

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE CARGA VIVA  
PARA LA EVALUACIÓN  
DE LA FATIGA EN PUENTES VEHICULARES DE ACERO EN  
MÉXICO**

Por:

Bernardo Tadeo Terán Torres  
Ingeniero Civil

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en  
Ingeniería Estructural

Noviembre, 2011



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ**

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación  
de la Facultad de Ingeniería Civil, UANL  
P r e s e n t e .-

Estimado Doctor Valdez:

Por medio de la presente me es grato saludarlo y a la vez informarle que el Ingeniero **BERNARDO TADEO TERÁN TORRES**, Pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural, ha concluido su trabajo de Tesis titulado **"CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE CARGA VIVA PARA LA EVALUACIÓN DE FATIGA EN PUENTES VEHICULARES DE ACERO EN MÉXICO"** la cual fue realizada bajo la dirección de su Servidor, por lo que no existe ningún inconveniente en atender la solicitud de Examen de Grado, con los requisitos que exige el **REGLAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES** de nuestra Institución, agradeceré informarle las instrucciones para el trámite correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano las atenciones que se sirva prestar a la presente, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere necesaria.

**ATENTAMENTE**  
**"ALERE FLAMMAM VERITATIS"**  
Cd. Universitaria, 21 de julio de 2011

**DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA**  
Coordinador de Maestría en Ciencias con  
Orientación en Ingeniería Estructural



RGA/frp\*



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477  
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ**

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación  
de la Facultad de Ingeniería Civil, UANL  
Presente.-

Estimado Doctor Valdez

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis **"CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE CARGA VIVA PARA LA EVALUACIÓN DE LA FATIGA EN PUENTES VEHICULARES DE ACERO EN MÉXICO"** que presenta el Ing. **Bernardo Tadeo Terán Torres**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural, comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como **APROBADA**.

Sin más por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

**ATENTAMENTE**  
**"ALERE FLAMMAM VERITATIS"**

Cd. Universitaria, 21 de Octubre de 2011

*Jorge H. Chávez*

**DR. JORGE HUMBERTO CHÁVEZ**

Profesor Investigador de la Facultad de  
Ingeniería Civil de la U.A.N.L.  
Evaluador de Tesis de Maestría



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477  
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



Monterrey, N.L., a 18 de noviembre 2011

Dr. Pedro L. Valdez Tamez  
Subdirector de Estudios de Posgrado de Investigación  
de la Facultad de Ingeniería Civil, UANL

Estimado Dr. Valdez,

Me permito extender este oficio como Evaluador de la tesis "Caracterización de los modelos de carga viva para la evaluación de la fatiga en puentes vehiculares de acero en México" desarrollada por el Ing. Bernardo Tadeo Terán Torres, requerida para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural, informo que ha sido revisada y evaluada como APROBADA.

Quedo como siempre a sus órdenes para cualquier aclaración que considere necesaria.

Atentamente



Dipl. Ing. Francisco Madla De la Garza  
Director General





# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**Oficio SDEPI-442-2011**

**ING. LÁZARO VARGAS GUERRA**

Director del Departamento de Escolar y de  
Archivo de la UANL  
Presente.-

Estimado Ing. Vargas:

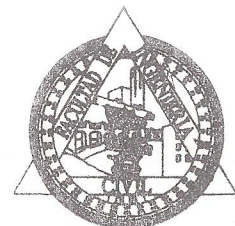
Por este conducto me permito comunicarle que el **Ing. Bernardo Tadeo Terán Torres**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución.

De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,  
"ALERE FLAMAM VERITATIS"  
Cd. Universitaria a 23 de noviembre del 2011.

**DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.**  
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION

C.c.p. Archivo.  
Rtp.



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902  
[www.ingenieriacivil.uanl.mx](http://www.ingenieriacivil.uanl.mx)

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
Antecedentes y justificación de la investigación .....	5
Objetivo de investigación e hipótesis. ....	8
Resumen de los capítulos. ....	9
<b>CAPÍTULO 1: LA FATIGA EN LOS MATERIALES Y EN LAS ESTRUCTURAS.....</b>	<b>11</b>
1.1 Concepto de fatiga. ....	11
1.2 Avances importantes en el campo de la fatiga a través de los años. ....	12
1.3 Las fases de la fatiga. ....	16
1.3.1 Periodo de iniciación. ....	17
1.3.2 Periodo de crecimiento de grieta. ....	19
1.3.3 Factor de concentración de esfuerzos y Factor de intensidad de esfuerzos. ....	20
1.3.4 Obtención de la curva de propagación de grieta de fatiga y las regiones de la curva. ....	23
1.3.5 La región de crecimiento estable y la ecuación de Paris.....	27
1.4 La curva de rango de esfuerzos (S-N) y su aporte al fenómeno de fatiga.....	28
1.4.1 Obtención experimental de la curva y el rango de esfuerzos. ....	29
1.4.2 Bajos-ciclos.....	30
1.4.3 Altos-ciclos. ....	31
1.4.4 El límite de fatiga. ....	31
1.5 Modelos de predicción de la falla por fatiga. ....	33
1.5.1 Amplitud constante (CA-Amplitud).....	34
1.5.2 Amplitud variable (VA-Amplitud).....	37
1.5.3 Modelos de daño acumulado.....	39
1.5.4. Modelos de crecimiento de la grieta.....	41
1.6 Aplicación de los conceptos fundamentales a esta investigación. ....	43

<b>CAPÍTULO 2: MÉTODOS DE PREDICCIÓN DEL DAÑO ACUMULADO, PARA LA EVALUACIÓN DE LA FATIGA EN LOS PUENTES DE ACERO.</b>	<b>45</b>
2.1 Descripción de los métodos de predicción del daño acumulado. ....	45
2.1.1 Los conceptos fundamentales. ....	46
2.1.2 Descripción del método “European Convention for Constructional Steelwork” (ECCS). ....	53
2.1.3 Descripción del método “Código de práctica para fatiga” (British) ....	54
2.1.4 Descripción del método de la “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO 2008) ....	55
2.2 Revisión del método de evaluación: “Carga que induce daño por fatiga” del AASHTO y otras investigaciones relacionadas. ....	59
2.2.1 Obtención del rango de esfuerzos. ....	60
2.2.2 La vida restante. ....	72
2.3 Áreas de oportunidad para la adaptación de los métodos de evaluación de la fatiga en México. ....	77
<b>CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LOS PESOS Y LAS DIMENSIONES DE LOS DIVERSOS TIPOS DE VEHÍCULOS EN MÉXICO. ....</b>	<b>80</b>
3.1 Clasificación de los vehículos. ....	81
3.2 El peso máximo por eje reglamentado, la carga total del vehículo y la fracción de distribución de la carga por eje. ....	85
3.2.1 La fracción de distribución. ....	89
3.3 Distancia estándar entre los ejes para los diversos vehículos. ....	92
3.4 Descripción del estudio estadístico de campo del autotransporte nacional. ....	95
3.5 Consideraciones de las características de los vehículos, tomadas en la investigación. ....	103
<b>CAPÍTULO 4: AJUSTE DE LOS CAMIONES DE FATIGA PARA MÉXICO. ....</b>	<b>106</b>
4.1 Cálculo del peso equivalente por estación encuestada y su análisis estadístico. ....	109
4.1.1 Ejemplo de cálculo del peso equivalente del camión de fatiga por estación. ....	109
4.1.2 Pesos equivalentes del camión de fatiga, grupo C. ....	111

4.1.3 Pesos equivalentes de camión de fatiga, grupo T-S. ....	116
4.1.4 Pesos equivalentes de camión de fatiga, grupo T-S-R. ....	120
4.2 El algoritmo “K-Means Clustering” y su aplicación a la clasificación de los pesos equivalentes de los camiones de fatiga. ....	125
4.2.1 “K-Means” para los pesos equivalentes del camión de fatiga grupo C. ....	126
4.2.2 “K-Means” para los pesos equivalentes del camión de fatiga grupo T-S ...	135
4.2.3 “K-Means” para los pesos equivalentes del camión de fatiga del grupo T-S-R .....	144
4.3 Determinación del peso equivalente del camión de fatiga para las clases elegidas de cada grupo. ....	153
4.3.1 Peso equivalente del camión de fatiga para el grupo C de la clase A.....	154
4.3.2 Peso equivalente del camión de fatiga para el grupo T-S de la clase A ....	156
4.3.3 Peso equivalente del camión de fatiga para el grupo T-S-R, de la clase A .....	157
4.4 Simulación de tráfico real y el rango de momentos, para las clases elegidas de cada grupo.....	158
4.4.1 Simulación de tráfico real para los vehículos de la clase A del grupo C y sus rangos de momentos equivalentes. ....	162
4.4.2 Simulación de tráfico real para los vehículos de la clase A del grupo T-S y sus rangos de momentos equivalentes. ....	173
4.4.3 Simulación del tráfico real para los vehículos de la clase A, del Grupo T-S-R y sus rangos de momentos equivalentes. ....	183
4.5 Determinación aproximada de la carga por eje para los diversos vehículos de fatiga. ....	193
4.5.1 Fracciones de distribución para el camión C y el peso por eje para la clase A del grupo C. ....	199
4.5.2 Fracciones de distribución para el camión T-S y el peso por eje para la clase A del grupo T-S. ....	201
4.5.3 Fracciones de distribución para el camión T-S-R y el peso por eje para la clase A del grupo T-S-R .....	203
4.6 Determinación de la distancia entre los ejes para los diversos vehículos de Fatiga y la comparación de los rangos de momentos. ....	205
4.6.1 Resultados de la comparación de los rangos de momento para del camión de fatiga C.....	206

4.6.2 Resultados de la comparación de los rangos de momento para el camión de fatiga T-S. ....	218
4.6.3 Resultados de la comparación de los rangos de momento para del camión de fatiga T-S-R.....	230
4.7 Cálculo del peso equivalente del total de estaciones y los factores de dispersión propuestos para las diversas clasificaciones de los grupos de vehículos. ....	247
4.7.1 Peso equivalente del total de las estaciones para el grupo C y sus respectivos factores de dispersión. ....	248
4.7.2 Peso equivalente del total de las estaciones para el Grupo T-S y sus respectivos factores de dispersión. ....	249
4.7.3 Peso equivalente del total de las estaciones para el grupo T-S-R y sus respectivos factores de dispersión. ....	250
4.8 Propuesta de aplicación práctica de los modelos de carga viva determinados. ....	251
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES DE ESTA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>257</b>
5.1 Conclusiones generales .....	257
5.2 Incertidumbres en la investigación y las áreas de oportunidad.....	259
<b>CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES DE POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN. ....</b>	<b>260</b>
6.1 Recomendaciones.....	260
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>263</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.....</b>	<b>268</b>
Tablas .....	268
Figuras .....	270



# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes y justificación de la investigación

En la actualidad, una de las fallas más comunes en cualquier tipo de estructura es la provocada por los efectos de fatiga. Estas fallas pueden presentarse en diversos tipos de estructuras, v.gr., civiles, militares, aeroespaciales.

Países como los Estados Unidos, Inglaterra, Japón, y países miembros de la Unión Europea, entre otros, han dedicado tiempo y dinero a la investigación de este tipo de fallas, al investigar en los materiales usados en las diversas áreas de la ingeniería, con la finalidad de predecir cuándo podrían ocurrir estas fallas, para evitar pérdidas humanas y económicas. Estos países cuentan en la actualidad con métodos de predicción bastante confiables, que permiten predecir una falla de manera eficaz.

Sin embargo, estos avances no se presentaron inmediatamente, sino que tuvieron que presentarse fallas importantes en las estructuras y tener grandes pérdidas para que se entendiera la importancia de este fenómeno. En particular, un grupo importante de fallas ha ocurrido en puentes vehiculares de acero, fallas como las ocurridas en puentes como el “Silver Bridge”, en West Virginia (Estados Unidos, 1967), donde se suscitó el colapso del puente en horas pico, registrándose pérdidas de vidas humanas. También el puente “Hoan Bridge”, en Milwaukee, Wisconsin (Estados Unidos, 2000) presentó una falla frágil en una de las vigas,

debido a la acción combinada de la fatiga y las bajas temperaturas, frecuentes en la zona. En 1994, el puente “Song-su Bridge” (Seúl, Corea) presentó el colapso total de la estructura, causando muchas pérdidas humanas y grandes pérdidas económicas. Existen también casos registrados de fallas por fatiga en puentes en Japón (“Tatara Bridge”, “Metropolitan Expressway”, “Kanda Bridge”).

Por tales motivos, estos países han creado métodos para la evaluación de la fatiga en los puentes de acero, con la finalidad de evitar estas fallas y con la intención de reparar los puentes a tiempo, antes que acontezcan nuevas tragedias.

Los métodos de predicción utilizados en los países antes mencionados se basan, en grandes rasgos, en la determinación de la vida remanente con la cantidad de vehículos que transitan en la zona y los rangos de esfuerzos producidos por los mismos.

El rango de esfuerzos puede determinarse a través de mediciones hechas en el campo, o bien, con la aplicación de modelos de carga viva conocidos como camiones de fatiga. Cabe mencionar que, aunque dentro de estos métodos de evaluación existen otras variables que intervienen en la determinación de la vida remanente, que serán mencionadas más adelante en este documento, esta investigación se centrará principalmente en la obtención del rango de esfuerzo, por medio de la aplicación de camiones de fatiga.

Los camiones de fatiga son modelos de carga viva que permiten al evaluador determinar el rango de esfuerzos en cualquier componente de un puente, mediante la aplicación de este vehículo en la zona donde se genere la máxima demanda. Estos modelos de carga viva se basan en las consideraciones de peso y en las dimensiones de los vehículos que circulan sobre los puentes.

En México no se cuenta en la actualidad con un método propio para la evaluación teórica de la fatiga en puentes de acero, sino que se emplea el método propuesto por la “American Association of State Highways and Transportation Officials” (AASHTO) para realizar las evaluaciones en los puentes vehiculares <sup>(1)</sup>.

Si bien, sabemos por investigaciones previas (como la realizada por Octavio Rascón, <sup>(2)</sup> donde se definió un camión característico de diseño para los puentes en México), las características de los pesos y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan en el país son diferentes a las características de países como los Estados Unidos. Por eso es inapropiada la utilización de las normas norte-americanas para obtener una evaluación de fatiga.

Aunque en México no se tiene un registro confiable de las fallas estructurales debidas al fenómeno de fatiga (ya que el 90% de las fallas en los puentes, en México, se deben a la socavación), investigadores como Francisco Carrión <sup>(3)</sup> actualmente realizan evaluaciones de fatiga en los cables de un puente atirantado ubicado en el Estado de Veracruz, utilizando para ello simulaciones de tráfico real (simulación Monte Carlo) en un modelo matemático de elemento finito y utilizando la mecánica de la fractura como método de evaluación.

Dado que en México las características de los pesos y las dimensiones de los vehículos de carga que transitan son diferentes a las del resto de los países, además de que actualmente se está generando en nuestro país investigación en el área de la fatiga, es necesario obtener nuestros propios métodos de evaluación, tales que permitan tener una mejor aproximación en la evaluación.

Por tal motivo, este trabajo de investigación se centra en la obtención de las características de los vehículos para calcular la fatiga, las cuales serán utilizadas para definir los rangos de

esfuerzos en los diversos componentes de los puentes, para diversas zonas del país. Estos camiones de fatiga deberán concordar con las características del tráfico y las dimensiones que tienen los vehículos que circulan en el país. Con estos camiones se pretende iniciar la investigación para la creación de un método propio, para la evaluación de la fatiga en los puentes vehiculares de acero, en México.

## **Objetivo de investigación e hipótesis.**

El **objetivo general** de esta investigación es caracterizar los camiones de fatiga que servirán para determinar el rango de esfuerzos en los diferentes componentes de un puente, con lo que se conocerán las propiedades de una de las variables que intervienen en la estimación de la vida remanente del puente.

En esta tesis, además del objetivo general de investigación, se plantean dos objetivos particulares. El **primer objetivo particular** es generar una clasificación de las carreteras del país, conforme a los pesos de los vehículos que circulan por ellas y calcular el peso del vehículo que representará a cada categoría generada.

El **segundo objetivo particular** será determinar las cualidades de los camiones característicos, con cierta configuración de los ejes, para poder, en investigaciones posteriores, obtener la cantidad de ciclos equivalentes, aplicados por vehículos que transiten por cada puente, con un mayor grado de aproximación. El concepto de ciclos equivalentes se explicará un poco más adelante, en el CAPÍTULO 2.

Para cumplir estos objetivos se plantean las siguientes **hipótesis**:

- Si se aplican conceptos de la minería de datos, es posible determinar las clases o las regiones por donde suelen circular los diferentes vehículos, en función de los pesos y, específicamente, determinar el peso que deberían tener los vehículos de fatiga, para cada una de las diferentes clases o regiones.
- Con los conceptos utilizados en el área de la fatiga por los investigadores y aplicando las teorías de minimización de errores, se determinarán las características de las dimensiones, los pesos por ejes y la cantidad de ejes. Estos vehículos deberán ser tales que su empleo asemeje el comportamiento producido por el tráfico real.

## **Resumen de los capítulos.**

En los capítulos que integran este documento se dará una breve descripción del fenómeno de fatiga y de los métodos de predicción que existen para la evaluación de la misma, en diferentes áreas de la ingeniería (**CAPÍTULO 1**). Además, se hará una descripción de algunos de los métodos que se emplean para la evaluación de la fatiga en los puentes de acero, en diferentes regiones del mundo y un estudio del método utilizado en los Estados Unidos (**CAPÍTULO 2**).

En el **CAPÍTULO 3** se hablará sobre las características de peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan en México, así como un breve resumen de los estudios realizados por el IMT en diversas carreteras del país.

Habiendo estudiado los documentos técnicos y las características de los pesos y de las dimensiones, en el **CAPÍTULO 4** se describirá el método implantado en esta investigación para obtener los modelos de carga viva, que serán utilizados para la evaluación de la fatiga en diversas zonas del país.



Finalmente, en el **CAPÍTULO 5** se mencionarán las conclusiones de este trabajo de investigación. Algunas de las líneas de investigación que podrían suscitarse a partir de este trabajo de investigación se presentan en el **CAPÍTULO 6**.

# CAPÍTULO 1: LA FATIGA EN LOS MATERIALES Y EN LAS ESTRUCTURAS.

## 1.1 Concepto de fatiga.

Se llama fatiga a un proceso localizado y progresivo que causa un cambio permanente en las propiedades micro-estructurales de los materiales. Este fenómeno se debe a cargas cíclicas dinámicas que producen esfuerzos y deformaciones fluctuantes <sup>(4)</sup>. Dichas cargas cíclicas pueden ser:

- Mecánicas, que producen fatiga mecánica
- Cargas térmicas (altas temperaturas), que provocan fatiga por fluencia (“creep”)
- Cargas químicas, que inducen fatiga por corrosión, etcétera <sup>(5)</sup>.

Además, la fatiga está presente en estructuras tales como: puentes carreteros y ferroviarios, maquinarias, motores, fuselaje de aviones, turbinas, barcos, plataformas marinas, etc.(**Figura 1**)



Puentes

Grúas

**Figura 1.** Algunas estructuras sometidas a la falla por fatiga

Por otra parte, la fatiga ocurre en materiales tanto metálicos como no metálicos; es decir, puede presentarse en el concreto, el aluminio, el cristal, los polímeros, el acero y en cualquier otro tipo de aleación. Sin embargo, su mecanismo de falla es distinto, conforme al tipo de material <sup>(6)</sup>, ya que depende de las características del mismo; v.gr., anisotropía elástica, alotropía, tamaño y forma del grano, orientación de grano a grano.

## **1.2 Avances importantes en el campo de la fatiga a través de los años.**

La fatiga es un área de estudio que une muchas disciplinas de la ingeniería y ofrece una gran variedad de fenómenos que conviene investigar. Muchos científicos han trabajado arduamente para entender la fatiga en materiales metálicos y no metálicos, tanto como en materiales frágiles y dúctiles, así como en materiales compuestos y monolíticos. Por tal motivo, es importante hacer una revisión histórica <sup>(5)</sup> antes de entrar en materia.

El primer estudio en este tema se cree que fue desarrollado por W.A.J. Albert, en 1829, quién realizó pruebas aplicando cargas cíclicas reversibles sobre unas cadenas de hierro que se utilizaban en la minería. A Poncelet (1839) generalmente se le atribuye el término “fatiga en metales”. Posteriormente, se incrementó el estudio de este fenómeno en estructuras férreas, generalmente puentes. En 1842 se inició la primera investigación seria sobre la fatiga, debido al accidente que ocurrió cerca de Versalles, Francia. En 1843, W.J.M. Rankine reconoció las características de las fracturas por fatiga y alertó acerca del peligro que hay en las maquinarias por la concentración de esfuerzos. Con estos estudios empezó a surgir la llamada “teoría de

cristalización”, que postulaba que la fatiga se debía a una cristalización de la microestructura del material. Posteriormente, en 1849, el gobierno de Inglaterra comisionó a Hodgkinson para estudiar la fatiga en el hierro fundido y forjado que se usaba en puentes ferroviarios.

En 1860, Wöhler realizó una investigación en los rieles usados por la industria ferroviaria alemana. Observó que los rieles sujetos a cargas cíclicas fallaban a un esfuerzo menor que los rieles sometidos a cargas estáticas. Estos estudios incluían pruebas a flexión, tensión y torsión. Con su trabajo se realizó una caracterización del comportamiento por fatiga, usando las curvas de amplitud de esfuerzos-número de ciclos (S-N) y se introdujo el concepto de “límite de fatiga”.

Ya en 1874, H. Gerber desarrolló métodos de diseño contra la fatiga y contribuyó a la elaboración de métodos para calcular la vida restante utilizando distintos niveles de ciclos de esfuerzos. Goodman (1899) realizó estudios similares a los de Gerber.

En 1903, dos investigadores suecos, Ewing y Humfrey, investigaron la fatiga en el hierro sueco altamente puro. En su publicación se incluyó la microscopía óptica del daño cíclico sobre la superficie del espécimen. Esta publicación desechó la teoría que se tenía de la cristalización micro-estructural. En la microscopía se mostraban las bandas de deslizamiento desarrolladas en muchos granos del material, estas bandas se ensanchaban con la progresión de la deformación producida por la fatiga, hasta la formación de grietas.

O.H. Basquin, en 1910, propuso leyes empíricas para caracterizar el límite de fatiga. Contribuciones significativas fueron hechas por Bairstow (1910) para entender el ablandamiento y endurecimiento cíclico en los materiales. Bairstow presentó resultados sobre la deformación histerética y sus relaciones con la falla de fatiga. En 1911, Boudouard condujo una investigación

sobre la fatiga en barras de acero que estaban sujetas a vibración. El objeto de estudio fue observar los efectos térmicos en la resistencia de las barras por fatiga.

