



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación MonteCarlo

Saúl Enrique Crespo Sánchez
Francisco Carrión Viramontes
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Andrés Hernández Guzmán
José Alfredo López López

**Publicación Técnica No. 379
Sanfandila, Qro. 2013**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Análisis del deterioro estructural por fatiga y
prognosis de un puente típico de concreto
utilizando simulación MonteCarlo**

Publicación Técnica No. 379
Sanfandila, Qro. 2013

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el M. C. Saúl Enrique Crespo Sánchez, el Dr. Francisco Carrión Viramontes, el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el Ing. Andrés Hernández Guzmán y el Dr. José Alfredo López López.

Se reconoce y agradece la colaboración del Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, investigador de la Universidad Autónoma de Querétaro, por sus aportaciones al presente trabajo, además de la participación del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la revisión y las facilidades para la realización del presente trabajo.

Índice

Resumen.....	v
Abstract	vii
Resumen ejecutivo.....	ix
Capítulo 1 Introducción.....	1
Capítulo 2 Modelos para el análisis del deterioro del concreto	7
2.1 Mecanismos de deterioro del concreto.....	7
2.2 Fenómeno de fatiga	9
2.3 Modelos de deterioro por fatiga.....	9
2.4 Método de elementos finitos	12
2.5 Simulación MonteCarlo	13
2.6 Técnicas de detección de daño estructural	13
2.6.1 Inspección visual	14
2.6.2 Líquidos penetrantes.....	15
2.6.3 Corrientes parásitas o de Eddy	15
2.6.4 Partículas magnéticas.....	16
2.6.5 Inspección por ultrasonido	16
2.6.7 Emisiones acústicas.....	17
2.6.6 Radiografía industrial	17
Capítulo 3 Diseño del modelo de simulación MonteCarlo	19
3.1 Atributos geométricos y composición de puente tipo	19
3.2 Análisis de aforo vehicular	21
3.3 Crecimiento del flujo vehicular	25
3.4 Determinación de escenarios de carga mediante simulación MonteCarlo.....	25
3.5 Modelo del puente.....	27
3.6 Carga viva por tráfico vehicular	27
3.7 Obtención de esfuerzos en vigas de superestructura	37
3.8 Evaluación de deterioro estructural en la superestructura	32

Capítulo 4	Resultados y discusión	35
Capítulo 6	Bibliografía	49
Apéndice A	Revisión de base de datos SIPUMEX.....	53
Apéndice B	Análisis de aforo vehicular en el puente Río Papaloapan	61
Apéndice C	Diseño de la superestructura del puente de concreto reforzado tipo.....	77
Apéndice D	Programa en Matlab para la generación de escenarios de carga mediante simulación MonteCarlo	87

Resumen

Todas las estructuras civiles acumulan daño gradualmente durante su vida útil, particularmente, los puentes carreteros, siendo la fatiga y los efectos ambientales, las principales causas de deterioro. En México, según el Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) más del 60% de los 8000 puentes tienen más de 30 años de servicio. Este trabajo se centra en el deterioro estructural en puentes y por ende se propone una metodología que permita analizar los puentes de concreto reforzado por efecto de fatiga, determinar así la capacidad de carga y estimar la vida útil de estos, con el objeto de optimizar y planear de mejor manera los programas de conservación para este tipo de estructuras. En esta metodología, los escenarios de carga son reproducidos mediante simulación MonteCarlo con base en distribuciones estadísticas de configuración y pesos brutos vehiculares del tránsito. Las distribuciones de esfuerzos provocados por estos escenarios de carga en el puente son obtenidos de un análisis de elementos finitos de la estructura mientras que el deterioro estructural es evaluado mediante la evolución del crecimiento de grieta en la zona más esforzada de la superestructura. Un caso de estudio es tratado con esta metodología: un puente carretero tipo, cuyos atributos geométricos representan en su mayoría al conjunto de puentes de la red federal de carreteras mexicanas, sujeto a cargas simuladas con base en distribuciones estadísticas de configuración y pesos brutos vehiculares obtenidas en el aforo y pesaje vehicular realizado en un tramo carretero representativo del país.

Abstract

All civil structures accumulate damage gradually during its useful life, particularly, highway bridges, being fatigue one of the main causes of its damage. In Mexico, according to the Bridge Management System (SIPUMEX), more than 60% of the 8000 bridges are older than 30 years. Due to this, in this work a methodology was developed to allow the analysis of structural damage in reinforced concrete bridges by fatigue; in order to determine load capacity, to estimate the useful life of these bridges, and to optimize the conservation programs of such structures. In this methodology, load scenarios are reproduced through MonteCarlo simulation based on distributions of statistical configuration and the transit gross vehicle weight. The distribution of stresses on the bridge caused by these load scenarios are obtained from an analysis of finite elements of the structure, while the structural damage is evaluated through the evolution of crack growth in the most demanding region of the superstructure. A study case is treated with this methodology considering a common bridge type in the Mexican highways, with geometric attributes that represent in its majority this set of bridges. For the analysis, the loads distributions were obtained from a field study where the vehicles configurations and gross weights were measured and analyzed statistically.

Resumen ejecutivo

Los puentes carreteros son estructuras que están expuestas al deterioro por efectos de fatiga debido a las condiciones de carga a la que están sometidos (cargas dinámicas cíclicas) y a efectos ambientales debidos a la exposición a ambientes corrosivos, pudiendo ser estos factores responsables de fallas importantes debido a su efecto degradante en la rigidez de los mismos, llevándolos al colapso, incluso antes de haber alcanzado su resistencia.

La Red Federal de Carreteras en México cuenta con más de 8000 puentes carreteros. Más del 60% de estos opera con más de 30 años de servicio. Esta situación no sólo impacta en el posible deterioro físico de los materiales de composición de los mismos, sino en el incremento de los elementos mecánicos a los que son sujetos sus componentes, debido a la evolución de los vehículos de diseño en las actualizaciones de las normativas y a la demanda de los transportistas por la operación lucrativa de vehículos con mayor capacidad de carga y el notable incremento del parque vehicular, producto del desarrollo económico del país.

Aunque la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) cuenta con un programa de monitoreo de puentes (Sistema de Puentes de México, SIPUMEX) que tiene como finalidad establecer un inventario de la totalidad de los puentes de la Red Federal de Carreteras, incluyendo características físicas, atributos geométricos, ubicación y estado de los mismos, es cierto que la evaluación de la condición estructural en este sistema es realizada de manera subjetiva por supervisores a través de inspección visual, lo cual limita contar con una evaluación objetiva y realista del estado en el que se encuentran estos sistemas estructurales.

En el presente estudio se expone una alternativa para la evaluación de la condición estructural de puentes de concreto reforzado sujetos a efectos de fatiga. En esta metodología, los escenarios de carga son reproducidos mediante simulación MonteCarlo con base en distribuciones estadísticas de configuración y pesos brutos vehiculares del tránsito. Las distribuciones de esfuerzos provocadas por estos escenarios de carga en el puente son obtenidos de un análisis de elementos finitos de la estructura mientras que el deterioro estructural es evaluado mediante la evolución del crecimiento de grieta en la zona más esforzada de la superestructura. Un caso de estudio es tratado con esta metodología: un puente carretero “tipo”, cuyos atributos geométricos representan en su mayoría al conjunto de puentes de la Red Federal de Carreteras, sujeto a cargas simuladas con base en distribuciones estadísticas de configuración y pesos brutos vehiculares obtenidas en el aforo y pesaje vehicular realizado en un tramo carretero representativo del país.

1 Introducción

Todas las estructuras acumulan daño gradualmente durante su vida útil. En general, cualquier estructura es susceptible de presentar fallas, ya que las condiciones reales de servicio y/o las características de los materiales, pueden discrepar de las que esperaba el diseñador. Una de las acciones a las que se atribuyen la falla en diversas estructuras es la fatiga. Ésta se define como el daño de un material resultante de la aplicación de esfuerzos repetitivos (carga cíclica) (Torres, 2007). El deterioro por fatiga se inicia con defectos o micro-grietas que actúan como zonas de concentración de esfuerzos, generando la aparición y propagación de grietas. Específicamente, una grieta de fatiga se puede iniciar en cualquier lugar de un componente donde el esfuerzo y la deformación sean lo suficientemente altos para causar un deslizamiento alterno continuo, luego sigue un periodo de propagación, también por deslizamiento alterno, hasta que la grieta alcanza un tamaño crítico. En consecuencia la vida de fatiga de un componente estructural por iniciación y propagación de una grieta es igual a la suma de la fase de iniciación y de propagación. Cuando un componente contiene una imperfección tipo grieta se reduce o elimina la vida de la fase de iniciación (Hernández, 2002).

Los puentes carreteros son estructuras susceptibles al deterioro por efectos de fatiga debido a las condiciones de carga a la que están sometidos (cargas dinámicas cíclicas), pudiendo ser éstas responsables de fallas importantes debido a su efecto degradante en la rigidez de los mismos, llevándolos al colapso, incluso antes de haber alcanzado su resistencia.

Según el departamento de transporte de EE.UU. (FHWA Report, 1989), se estima que en ese país existían cerca de 545 000 puentes carreteros, de los cuales el 41% está estructuralmente dañado o su funcionamiento era obsoleto. Este fenómeno se reproduce a nivel mundial, siendo la principal causa el hecho de que la mayoría de ellos tienen más de 20 años de servicio, aunado a que en los últimos años los flujos vehiculares se han incrementado considerablemente, al igual que la capacidad de carga de los vehículos.

Nuestro país no se escapa de este panorama, es por esto que Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) tienen sus propios programas de conservación de puentes. El más ambicioso de estos programas fue implantado por SCT, firmado en 1992 con el Directorio Danés de Carreteras. Este programa lleva como nombre SIPUMEX, el cual permite contar con un inventario de la totalidad de los puentes de la Red Federal de Carreteras, en el que se incluyen las características, ubicación y estado físico.

Según la última entrega del programa SIPUMEX (Marzo, 2010), de los 7 585 puentes evaluados en el sistema, el 61.75% de ellos fue construido entre los años 1931 y 1980, es decir, este porcentaje de puentes oscila entre los 30 y 80 años de servicio (figura 1.1).

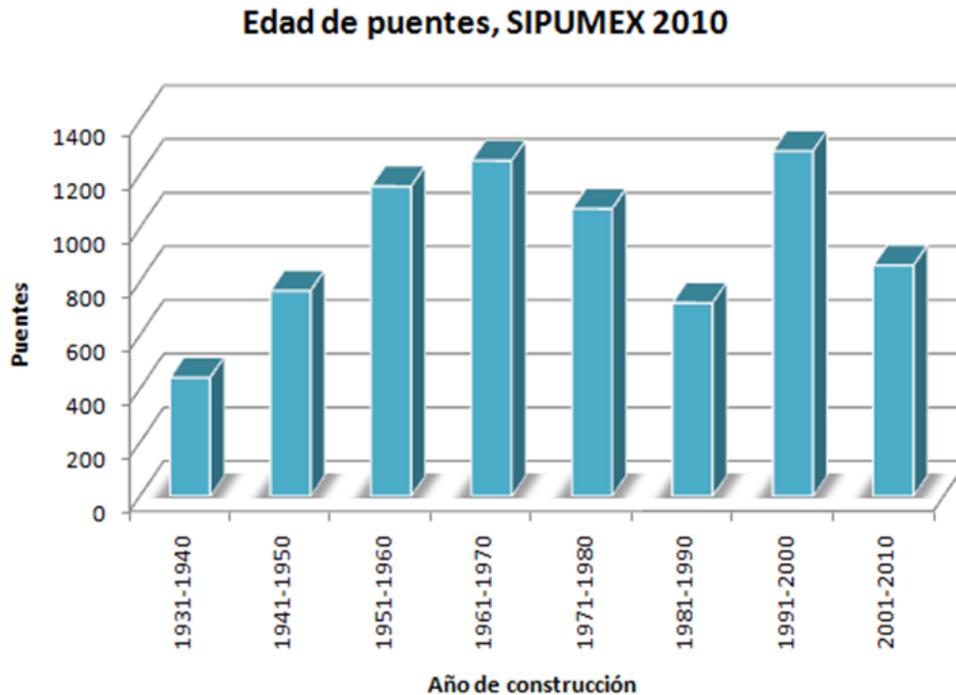


Figura 1.1 Edad de puentes, (SIPUMEX, 2010)

Esto aunado a que en los últimos años, el desarrollo tecnológico ha propiciado la aparición de vehículos cada vez más pesados en respuesta a la demanda de los transportistas que encuentran más lucrativa la operación de vehículos de mayor peso y, por otra parte, el desarrollo económico reflejado en un notable incremento del parque vehicular (Figura1.2), nos lleva a reconocer la necesidad de estudiar el efecto de estos nuevos escenarios de cargas en este tipo de estructuras.

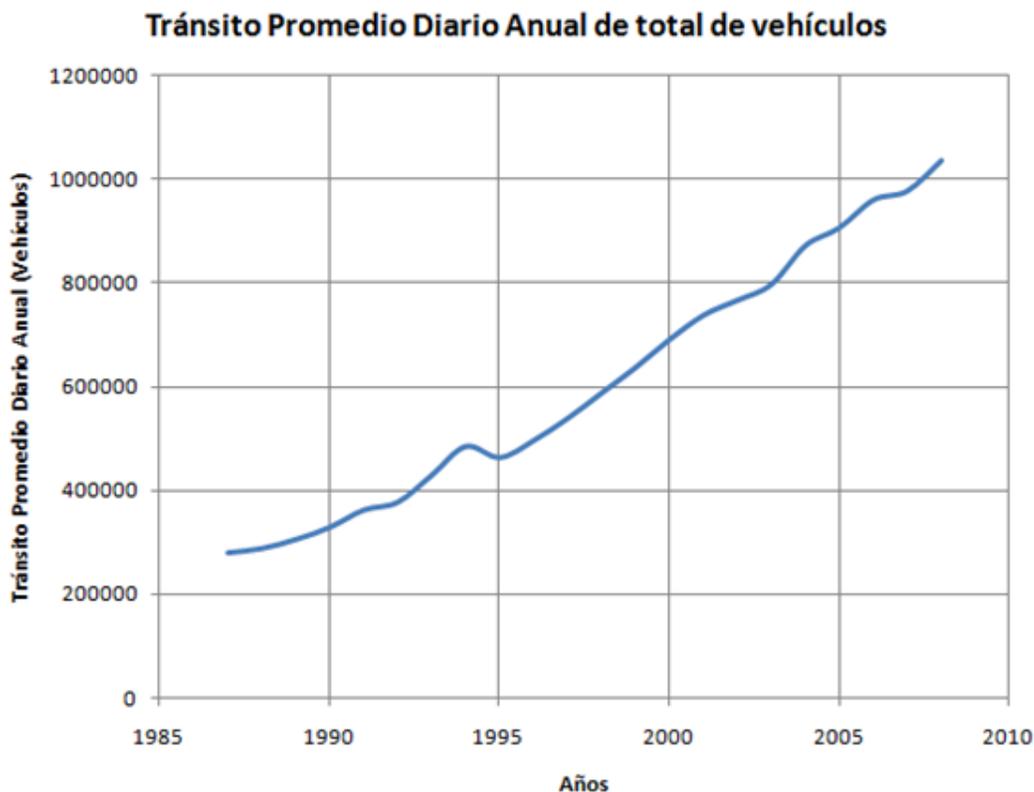


Figura 1.2 Tránsito Promedio Diario Anual, total de vehículos, (Anuarios estadísticos, SCT)

Una explicación de la operación adecuada de estas estructuras a pesar de los factores adversos antes descritos, se da argumentando que la mayoría de éstas, fueron diseñadas con criterios de diseño muy conservadores, no obstante, es claro el riesgo al que están sujetas de seguir aumentando los flujos y las capacidades de los vehículos que circulan sobre ellas, además del considerable rezago en su conservación, un factor más en el deterioro físico de las mismas.

En nuestro país, la necesidad de conservar el inventario de puentes de la Red Federal de Carreteras ha llevado a proponer el esquema de un sistema de administración de puentes, que no solo contenga información relevante de los puentes, sino que incorpore módulos de capacidad de carga y vida útil, además de módulos económicos en la estimación de costos de rehabilitación y un modelo de asignación de prioridades de conservación, basándose en información objetiva, actualizada y completa del estado de las estructuras (Carrión, 2006).

Existen técnicas con el potencial para evaluar de una manera global estas estructuras: el análisis de vibraciones y el análisis modal. En ambos casos, el monitoreo se realiza mediante el análisis de oscilaciones en el comportamiento característico de vibración a través de la frecuencia natural, razón de amortiguamiento y formas modales. Estas técnicas han resultado ser muy efectivas para el estudio de estas estructuras, actualmente es posible establecer

criterios de mantenimiento predictivo, con base en los cuales se predicen fallas mecánicas y las causas de las mismas. Sin embargo, éstas técnicas presentan la dificultad de que se requieren fuerzas de excitación de gran magnitud, proporcionales al tamaño de la estructura que se va a excitar, además de la utilización de un número considerable de sensores para realizar las mediciones.

En un esfuerzo por obtener información sobre la condición estructural del inventario de puentes de la Red Federal de Carreteras, en el Sistema de Puentes Mexicanos, se llevaron a cabo inspecciones visuales con el fin de determinar un índice de calificación de la condición estructural de los diferentes componentes de los puentes (subestructura, pilas, superestructura, etc.) y del puente en general, ponderando las calificaciones de sus componentes. La escala de las calificaciones empleada va de 0 a 5, donde la calificación 0 denota condiciones excelentes y la calificación 5 una condición crítica del puente. A continuación se muestran los resultados del análisis de estas calificaciones con respecto a la edad de los puentes registrados en SIPUMEX.

En la figura 1.3 pueden observarse las calificaciones de la condición estructural de la superestructura de los puentes de la Red Federal de Carreteras relacionadas con la edad de estos, mientras que en la figura 1.4, puede verse el valor promedio de estas calificaciones de acuerdo a las edades. En esta última, es importante notar el salto de un punto en la escala de calificaciones en 30 años de servicio de la superestructura, mostrando el deterioro generado en ese periodo de tiempo. De aquí, la importancia de formular una metodología que permita sin intervención física alguna, predecir mediante simulación, los efectos que generará el tráfico vehicular en nuestro país sobre este tipo de estructuras, las cuales en un gran porcentaje, rebasan ese periodo de vida.

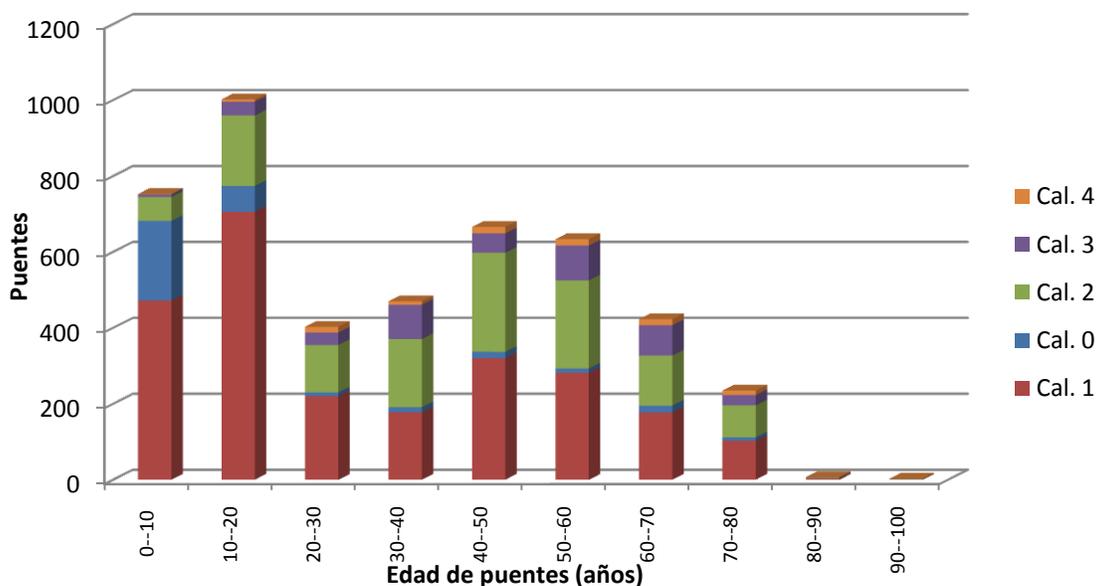


Figura 1.3 Calificaciones de condición estructural de superestructura de puentes (SIPUMEX, 2010)

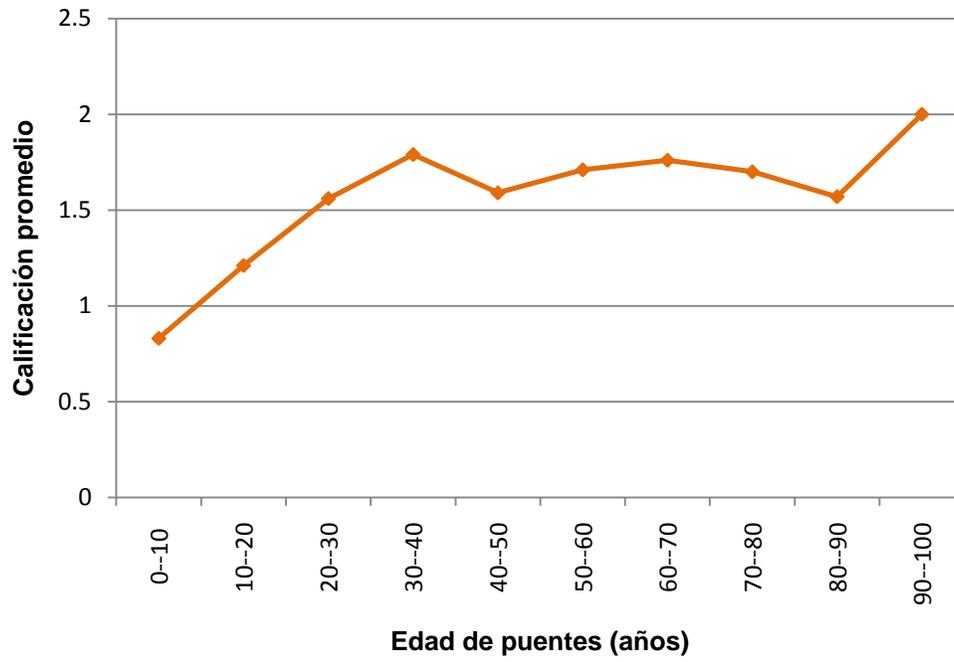


Figura 1.4 Calificaciones promedio de condición estructural de superestructura de puentes (SIPUMEX, 2010)

2 Modelos para el análisis del deterioro del concreto

2.1 Mecanismos de deterioro del concreto

En general, los factores que contribuyen al deterioro de estructuras de concreto, asociados con la carga y las condiciones ambientales pueden clasificarse en:

- *Efectos mecánicos.* Resultan en un daño acumulado que se manifiesta en agrietamiento en el concreto, fracturas, daños en el refuerzo y desprendimiento del recubrimiento en las piezas.
- *Efectos físicos.* Incluyen el agrietamiento por contracción del concreto, gradientes de temperatura repentinos y presiones debidas a la recristalización de las sales en los poros.
- *Efectos químicos.* Incluyen la contaminación por cloruros, reacción álcali-silica y el ataque de sulfatos y ácidos, resultando generalmente en reacciones expansivas y daño subsecuente en el concreto (Buyukozturk).
- *Efectos electroquímicos.* Incluyen la corrosión del acero de refuerzo cuya capa protectora se comienza a despasivar por la carbonatación y el ataque de los cloruros (Torres, 2001).

El deterioro estructural de puentes carreteros es un proceso complejo ya que varía principalmente con la aplicación de las cargas, las condiciones ambientales, el diseño inicial y su construcción, el comportamiento real del sistema estructural y la calidad de los materiales utilizados, entre otros (Lounis, 2002). Sin embargo, se ha reconocido que los ambientes corrosivos y las condiciones de carga cíclicas son las principales causas de deterioro en las estructuras de concreto reforzado. Por un lado, la corrosión, forma más común de deterioro del acero, la cual consiste en la desintegración del material como resultado de acciones químicas y electroquímicas. Por el otro, la fatiga, daño resultante de la aplicación de esfuerzos repetitivos (carga cíclica) (Bastidas-Arteaga, 2009).

La corrosión es el daño que sufren los materiales por el transporte de iones debido a la diferencia de potencial, en el material mismo o entre éste y el medio que lo rodea, deteriorando las propiedades del material (Costa, 2005). La corrosión puede ser uniforme y localizada, la primera se desarrolla a una misma velocidad en toda la superficie del material, mientras que la segunda es un ataque acelerado de una posición superficial determinada (Cortes, 2008). Cuando el acero embebido en el concreto se corroe, se reduce la sección de la barra de

acero, ya que el fierro contenido en el acero reacciona con el oxígeno presente y se forma una capa de productos de corrosión en el perímetro de la misma. Como el volumen ocupado por dicho óxido es mayor que el que ocupaba el acero original se crean presiones contra el concreto que rodea al acero, propiciando la formación de grietas y desprendimientos en el concreto (Torres, 2001).

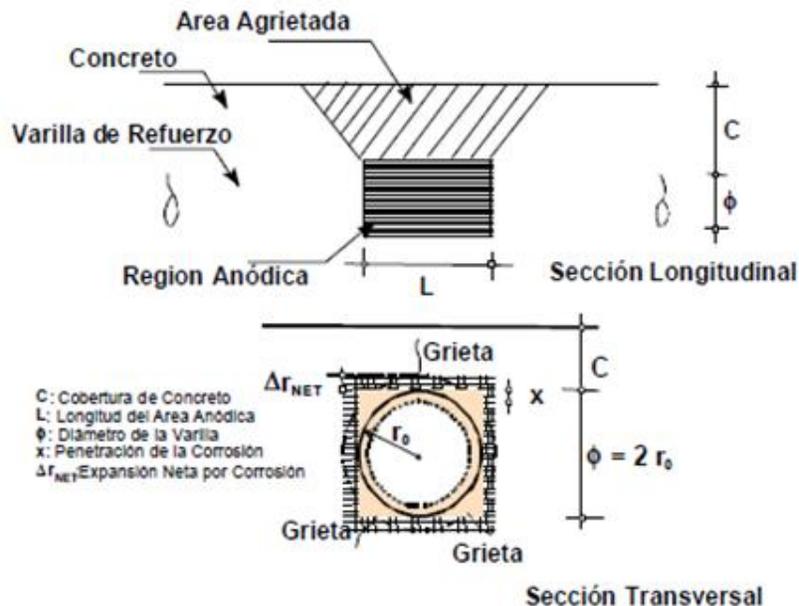


Figura 2.1 Parámetros en el agrietamiento del concreto por corrosión del acero (Torres, 1999)

Por otro lado, las estructuras están expuestas a condiciones de carga que pueden causar diferentes niveles de daño durante su vida de diseño. La fatiga es uno de los tipos de daño más comunes en las estructuras cuando están sujetas a patrones de cargas cíclicas o repetitivas (Torres, 2007). El daño por fatiga comienza con el agrietamiento que se presenta en el elemento estructural y puede continuar con su crecimiento y con la iniciación de otras grietas (Etube, 2001).

A principios de 1960, Paris (Paris, 1960 & 1961) demostró que la mecánica de fractura es una herramienta útil para caracterizar el crecimiento de grietas por fatiga. Desde entonces, la aplicación de la mecánica de fractura a los problemas de fatiga se ha convertido en una práctica común, sin embargo, hay todavía un buen número de cuestiones controversiales y preguntas sin respuesta en este campo (Anderson, 2001).

Algunos estudios experimentales (Schlafli, 1998) han demostrado la importancia del proceso de fatiga en la falla final e influencia en las condiciones de servicio de elementos estructurales con carga externa de gran amplitud cuando el esfuerzo del concreto sobrepasa el 55-60% de la resistencia estática (Zanuy, 2007).

2.2 Fenómeno de fatiga

Mientras que un elemento de concreto puede estar seguro contra el colapso (estado límite último), deformaciones excesivas pueden presentarse debido al daño progresivo provocado por cargas de fatiga (Rao, 2004). Una de las consecuencias de estas deformaciones excesivas es el agrietamiento, el cual es uno de los más importantes límites de serviciabilidad considerados en el diseño de elementos de concreto reforzado (Rao, 1991).

El crecimiento progresivo de la grieta bajo cargas cíclicas influye en el comportamiento del elemento, provocando cambios significativos en las propiedades mecánicas de los materiales que lo componen (resistencia, dureza, rigidez, etc.) que finalmente pueden llevarlo al colapso (Carpinteri, 2004), el daño progresivo por fatiga también es también indicado por la reducción de la pendiente de la curva esfuerzo deformación conforme se incrementa el número de ciclos de carga, además del microagrietamiento, la carga de fatiga causa cambios en la estructura de poro de la pasta de cemento del concreto (ACI, 1974).

Es importante hacer notar que en concreto reforzado el problema es todavía más complejo, ya que una vez que una grieta se ha abierto durante la carga de fatiga, la pérdida de agregado puede impedir que la grieta se cierre, además, en este material heterogéneo, la interacción entre el concreto y el acero debe ser considerada (Neild, 2002).

2.3 Modelos de deterioro por fatiga

El estudio de los mecanismos y procesos de propagación de grietas en sólidos, así como la distribución de esfuerzos y deformaciones que ocurren en un material agrietado o con discontinuidades, es tratado por la Mecánica de Fractura Elástica Lineal, propuesta por Griffith en 1920, con su criterio energético de propagación de grietas (Hernández, 2002). El llamado esfuerzo de fractura de Griffith se plantea en la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2TE}{\pi c}} \quad (2.1)$$

En donde T es la energía específica de superficie y c es la longitud de la grieta y E el módulo elástico del material en cuestión (Kaplan, 1961). Años más tarde, Irwin desarrolló uno de los más importantes avances de la mecánica de fractura al formular que la distribución de esfuerzos alrededor de la punta de la grieta está dado por

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.2)$$

Donde $f_{ij}(\theta)$ es una función conocida de θ y K_I es el factor de intensidad de esfuerzos para el modo I de agrietamiento y se puede expresar como:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{a} \quad (2.3)$$

Donde a es la longitud de la grieta inicial y β es un factor adimensional que para un elemento de tamaño finito depende de la longitud de la grieta y de la geometría del cuerpo sometido a esfuerzo, que de manera general se expresa como la longitud L de una de sus dimensiones (Hernández, 2002).

Existen una cantidad considerable de modelos que describen esta relación, teniendo como base la llamada ecuación de propagación de grietas de Paris (Paris, 1960), la cual está dada por:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (2.4)$$

Donde C y n son constantes que dependen del material, y ΔK , es la variación del factor de intensidad de esfuerzo en un ciclo de carga.

