)/13113265
          sccf=scbi+Dscb
          spf=spi+Dsp/7.195
          Dsp2=spf-spii
          sp2=7.195*Dsp2
          Pp=20.729*sp2
          ssf=ssi+Dss/7.195
          IF(ssf.GT.0) THEN
            Ps=7.195*8.23224*ssf
          ELSE
            Ps=0
          END IF
          MCM=13277400
          MINT2=MCM+MVI-4593264-(71.85*Ps)-(60.45*Pp)
        ELSE
          PE=474070.77                                  !FUERZA EQUIVALENTE, PARA SECCIONES AGRIETADAS,
          YP=62.23897                                  !PROFUNDIDAD DE APLICACIÓN DE LA FUERZA EQUIVALENTE
          MCM=13277400
          IF(MVI.LE.8065000) THEN
            C=115.75
            DC=13.65
            DO 141 I=1,10
              A4=55.9*(C-102.1)
              DFS4=102.1+((C-102.1)/2)
              I4=(55.9)*((C-102.1)**3)/12)
              ASA=4737.76+A4
              ADFS=152525.237+(A4*DFS4)
              YT=ADFS/ASA
              YNA=C-YT
              ISS=441442.482+I4
              ISC=2496.6*((9-YT)**2)+954.1*((29.75-YT)**2)+
              $1078.68*((71.8-YT)**2)+A4*((DFS4-YT)**2)+149.148*((113-YT)**2)+
              $59.23*((124.4-YT)**2)
              ITSA=ISS+ISC
              MINT=MCM+MVI-PE*(YP-YT)
              DS=(PE/ASA)-((MINT*YNA)/ITSA)
              IF(ABS(DS).GT.0.25) THEN
                DC=DC/2
                IF(DS.GT.0) THEN
                  C=C+DC
                ELSE

```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
      C=C-DC
      END IF
      ELSE
      GOTO 143
      END IF
141  CONTINUE
      ELSE
      IF (MVI.LE.21560000) THEN
      C=71.8
      DC=30.3
      DO 142 I=1,11
      A3=17.8*(C-41.5)
      DFS3=41.5+((C-41.5)/2)
      I3=(17.8)*((C-41.5)**3)/12)
      ASA=3659.08+A3
      ADFS=75076+(A3*DFS3)
      YT=ADFS/ASA
      YNA=C-YT
      ISS=111334+I3
      ISC=2496.6*((9-YT)**2)+954.1*((29.75-YT)**2)+
      $A3*((DFS3-YT)**2)+149.148*((113-YT)**2)+59.23*((124.4-YT)**2)
      ITSA=ISS+ISC
      MINT=MCM+MVI-PE*(YP-YT)
      DS=(PE/ASA)-((MINT*YNA)/ITSA)
      IF (ABS(DS).GT.0.25) THEN
      DC=DC/2
      IF (DS.GT.0) THEN
      C=C+DC
      ELSE
      C=C-DC
      END IF
      ELSE
      GOTO 143
      END IF
142  CONTINUE
      ELSE
      WRITE(*,*) 'MOMENTO MAYOR AL PREVISTO'
      END IF
      END IF
```

```
C=====
C   CON LA PROFUNDIDAD C CALCULADA SE DETERMINA SI SE APLICA EL C O EL CF Y SE
C   CALCULAN LOS INCREMENTOS DE LOS ESFUERZOS
C=====
```

```
143 IF (C.LT.CF) THEN
      C=CF
      PE=474070.77
      YP=62.23897
      MCM=13277400
      IF (C.GT.102.1) THEN
      A4=55.9*(C-102.1)
      DFS4=102.1+((C-102.1)/2)
      I4=(55.9)*((C-102.1)**3)/12)
      ASA=4737.76+A4
      ADFS=152525.237+(A4*DFS4)
      YT=ADFS/ASA
      YNA=C-YT
      ISS=441442.482+I4
      ISC=2496.6*((9-YT)**2)+954.1*((29.75-YT)**2)+
      $1078.68*((71.8-YT)**2)+A4*((DFS4-YT)**2)+149.148*((113-YT)**2)+
      $59.23*((124.4-YT)**2)
      ITSA=ISS+ISC
      MINT=MCM+MVI-PE*(YP-YT)
      ELSE
      A3=17.8*(C-41.5)
      DFS3=41.5+((C-41.5)/2)
      I3=(17.8)*((C-41.5)**3)/12)
      !UN "C" MENOR INDICA QUE LA GRIETA EXISTENTE SE
      !SE ABRIÓ AL MÁXIMO, SIN ALCANZAR LA PROFUNDIDAD
      !DEL EJE NEUTRO, ASÍ QUE SE TOMA LA LONGITUD DE
      !LA GRIETAYA EXISTENTE
      !MOMENTO POR LAS CARGAS MUERTAS DEL PUENTE
      !PROFUNDIDAD C=CF
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```

ASA=3659.08+A3
ADFS=75076+(A3*DFS3)
YT=ADFS/ASA
YNA=C-YT
ISS=111334+I3
ISC=2496.6*((9-YT)**2)+954.1*((29.75-YT)**2)+
$A3*((DFS3-YT)**2)+149.148*((113-YT)**2)+59.23*((124.4-YT)**2)
ITSA=ISS+ISC
MINT=MCM+MVI-PE*(YP-YT)
END IF
END IF

sccci=- (242934.55/3767.23) - ((242934*31.48*(CF-81.41))/5172596.4) +           !ESFUERZOS
$( (9654480*(CF-81.41))/5172596.4) + ((3622920*(CF-52.55))/13113265)         ! INICIALES
scbi=-24.635
spi=-31.808
ssi=-27.956
sccf=( (MINT*(CF-YT))/ITSA) - (PE/ASA) scbf=( (MINT*(129.4-YT))/ITSA) - (PE/ASA)
spf=( (MINT*(118.6-YT))/ITSA) - (PE/ASA)   ssf=( (MINT*(124.4-YT))/ITSA) - (PE/ASA)

Dsccl=sccf-sccci           !INCREMENTOS DE LOS ESFUERZOS
Dscb=scbf-scbi
Dsp=7.195*(spf-spi) Dss=7.195*(ssf-ssi)