En 1926 se publicó el libro “Fatigue of Metals” por H.J. Gough. Un año más tarde se publicó el libro del mismo nombre por H.F. Moore y J.B. Kammers en los Estados Unidos. Ya para los años 20’s y 30’s, el estudio de la fatiga había sido adoptado por diversos investigadores como su campo de estudio. Tales investigaciones permitieron establecer los modelos llamados “de acumulación de daño”, desarrollados por Pålmgren en 1924 y modificados por Miner en 1945.

Coffin y Manson establecieron que las deformaciones plásticas eran responsabilidad del daño cíclico (1954). Estos investigadores propusieron una relación entre la deformación plástica y el número de cargas reversible para la falla (llamada la Relación Coffin-Manson).

En 1913, Inglis desarrolló el análisis de esfuerzos; más tarde en 1921, Griffith enunciaría los conceptos de energía en sólidos frágiles. Con esto se aportaba una herramienta matemática para cuantificar lo que en años atrás Ewing y Humfrey habían descubierto. Sin embargo, no era posible aplicarlo directamente a las fallas de fatiga. No fue sino hasta 1957 cuando Irwin expresó la cantidad de esfuerzo en una grieta mediante un escalar conocido como “Factor de intensidad de esfuerzo  $K$ ”, utilizando la mecánica de la fractura elástica lineal.

Paris, Gómez y Anderson (1961) fueron los primeros en sugerir que la grieta avanzaba por ciclo de esfuerzo,  $\frac{da}{dN}$ , y lo relacionaron con el factor de intensidad de esfuerzo,  $\Delta K$ , en amplitud constante de esfuerzos. Aunque, este documento no fue aceptado para su publicación por los expertos en el área, esta aproximación ha sido mundialmente adoptada para caracterizar el crecimiento de la grieta.



Gracias a los avances en el microscopio óptico y de electrones, se pudieron identificar las características microscópicas de la fatiga. En 1951, Zappfe y Worden observaron las fallas por fatiga e identificaron las “estrías de fatiga”. Thompson, Wadsworth y Louat, en 1956 observaron los deslizamientos que reaparecían en los metales fatigados en la misma posición durante ciclos continuos, a los que nombraron “deslizamientos persistentes”. En 1960, las correlaciones de las estrías con la tasa de crecimiento de la grieta fueron publicadas por Forsyth y Ryder. Estas correlaciones se volvieron fundamentales para el desarrollo de teorías de crecimiento de la grieta y análisis de la falla.

Con la aplicación de los conceptos de mecánica de la fractura a la fatiga, se desarrollaron modelos conceptuales y cuantitativos (Laird-Smith, 1962; McClintock, 1963; Weertman, 1966; Laird, 1967; Rice, 1967; Neumann, 1969; Pelloux, 1969).

Una contribución importante fue el experimento desarrollado por Elber (1970), quien demostró que una grieta podía permanecer cerrada aplicando una carga cíclica de tensión. También demostró que el crecimiento de la grieta no depende del factor de intensidad del esfuerzo, sino de un esfuerzo efectivo, que depende de la forma de la superficie de fractura.

Posteriormente, en 1975, Pearson identificó pequeñas grietas que no podían ser satisfechas por la teoría de mecánica de la fractura existente en la época. La llamó “problemas de la grieta pequeña”.

El desarrollo de modelos fiables para la predicción de la fatiga en condiciones de servicio, en aplicaciones para la ingeniería (estructuras expuestas a cargas espectrales, ambientes corrosivos, bajas o altas temperaturas y esfuerzo multi-axiales), han sido un reto para la investigación actual, en el ramo, por su alto grado de complejidad.

Estos modelos de predicción son sin duda alguna la tendencia actual de las investigaciones mundialmente realizadas, entre las cuales se encuentra la predicción conocida como “load spectra” <sup>(7)</sup>, donde se somete un componente a repeticiones de carga, y donde las cargas son aquellas a las que el componente estará sujeto durante su vida. Esta técnica tiene muchos años, no obstante, en los recientes años se ha mejorado debido a los avances en las mediciones y en las adquisiciones de datos por medio de los equipos de cómputo.

Además de los métodos de predicción, en los recientes años ha surgido la inquietud de investigar el comportamiento de materiales no metálicos y materiales compuestos, pues éstos ofrecen un potencial mecánico, térmico y ambiental que los metales convencionales no son capaces de desarrollar.

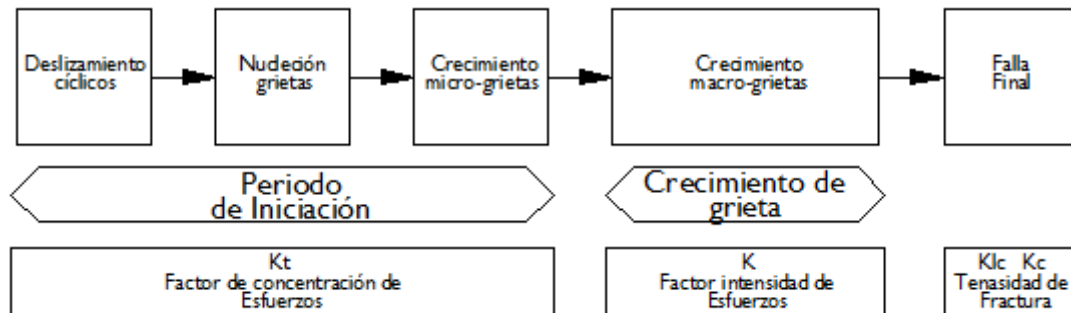
### **1.3 Las fases de la fatiga.**

Como se describió con anterioridad, la fatiga es un proceso progresivo. Este proceso puede dividirse en varias fases, antes de llegar a la fractura final. Las fases han sido identificadas mediante varios estudios <sup>(7)</sup>, observaciones microscópicas y modelos propuestos para explicar este fenómeno.

En un espécimen sometido a cargas cíclicas, la falla por fatiga presentará grietas micro-estructurales; posteriormente le seguirán grietas de tipo macro-estructural (visibles a simple vista) y por último, ocurrirá la falla total del espécimen <sup>(6)</sup>.

A consecuencia de lo anterior, es posible denotar dos grandes periodos; el periodo de iniciación de la grieta y el periodo de crecimiento de la grieta (**Figura 2**). Estos periodos

pueden dividirse en sub-fases y además definirse según los respectivos factores que intervienen en el desarrollo. Dichas fases y sus respectivos factores se definirán posteriormente.



**Figura 2.** Diagrama de las fases y sub-fases de la vida de un espécimen sometido a fatiga y sus factores más relevantes.

Es importante denotar que, en un espécimen, el periodo de mayor duración es el periodo de iniciación, mientras que la vida de la fase de crecimiento de la grieta es pequeña <sup>(6)</sup>. En una estructura real, la fase de crecimiento de la grieta puede ser mucho mayor, puesto que las dimensiones del espécimen son mayores y la propagación de la grieta dependerá únicamente de la intensidad de esfuerzos que exista en la punta de la fisura <sup>(6)</sup>.

A continuación se explicarán con mayor claridad estas fases y sus sub-fases.

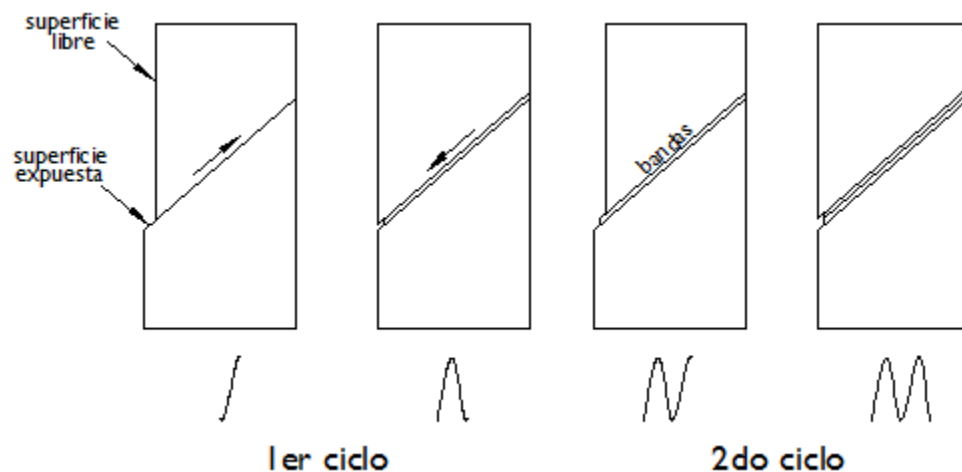
### 1.3.1 Periodo de iniciación.

El periodo de iniciación y el periodo de crecimiento son consecuencia del deslizamiento cíclico en bandas de deslizamiento. Como resultado de este desplazamiento cíclico se genera deformación plástica en pequeños granos superficiales (esto se debe a que estos granos no se encuentran rodeados por material en toda su superficie, además de estar expuestos a las condiciones ambientales) <sup>(6)</sup>.

Para que se generen las bandas de deslizamiento es necesario que ocurra esfuerzo cortante cíclico, pues este esfuerzo no es constante en la micro-estructura (debido a el distinto tamaño y forma del grano y su anisotropía) (6).

Una vez que se genera una banda de deslizamiento, una superficie de material queda expuesta a la acción del ambiente y queda cubierta por una capa de óxido (en los materiales metálicos). Al aplicar el esfuerzo reversible, ya que la zona sufrió endurecimiento por deformación y oxidación, la banda de deslizamiento no puede ser completamente revertida. Esto provoca intrusiones o extrusiones en el material, (**Figura 3**) lo que se conoce como *nucleación de grietas*.

Estas intrusiones y extrusiones son micro-grietas y con cada ciclo de esfuerzos estas grietas se extienden y se desarrollan hasta que el fenómeno deja de ser superficial.



**Figura 3.** Deslizamiento cíclico la cual genera nucleación.

### 1.3.2 Periodo de crecimiento de grieta.

Una vez nucleado el espécimen, la grieta causa discontinuidad en la distribución de los esfuerzos en el espécimen y una concentración de esfuerzos en la punta de la grieta. La grieta se propagará fácilmente si crece dentro de los granos adyacentes y se desarrollará en dirección a la banda de deslizamiento inicial, generalmente perpendicular a la dirección de la carga.

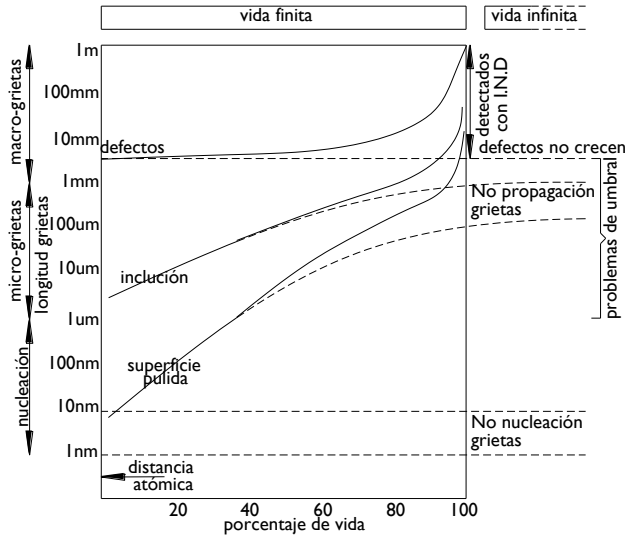
El crecimiento de la grieta depende del nivel de plasticidad cíclica que haya en los granos y la rapidez con que se desarrolle esta grieta dependerá únicamente de la resistencia del material; ya no depende de las condiciones superficiales <sup>(7)</sup>.

Es importante resaltar que la sub-fase de crecimiento de la micro-grieta se encuentra definida en el periodo de iniciación. Sin embargo, el tamaño de la grieta para considerar la transición entre la iniciación y el crecimiento de la grieta queda definido por el material, ya que depende de las características micro-estructurales del mismo <sup>(6)</sup>.

En la **Figura 4** se ilustra el crecimiento de la grieta en función del porcentaje de vida, pero con diferentes longitudes iniciales de grieta.

Se puede observar que la vida de una grieta puede ser infinita si no llegara al umbral. Este umbral será definido en detalle más adelante, en este documento. También es posible notar que la longitud inicial de la grieta juega un papel importante en el desarrollo de la misma y su vida restante, puesto que mientras que un espécimen ideal tiene que pasar por la etapa de nucleación y posteriormente por el resto de las etapas hasta la inestabilidad; en especímenes con inclusiones y defectos, la vida de la fatiga iniciará desde la etapa de micro-grietas y macro-grietas, respectivamente.



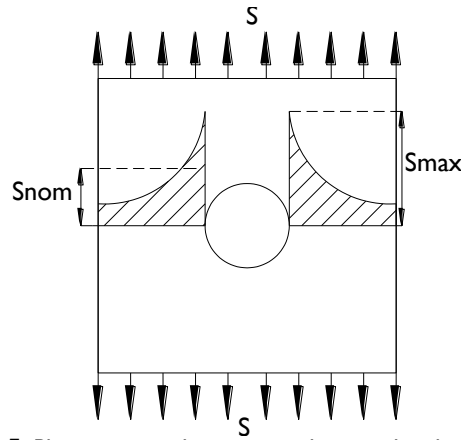


**Figura 4.** Crecimiento de grieta.

### 1.3.3 Factor de concentración de esfuerzos y Factor de intensidad de esfuerzos.

Como se pudo observar anteriormente, las fases de la fatiga están definidas por factores que intervienen (**Figura 2**), los cuales son primordiales para que se desarrolle la grieta. Estos factores son el **Factor de concentración de esfuerzos,  $K_t$** , en la etapa de iniciación de grieta y el **factor de intensidad de esfuerzos,  $K$** , el cual es la variable dependiente del crecimiento de grieta.

El **Factor de concentración de esfuerzos** está relacionado con los puntos en los cuales hay aberturas y cambios bruscos de sección en las estructuras. Para definir el factor de concentración de los esfuerzos<sup>(8)</sup> considérese una placa con una abertura como se muestra en la **Figura 5**. Esta placa estará sometida a un esfuerzo constante  $S$  de tensión en los extremos de la placa. La distribución de esfuerzos en la sección crítica de la placa queda definida como se muestra en la figura. Es posible observar el nivel de esfuerzo que se genera en la abertura. A esto se le conoce como **Concentración de esfuerzos**.



**Figura 5.** Placa con una abertura circular y su distribución de esfuerzos en la sección crítica.

La concentración de esfuerzos se puede definir con la siguiente ecuación.

$$S_{max} = K_t S_{nom} \quad (1)$$

Dónde:

$S_{max}$  = Esfuerzo Máximo

$S_{nom}$  = Esfuerzo Nominal

$K_t$  = Factor de Concentración de Esfuerzos

El **Factor de concentración de esfuerzos está definido por el cociente del esfuerzo máximo entre el esfuerzo nominal**. Este factor concentrador es mayor cuando la abertura es una elipse. Además, si la dimensión menor de la elipse tiende a cero, el esfuerzo tenderá a infinito <sup>(8)</sup> .

Por tal motivo, si se sabe que una grieta puede considerarse como una elipse (**Figura 6**) con su dimensión menor igual a cero, no es posible usar el factor de concentración de esfuerzo para definir el valor del esfuerzo, puesto que sería infinito <sup>(8)</sup>.

Para determinar el nivel de esfuerzos en una grieta se usa el concepto de “Intensidad de Esfuerzos”<sup>(6)</sup>.

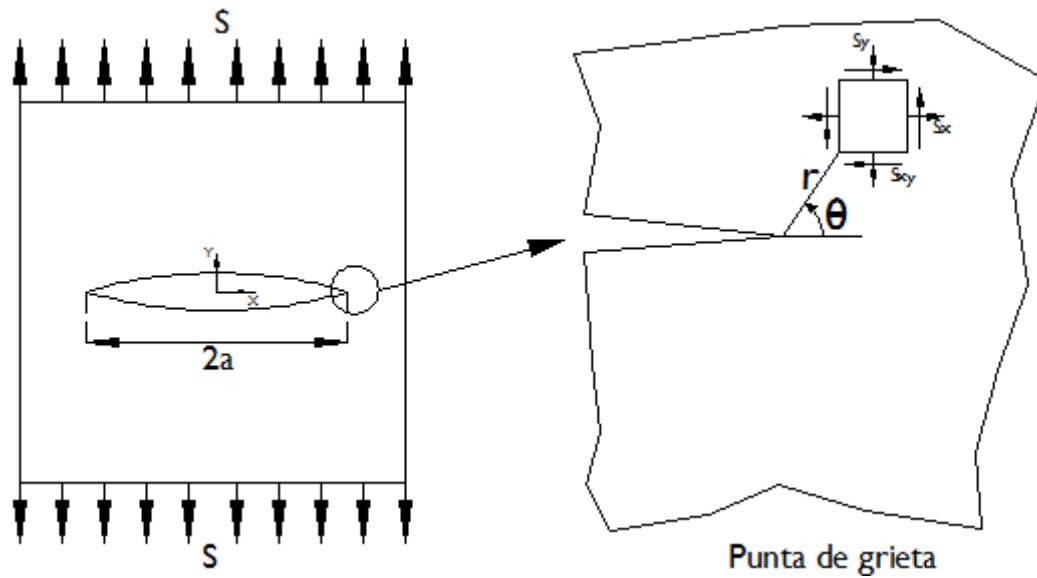


Figura 6. Placa con grieta y esfuerzos en la punta de la grieta.

Este concepto puede definirse mediante las expresiones clásicas de la teoría de elasticidad que determinan los esfuerzos en una placa con una abertura de forma elíptica<sup>(6)</sup>.

$$S_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - S$$

$$S_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2)$$

$$S_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

Las expresiones anteriores pueden expresarse, de forma general, de la siguiente manera:

$$S_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (3)$$

Si de esta expresión general se separan los elementos constantes de los que son función de  $(r, \theta)$ , es posible determinar el escalar que sirva para evaluar el nivel de esfuerzo que se encuentra en la grieta. De esta manera, se tiene;

$$K = \beta S \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

Dónde:

$K$  = Factor de intensidad de esfuerzo

$S$  = Esfuerzo aplicado a la placa

$\beta$  = Factor de geometría

Así pues, el **Factor de intensidad de esfuerzos  $K$  muestra la severidad de intensidad de esfuerzo que se encuentra en la punta de la grieta**. Mientras que  $\beta$ , es el factor de geometría de la grieta el cual es adimensional.

#### 1.3.4 Obtención de la curva de propagación de grieta de fatiga y las regiones de la curva.

Una vez definido el factor de intensidad de esfuerzos, es posible relacionarlo con el crecimiento de la grieta. La relación que existe puede expresarse en la curva de propagación de la grieta (**Figura 7**), en la cual se grafica la tasa de crecimiento de la grieta en función del rango de la intensidad del esfuerzo. Esta gráfica puede ser obtenida mediante la prueba estandarizada ASTM E-647 <sup>(9)</sup>.

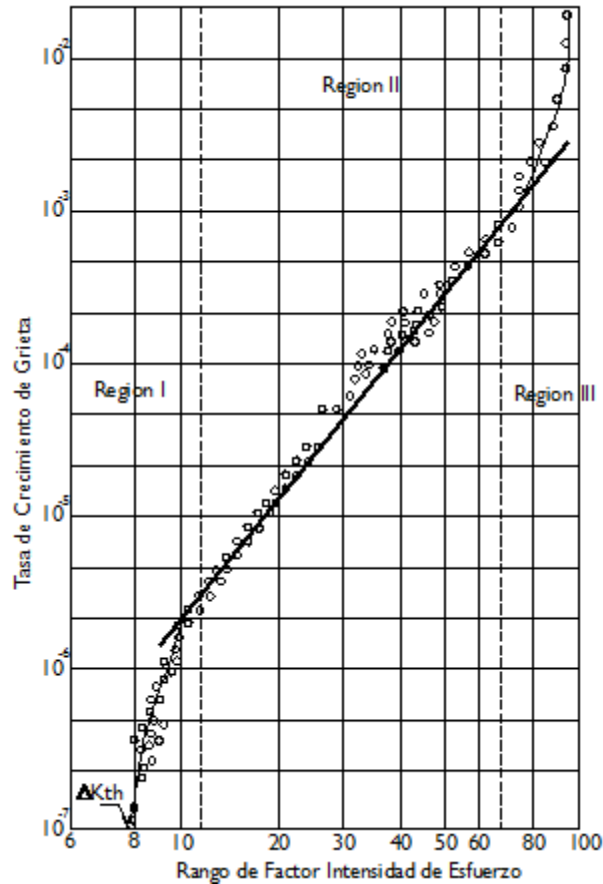


Figura 7. Curva de propagación de grieta del acero ASTM A533 B1

Esta prueba requiere el uso de un espécimen agrietado (**Figura 8**) y especímenes compactos (**Figura 9**), con sus respectivas dimensiones. La relación de espesor-ancho  $B/W$  debe ser menor que el valor 0.5 de la tenacidad de material,  $K_{Ic}$ . El máximo valor de  $B/W$  para el espécimen agrietado y el compacto son de 0.125 y 0.25, respectivamente.

Para obtener la gráfica, primeramente es necesario someter los especímenes a carga en amplitud constante y generar una gráfica de longitud de la grieta vs. Ciclos, cargando estos especímenes a carga máxima y carga mínima. Las mediciones deben hacerse en intervalos, de

acuerdo al ASTM E-647, los cuales no se mencionarán en este documento, puesto que no son objeto de estudio.

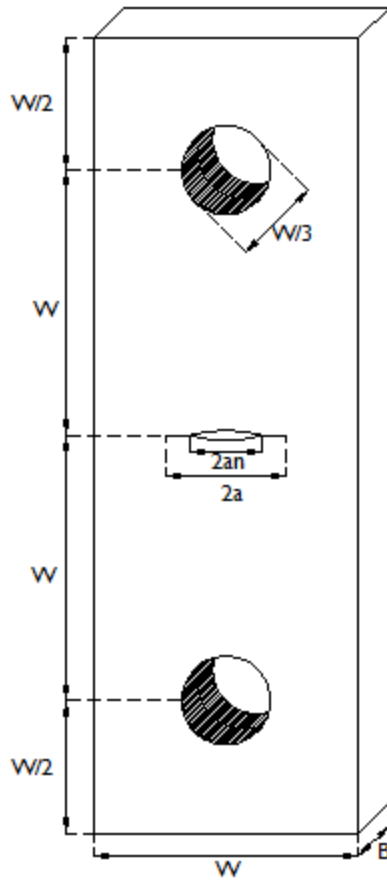


Figura 8. Especimen agrietado para la prueba ASTM E-647

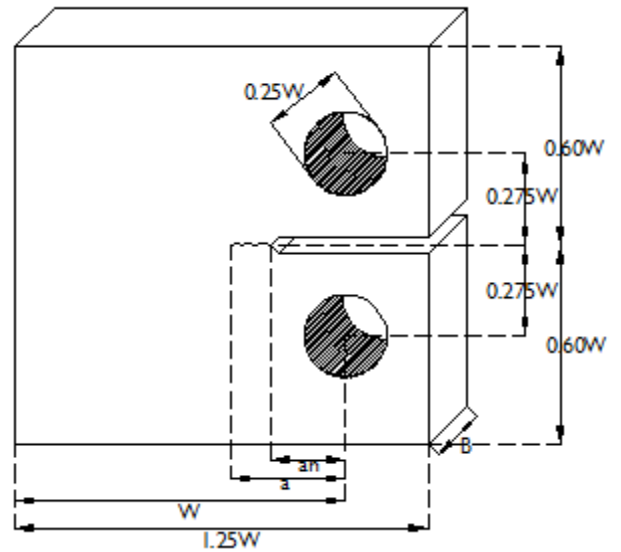


Figura 9. Especimen compacto prueba ASTM E-647

Ya con los datos obtenidos de la gráfica de longitud de la grieta vs. ciclos, puede obtenerse la tasa de crecimiento de la grieta. Existen distintos métodos para obtener la tasa de crecimiento, sin embargo, los métodos más comunes son el método de la secante y método del incremento polinomial <sup>(10)</sup>.