Dos de las leyes más comúnmente usadas basadas en la ley de Paris son la ley de Walker (Walker, 1970) y la ley de Forman (Foreman, 1967). Por un lado la ley de Walker está descrita por la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = C K_{I_{max}}^m \Delta K_I^n \quad (2.5)$$

Donde $K_{I_{max}}$ es el factor de intensidad de esfuerzos correspondiente al límite de carga por fatiga más alto y C , m y n son parámetros correspondientes al material. Mientras que la ley de Forman está dada por:

$$\frac{da}{dN} = \frac{K_{I_{max}}^m \Delta K_I^m}{K_{IC} - K_{max}} \quad (2.6)$$

Sin embargo, fueron Bazant y Xu (Bazant, 1991) quienes propusieron la siguiente modificación a la ley de Paris, para su aplicación en concreto:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K_I}{K_{IC}} \right)^n \quad (2.7)$$

Donde

$$K_{IC} = K_{If} \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \beta = \frac{d}{d_0} \quad (2.8 \text{ y } 2.9)$$

K_{If} es la tenacidad a la fractura de una estructura infinitamente grande, d es la dimensión característica de la estructura y d_0 es una constante empírica. La

constante C no necesita ser ajustado si ΔK_I lo ha sido. Esta propuesta ha sido validada para cargas de amplitud constante y un rango de carga particular (Bazant, 1991). Slowik (Slowik, 1996) y sus colaboradores, desarrollaron un modelo elástico lineal simplificado basado también en la ley de París. El cual describe el incremento de la longitud de grieta equivalente a en la región en la que $K_I < K_{IC}$ y se enuncia de la siguiente manera:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{K_{I_{max}}^m \Delta K_I^n}{(K_{IC} - K_{I_{sup}})^p} + F(a, \Delta\sigma) \quad (2.10)$$

Donde C es un parámetro que da una medida del crecimiento de grieta por ciclo de carga, $K_{I_{sup}}$ es el máximo factor de intensidad de esfuerzo jamás alcanzado por la estructura en su historial de carga, K_{IC} es la tenacidad a la fractura, $K_{I_{max}}^m$ es el máximo factor de intensidad de esfuerzo en un ciclo, N es el número de ciclos de carga, a es la longitud de la grieta, ΔK es el rango de factores de intensidad de esfuerzo y m , n , y p son constantes. Estas constantes fueron determinadas por Slowik usando datos experimentales 2, 1.1 y 0.7 respectivamente (Slowik, 1996). En las figuras 2.2a y 2.2b, puede observarse el efecto de la variación de los parámetros σ_{ISUP} y σ_{IMAX} del modelo de Slowik. Puede verse que en tamaños de grieta considerables, el efecto de estos parámetros incrementa la velocidad de crecimiento de grieta, con respecto al modelo de Paris, el cual no considera el efecto de estas sobrecargas.

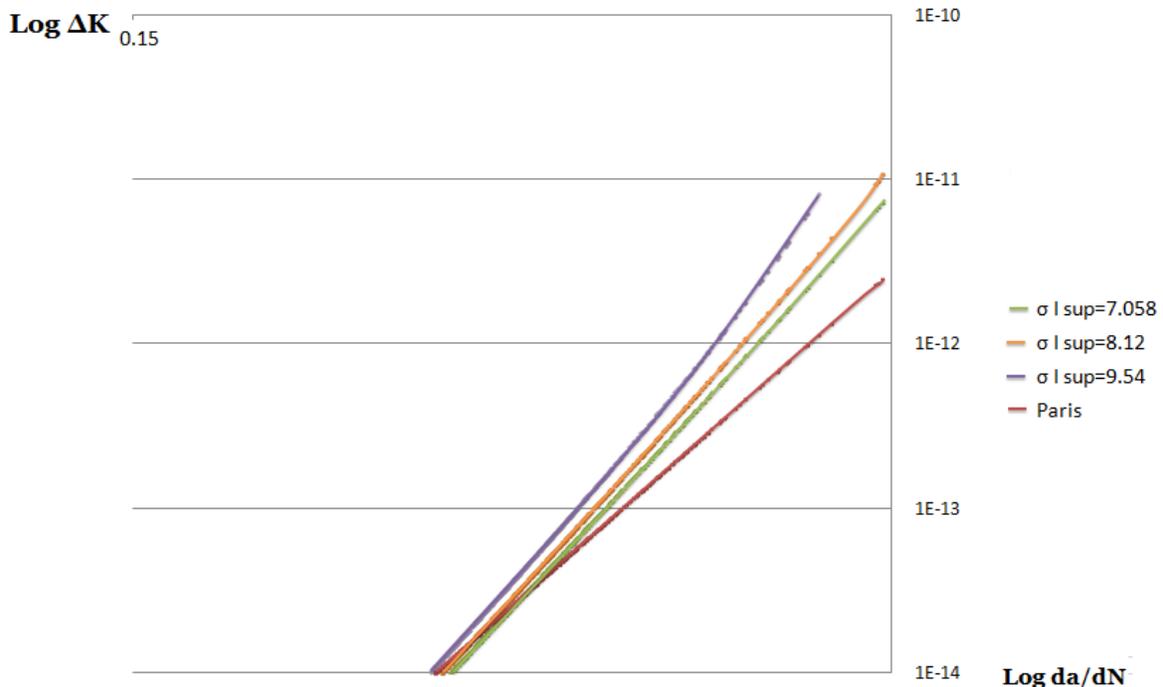


Figura 2.2a Análisis de modelos de Paris y Slowik, variación en σ_{ISUP}

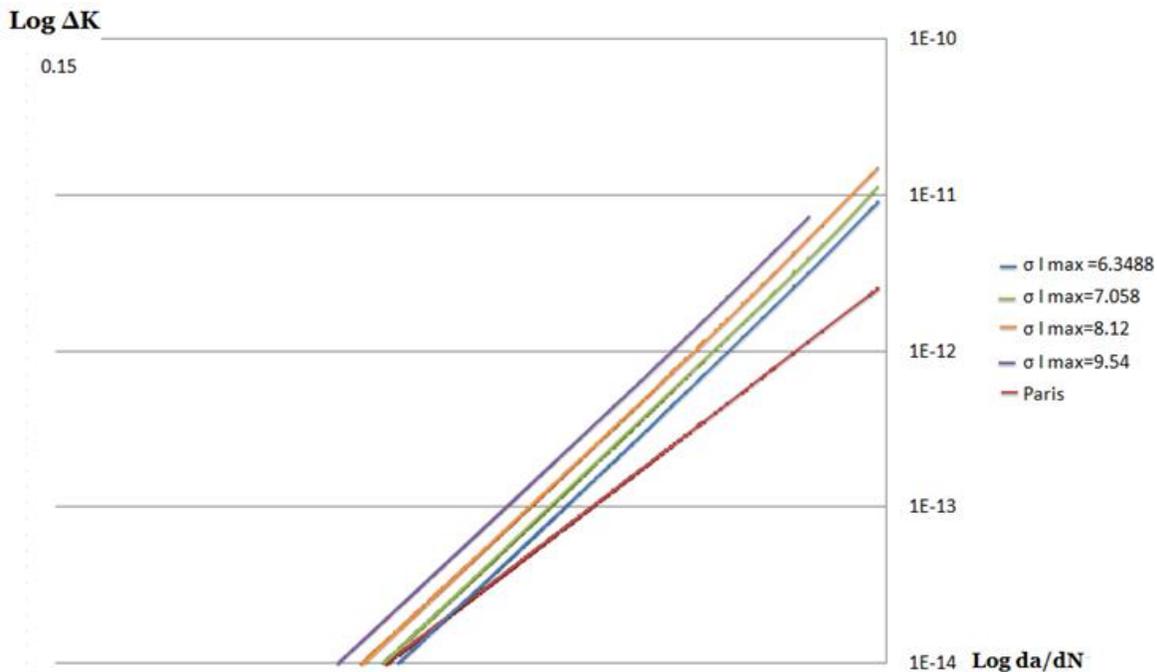


Figura 2.2b Análisis de modelos de Paris y Slowik, variación en σ_{IMAX}

2.4 Método de elementos finitos

El método de simulación por elementos finitos, originalmente introducido por Turner, es una poderosa técnica computacional para aproximar soluciones a una variedad de problemas de ingeniería del “mundo real”, teniendo dominios complejos sujetos a condiciones de frontera generales. Este método se ha posicionado como un método fundamental en la modelación de fenómenos físicos en varias disciplinas de la ingeniería. Un fenómeno físico normalmente ocurre en un continuo de materia (sólido, líquido o gas) involucrando grandes campos de variables. El campo de variables varía de un punto a otro, poseyendo así un número infinito de soluciones en el dominio.

La base del método se apoya en la descomposición del dominio en un número finito de subdominios (elementos), para expresar la variable de campo desconocida en términos de las funciones de aproximación asumidas dentro de cada elemento. Estas funciones se definen en términos de los valores de las variables de campo en puntos específicos, llamados nodos. Los nodos son usualmente localizados a lo largo de las fronteras de los elementos y se conectan con elementos adyacentes (Madenci, 2006).

El método de elementos finitos involucra la modelación de una estructura empleando pequeños elementos interconectados llamados elementos finitos. Una función de desplazamiento es asociada a cada elemento. Cada elemento interconectado está ligado entre sí, directa o indirectamente a través de interfases comunes, como lo pueden ser nodos, superficies comunes o bordes. Al usar incógnitas de propiedades de materiales en donde se estudie el esfuerzo-

deformación, se puede determinar el comportamiento de un nodo determinado en términos de las propiedades de cualquier otro elemento en la estructura.

El arreglo total de ecuaciones, describen el comportamiento de cada nodo en una serie de ecuaciones algebraicas las cuales se expresan en notación matricial para un tratamiento más eficiente.

2.5 Simulación MonteCarlo

Bajo el nombre de Simulación MonteCarlo se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios. Este método da solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico.

El método fue llamado así por el principado de Mónaco por ser “la capital del juego de azar”, al tomar una ruleta como generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de MonteCarlo datan aproximadamente de 1944 con el desarrollo de la computadora. El uso real de los métodos de MonteCarlo como una herramienta de investigación, proviene del trabajo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. Este trabajo involucraba la simulación directa de problemas probabilísticos de hidrodinámica concernientes a la difusión de neutrones aleatorios en material de fusión.

Aún en la primera etapa de estas investigaciones, John Von Neumann y Stanislaw Ulam refinaron esta curiosa “ruleta rusa”. Sin embargo, el desarrollo sistemático de estas ideas tuvo que esperar el trabajo de Harris y Herman Kahn en 1948. Aproximadamente en el mismo año, Fermi, Metropolis y Ulam obtuvieron estimadores para los valores característicos de la ecuación de Schrodinger para la captura de neutrones a nivel nuclear.

Alrededor de 1970, los desarrollos teóricos en complejidad computacional comienzan a proveer mayor precisión y relación para el empleo del Método de MonteCarlo.

El algoritmo de Simulación MonteCarlo puro está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de Transformación Inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias (Apuntes: Investigación operativa, 2005)

2.6 Técnicas de detección de daño estructural

Las estructuras civiles modernas son cada vez más complejas en tamaño y diseño, nuevos conceptos y materiales se utilizan cada vez más, y las condiciones ambientales y operacionales resultan más demandantes (Carrión, 2006). En estas condiciones, el monitoreo de la sanidad estructural de estructuras nuevas y el

desarrollo de originales tecnologías en sensores, ofrecen nuevos retos para el desarrollo de teorías innovadoras y esquemas experimentales (Aktan, 1998).

La evaluación estructural para determinar daño, deterioro y/o condiciones anormales de operación en estructuras civiles complejas, es esencial para determinar la confiabilidad operacional y vida residual de las mismas (Aktan, 1999).

Tradicionalmente, la mayoría de los programas de detección de daño se basan en inspecciones visuales, que son costosas y limitadas por el acceso a todas las partes de la estructura. Adicionalmente, el daño interno no es detectable con una inspección visual y no es posible obtener una estimación cuantitativa del daño o de la capacidad estructural remanente (Carrión, 2006). Sistemas para el monitoreo de la sanidad de sistemas incluyen diferentes pruebas no destructivas, pero en todos los casos la evaluación es localizada, y no permiten evaluaciones globales de las estructuras (Thomas, 1995).

El análisis de vibraciones y el análisis modal son las únicas técnicas que tienen el potencial para la evaluación global de estructuras (Aktan, 1999 & Chase, 1996). En estos casos, el monitoreo de la sanidad se realiza analizando los cambios del comportamiento característico de vibración a través de la frecuencia natural; razón de amortiguamiento; y formas modales. En general, un modelo no dañado (típicamente de elemento finito) se utiliza como referencia y la identificación del daño se realiza comparando las respuestas del modelo con los resultados experimentales en la estructura real (Carrión, 2006). Muchos algoritmos se han desarrollado para realizar dicha comparación, pero en general, se clasifican considerando cuatro diferentes aproximaciones: optimización de matrices; métodos de sensibilidad; técnicas de asignación de valores característicos; y métodos de perturbación de mínimo rango (Doebling, 1998).

En los sistemas modernos de administración de puentes y, en general para los de diseño y operación de sistemas mecánicos complejos, la evaluación e inspección no destructiva juegan un papel preponderante desde el diseño hasta la operación. Teorías como la de la mecánica de la fractura y los modelos para determinar criterios de estimación de vida útil y vida residual, adquieren cada vez mayor importancia para garantizar la operación y servicio de dichos sistemas (Carrión, 2006).

2.6.1 Inspección visual

La definición más aceptada para la inspección visual es: "... El proceso de examen y evaluación de un sistema o sus componentes, mediante el cual se utilizan los sentidos humanos auxiliados únicamente con algún dispositivo que magnifique la capacidad sensorial del inspector. El proceso de inspección puede constituirse por acciones, como observar, escuchar, sentir, oler, agitar o revolver. Incluye una componente cognoscitiva que, con las observaciones, se correlacionan con la información técnica del sistema o la estructura y de los datos sobre las condiciones de servicio pasadas y presentes...". (Spencer, 1996) Es importante

destacar que en esta definición se pueden considerar, además de la vista, otros sentidos humanos para cualquier proceso de decisión y búsqueda. A pesar de que la inspección visual depende fuertemente de las capacidades del observador, el sistema que conforma el sentido humano y el cerebro, conforman un sistema de inspección de muy alta sensibilidad y con una muy alta capacidad de discernimiento que puede ser entrenada para encontrar e interpretar variaciones mínimas en un sistema (Carrión, 2003).

2.6.2 Líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes (PT) es una técnica versátil y de simple aplicación para una gran variedad de materiales y diseños que permite localizar defectos o grietas superficiales. El método se basa en los principios básicos de la acción capilar, y la capacidad de humectación de un líquido de baja viscosidad, propiedades que permiten que éste penetre por hendiduras o grietas imperceptibles a la vista, para resaltarlas y evidenciarlas. En general, la viscosidad, la capilaridad y la humectación están íntimamente relacionadas entre sí, y dependen de la tensión superficial del líquido y su capacidad para mojar la superficie de un material determinado. Una forma directa para medir dicha capacidad es a través del ángulo que hay en el punto de contacto de una gota con una superficie sólida, y que entre más pequeños sean, es mejor la capacidad de humectación del líquido (Carrión, 2003).

2.6.3 Corrientes Parásitas o Eddy

Las técnicas de Corrientes Parásitas o corrientes Eddy, se utilizan en materiales conductores basándose en el análisis de las variaciones que las grietas -o defectos superficiales- producen en un flujo de corrientes inducidas. Para inducir estas corrientes se utiliza una bobina externa con corriente alterna que genera un campo magnético variable. Como las corrientes inducidas (o parásitas) provocan un campo magnético secundario que tiende a contrarrestar el primero, las variaciones en las primeras se miden a través del campo magnético secundario, el cual se mide con una bobina que puede ser la misma que induce las corrientes u otra independiente. Las corrientes inducidas, y por tanto, las inspecciones no destructivas basadas en este principio, dependen de varios factores que incluyen la conductividad del material, la permeabilidad magnética, la densidad del espécimen, los esfuerzos residuales, la microestructura, factores geométricos, el acoplamiento magnético, y los defectos o grietas. La sensibilidad a todos ellos hace que esta técnica se emplee en una gran cantidad de aplicaciones o problemas, sin embargo, siempre estará limitada a que el material sea conductor, y para identificar anomalías superficiales o muy cercanas a la superficie (Carrión, 2003).

2.6.4 Partículas magnéticas

Las técnicas de inspección por partículas magnéticas (MT) son un subconjunto específico de las técnicas de inspección basadas en el magnetismo. En este caso, una pieza ferromagnética se magnetiza empleando magnetos, o induciendo una corriente eléctrica para que a través de la “observación” del campo magnético se puedan identificar alteraciones en éste, y que a su vez son ocasionadas por la presencia de anomalías: grietas o defectos superficiales, o casi superficiales en la pieza. Existen varias maneras de observar el campo magnético, pero la más común es mediante las llamadas “partículas magnéticas”, o sea pequeñas partículas que se orientan con el campo magnético y, por ende, con las variaciones o alteraciones del mismo. Hay una gran variedad de partículas magnéticas que se aplican en ambiente seco o húmedo; son de diferentes colores e inclusive, fluorescentes. Además de las partículas magnéticas, se utilizan para hacer “visible” el campo magnético sensores que incluyen pinturas, hules, impresiones o laminillas magnéticas (Carrión, 2003).

2.6.5 Inspección por ultrasonido

Es una de las técnicas de inspección no destructiva más poderosas, ya que permite localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes tipos de geometrías y materiales. En general, el procedimiento es relativamente sencillo y no representa riesgo para el inspector o para el material.

Existe una diversidad de técnicas que se pueden adaptar a cada aplicación en particular. La inspección por ultrasonido mide en varios puntos el efecto del paso de las ondas acústicas de alta frecuencia a través del material de la pieza que se evalúa. Dicha propagación se controla electrónicamente por pulsos que un transductor convierte en energía acústica que se aplica en puntos específicos. Posteriormente, el mismo transductor u otro similar, recibe el reflejo de esa onda acústica y la convierte nuevamente en una señal eléctrica. La interpretación del reflejo de dicha onda sonora permite inferir información sobre discontinuidades en el material. Debido a que las ondas sonoras viajan en casi todos los materiales, esta técnica es una de las más empleadas en la identificación de defectos internos (Carrión, 2003).

2.6.6 Radiografía industrial

Una de las primeras técnicas de inspección no destructiva que tuvo un amplio y rápido desarrollo es la radiografía industrial, que a partir del descubrimiento de los rayos X por Pierre y Marie Curie, ha encontrado varias aplicaciones en diferentes campos, entre los cuales la medicina es uno de los más importantes, junto con el desarrollo de la tecnología y el descubrimiento de otros tipos de radiación, como la gamma, los neutrones o las partículas alfa. Actualmente la radiografía industrial no sólo se refiere a los rayos X, sino a cualquier tipo de radiación. Hoy por hoy, estas técnicas se utilizan en diferentes ramas de la industria por su amplia versatilidad y fácil aplicación, aunque los requerimientos de seguridad son muy estrictos.

El principio básico de la radiografía se apoya en que la radiación pasa a través de un material y ésta se absorbe según su densidad, tipo o estructura. Se pueden distinguir dos materiales con diferentes densidades o características, al igual que identificar la presencia de porosidades o huecos en un material sólido. Las variaciones de espesor y cambios geométricos son detectables con estas técnicas, y la radiación se mide en forma indirecta mediante una placa fotosensible cuya intensidad de impresión es proporcional a la intensidad de la radiación que llega a pasar (Carrión, 2003).

2.6.7 Emisiones acústicas

El principio básico de las técnicas de emisiones acústicas se fundamenta en el hecho de que casi todos los materiales emiten pulsos sonoros cuando se someten a una carga. Esta emisión se origina por el micro-agrietamiento que ocurre por la aplicación de las cargas, generalmente en grietas, porosidades o defectos. Las emisiones acústicas son una técnica pasiva que “escucha” el sonido emitido en el material, y ubica la fuente de la misma. En general no determina el tamaño de los defectos, pero es una técnica que localiza fácilmente puntos con potencial daño, y que requieren una inspección más detallada mediante otras técnicas (Carrión, 2003).

3 Diseño del modelo de simulación MonteCarlo

3.1 Atributos geométricos y composición de puente tipo

Como se planteó en los objetivos particulares, la superestructura del puente utilizada para el análisis, fue representativa del conjunto de puentes existentes en nuestro país. Para la determinación de los atributos geométricos y la composición de ésta, se recurrió a la base de datos del Sistema de Puentes de México (SIPUMEX), implementado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), el cual cuenta con un inventario de la totalidad de los puentes de la Red Federal de Carreteras, en el que se incluyen las características, ubicación y estado físico, entre otras características.

De la información de la base de datos de este sistema, se eligió un conjunto de atributos geométricos para definir la composición del puente “tipo” que se utilizó en el estudio:

- Material de composición de la superestructura
- Número de claros
- Longitud de claro
- Ancho total del puente

El análisis estadístico de cada uno de estos atributos se muestra a detalle en el apéndice A. A continuación se muestran los atributos geométricos del puente tipo utilizado para el estudio, con base en este análisis estadístico.

Material de composición de la superestructura

Según el análisis de la base de datos, el 57.39% de los puentes que registran este atributo cuentan con una superestructura hecha a base de concreto reforzado colado *in situ*, mientras que el 12.06% están hechas a base de concreto presforzado, prefabricado. Sin embargo, es importante hacer notar que entre la información correspondiente a este atributo y la descripción del puente hecha en el apartado de observaciones existen inconsistencias, por lo que este atributo tiene alto grado de incertidumbre. Sin embargo, se consideró que la superestructura está conformada por un sistema de vigas y losa de concreto reforzado.

Número de claros

Por otro lado, el 41% de este conjunto de puentes de concreto reforzado están conformados por un solo claro, seguidos de aquellos que están conformados por dos claros, con un 24% del total. Por lo que el puente para el estudio fue de un solo claro.

Longitud de claro

La longitud de este claro según el análisis de este conjunto oscila entre 5 y 15 m con un 67% del conjunto, por lo que la longitud adoptada para el claro del puente fue de 13.5 m.

Ancho total de puente

Mientras que el ancho total de la sección transversal oscila igualmente entre 5 y 15 m con un 89% de representación, por lo que se consideró la existencia de dos carriles de 4 m y hombros de 1.5 m, por lo que el ancho total considerado fue de 11 m.

A continuación se muestra un detalle de la sección transversal del puente,

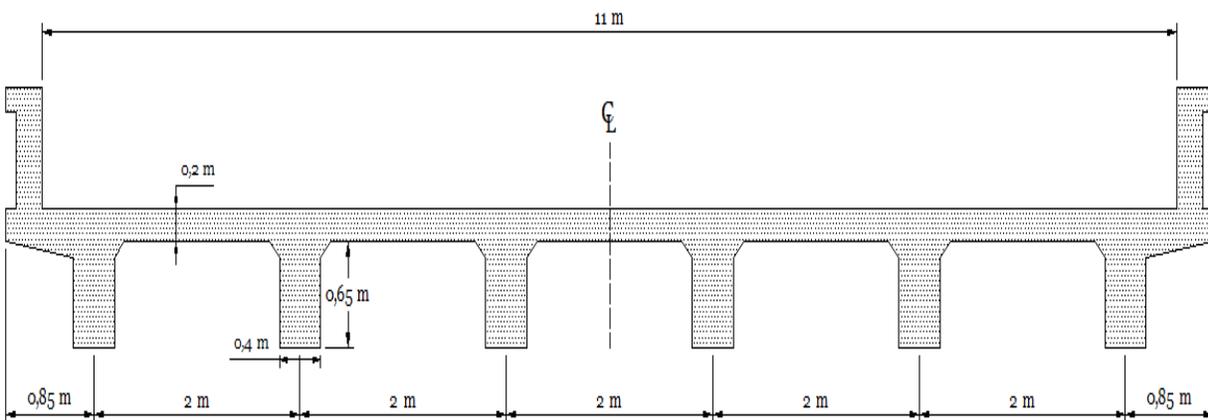


Figura 3.1 Croquis de superestructura de puente

Considerando los atributos geométricos y la composición de la superestructura del puente, se procedió con el dimensionamiento y diseño de las secciones que la componen (Véase apéndice C). A continuación se muestra un croquis del tablero y secciones de vigas resultantes:

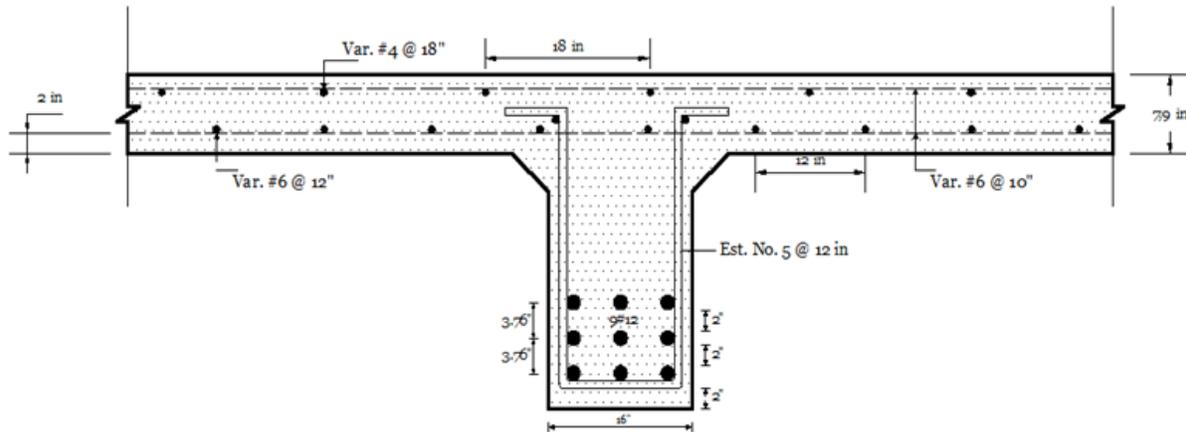


Figura 3.2 Detalle de armado de superestructura de puente

3.2 Análisis de aforo vehicular

Para la obtención de la información necesaria para la generación de los escenarios de carga fue considerado como base el aforo vehicular realizado en el puente Río Papaloapan ubicado en el tramo carretero (cuota) de La Tinaja a Cosoleacaque en el estado de Veracruz.

Los parámetros considerados en este análisis fueron los siguientes:

- Composición vehicular
- Condición de carga de los vehículos
- Peso Bruto Vehicular de acuerdo a condiciones de carga
- Distribución de carga en los ejes de los vehículos
- Porcentajes de ocupación vehicular
- Ocupación vehicular por carril

Composición vehicular

Del análisis de la composición del tránsito mostrada detalladamente en el apéndice B, podemos observar que el número de vehículos aforados es de 1,208, y los vehículos tipo B2, B3, C2, C3, T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4 representan en promedio el 97% del total de vehículos aforados en la dirección Coatzacoalcos, por lo que ésta fue la configuración vehicular adoptada para el estudio.

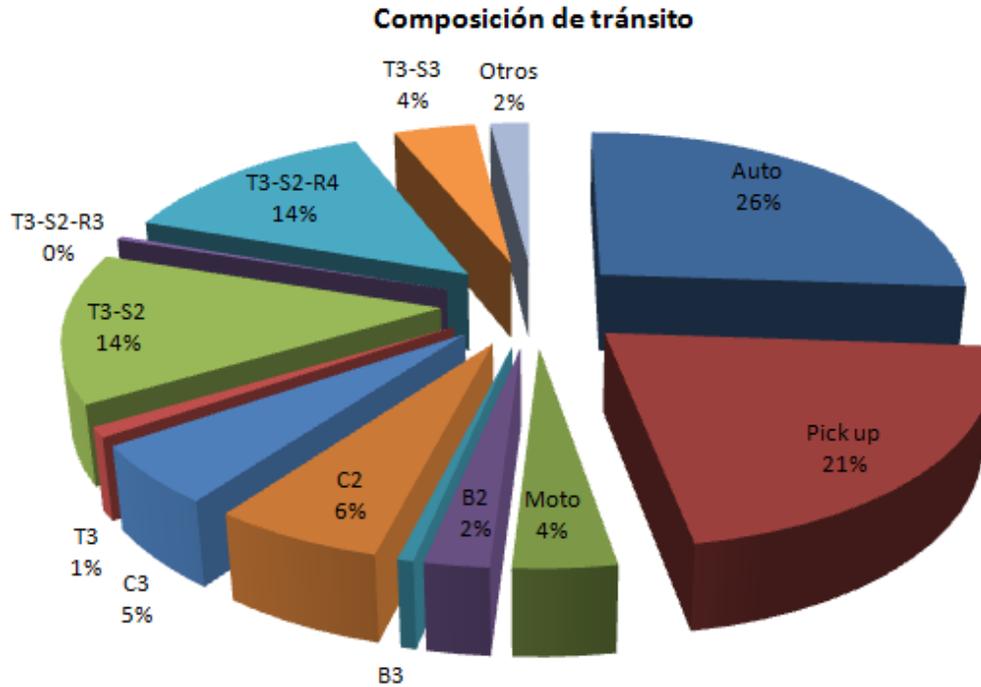


Figura 3.3 Configuración vehicular: Carril de baja velocidad

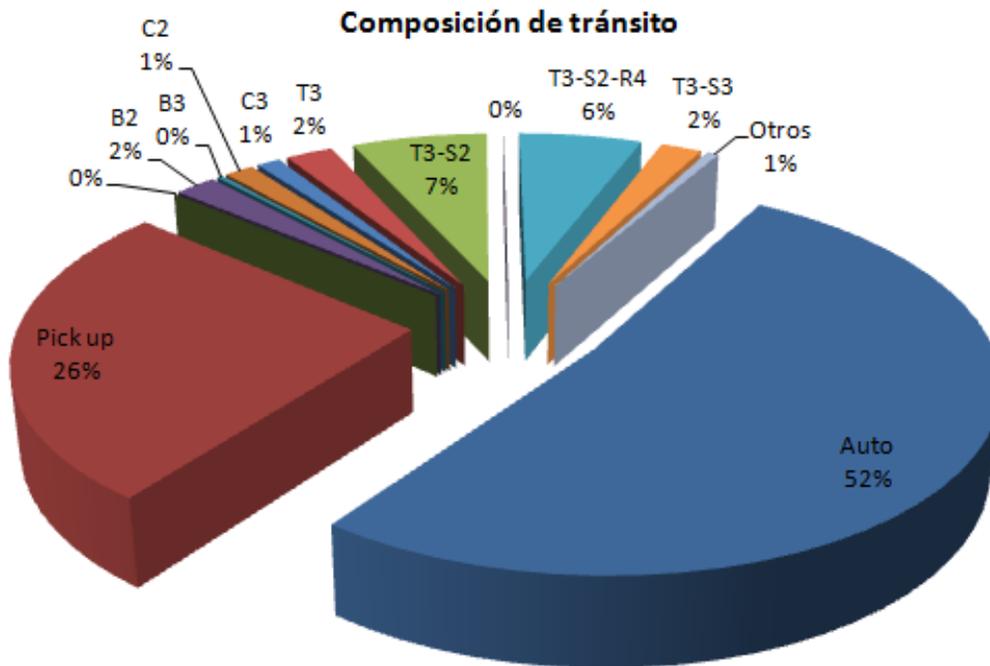


Figura 3.4 Configuración vehicular: Carril de alta velocidad

Condición de carga de los vehículos

Del análisis realizado, se identificaron 3 condiciones de carga en los vehículos registrados:

- Vehículos vacíos
- Vehículos sobrecargados
- Vehículos no excedidos en peso bruto vehicular

Tabla 3.1 Condiciones de carga registradas

Tipo de vehículo	Vacíos	Sobrecargados	No Excedidos
C2	34.50%	0.37%	65.13%
C3	19.65%	4.82%	75.53%
T3S2	22.86%	26.31%	50.83%
T3S3	35.35%	39.81%	24.84%
T3S2R4	30.51%	34.44%	35.05%

En el apéndice B, se muestra un análisis detallado de estas condiciones.

Peso Bruto Vehicular de acuerdo a condiciones de carga

De acuerdo al análisis del aforo, para los vehículos vacíos, se consideraron los pesos brutos vehiculares promedio presentados entre los vehículos con esta condición de carga, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Peso Bruto Vehicular en vehículos vacíos

Vehículos	Peso (ton)
Ligeros	3
B2	17.5
B3	26
C2	4.4
C3	7.9
T3-S2	20
T3-S3	25.7
T3-S2-R4	40

Mientras que las distribuciones de los pesos brutos vehiculares correspondientes a las otras dos condiciones (sobrecargados, no excedidos) se muestran en el apéndice B.

Distribución de carga en los ejes de los vehículos

Por otro lado, en el aforo y pesaje vehicular se determinaron los pesos por cada eje de los diferentes vehículos, realizando el análisis de este parámetro, se obtuvieron porcentajes promedio de distribución del peso en cada uno de los ejes de los vehículos.