```

```

C=====
C  OBTENCIÓN DE FUERZAS Y MOMENTO INTERNO PARA CALCULAR FACTORES DE
C  INTENSIDAD DE ESFUERZOS
C=====

```

```

spii=-119.4709
Dsp2=spf-spii           !ESTA VARIACIÓN DE ESFUERZOS VÁLIDA SÓLO
sp2=7.195*Dsp2         !PARA CÁLCULO DE FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS
Pp=20.729*sp2
IF(ssf.GT.0) THEN
  Ps=7.195*8.23224*ssf
ELSE
  Ps=0
END IF
MCM=13277400
MINT2=MCM+MVI-4593264-(71.85*Ps)-(60.45*Pp)

END IF
END IF

WRITE(5,5030) sccf,Dsp,Ps,Pp,MINT2

CLOSE(5)

```

```

C=====
C  FORMATOS DE LA SUBROUTINA
C=====

```

```
5030 FORMAT(F10.4,F10.4,F10.3,F11.3,F11.1)
```

```
END
```

```

C=====
C  INICIA SUBROUTINA PARA CALCULAR FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS,
C  USA COMO VARIABLES DE ENTRADA EL TAMAÑO DE GRIETA, LAS FUERZAS DE
C  CERRAMIENTO POR ACERO DE REFUERZO Y PRESFUERZO Y EL MOMENTO INTERNO
C=====

```

```
SUBROUTINE CALCFACTORINT (A,Ps,Pp,MINT2)
```

```
REAL A,Ps,Pp,MINT2,D,B,YM,YF,KIM,KIF,KI,KIMN
```

```
D=129.4
```

```
!PERALTE TOTAL DE LA SECCIÓN
```



Modelo para el pronóstico del deterioro por fatiga de un puente de  
concreto presforzado con agrietamiento



```
IF (A.LE.17.8) THEN
  B=55.9
ELSE
  IF ((A.GT.17.8).AND.(A.LT.36.9)) THEN
    B=55.9-((A-17.8)/19.1)*(55.9-17.8)
  ELSE
    B=17.8
  END IF
END IF

YF=1.99*((A/D)**0.5)-0.41*((A/D)**1.5)+18.7*((A/D)**2.5)-
$38.48*((A/D)**3.5)+53.85*((A/D)**4.5)
KIF=(474070+Ps+Pp)*YF/(D**0.5)*B

YM=6*(1.99*((A/D)**0.5)-2.47*((A/D)**1.5)+12.97*((A/D)**2.5)-
$23.17*((A/D)**3.5)+24.8*((A/D)**4.5)
KIM=MINT2*YM/(D**1.5)*B
KI=KIM-KIF
KIMN=KI/101.4286
!EL FACTOR EN KG/CM^3/2 SE TRANSFORMA A MN/M^3/2

OPEN(6,FILE='AUXFACINT',STATUS='UNKNOWN')
WRITE(6,5040) KIMN

CLOSE(6)

C=====
C   FORMATOS DE LA SUBROUTINA
C=====

5040 FORMAT(F9.5)

END
```