El método de la secante consiste en las pendientes en línea recta que conectan dos datos adyacentes. Este método, aunque simple, aporta resultados más dispersos en las mediciones.

El método del incremento polinomial ajusta un polinomio de segundo orden en cinco a siete datos y la pendiente es el crecimiento. Este método elimina la dispersión, que es necesaria en las pruebas de fatiga.

Una vez obtenida la tasa de crecimiento, se procede a graficarla; en función de la intensidad de los esfuerzos, obteniendo así la curva de propagación de la grieta.

En esa curva de propagación se pueden observar fácilmente 3 regiones (**Figura 7.**), que son <sup>(4)</sup>:

*Región I: Crecimiento lento de la grieta*

*Región II: Ley potencial o Estable*

*Región III: Crecimiento Inestable de la Grieta y Falla*

En la región I se puede observar el **Umbral de esfuerzos**,  $\Delta K_{th}$ , que es el punto en el que la grieta no se desarrolla, puesto que la intensidad de esfuerzos en la punta de la grieta es menor que el umbral de esfuerzos <sup>(7)</sup>. Este umbral se puede definir como la resistencia de fatiga que cada material tiene, de acuerdo con las características micro-estructurales y puede asemejarse su concepto a lo que se conoce como el **Límite de fatiga**. Este límite de fatiga será definido más adelante, puesto que es más evidente su concepción utilizando la curva de “Amplitud de esfuerzos-número de ciclos”.

La región II es aquella en la que la grieta se desarrolla de una manera estable, mientras que la región III es aquella en la que la grieta crece inestablemente.

### 1.3.5 La región de crecimiento estable y la ecuación de Paris.

De acuerdo con lo anterior, la región II, en la gráfica (**Figura 7**), se asimila como un crecimiento estable de la macro-grieta, la cual está definida por una recta que cumple perfectamente la ley potencial (10).

Muchas relaciones han surgido para establecer la relación que se presenta en la región II; sin embargo, la más aceptada ha sido la relación propuesta por París et al. <sup>(10)</sup>.

París <sup>(11)</sup> estableció que el crecimiento de la grieta puede ser descrito por una simple teoría racional. Con esto se pretendía calcular la vida de la fatiga de especímenes con geometría complicada, por medio de pruebas experimentales.

Dicha teoría enuncia la relación de la tasa de crecimiento en función del campo de esfuerzos y su variación cerca de la punta de la grieta. La relación que existe puede expresarse de la siguiente manera <sup>(7)</sup>:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (5)$$

Donde:

$\frac{da}{dN}$  = Tasa de crecimiento de grieta

$\Delta K$  = Factor de intensidad de esfuerzos relacionada con la energía de deformación.

$C, m$  = Constantes del material.



En dicha relación se basan actualmente los métodos de predicción de crecimiento de la grieta, de los cuales, se hablará un poco más adelante, en este capítulo. Sin embargo, de ellos no se hablará a fondo, por no ser objeto de estudio en esta investigación.

#### **1.4 La curva de rango de esfuerzos (S-N) y su aporte al fenómeno de fatiga.**

En el siglo XIX Wöhler ya había realizado experimentación para obtener la curva S-N, que por mucho tiempo fue conocida como la curva de Wöhler <sup>(7)</sup>. Posteriormente, en el siglo XX, se realizaron numerosas pruebas para obtener la curva S-N con gran número de ciclos. Mientras ya en los años 40's ya contaba con maquinaria para ensayos a flexión, tensión y torsión. Actualmente se cuenta con equipo de resonancia, lo que permitió crear pruebas a alta frecuencia y hacer rápidamente las pruebas.

La curva S-N se usa para dar información confiable de los efectos del tamaño y las aberturas en los especímenes, de los cuales se pretende obtener la vida de la fatiga. La vida de la fatiga, N, se grafica en una escala logarítmica, en el eje horizontal, mientras que en el eje vertical se grafica la amplitud de los esfuerzos.

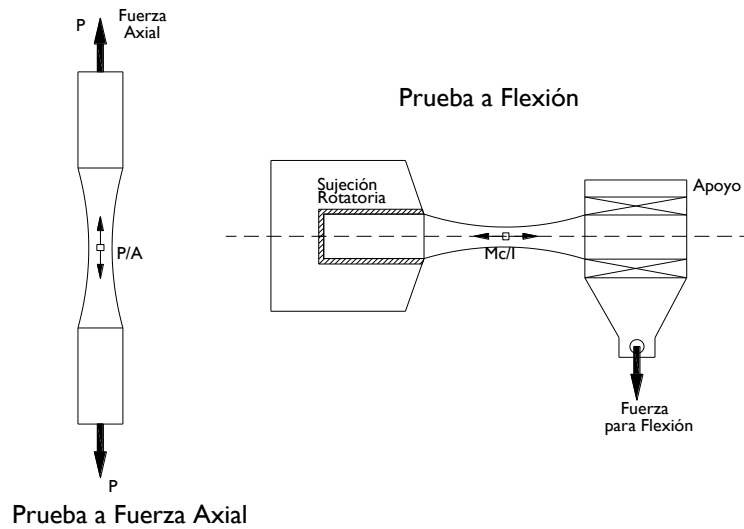
Con esta curva se obtendrá el concepto de Bajo-Ciclo y Alto-Ciclo, el concepto de límite de la fatiga, pero antes de definirlos es importante saber cómo obtener experimentalmente esta curva.

### 1.4.1 Obtención experimental de la curva y el rango de esfuerzos.

Para obtener esta gráfica es necesario realizar la prueba estandarizada ASTM E-466 <sup>(12)</sup>, que muestra el tamaño y las dimensiones del espécimen (**Figura 9**).

Primeramente, el espécimen se somete a un esfuerzo un poco menor que la fluencia y se somete a carga cíclica (carga y descarga) hasta la falla. A la carga y descarga de ese espécimen se le conoce como **Amplitud de esfuerzo o rango de esfuerzo** al que está sometido. Sobre este concepto se abundará un poco más en el régimen de **amplitud variable**.

Posteriormente se somete otro espécimen a un nivel de esfuerzo menor que el anterior, a carga cíclica, hasta la falla. Se someten más especímenes, bajando el nivel de esfuerzo, hasta obtener varios puntos para poder graficar la curva, el número de especímenes depende del estándar ASTM E-466, lo que no será señalado en este documento, puesto que está fuera de estudio.



**Figura 10.** Especímenes para la prueba curva S-N fatiga

Después de realizada la prueba, se grafican los datos en escala logarítmica, los ciclos en el eje de horizontal y la amplitud de esfuerzos en el eje vertical, como se muestra a continuación (Figura 11).

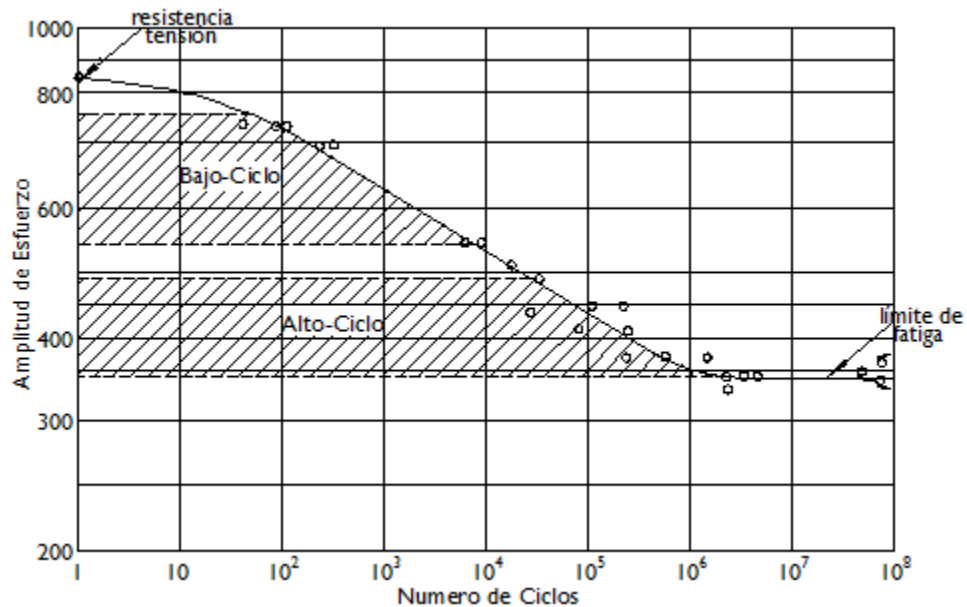


Figura 11. Resultados de la prueba de especímenes sin abertura en un acero de baja aleación

En esta gráfica se aprecian las regiones de **bajo-ciclo**, **alto-ciclo** y el **límite de fatiga**. A continuación se definirá cada uno de estos conceptos, que serán de gran relevancia para esta investigación.

#### 1.4.2 Bajos-ciclos.

A este fenómeno se le había prestado poca atención hasta la llegada de la Segunda Guerra Mundial <sup>(10)</sup>, puesto que se requería una teoría de vida corta por fatiga, ya que se necesitaba para el estudio de contenedores y fuselajes presurizados, misiles, controladores flaps en alas de aviones y equipo para el lanzamiento de naves espaciales.

El concepto de **bajo-ciclo** se refiere a la falla causada por fatiga en un número pequeño de ciclos. Esto se debe a que hay gran deformación plástica en la superficie del material <sup>(7)</sup>. Las macro-grietas en bajo-ciclo son muy limitadas, puesto que las pequeñas grietas inducen la falla en niveles altos de esfuerzo. El fenómeno de bajo-ciclos es importante cuando la deformación plástica no puede evitarse (generalmente se presenta en problemas térmicos), esto guió a que se crearan modelos de aproximación de deformación vs ciclos,  $\epsilon - N$ , donde la deformación se mantiene en vez del esfuerzo <sup>(7)</sup>.

### 1.4.3 Altos-ciclos.

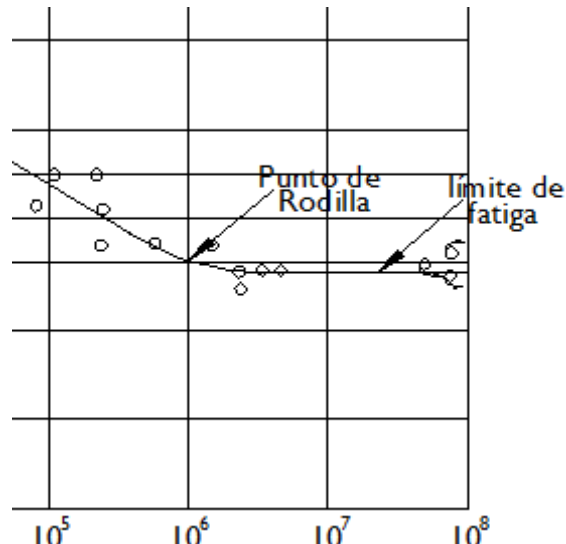
A diferencia del fenómeno de bajo-ciclos, este fenómeno había sido estudiado ampliamente. El fenómeno de **alto-ciclos** se presenta ya que, a baja amplitud de esfuerzo, la deformación macro-plástica no ocurre; por lo tanto, se asume que, a macro-escala, la deformación cíclica todavía es elástica <sup>(7)</sup>.

Este fenómeno se ve afectado por las condiciones superficiales en su etapa de iniciación, a diferencia de la condición de bajo-ciclo, donde la deformación plástica ocurrirá de todas maneras. Mientras que en la etapa de crecimiento, el fenómeno de alto-ciclos desarrollará macro-grietas importantes. A consecuencia del fenómeno de alto-ciclo se presenta el concepto de límite de fatiga.

### 1.4.4 El límite de fatiga.

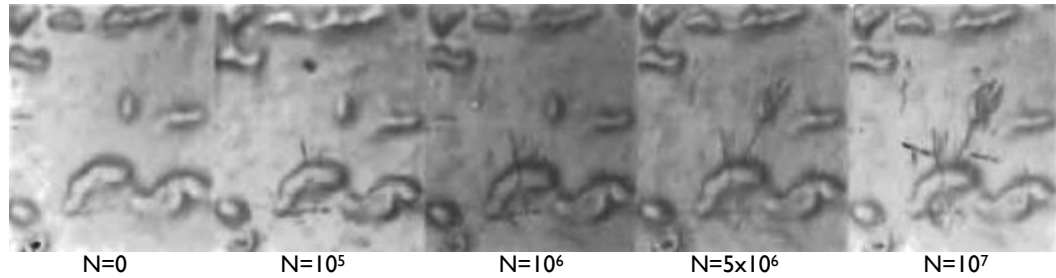
Al cambio repentino de pendiente en la curva S-N se le conoce como **Punto de rodilla** <sup>(13)</sup> (**Figura 12**). Como esta investigación está enfocada al estudio de elementos estructurales de acero, este punto en la mayoría de ellos aparece, en una cantidad de  $10^7$  ciclos.

El Punto de rodilla es aquél en el que el material ya no presenta signos de falla, frente a una cantidad de amplitud de esfuerzos. A este fenómeno se le conoce como límite de fatiga, en el que se considera que la vida del material a fatiga es infinita <sup>(7)</sup>.



**Figura 12.** Punto de rodilla en la prueba de especímenes sin abertura en un acero de baja aleación.

La falla no ocurre debido a que, aunque las bandas de deslizamiento aparezcan en los primeros ciclos, y se generen grietas micro-estructurales, las grietas no se propagan a los granos adyacentes (**Figura 13**). Esto sugiere que el límite de fatiga está controlado por la resistencia media de la micro-estructura <sup>(13)</sup>; es decir, que depende de la resistencia media del grano (umbral de esfuerzos) y que la grieta se establece en una cierta cantidad pequeña de granos, en comparación con la gran cantidad que existen en el espécimen. Esto lleva a concluir que el límite de fatiga es el umbral de esfuerzos para la propagación de la grieta <sup>(13)</sup>.



**Figura 13.** Secuencia del desarrollo de grietas sin propagación.

El concepto del límite de fatiga sigue usándose hasta la fecha, para el diseño estructural en todas las ramas de la ingeniería. Sin embargo, las nuevas pruebas realizadas con máquina de resonancia son de giga-ciclos ( $10^{10}$ –  $10^{12}$  ciclos), las cuales apuntan a que no existe tal límite en los metales. Tal es el caso del estudio realizado por Bathias <sup>(14)</sup>, en el que se concluye que no existe tal límite, al realizar pruebas a un número de ciclos de  $10^{10}$ .

### 1.5 Modelos de predicción de la falla por fatiga.

Para la ingeniería ha sido importante la predicción de la fatiga, tanto en estructuras civiles como mecánicas <sup>(5)</sup>, puesto que es necesario cuantificar los problemas de fatiga que pudieran existir en una estructura <sup>(4)</sup>.

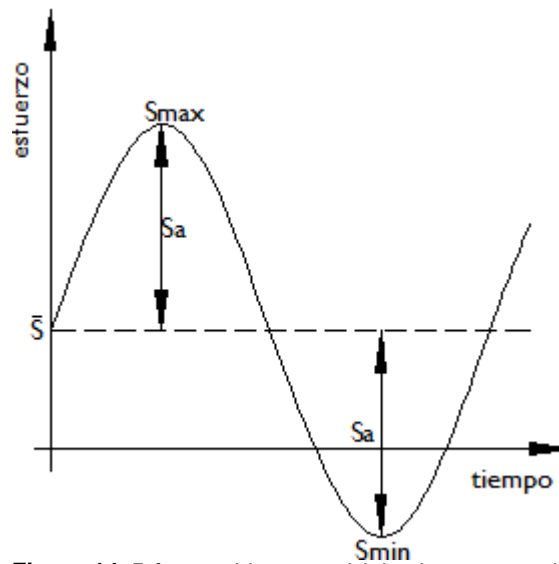
Para esto se han creado distintos modelos, contenidos en dos tipos de enfoque: el enfoque clásico, también conocido como **Acumulación de daño** <sup>(15)</sup>, basado en la aproximación de la resistencia por fatiga; mientras que el segundo enfoque está basado en la mecánica de la fractura, conocido como de **Propagación de la grieta de fatiga** <sup>(15)</sup>.

Asimismo, el fenómeno de fatiga se ve afectado por distintas variables que son incluidas en los modelos de predicción. Un ejemplo de éstas es el tipo de carga <sup>(6)</sup>. Esta variable se define por

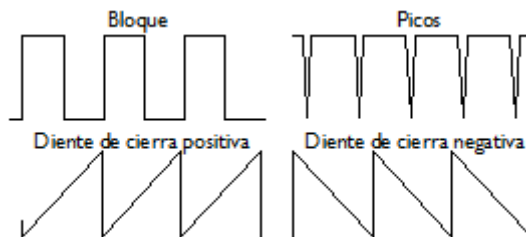
los conceptos de amplitud constante (CA-Amplitud) y amplitud variable (VA-Amplitud), conceptos que se definirán a continuación.

### 1.5.1 Amplitud constante (CA-Amplitud)

La **Amplitud constante** (CA-Amplitud) es la carga o esfuerzo de fatiga en la que todos los ciclos son iguales <sup>(16)</sup>. Este tipo de esfuerzo generalmente es senoidal (**Figura 14**), pero puede existir otro tipo de carga (**Figura 15**).



**Figura 14.** Esfuerzo cíclico senoidal donde se expresa la notación de CA-amplitud.



**Figura 15.** Otra clase de esfuerzos cíclico en CA-Amplitud

Observando la **Figura 14** es posible denotar el esfuerzo alternante  $S_a$ , el esfuerzo máximo  $S_{max}$ , el esfuerzo mínimo  $S_{min}$  y el esfuerzo medio  $\bar{S}$ . Con base en la misma figura, es posible expresar las siguientes ecuaciones:

$$S_{max} = \bar{S} + S_a$$

$$S_{min} = \bar{S} - S_a$$

$$\bar{S} = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (6)$$

Donde:

$S_a$  = Esfuerzo alternante

$S_{max}$  = Esfuerzo máximo

$S_{min}$  = Esfuerzo mínimo

$\bar{S}$  = Esfuerzo medio

A la diferencia que existe entre el esfuerzo máximo y el mínimo se le conoce como **Rango de esfuerzos  $S$**  (con el cual se obtiene la curva S-N), que es igual a 2 veces el esfuerzo alternante  $S_a$ . Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$S = 2S_a = S_{max} - S_{min} \quad (7)$$

Adicionalmente al rango de esfuerzos, se sabe que existe el factor concentrador de esfuerzos. Con estos dos conceptos se enunciará el concepto de principio de similitud.



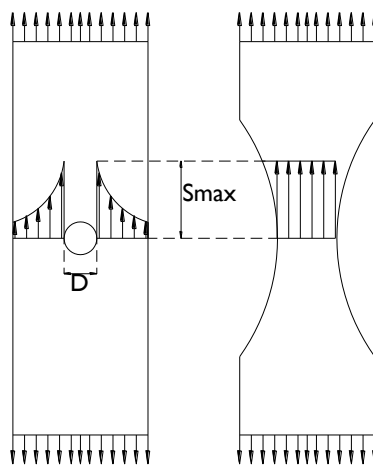
### 1.5.1.1 El principio de similitud

Los modelos de predicción desarrollados para este tipo de amplitud utilizan el **Principio de similitud de condiciones**. Este principio es la base de muchas predicciones de las propiedades de materiales y estructuras.

Este principio se refiere a que: “En condiciones similares, aplicadas a un sistema similar, debe de producirse la misma consecuencia”<sup>(7)</sup>.

Aplicando este principio a la fatiga de aberturas se deduce que si se aplica un esfuerzo similar a un espécimen sin abertura, este esfuerzo aplicado a un espécimen con aberturas debería producir el mismo periodo de iniciación<sup>(7)</sup>. Sin embargo, esta teoría tiene el problema de que, en una abertura, la cantidad de material sometida a ese esfuerzo es menor que en un espécimen sin abertura (**Figura 16**).

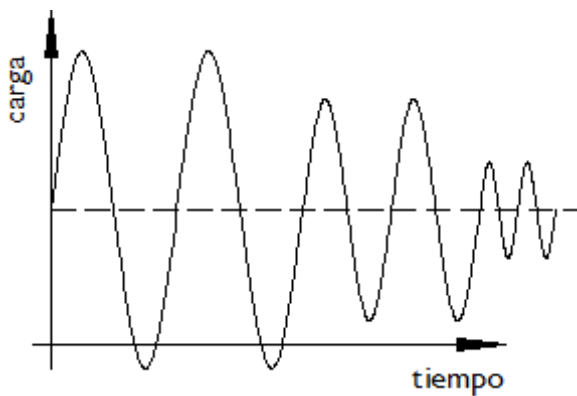
Para modelos de crecimiento de grieta este principio sugiere: la misma intensidad de esfuerzo (intensidad efectiva de acuerdo con el estudio de Elber), aplicada a diferentes grietas, resulta la misma tasa de crecimiento.<sup>(7)</sup>



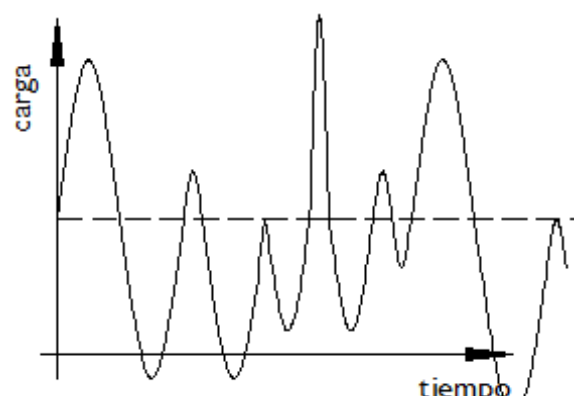
**Figura 16.** Principio de similitud aplicado a espécimen de ensaye

### 1.5.2 Amplitud variable (VA-Amplitud)

Aunque los primeros estudios de fatiga fueron realizados en el régimen de CA-Amplitud, la mayoría de las estructuras se encuentran en el régimen de amplitud variable (VA-Amplitud) <sup>(16)</sup>. Este tipo de amplitud puede dividirse en dos grandes categorías: la primera, en la que se pueden distinguir cargas individuales fácilmente (**Figura 17**), y la segunda, en la que no es esto posible (**Figura 18**) <sup>(16)</sup>.