Tabla 3.3 Porcentajes de Pesos Brutos Vehiculares por eje

Tipo de vehículo	Porcentajes de Peso Bruto Vehicular (%)								
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Eje 7	Eje 8	Eje 9
B2	50	50							
C2	40	60							
B3	25	37.5	37.5						
C3	25	37.5	37.5						
T3-S2	15	21.25	21.25	21.25	21.25				
T3-S3	12	20	20	16	16	16			
T3-S2-R4	8	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5

Número y distancias entre ejes de vehículos registrados

El número de ejes en los vehículos fue determinado con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, mientras que las distancias entre estos fueron determinadas del análisis de la información del aforo vehicular. Los valores de estos dos parámetros para cada configuración vehicular se muestran en el apéndice B.

Porcentajes de ocupación vehicular por carril

Mientras que en el mismo estudio, se obtuvieron los porcentajes de ocupación por carril que presenta el tráfico en dicho puente.

Tabla 3.4 Porcentajes de ocupación vehicular por carril

Carril	Dirección Tinaja		Dirección Acayucan	
	Baja velocidad	Alta velocidad	Baja velocidad	Alta velocidad
Porcentaje	35.61	14.23	35.82	14.32

3.3 Crecimiento del flujo vehicular

De acuerdo a estudios realizados en un punto de control en el tramo carretero en cuestión, se obtuvo durante su monitoreo que la tasa de crecimiento promedio anual del tránsito es del 4%, sin embargo, se consideraron además de esta tasa, dos escenarios más, uno con un crecimiento del 2% y el otro con uno del 6%.

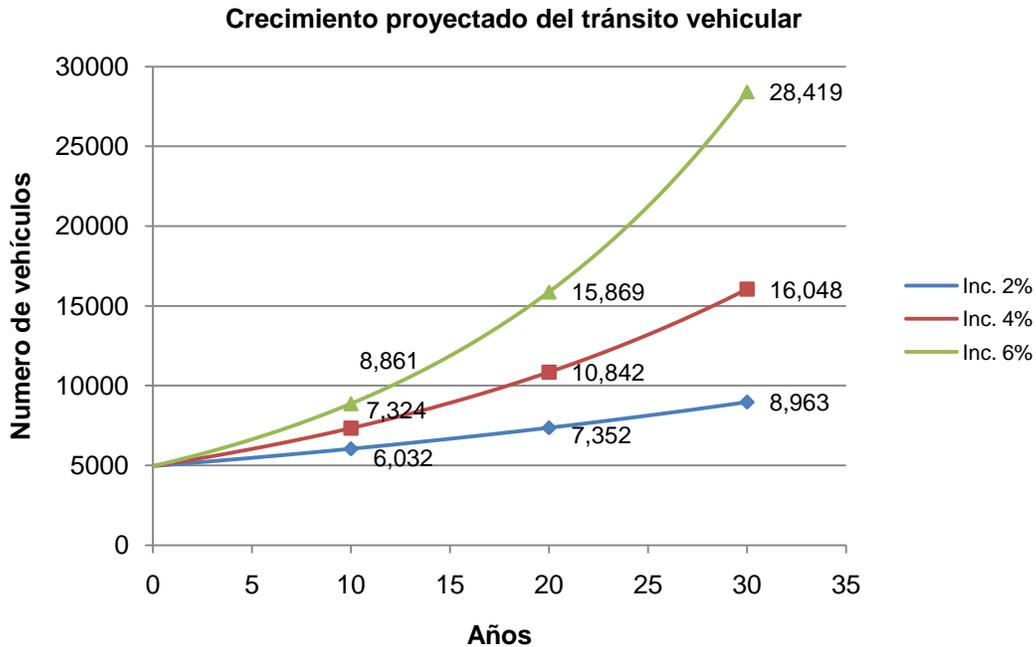


Figura 3.5 Proyecciones de tránsito diario

3.4 Determinación de escenarios de carga mediante simulación MonteCarlo

Los datos presentados anteriormente fueron obtenidos para simular de forma aleatoria las variables y generar así, escenarios de carga. Estos escenarios fueron generados mediante simulación MonteCarlo, para lo cual se elaboró un programa en Matlab (véase el apéndice C).

En general, el programa trabaja bajo el siguiente esquema:

- 1) Definición del número de eventos que se desean simular.
- 2) Para cada evento se define el número de vehículos de acuerdo a los datos de ocupación del puente.
- 3) Posteriormente, se asignan con base en la composición vehicular analizada anteriormente, los tipos de vehículos en cada evento.
- 4) Luego, se determina la condición de carga de los vehículos, es decir, se determina si va vacío, con sobrecarga o no excedido, esto con base en los datos obtenidos del análisis del aforo vehicular.
- 5) Una vez conocida la condición de carga de los vehículos en el evento, se procede a asignar el peso de acuerdo a las distribuciones para cada condición y tipo de vehículo.

- 6) Luego, conociendo el peso del vehículo, se procede a distribuirlo en los ejes, con base en las distribuciones determinadas.
- 7) Por último, una vez que se tiene la carga distribuida en los ejes del vehículo, se ubica en la estructura de manera aleatoria, para obtener así, los esfuerzos en los elementos de interés.

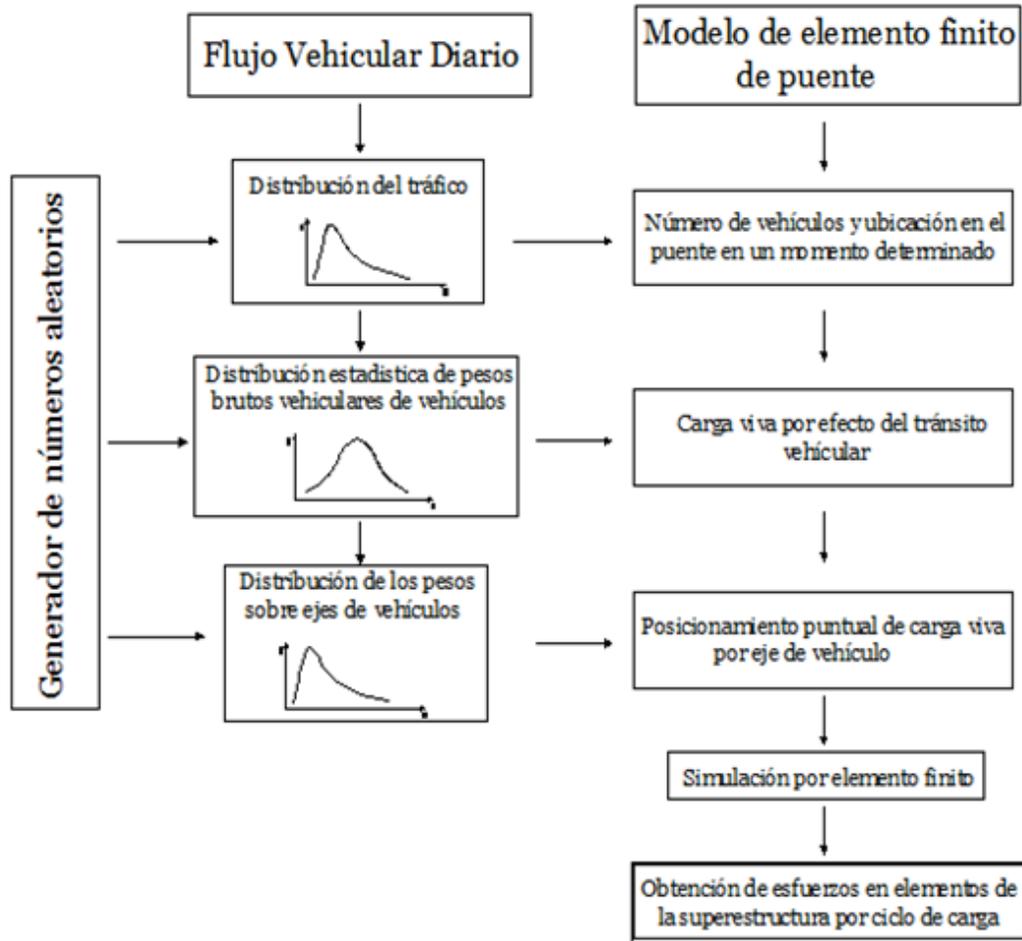


Figura 3.6 Esquema de programa de simulación MonteCarlo para la obtención de esfuerzos en superestructura

3.5 Modelo del puente

De acuerdo al análisis de los atributos geométricos de la base de datos de SIPUMEX, se determinó que el material de composición de la superestructura del puente tipo utilizado para el estudio fuera concreto reforzado, con un solo claro de una longitud de 13.5 m y un ancho de 11 m, considerando la existencia de dos carriles y acotamiento a ambos lados de la calzada.

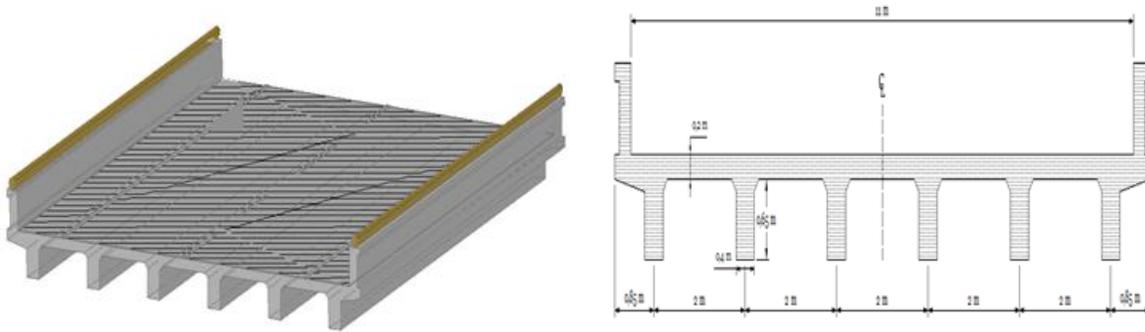


Fig. 3.7 Esquema de superestructura

Para la modelación de esta superestructura se empleó una malla de elementos finitos triangulares con catetos de 25 cm para la losa, mientras que para el modelado de las vigas de concreto reforzado se emplearon elementos tipo frame con una longitud de 25 cm. Para la losa se emplearon 4,752 elementos, mientras que para las vigas, sólo 324. La discretización se supeditó a las mencionadas dimensiones de los elementos debido a la limitación del software en cuanto al número de elementos permitidos. El modelo fue desarrollado en el software StaDyn versión 4.4. Considerando un concreto reforzado con una resistencia de proyecto $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, un modulo de elasticidad $E = 253\,456.36 \text{ kg/cm}^2$ tanto para los elementos de la losa, como para los de las vigas.

3.6 Carga viva por tráfico vehicular

La tarea de cuantificar los vectores de carga que actúan en los puentes por efecto del tránsito de vehículos comerciales es una tarea compleja debido al gran número de ejes y combinaciones de espaciamientos entre estos que son encontrados en la práctica. Con la ayuda de algunos métodos, un conjunto de cargas discretas puede ser reducido a una carga uniformemente distribuida equivalente, de la cual se obtienen los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos en la estructura con un nivel de precisión muy adecuado. Uno de estos métodos es el propuesto por Csagoly y Dorton en 1978, en el que N cargas discretas, con un peso total de W , en una viga, pueden ser remplazadas por una carga uniformemente distribuida que proporciona el mismo peso total W y tiene una longitud B_m . Esta longitud se define como la longitud de base equivalente y está dada por la siguiente ecuación:

$$B_m = \frac{4}{W} \sum_{i=1}^N |P_i x_i| \frac{2(N-1)}{bNW^2} \left\{ \sum_{i=1}^N (P_i x_i) \right\}^2 \quad (3.1)$$

Donde N es el número total de cargas discretas, mientras que las otras variables se muestran a continuación.

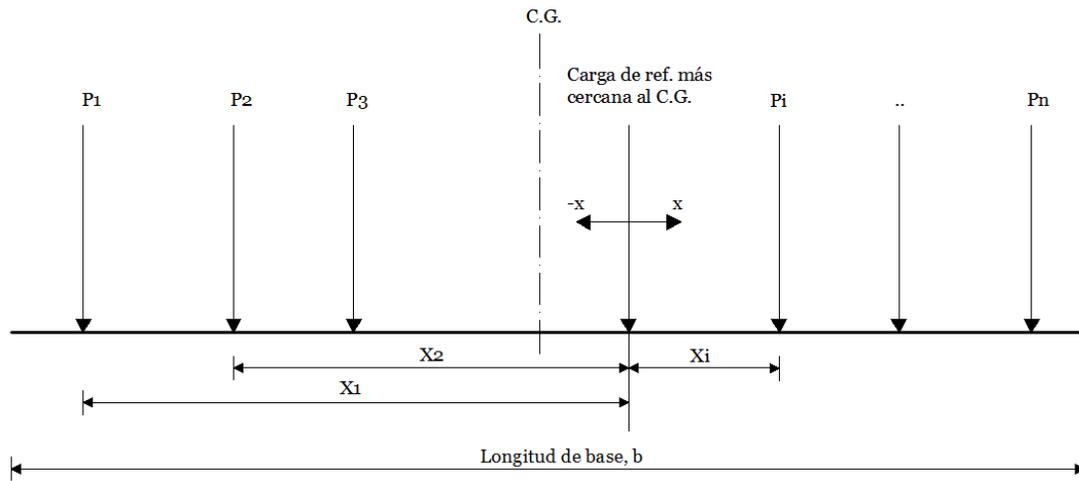


Figura 3.8 Notación para series de cargas puntuales y su espaciamiento.

Sin embargo, para el estudio, debido a que la configuración vehicular se encuentra definida por el estudio del aforo vehicular, y la generación de los escenarios de carga será mediante simulación programada, las cargas por este efecto se consideraron discretas (puntuales).

Para la ubicación de estas cargas sobre el modelo de la superestructura, se realizaron líneas de influencia para las vigas que conforman la superestructura y de acuerdo con los porcentajes de distribución del peso sobre los ejes de los vehículos, se ubicó para cada vehículo la posición del tren de carga que proporciona el valor máximo del momento flexionante en el centro del claro de estas piezas.

A continuación se muestran los esquemas de las líneas de influencia para el momento flexionante en el centro del claro y la posición del tren de cargas de cada vehículo que maximiza este efecto.

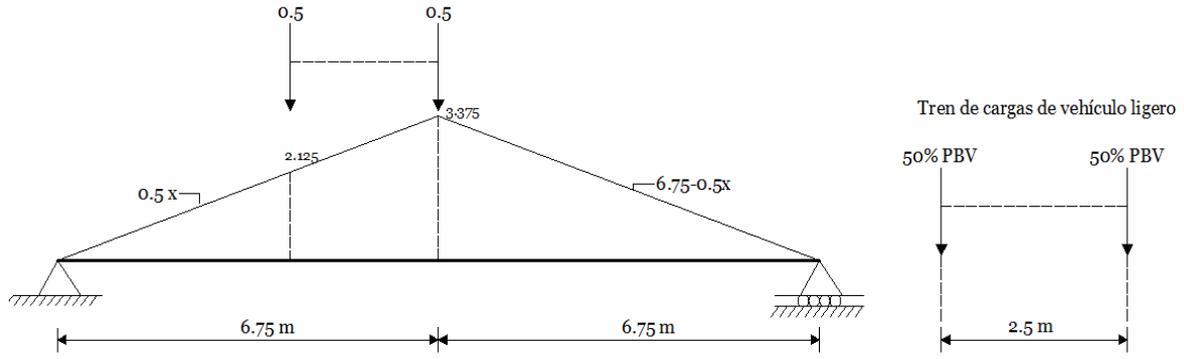


Figura 3.9 Tren de cargas de vehículo ligero en línea de influencia del momento flexionante en centro de claro

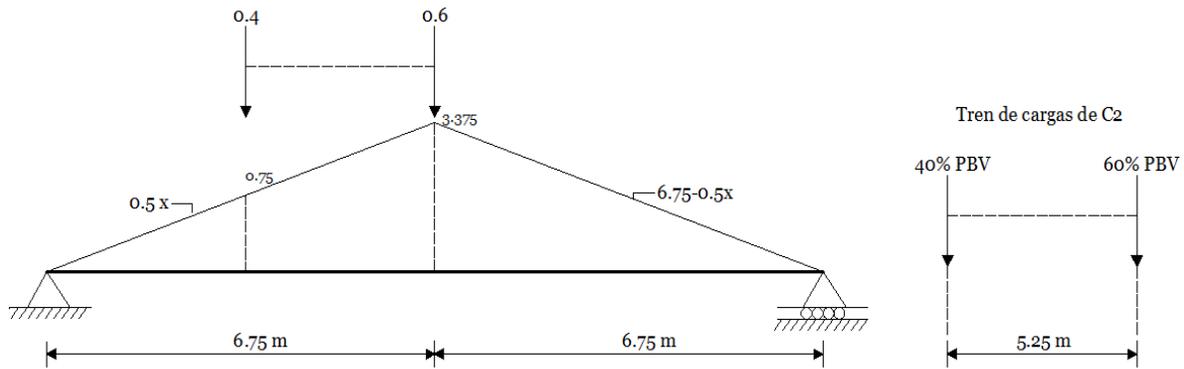


Figura 3.10 Tren de cargas de C2 en línea de influencia del momento flexionante en centro de claro

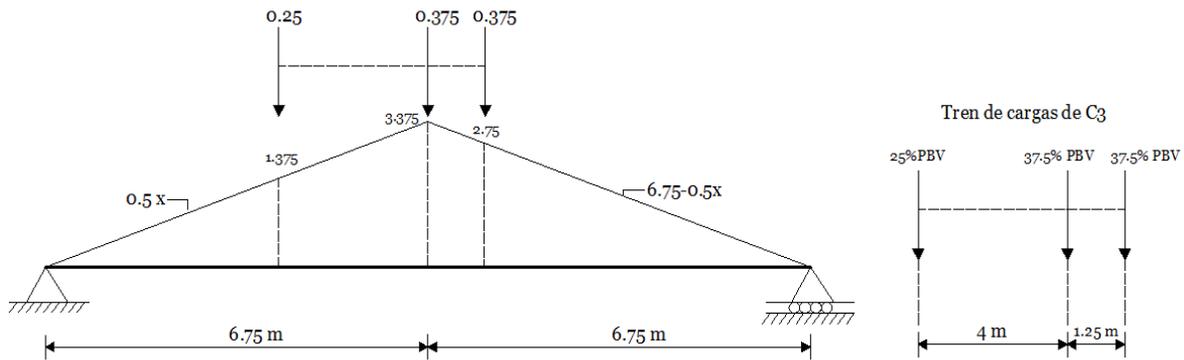


Figura 3.11 Tren de cargas de C3 en línea de influencia del momento flexionante en centro de claro

Debido a que la longitud del puente (13.5 m) es muy corta comparada con la longitud de los tractocamiones T3-S2, T3-S3, T3-S2-R4, se eligió la condición más crítica de sus trenes de carga para el momento flexionante en el centro del claro. A continuación se presentan estas condiciones.

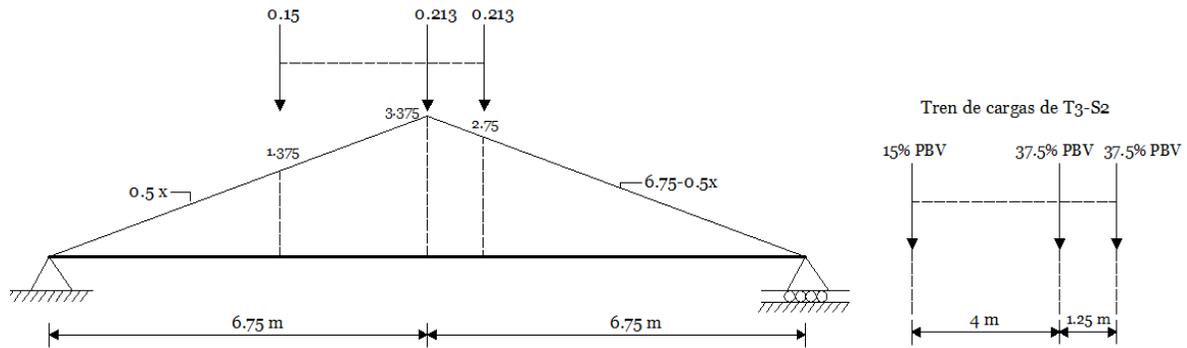


Figura 3.12 Tren de cargas de T3-S2 en línea de influencia del momento flexionante en centro de claro

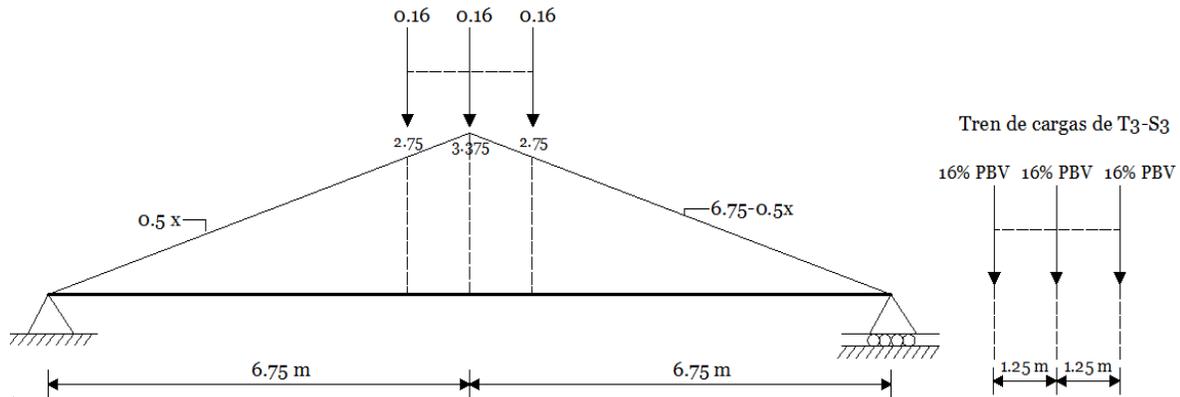


Figura 3.13 Tren de cargas de T3-S3 en línea de influencia del momento flexionante en centro de claro

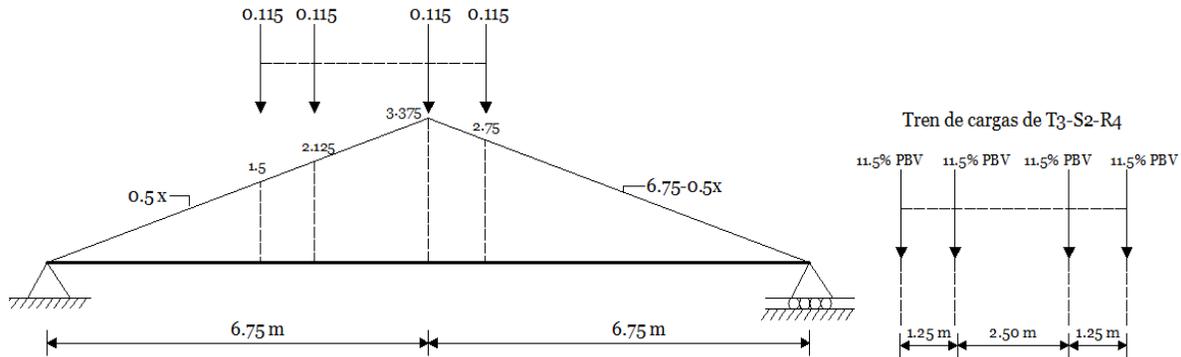


Figura 3.14 Tren de cargas de T3-S2-R4 en línea de influencia del momento flexionante en centro de claro

3.7 Obtención de esfuerzos en vigas de superestructura

Para la evaluación del deterioro en la superestructura del puente, se eligió de entre las vigas que la conforman, la viga central ubicada en el carril de baja velocidad, tal como se muestra en la siguiente figura.

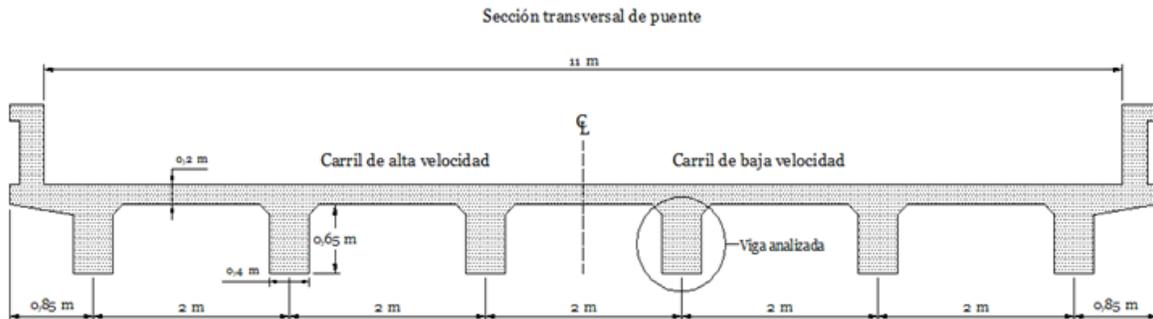


Figura 3.15 Sección transversal de superestructura

Debido a la longitud del claro del puente, se definieron dos condiciones posibles de ocupación del mismo, 1 y 2 vehículos.

Para el caso de ocupación de la superestructura por un solo vehículo, se simuló el paso de cada uno de los diferentes tipos de vehículos adoptados de acuerdo a la configuración determinada, obteniendo los efectos (elementos mecánicos) a lo largo de la viga indicada, generados por el tren de carga de estos. De los efectos, se consideró el momento flexionante máximo en el centro del claro de esta viga para la estimación de los esfuerzos normales máximos. Además, de este análisis

se obtuvo el número de ciclos que imprime el paso de cada uno de estos vehículos.

Para el caso de ocupación de dos vehículos, se consideró el efecto generado por el paso de un vehículo sobre el carril de baja velocidad, aunado al efecto proporcionado por la aparición del segundo vehículo, posicionado en una ubicación aleatoria sobre el carril de alta velocidad. En cuanto a los ciclos generados en esta segunda condición de carga, se observó al realizar la simulación de dos vehículos pasando la superestructura en los diferentes carriles que para la viga en cuestión, la inclusión de otro vehículo en el carril de alta velocidad no modifica el número de ciclos que genera el vehículo que transita en el carril de baja velocidad, por lo que para esta condición, se consideró el número de ciclos impuestos por el vehículo que transita en este carril.

Una vez realizada la simulación de los eventos de carga y el análisis de la superestructura sujeta a estos, se obtuvieron las distribuciones de probabilidad de los esfuerzos presentados durante los distintos periodos de tiempo evaluados.

3.8 Evaluación de deterioro estructural en la superestructura

Para analizar el número de ciclos de carga que induce cada configuración vehicular considerada en el estudio, se simuló el paso de los distintos tipos de vehículos sobre la superestructura, observándose que los vehículos de carga y pasajeros considerados le imprimen 2 ciclos de carga, exceptuando el vehículo T3-S2-R4, el cual genera 4 ciclos a su paso sobre la superestructura. Por otro lado, se consideró que el paso de vehículos ligeros no genera ningún ciclo, dado que la magnitud del efecto es prácticamente nula. Con esta información, se estimaron de acuerdo a las proyecciones realizadas del tránsito en el periodo de 30 años, el número promedio de ciclos que se presentan de acuerdo a la cantidad de vehículos que circulan por año, estableciendo esta relación mediante los porcentajes de configuración vehicular registrados en el aforo realizado. De esta manera, se relacionaron las cantidades de vehículos proyectadas con el número de ciclos que estos generarían en intervalos de tiempo de diez años.

Por otro lado, como condición inicial del problema, se estableció una distribución normal con una media de 0.5 cm y una desviación estándar de 2 para los defectos iniciales en la superestructura.

Estos datos, aunados a la distribución de probabilidad de los esfuerzos obtenida en la simulación previa, fueron la entrada para la evaluación del deterioro estructural en el elemento de la superestructura.

Para la evolución de los defectos iniciales en el elemento de concreto, fue empleado el modelo de propagación de grietas de Paris (ecuación 2.4), con

constantes $n=0.000\ 032$ y $C= 13.5$ (Slowik, 1996). El proceso de simulación para la evaluación del crecimiento de defectos iniciales se muestra en la figura 3.16.

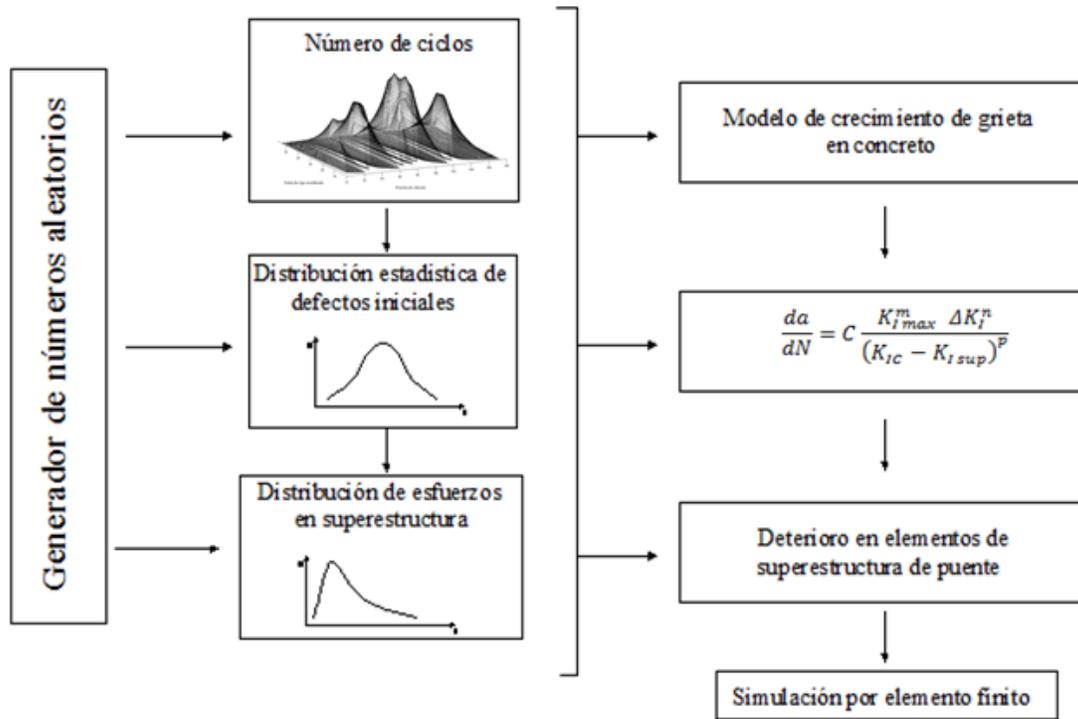


Figura 3.16 Proceso para la evaluación del deterioro estructural

4 Resultados y discusión

Producto de la simulación del paso de los diferentes tipos de vehículos por el carril de baja velocidad, se muestran las superficies formadas por el momento flexionante en cada nodo de la viga en estudio de acuerdo a la posición del tren de cargas de los vehículos analizados.