**Figura 17.** Esfuerzo cíclico en VA-Amplitud en donde se observa las cargas individuales

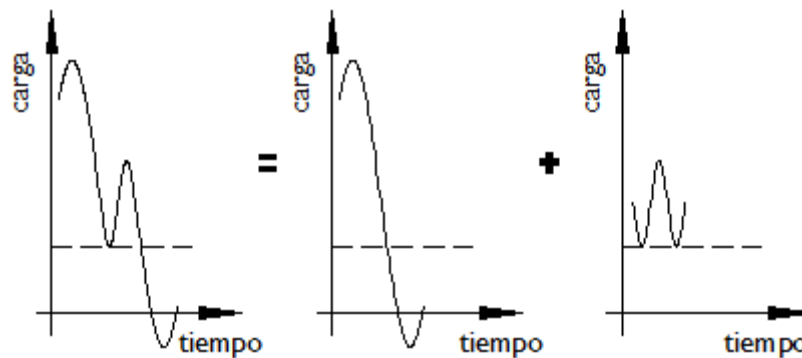


**Figura 18.** Esfuerzo cíclico en VA-Amplitud en donde no se observa las cargas individuales

En este tipo de régimen también se encuentra el criterio de **Carga espectral**. La carga espectral (o load spectra en inglés) es la información de la carga actuando en una estructura en función del tiempo. Esta carga se obtiene mediante la instrumentación, con el fin de medir las deformaciones en una estructura (strain gages) y aplicando algunos métodos de evaluación estadística <sup>(7)</sup>.

La herramienta llamada “Rainflow Count”, fue un desarrollo importante para analizar la carga espectral. Este método descrito en el estándar ASTM E-1049 <sup>(17)</sup> se basa en separar la carga espectral en rangos (**Figura 19**).

Otro ejemplo que se encuentra en el régimen VA-Amplitud, es la “Carga multiaxial” <sup>(16)</sup>, puesto que muchas estructuras no sólo se encuentran sometidas a esfuerzos uniaxiales.



**Figura 19.** Ejemplo de la descomposición de ciclos en base al “Rainflow count”

Adicionalmente a lo anterior, este régimen requiere la utilización de un concepto conocido como la Regla de Miner, la que conviene describir, pues es de fundamental interés para esta investigación.

### **1.5.2.1 La regla de Miner.**

Para los modelos de predicción en el régimen de VA-Amplitud se utiliza el principio conocido como: **Regla de Miner**. Esta regla también se conoce como “hipótesis de daño acumulativo lineal”. <sup>(7)</sup>

Pálmgren sugirió, en 1924 <sup>(18)</sup>, que aplicando  $n$  veces ciclos con una amplitud de esfuerzo  $S_{ai}$ , se consumiría una parte de la vida total  $N$ . Lo cual se podría expresar de la siguiente manera:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (8)$$

Posteriormente, en 1945; Miner, en su artículo <sup>(19)</sup> realizó un análisis de pequeños especímenes y sugirió que la vida total  $N$  del espécimen podría ser considerada como el período de iniciación. Asimismo, refirió que el daño de fatiga es la consecuencia del trabajo absorbido por el material, el cual es proporcional al número de ciclos, con lo cual formuló la regla conocida.

Muchos autores han sugerido que este daño es una función no lineal <sup>(7)</sup>, puesto que esta ecuación depende del esfuerzo cíclico. Sin embargo, no se ha podido encontrar una relación adecuada para el daño, en función de la amplitud de esfuerzos <sup>(7)</sup>.

### **1.5.3 Modelos de daño acumulado.**

Estos modelos macroscópicos pueden usarse para cuantificar la nucleación y el periodo de crecimiento de las micro-grietas <sup>(15)</sup>. Estos modelos varían de acuerdo con el tipo de estructura y la predicción que se quiera hacer, que puede ser: de esfuerzos, de deformaciones, o de densidad de energía. Los modelos tienen la desventaja de que no se tiene una definición consistente de la falla. Se dice que fallan cuando presentan una grieta visible o cuando el espécimen falla completamente o después de que decrece la amplitud de carga.

En este documento se hablará más en detalle de los modelos de esfuerzo, puesto que los modelos de deformación y de energía se emplean comúnmente para predicciones sometidas a cargas térmicas <sup>(7)</sup>.

### 1.5.3.1 La vida infinita (curva S-N)

La vida de la fatiga  $N$  se relaciona con el rango de esfuerzos aplicados  $S$ , y se grafica como se observó anteriormente, en el apartado 1.4. Sin embargo, puede graficarse en vida  $N$  vs. amplitud de esfuerzos  $S_a$  (forma Basquin) <sup>(7)</sup> <sup>(16)</sup>. Representada por la ecuación:

$$S_a = \frac{E \cdot \Delta \varepsilon_e}{2} = S'_f (2N)^b \quad (9)$$

Donde:

$S_a$  = Amplitud de esfuerzos

$\Delta \varepsilon_e$  = Incremento de deformación unitaria elástica

$S'_f$  = Resistencia de fatiga

$N$  = Número de ciclos a la falla

$2N$  = Número de carga reversible a la falla

$b$  = Exponente negativo de resistencia de fatiga

Esta ecuación es válida sólo para la parte central de la curva S-N, puesto que se considera que existe el límite de fatiga.

Otras ecuaciones han sido desarrolladas para considerar la zona de Bajo-Ciclo y el Punto de rodilla <sup>(15)</sup>.

Hay dos tipos de concentración de esfuerzos en las estructuras que son necesarias calcular para determinar los esfuerzos. Estas son: en las soldaduras y en los cambios geométricos.

Asimismo, este tipo de aproximación puede ser de 3 tipos, de acuerdo con el estudio que se esté realizando. Estas son: la aproximación de esfuerzo nominal, del esfuerzo hot-spot

(método recomendado para hacer predicciones en barcos y otras estructuras) <sup>(20)</sup> y la de aberturas.

### **1.5.3.2 Otros modelos de predicción de daño acumulado**

Estos modelos, aunque son de gran importancia, no son objeto de estudio de este trabajo. Por tal motivo, se mencionarán a continuación estos métodos y un resumen de cada uno de ellos.

**El método de vida finita (curva  $\epsilon - N$ ).** Diseñado para hacer aproximaciones en donde estén presentes grandes cantidades de deformación plástica y relacionadas con material elástico al rededor. La relación fue descrita por Manson y Coffin <sup>(15)</sup>. Existen otras relaciones como la relación de las pendientes universales, la relación modificada de las pendientes universales y la propuesta por Roessle-Fatemi, entre otras <sup>(15)</sup>.

**El método de la energía.** En éste se pensó que el parámetro de energía de daño podía unificar el daño causado por diferentes tipos de carga. Este método puede incluir amplitudes multiaxiales <sup>(15)</sup>.

**El método del daño continuo.** Se basa en el comportamiento mecánico de un medio continuo en deterioro <sup>(15)</sup>.

### **1.5.4. Modelos de crecimiento de la grieta**

Actualmente, estos son modelos grandemente utilizados en el nivel mundial y de gran importancia, al igual que los modelos de daño acumulado. Sin embargo, estos modelos de predicción no son relevantes para esta investigación; aun así, al ser de gran importancia se hará una breve reseña de ellos.

De estos modelos existen 3 tipos distintos. Estos son: de grieta visible, de pequeña grieta y de grieta micro-estructural <sup>(15)</sup>. Cada uno de estos modelos se basa en las sub-fases de fatiga anteriormente descritas.

En este documento se hablará de los modelos de grieta visible, puesto el estudio de las macro-grietas es de vital importancia para la estabilidad de estructuras como los puentes los cuales competen a esta investigación.

La teoría que se utiliza para predecir la propagación de la longitud de la grieta es la **Mecánica de la fractura elástica lineal**. El primer modelo fue introducido por Paris <sup>(11)</sup> <sup>(15)</sup>, ecuación que se representó en el inciso 1.3.5 de este documento.

Posteriormente, se generaron modelos para predecir la región I de la curva, propuesta por Donahue <sup>(15)</sup>, esta ecuación se expresa de esta manera:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot [\Delta K - \Delta K_{th}]^m \quad (10)$$

Donde:

$\frac{da}{dN}$  = Tasa de crecimiento de grieta

$\Delta K$  = Factor de intensidad de esfuerzos relacionada a la energía deformación.

$C, m$  = Constantes del material.

$\Delta K_{th}$  = Factor de Intensidad del umbral esfuerzos.

Forman propuso la expresión para la región III <sup>(15)</sup>:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \frac{[\Delta K]^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (11)$$

Donde:

$K_c$  = La rigidez de fractura.

$R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$  = Cociente de Intensidad de esfuerzo mínimo sobre máximo

Elber contribuyó a determinar el factor de intensidad de esfuerzo efectivo  $\Delta K_{eff}$ , el cual es el nivel de esfuerzo que existe en la grieta producida por la fatiga, dependiendo de la geometría de la grieta <sup>(5)</sup> (15). Sin embargo, se crearon otros modelos para definir el esfuerzo, sin necesidad de usar el  $\Delta K_{eff}$  <sup>(15)</sup>.

## **1.6 Aplicación de los conceptos fundamentales a esta investigación.**

Antes de entrar al CAPÍTULO 2 de este documento, es importante hacer una breve reseña de los conceptos más relevante del CAPÍTULO 1: FATIGA EN LOS MATERIALES Y EN LAS ESTRUCTURAS, que serán utilizados de manera usual en los capítulos posteriores.

Primero, la fatiga es el fenómeno que cambia de manera progresiva las propiedades de un material, debilitando internamente su composición micro estructural, llevándolo desde una fase de iniciación, pasando por un periodo de incubación de grietas (nucleación) y, posteriormente, el desarrollo de grietas a gran escala, hasta la falla.

Así mismo, ya que esta investigación está basada en las características de las curva S-N, es importante conocer el concepto de rango de esfuerzos, de fatiga a bajos-ciclos, de fatiga a altos-ciclos y el límite de fatiga.

El rango de esfuerzos es el cambio de esfuerzo debido a la carga y descarga de un espécimen o estructura. Este concepto es fundamental para la obtención de la curva S-N y para



las predicciones de falla por fatiga de cualquier estructura. Este concepto será utilizado tanto en la concepción de esta investigación como en su aplicación.

Adicionalmente, la fatiga en bajos-ciclos es la falla de un elemento en pocos ciclos, debido a un rango de esfuerzos muy amplio. Mientras que la fatiga a altos-ciclos es aquella que se considera como una falla elástica, puesto que la variación de esfuerzos no llega a exceder el límite elástico del material.

Además, el concepto de límite de fatiga, que es aquel rango de esfuerzos en el que la falla no se presenta, es de vital importancia para el desarrollo de esta investigación, ya que está basada en la determinación de las curvas S-N propuestas por organismos como el AASHTO.

Por otro lado, como un resumen, los modelos de predicción de daño acumulado no habrían sido posibles sin la Regla de Miner-Palmgren, cuya relación lineal de daño se mencionará en el siguiente capítulo.

Asimismo, los conceptos de amplitud constante (CA-Amplitud) y amplitud variable (VA-Amplitud) se utilizarán de manera frecuente en esta investigación, ya que en ella intervienen ambos tipos de regímenes.

Por último, será de gran relevancia el concepto de factor de concentración de esfuerzos y el principio de similaridad para la aplicabilidad de esta propuesta.

## **CAPÍTULO 2: MÉTODOS DE PREDICCIÓN DEL DAÑO ACUMULADO, PARA LA EVALUACIÓN DE LA FATIGA EN LOS PUENTES DE ACERO.**

### **2.1 Descripción de los métodos de predicción del daño acumulado.**

Como se describió en el capítulo anterior, los modelos de predicción del daño acumulado fueron posibles mediante la concepción de la Regla de Miner-Pálmgren. Estos modelos permiten predecir una posible falla, de acuerdo con ciertas cantidades de repeticiones de carga.

Al igual que existen diversos modelos para predecir la vida por fatiga (regímenes como S-N,  $\epsilon$ -N, etc.), de igual manera existen distintos tipos de métodos utilizados para evaluar la fatiga en los puentes de acero.

Generalmente, estos métodos se encuentran dentro de los modelos de predicción del daño acumulado, dentro del régimen Rango de esfuerzos – número de ciclos (Curva S-N). Son éstos de gran importancia para determinar las posibles fallas de un puente en un determinado periodo.

Para la evaluación del rango de esfuerzos actuantes en el puente, dichos métodos plantean modelos de carga viva en función de las características de tráfico, el peso y las dimensiones de los vehículos. Mientras que para determinar la vida remanente plantean ecuaciones en función de la cantidad de tráfico por año, a las que están sujetas dichas estructuras.

Estos métodos se aplican en países como los Estados Unidos, el Reino Unido, los países pertenecientes a la Unión Europea, Japón, etc., que han sufrido pérdidas económicas y humanas debido a este tipo de fallas.

Si bien, estos métodos tienen sus fortalezas y cumplen su cometido, también tienen ciertas debilidades. Para corregir estas debilidades, algunos investigadores han planteado modificaciones o ajustes a dichos modelos de predicción.

A continuación se enunciarán algunos de los distintos métodos de evaluación de la fatiga en los puentes y las características primordiales de éstos. Sin embargo, antes de entrar en materia sobre estos modelos de predicción, es pertinente enumerar algunos conceptos fundamentales para entender las bases de estos modelos. Dichos conceptos son **rango de esfuerzo equivalente, camión de fatiga y número de ciclos equivalentes**.

## **2.1.1 Los conceptos fundamentales.**

### **2.1.1.1 Rango de esfuerzos equivalentes y número de ciclos equivalentes.**

Al igual que el rango de esfuerzos, el **rango de esfuerzos equivalente** es la cantidad de esfuerzos que varía en carga y descarga, sólo que este rango se debe a la carga viva (camiones), tal que englobe a todos los tipo de vehículos que transitan sobre el puente (**Figura 20**).

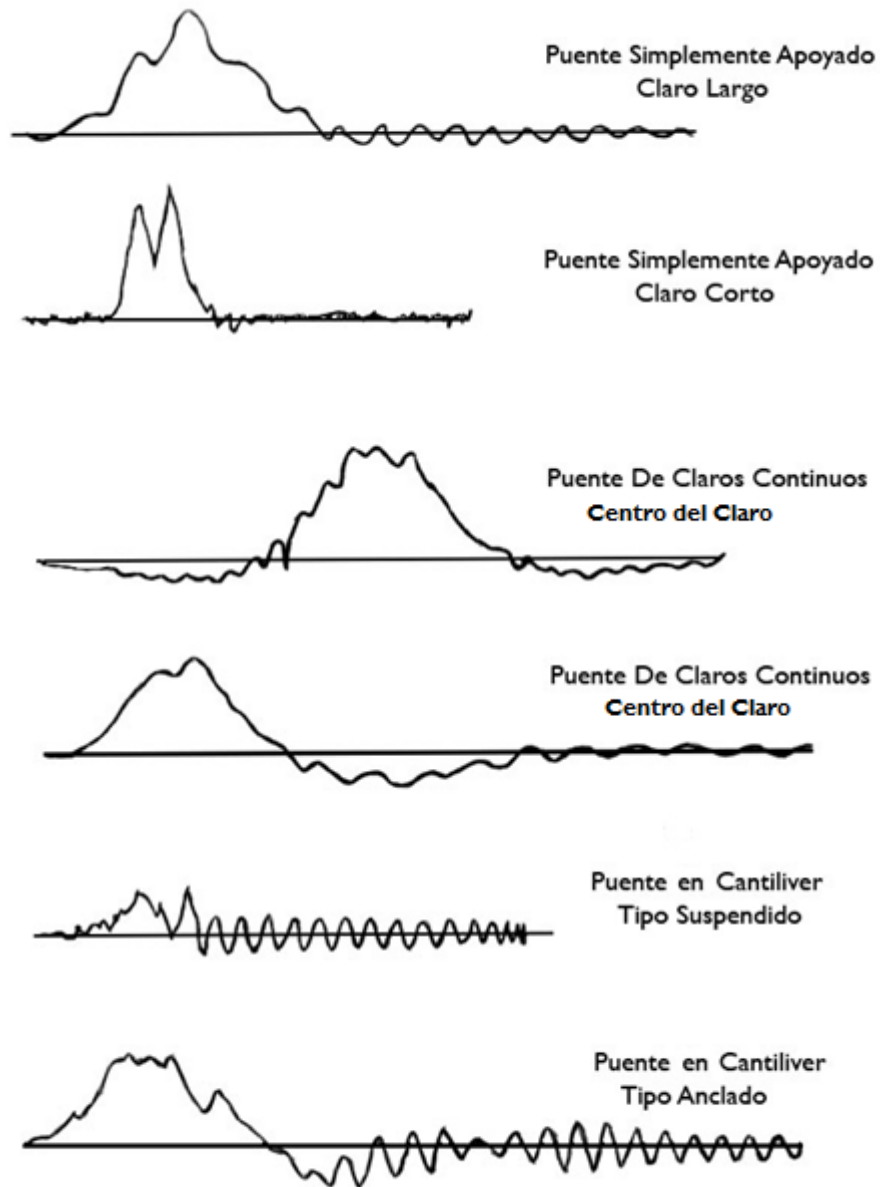


**Figura 20.** Tráfico vehicular en un puente común

Se sabe que el esfuerzo en un puente varía en función de la posición de la carga, y dicha posición varía en función del tiempo, debido a la velocidad de movimiento <sup>(21)</sup>. Además, siendo este un fenómeno dinámico <sup>(21)</sup>, las fuerzas inerciales en el puente continúan apareciendo después de haber terminado de circular la carga viva en el puente. Estas fuerzas inerciales se disipan por medio del amortiguamiento en el sistema estructural.

Con base en lo anterior, es posible obtener la respuesta dinámica del puente (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) y transformar esta respuesta dinámica en fuerzas internas, en función del tiempo (momentos flexionantes, cortantes, torsiones, etc.).

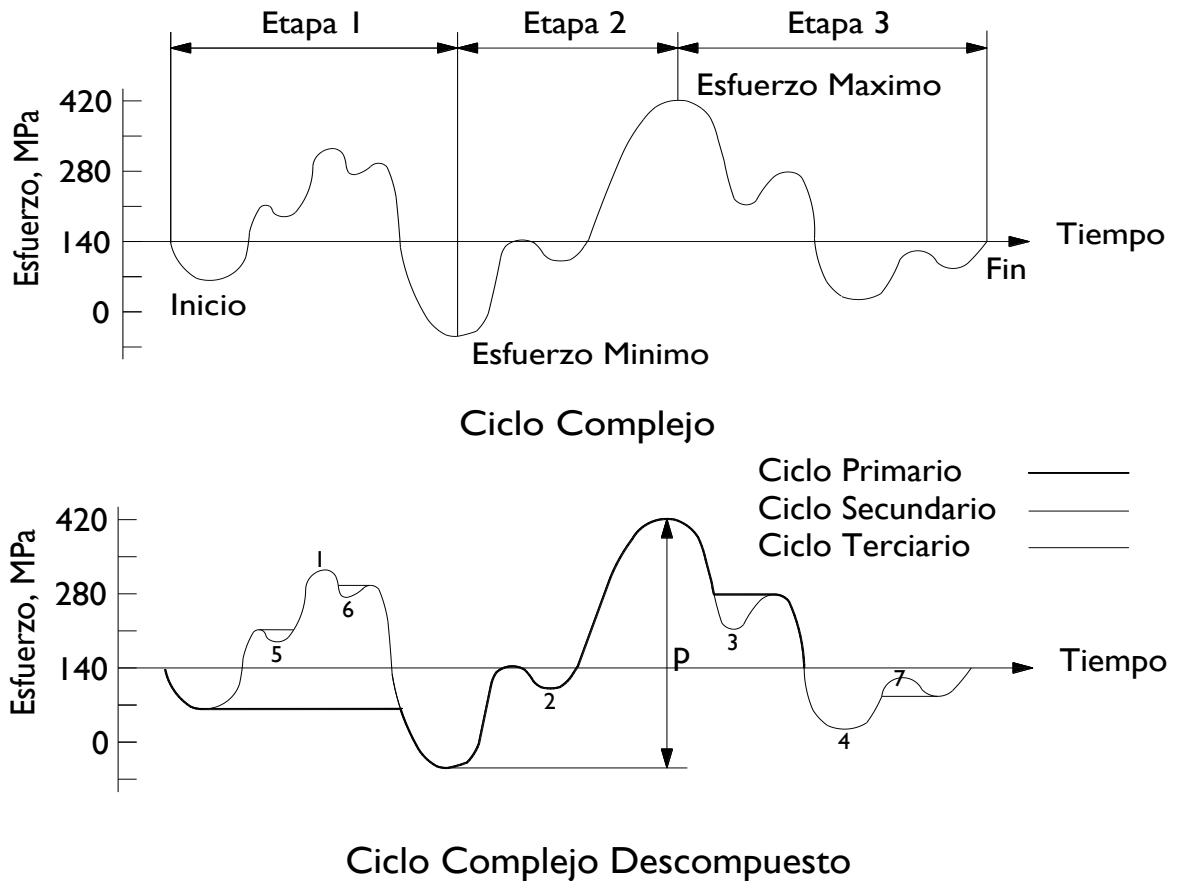
La transformación de esta respuesta dinámica puede considerarse como **espectro de carga (Figura 21)**; el cual, como se enlistó en el capítulo anterior, pertenece al régimen de amplitud variable <sup>(7)</sup>.



**Figura 21.** Espectro de amplitud variable de un puente con diferentes condiciones de apoyo.

Al pertenecer este espectro al régimen de amplitud variable, se dificulta su tratamiento para la evaluación de la fatiga. Sin embargo, haciendo uso de la regla de Miner se puede transformar este espectro del régimen de VA-Amplitud al régimen de CA-Amplitud <sup>(22)</sup>.

De modo que el rango de esfuerzos equivalentes es, en otras palabras, la variación de carga y descarga, obtenida mediante la transformación de un espectro de amplitud variable a un espectro de amplitud constante (**Figura 22**) y éste debe ser tal que se cause la misma cantidad de daño por la carga que transite.



**Figura 22.** Descomposición de un espectro de amplitud variable a espectro de amplitud constante

Ahora bien, si este espectro de amplitud variable tiene sub-ciclos (debidos a la continuidad de claros, fuerzas inerciales, etcétera); dichos sub-ciclos, considerados como ciclos de orden superior <sup>(23)</sup>, también causarían un daño en las propiedades micro-estructurales del material, provocando fatiga.

Con la necesidad de cuantificar ese daño adicional se creó el concepto de número de ciclos equivalentes <sup>(23)</sup> y éste se aplica a cada camión que transite sobre la súper-estructura del puente.

Este concepto basado de igual modo en la regla de Miner es similar al método de Rainflow Count <sup>(23)</sup>. El concepto de ciclos equivalentes sirve para expresar la cantidad de ciclos de orden superior, en función del ciclo primario que existe en un espectro de VA-Amplitud. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$N_e = 1 + \left(\frac{S_{r1}}{S_{rp}}\right)^B + \left(\frac{S_{r2}}{S_{rp}}\right)^B + \dots + \left(\frac{S_{rn}}{S_{rp}}\right)^B \quad (12)$$

Donde:

$N_e$  = Número de ciclos equivalentes

$S_{rp}$  = Rango de esfuerzos primarios

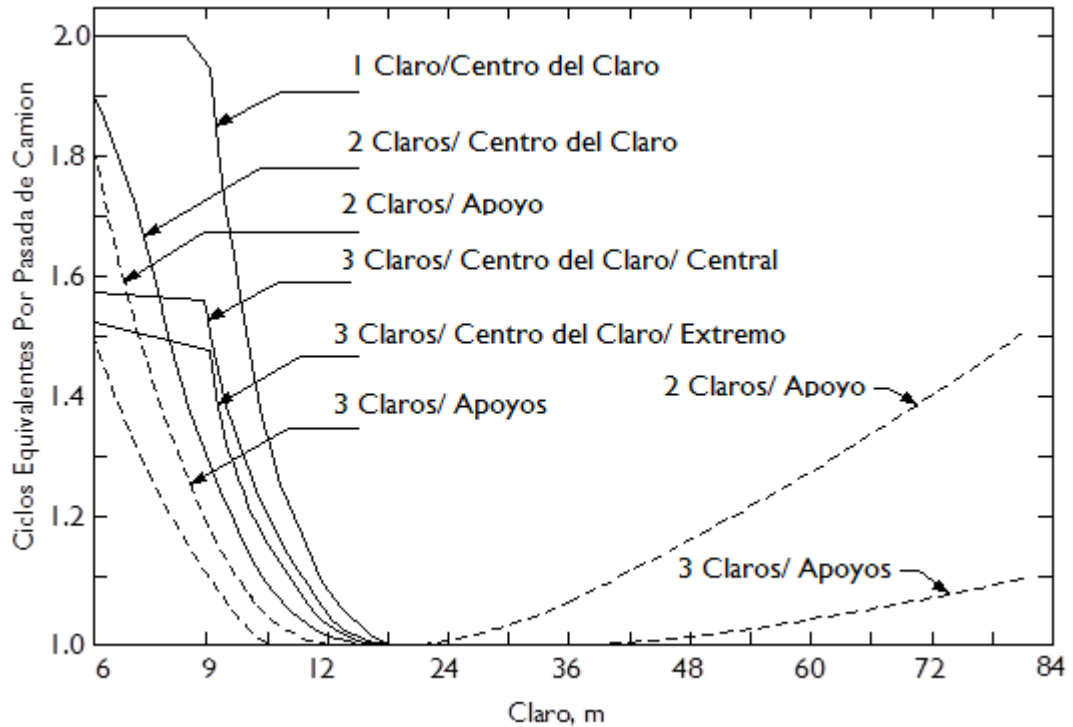
$S_{r1}$  = Primer rango de esfuerzos de orden superior

$S_{r2}$  = Segundo rango de esfuerzos de orden superior

$S_{rn}$  = Enésimo rango de esfuerzos de orden superior

$B$  = Pendiente de la curva S-N

De lo anterior se pueden deducir graficas (**Figura 23**), en función del claro del puente, de la condición de apoyo y del tipo de puente que se desee evaluar.



**Figura 23.** Gráfica de número de ciclos equivalentes para el camión propuesto por Schilling.

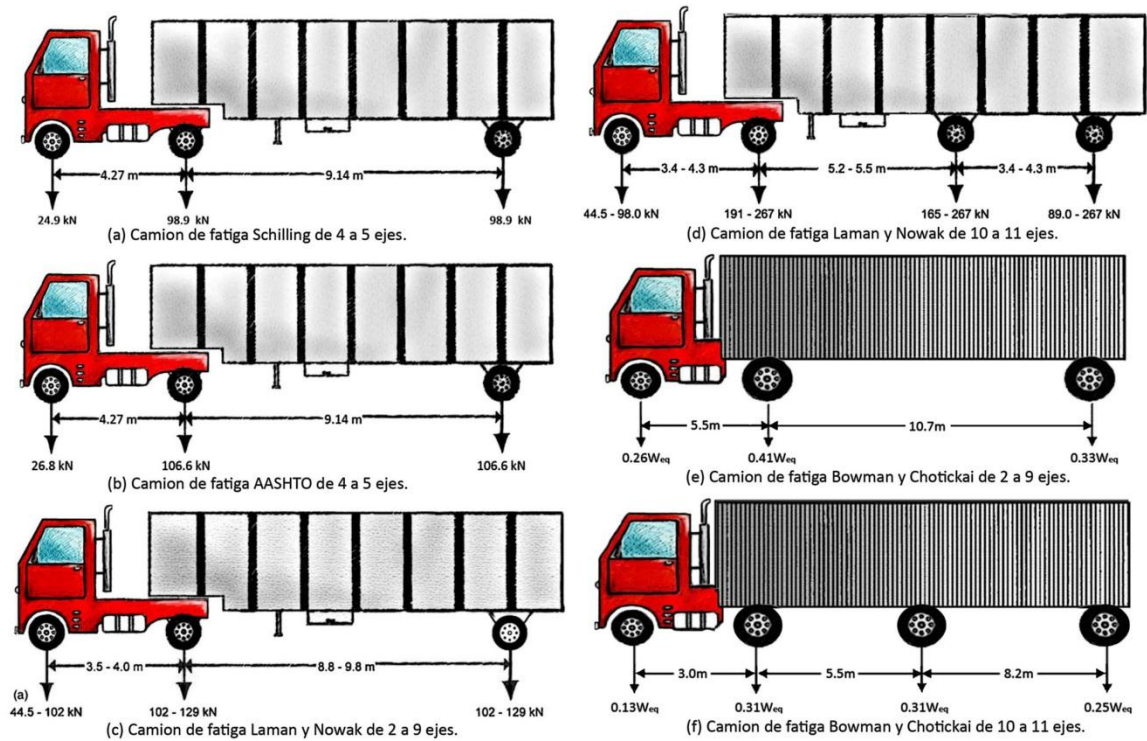
### 2.1.1.2 El camión de fatiga.

Al igual que existe un camión característico de diseño para los puentes, existe un camión característico para la evaluación y el diseño a fatiga. La utilidad de este camión es el de obtener el rango de esfuerzos equivalente que actúa sobre un detalle de conexión en un puente para con el determinar una cantidad determinada de repeticiones de vehículos hasta la falla del elemento a evaluar.

Ya que se está evaluando la fatiga en el puente, es importante decir que este camión no representa la carga viva máxima (camión de diseño) a la cual la estructura estará sometida, sino que representa a un camión con un peso equivalente al tráfico del lugar en el que se encuentra la estructura. <sup>(22)</sup>



Este peso equivalente se obtiene mediante estudios WIM (Weigh-in-Motion: Estudio en el cual se coloca una banda sobre la superficie de rodamiento para obtener la carga por eje de los vehículos) en los puentes reales, para determinar el peso del tráfico real que transita sobre el puente y en la aplicación de las ecuaciones basadas en la regla de Miner (22).



**Figura 24.** Camiones de fatiga propuestos por diversos autores en los Estados Unidos.

En los siguientes apartados se citará una pequeña descripción de algunos de los métodos utilizados en la evaluación de la fatiga. Dichos métodos se encuentran listados en las reglamentaciones y especificaciones de cada país.

## 2.1.2 Descripción del método “European Convention for Constructional Steelwork” (ECCS).

Este método, utilizado en Europa, está basado en el concepto de *rango efectivo de esfuerzos*. El ECCS <sup>(24)</sup> permite realizar un diseño completo del miembro, utilizando las curvas S-N para cada una de las 14 categorías de detalle de unión, donde cada categoría distinta de detalle muestra la susceptibilidad que tiene a presentar problemas de fatiga o resistencia a la fatiga.

El concepto de camión de fatiga se utiliza para obtener los rangos de esfuerzos en puentes carreteros, en este procedimiento.

Las curvas S-N, utilizadas para la revisión de la fatiga de cada una de las categorías, muestran una pendiente de 3 (**Figura 25**). Así mismo, se puede observar un cambio de pendiente a 5 en 5 millones de ciclos, con lo cual se puede concluir que para cada categoría de detalle la pérdida de resistencia a fatiga ocurre en la misma cantidad de ciclos, lo cual es poco probable. Alternativamente, es posible usar una pendiente de 3 en vez de 5, para hacer un análisis conservador.

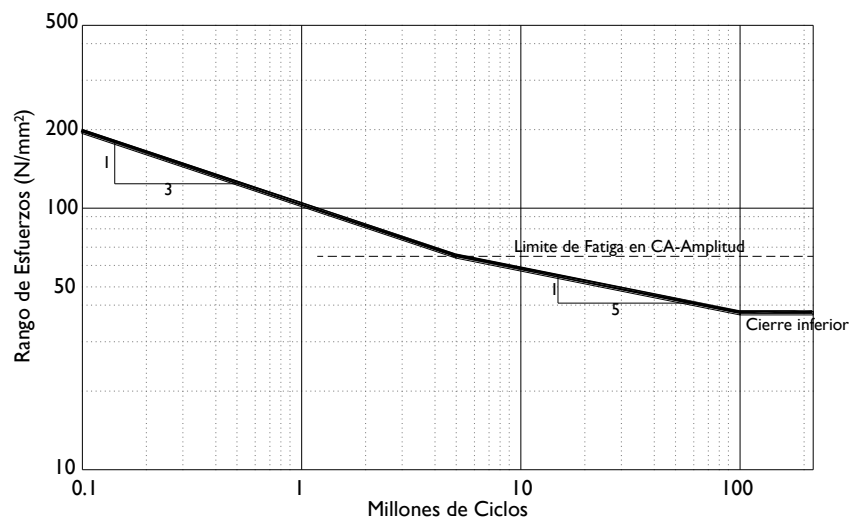


Figura 25. Curva S-N típica en el método ECCS

El límite de fatiga para una amplitud constante está representado con líneas punteadas (interrumpidas) como se muestra en la **Figura 25**. Para este método se considera que si el rango de esfuerzos del espectro de amplitud variable, en cualquiera de sus ciclos, es menor que ese límite, la vida por daño de fatiga es infinita. Mientras que la línea sólida horizontal (cierre inferior) muestra el rango de esfuerzos, a partir del cual pueden ser ignorados.

Otro de los aspectos importantes es que, para miembros soldados, el ECCS considera los ciclos en compresión, como si fuesen tensión, debido a los esfuerzos residuales.

### **2.1.3 Descripción del método “Código de práctica para fatiga” (British)**

Conocido como el código británico <sup>(25)</sup>, que se aplica tanto en los puentes carreteros como en los ferroviarios. En este código existen 3 procedimientos distintos para la evaluación de los puentes, los cuales se basan en curvas S-N, para las distintas categorías de detalle.

El método más usado de los 3 propuestos en este código usa camiones típicos de fatiga, para representar el tráfico real del puente y considera que cada camión que pase es un ciclo.

Con estos camiones se calcula el rango de esfuerzos efectivo, que debe estar por debajo del esfuerzo permisible, a 120 años. Los otros dos métodos restantes son mucho más complejos y permiten calcular el daño por fatiga causado por cada camión que pasa.

La clasificación en categorías de detalle es similar a la ECCS. Sin embargo, en el código británico, el límite de fatiga para cada categoría se toma como el rango de esfuerzo a 10 millones; el mismo punto en el cual cada curva S-N sufre un cambio de pendiente a 5.

En este método no existe un punto en el cual se desprecien los efectos de ciertos rangos, como en el caso del ECCS. Así mismo, los miembros soldados en compresión, se tratan como si estuvieran en tensión.

#### **2.1.4 Descripción del método de la “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO 2008)**

Este método cuenta con dos tipos de evaluación <sup>(26)</sup>, la evaluación de **distorsión que induce daño de fatiga** y la evaluación de **carga que induce daño de fatiga**.

La distorsión que induce daño de fatiga es aquella que ocurre a bajos-ciclos <sup>(26)</sup>. Es decir, poca cantidad de ciclos se requiere para ocasionar una grieta en el detalle. Este fenómeno se debe a la poca rigidez de los elementos contra los problemas de carga.

La carga que induce daño de fatiga es el método propuesto por Moses, Schilling y Raju <sup>(22)</sup> con algunas pequeñas modificaciones. Este mismo método se basa en las curvas S-N propuestas por Fisher y Keating <sup>(27)</sup>.

Estas curvas se encuentran en el código AASHTO LRFD <sup>(28)</sup> y están subdivididas en 7 categorías de detalle (a diferencia de las 14 en ECCS y el código británico).

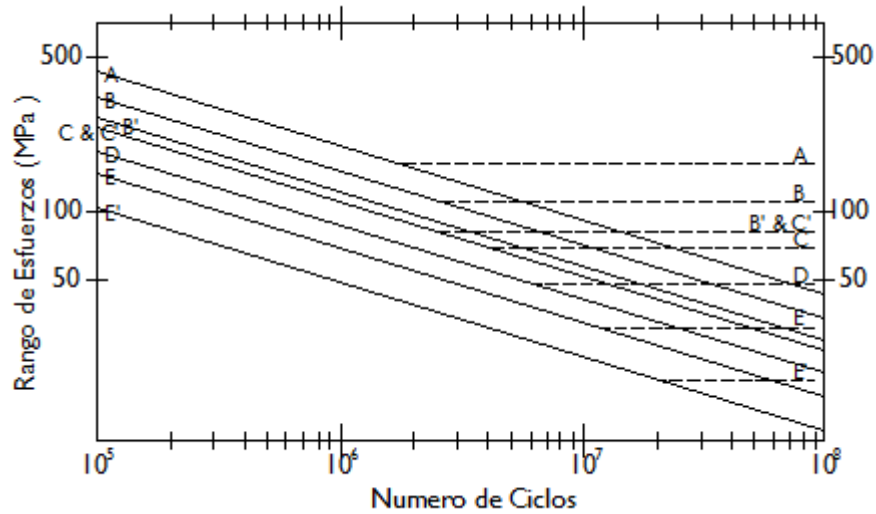


Figura 26. Curvas S-N desarrolladas por Fisher y Keating

Las categorías de diseño tienen pendiente de 3 (**Figura 26**). Sin embargo, éstas no cuentan con un cambio de pendiente y su límite de fatiga para amplitud constante no se presenta en el mismo número de ciclos para diversas categorías, como en el método ECCS y el método británico, con la finalidad de obtener un comportamiento más apegado a la variación de resistencia de la categoría de detalle.

Para obtener el rango de esfuerzos efectivos es posible usar estudios de WIM en la zona para la determinación del camión de fatiga; así también, es posible usar el camión de fatiga, que está representado por el 75 por ciento del camión actual de diseño de la normativa AASHTO LRFD <sup>(29)</sup> y, por último, la opción de obtener los rangos de acuerdo con los campos de mediciones (strain gages).

Los efectos de impacto deben establecerse de acuerdo con los lineamientos en el AASHTO LRFD <sup>(29)</sup>, siendo éste un 15 por ciento del valor de la carga viva.

Adicionalmente, este método considera las mismas revisiones para vida infinita, del método propuesto por Moses et al. <sup>(22)</sup> (Esfuerzos de compresión por carga muerta y límite de fatiga).

La aplicación de una tasa de crecimiento del tráfico vehicular es opcional y de igual manera se permite realizar aforos en el puente para obtener su cantidad actual de vehículos o utilizar los valores establecidos en el AASHTO LRFD <sup>(29)</sup>.

Los factores de aproximación están en función del tipo de análisis que se utilice para determinar los rangos de esfuerzos y de tipo de vida restante que se desea calcular. Estos tipos de análisis están de acuerdo con la sección correspondiente en el AASHTO LRFD <sup>(30)</sup>.

Además, se consideran 3 distintas vidas restantes de fatiga, las cuales son: **la vida media, la vida mínima y el valor de evaluación**. Esto se debe a la dispersión que existe en los problemas relacionados con la fatiga <sup>(6)</sup> <sup>(26)</sup>.

Para miembros remachados debe considerarse la evaluación como si el área neta fuese de categoría C en vez de D, esto da una vida menor.

A continuación se presenta un diagrama de flujo (**Figura 27**) del método AASHTO, para la evaluación de la fatiga en los puentes de acero

Siendo la evaluación de la **carga que induce la fatiga** de mayor interés para esta investigación, es de vital importancia analizar la aproximación desarrollada por Moses et al <sup>(22)</sup> con el fin de identificar cuáles son las variables críticas que deben ser adaptadas a las condiciones de México.

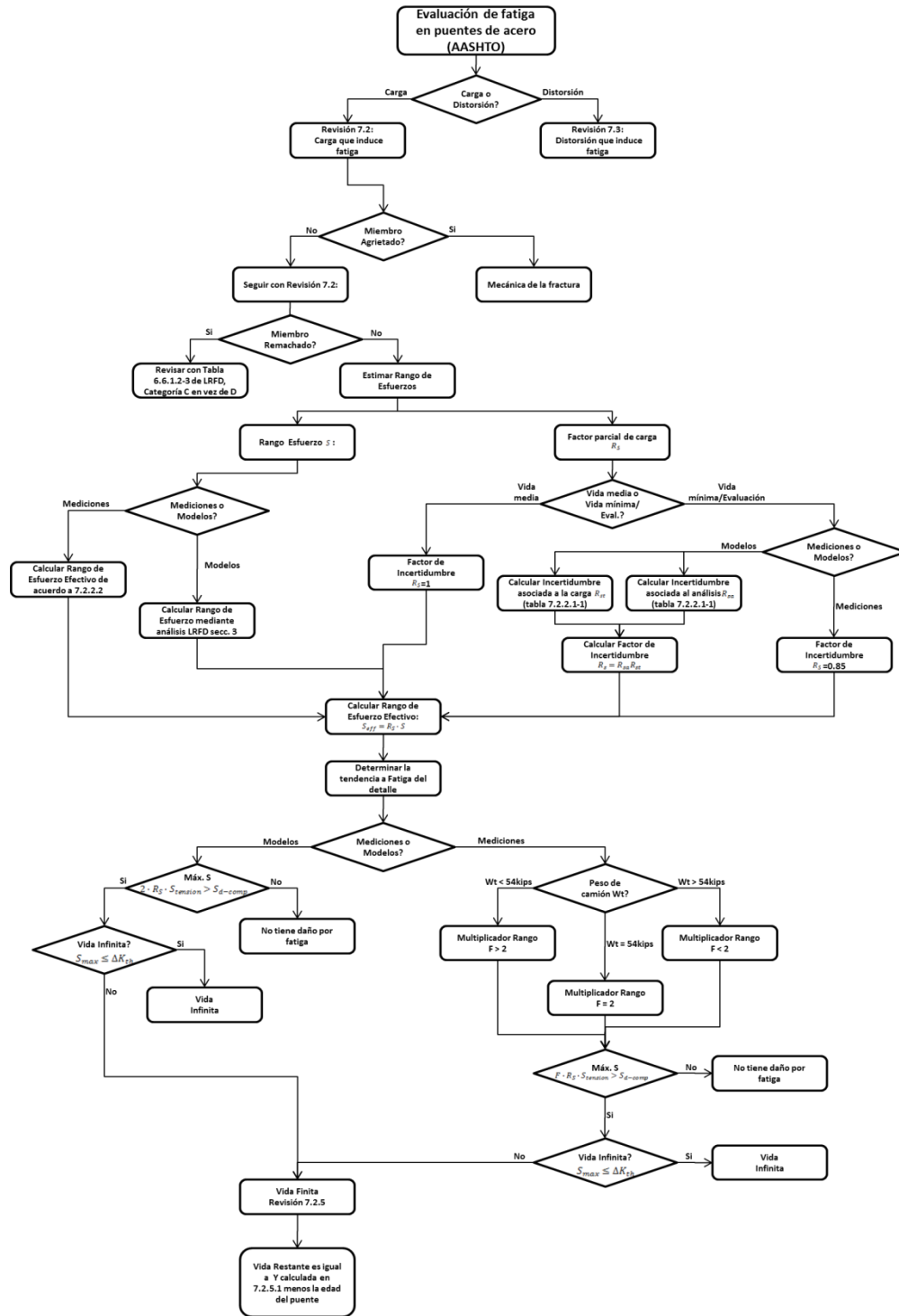


Figura 27. Diagrama de flujo de los pasos para la evaluación de la fatiga por el método del AASHTO

## **2.2 Revisión del método de evaluación: “Carga que induce daño por fatiga” del AASHTO y otras investigaciones relacionadas.**

Como se mencionó en el apartado 2.1.5, este método se basa en el reporte técnico 299 <sup>(22)</sup> del “National Cooperative Highway Research Program”, que contiene la investigación realizada por Moses, F., Schilling, C. G. y Raju, K. S.

Dicho reporte, presentado en 1987, planteaba una serie de procedimientos para la evaluación y el diseño a fatiga de una manera racional, de acuerdo con el estado actual del conocimiento de aquella época en el área de la fatiga.

Conjuntamente, esta propuesta planteó un método para la calibración de los modelos matemáticos utilizados para el diseño y la evaluación de la fatiga.

Otro dato importante es que el método en cuestión no toma en consideración los efectos debidos a la flexión secundaria, los miembros agrietados, la corrosión y el daño mecánico de los elementos estructurales en evaluación.

Este método de diseño y evaluación fue adoptado en 1988 por el AASHTO y publicado, respectivamente, en los años de 1989 y 1990. La publicación de estos métodos fue en un par de guías <sup>(31)</sup> <sup>(32)</sup> en las cuales se incluían todos los pasos que debían ser considerados para la evaluación y el diseño de la fatiga.

Ya que esta investigación se enfoca a la evaluación de los puentes, se enunciará únicamente el procedimiento para la evaluación.



Es importante resaltar que este procedimiento de evaluación es muy similar al procedimiento de diseño, con lo que se puede considerar a esta investigación con fines de diseño de puentes nuevos, en el caso de ser necesario.

El procedimiento de evaluación se divide en dos frentes. El primero engloba las variables que determinan el rango de esfuerzos en el puente, tales como las características del camión de fatiga (la distancia entre los ejes, el peso del vehículo), superposición de camiones, los factores de impacto, así como las secciones transversales y la distribución lateral de la carga.

Mientras que el segundo apartado trata de determinar la vida restante, de acuerdo con variables como: la resistencia de las categorías de detalle, la configuración de los ejes del camión para obtener el número de ciclos equivalentes, las características del volumen del tráfico de camiones y las respectivas tasas anuales de crecimiento.