Vehículo C2

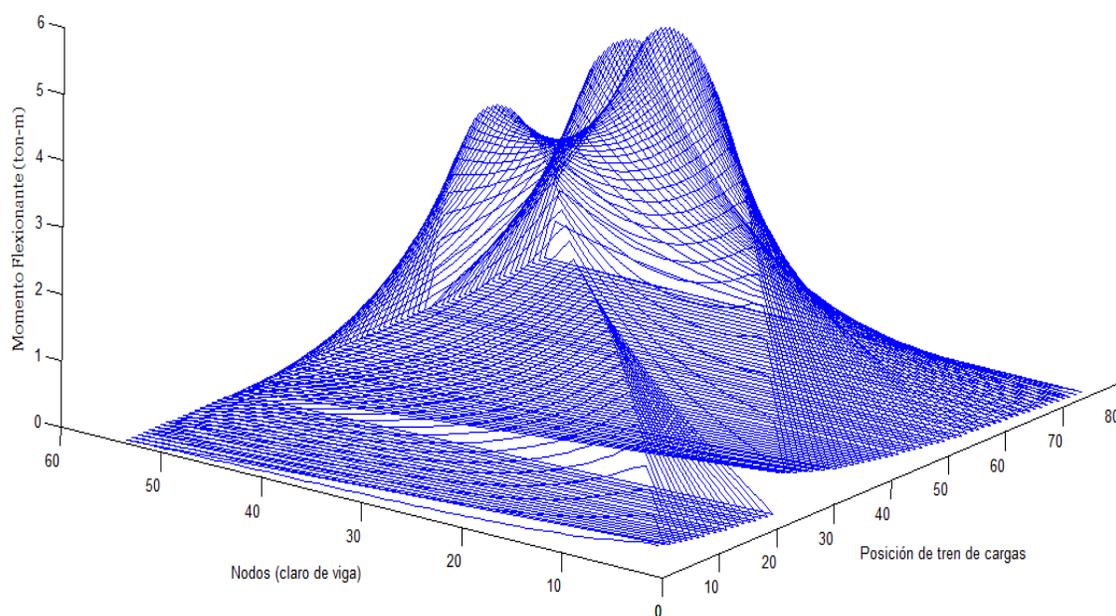


Figura 4.1 Efecto del paso de vehículo C2 en la viga de la superestructura analizada

Vehículo C3

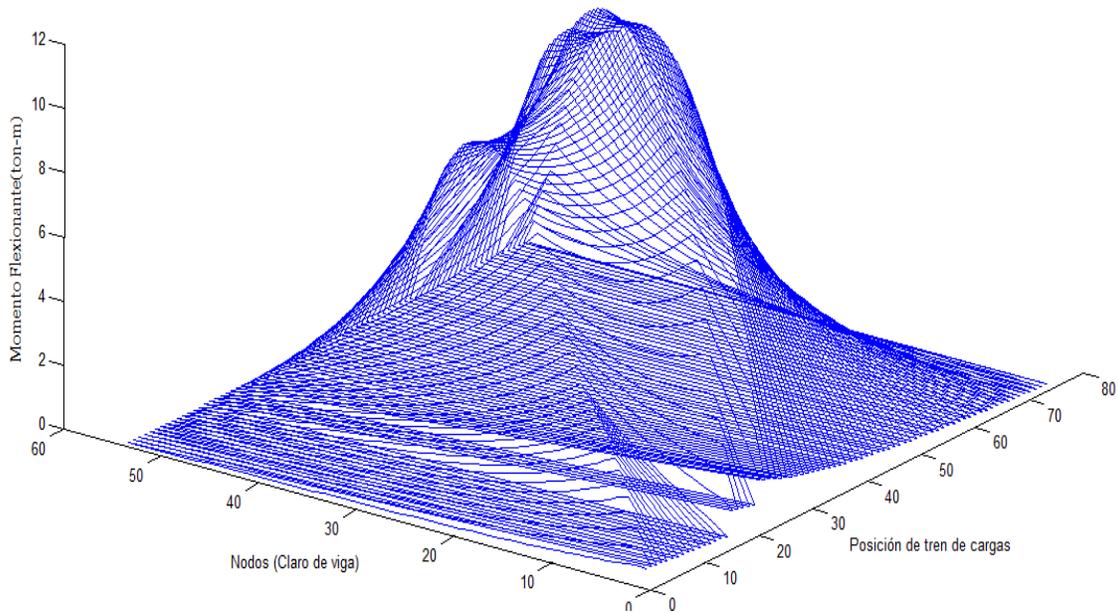


Figura 4.2 Efecto del paso de vehículo C3 en la viga de la superestructura analizada

Vehículo T3-S2

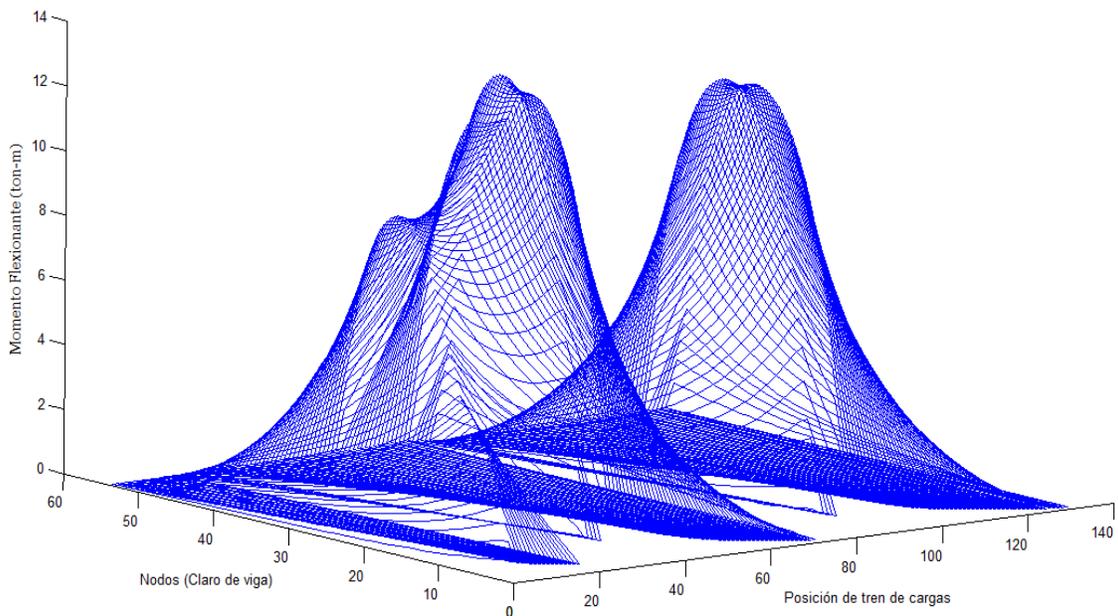


Figura 4.3 Efecto del paso de vehículo T3-S2 en la viga de la superestructura analizada

Vehículo T3-S3

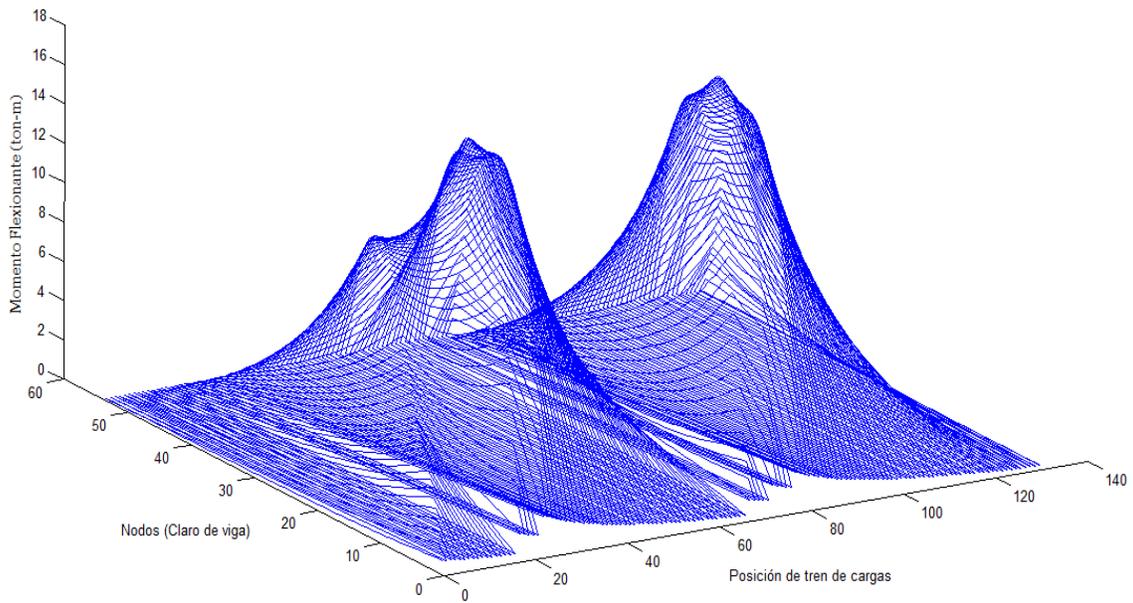


Figura 4.4 Efecto del paso de vehículo T3-S3 en la viga de la superestructura analizada

Vehículo T3-S2-R4

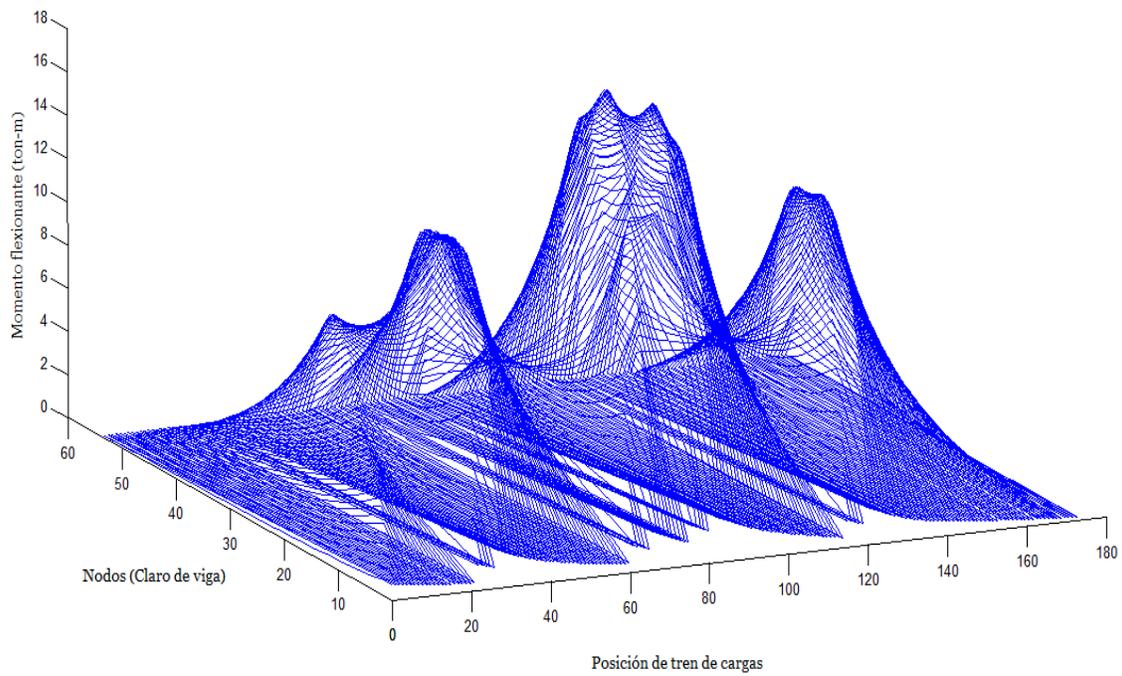


Figura 4.5 Efecto del paso de vehículo T3-S2-R4 en la viga de la superestructura analizada

En estas superficies, pueden observarse el número de ciclos de carga que estos vehículos generan a su paso, además de las diferentes amplitudes de momento flexionante. Los vehículos para esta simulación fueron considerados vacíos, la amplitud depende del peso bruto vehicular de estos en la simulación.

De acuerdo a estudios realizados en un punto de control en el tramo carretero en cuestión, se obtuvo durante su monitoreo que la tasa de crecimiento promedio anual del tránsito es del 4%, sin embargo, se consideraron además de esta tasa, dos escenarios más, uno con un crecimiento del 2% y el otro con uno del 6%.

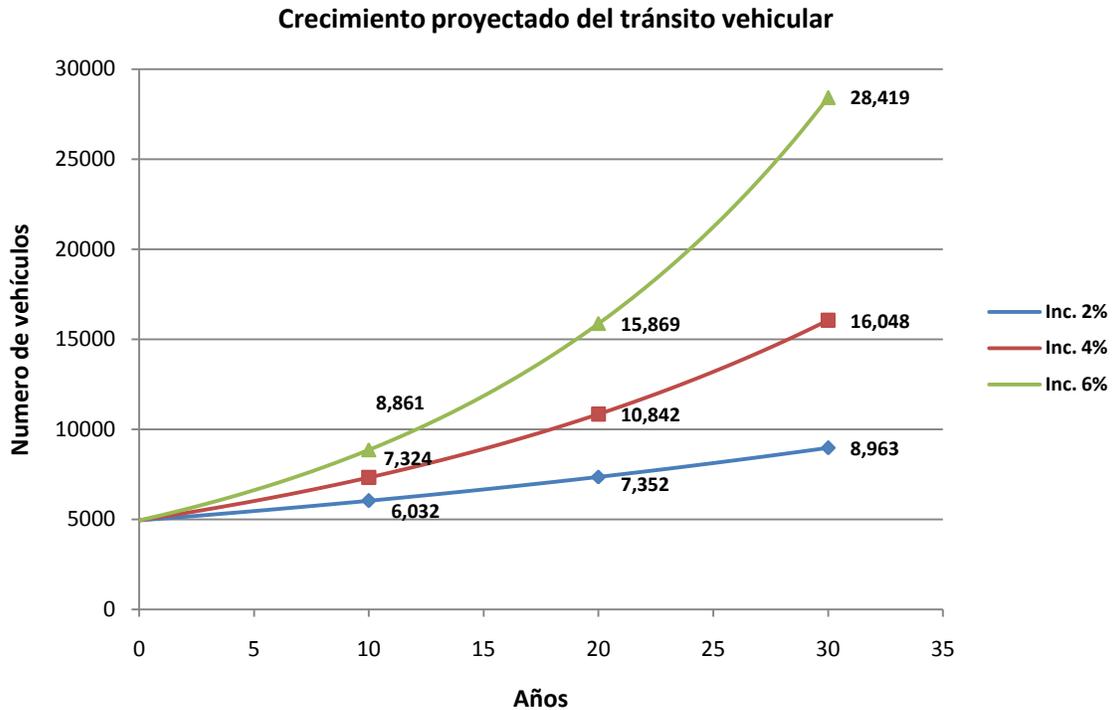


Figura 4.6 Crecimiento del tránsito vehicular proyectado

En la gráfica pueden observarse los valores del número de vehículos con respecto al tiempo de acuerdo a las tres tasas de crecimiento consideradas. Por la proximidad en algunos valores de las proyecciones, estos serán considerados una sola vez en el análisis.

A continuación se muestran los porcentajes de ocupación del puente de acuerdo a las cantidades de vehículos proyectadas con las diferentes tasas de crecimiento de tránsito.

Tabla 3.5 Porcentajes de ocupación por cantidad de vehículos

Cantidad de vehículos	Porcentajes de ocupación	
	1 vehículo	2 vehículos
6 032	98.32	1.68
7 352	97.96	2.04
8 963	97.53	2.47
10 842	97.02	2.98
16 048	95.64	4.36
28 419	92.47	7.53

Para cada escenario proyectado en el tiempo, se estimaron las cantidades de vehículos de acuerdo a la configuración obtenida en campo, es decir, se supuso que la configuración vehicular permanece sin cambios en el intervalo de tiempo analizado.

Tabla 3.6 Número de vehículos por configuración

Cantidad de vehículos	Evaluación de número de vehículos de acuerdo a configuración							
	Vehículo ligero	B2	B3	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4
4 948	2 523	115	29	306	266	722	306	681
6 032	3 076	141	35	373	324	880	373	831
7 352	3 750	171	43	454	395	1073	454	1 012
8 963	4 571	209	52	554	481	1308	554	1 234
10 842	5 529	253	63	670	582	1582	670	1 493
16 048	8 184	374	93	992	862	2341	992	2 210
28 419	14 494	662	165	1 756	1 526	4 146	1 756	3 913

De la simulación Montecarlo para la obtención de esfuerzos, se obtuvieron las siguientes distribuciones para las tasas de crecimiento planteadas:

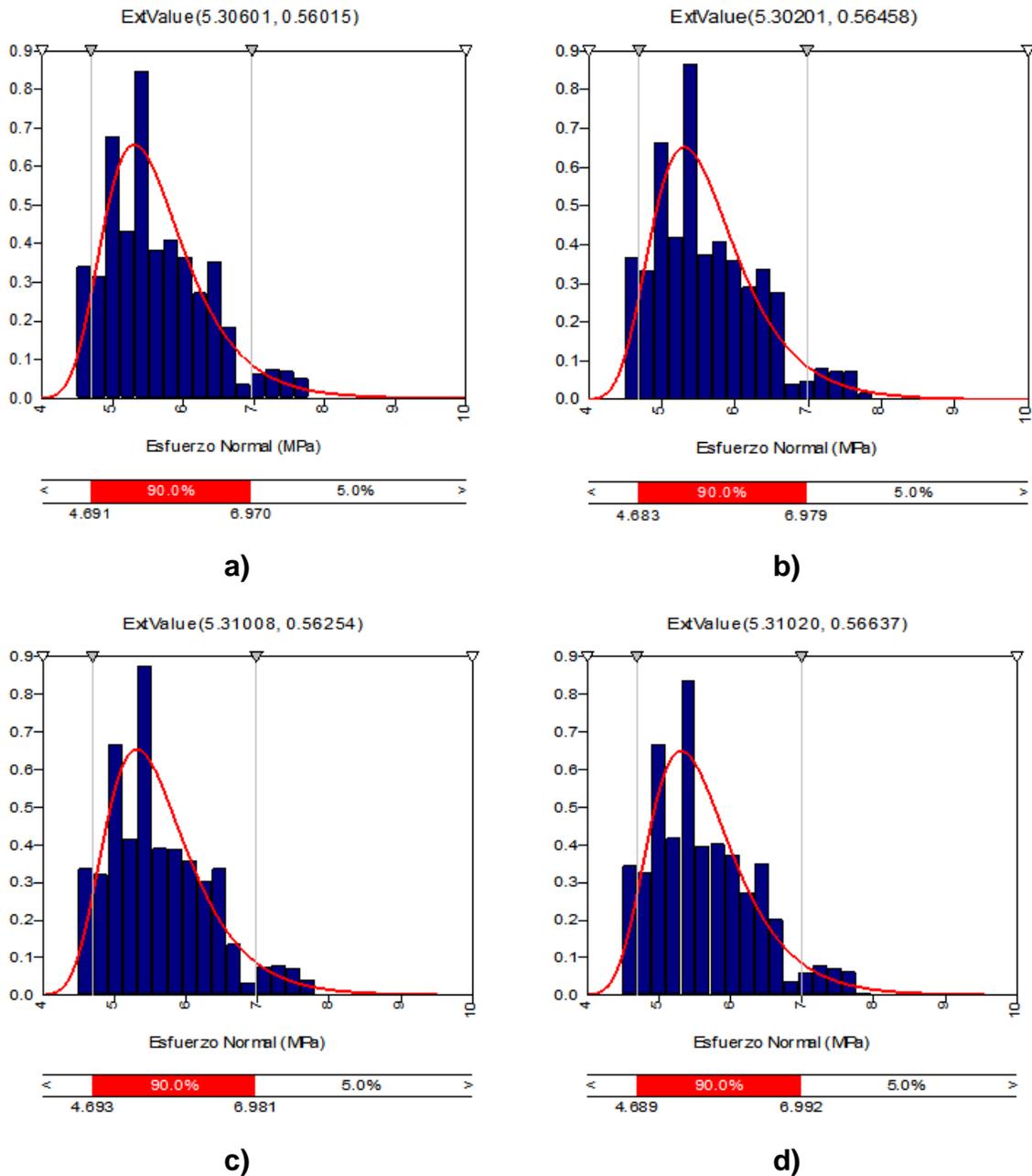
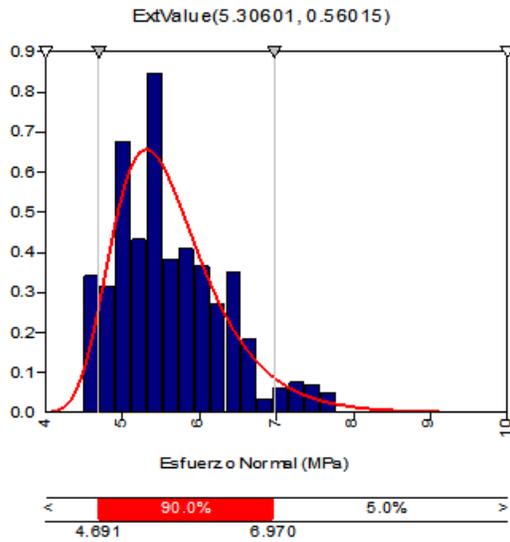
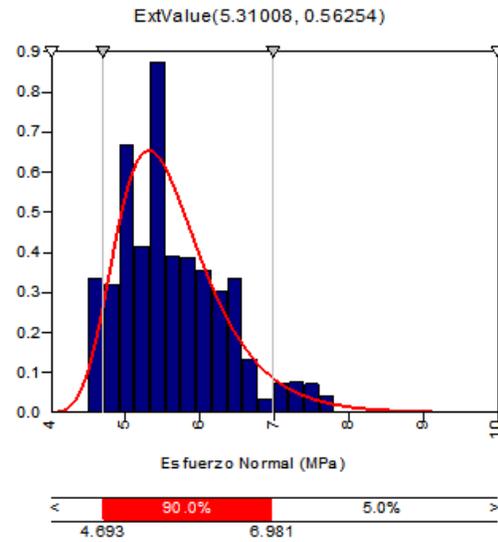


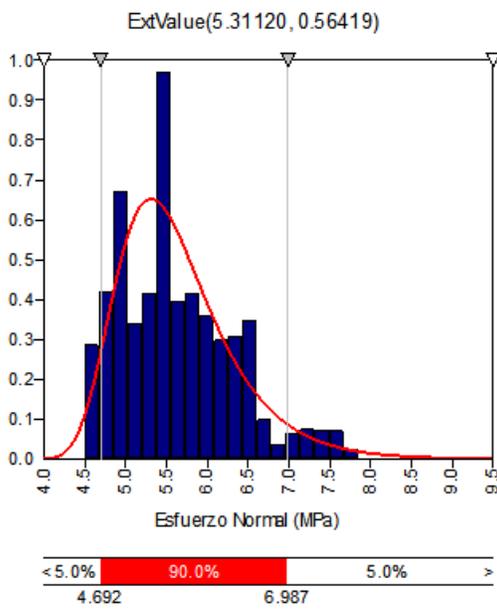
Figura 4.7 Distribuciones de probabilidad de esfuerzos considerando tasa de crecimiento del flujo del 2%, (a) Condición actual, (b) 10 años, (c) 20 años, (d) 30 años



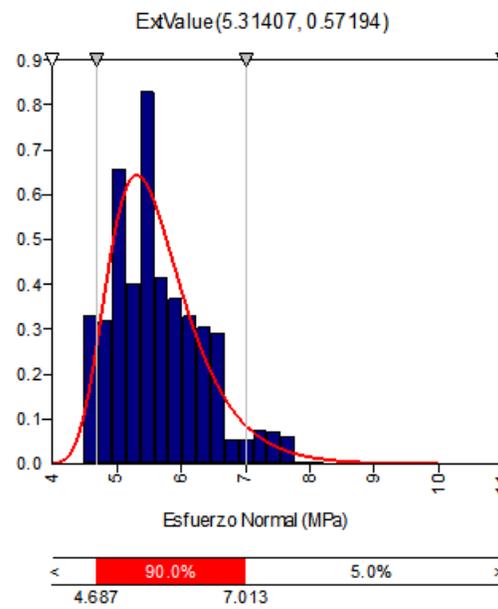
a)



b)



c)



d)

Figura 4.8 Distribuciones de probabilidad de esfuerzos considerando tasa de crecimiento del flujo del 4%, (a) Condición actual, (b) 10 años, (c) 20 años, (d) 30 años

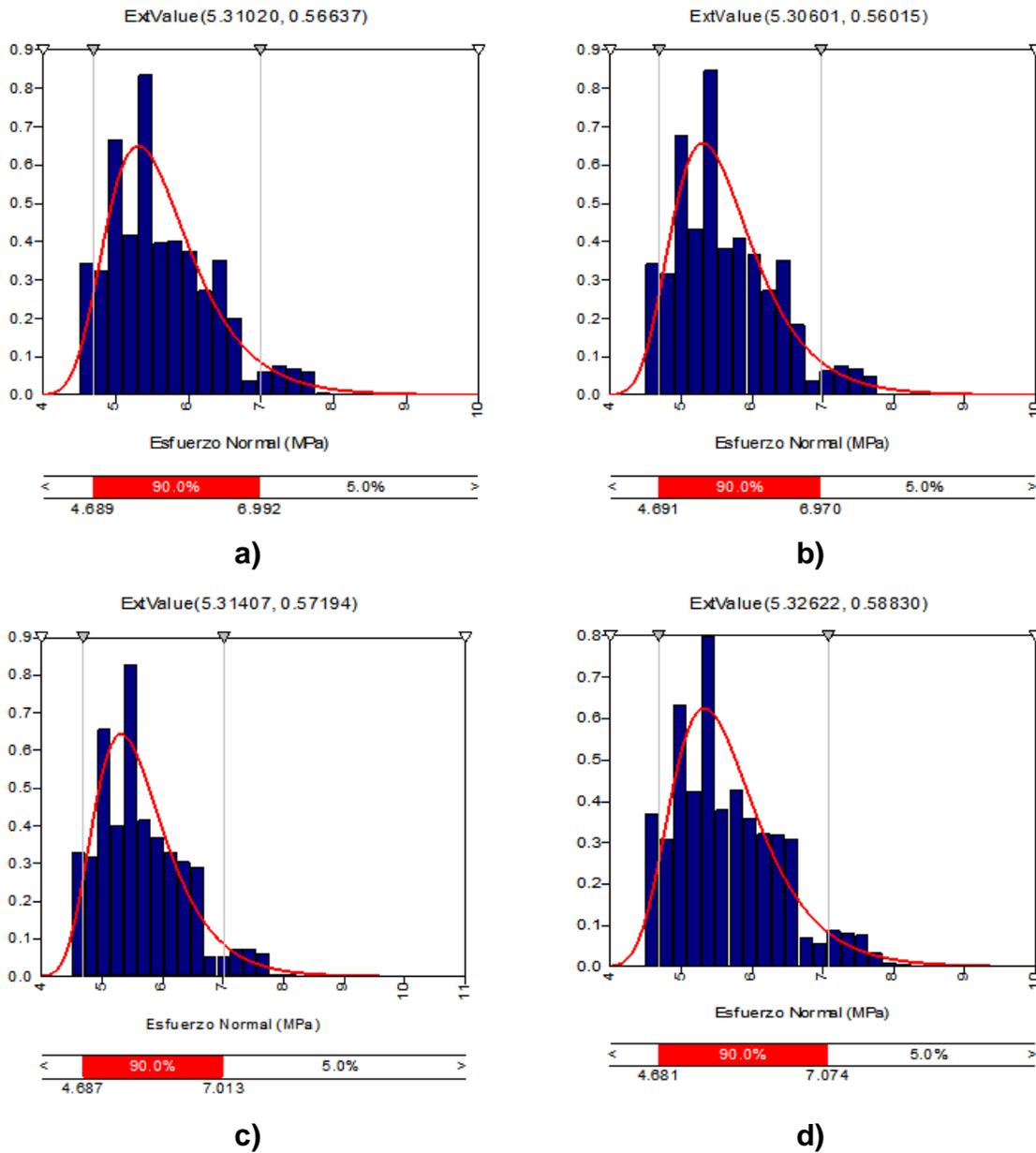


Figura 4.9 Distribuciones de probabilidad de esfuerzos considerando tasa de crecimiento del flujo del 6%, (a) Condición actual, (b) 10 años, (c) 20 años, (d) 30 años

De la simulación del paso de cada tipo de vehículo por la superestructura se obtuvo el número de ciclos que genera su paso, a continuación se muestra el número de ciclos estimados por cada escenario proyectado basando el cálculo en los resultados de esta simulación.

Tabla 3.7 Número de ciclos por configuración

Cantidad de vehículos	Evaluación de número de ciclos/día								Total ciclos
	Vehículo ligero	B2	B3	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	
4 948	0	231	57	612	531	1 444	612	2 725	6 212
6 032	0	281	70	746	648	1 760	746	3 322	7 573
7 352	0	343	85	909	790	2 145	909	4 049	9 230
8 963	0	418	104	1 108	963	2 615	1 108	4 937	11 252
10 842	0	505	126	1 340	1 164	3 164	1 340	5 972	13 611
16 048	0	748	186	1 984	1 724	4 683	1 984	8 839	20 147
28 419	0	1 324	330	3 513	3 052	8 293	3 513	15 653	35 677

Puede notarse que se consideró que el paso de vehículos ligeros no llega a imprimir un ciclo considerable de carga por lo que la contribución de esta población al número de ciclos por día fue discriminada.

Para el análisis del deterioro estructural, fue considerado el escenario de crecimiento del tránsito del 4%.

Tabla 3.8 Número de ciclos totales

Años	Cantidad de vehículos	Promedio de vehículos	Cantidad de ciclos por día	Cantidad de ciclos total
0	4 948			
0-10		6 136	7 703	28 115 950
10	7 324			
10-20		9 083	11 403	41 620 950
20	10 842			
20-30		13 445	16 878	61 604 700
30	16 048			

Mediante el empleo del modelo de Paris (ecuación 2.4) se evaluó la evolución de defectos iniciales en la superestructura, considerando como condición inicial una distribución normal de defectos (figura 4.10a), una constante $C = 0.000\ 032$ y una constante $m = 13.5$.

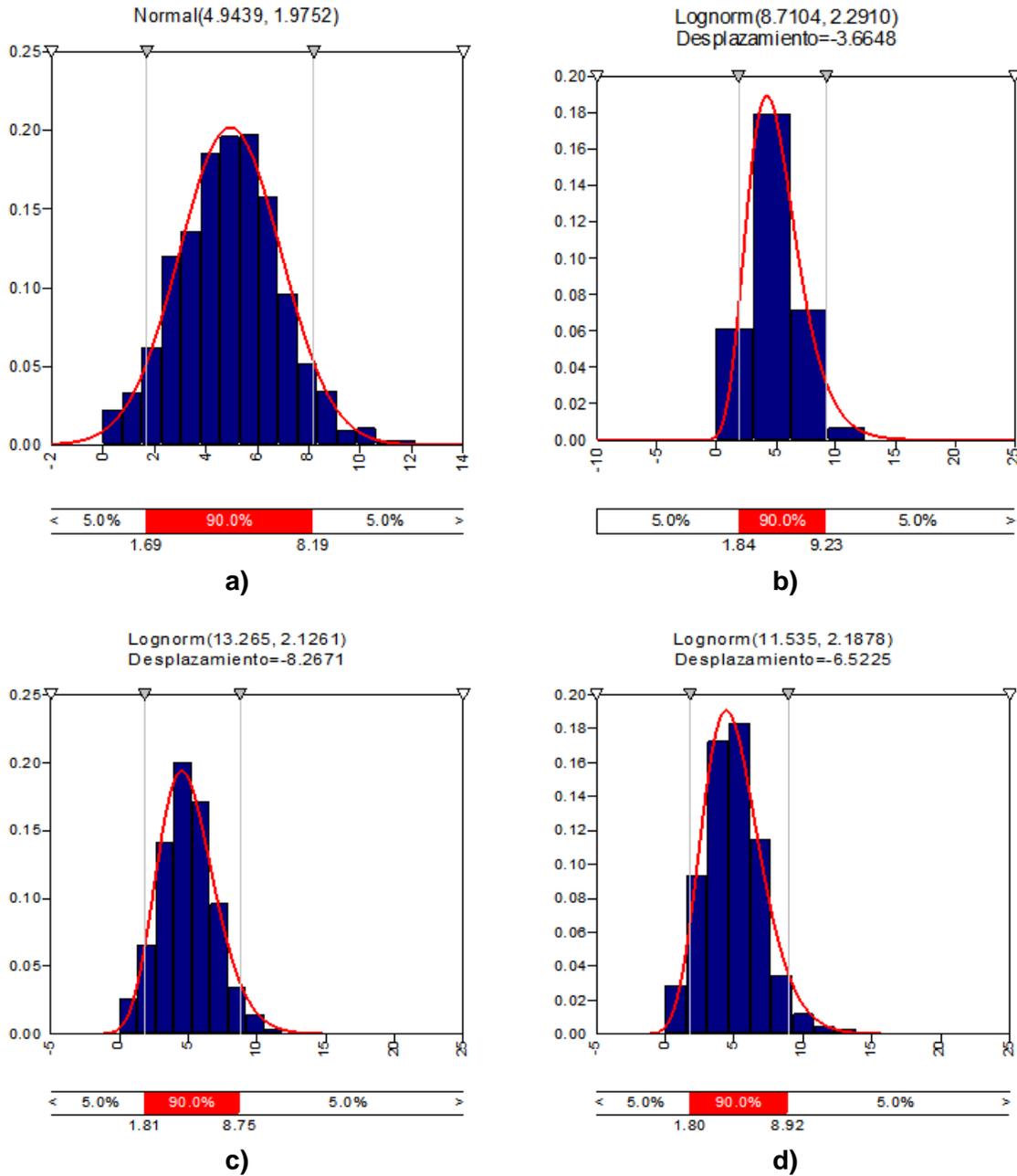


Figura 4.10 Distribuciones de probabilidad de defectos en mm, Modelo de Paris (a) Condición inicial, (b) 10 años, (c) 20 años, (d) 30 años

Por otro lado, mediante el empleo del modelo de Slowik (ecuación 2.10), se analizó la evolución de defectos iniciales en la superestructura, considerando como condición inicial una distribución normal de defectos (figura 4.11 a), y constantes $C = 0.000\ 032$, $m=2$, $n=13.5$, $p=0.7$, una tenacidad a la fractura $K_{IC} = 2.1\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$. Para la estimación de los factores de intensidad de esfuerzos K_{ISUP} , K_{IMAX} , se consideraron valores de esfuerzos σ_{ISUP} , σ_{IMAX} , a 1 y 3 desviaciones

estándar ($\sigma_{ISUP} = 7.768$ MPa, $\sigma_{IMAX} = 6.3488$ MPa) de la media en la distribución de esfuerzos determinada en la simulación.

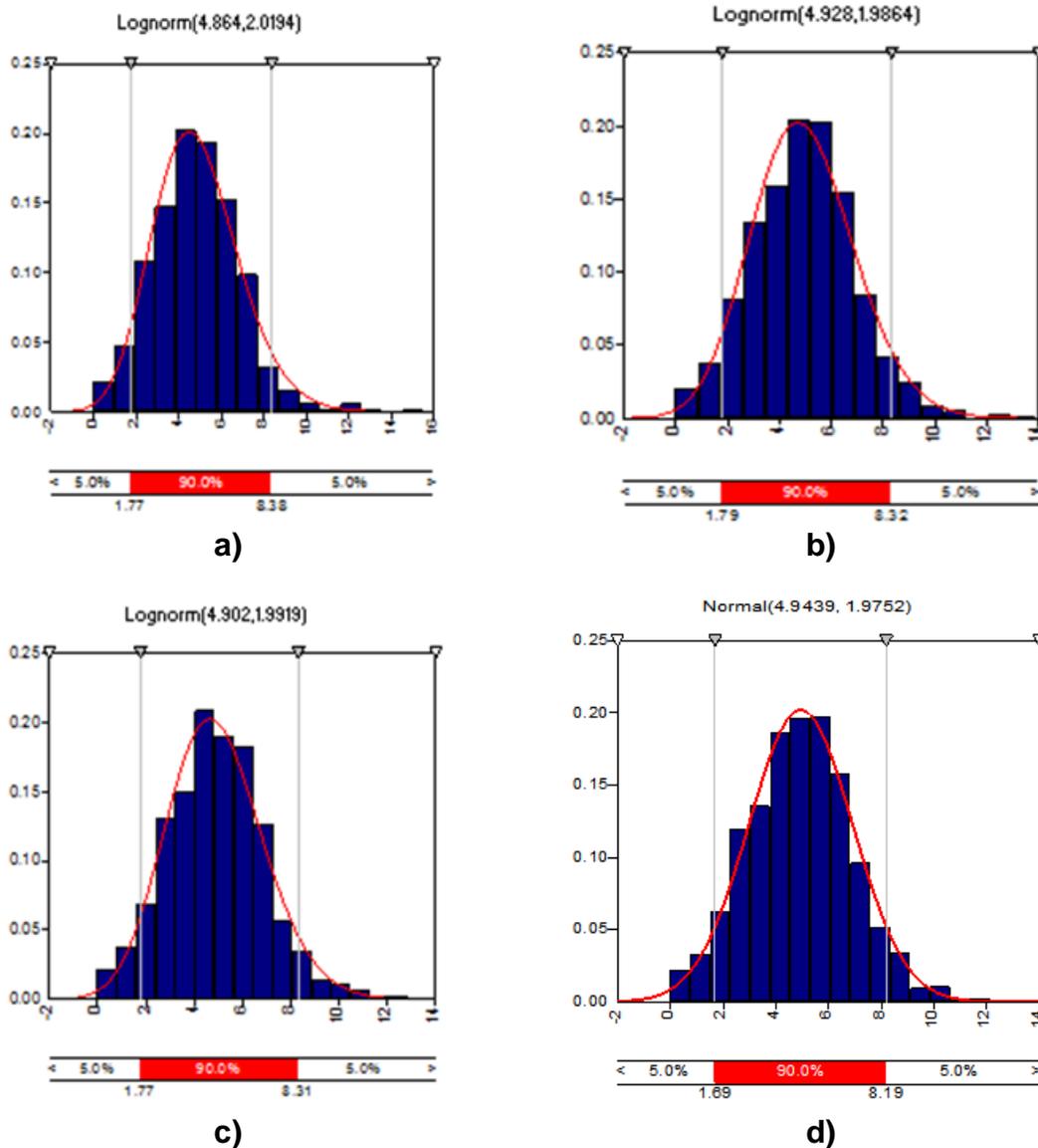


Figura 4.11. Distribuciones de probabilidad de defectos en mm, Modelo de Slowik, (a) Condición inicial, (b) 10 años, (c) 20 años, (d) 30 años

Es importante hacer notar que durante la evaluación del crecimiento de grieta en el intervalo de tiempo analizado, el porcentaje de defectos que sobrepasa el tamaño de grieta crítica, crece como se muestra en la figura 4.10, puede verse que en 30 años, con el modelo de Paris, existe un 2.4% de probabilidad de que estos alcancen un tamaño de grieta crítica (25 mm), mientras que con el modelo de Slowik, el cual involucra el efecto de sobrecargas, esta probabilidad llega a 5.40%, generando daños significativos en los elementos de concreto reforzado.

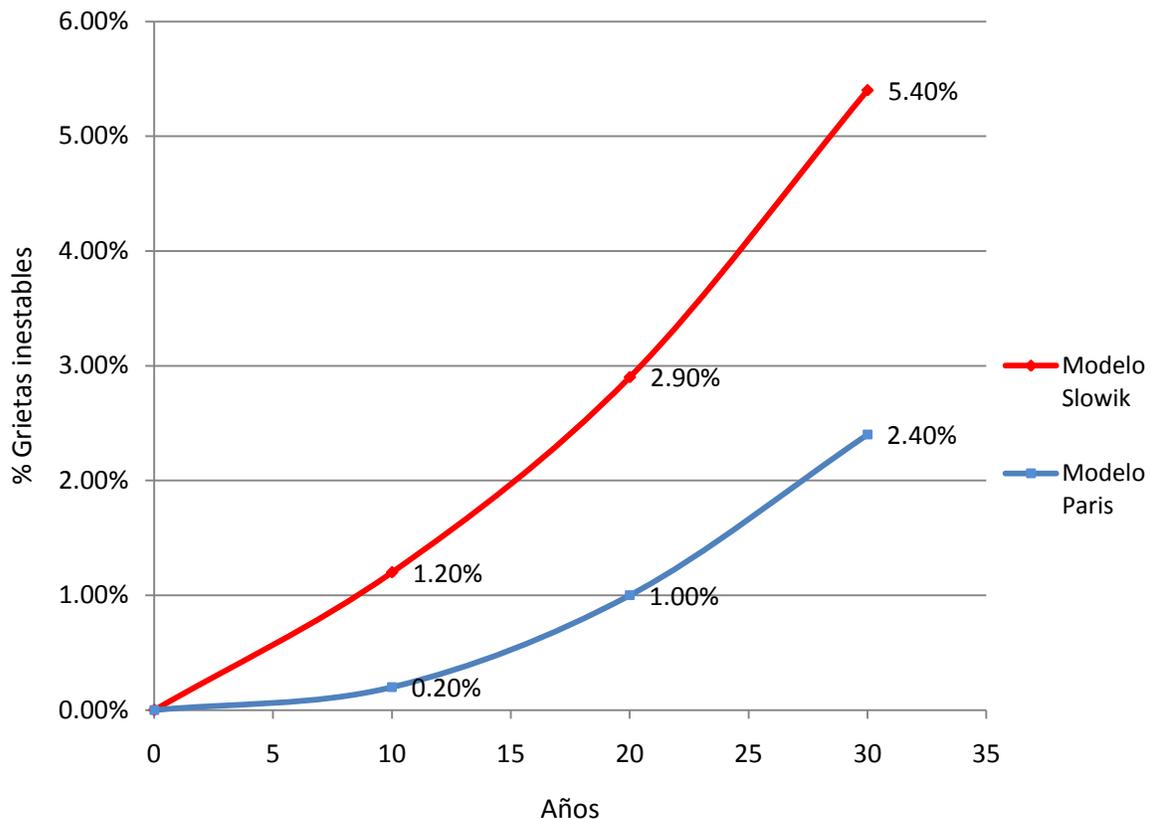


Figura 4.12 Porcentaje de defectos que rebasan el tamaño de grieta crítica

De los resultados mostrados se concluye lo siguiente:

La simulación Monte Carlo es una herramienta poderosa para simular el deterioro estructural de los puentes carreteros en condiciones de carga variable que pueden ser representadas estadísticamente. Una vez que la información estadística de las condiciones de carga está disponible, mediante el análisis de un modelo de elementos finitos de un puente dado, la fiabilidad estructural puede ser calculada con un modelo de daño apropiado para evaluar el deterioro del puente.

Para el caso estudiado (puente “tipo”, claro corto) la distribución de probabilidad de esfuerzos se mantiene prácticamente constante con los distintos escenarios de carga proyectados, ya que el incremento en el flujo vehicular sólo afecta los porcentajes de ocupación del puente (vacío, 1 ó 2 vehículos), observándose que aún con la aparición de un segundo vehículo en su posición crítica (probabilidad baja), el incremento en la magnitud del esfuerzo es de aproximadamente un 20%, afectándose poco esta distribución.

En cuanto a los modelos de fatiga empleados y la distribución de los defectos resultantes, se observó que la distribución de los defectos de tamaño no crítico,

sufre cambios poco significativos en el tiempo debido al hecho de que defectos de tamaño grande evolucionan a grandes grietas rápidamente, mientras que los defectos de tamaño pequeño evolucionan de manera muy lenta, conservándose prácticamente la misma distribución de tamaños en el tiempo. Sin embargo, aplicando el modelo de crecimiento de grieta de Paris, la probabilidad de que un defecto inicial alcance su tamaño de grieta crítico en los 30 años de servicio de la estructura, bajo condiciones de mantenimiento nulo, es de 2.4%, mientras que con el modelo de Slowik, el cual considera el efecto de sobrecargas en el intervalo analizado, esta probabilidad llega a ser del 5.4%.

Los resultados obtenidos en este estudio contemplan el fenómeno de fatiga como mecanismo de degradación de la estructura, no obstante, es posible un refinamiento del modelo mediante la inclusión del fenómeno de corrosión, ya que como se sabe, no es necesaria una exposición total del acero para que el proceso de corrosión se active.

6 Bibliografía

ACI Committee 215. Consideration for design of concrete structures subjected to fatigue loading. ACI, Journal. 1974

Aktan A E, Helmicki A J, and Hunt V J. Issues in Health Monitoring for Intelligent Infrastructure. Journal of Smart Materials and Structures. 1998

Aktan A E, and K A Grimmelsman. The Role of NDE in Bridge Health Monitoring, Proceedings of the SPIE: *Conference on Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways II*. Newport Beach, California. 1999

Anderson, T.L. Fracture Mechanics. Fundamentals and applications. Department of Mechanical Engineering Texas University, 1995. Engineering research series. London; 2001

Bastidas-Arteaga Emilio, Philippe Bressolette, Alaa Chateauneu. Mauricio Sánchez-Silva. Probabilistic lifetime assessment of RC structures under coupled corrosion–fatigue deterioration processes. Structural safety (2009)

Bažant, Z. P., and Xu, K. Size Effect in Fatigue Fracture of Concrete ACI-Materials Journal, 1991

Buyukozturk Oral and Gunes Oguz. Deterioration and nondestructive evaluation of concrete. Symposium Proceedings, Performance of Concrete Structures in The Arabian Gulf Environment, pp.216-229, Dhahran, Saudi Arabia, November 15-17, 1998.

Carpinteri, Andrea *, Spagnoli Andrea, Vantadori Sabrina. A fracture mechanics model for a composite beam with multiple reinforcements under cyclic bending. International Journal of Solids and structures, 2004

Carrión Viramontes, Francisco Javier; Quintana Rodríguez, Juan Antonio; Lomelí González, María Guadalupe; Martínez Madrid, Miguel. La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes. Publicación Técnica No.301, Instituto Mexicano del Transporte. 2003

Carrión Viramontes, Francisco Javier; Quintana Rodríguez, Juan Antonio; López López, José Alfredo; Balankin Alexander; Samayoa Ochoa, Didier. Metodologías de inspección no destructiva aplicables a sistemas de gestión de puentes. Publicación Técnica No.302. Instituto Mexicano del Transporte. 2006

Chase S B, Developing NDT Technologies for the Next Century, Structural Materials Technology: An NDT Conference, San Diego, California (1996)

Cortes Yah, Karina Guadalupe. Modelo probabilista de daño por corrosión en ductos terrestres de transporte de hidrocarburos. Tesis de grado, Maestría en Ciencias, Estructuras, IPN, 2008.

Costa, J.M. Diccionario de Química Física. Ed. Díaz de Santos, 2005

Doebling S W, Ch R Farrar, and M B Prime. A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. The Shock and Vibration Digest. 1998

Etube LS. Fatigue and fracture mechanics of offshore structures. Engineering research series. London. 2001

FHWA Report U.S. Department of Transportation. The Status of the Nation's Highways and Bridges: Conditions and Performance-Highway Bridge Replacement and Rehabilitation Program. 1989

Foreman, R. G.; Kearney, V. E.; and Engle. Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures Journal of Basic Engineering. 1967.

Hernández Albañil Héctor, Espejo Mora Edgar. Mecánica de fractura y análisis de falla. Universidad Nacional de Colombia. 2002

Investigación operativa I, apuntes. Facultad de ciencias exactas. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. 2005.

Kaplan M.F. Crack Propagation and the fracture of concrete. Journal of the American Concrete Institute. 1961.

Lounis, Z. and Madanat, S.M. Integrating mechanistic and statistical deterioration models for effective bridge management. 7th ASCE International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation. 2002.

Madenci Erdogan, Guven Ibrahim. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS Springer. 2006.

Neild S.A., Williams M.S., McFadden P.D. Non-linear behavior of reinforced concrete beams under low amplitude cyclic and vibration loads Engineering Structures. 2002.

Paris, P.C., Gomez, M.P. A Rational Analytic Theory of fatigue. The Trend in Engineering, Vol. 13. 1961.

Paris, P.C., Erdogan, F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws Journal of Basic Engineering, Vol.85. 1960.

Rao K. Balaji, Appa Rao. Stochastic modelling of crack width in reinforced concrete beams subjected to fatigue Loading. *Engineering Structures*. 2004.

Rao, K. Balaji; Rao Appa. Probabilistic analysis of crack widths in RC beams under fatigue loading. *Proceedings of International Symposium on Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures*. 1991

Schlafl M, Bruhweiler E. Fatigue of existing reinforced concrete bridge deck slabs. *Engineering Structures*. 1998

Slowik Volker; Plizzari, Giovanni Angelo; and Saouma, Victor E. Fracture of Concrete Under Variable Amplitude Fatigue Loading *ACI-Materials Journal*. 1996.

Spencer F W. *Visual Inspection Research Project on Benchmark Inspection*, Technical Report DOT/FAA/AR-96/05, U S Department of Transportation, Federal Aviation Administration. 1996.

Thomas G. Overview of Nondestructive Evaluation Technologies, *Proceedings of the SPIE: Conference on Nondestructive Evaluation of Aging Utilities*. Oakland, California. 1995

Torres-Acosta, Andrés. Cracking induced by localized corrosion of reinforcement in chloride contaminated Concrete. *Disertación doctoral*. University of South Florida, USA: 1999

Torres Acosta, Andrés; Martínez Madrid, Miguel. *Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad*. Publicación técnica No. 181. Instituto Mexicano del Transporte. 2001

Torres Marco A.; Ruiz Sonia E. Structural reliability evaluation considering capacity degradation over time. *Engineering structures*. 2007

Walker, E. K. Effect of Stress Ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-t3 and 7075-t6 Aluminum. *American Society for Testing and Materials STP 462*, M. S. Rosenfeld. 1970.

Zanuy Carlos, Pablo de la Fuente, Luis Albajar. Effect of fatigue degradation of the compression zone of concrete in reinforced concrete sections. *Engineering Structures*. 2007.

Apéndice A Revisión de base de datos SIPUMEX

A1 Análisis de atributos geométricos y composición de puentes

Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), Comisión Nacional de Electricidad (CFE) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) tienen sus propios programas de conservación de puentes. El más ambicioso de estos programas fue implantado por SCT, firmado en 1992 con el Directorio Danés de Carreteras. Este programa lleva como nombre SIPUMEX. El Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) permite contar con un inventario de la totalidad de los puentes de la Red Federal de Carreteras, en el que se incluyen las características, ubicación y estado físico. Ello permite efectuar una priorización de las necesidades de mantenimiento y rehabilitación, con lo que se logra una optimización de los recursos aplicables, atendiendo al mismo tiempo a la seguridad de los usuarios.

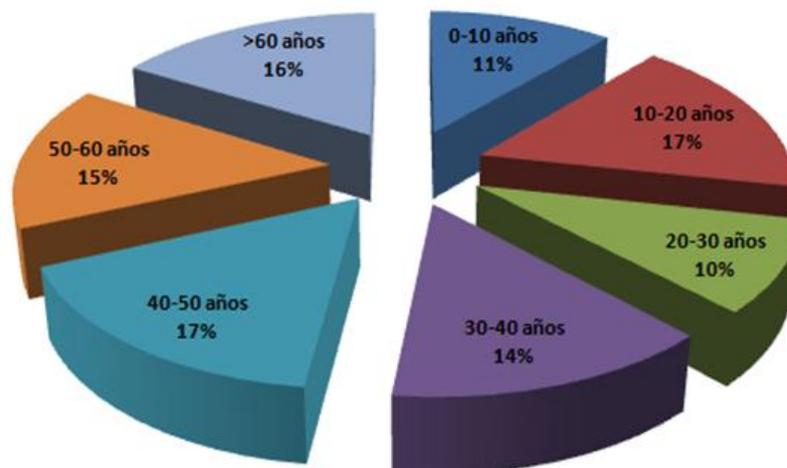
Al inicio, se emplearon inspecciones visuales para evaluar diferentes partes de los puentes, y determinar un índice de la calificación de la condición estructural calculada del promedio de calificaciones individuales ponderadas de acuerdo con la importancia. Inicialmente, el resultado general del sistema de administración fue la visión global y calificación de todo el inventario de puentes con su tipo, tamaño, condición, localización, etc. (Carrión, 2006).

A continuación se presenta un análisis de la base de datos del Sistema Puentes de México (SIPUMEX) con el objeto de determinar los atributos geométricos más representativos del conjunto de puentes de este inventario.

Edad de puentes

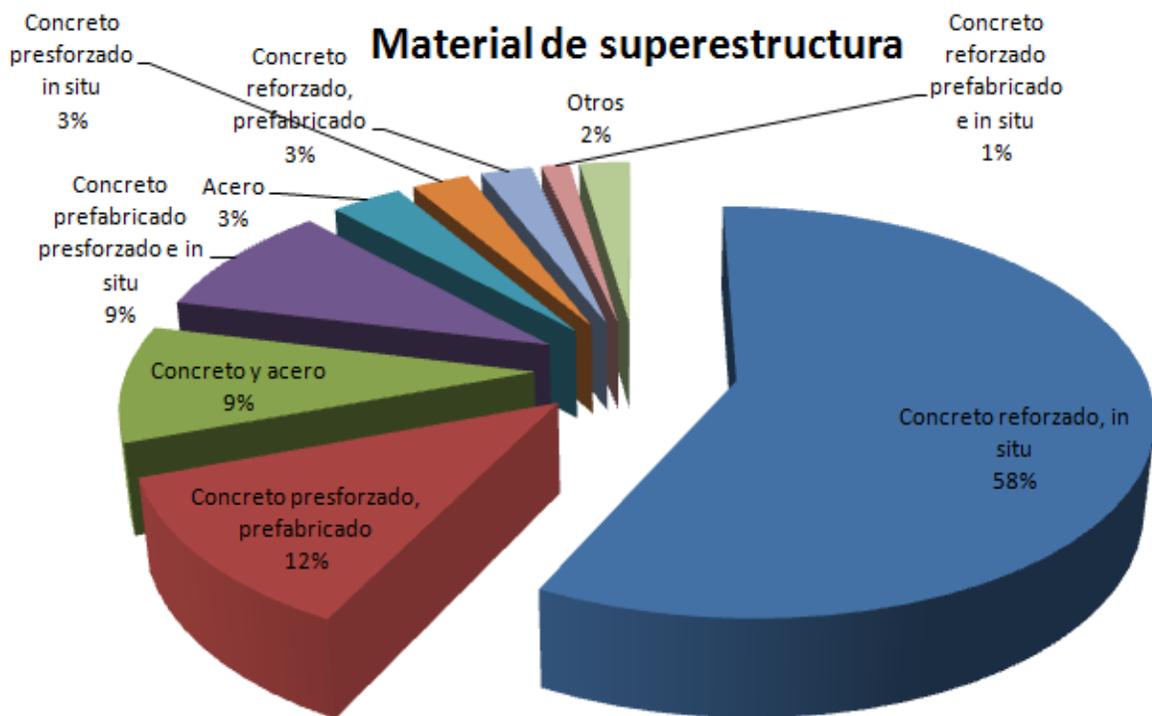
Edad	Cantidad	Porcentaje
0-10 años	860	11.34%
10-20 años	1 287	16.97%
20-30 años	720	9.49%
30-40 años	1 071	14.12%
40-50 años	1 250	2.96%
50-60 años	1 155	15.23%
>60 años	1 242	16.38%

Edad de puentes



Material de composición de la superestructura

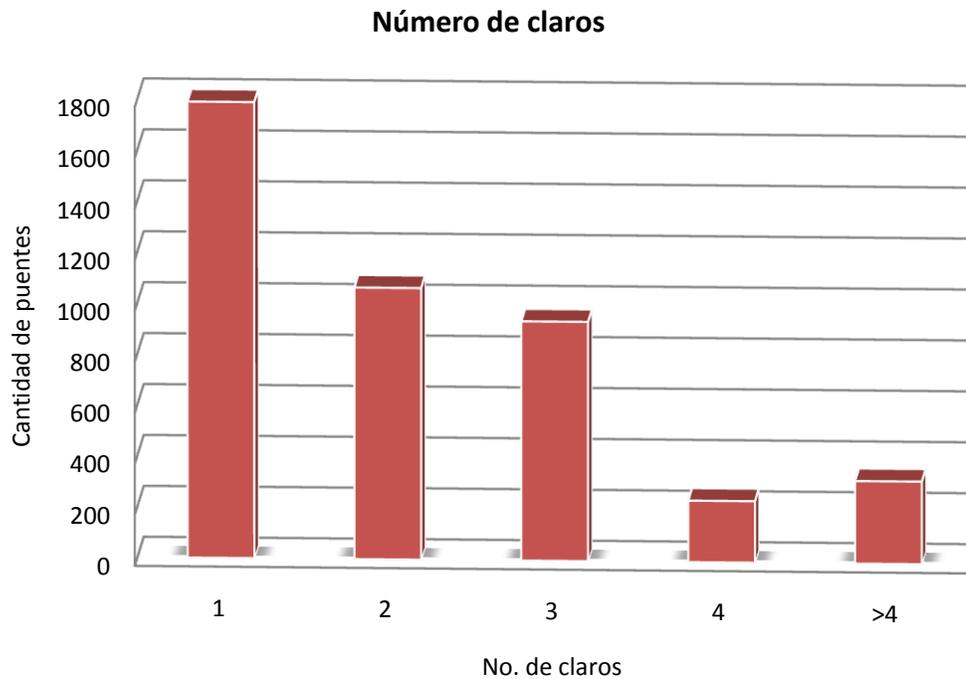
Material	Cantidad	Porcentaje
Concreto reforzado, in situ	4 360	57.39%
Concreto presforzado, prefabricado	916	12.06%
Concreto y acero	704	9.27%
Concreto prefabricado presforzado in situ	694	9.14%
Acero	254	3.34%
Concreto presforzado in situ	206	2.71%
Concreto reforzado, prefabricado	183	2.41%
Concreto reforzado prefabricado e in situ	100	1.32%
Otros	180	2.00%



A continuación se muestra el análisis del número de claros con los que cuenta el conjunto de puentes de concreto reforzado (57.39%),

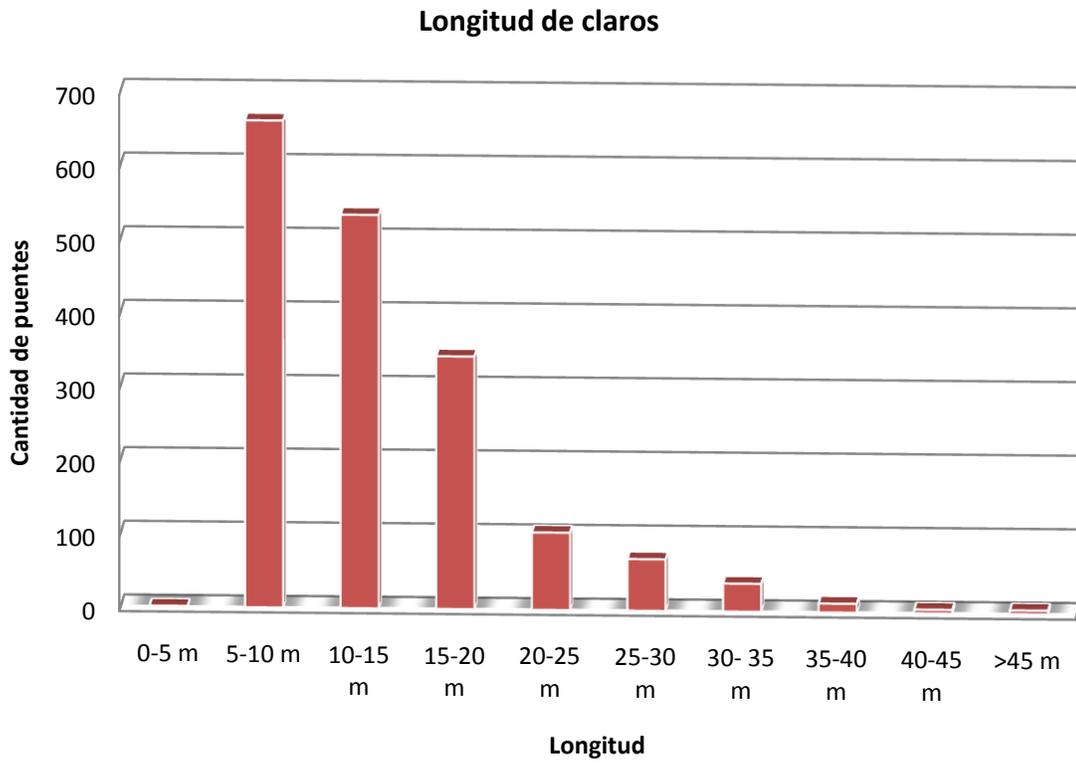
Número de claros en los puentes

Claro de puentes	Número de puentes	Porcentaje
1	1 790	41.05%
2	1 066	24.45%
3	939	21.53%
4	241	5.52%
> 4	324	7.43%



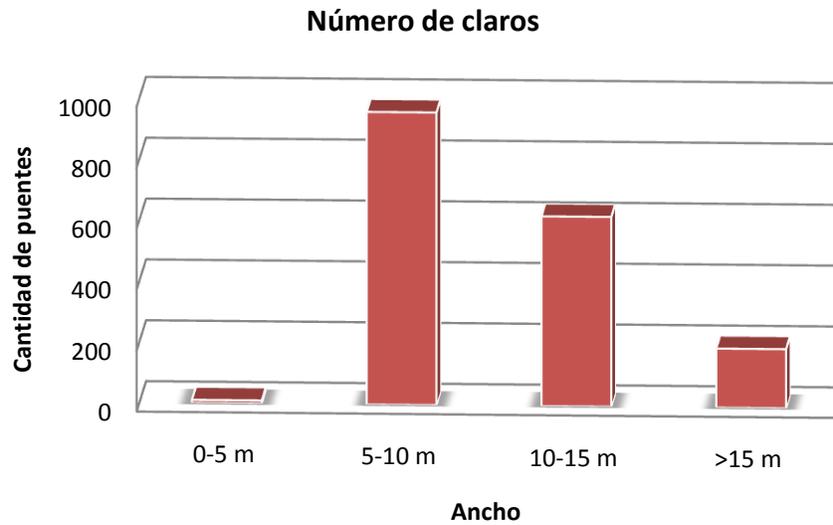
Analizando la longitud de los claros de este subconjunto, se tiene lo siguiente:

Longitud de claro	Cantidad de puentes	Porcentaje
0-5 m	1	0.06%
5-10 m	661	37.26%
10-15 m	534	30.10%
15-20 m	343	19.33%
20-25 m	105	5.92%
25-30 m	70	3.95%
30-35 m	38	2.14%
35-40 m	12	0.68%
40-45 m	5	0.28%
>45 m	5	0.28%



Analizando el ancho de la sección transversal de este subconjunto, se tiene lo siguiente:

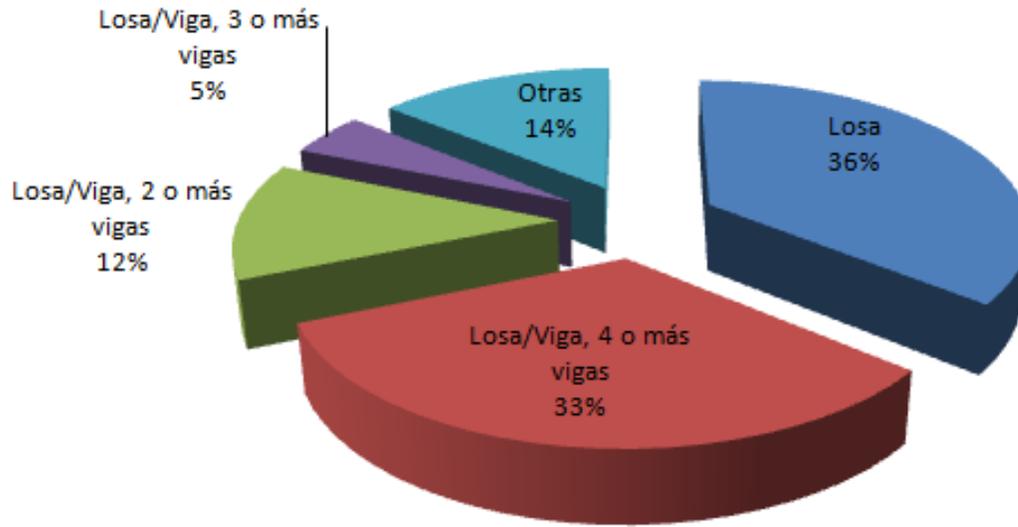
Ancho total de puente	Cantidad de puentes	Porcentaje
0-5 m	10	10.83%
5-10 m	961	45.00%
10 -15 m	623	34.12%
>15 m	194	4.82%



Del conjunto total de puentes registrados en la base de datos, la superestructura está conformada por:

Tipo de sección transversal		
Sección transversal	Cantidad	Porcentaje
Losa	2 728	35.89%
Losa/Viga, 4 o más vigas	2 499	32.88%
Losa/Viga, 2 o más vigas	949	12.49%
Losa/Viga, 3 o más vigas	354	4.66%
Otras	1 071	14.09%

Sección transversal

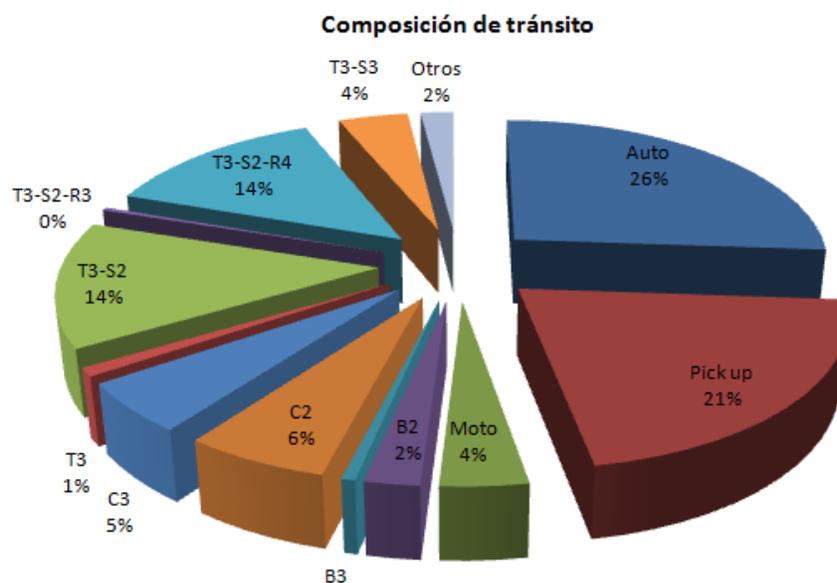


Apéndice B Análisis de aforo vehicular en el puente Río Papaloapan

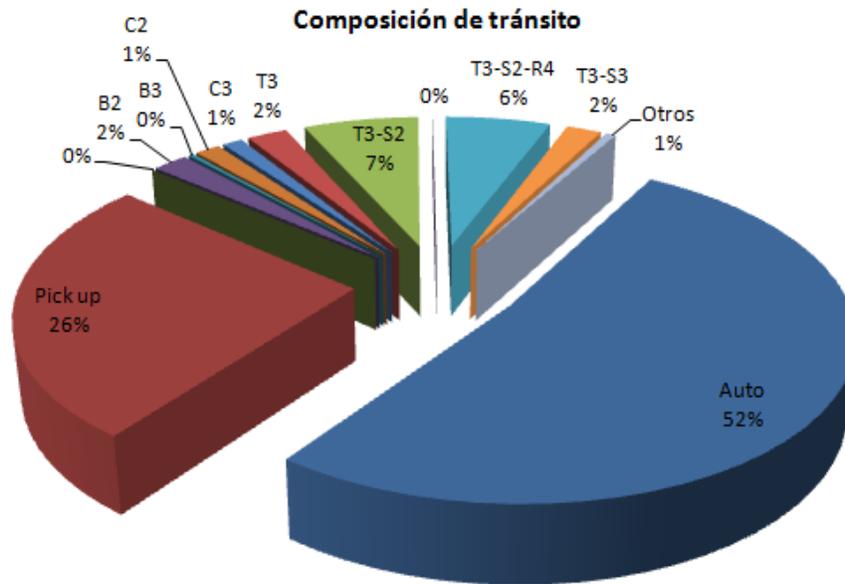
Composición vehicular

A continuación se presenta la información correspondiente al aforo vehicular en el puente Río Papaloapan ubicado en el tramo carretero (cuota) de La Tinaja a Cosoleacaque en el estado de Veracruz, en dirección Coatzacoalcos.