### **2.2.1 Obtención del rango de esfuerzos.**

Como se enfatizó en el apartado 2.1.5 de este documento, existen diversas maneras de obtener el rango de esfuerzos actuante en el puente. Sin embargo, para el caso de esta investigación, cuya finalidad es la de obtener modelos de carga viva para la evaluación de la fatiga (camiones de fatiga), se mencionará lo concerniente a la obtención del camión propuesto en el método de Moses et al. <sup>(22)</sup>

Es importante decir, que para obtener el rango de esfuerzos (o bien momentos, fuerzas axiales, etc.) se debe colocar el camión de fatiga en el centro del carril a consideración, en un punto crítico tal que se obtenga el valor máximo y mínimo algebraico para definir el rango (para

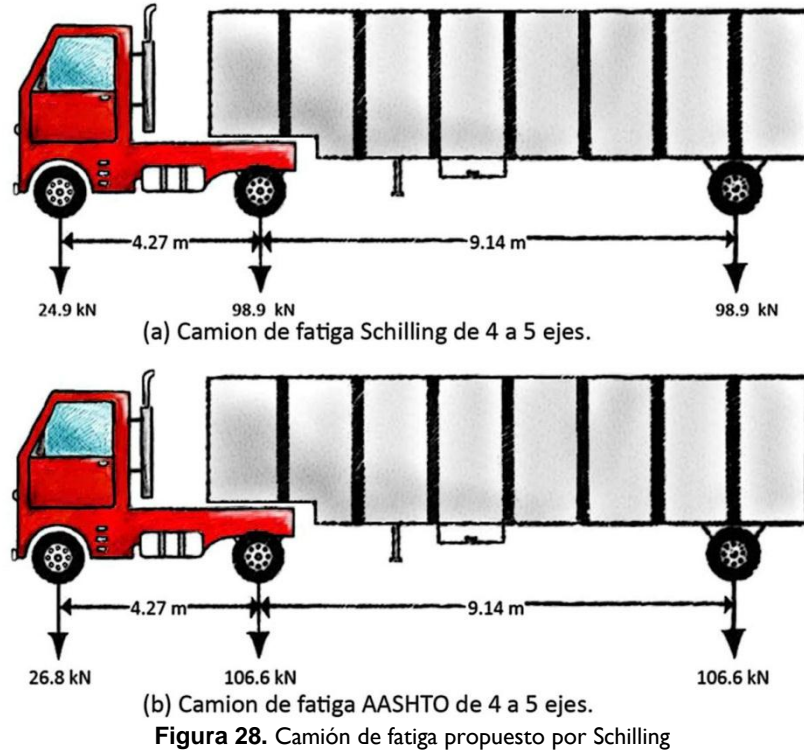
elementos longitudinales); mientras que para los elementos transversales, el camión de fatiga se colocará en cada uno de los diversos carriles y se evaluará el esfuerzo de acuerdo con la frecuencia con la que transiten los vehículos por cada carril.

Adicionalmente al camión de fatiga, se hablará de otras variables como la superposición de camiones, el factor de impacto, entre otros. Estos últimos también son relevantes para la obtención de este rango de esfuerzos.

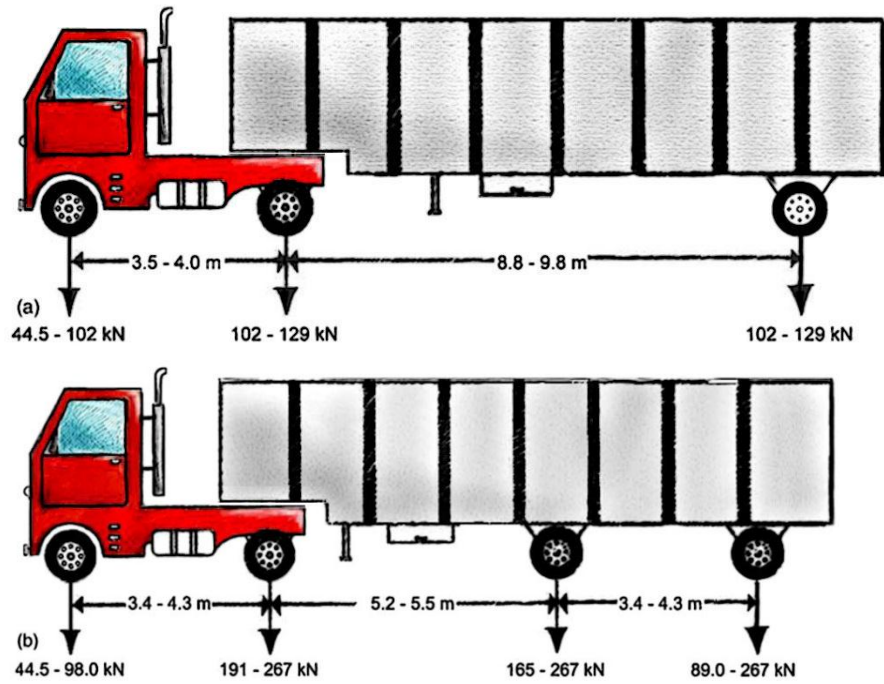
### **2.2.1.1 Camión característico para la fatiga**

Este camión de fatiga fue propuesto por Schilling<sup>(33)</sup>, el cual representaba una variedad de tipos de camiones y sus pesos del tráfico real. Este camión (**Figura 28a**) partía de la premisa de que la mayoría del daño por fatiga efectuado en un puente común se debía al tráfico común de camiones (camiones de 4 a 5 ejes).<sup>(34)</sup>

En años posteriores, en el reporte técnico 299<sup>(22)</sup> se le hizo una modificación al peso equivalente del camión propuesto por Schilling. Este camión se convertiría en el camión base para la evaluación de la fatiga en la normativa AASHTO (**Figura 28b**).

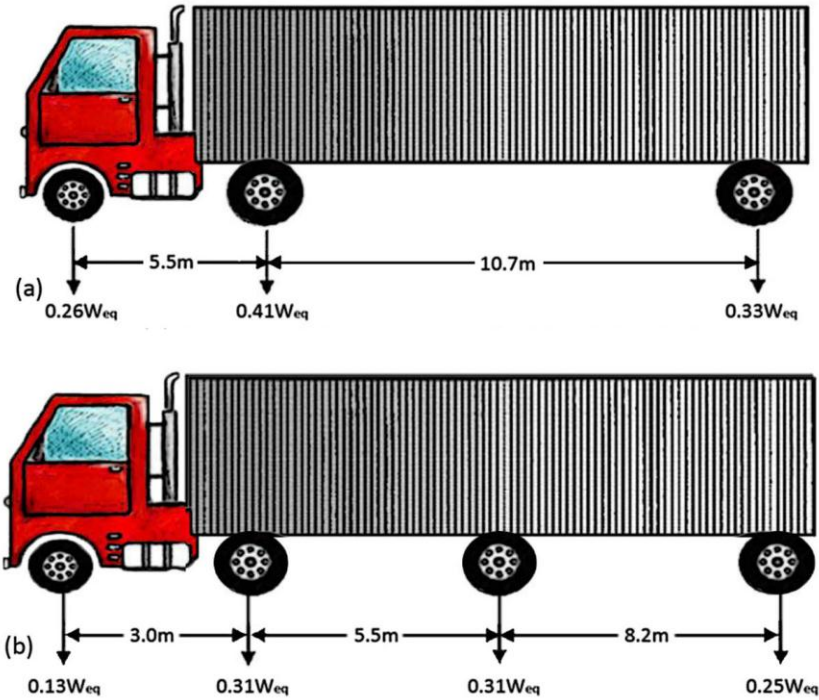


Posteriormente, Laman y Nowak <sup>(35)</sup> desarrollaron una serie de camiones con base en estudios WIM a 5 puentes, en 1996. Utilizando la regla de Miner, encontraron que además del daño producido por los camiones de 2 a 9 ejes, un alto porcentaje del daño por fatiga se debía a los vehículos de 10 y 11 ejes. Por esta razón propusieron dos camiones de fatiga: uno con 3 ejes, para los camiones de 2 a 9 ejes y otro de 4 ejes, que engloba los camiones de 10 a 11 ejes (Figura 29).



**Figura 29.** Camiones de fatiga propuestos por Laman y Nowak; a) Camión que representa vehículos de 2 a 9 ejes; b) Camión que representa de 10 a 11 ejes

Bowman y Chotickai <sup>(36)</sup>, basándose en las ecuaciones obtenidas por Schilling <sup>(22)</sup> e instrumentando 3 puentes (estudios WIM), determinaron dos camiones de fatiga (**Figura 30**). El primero para camiones convencionales y el segundo para camiones de 10 a 11 ejes. Sin embargo, al igual que Schilling, Bowman determinó que la distribución de cargas está en función del peso neto del camión (**Figura 30**).



**Figura 30.** Camiones de fatiga propuestos por Bowman y Chotickai; a) Camión que representa a camiones de 2 a 9 ejes; b) Camión que representa a camiones de 10 a 11 ejes

Cabe resaltar que los camiones propuestos por Laman y Novak, así como los camiones propuestos por Bowman y Chotickai no han sido tomados en cuenta para incluirlos en la reglamentación AASHTO. Sin embargo, Bowman actualmente dirige la investigación <sup>(37)</sup> que pretende servir como actualización a la reglamentación AASHTO.

Para este camión, las variables a considerar es el peso que debe tener, tal que represente el tráfico de la zona de estudio. Además, la distribución del peso por eje y la separación entre los ejes, juegan un papel importante para el ajuste de las acciones mecánicas que provoca el camión.

## El peso del vehículo.

El peso del vehículo característico para la evaluación de la fatiga se obtuvo mediante mediciones en más de 30 sitios, alrededor de los Estados Unidos <sup>(22)</sup>. Dichas mediciones consistían en estudios WIM.

El primer camión obtenido por Schilling tenía un peso neto de 222kN, mientras que el peso del vehículo obtenido en el estudio de 30 sitios indicaría un peso de 240kN. Esto se cree que fue debido a un posible incremento en el peso de los vehículos al paso del tiempo o que la banda del estudio WIM no es visible por los conductores, de tal manera que impactan las ruedas.

El peso efectivo del vehículo parte de la premisa de que el daño causado por el tráfico debido a camiones con diferentes pesos, en un cierto número de pasadas, es igual al daño causado por el mismo número de pasadas, pero por un vehículo con un peso equivalente. De esta manera, basándose en la regla de Miner y la consideración anterior, se formuló la siguiente expresión:

$$W_{eq} = (\sum f_i W_i^3)^{1/3} \quad (13)$$

Donde:

$f_i$  = Frecuencia de camiones con un peso  $W_i$  sobre el puente

$W_i$  = Peso del camión para el intervalo  $i$

Es posible observar con facilidad la raíz cubica, la cual está basada en la regla de Miner, en la cual 3 es la pendiente para cada una de las categorías de detalle.

Es importante resaltar que esta expresión ha sido utilizada por otros investigadores como Laman et al <sup>(35)</sup> y Bowman et al <sup>(36)</sup> para determinar el peso de los camiones característicos en una zona determinada.

Alternativamente, recomienda cuatro opciones para determinar el peso del vehículo a evaluar en la zona a considerar:

- Ajustar de acuerdo con el conocimiento de los pesos de los vehículos en la zona.
- Calcular mediante los datos de estaciones fijas.
- Calcular por medio de estudios WIM en la zona.
- Ajustar mediante un censo del tipo de vehículos en la zona.

### **Configuración de los ejes.**

Para obtener la configuración de los ejes se hizo una comparación de las acciones provocadas por el camión del tráfico real y el camión para la fatiga. Esta comparación se conoce como **“Relación de momentos”** <sup>(22)</sup>, la cual se define mediante la siguiente expresión:

$$Mr = \frac{\bar{I}_{tr}}{I_{cf}} \quad (14)$$

Donde:

$\bar{I}_{tr}$  = Factor de influencia promedio del tráfico real

$I_{cf}$  = Factor de influencia del camión de fatiga

Estos factores de influencia están definidos por la relación del momento máximo, dividido entre el peso del camión.

La relación de los momentos se ve afectada por los siguientes factores: el tipo de puente (continuo o simple), la longitud del claro, la posición a lo largo del claro y, por supuesto, las características del tráfico real.

Esta relación debe aproximarse a la unidad para obtener la configuración ideal de las distancias entre los ejes.

Adicionalmente, para la obtención de los esfuerzos en el puente, se propone una expresión basada en la regla de Miner, que es:

$$S_{eq} = (\sum f_i S_i^3)^{1/3} \quad (15)$$

Donde:

$f_i$  = Frecuencia de camiones con un peso  $W_i$  que producen un rango de esfuerzos  $S_i$

$S_i$  = Rango de esfuerzos producido por el vehículo en el intervalo  $i$

Bowman y Chotickai <sup>(36)</sup> propusieron que esa relación podía expresarse en **rango de momentos**, si dichos momentos son proporcionales al rango de esfuerzos, entonces se tiene:

$$M_{eq} = (\sum f_i M_i^3)^{1/3} \quad (16)$$

Donde:

$f_i$  = Frecuencia de camiones con peso  $W_i$  que producen un rango de momentos  $M_i$

$M_i$  = Rango de momentos producidos por el vehículo con peso  $W_i$  en el intervalo  $i$



De esta manera Bowman y Chotickai obtuvieron su distribución de cargas por eje, así como la separación entre los ejes.

Es importante denotar que la configuración de la distancia entre los ejes es fija <sup>(22) (26) (31) (36)</sup> pues utilizar distancias variables es mucho más conservador, lo cual no es deseable en las evaluaciones por fatiga. Sin embargo, los camiones obtenidos por Laman y Nowak <sup>(35)</sup> utilizan distancias variables (**Figura 29**).

### ***2.2.1.2 La superposición de camiones.***

El rango de esfuerzos equivalente para la evaluación de fatiga se calcula al colocar el camión característico de fatiga en el centro del carril de circulación de los camiones. Sin embargo, de acuerdo con el estudio realizado por Moses et al. <sup>(22)</sup>, los camiones cruzan individualmente en puentes con claros cortos.

La conclusión anterior se basaba en estudios realizados en aquella época, cuando la probabilidad de ocurrencia de vehículos con una separación pequeña entre ellos en combinación con el daño causado por fatiga, mostraba probabilidades muy bajas para condiciones de tráfico normales. De esta manera, la superposición de vehículos no debía ser considerada para efectos de la evaluación de la fatiga.

Ahora bien, si se consideran condiciones extraordinarias de acumulación de vehículos, se debe considerar un 15 por ciento extra para el rango de esfuerzos determinado en el análisis. Esto se basa en que si se supone que el 10 % de la composición vehicular son camiones, entonces el 10% del tiempo evaluado habría camiones coincidiendo en la misma posición, pero

cada uno en su respectivo carril. Si se toma ese incremento de carga como un 80% extra del rango de esfuerzos para el carril en consideración, entonces aplicando la **Ecuación (15)** se obtendría un rango de esfuerzos equivalente de 1.14S que es aproximadamente el 15% del rango de esfuerzos.

### ***2.2.1.3 El factor de impacto.***

Otro factor importante a considerar es el correcto empleo del factor de impacto utilizado en la evaluación de la fatiga. Este factor utilizado para la evaluación trata de ser efectivo, al igual que para los rangos de esfuerzos y no el valor máximo registrado, dado que sería demasiado conservador.

Este factor se cree que depende básicamente de la rugosidad del pavimento en el puente, o bien, del estado de las juntas y no de la frecuencia natural de vibración del puente.

Para la evaluación de la fatiga, este factor debe ser considerado como el 10% extra del rango de esfuerzos equivalentes obtenido. Este dato coincide con estudios realizados por los investigadores <sup>(22)</sup> que encontraron que el valor del esfuerzo oscilaba entre 1.12 a 1.17, en el periodo en el que se hicieron las mediciones.

Este factor pudo haber sido obtenido de la regla de Miner; no obstante, no fue posible dado que los investigadores no contaban con suficiente información.

#### **2.2.1.4 La distribución lateral**

Otro factor que fue considerado en el método elaborado por Moses et al, fue la distribución lateral de la carga producto del camión de fatiga; ya que, como se sabe, la carga se recibe directamente por una losa, que sirve como diafragma rígido para distribuir la carga sobre cada trabe (o elemento estructural del cual este compuesto el puente).

Estos factores fueron de suma importancia; ya que, como se sabe, anteriormente no se contaba con las herramientas matemáticas y de computación que se tienen en la actualidad. Sin embargo, conforme fue cambiando la computadora y se hizo más factible la utilización de software a lo largo de los años, este factor ha perdido su finalidad.

Para la utilización de estos factores había 3 alternativas, donde 2 de ellas se basaban en métodos empíricos (una con base en placas ortotrópicas, la otra basada en estudios con elemento finito), mientras que la tercera consideraba un análisis completo tridimensional, lo cual es bastante factible en la actualidad.

#### **2.2.1.5 Las secciones transversales**

Otro de los aspectos importantes fue la consideración de las secciones transversales para la evaluación de la fatiga, puesto que se sabe que para la obtención de los esfuerzos en elementos sometidos a flexión, se requiere conocer el modulo se sección.

Este método considera que el módulo de sección se considere del centroide al punto donde se iniciará la fractura de la sección, o lo que se conoce como la iniciación de la grieta.

Se sabe que existen algunos aportes a las secciones transversales, como son la rigidización de las trabes debido a la losa, los parapetos y guarniciones y el empotramiento generado en los extremos de los puentes debido a los anclajes, entre otros, en donde cada uno de estos aportes deben ser cuantificados.

Algunas de las consideraciones tomadas para la estimación de estos aportes, se hacía de manera aproximada, al considerar las secciones compuestas conformadas por las losas y las trabes, en las zonas de momentos positivos del puente; mientras que el acero de refuerzo de la losa y las trabes, para las zonas donde preponderantemente actúa el momento negativo.

Si bien, este factor es importante para la evaluación, en la actualidad puede pasarse por alto, debido al gran avance que se tiene en el ramo del análisis estructural por medio de software, donde puede evaluarse el esfuerzo en cualquier punto donde se requiera, mediante el uso de la herramienta del elemento finito.

#### ***2.2.1.6 Los factores de seguridad***

Este método contempla el uso de factores de seguridad, de acuerdo con el tipo de evaluación que se requiera realizar, es decir, este factor depende si se requiere una evaluación media o conservadora.

Este factor se conoce en este método como factor  $\beta$  y depende de las características del puente (puentes redundantes y no redundantes).

Si bien, la vida conservadora de la estructura sometida a fatiga es deseable, la mejor aproximación estaba dada por la vida media en donde el factor  $\beta$  es igual a la unidad.

Una de las características que es importante destacar es que estos factores dependen de la exactitud con que se cuente para obtener el análisis estructural, estimar la carga actuante y el comportamiento del material sometido a fatiga.

### **2.2.2 La vida restante.**

La vida remanente depende básicamente de dos revisiones: la primera es la vida infinita, cuyas variables son el límite de fatiga del material y la compresión cíclica. En esta revisión se determina si la vida de fatiga para la estructura o el detalle en revisión es infinita.

En la segunda revisión, es conocida como “vida finita”, se obtiene la cantidad o el tiempo restante que la estructura será capaz de estar recibiendo ciclos de carga, antes de presentarse la falla, donde se conoce por falla para este tipo de predicciones, de acuerdo con el capítulo anterior, la iniciación de la grieta.

#### **2.2.2.1 La vida infinita.**

##### **El límite de fatiga**

Se considera, en general, para cualquier clase de estructura, como vida infinita por fatiga en el régimen de amplitud variable cuando el espectro de amplitud variable del tráfico real no excede el límite de fatiga para la amplitud constante. Sin embargo, este método también considera que puede determinarse un límite de fatiga para la amplitud variable, que consiste en

dividir el límite de fatiga de amplitud constante entre la relación de picos máximos (peak ratio en inglés).

Esta relación de picos máximos de esfuerzos se obtiene dividiendo el pico máximo del espectro de amplitud variable del tráfico real entre el pico máximo del rango de esfuerzos equivalente, obtenido por la **Ecuación (15)**, donde esto se expresa matemáticamente como:

$$\phi = \frac{S_{max_i}}{S_{max_{eq}}}$$

Donde:

$\phi$  = Relación de picos máximos

$S_{max_i}$  = Pico Máximo de esfuerzos del tráfico real

$S_{max_{eq}}$  = Pico máximo de esfuerzos del rango de esfuerzos equivalente calculado.

De esta manera, se considera infinita la vida, si el pico máximo del rango de esfuerzos equivalente obtenido por la **Ecuación (15)** (o bien del camión de fatiga) es menor que el límite de fatiga para amplitud constante, es decir:

$$S_{eq} < \frac{S_{lim}}{\phi}$$

Donde:

$S_{eq}$  = Rango de esfuerzos equivalentes obtenidos de la **Ecuación (15)**

$S_{lim}$  = Límite de fatiga para la categoría de diseño sujeta a revisión

$\phi$  = Relación de picos máximos.

## **Compresión cíclica**

Los elementos que están sujetos a compresión se tratan como elementos en los cuales no se desarrolla la falla por fatiga para este método. Esto se debe a que se realizaron pruebas en elementos sujetos a compresión; sin embargo, sólo se desarrollaban grietas en las zonas donde existían esfuerzos residuales de tensión, pero al llegar a la zona de esfuerzos residuales de compresión, las grietas dejaban de desarrollarse.

### **2.2.2.2 La vida finita.**

La vida finita se calcula siempre y cuando el rango de esfuerzos no exceda al límite de fatiga para amplitud variable. Este valor depende de varios factores, que son las constantes del material, según las categorías de detalle a evaluar, el tráfico diario promedio anual del sitio y los ciclos equivalentes por pasada del vehículo.

Además de los anteriores, existen factores que pueden involucrarse para hacer aún más preciso el cálculo, en el caso que esto se requiera. Estos factores son: la tasa de crecimiento de los vehículos con su respectivo límite de tráfico de la zona y los valores del tráfico diario promedio anual para la zona; en el pasado y en el presente.

Se abordará un poco de estos factores que intervienen pues son de importancia, pero el más relevante de todos es por supuesto la constante del material, de lo cual se hablará un poco más adelante. No se mencionará en lo subsecuente de los ciclos equivalentes por pasada de camión, ya que previamente se ha descrito en el apartado 2.1.1 de este capítulo.

## **El tránsito diario promedio anual, la tasa de crecimiento y el límite de tráfico.**

Primero se hablará sobre el tráfico diario promedio anual, del cual se sabe que es la cantidad media de vehículos que circulan por una vialidad durante todo el año. Este factor es importante, ya que con él se determinará la cantidad de años en la que el puente podría fallar, debido a una grieta por fatiga

Además, se sabe que una vialidad no está expuesta a la misma cantidad de vehículos a lo largo de su vida útil, sino que esta cantidad se va modificando a lo largo de su vida, lo cual sugiere que es posible calcular una tasa de crecimiento de los vehículos para hacer una estimación más fiable de la evaluación.

Por último, el límite de tráfico es un valor que debe considerarse, ya que se sabe que la capacidad de una vialidad no es infinita, sino que tiene una cantidad límite de vehículos que pueden circular por la zona.

## **Las constantes para cada categoría de detalle.**

El número total de ciclos  $N$  depende, específicamente, del rango de esfuerzos al que esté sometido y de la concentración de los esfuerzos.

Para cuantificar los diferentes valores de concentración de esfuerzo, se clasificaron en diferentes categorías, que se conocen como categorías de detalle (mismas que fueron determinadas por Fisher et al <sup>(27)</sup>).

De esta manera, el rango de momentos medio que un elemento puede aguantar para una cantidad de ciclos está dado por:



$$NS^b = c$$

Donde:

$c$  = Valor de intersección con la curva de categoría de detalle.

$N$  = Numero de ciclos dado para su correspondiente rango de esfuerzos  $S$ .

$S$  = Rango de esfuerzos dado.

$b$  = Pendiente dada para la categoría de detalle.

Sin embargo, dada la cantidad de dispersión que existe en las pruebas de fatiga, la constante resistente del material para la categoría de detalle está basada en un valor dado para un rango de esfuerzo de dos desviaciones estándar, abajo de la media, es decir:

$$NS_{95}^b = A$$

Donde:

$A$  = Valor de intersección para 2 millones de ciclos

$S_{95}$  = Rango de esfuerzos de dos desviaciones estándar abajo de la media

Entonces, entiéndanse **A y b** como la resistencia a la fatiga para la categoría de detalle.

Es importante decir que  $b$  es igual a 3, de acuerdo con las investigaciones realizadas por Fisher et al <sup>(27)</sup>, conforme a las pruebas experimentales realizadas.

## 2.3 Áreas de oportunidad para la adaptación de los métodos de evaluación de la fatiga en México.

En este capítulo se pudo apreciar lo referente a los conceptos fundamentales utilizados en los modelos de predicción para la evaluación de los puentes; así como una breve descripción de algunos de los métodos que existen.

Se realizó una profunda revisión del método propuesto por Moses et al. <sup>(22)</sup>, con la finalidad de entender las variables que intervienen en él.

Dichas variables se agrupan en dos grandes grupos: el grupo del rango de esfuerzos y el grupo de la vida restante.

Desafortunadamente, este método no podrá ser adaptado en su totalidad para las condiciones de México, dado que no se cuenta con todos los estudios necesarios.

Las características del tráfico vehicular (Transito diario promedio anual) que interviene en el grupo de vida restante, pueden obtenerse de los datos viales <sup>(38)</sup> realizados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Sin embargo, aunque se cuenta con los datos viales durante un periodo largo de años, no existe una tendencia de tráfico (Tasa de crecimiento anual) que pudiese servir para hacer una aproximación más fiable. Esta tasa de crecimiento anual podría obtenerse en investigaciones posteriores, analizando los datos contenidos en los datos viales de la SCT.

Dado que la variable **“camión de fatiga”** es de primordial importancia para el desarrollo de este método, la presente investigación se centrará en la forma de obtener las características

de dichos camiones, con base en la ecuación desarrollada por Schilling<sup>(34)</sup> y con los datos de los pesos de vehículos, obtenidos por la SCT y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).<sup>(39)- (47)</sup>

Puesto que el peso neto del vehículo de fatiga depende intrínsecamente de las características de las curvas S-N (**Ecuación 13**), se tomará la pendiente de 3 como válida para esta investigación, lo cual es congruente con las categorías de detalle propuestas por el ECCS, el Código Británico y el AASHTO. Además, dado que no se han realizado pruebas experimentales para cada categoría de detalle en México, se utilizarán las curvas S-N del AASHTO para la determinación de las constantes del material para la vida remanente

Se sabe que el número de ciclos equivalentes, además de depender de la carga externa (camión de fatiga), también depende de las propiedades dinámicas de la estructura (masa, rigidez y amortiguamiento) y de las condiciones de apoyo del puente. Por tal motivo no será posible evaluar esta variable.

Si se realizara un análisis de sensibilidad, sería posible evaluar si la variable de ciclos equivalentes depende en gran manera de las propiedades dinámicas de la estructura. Esto serviría para saber si este factor puede aplicarse indistintamente para cualquier tipo de puente que tenga con las mismas condiciones de apoyo. (Armaduras, traveses, etc.)

La superposición de camiones es un factor que no puede evaluarse, dado que no se tiene un estudio probabilístico que permita definir si un camión pasa individualmente o pasa conjuntamente con otro camión. Sin embargo, se tomarán las consideraciones que se encuentran en el reporte realizado por Moses et al.<sup>(22)</sup>.

El factor de impacto, cuya importancia es significativa para el rango de esfuerzos, no puede determinarse si no se tiene información disponible de los puentes, con la cual se pudiese evaluar

el impacto en el puente, en condiciones normales. Sin embargo, es posible utilizar un modelo matemático de un puente real para comparar las acciones estáticas con las acciones dinámicas, con la finalidad de concluir si realmente el factor de impacto no depende de las propiedades dinámicas de la estructura, sino de la rugosidad de la superficie de rodamiento, como se postuló en el estudio realizado por Moses et al. <sup>(22)</sup>

Ya que se puede elaborar un modelo matemático tridimensional del puente, tratando de incluir cada una de las secciones que existen en él y elaborado con el método del elemento finito, el factor de distribución de carga puede despreciarse, al realizar este tipo de análisis refinado; así como pueden despreciarse las consideraciones de las secciones transversales; puesto que es posible obtener el esfuerzo en cualquier punto del puente con esta clase de análisis.

Los factores como la superposición de camiones y los factores de seguridad pueden obtenerse realizando estudios estadísticos que definan adecuadamente la cantidad de vehículos de carga que circulan del total de la composición vehicular y haciendo estudios probabilísticos de la susceptibilidad a la falla del puente, para los diversos tipos de puentes. Sin embargo, se requiere realizar estudios previos para poder obtenerlos.

En el siguiente capítulo, se definirán los tipos de vehículos que circulan en México, así como las características de peso y dimensiones de los mismos.

### **CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LOS PESOS Y LAS DIMENSIONES DE LOS DIVERSOS TIPOS DE VEHÍCULOS EN MÉXICO.**

Como se describió en el capítulo anterior, las características de los vehículos en una zona son de suma importancia para la determinación del camión característico para la evaluación.

En México, las características de los vehículos están reguladas por diversas normas y manuales de diseño.

Estas normas y manuales enuncian los pesos, las dimensiones e inclusive las velocidades de circulación, así como la clasificación de los vehículos, a la cual están sujetos los vehículos que transitan por el país.

Una de estas normas es la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008<sup>(48)</sup>, que regula los pesos y las dimensiones máximas de los vehículos que circulan sobre las carreteras federales. Sin embargo, estos pesos están en función del tipo de vehículo y de la carretera sobre la cual circulan.

Además de esta norma, existen manuales de diseño para vialidades urbanas<sup>(49)</sup><sup>(50)</sup> en las que se muestra, entre otra información, las dimensiones y los pesos medios de los vehículos. Estas dimensiones están sujetas, de igual modo, para el tipo de vehículo.

Otros documentos importantes para esta investigación son los reportes técnicos de la SCT y del IMT <sup>(39)- (47)</sup>, que aportan datos estadísticos de los diversos vehículos que transitan por las carreteras del país, en diversos puntos encuestados. Estos datos también están en función de la clasificación del tipo de vehículo.

Sin embargo, antes de describir los pesos y las dimensiones de los vehículos que circulan en el país, es de vital importancia que se conozca la clasificación a la que están sujetos.

Una vez conocida esta clasificación, es posible entrar en detalle, en los aspectos característicos de los vehículos, tales como los pesos y las dimensiones, que se encuentran en los manuales y en los reportes técnicos ya mencionados.

### **3.1 Clasificación de los vehículos.**

Como se vio previamente, la Norma Mexicana <sup>(48)</sup> describe los pesos y las dimensiones máximas para los diversos vehículos que transitan sobre las carreteras del país.

La clasificación de estos vehículos se encuentra, de igual manera, en esta norma. Esta clasificación agrupa a los diversos vehículos en función de la cantidad de elementos articulados y los diferencia de una manera más precisa mediante la asignación de dígitos que contabilizan el número de ejes.

De esta manera se tienen 2 tipos de clasificaciones de vehículos; la primera, en la que se agrupan todos los vehículos de características similares en cuanto a su uso y la segunda, que subcategoriza a los vehículos en función de su cantidad de ejes.

La primera clasificación se conoce como “**Clasificación con base en su clase**”, en la que se agrupan los diversos vehículos que circulan en las carreteras de jurisdicción federal, de acuerdo con la cantidad de remolques articulados con los que cuentan y con base en el uso del vehículo. De esta manera, se han formado sub-grupos que se reconocen mediante la asignación de una letra (o letras), que se conocen como nomenclatura. En la **Tabla 1** se muestra la clasificación de los vehículos, con base en su clase y con su respectiva nomenclatura.











**Tabla 1.** Clasificación de vehículos con base en su clase.

<b>Clase</b>	<b>Nomenclatura</b>
Camión unitario	C
Camión remolque	C-R
Tracto-camión articulado	T-S
Tracto-camión doblemente articulado	T-S-R y T-S-S









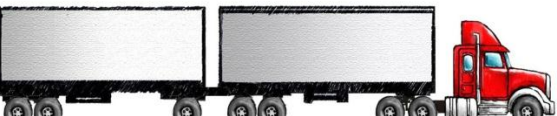


Las categorías A y B, que incluyen a los vehículos particulares y a los camiones de pasajeros, respectivamente, no se mencionó en la clasificación anterior, ya que interesan para esta investigación únicamente los transportes de carga.



Dado que existe una gran diversidad de vehículos que entrarían en la clasificación previa, se decidió, con base en la anterior clasificación, asignar dígitos a las nomenclaturas de cada vehículo, los cuales representarían la cantidad de ejes con que cuenta cada vehículo o remolque. Esta clasificación se conoce como “**Clasificación con base en la nomenclatura y el número de ejes**”, que se presenta en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Clasificación de vehículos con base en la nomenclatura y el número de ejes.

Nomenclatura	Número de ejes	Número de llantas	Configuración de los vehículos
C2	2	6	
C3	3	8-10	
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	



T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4	9	34	
T2-S2-S2	6	22	

T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

De igual modo, se ha omitido las categorías A y B, por la razón ya expuesta. Cabe resaltar que esta lista muestra el tipo de vehículos autorizados para circular en la república mexicana.

Esta última clasificación será de gran utilidad, de ahora en adelante, para esta investigación, debido a que en ella están basados los pesos de los vehículos de los estudios realizados por la IMT y la SCT y las características que se indican en los manuales de las vialidades urbanas.















### 3.2 El peso máximo por eje reglamentado, la carga total del vehículo y la fracción de distribución de la carga por eje.

Habiendo ya clasificado los vehículos de acuerdo con su clase y con la cantidad de ejes con los que cuentan, y dado que es de vital importancia el peso de los vehículos para el cálculo del camión de fatiga, es importante conocer la distribución de carga que existe en cada uno de los ejes de los diferentes vehículos, dado que el daño que causen estará en función de esas cargas móviles.

La norma <sup>(48)</sup> que se ha mencionado previamente regula la carga máxima a la cual debe de estar sometido un eje individual (**Tabla 3**), así como la carga máxima total (**Tabla 4**) con la que los vehículos pueden transitar. Sin embargo, existen muchas combinaciones que se pueden

hacer, ya que la carga individual por eje puede variar según el número de llantas o el tipo de camino en el que se encuentre el camión.

**Tabla 3.** Carga máxima por eje autorizada por la SCT en el año 2008

Configuración de Ejes	Tipo de Camino (kN)			
	ET4 y ET2 A4 y A2	B4 y B2	C	D
  Sencillo dos llantas	63.7	58.8	53.9	49.0
  Sencillo cuatro llantas	98.1	93.2	78.5	68.5
  Motriz sencillo cuatro llantas	107.9	103.0	88.3	78.5
  Motriz doble o tándem seis llantas	147.1	127.5	112.8	107.9
  Doble o tándem ocho llantas	166.7	147.1	132.4	117.7
  Motriz doble o tándem Ocho llantas	176.5	166.7	142.2	132.4
  Triple o tridem doce llantas	230.5	220.7	196.1	NA

NA= No Autorizado

**Tabla 4.** Carga máxima autorizada por la SCT para los vehículos dependiendo del tipo de carretera en el año 2008

Vehículo o configuración vehicular	Núm. ejes	Núm. llantas	Peso bruto vehicular (kN)			
			ET y A	B	C	D
C2	2	6	171.6	161.8	142.2	127.5
C3	3	8	210.8	186.3	166.7	156.9
C3	3	10	240.3	225.6	196.1	181.4
C2-R2	4	14	367.7	348.1	NA	NA
C3-R2	5	18	436.4	411.9	NA	NA
C3-R3	6	22	505.0	465.8	NA	NA
C2-R3	5	18	436.4	402.1	NA	NA
T2-S1	3	10	269.7	255.0	220.6	NA
T2-S2	4	14	338.3	308.9	274.6	NA
T3-S2	5	18	407.0	372.7	328.5	NA
T3-S3	6	22	470.7	446.2	392.3	NA
T2-S3	5	18	402.1	382.5	338.3	NA
T3-S1	4	14	338.3	318.7	274.6	NA
T2-S1-R2	5	18	465.8	441.3	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	534.5	495.2	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	534.5	495.2	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	534.5	505.0	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	593.3	563.9	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	593.3	563.9	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	652.1	647.2	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	617.8	612.9	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	588.4	588.4	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	505.0	456.0	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	568.8	519.8	NA	NA

NA= No Autorizado

Por tal motivo, se decidió utilizar el Manual normativo, Tomo XIV, de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) <sup>(49)</sup> para el cálculo de la distribución de la carga por eje. En este manual se muestra la distribución por eje para los diversos vehículos, para un camino tipo A, tanto para vehículos cargados como para vehículos vacíos (**Tabla 5**). Esta tabla está basada de acuerdo con la normatividad de 1994.

**Tabla 5.** Pesos máximos autorizados para circular en las carreteras nacionales en el año 1994

Clasif.	Tipo	Carga máxima por eje en kN									
		cargados					vacíos				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
C2	Camión de 2 ejes (6 llantas)	* 60.8	* 110.8				* 34.3	* 29.4			
C3	Camión de 3 ejes (10 llantas)	* 58.8	** 196.1				* 39.2	** 44.1			
C4	Camión de 4 ejes (14 llantas)	* 58.8	*** 245.2				* 44.1	*** 78.5			
T2-S1	Tractor de 3 ejes. Semirremolque de 1 eje (10 llantas)	* 57.9	* 105.9	* 105.9			* 31.4	* 33.3	* 33.3		
T2-S2	Tractor de 2 ejes. Semirremolque de 2 ejes (14 llantas)	* 56.9	* 103.0	** 188.3			* 39.2	* 34.3	** 39.2		
T3-S2	Tractor de 3 ejes. Semirremolque de 2 ejes (18 llantas)	* 58.8	** 186.3	** 186.3			* 39.2	** 39.2	** 39.2		
T3-S3	Tractor de 3 ejes. Semirremolque de 3 ejes (22 llantas)	* 56.9	** 186.3	*** 232.4			* 39.2	** 39.2	*** 49.0		
C2-R2	Camión de 2 ejes. Remolque de 2 ejes (14 llantas)	* 55.9	* 104.0	* 104.0	* 104.0		* 34.3	* 29.4	* 19.6	* 19.6	
C3-R2	Camión de 3 ejes. Remolque de 2 ejes (18 llantas)	* 56.9	** 186.3	* 104.0	* 104.0		* 39.2	** 44.1	* 19.6	* 19.6	
C3-R3	Camión de 3 ejes. Remolque de 3 ejes (22 llantas)	* 55.9	** 185.3	* 103.0	** 185.3		* 39.2	** 44.1	* 19.6	** 29.4	
T2-S1-R2	Tractor de 2 ejes. Semirremolque de 1 eje, Remolque 2 ejes (18 llantas)	* 53.9	* 103.0	* 103.0	* 103.0	* 103.0	* 31.4	* 33.3	* 23.5	* 22.6	* 21.6
T2-S2-R2	Tractor de 2 ejes. Semirremolque de 2 ejes, Remolque 2 ejes (20 llantas)	* 53.9	* 103.0	** 188.3	* 103.0	* 103.0	* 31.4	* 34.3	** 39.2	* 22.6	* 21.6
T3-S1-R2	Tractor de 3 ejes. Semirremolque de 1 eje, Remolque 2 ejes (22 llantas)	* 53.9	** 186.3	* 103.0	* 103.0	* 103.0	* 31.4	** 33.3	* 23.5	* 22.6	* 21.6
T3-S2-R2	Tractor de 3 ejes. Semirremolque de 2 ejes, Remolque 2 ejes (26 llantas)	* 53.9	** 173.6	** 173.6	* 96.1	* 96.1	* 39.2	** 39.2	** 34.3	* 22.6	* 21.6
T3-S2-R3	Tractor de 3 ejes. Semirremolque de 2 ejes, Remolque 3 ejes (28 llantas)	* 53.9	** 147.1	** 147.1	* 96.1	** 147.1	* 39.2	** 39.2	** 34.3	* 22.6	** 39.2
T3-S2-R4	Tractor de 3 ejes. Semirremolque de 2 ejes, Remolque 4 ejes (34 llantas)	* 53.9	** 147.1	** 147.1	** 147.1	** 147.1	* 39.2	** 39.2	** 34.3	** 32.4	** 31.4

Es notorio que existe un cambio en la carga máxima permitida para los diversos vehículos, si se compara con la normativa de 2008<sup>(48)</sup>. Sin embargo, esta diferencia oscila entre 1 y el 6% (mas - menos) en la mayoría de los casos; además, esto puede ser despreciable, ya que este

peso será tomado en cuenta únicamente para obtener una fracción de distribución de carga por eje, en función del peso total de cada vehículo.

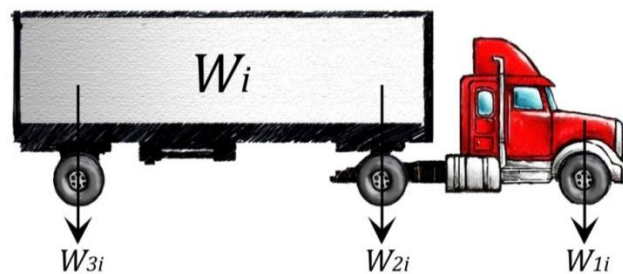
Adicionalmente, la **Tabla 5** muestra una gran ventaja, comparada con la **Tabla 3**, ya que en ésta se muestran los pesos máximos por eje para los vehículos vacíos, caso contrario a la **Tabla 3**.

Con base en lo anterior, se obtendrá lo que en esta investigación se ha denominado como la fracción de distribución de la carga.

### 3.2.1 La fracción de distribución.

La fracción de distribución por eje es de suma importancia para esta investigación. Esto se debe a que se cuenta con una serie de datos <sup>(39)- (47)</sup> que representan el peso total para los diversos vehículos.

Con la necesidad de obtener la carga por eje para cada uno de esos pesos de vehículos que se tiene, se explicará mediante las siguientes expresiones que esta fracción representa el porcentaje de la carga total por eje.



**Figura 31.** Camión con peso total  $W_i$  para obtener fracción de distribución por eje.

Si se tiene un camión con un peso total  $W_i$  (**Figura 31**), por equilibrio de fuerzas se sabe que la sumatoria de las reacciones en cada uno de los ejes debida al peso total  $W_i$  sería igual a  $W_i$ . Esto se expresa de la siguiente manera:

$$\Sigma Fy = 0 = W_{1i} + W_{2i} + \dots + W_{ni} - W_i$$

Donde:

$W_{1i}, W_{2i} + \dots + W_{ni}$  = Reacciones en cada uno de los ejes debidas a la carga del vehículo  $W_i$

$W_i$  = Peso total del vehículo en un intervalo  $i$

Si se divide cada una de las reacciones entre el peso total  $W_i$ , se obtiene la fracción que represente el porcentaje de la carga total  $W_i$  para cada eje. Esto se expresaría de la siguiente manera:

$$\frac{W_{1i}}{W_i} = a_{1i}; \frac{W_{2i}}{W_i} = a_{2i}; \dots; \frac{W_{ni}}{W_i} = a_{ni} \quad (17)$$

Donde:

$a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{ni}$  = Fracciones de distribución para el primero y hasta el enésimo eje.

Si cada una de estas fracciones es un porcentaje de la carga total  $W_i$ , la sumatoria de cada una de las fracciones de distribución para un camión con peso  $W_i$  será igual a la unidad.

$$\Sigma_{m=1}^n a_{mi} = 1 \quad (18)$$

Con los datos de la **Tabla 5** y lo anterior se pudieron deducir las fracciones de distribución para cada uno de los diversos vehículos que circulan en el país (**Tabla 6**).

**Tabla 6.** Fracción de distribución para los diversos vehículos

Clasificación	FRACCIÓN DE DISTRIBUCIÓN POR EJE										Sumatoria		
	cargados					vacíos							
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	cargado	vacíos	
C2	*	*				*	*						
	0.35	0.65				0.54	0.46					1.00	1.00
C3	*	**				*	**						
	0.23	0.77				0.47	0.53					1.00	1.00
C4	*	***				*	***						
	0.19	0.81				0.36	0.64					1.00	1.00
T2-S1	*	*	*			*	*	*					
	0.21	0.39	0.39			0.32	0.34	0.34				1.00	1.00
T2-S2	*	*	**			*	*	**					
	0.16	0.30	0.54			0.35	0.30	0.35				1.00	1.00
T3-S2	*	**	**			*	**	**					
	0.14	0.43	0.43			0.33	0.33	0.33				1.00	1.00
T3-S3	*	**	***			*	**	***					
	0.12	0.39	0.49			0.31	0.31	0.38				1.00	1.00
C2-R2	*	*	*	*		*	*	*	*				
	0.15	0.28	0.28	0.28		0.33	0.29	0.19	0.19			1.00	1.00
C3-R2	*	**	*	*		*	**	*	*				
	0.13	0.41	0.23	0.23		0.32	0.36	0.16	0.16			1.00	1.00
C3-R3	*	**	*	**		*	**	*	**				
	0.11	0.35	0.19	0.35		0.30	0.33	0.15	0.22			1.00	1.00
T2-S1-R2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
	0.12	0.22	0.22	0.22	0.22	0.24	0.25	0.18	0.17	0.16		1.00	1.00
T2-S2-R2	*	*	**	*	*	*	*	**	*	*			
	0.10	0.19	0.34	0.19	0.19	0.21	0.23	0.26	0.15	0.14		1.00	1.00
T3-S1-R2	*	**	*	*	*	*	**	*	*	*			
	0.10	0.34	0.19	0.19	0.19	0.24	0.25	0.18	0.17	0.16		1.00	1.00
T3-S2-R2	*	**	**	*	*	*	**	**	*	*			
	0.09	0.29	0.29	0.16	0.16	0.25	0.25	0.22	0.14	0.14		1.00	1.00
T3-S2-R3	*	**	**	*	**	*	**	**	*	**			
	0.09	0.25	0.25	0.16	0.25	0.22	0.22	0.20	0.13	0.22		1.00	1.00
T3-S2-R4	*	**	**	**	**	*	**	**	**	**			
	0.08	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.19	0.18	0.18		1.00	1.00



### 3.3 Distancia estándar entre los ejes para los diversos vehículos.

Adicionalmente a las cargas por eje y su respectiva fracción de distribución, es importante conocer las distancias entre los ejes que tienen estos vehículos.