Carril de baja velocidad



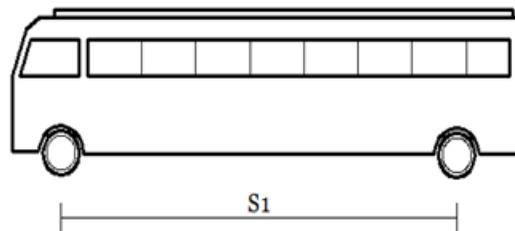
Carril de alta velocidad



Número y distancias entre ejes de vehículos registrados

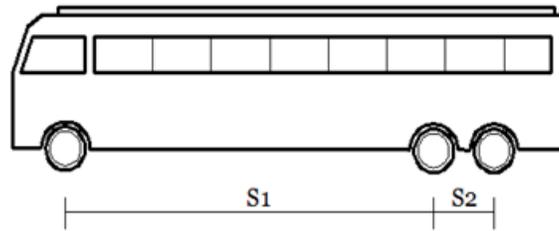
En seguida se muestran para cada una de las configuraciones vehiculares anteriores, las distancias consideradas entre cada uno de sus ejes.

Vehículo B2



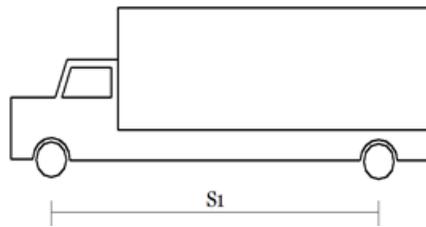
Tipo de vehículo	Número de ejes	Distancia entre ejes (m) S1
B2	2	5.25

Vehículo B3



Tipo de vehículo	Número de ejes	Distancia entre ejes (m)	
		S1	S2
B3	3	4.0	1.25

Vehículo C2



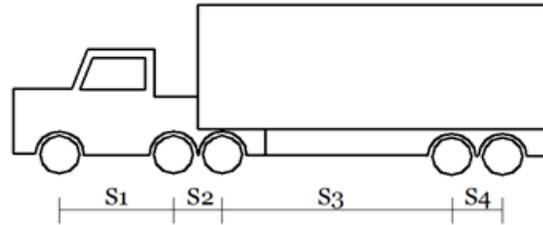
Tipo de vehículo	Número de ejes	Distancia entre ejes (m)
		S1
C2	2	5.25

Vehículo C3



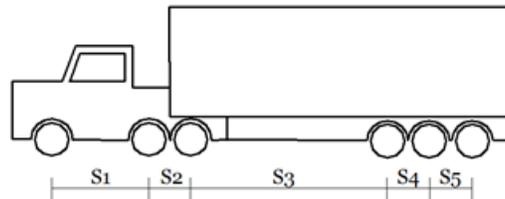
Tipo de vehículo	Número de ejes	Distancia entre ejes (m)	
		S1	S2
C3	3	4.0	1.25

Vehículo T3-S2



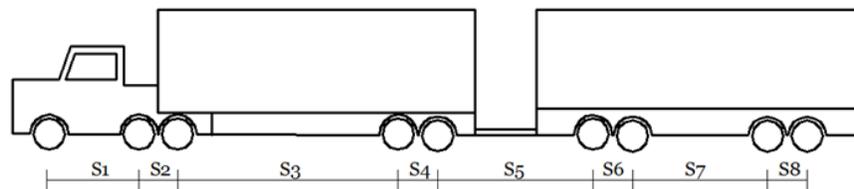
Tipo de vehículo	Número de ejes	Distancia entre ejes (m)			
		S1	S2	S3	S4
T3-S2	5	4.25	1.25	12.5	1.25

Vehículo T3-S3



Tipo de vehículo	Número de ejes	Distancia entre ejes (m)				
		S1	S2	S3	S4	S5
T3-S3	5	4.25	1.25	11.25	1.25	1.25

Vehículo T3-S2-R4



Tipo de vehículo	Número de ejes	Distancia entre ejes (m)							
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
T3-S2-R4	9	5.5	1.25	8.5	1.25	2.5	1.25	8.5	1.25

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, 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. El

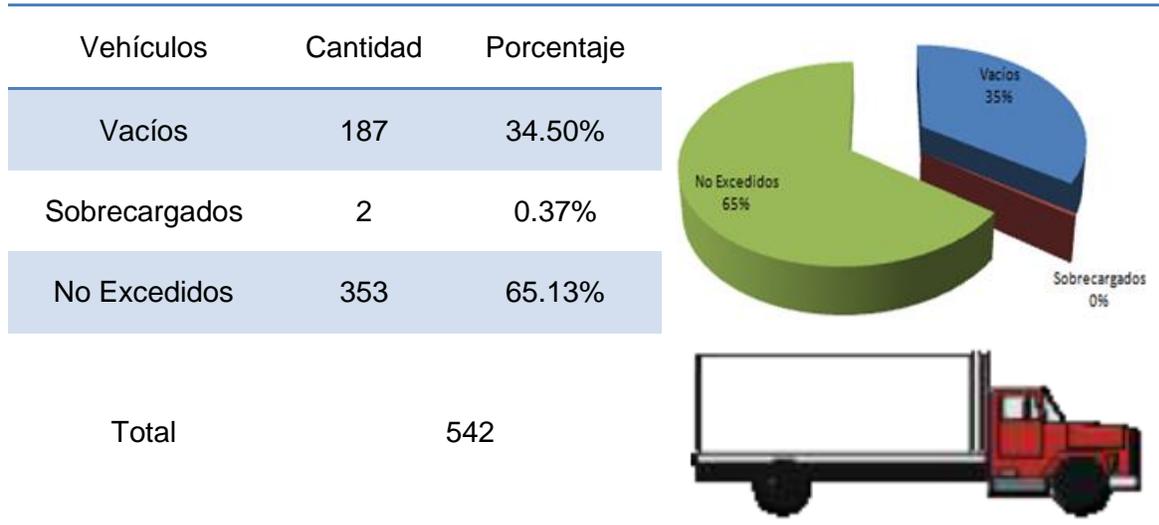
ancho máximo autorizado para todas las clases de vehículos que transitan en los diferentes tipos de caminos, será de 2,60 m, este ancho máximo no incluye los espejos retrovisores, elementos de sujeción y demás aditamentos para el aseguramiento de la carga, sin embargo, se tomará como 2 m la distancia máxima entre ejes para todos los vehículos.

Condición de carga en vehículos

A continuación se muestran las cantidades registradas de cada uno de estos vehículos, con los porcentajes de estos que circulan vacíos, sobrecargados y no excedidos en peso bruto vehicular, considerando únicamente aquellos que transitan en la dirección La Tinaja-Cosoleacaque.

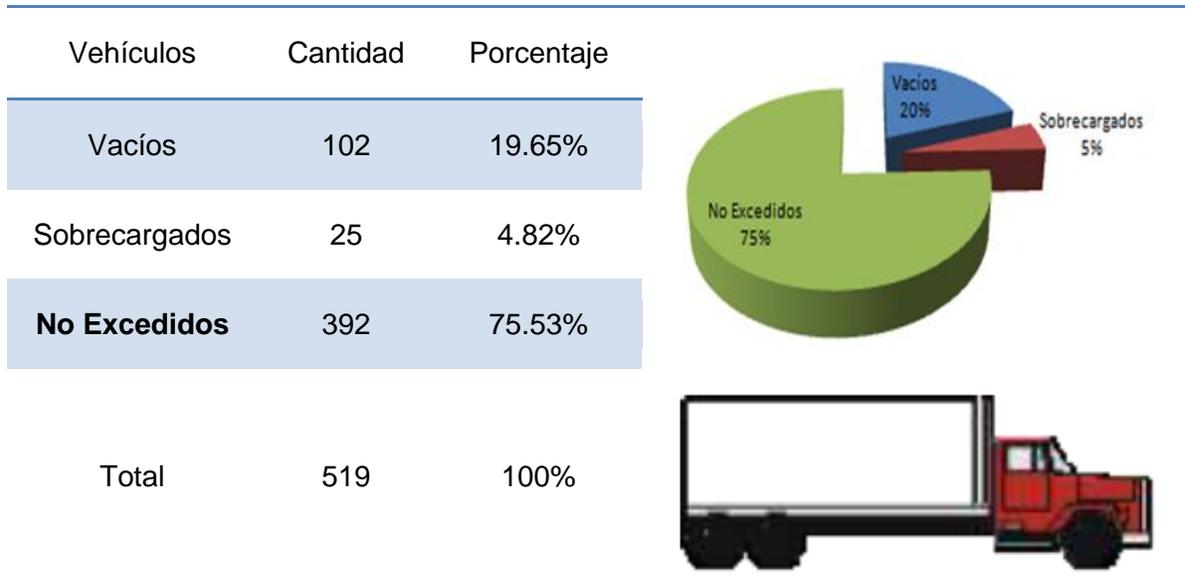
Vehículos tipo C2

Vehículo automotor de 2 ejes y 6 llantas, destinado al transporte de carga con peso bruto vehicular mayor a 4 ton.



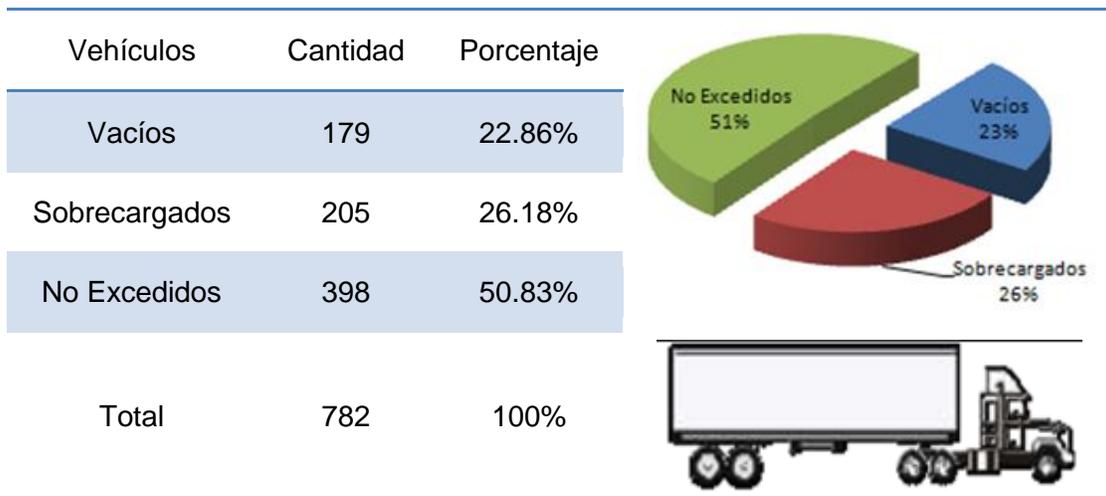
Vehículos tipo C3

Vehículo automotor de 3 ejes y 8 llantas, destinado al transporte de carga con peso bruto vehicular mayor a 4 ton.



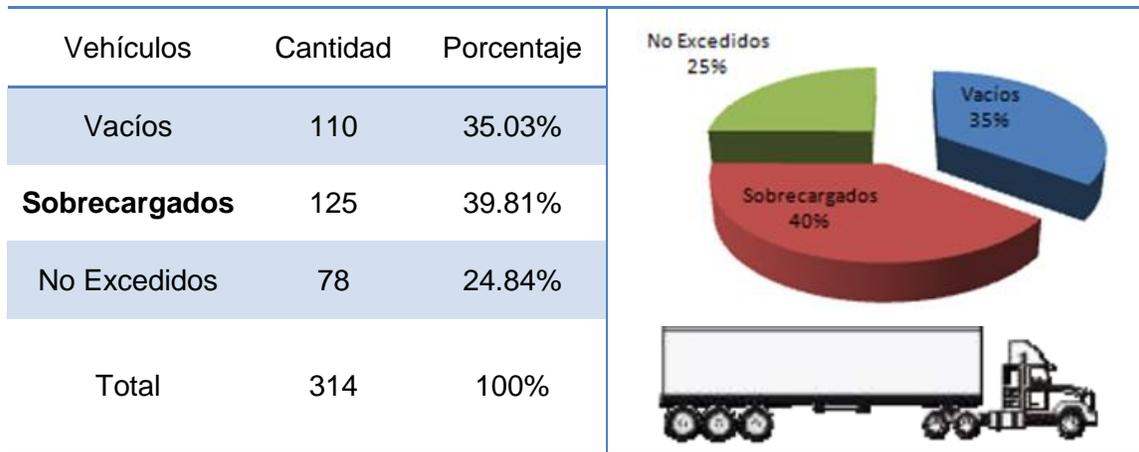
Vehículos tipo T3-S2

Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión y un semirremolque.



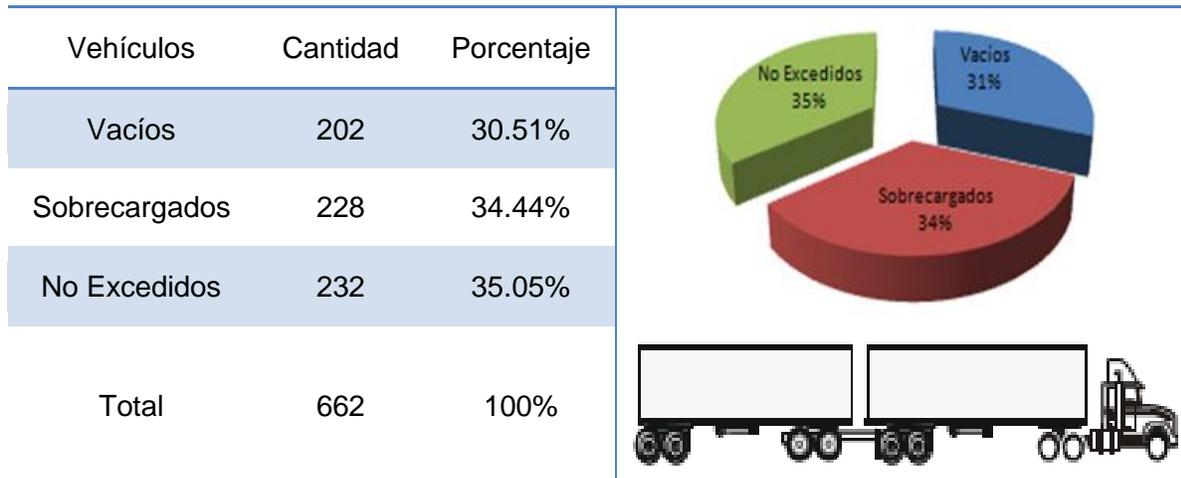
Vehículos tipo T3-S3

Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión y un semirremolque.



Vehículos tipo T3-S2-R4

Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión y dos semirremolques.



Vehículos ligeros y autobuses

Estos vehículos fueron considerados con un peso constante de 3 ton, independientemente de su porcentaje de ocupación. Lo mismo con los vehículos de pasajeros B2 y B3, considerándolos con peso fijo de 17.5 y 21.5 ton respectivamente.

Peso Bruto Vehicular

Del estudio correspondiente a la caseta Sayula (No.152) ubicada en el tramo carretero (cuota) de La Tinaja a Cosoleacaque en el estado de Veracruz, se determinaron las distribuciones del Peso Bruto Vehicular registrado, a continuación se muestra un resumen de este análisis.

Vehículos C2

Vehículos vacíos

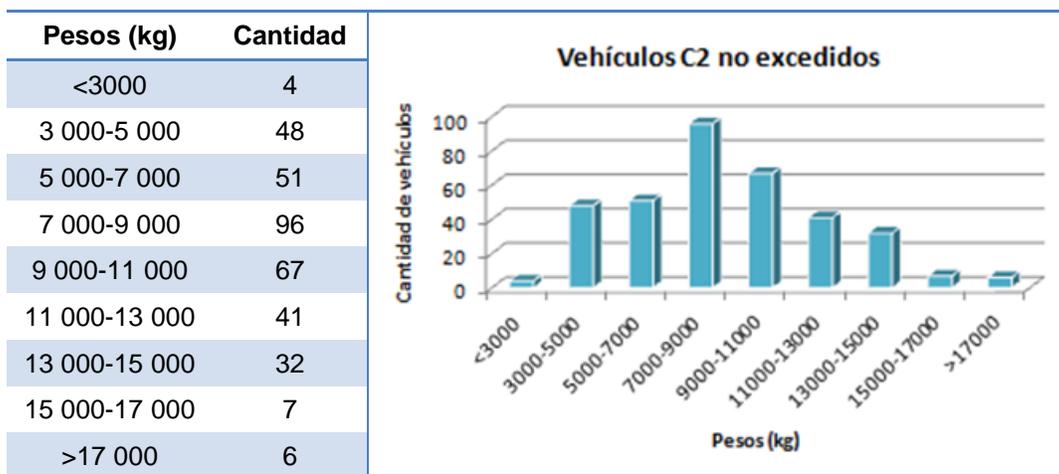
Los vehículos vacíos representan el 34.50% del total de vehículos registrados, se consideró un Peso Bruto Vehicular promedio de 4.2 ton.

Vehículos excedidos

Los vehículos excedidos representan el 0.37% del total de vehículos registrados, para estos vehículos se consideró un Peso Bruto Vehicular promedio de 20.8 ton.

Vehículos no excedidos

Los vehículos no excedidos representan el 65.13% del total de vehículos registrados, para este conjunto se presenta a continuación la distribución de frecuencias de los pesos registrados.



Vehículos C3

Vehículos vacíos

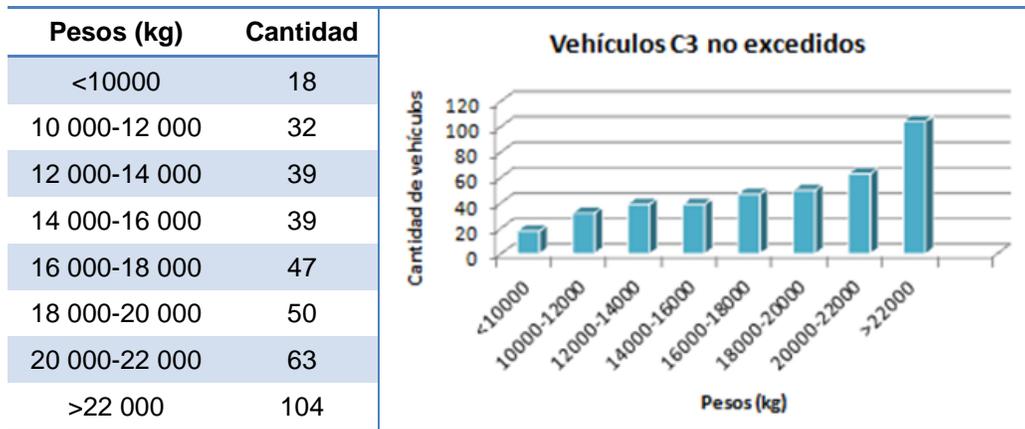
Los vehículos vacíos representan el 19.65% del total de vehículos registrados, para este conjunto se consideró un Peso Bruto Vehicular promedio de 8 ton.

Vehículos excedidos

Los vehículos excedidos representan el 4.8% del total de vehículos registrados, para estos vehículos se consideró un Peso Bruto Vehicular promedio de 28 ton.

Vehículos no excedidos

Los vehículos no excedidos representan el 75.53% del total de vehículos registrados, para este conjunto se presenta a continuación la distribución de frecuencias de los pesos registrados.



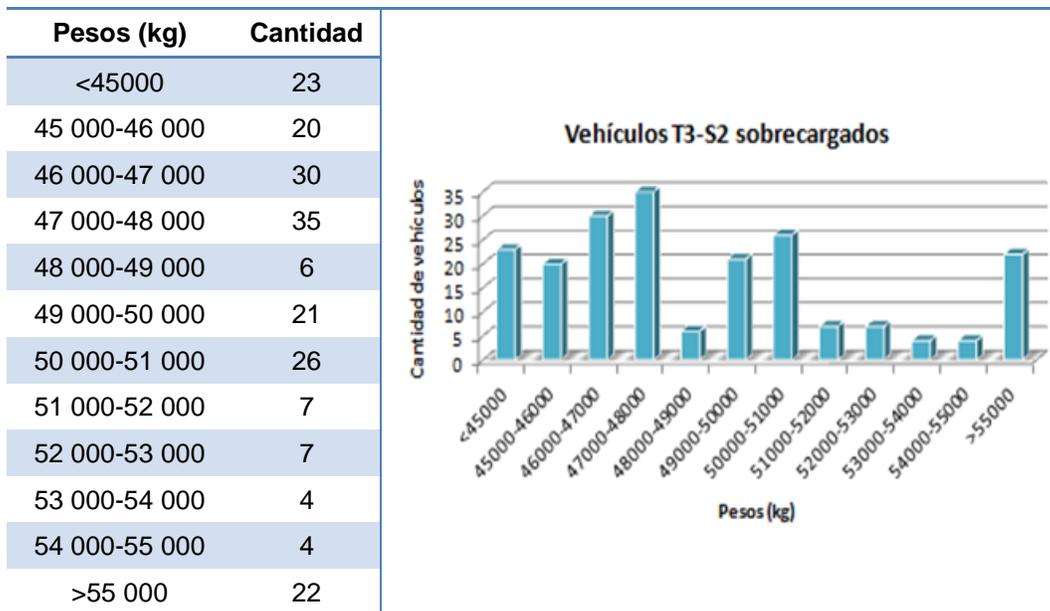
Vehículos T3-S2

Vehículos vacíos

Los vehículos vacíos representan el 22.86% del total de vehículos registrados, para estos vehículos se consideró un Peso Bruto Vehicular promedio de 19.88 ton.

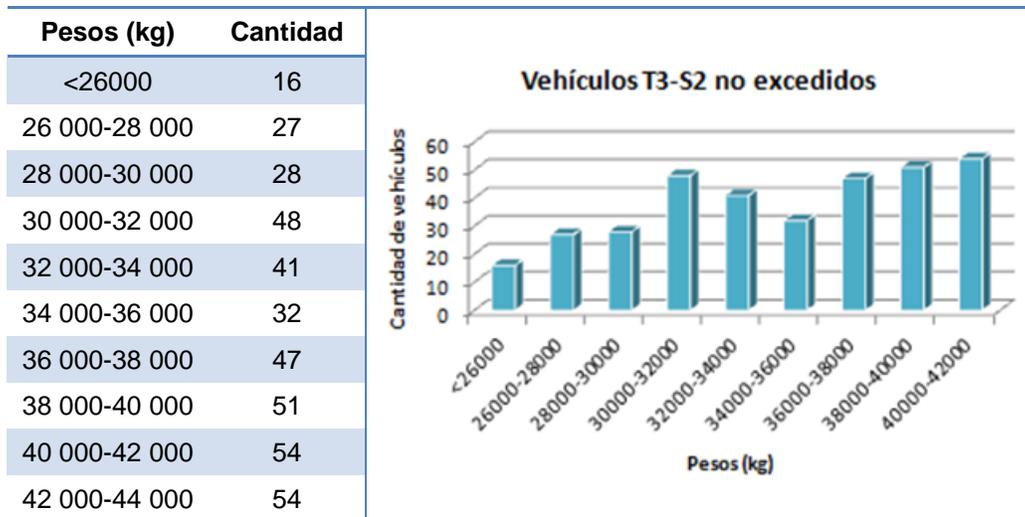
Vehículos excedidos

Los vehículos excedidos representan el 26.18% del total de vehículos registrados, para este conjunto se presenta a continuación la distribución de frecuencias de los pesos registrados.



Vehículos no excedidos

Los vehículos no excedidos representan el 42.68% del total de vehículos registrados, para este conjunto se presenta a continuación la distribución de frecuencias de los pesos registrados.



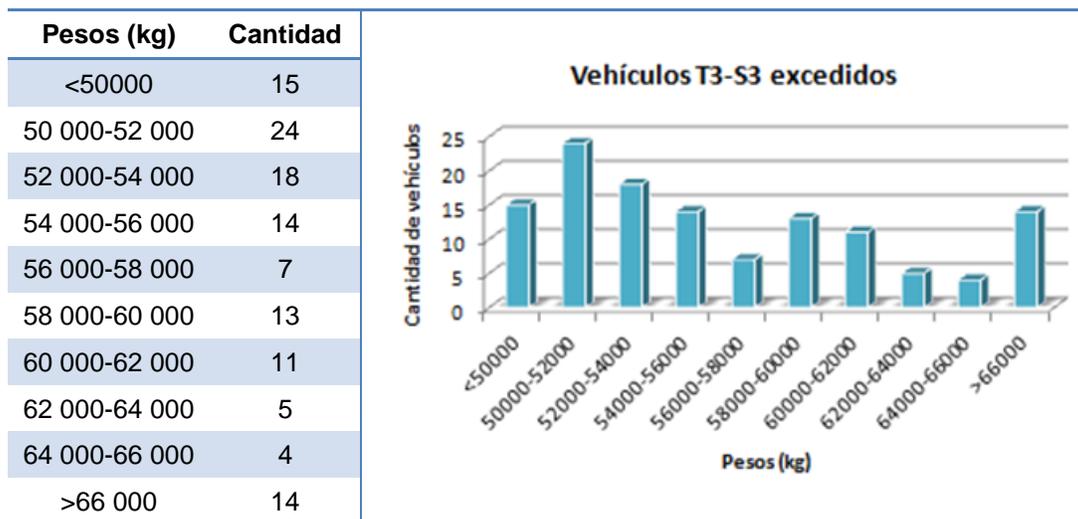
Vehículos T3-S3

Vehículos vacíos

Los vehículos vacíos representan el 35.03% del total de vehículos registrados, para estos vehículos se consideró un Peso Bruto Vehicular promedio de 25.7 ton.

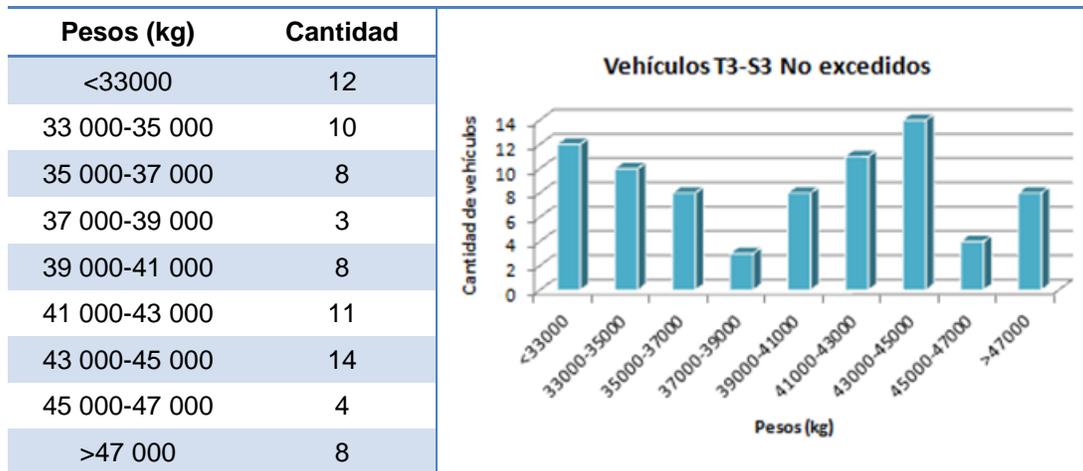
Vehículos excedidos

Los vehículos excedidos representan el 39.81% del total de vehículos registrados, para este conjunto se presenta a continuación la distribución de frecuencias de los pesos registrados.



Vehículos no excedidos

Los vehículos no excedidos representan el 24.84% del total de vehículos registrados.



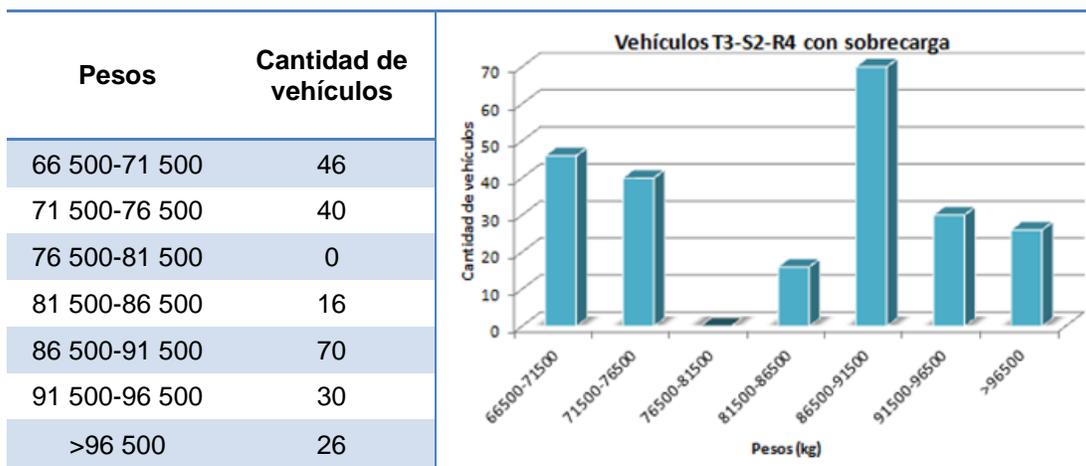
Vehículos T3-S2-R4

Vehículos vacíos

Los vehículos vacíos representan el 30.51% del total de vehículos registrados, para estos vehículos se consideró un Peso Bruto Vehicular promedio de 40 ton.

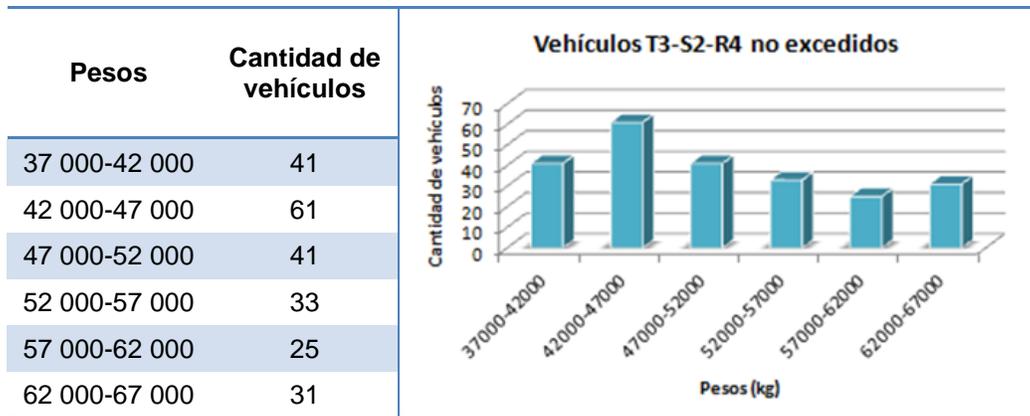
Vehículos excedidos

Los vehículos excedidos representan el 34.44% del total de vehículos registrados, para este conjunto se presenta a continuación la distribución de frecuencias de los pesos registrados.



Vehículos no excedidos

Los vehículos no excedidos representan el 35.05% del total de vehículos registrados, para este conjunto se presenta a continuación la distribución de frecuencias de los pesos registrados.



Distribución del peso en los ejes

Por otro lado, de este estudio de aforo y pesaje vehicular se determinaron los pesos por cada eje de los diferentes vehículos, a continuación se presentan los porcentajes promedio de distribución del peso en cada uno de estos ejes.

Vehículo B2

Ejes de vehículo	Eje 1	Eje 2
Porcentaje del peso total promedio	50%	50%

Vehículo B3

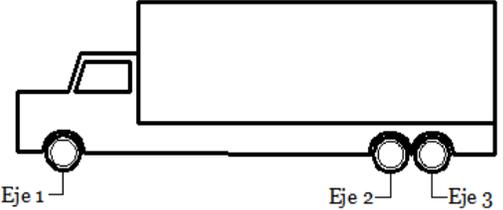
Ejes de vehículo	Eje 1	Eje 2	Eje 3
Porcentaje del peso total promedio	25.0%	37.5%	37.5%

Vehículo C2

Ejes de vehículo	Eje 1	Eje 2
Porcentaje del peso total promedio	40%	60%

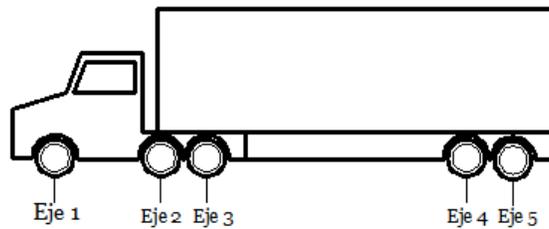
Vehículos C3

Ejes de vehículo	Eje 1	Eje 2	Eje 3
Porcentaje del peso total promedio	25.0%	37.5%	37.5%



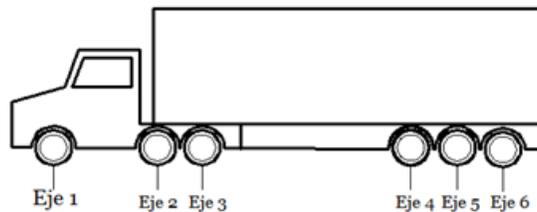
Vehículos T3-S2

Ejes de vehículo	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5
Porcentaje del peso total promedio	15.00%	21.25%	21.25%	21.25%	21.25%



Vehículos T3-S3

Ejes de vehículo	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6
Porcentaje del peso total promedio	12.00%	20.00%	20.00%	16.00%	16.00%	16.00%



Vehículos T3-S2-R4

Ejes de vehículo	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Eje 7	Eje 8	Eje 9
Porcentaje del peso total promedio	8.0 %	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%

Vehículos ligeros

La distribución del peso en este tipo de vehículos se considerará del 50% en cada uno de los dos ejes.

Porcentajes de ocupación vehicular

Según el estudio estadístico de datos del aforo vehicular realizado en el puente Papaloapan, ubicado sobre el tramo carretero La Tinaja-Acayucan en Veracruz, incluido en 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, los porcentajes de ocupación vehicular sobre este puente son los siguientes:

Número de vehículos	Probabilidad de ocurrencia (%)
0	19.98
1	26.31
2	28.74
3	15.17
4	6.51
5	2.43
6	0.67
7	0.10
8	0.04
9	0.002

Porcentajes de ocupación vehicular por carril

Carril	Dirección Tinaja		Dirección Acayucan	
	Baja velocidad	Alta velocidad	Baja velocidad	Alta velocidad
Porcentaje	35.61	14.23	35.82	14.32

Determinación de ocupación vehicular

Según el estudio estadístico de datos del aforo vehicular realizado en el puente Papaloapan, ubicado sobre el tramo carretero La Tinaja-Acayucan en Veracruz, incluido en 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, el promedio de vehículos que transitan en esta zona por día es de 9895, considerando una velocidad promedio de 90 km/h (25 m/s), y una longitud del puente de 25 m, tenemos que el tiempo que tarda en pasar un vehículo por el puente es:

$$\frac{86400}{9895} = 8.732 \frac{\text{seg}}{\text{veh}}$$

De acuerdo a la velocidad promedio (25 m/s), un vehículo tarda en cruzar el puente 1 seg, por lo que considerando intervalos de tiempo de 0.10 seg, se tendrá que la probabilidad de encontrar un vehículo en éste es de:

$$Pv = \frac{0.10}{8.732} = 0.0114$$

Como el intervalo de cada una de las 10 ventanas consideradas para este análisis fue de 0.10 seg, las probabilidades de ocupación del puente se calcularon con las siguientes expresiones:

$(1 - Pv)^{10}$	0 vehiculos
$10(1 - Pv)^9 (Pv)$	1 vehiculos
$45(1 - Pv)^8 (Pv)^2$	2 vehiculos
$120(1 - Pv)^7 (Pv)^3$	3 vehiculos
$210(1 - Pv)^6 (Pv)^4$	4 vehiculos
$252(1 - Pv)^5 (Pv)^5$	5 vehiculos
$210(1 - Pv)^4 (Pv)^6$	6 vehiculos

Número de vehículos	Probabilidad de ocurrencia (%)
0	89.12
1	10.32
2	0.538 2
3	0.016 6
4	0.000 337
5	0.000 004 687
6	0.000 000 0452

Para la generación de los escenarios de carga serán consideradas la existencia sobre la superestructura de 1 ó 2 vehículos, con lo cual, de los porcentajes anteriores, tenemos:

Número de vehículos	Probabilidad de ocurrencia (%)
1	94.78
2	5.21

Apéndice C Diseño de la superestructura del puente de concreto reforzado tipo

C1 Análisis

C1.1 Diseño de losa de superestructura

C1.1.1 Revisión del peralte propuesto

Según la “Standard Specification for Highway Bridges 1996” de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), las limitaciones del peralte de la superestructura están dadas por la siguiente ecuación, esto si se desea omitir la revisión de las deflexiones máximas.

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

Donde S = Longitud entre los ejes de los elementos de apoyo del tablero

Para este caso la separación entre ejes de estos elementos es de 2 m, por lo que S = 1.6 m ≈ 5.3 ft

$$t_s = \frac{(5.3 + 10)}{30} = 0.51 \leq 0.542$$

Como vemos, el valor obtenido es menor que 0.542, por lo que se tomará para el análisis este último, que equivale a 6.5 in ≈ 16.5 cm, por lo que los 20 cm propuestos son aceptables.

Considerando el empleo de un concreto con un $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2 = 4000 \text{ psi}$, se tiene la siguiente carga muerta:

Concepto	Carga
Peso propio de la losa considerada = $\left(\frac{7.9}{12}\right) (1)(150)$	99 $\frac{\text{lb}}{\text{ft}}$
Superficie de rodamiento	15 $\frac{\text{lb}}{\text{ft}}$
Carga Muerta total =	114 $\frac{\text{lb}}{\text{ft}}$

Calculando el momento flexionante provocado por esta carga, tenemos

$$M_D = \frac{wL^2}{10} = \frac{(114)(5.3)^2}{10} = 320 \text{ lb} - \text{ft} = 0.32 \text{ klb} - \text{ft}$$

Por otro lado, del apartado 3.24 de “Standard Specification for Highway Bridges 1996” de AASHTO, sobre la distribución de las cargas y diseño de las losas de concreto, se tiene que el momento flexionante producido por la carga viva para el vehículo de diseño HS 20 está dado por:

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

Como sabemos, S = 5.3 ft y P₂₀ = 16 000 lb para el vehículo HS 20,

$$M_L = 0.8 \left(\frac{S + 2}{32} \right) P_{20} = 0.8 \left(\frac{5.3 + 2}{32} \right) 16\,000 = 2\,920 \text{ lb} - \text{ft} = 2.92 \text{ klb} - \text{ft}$$

En la expresión anterior no está incluido el efecto de impacto, por lo que se hace necesario, según la sección 3.8.2 de estas especificaciones, alterar el momento anterior un porcentaje, el cual está definido por la siguiente expresión:

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

$$I = \frac{50}{5.3 + 125} = 0.38 \geq 0.30$$

Como el valor obtenido sobrepasa el máximo permitido, se tomará este último como válido, por lo que,

$$M_{L+I} = (2.92)(1.3) = 3.8 \text{ klb} - \text{ft}$$

Por lo que el momento total de diseño será

$$M_T = 0.32 + 3.8 = 4.12 \text{ klb} - \text{ft}$$

Si definimos las constantes j y k como sigue:

$$k = \frac{n}{(n+r)} ; j = 1 - \frac{k}{3}$$

Donde $n=8$ para un $f'_c = 4\,000$ psi y $r = \frac{f_s}{f_c}$

$$f_c = 0.4 f'_c = 0.4(4\,000 \text{ psi}) = 1\,600 \text{ psi}$$

$$f_s = 20\,000 \text{ psi}$$

$$r = \frac{20\,000}{1\,600} = 12.5$$

Tenemos que,

$$k = \frac{n}{(n+r)} = \frac{8}{(8+12.5)} = 0.39$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.3902}{3} = 0.87$$

El peralte efectivo de la losa está dado por:

$$d = \sqrt{\frac{2M}{f_c k j b}} = \sqrt{\frac{2(4.12)(12\,000)}{1\,600 (0.39)(0.87)(12)}} = 3.89 \text{ in}$$

Suponiendo que se utilizarán barras del No. 6, y se aplicará un recubrimiento de 2 in, tendremos un d disponible de:

$$d = 7.9 - \frac{1}{2}(0.75) - 2 = 5.5 \text{ in}$$

Por lo tanto, el peralte total propuesto es suficiente para las condiciones de carga definidas.

El área de acero requerido en esta dirección será:

$$A_s = \frac{M}{f_s j d} = \frac{4.12(12\,000)}{20\,000(0.87)(5.5)} = 0.516 \text{ in}^2$$

Si se suministran barras del No.6, estas irán @ 10 in, tanto en el lecho superior como en el lecho inferior.

Por otro lado, según la sección 3.24.10.2, el acero perpendicular al último calculado será un:

$$\text{Porcentaje} = \frac{220}{\sqrt{S}} = \frac{220}{\sqrt{5.3}} = 95.56\% > 67\%$$

Así, se proporcionará,

$$A_{S, dist} = 0.67(0.53) = 0.36 \text{ in}^2$$

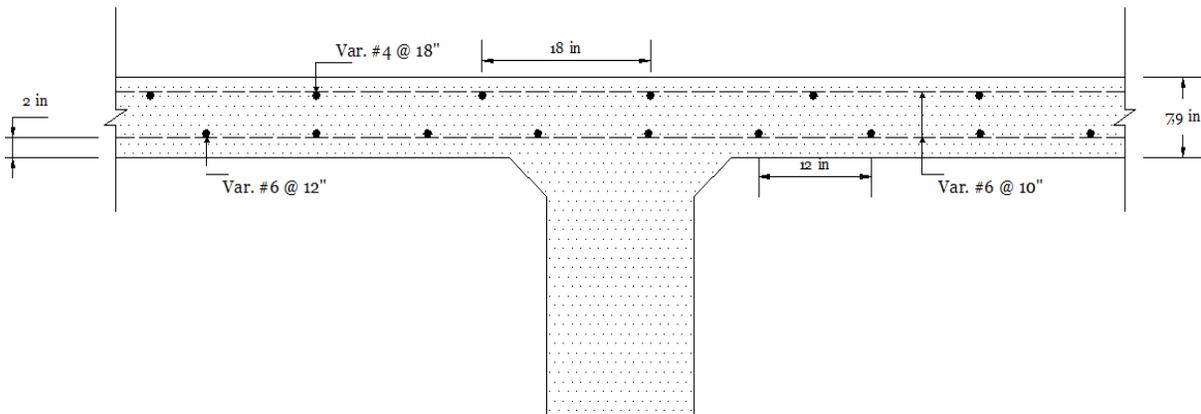
Por lo que se proporcionará var. No.6 @ 12 in.

Por otro lado, el acero por temperatura, según la sección 8.20, será de al menos,

$$A_{S temp} \geq 0.125 \text{ in}^2$$

Por lo que si suministramos barras del No. 4, éstas irán @ 18 in.

A continuación, se muestra el croquis de armado de la losa de la superestructura del puente.



C1.1.2 Diseño de vigas interiores de superestructura

Según el apartado 8.9.2 de "Standard Specification for Highway Bridges 1996" de AASHTO, el peralte mínimo de estos elementos está definido por la siguiente expresión:

$$\text{Peralte mínimo (vigas } T) = 0.070 S$$

Donde S = longitud del claro que cubre el elemento, por lo tanto:

$$\text{Peralte mínimo (vigas } T) = 0.070 (44.5 \text{ ft}) = 3.12 \text{ ft} \approx 37.5 \text{ in}$$

Como se ve, el peralte inicial propuesto (33.5 in) para la viga es insuficiente, por lo que el peralte será modificado, en adelante se adoptará un peralte de 37.5 in.

Por otro lado, estimando la carga muerta, tenemos:

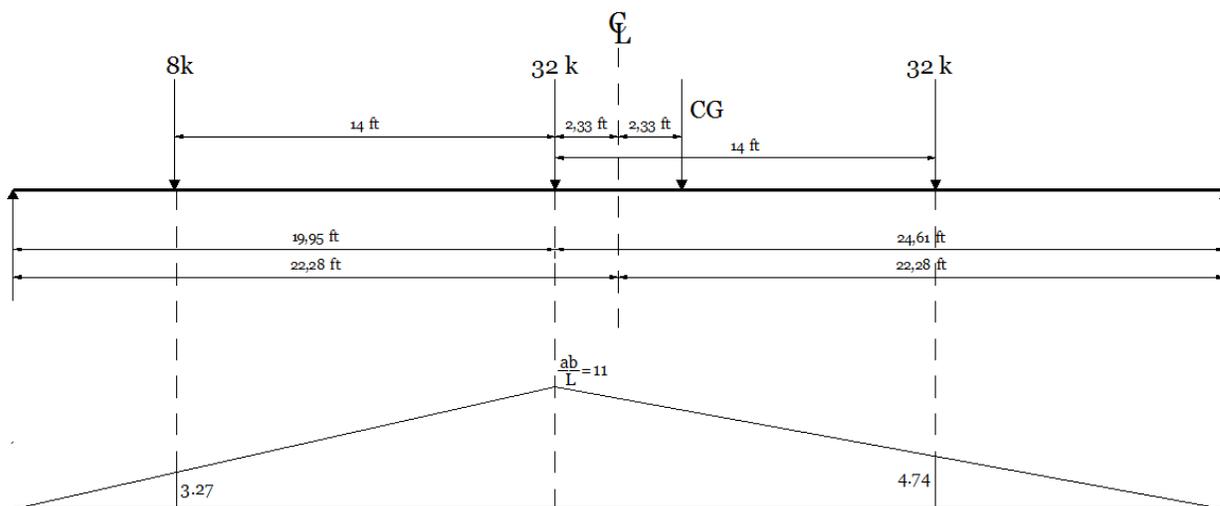
Concepto	Carga
Peso de la losa @ 114 lb/ft ² = 114 (6.6) =	752.4 lb/ft
Peso de la viga T = 16 (29.5)(150/144) =	491.1 lb/ft
Carga muerta total =	1243.5 lb/ft

Se estima el momento flexionante y la fuerza cortante asociados a esta carga calculada:

$$M_D = \frac{1}{8}wL^2 = \frac{1}{8}(1.2435)(44.5)^2 = 307.8 \text{ klb}$$

$$V_D = \frac{1}{2}wL = \frac{1}{2}(1.2435)(44.5) = 27.7 \text{ klb}$$

Estimación de la carga viva:



Como vemos, el máximo momento flexionante máximo debido a la carga viva ocurre a 19.95 ft del apoyo izquierdo. Este momento es de:

$$M_L = 32 \left[11 + 4.74 + \frac{1}{4}(3.27) \right] = 529.84 \text{ klb} - ft$$

Por otro lado, el factor de distribución será:

$$DF = \frac{S}{6} = \frac{6.6}{6} = 1.1$$

Mientras que el factor de impacto será:

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

$$I = \frac{50}{44.5 + 125} = 0.30$$

Por lo tanto, el momento de diseño debido a la carga viva incluyendo el impacto será:

$$M_{L+I} = (M_L) \left(\frac{1}{2}\right) (DF)(1 + I)$$

$$M_{L+I} = (529.84) \left(\frac{1}{2}\right) (1.1)(1 + 0.30) = 379 \text{ klb} - \text{ft}$$

Este momento es el correspondiente a un solo eje del camión, por esto se multiplicó por 0.5.

Por otro lado, el máximo momento debido a la carga muerta puede ser calculado mediante el diagrama de la línea de influencia:

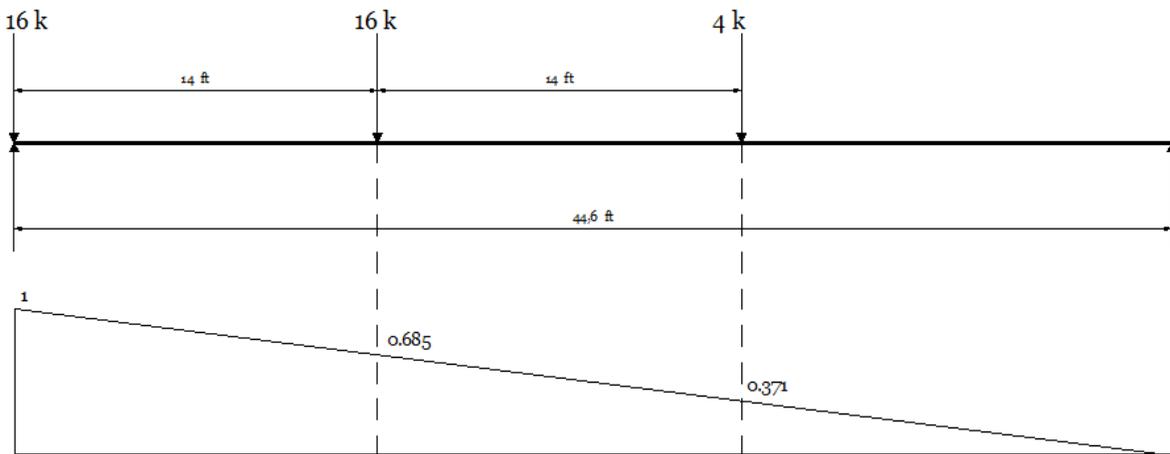
$$M_D = w (\text{Área bajo el diagrama de línea de influencia})$$

$$M_D = 1.243 \frac{\text{klb}}{\text{ft}} \left(\frac{1}{2} \times 44.5 \times 11\right) = 304.22 \text{ klb} - \text{ft}$$

Por lo que el momento total de diseño será:

$$M_T = 304.22 \text{ klb} - \text{ft} + 379 \text{ klb} - \text{ft} = 683 \text{ klb} - \text{ft}$$

La máxima fuerza cortante debida a la carga viva en la viga T es obtenida de la línea de influencia de la reacción, de la siguiente forma:



$$V_{L,apoyo} = 21.3 \text{ klb} + (16 \times 1.1 \times 0.685) + (4 \times 1.1 \times 0.37) = 34.98 \text{ klb}$$

$$V_{L+I} = 34.98 (1 + 0.3) = 45.48 \text{ klb}$$

Por otro lado, el máximo cortante en el apoyo debido a la carga muerta es:

$$V_{D,apoyo} = w (\text{Área bajo el diagrama de línea de influencia})$$

$$V_{D,apoyo} = 1.243 \left(\frac{1}{2} \times 44.5 \times 1 \right) = 27.65 \text{ klb}$$

Por lo que el cortante total será:

$$V_T = 27.65 \text{ klb} + 45.48 \text{ klb} = 73.13 \text{ klb}$$

Antes de proceder al diseño por flexión de estas piezas, es importante revisar la sección propuesta por cortante, según la AASHTO, el esfuerzo por cortante en el concreto está dado por la siguiente expresión:

$$v_c = 0.95 \sqrt{f'_c}$$

Además, el cortante admisible que tomará el refuerzo por cortante será:

$$v - v_c = 4 \sqrt{f'_c}$$

Por lo tanto,

$$v = 4 \sqrt{f'_c} + v_c = 4.95 \sqrt{f'_c}$$

$$v = 4.95 \sqrt{f'_c} = 4.95 \sqrt{4000} = 313 \text{ psi}$$

Por lo que la mínima área de sección requerida para estos elementos está dada por:

$$b_w d = \frac{V}{v_c}$$

$$b_w d = \frac{73.13 \text{ klb}}{0.313}$$

$$b_w d = 233.64 \text{ in}^2$$

Considerando que la distancia entre el centro de gravedad del acero de refuerzo y el lecho inferior es de 6 in, tendremos un peralte efectivo de 31.5 in, por lo que

$$b_w d = 16 (31.5) = 504 \text{ in}^2$$

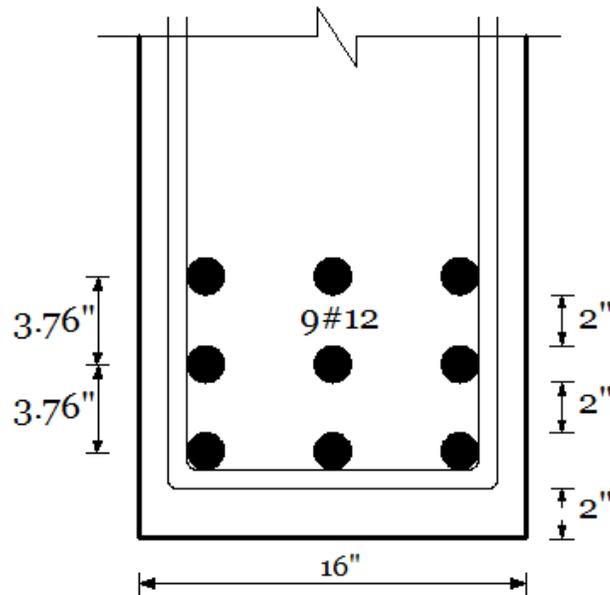
Por lo que el área propuesta es suficiente para resistir la fuerza cortante presentada.

Calculando el área de acero por flexión asumiendo un $d=31.5$, se tiene

$$A_s = \frac{M}{f_s \left(d - \frac{t}{2}\right)} = \frac{683 (12)}{20 \left(31.5 - \frac{7.9}{2}\right)} = 14.87 \text{ in}^2$$

Se proponen 9 varillas del No. 12 ($A_s = 15.9$) para cubrir este requerimiento.

A continuación, se presenta un croquis de armado de este acero por flexión,



Puede verse que el centroide del acero de refuerzo está ubicado a 3.50 in de la fibra inferior del elemento, por lo que el peralte efectivo será de 34 in.

Estimando la fuerza cortante a un peralte efectivo del apoyo, se tiene un valor de 63.82 klb.

Por lo tanto, el esfuerzo máximo de cortante en la viga es:

$$v_{max} = \frac{V}{b_w d} = \frac{63.82 \times 1000}{16 \times 34} = 117.32 \text{ psi}$$

El esfuerzo cortante del concreto está dado por:

$$v_c = 0.95\sqrt{f'_c} = 0.95\sqrt{4000} = 60 \text{ psi}$$

Por lo que el esfuerzo al corte que tendrá que soportar el acero de refuerzo será

$$v_s = v_{max} - v_c = 117.3 - 60 \text{ psi} = 57.3 \text{ psi}$$

El máximo esfuerzo permitido que puede soportar el acero de refuerzo es

$$4\sqrt{f'_c} = 4\sqrt{4000} = 253 \text{ psi} > 57.3 \text{ psi}$$

Por lo tanto la sección es adecuada para cortante.

Se proponen estribos del No.5, con un área de 0.61 in^2 , por lo que la separación estará dada por:

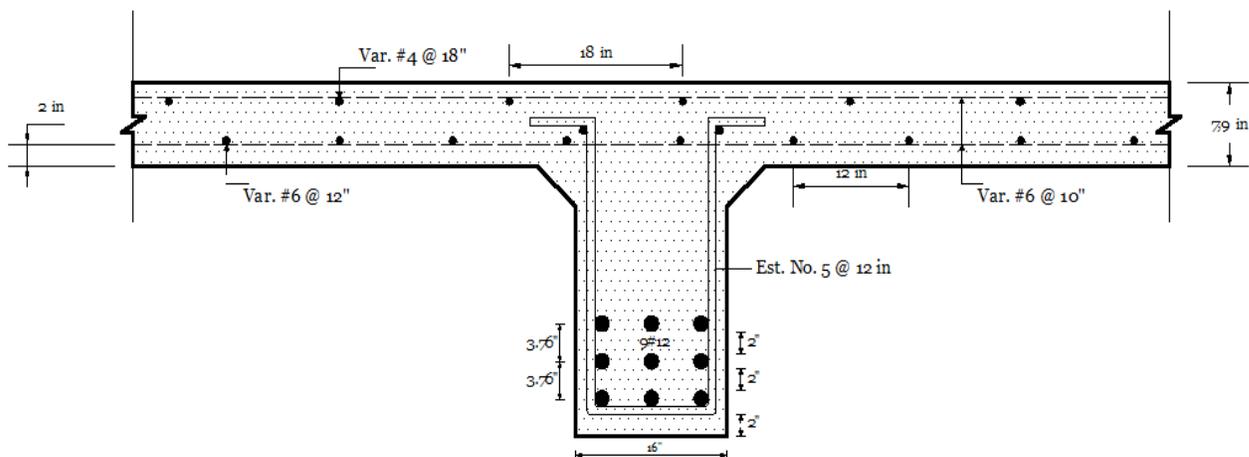
$$s = \frac{A_v f_s}{(v - v_c) b_w} = \frac{0.61 (20\ 000)}{(57.3)(16)} = 13.30 \text{ in}$$

Por otro lado, la máxima separación permisible está dada por:

$$s_{max} = \frac{d}{2} = \frac{34}{2} = 17 \text{ in}$$

Por lo que los estribos serán del No. 5 @ 12 in.

A continuación, se muestra un croquis de armado de esta sección junto con la losa:



Apéndice D Programa en Matlab para la generación de escenarios de carga mediante simulación MonteCarlo

```
% Programa de simulación MonteCarlo, para la generación de escenarios de
% carga basados en aforos vehiculares en México
%En este modelo se modificó la ubicación de la carga del carril de alta
%velocidad cuando hay dos vehículos, posicionandola en la zona crítica.
%_____
% Primer bloque: Número de vehículos de acuerdo a los porcentajes de ocupación
% Definición de porcentajes de ocupación a utilizar
veh_1=0.9669;
veh_2=0.0331;
% Definición de cantidad de vehículos por evento
veh_total=0;
n=input('Cual es el numero de eventos que desea simular: ');
ale=rand(n,1);
num_veh=zeros(n,1);
for k=1:n
    if ale(k,1)< veh_1
        num_veh(k,1)=1;
    else
        num_veh(k,1)=2;
    end
    veh_total=veh_total+num_veh(k,1);
end
num_veh;
%_____
% Segundo bloque: Definición del tipo de vehículo y ubicacion en carriles y
% determinación de esfuerzos producidos (únicamente para la presencia de un
% vehículo)
```

% Nomenclatura: En tipo_veh: 1=vehículo ligero, 2=pick up, 3=B2, 4=B3, 5=C2, 6=C3, 7=T3-S2, 8=T3-S3, 9=T3-S2-R4

% En ubi_veh: 1=carril alta vel. 2=carril baja vel.

Pes=0.4134;

Lig=0.5863;

alta=0.2855;

baja=0.7144;

esf=zeros(n,1);

esf_2=zeros(n,1);

tipo_veh=zeros(n,1);

fac_esf=11.956722;

fac_din=1.33;

ciclos=0;

carga=zeros(4,9);

tipo_veh2=zeros(2,1);

for k=1:n

% Bloque A: Existe 1 vehículo sobre la estructura

if num_veh(k,1)==1

ale=rand;

if ale<=Pes

ale=rand;

if ale<=alta

ale=rand;

if ale<=0.0897

esf(k,1)=(((0.32383*17.5)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);

tipo_veh(k,1)=3;

ciclos=ciclos+1;

elseif ale<=0.1025

esf(k,1)=(((0.360355*26)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);

tipo_veh(k,1)=4;

ciclos=ciclos+1;

elseif ale<=0.1666

s=rand();

if s<0.345

esf(k,1)=(((0.32383*4.2)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);

tipo_veh(k,1)=5;

ciclos=ciclos+1;

```
elseif s<0.9963

esf(k,1)=(((0.32383*((wblrnd(7377.4,2.08)+2248.5)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=5;
    ciclos=ciclos+1;
else
    esf(k,1)=(((0.32383*20.8)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=5;
    ciclos=ciclos+1;
end
elseif ale<=0.2179
s=rand();
if s<0.1965
    esf(k,1)=(((0.360355*8)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=6;
    ciclos=ciclos+1;
elseif s<0.9518
    esf(k,1)=(((0.360355*((wblrnd(38647,9.68)-
18409)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=6;
    ciclos=ciclos+1;
else
    esf(k,1)=(((0.360355*28)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=6;
    ciclos=ciclos+1;
end
elseif ale<=0.64102
s=rand();
if s<0.228
    esf(k,1)=(((0.203317*19.88)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=7;
    ciclos=ciclos+2;
elseif s<0.7369
    esf(k,1)=(((0.203317*((wblrnd(41796,8.77)-
3908.8)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=7;
    ciclos=ciclos+2;
else
```

```
esf(k,1)=(((0.203317*((evrnd(47424.2,3017.3))/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=7;
    ciclos=ciclos+2;
end
elseif ale<=0.91025
s=rand();
if s<0.3051
    esf(k,1)=(((0.16527*40)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=9;
    ciclos=ciclos+3;
elseif s<0.6556

esf(k,1)=(((0.16527*((wblrnd(13827,1.5072)+37562)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=9;
    ciclos=ciclos+3;
else
    if rand()<0.3772
        esf(k,1)=(((0.16527*unifrnd(66.5,71.5))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=9;
        ciclos=ciclos+3;
    else

esf(k,1)=(((0.16527*unifrnd(81.5,100))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=9;
        ciclos=ciclos+3;
    end
end
else
s=rand();
if s<0.3503
    esf(k,1)=(((0.193668*25.7)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=8;
    ciclos=ciclos+2;
elseif s<0.5987
    esf(k,1)=(((0.193668*((wblrnd(108575,22.219)-
66506)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=8;
```

```
        ciclos=ciclos+2;
    else
esf(k,1)=(((0.193668*((wblrnd(9001.8,1.2731)+48220.1)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=8;
        ciclos=ciclos+2;
    end
end
else
ale=rand;
if ale<=0.0476
    esf(k,1)=(((0.54854*17.5)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=3;
    ciclos=ciclos+1;
elseif ale<=0.0595
    esf(k,1)=(((0.59481*26)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
    tipo_veh(k,1)=4;
    ciclos=ciclos+1;
elseif ale<=0.1857
    s=rand();
    if s<0.345
        esf(k,1)=(((0.54854*4.2)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=5;
        ciclos=ciclos+1;
    elseif s<0.9963
esf(k,1)=(((0.54854*((wblrnd(7377.4,2.08)+2248.5)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=5;
        ciclos=ciclos+1;
    else
        esf(k,1)=(((0.54854*20.8)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=5;
        ciclos=ciclos+1;
    end
elseif ale<=0.2952
    s=rand();
    if s<0.1965
        esf(k,1)=(((0.59481*8)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
```

```
        tipo_veh(k,1)=6;
        ciclos=ciclos+1;
    elseif s<0.9518
        esf(k,1)=(((0.59481*((wblrnd(38647,9.68)-
18409)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=6;
        ciclos=ciclos+1;
    else
        esf(k,1)=(((0.59481*28)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=6;
        ciclos=ciclos+1;
    end
elseif ale<=0.6333
    s=rand();
    if s<0.228
        esf(k,1)=(((0.33545*19.88)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=7;
        ciclos=ciclos+2;
    elseif s<0.7369
        esf(k,1)=(((0.33545*((wblrnd(41796,8.77)-
3908.8)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=7;
        ciclos=ciclos+2;
    else
        esf(k,1)=(((0.33545*((evrnd(47424.2,3017.3))/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=7;
        ciclos=ciclos+2;
    end
elseif ale<=0.9142
    s=rand();
    if s<0.3051
        esf(k,1)=(((0.242011*40)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=9;
        ciclos=ciclos+3;
    elseif s<0.6556
        esf(k,1)=(((0.242011*((wblrnd(13827,1.5072)+37562)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
```

```
    tipo_veh(k,1)=9;
    ciclos=ciclos+3;
else
    if rand() $<$ 0.3772
        esf(k,1)=(((0.242011*unifrnd(66.5,71.5))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=9;
        ciclos=ciclos+3;
    else
        esf(k,1)=(((0.242011*unifrnd(81.5,100))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=9;
        ciclos=ciclos+3;
    end
end
end
else
    s=rand();
    if s $<$ 0.3503
        esf(k,1)=(((0.321674*25.7)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=8;
        ciclos=ciclos+2;
    elseif s $<$ 0.5987
        esf(k,1)=(((0.321674*((wblrnd(108575,22.219)-66506)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=8;
        ciclos=ciclos+2;
    else
        esf(k,1)=(((0.321674*((wblrnd(9001.8,1.2731)+48220.1)/1000))*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=8;
        ciclos=ciclos+2;
    end
end
end
else
    ale=rand();
    if ale $\leq$ alta
        ale=rand();
        if ale $\leq$ 0.66666
            esf(k,1)=((0+(33.72)))*(fac_esf)*(9807);
```

```
        tipo_veh(k,1)=1;
    else
        esf(k,1)=(((0.403823*3)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=2;
    end
else
    ale=rand;
    if ale<=0.5858
        esf(k,1)=((0+(33.72)))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=1;
    else
        esf(k,1)=(((0.654096*3)*fac_din)+(33.72))*(fac_esf)*(9807);
        tipo_veh(k,1)=2;
    end
end
end
end
```

% Bloque B: Existen 2 vehículos sobre la estructura

```
    else
% Carril de baja velocidad:
ent=zeros(36,8);
nodo=zeros(18,1);
v1=[0.25,0.25,0,0,0,0,0,0];
v2=[0.2,0.3,0,0,0,0,0,0];
v3=[0.125,0.1875,0.1875,0,0,0,0,0];
v4=[0.075,0.10625,0.10625,0.10625,0.10625,0,0,0];
v5=[0.06,0.10,0.10,0.08,0.08,0.08,0,0];
v6=[0.04,0.0575,0.0575,0.0575,0.0575,0.0575,0.0575,0.0575];
    ale=rand;
    if ale<=Pes
        ale=rand;
        %B2:
        if ale<=0.0476
            tipo_veh2(1,1)=3;
            carga(1,:)=((17.5)*fac_din)*v1;
            carga(2,:)=carga(1,:);
            nodo=zeros(4,1);
        end
    end
end
```

```
nodo(1,1)=2187;
nodo(2,1)=2195;
nodo(3,1)=1242;
nodo(4,1)=1250;

ent(1,1)=nodo(1,1);
ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(2,1)=nodo(2,1);
ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(3,1)=nodo(3,1);
ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(4,1)=nodo(4,1);
ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
%B3:
elseif ale<=0.0595
    tipo_veh2(1,1)=4;
    carga(1,:)=((26)*fac_din)*v3;
    carga(2,:)=carga(1,:);
    nodo=zeros(6,1);

        nodo(1,1)=1962;
        nodo(2,1)=1970;
        nodo(3,1)=1242;
        nodo(4,1)=1250;
        nodo(5,1)=1017;
        nodo(6,1)=1025;

ent(1,1)=nodo(1,1);
ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(2,1)=nodo(2,1);
ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(3,1)=nodo(3,1);
ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(4,1)=nodo(4,1);
ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(5,1)=nodo(5,1);
```

```
ent(5,4)=-carga(1,3)*(9807);
ent(6,1)=nodo(6,1);
ent(6,4)=-carga(1,3)*(9807);
%C2:
elseif ale<=0.1857
s=rand();
if s<0.345
tipo_veh2(1,1)=5;
carga(1,:)=((4.2)*fac_din)*v2;
carga(2,)=carga(1,);
elseif s<0.9963
tipo_veh2(1,1)=5;
carga(1,:)=(wblrnd(7377.4,2.08)+2248.5)*fac_din)/1000)*v2;
carga(2,)=carga(1,);
else
tipo_veh2(1,1)=5;
carga(1,:)=(20.8)*fac_din)*v2;
carga(2,)=carga(1,);
end

nodo=zeros(4,1);

nodo(1,1)=2187;
nodo(2,1)=2195;
nodo(3,1)=1242;
nodo(4,1)=1250;

ent(1,1)=nodo(1,1);
ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(2,1)=nodo(2,1);
ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(3,1)=nodo(3,1);
ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(4,1)=nodo(4,1);
ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
%C3:
elseif ale<=0.2952
```

```
s=rand();
if s<0.1965
    tipo_veh2(1,1)=6;
    carga(1,:)=((8)*fac_din)*v3;
    carga(2,:)=carga(1,:);
elseif s<0.9518
    tipo_veh2(1,1)=6;
    carga(1,:)=(wblrnd(38647,9.68)-18409)*fac_din/1000*v3;
    carga(2,:)=carga(1,:);
else
    tipo_veh2(1,1)=6;
    carga(1,:)=((28)*fac_din)*v3;
    carga(2,:)=carga(1,:);
end

nodo=zeros(6,1);

nodo(1,1)=1962;
nodo(2,1)=1970;
nodo(3,1)=1242;
nodo(4,1)=1250;
nodo(5,1)=1017;
nodo(6,1)=1025;

ent(1,1)=nodo(1,1);
ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(2,1)=nodo(2,1);
ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(3,1)=nodo(3,1);
ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(4,1)=nodo(4,1);
ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(5,1)=nodo(5,1);
ent(5,4)=-carga(1,3)*(9807);
ent(6,1)=nodo(6,1);
ent(6,4)=-carga(1,3)*(9807);

%T3S2:
```

```
elseif ale<=0.6333
    s=rand();
    if s<0.228
        tipo_veh2(1,1)=7;
        carga(1,:)=((19.88)*fac_din)*v4;
        carga(2,)=carga(1,:);
    elseif s<0.7369
        tipo_veh2(1,1)=7;
        carga(1,:)=(wblrnd(41796,8.77)-3908.8)*fac_din/1000)*v4;
        carga(2,)=carga(1,:);
    else
        tipo_veh2(1,1)=7;
        carga(1,:)=(evrnd(47424.2,3017.3))*fac_din/1000)*v4;
        carga(2,)=carga(1,:);
    end
    nodo=zeros(10,1);

    nodo(1,1)=1962;
    nodo(2,1)=1970;
    nodo(3,1)=1242;
    nodo(4,1)=1250;
    nodo(5,1)=1017;
    nodo(6,1)=1025;
    nodo(7,1)=0;
    nodo(8,1)=0;
    nodo(9,1)=0;
    nodo(10,1)=0;

    ent(1,1)=nodo(1,1);
    ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
    ent(2,1)=nodo(2,1);
    ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
    ent(3,1)=nodo(3,1);
    ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
    ent(4,1)=nodo(4,1);
    ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
    ent(5,1)=nodo(5,1);
```

```
ent(5,4)=-carga(1,3)*(9807);
ent(6,1)=nodo(6,1);
ent(6,4)=-carga(1,3)*(9807);
ent(7,1)=nodo(7,1);
ent(7,4)=-carga(1,4)*(9807);
ent(8,1)=nodo(8,1);
ent(8,4)=-carga(1,4)*(9807);
ent(9,1)=nodo(9,1);
ent(9,4)=-carga(1,5)*(9807);
ent(10,1)=nodo(10,1);
ent(10,4)=-carga(1,5)*(9807);
%T3-S2-R4:
elseif ale<=0.9142
    s=rand();
    if s<0.3051
        tipo_veh2(1,1)=9;
        carga(1,:)=((40)*fac_din)*v6;
        carga(2,:)=carga(1,:);
    elseif s<0.6556
        tipo_veh2(1,1)=9;
        carga(1,:)=(wblrnd(13827,1.5072)+37562)*fac_din/1000*v6;
        carga(2,:)=carga(1,:);
    else
        if rand()<0.3772
            tipo_veh2(1,1)=9;
            carga(1,:)=(unifrnd(66.5,71.5))*fac_din*v6;
            carga(2,:)=carga(1,:);
        else
            tipo_veh2(1,1)=9;
            carga(1,:)=(unifrnd(81.5,100))*fac_din*v6;
            carga(2,:)=carga(1,:);
        end
    end
end

nodo=zeros(18,1);

nodo(1,1)=0;
```

nodo(2,1)=0;
nodo(3,1)=0;
nodo(4,1)=0;
nodo(5,1)=0;
nodo(6,1)=0;
nodo(7,1)=1917;
nodo(8,1)=1925;
nodo(9,1)=1692;
nodo(10,1)=1700;
nodo(11,1)=1242;
nodo(12,1)=1250;
nodo(13,1)=1017;
nodo(14,1)=1025;
nodo(15,1)=0;
nodo(16,1)=0;
nodo(17,1)=0;
nodo(18,1)=0;

ent(1,1)=nodo(1,1);
ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(2,1)=nodo(2,1);
ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(3,1)=nodo(3,1);
ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(4,1)=nodo(4,1);
ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(5,1)=nodo(5,1);
ent(5,4)=-carga(1,3)*(9807);
ent(6,1)=nodo(6,1);
ent(6,4)=-carga(1,3)*(9807);
ent(7,1)=nodo(7,1);
ent(7,4)=-carga(1,4)*(9807);
ent(8,1)=nodo(8,1);
ent(8,4)=-carga(1,4)*(9807);
ent(9,1)=nodo(9,1);
ent(9,4)=-carga(1,5)*(9807);
ent(10,1)=nodo(10,1);

```
ent(10,4)=-carga(1,5)*(9807);
ent(11,1)=nodo(11,1);
ent(11,4)=-carga(1,6)*(9807);
ent(12,1)=nodo(12,1);
ent(12,4)=-carga(1,6)*(9807);
ent(13,1)=nodo(13,1);
ent(13,4)=-carga(1,7)*(9807);
ent(14,1)=nodo(14,1);
ent(14,4)=-carga(1,7)*(9807);
ent(15,1)=nodo(15,1);
ent(15,4)=-carga(1,8)*(9807);
ent(16,1)=nodo(16,1);
ent(16,4)=-carga(1,8)*(9807);
ent(17,1)=nodo(17,1);
ent(17,4)=-carga(1,9)*(9807);
ent(18,1)=nodo(18,1);
ent(18,4)=-carga(1,9)*(9807);
%T3-S3:
else
s=rand();
if s<0.3503
tipo_veh2(1,1)=8;
carga(1,:)=((25.7)*fac_din)*v5;
carga(2,:)=carga(1,:);
elseif s<0.5987
tipo_veh2(1,1)=8;
carga(1,:)=( (((wblrnd(108575,22.219)-66506))*fac_din)/1000)*v5;
carga(2,:)=carga(1,:);
else
tipo_veh2(1,1)=8;
carga(1,:)=( (((wblrnd(9001.8,1.2731)+48220.1))*fac_din)/1000)*v5;
carga(2,:)=carga(1,:);
end

nodo=zeros(12,1);

nodo(1,1)=0;
```

```
nodo(2,1)=0;
nodo(3,1)=0;
nodo(4,1)=0;
nodo(5,1)=0;
nodo(6,1)=0;
nodo(7,1)=1467;
nodo(8,1)=1475;
nodo(9,1)=1242;
nodo(10,1)=1250;
nodo(11,1)=1017;
nodo(12,1)=1025;

ent(1,1)=nodo(1,1);
ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(2,1)=nodo(2,1);
ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
ent(3,1)=nodo(3,1);
ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(4,1)=nodo(4,1);
ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
ent(5,1)=nodo(5,1);
ent(5,4)=-carga(1,3)*(9807);
ent(6,1)=nodo(6,1);
ent(6,4)=-carga(1,3)*(9807);
ent(7,1)=nodo(7,1);
ent(7,4)=-carga(1,4)*(9807);
ent(8,1)=nodo(8,1);
ent(8,4)=-carga(1,4)*(9807);
ent(9,1)=nodo(9,1);
ent(9,4)=-carga(1,5)*(9807);
ent(10,1)=nodo(10,1);
ent(10,4)=-carga(1,5)*(9807);
ent(11,1)=nodo(11,1);
ent(11,4)=-carga(1,6)*(9807);
ent(12,1)=nodo(12,1);
ent(12,4)=-carga(1,6)*(9807);

end
```

```
else
    ale=rand;
    if ale<=0.5858
        tipo_veh2(1,1)=1;
        carga(1,:)=0;
        carga(2,:)=carga(1,:);

        s=rand();
        nodo=zeros(4,1);

        if s<0.01315789
            nodo(1,1)=27;
            nodo(2,1)=35;
            nodo(3,1)=0;
            nodo(4,1)=0;
        else
            for i=1:66
                if s>(0.01315789*i)
                    if (27+(45*i))>2457
                        nodo(1,1)=0;
                        nodo(2,1)=0;
                        nodo(3,1)=(27+(45*i))-(12*45);
                        nodo(4,1)=(35+(45*i))-(12*45);
                    else
                        nodo(1,1)=27+(45*i);
                        nodo(2,1)=35+(45*i);
                        if (27+(45*i))-(12*45)>=27
                            nodo(3,1)=(27+(45*i))-(12*45);
                            nodo(4,1)=(35+(45*i))-(12*45);
                        else
                            nodo(3,1)=0;
                            nodo(4,1)=0;
                        end
                    end
                end
            end
        else
            break
        end
    end
```

```
        end
    end
    ent(1,1)=nodo(1,1);
    ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
    ent(2,1)=nodo(2,1);
    ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
    ent(3,1)=nodo(3,1);
    ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
    ent(4,1)=nodo(4,1);
    ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
else
    tipo_veh2(1,1)=2;
    carga(1,:)=((3)*fac_din)*v1;
    carga(2,:)=carga(1,:);

    nodo=zeros(4,1);

    nodo(1,1)=1557;
    nodo(2,1)=1565;
    nodo(3,1)=1242;
    nodo(4,1)=1250;

    ent(1,1)=nodo(1,1);
    ent(1,4)=-carga(1,1)*(9807);
    ent(2,1)=nodo(2,1);
    ent(2,4)=-carga(1,1)*(9807);
    ent(3,1)=nodo(3,1);
    ent(3,4)=-carga(1,2)*(9807);
    ent(4,1)=nodo(4,1);
    ent(4,4)=-carga(1,2)*(9807);
end
end
% Carril de alta velocidad:
ale=rand;
if ale<=Pes
    ale=rand;
    %B2:
```

```
if ale<=0.0897
    tipo_veh2(2,1)=3;
    carga(3,:)=((17.5)*fac_din)*v1;
    carga(4,:)=carga(3,:);

    s=rand();
    nodo=zeros(4,1);

    nodo(1,1)=2171;
    nodo(2,1)=2179;
    nodo(3,1)=1226;
    nodo(4,1)=1234;

    ent(19,1)=nodo(1,1);
    ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
    ent(20,1)=nodo(2,1);
    ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
    ent(21,1)=nodo(3,1);
    ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
    ent(22,1)=nodo(4,1);
    ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
%B3:
elseif ale<=0.1025
    tipo_veh2(2,1)=4;
    carga(3,:)=((26)*fac_din)*v3;
    carga(4,:)=carga(3,:);

    s=rand();
    nodo=zeros(6,1);

    nodo(1,1)=1946;
    nodo(2,1)=1954;
    nodo(3,1)=1226;
    nodo(4,1)=1234;
    nodo(5,1)=1001;
    nodo(6,1)=1009;
```

```
ent(19,1)=nodo(1,1);
ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(20,1)=nodo(2,1);
ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(21,1)=nodo(3,1);
ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(22,1)=nodo(4,1);
ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(23,1)=nodo(5,1);
ent(23,4)=-carga(3,3)*(9807);
ent(24,1)=nodo(6,1);
ent(24,4)=-carga(3,3)*(9807);
%C2:
elseif ale<=0.1666
    s=rand();
    if s<0.345
        tipo_veh2(2,1)=5;
        carga(3,:)=((4.2)*fac_din)*v2;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    elseif s<0.9963
        tipo_veh2(2,1)=5;
        carga(3,:)=(((wblrnd(7377.4,2.08)+2248.5))*fac_din)/1000)*v2;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    else
        tipo_veh2(2,1)=5;
        carga(3,:)=((20.8)*fac_din)*v2;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    end

    s=rand();
    nodo=zeros(4,1);

    nodo(1,1)=2171;
    nodo(2,1)=2179;
    nodo(3,1)=1226;
    nodo(4,1)=1234;
```

```
ent(19,1)=nodo(1,1);
ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(20,1)=nodo(2,1);
ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(21,1)=nodo(3,1);
ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(22,1)=nodo(4,1);
ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
%C3:
elseif ale<=0.2179
    s=rand();
    if s<0.1965
        tipo_veh2(2,1)=6;
        carga(3,:)=((8)*fac_din)*v3;
        carga(4,)=carga(3,);
    elseif s<0.9518
        tipo_veh2(2,1)=6;
        carga(3,)=( (((wblrnd(38647,9.68)-18409))*fac_din)/1000)*v3;
        carga(4,)=carga(3,);
    else
        tipo_veh2(2,1)=6;
        carga(3,)=( (28)*fac_din)*v3;
        carga(4,)=carga(3,);
    end

    s=rand();
    nodo=zeros(6,1);

    nodo(1,1)=1946;
    nodo(2,1)=1954;
    nodo(3,1)=1226;
    nodo(4,1)=1234;
    nodo(5,1)=1001;
    nodo(6,1)=1009;

    ent(19,1)=nodo(1,1);
    ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
```

```
ent(20,1)=nodo(2,1);
ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(21,1)=nodo(3,1);
ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(22,1)=nodo(4,1);
ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(23,1)=nodo(5,1);
ent(23,4)=-carga(3,3)*(9807);
ent(24,1)=nodo(6,1);
ent(24,4)=-carga(3,3)*(9807);
%T3-S2:
elseif ale<=0.64102
    s=rand();
    if s<0.228
        tipo_veh2(2,1)=7;
        carga(3,:)=((19.88)*fac_din)*v4;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    elseif s<0.7369
        tipo_veh2(2,1)=7;
        carga(3,:)=(((wblrnd(41796,8.77)-3908.8))*fac_din)/1000)*v4;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    else
        tipo_veh2(2,1)=7;
        carga(3,:)=(((evrnd(47424.2,3017.3))*fac_din)/1000)*v4;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    end

    s=rand();
    nodo=zeros(10,1);

    nodo(1,1)=1946;
    nodo(2,1)=1954;
    nodo(3,1)=1242;
    nodo(4,1)=1226;
    nodo(5,1)=1034;
    nodo(6,1)=1009;
    nodo(7,1)=0;
```

```
nodo(8,1)=0;
nodo(9,1)=0;
nodo(10,1)=0;

ent(19,1)=nodo(1,1);
ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(20,1)=nodo(2,1);
ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(21,1)=nodo(3,1);
ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(22,1)=nodo(4,1);
ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(23,1)=nodo(5,1);
ent(23,4)=-carga(3,3)*(9807);
ent(24,1)=nodo(6,1);
ent(24,4)=-carga(3,3)*(9807);
ent(25,1)=nodo(7,1);
ent(25,4)=-carga(3,4)*(9807);
ent(26,1)=nodo(8,1);
ent(26,4)=-carga(3,4)*(9807);
ent(27,1)=nodo(9,1);
ent(27,4)=-carga(3,5)*(9807);
ent(28,1)=nodo(10,1);
ent(28,4)=-carga(3,5)*(9807);

%T3-S2-R4:
elseif ale<=0.91025
    s=rand();
    if s<0.3051
        tipo_veh2(2,1)=9;
        carga(3,:)=((40)*fac_din)*v6;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    elseif s<0.6556
        tipo_veh2(2,1)=9;
        carga(3,:)=(((wblrnd(13827,1.5072)+37562))*fac_din)/1000)*v6;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    else
        if rand()<0.3772
```

```
        tipo_veh2(2,1)=9;
        carga(3,:)=((unifrnd(66.5,71.5))*fac_din)*v6;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    else
        tipo_veh2(2,1)=9;
        carga(3,:)=((unifrnd(81.5,100))*fac_din)*v6;
        carga(4,:)=carga(3,:);
    end
end

s=rand();
nodo=zeros(18,1);

nodo(1,1)=0;
nodo(2,1)=0;
nodo(3,1)=0;
nodo(4,1)=0;
nodo(5,1)=0;
nodo(6,1)=0;
nodo(7,1)=1901;
nodo(8,1)=1909;
nodo(9,1)=1676;
nodo(10,1)=1684;
nodo(11,1)=1226;
nodo(12,1)=1234;
nodo(13,1)=1001;
nodo(14,1)=1009;
nodo(15,1)=0;
nodo(16,1)=0;
nodo(17,1)=0;
nodo(18,1)=0;

ent(19,1)=nodo(1,1);
ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(20,1)=nodo(2,1);
ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(21,1)=nodo(3,1);
```

```
ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(22,1)=nodo(4,1);
ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(23,1)=nodo(5,1);
ent(23,4)=-carga(3,3)*(9807);
ent(24,1)=nodo(6,1);
ent(24,4)=-carga(3,3)*(9807);
ent(25,1)=nodo(7,1);
ent(25,4)=-carga(3,4)*(9807);
ent(26,1)=nodo(8,1);
ent(26,4)=-carga(3,4)*(9807);
ent(27,1)=nodo(9,1);
ent(27,4)=-carga(3,5)*(9807);
ent(28,1)=nodo(10,1);
ent(28,4)=-carga(3,5)*(9807);
ent(29,1)=nodo(11,1);
ent(29,4)=-carga(3,6)*(9807);
ent(30,1)=nodo(12,1);
ent(30,4)=-carga(3,6)*(9807);
ent(31,1)=nodo(13,1);
ent(31,4)=-carga(3,7)*(9807);
ent(32,1)=nodo(14,1);
ent(32,4)=-carga(3,7)*(9807);
ent(33,1)=nodo(15,1);
ent(33,4)=-carga(3,8)*(9807);
ent(34,1)=nodo(16,1);
ent(34,4)=-carga(3,8)*(9807);
ent(35,1)=nodo(17,1);
ent(35,4)=-carga(3,9)*(9807);
ent(36,1)=nodo(18,1);
ent(36,4)=-carga(3,9)*(9807);
else
s=rand();
if s<0.3503
    tipo_veh2(2,1)=8;
    carga(3,:)=((25.7)*fac_din)*v5;
    carga(4,:)=carga(3,:);
```

```
elseif s<0.5987
    tipo_veh2(2,1)=8;
    carga(3,:)=((((wblrnd(108575,22.219)-66506))*fac_din)/1000)*v5;
    carga(4,:)=carga(3,:);
else
    tipo_veh2(2,1)=8;
    carga(3,:)=((((wblrnd(9001.8,1.2731)+48220.1))*fac_din)/1000)*v5;
    carga(4,:)=carga(3,:);
end

s=rand();
nodo=zeros(12,1);

nodo(1,1)=0;
nodo(2,1)=0;
nodo(3,1)=0;
nodo(4,1)=0;
nodo(5,1)=0;
nodo(6,1)=0;
nodo(7,1)=1451;
nodo(8,1)=1459;
nodo(9,1)=1242;
nodo(10,1)=1226;
nodo(11,1)=1034;
nodo(12,1)=1009;

ent(19,1)=nodo(1,1);
ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(20,1)=nodo(2,1);
ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(21,1)=nodo(3,1);
ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(22,1)=nodo(4,1);
ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(23,1)=nodo(5,1);
ent(23,4)=-carga(3,3)*(9807);
ent(24,1)=nodo(6,1);
```

```
ent(24,4)=-carga(3,3)*(9807);
ent(25,1)=nodo(7,1);
ent(25,4)=-carga(3,4)*(9807);
ent(26,1)=nodo(8,1);
ent(26,4)=-carga(3,4)*(9807);
ent(27,1)=nodo(9,1);
ent(27,4)=-carga(3,5)*(9807);
ent(28,1)=nodo(10,1);
ent(28,4)=-carga(3,5)*(9807);
ent(29,1)=nodo(11,1);
ent(29,4)=-carga(3,6)*(9807);
ent(30,1)=nodo(12,1);
ent(30,4)=-carga(3,6)*(9807);
end
else
ale=rand;
if ale<=0.66666
tipo_veh2(2,1)=1;
carga(3,:)=0;
carga(4,:)=carga(3,:);

s=rand();
nodo=zeros(4,1);

if s<0.01315789
nodo(1,1)=11;
nodo(2,1)=19;
nodo(3,1)=0;
nodo(4,1)=0;
else
for i=1:66
if s>(0.01315789*i)
if (11+(45*i))>2441
nodo(1,1)=0;
nodo(2,1)=0;
nodo(3,1)=(11+(45*i))-(12*45);
nodo(4,1)=(19+(45*i))-(12*45);
```

```
        else
            nodo(1,1)=11+(45*i);
            nodo(2,1)=19+(45*i);
            if (11+(45*i))-(12*45)>=11
                nodo(3,1)=(11+(45*i))-(12*45);
                nodo(4,1)=(19+(45*i))-(12*45);
            else
                nodo(3,1)=0;
                nodo(4,1)=0;
            end
        end
    end
else
    break
end
end
end
ent(19,1)=nodo(1,1);
ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(20,1)=nodo(2,1);
ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(21,1)=nodo(3,1);
ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(22,1)=nodo(4,1);
ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
else
    tipo_veh2(2,1)=2;
    carga(3,:)=((3)*fac_din)*v1;
    carga(4,:)=carga(3,:);

    s=rand();
    nodo=zeros(4,1);

    nodo(1,1)=1541;
    nodo(2,1)=1549;
    nodo(3,1)=1226;
    nodo(4,1)=1234;
```

```
ent(19,1)=nodo(1,1);
ent(19,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(20,1)=nodo(2,1);
ent(20,4)=-carga(3,1)*(9807);
ent(21,1)=nodo(3,1);
ent(21,4)=-carga(3,2)*(9807);
ent(22,1)=nodo(4,1);
ent(22,4)=-carga(3,2)*(9807);
end
end

if tipo_veh2(1,1)>tipo_veh2(2,1)
    veh_ciclo=tipo_veh2(1,1);
elseif tipo_veh2(1,1)<tipo_veh2(2,1)
    veh_ciclo=tipo_veh2(2,1);
else
    veh_ciclo=tipo_veh2(2,1);
end

if veh_ciclo==1
    ciclos=ciclos;
elseif veh_ciclo==2
    ciclos=ciclos;
elseif veh_ciclo==3
    ciclos=ciclos+1;
elseif veh_ciclo==4
    ciclos=ciclos+1;
elseif veh_ciclo==5
    ciclos=ciclos+1;
elseif veh_ciclo==6
    ciclos=ciclos+1;
elseif veh_ciclo==7
    ciclos=ciclos+2;
elseif veh_ciclo==8
    ciclos=ciclos+2;
else
    ciclos=ciclos+3;
```

```
end
cont=0;
for r=1:36
    if ent(r,1)>0
        cont=cont+1;
    else

    end
end
entra=zeros(cont,8);
l=1;
for t=1:36
    if ent(t,1)>0
        entra(cont-(cont-l),:)=ent(t,:);
        l=l+1;
    else

    end
end
entra
save cont.sdf cont -ASCII -TABS
dlmwrite('entra.sdf', entra, 'delimiter', '\t', 'newline', 'pc');

fid1=fopen('qed.sdf');
fid4=fopen('cont.sdf');
fid3=fopen('entra.sdf');
fid2=fopen('salida.sdf','wt');
for i=1:1:7660
    string=fgetl(fid1);
    fprintf(fid2,'%s\n',string);
end
string2=fgetl(fid4);
a=strread(string2);
a(1)=cont;
s1=sprintf('\t%d',a(1));
s2=sprintf('\t%s','::loads');
string3=strcat(s1,s2);
```

```
fprintf(fid2,'%s\n',string3);
for i=7662:1:(7661+cont)
    string=fgetl(fid3);
    fprintf(fid2,'%s\n',string);
end
for i=(7662+cont):1:(7676+cont)
    string=fgetl(fid1);
    fprintf(fid2,'%s\n',string);
end
fclose(fid1);
fclose(fid2);
fclose(fid3);

! stady <claves.txt
M=dlmread('stady.out', '\c',[17062 6 17170 6]);
val_max=max(M);
esf_2(k,1)=val_max*fac_esf;
end
end

num_veh
tipo_veh
esf
esf_2
esfuerzo=esf+esf_2
ciclos
veh_total
tipo_veh2
nodo;
ent;
xlswrite('esfuerzos.xls',esfuerzo)
dlmwrite('veh_total.sdf', veh_total, 'delimiter', '\t', 'newline', 'pc');
dlmwrite('esfuerzo.txt', esfuerzo, 'delimiter', '\t', 'newline', 'pc');
dlmwrite('tipo_veh.txt', tipo_veh, 'delimiter', '\t', 'newline', 'pc');
```


CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671



**INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE**



www.imt.mx
publicaciones@imt.mx