En el Manual normativo de la SEDESOL, TOMO IV <sup>(50)</sup>, se pueden encontrar las diversas dimensiones que tienen los vehículos, siendo estas dimensiones convencionales.

En la **Tabla 7** se muestran las distancias entre los ejes, conjuntamente con las distancias totales de los vehículos.

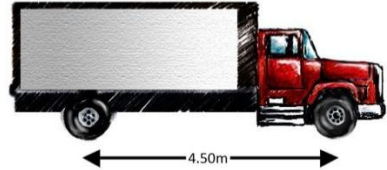
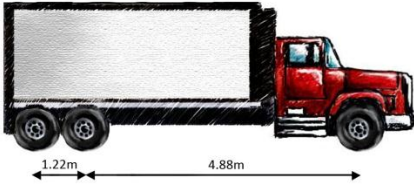
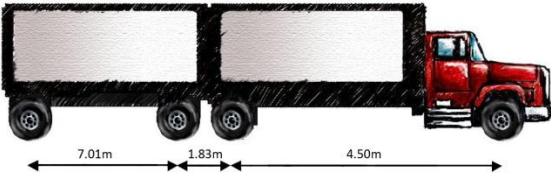
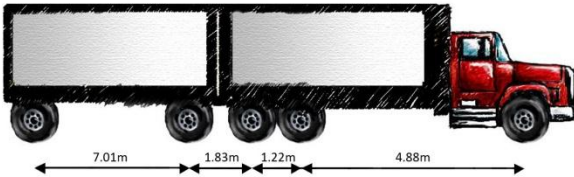
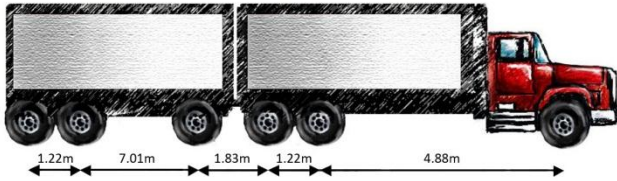
**Tabla 7.** Dimensiones de diferentes clases de vehículos, de acuerdo con el Manual normativo de la SEDESOL

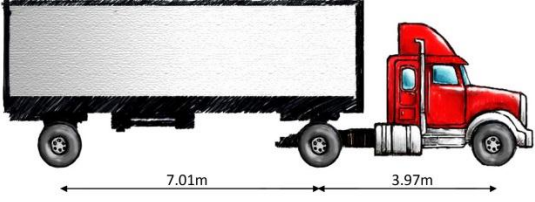
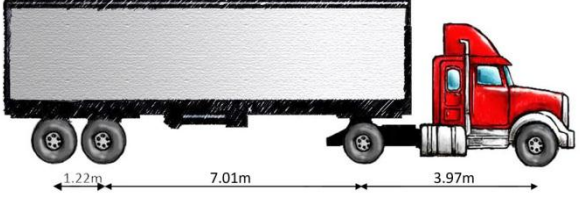
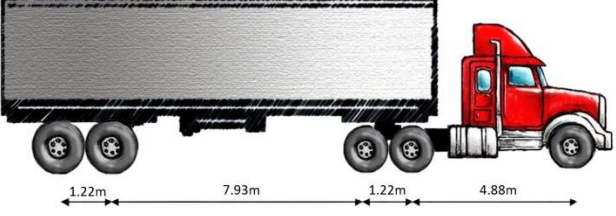
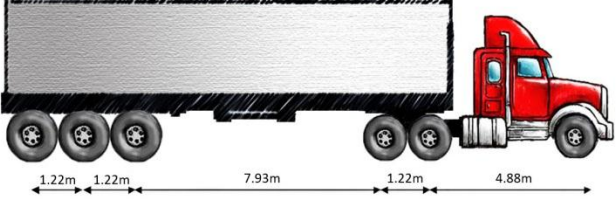
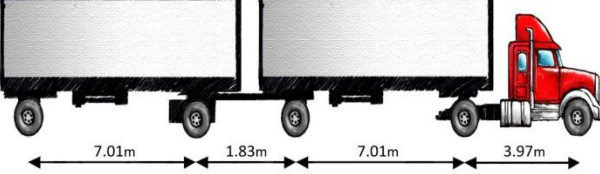
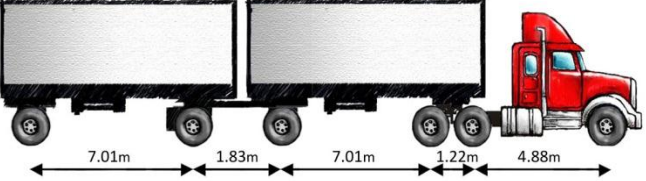
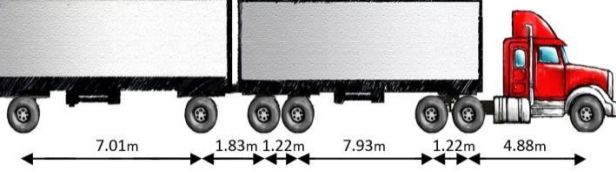
Características		Nom.	Vehículos de Proyecto			
			DE-450	DE-610	DE-1220	DE-1525
Dimensiones	Longitud total del vehículo (cm)	L	730	915	1525	1675
	Distancia entre ejes extremos del vehículo (cm)	DE	450	610	1220	1575
	Distancia entre ejes extremos del tractor (cm)	DET	-	-	397	915
	Distancia entre ejes del semiremolque (cm)	DES	-	-	762	610
	Vuelo delantero (cm)	Vd	100	122	122	92
	Vuelo trasero (cm)	Vt	180	183	183	61
	Distancia entre ejes tándem tractor (cm)	Tt	-	-	-	122
	Distancia entre ejes tándem semiremolque (cm)	Ts	-	-	122	122
	Distancia entre ejes interiores tractor (cm)	Dt	-	-	379	488
	Distancia entre ejes interiores tractor y semiremolque (cm)	Ds	-	-	701	793
	Ancho total del vehículo (cm)	A	244	259	259	259
	Entrevía del vehículo (cm)	EV	244	259	259	259
	Altura del vehículo (cm)	Ht	214-412	214-412	214-412	214-412
	Altura de los ejes del conductor (cm)	Hc	114	114	114	114
	Altura de las faros delanteros (cm)	Hf	61	61	61	61
Altura de los faros traseros (cm)	Ht	61	61	61	61	
Angulo de desviación del haz de luz de los faros (en grados)	$\alpha$	1	1	1	1	
Radio de giro mínimo (cm)	Rg	1040	1281	1220	1372	
Relación Peso/Potencia (kg/HP)	Wc/P	90	120	180	180	
<b>Vehículos representados por el de proyecto</b>			C2	B - C3	T2-S1 T2-S2	T3-S2 OTROS

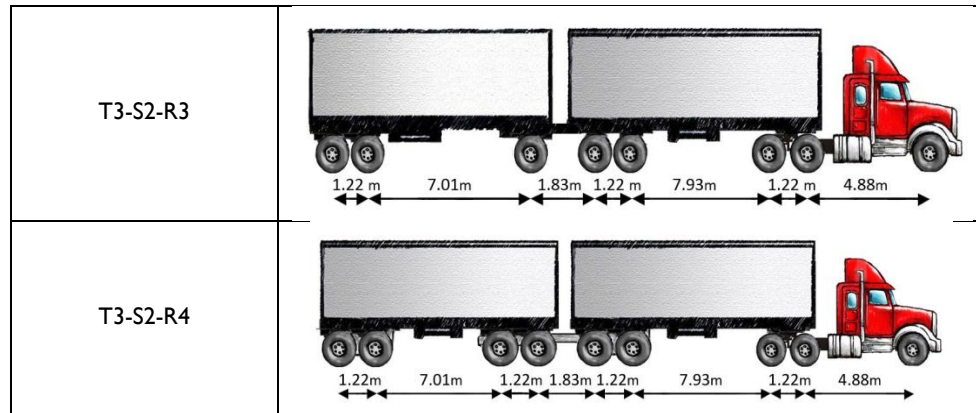
Cabe resaltar que no es prudente utilizar las distancias máximas permitidas que vienen en la Norma Oficial de la SCT <sup>(48)</sup>, dado que esto no sería representativo de lo que se pretende en esta investigación, ya que el objetivo fundamental es la evaluación de la fatiga.

Con base en la **Tabla 7**, se pudieron definir las siguientes medidas estándares para los diversos tipos de camiones, que se presentan en la tabla siguiente (**Tabla 8**) con sus respectivas figuras.

**Tabla 8.** Distancias entre los ejes de los diversos vehículos que circulan en el país

Nomenclatura	Configuración de vehículos
C2	
C3	
C2-R2	
C3-R2	
C3-R3	

T2-S1	 <p>7.01m 3.97m</p>
T2-S2	 <p>1.22m 7.01m 3.97m</p>
T3-S2	 <p>1.22m 7.93m 1.22m 4.88m</p>
T3-S3	 <p>1.22m 1.22m 7.93m 1.22m 4.88m</p>
T2-S1-R2	 <p>7.01m 1.83m 7.01m 3.97m</p>
T3-S1-R2	 <p>7.01m 1.83m 7.01m 1.22m 4.88m</p>
T3-S2-R2	 <p>7.01m 1.83m 1.22m 7.93m 1.22m 4.88m</p>



### 3.4 Descripción del estudio estadístico de campo del autotransporte nacional

Como se ha visto en este capítulo y en el CAPÍTULO 2, para la determinación del peso es necesario conocer el peso de varios vehículos en una zona.

Por existir esta necesidad se emprendió la tarea de buscar información referente a datos estadísticos con los que se pudiera trabajar para realizar este estudio. En esta búsqueda se encontró el **“Estudio estadístico de campo del auto-transporte nacional”**.<sup>(39)- (47)</sup>

En este estudio se presentan datos estadísticos de los diversos vehículos de carga que existen en el país. Este estudio ha sido realizado desde el año 1991, dirigido por investigadores del IMT y de la SCT.

Entre los trabajos de campo realizados en este estudio se seleccionan puntos diversos en el país, para ser encuestados. Una vez seleccionados estos puntos, se instalaron estaciones para las mediciones, que permanecieron activas 24 horas, durante 4 días del año.

En estas estaciones se aplicó un cuestionario a los conductores de los vehículos, para determinar un estudio de origen y destino de los diversos vehículos. Realizada esta encuesta, se procedió a pesar el vehículo.

Cabe resaltar que sólo entre los años 1991 y 1996 se tomaron dimensiones de los vehículos, lo que ha quedado descartado para los últimos estudios. Además, la cantidad de estaciones instaladas ha variado de acuerdo con el año de estudio.

Los trabajos de gabinete consisten en dos etapas. En la primera, se capturan todos los datos que se obtuvieron en las encuestas y en la medición de los pesos de los vehículos, con la finalidad de obtener bases de datos. Mientras que la segunda, consiste en identificar posibles errores en la captura: se analiza la información estadística y se realizan estudios para hacer más eficiente el sistema de transporte.

Para esta investigación, en particular, se decidió utilizar los datos estadísticos que pertenecen al periodo comprendido entre los años 1998 y 2008. Es importante decir que no se han publicado aún los estudios realizados en 2009; por este motivo no se considerarán para esta investigación.

Se utilizó un periodo de aproximadamente 10 años con la finalidad de estudiar un intervalo considerable de tiempo. Además, la utilización de este periodo lleva también la finalidad de omitir datos de camiones que ya no circulan en el país, como es el caso del camión C4 (Camión unitario con 4 ejes). Sin embargo, en los estudios comprendidos entre 1998 y 2000, aún aparece este camión, que ha sido descartado para esta investigación.

A partir de 1991 y hasta 2008, se han encuestado 227 estaciones. Como interesa a esta investigación únicamente el periodo que se comprende entre 1998 y 2008, se tomaron en

cuenta 129 estaciones del total de 227 (de la estación 99 hasta la estación 227). En la siguiente tabla (**Tabla 9**) se presentan las estaciones encuestadas entre los años 1998 y 2008, conjuntamente con la cantidad de vehículos encuestados.

**Tabla 9.** Cantidad de vehículos encuestados en las estaciones, entre 1998 y 2008

No. Estación	Nombre de estación	Carretera	Cantidad de vehículos
99	La antigua	Cardel-Veracruz	9163
100	Coacoyul	Acapulco-Zihuatanejo	4023
101	Puerto Escondido	Pinotepa Nacional-Salina Cruz	2149
102	CECYTEM	Zihuatanejo-La Mira	3233
103	San Pedro	Toluca-Zitácuaro	5244
104	Ojuelos	Ojuelos-Aguascalientes	3317
105	Malpaso	Guadalajara-Zacatecas	4054
106	Poste Rojo	Tapanatepec-Talismán	5520
107	El Rodeo	San Luis Potosí-Zacatecas	8495
108	Hauy Pix	Escárcega-Chetumal	1711
109	La Angostura	Concepción del Oro-Saltillo	11202
110	Tehuiztingo	Puebla-Huajuapán	2224
111	Yautepec	Cuernavaca-Cuautlixco	9171
112	El Jíadhi	La Colonia-Portezuelo	15894
113	Apaseo	Apaseo el Alto-Celaya	19741
114	El Monteón	Tepic-Puerto Vallarta	2963
115	Jalisco	Guadalajara-Tepic	8225
116	Guadalupe Victoria	Durango-Torreón	3336
117	Corralche	Campeche-Mérida	4651
118	Nuevo Laredo	Monterrey-Nuevo Laredo	24100
119	Coyame	Chihuahua-Ojinaga	274
120	Guaymas	Ciudad Obregón-Hermosillo	7584
121	Antigua Caseta	Culiacán-Los Mochis	3955
122	Monterrey	Saltillo-Monterrey	40774
123	Coyame	Chihuahua-Ojinaga	208
124	Fitosanitaria	Janos-Agua Prieta	2375
125	Cereso	Moctezuma-Agua Prieta	1098

126	Entronque Moctezuma	Agua Prieta-Ímuris	3096
127	Lienzo Charro	Sonoíta-Puerto Peñasco	376
128	Sonoita	Santa Ana-Sonoíta	3719
129	Las Adelitas	Sonoíta-Mexicali	4331
130	El Fato	Mexicali-San Felipe	1617
131	Tecate	Mexicali-Tijuana	5209
132	Tijuana	Tecate-Tijuana	2050
133	Plan Libertador	Tijuana-San Miguel	13383
134	Playas de Tijuana	Tijuana-Ensenada	416
135	Ejido Monterrey	Sonoíta-Mexicali	5051
136	El 21	Hermosillo-Nogales	3160
137	Samalayuca	El Sueco-Ciudad Juárez	6066
138	La Muralla	Morelos-Ciudad Acuña	1055
139	Aduana	Monclova-Piedras Negras	3079
140	El Oasis	Monterrey-Nuevo Laredo	20783
141	General Bravo	Monterrey-Reynosa	1636
142	General Bravo	Monterrey-Reynosa	8135
143	Aduana Capote	Matamoros-Reynosa	4204
144	Magdalena	Huajuapán de León-Oaxaca	1720
145	Hutzo	Cuacnopalan-Oaxaca (cuota)	2537
146	23 de Enero A	Arriaga-Huixtla	1106
147	23 de Enero B	Tapanatepec-Talismán	2409
148	Marina	Coatzacoalcos-Salina Cruz	3453
149	Rancho Nuevo	Tuxtla Gutiérrez-Ciudad Cuauhtémoc	1368
150	Cruz del Milagro	Ciudad Alemán-Sayula	9242
151	Apaxtla	Paso del Toro-Acayucan	2491
152	Caseta Sayula	La Tinaja-Cosoleacaque (cuota)	5475
153	Colonia Ejidal	Córdoba-Entronque Boticaria	3542
154	Canal SARH	Córdoba-Veracruz	6270
155	El Pando	Jalapa-Veracruz	6989
156	Campo de Tiro	Poza Rica-Veracruz	10163
157	El Refugio	Portezuelo-Palmillas	15178
158	Singuilucan	Venta de Carpio-TC(Pachuca-Tulancingo)-Huixtla	7645
159	Las Rajas	Naucalpan-Toluca	12719

160	San Mateo	México-Puebla	6422
161	Caseta San Martin	México-Puebla	10143
162	Parotales	Ciudad Altamirano-TC(Zihuatanejo-La Mira)	829
163	Guacamayas	Zihuatanejo-La Mira	741
164	Teloloapan	Iguala-Ciudad Altamirano	1725
165	Amayuca	Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros	3574
166	La Caridad	Las Cruces-Pinotepa Nacional	1587
167	Guadalupe Victoria	Durango-Cuencamé	3593
168	Ciudad Mier	Monterrey-Ciudad Mier	2063
169	Lagos de Moreno	León-Aguascalientes	8111
170	Las Cruces	Oaxaca-Tehuantepec	2279
171	Herradura	Piedras Negras-Nuevo Laredo	10439
172	Santa Rosa	Querétaro-San Luis Potosí	18454
173	Rancho Santa Elena	Coatzacoalcos-Salina Cruz	4667
174	Naval	Ciudad Victoria-Matamoros	2963
175	Tequisquiapan	Celaya-Dolores Hidalgo	1900
176	La Estancia	Toluca-Palmillas	8136
177	PC las Choapas	Las Choapas-Ocozocoautla	3311
178	La Colorada	T Morelos-Saltillo	5425
179	Santa Elena	Francisco Escárcega-Chetumal	3026
180	PC Yerbaniz	Durango-Gómez Palacio	536
181	CS Palo Alto	Ojuelos-Aguascalientes	3249
182	Tepetate	San Luis Potosí-Lagos de Moreno	6568
183	Seybaplaya	Ciudad del Carmen-Campeche	2024
184	PC Seybaplaya	Champotón-Campeche	3770
185	Casa Blanca	Gómez Palacio-Jiménez	7802
186	Santo Domingo	Ciudad Valles-San Luis Potosí	3539
187	Gustavo Garmendia	Ciudad Valles-Ciudad Victoria	1224
188	Ebtun	Mérida-Puerto Juárez	3873
189	PC Piste	Kantunil-Cancún	1658
190	La Granja I	Durango-Villa Unión	2086
191	PC Marmol	Mazatlán-Culiacán	4714
192	Union de Tula	Ent. Santa Cruz-Melaque	1766
193	Cementera	Hermosillo-Yécora	621



194	Jaluco	Manzanillo-Puerto Vallarta	3639
195	Moyahua	Guadalajara-Zacatecas	2107
196	El Centenario	La Paz-Ciudad Insurgentes	1349
197	Los Divisaderos	Cabo San Lucas-La Paz	823
198	El Moral	Ent. Tesistán-Ent. Malpaso	1547
199	La Paz	La Paz-Pichilingue	2166
200	San Jose el Saladillo	San Luis Potosí-Ent. Arcinas	8372
201	Cuicatlan	Tehuacán-Huitzo	455
202	Santo Tomas	Ensenada-Lázaro Cárdenas	3383
203	PC Santa Ana	Santa Ana-Sonoita	6129
204	PC Cuauhtemoc	Chihuahua-Ciudad Cuauhtémoc	3527
205	La Rosa	Saltillo-Torreón	9215
206	Hermanas	Monclova-Piedras Negras	4730
207	Santa Teresa	Saltillo-Monclova	2630
208	Perico 4	Ciudad Victoria-Monterrey	10135
209	Espinazo	Monterrey-Castaños	4793
210	Manuel	Tampico-Ciudad Mante	12998
211	Allende	Cadereyta-Allende	5996
212	Tarimbaro	Morelia-Salamanca	13289
213	Aeropuerto Morelia	Morelia-Zinapécuaro	2034
214	Aeropuerto	Pachuca-T Cañada Rica	10579
215	San Rafael	Matehuala-T Puerto México	24177
216	Nuevo Vivero	Coatzacoalcos-Minatitlán	3537
217	Cañitas	Villahermosa-Escopetazo	1132
218	Granja Romo	T Tesistán-T Malpaso	3794
219	Lo de Guevara	Guadalajara-Tepic	8692
220	Microondas	Santa Rosalía-Guerrero Negro	1034
221	Aeropuerto	Topolobampo-Choix	4431
222	PC El Arenal	Guadalajara-Tepic	7901
223	San Francisco	Ciudad Obregón-Hermosillo	8412
224	Tepatitlan	Lagos de Moreno-Zapotlanejo	10935
225	Los Zapotes	Mazatlán-Culiacán	5477
226	Benjamin Hill	Hermosillo-Nogales	8746
227	Campo de Tiro	Hermosillo-Bahía de Kino	2181

Estas estaciones se encuentran ubicadas en diversos lugares del país. En la **Figura 32** se muestra la ubicación de estas estaciones. La ubicación está de acuerdo con los estudios de origen y destino <sup>(51)</sup> realizados por la SCT.

Es importante decir que la ubicación de las estaciones, entre 1998 y 2000, es aproximada, dado que no se cuenta con la información de las coordenadas globales; caso contrario a las estaciones encuestadas entre 2001 y 2008.

De toda la información contenida en estos datos estadísticos, la más importante para esta investigación es la cantidad total de vehículos que fueron encuestados, el porcentaje del total de vehículos correspondiente de cada vehículo (composición vehicular) y los pesos medios para cada categoría de vehículos.

Para el caso de la composición vehicular y el peso medio de cada categoría de vehículos existe una sub categoría. En esta subcategoría se agrupan los vehículos que transitaron vacíos, cargados y los vehículos que circularon excedidos a la norma oficial vigente en aquel año.

Todas las tablas contenidas en el estudio de la IMT y SCT en el periodo de 1998 y 2008, que fueron de vital importancia para el desarrollo de esta investigación, se encuentran disponibles en formato digital en la página oficial del Instituto Mexicano del Transporte.



Figura 32. Mapa de las estaciones encuestadas entre 1998 y 2008

### 3.5 Consideraciones de las características de los vehículos, tomadas en la investigación.

Conociendo la clasificación de los vehículos, sus diversas dimensiones, las fracciones de distribución de la carga por eje y todos los datos contenidos en el estudio realizado por el IMT y la SCT, es posible desarrollar un camión característico de fatiga para cada zona del estudio.

Este camión de fatiga partirá de la premisa de que la variación de los pesos de los vehículos en las diversas zonas encuestadas a lo largo del tiempo es nula. Esto se debe a que se cree que el consumo per cápita de las poblaciones aledañas a los puntos encuestados no ha variado; además la tendencia de la reglamentación de los pesos en la mayoría de los vehículos es de disminuir la carga en el vehículo y no la de incrementarla. **(Figura 33)**

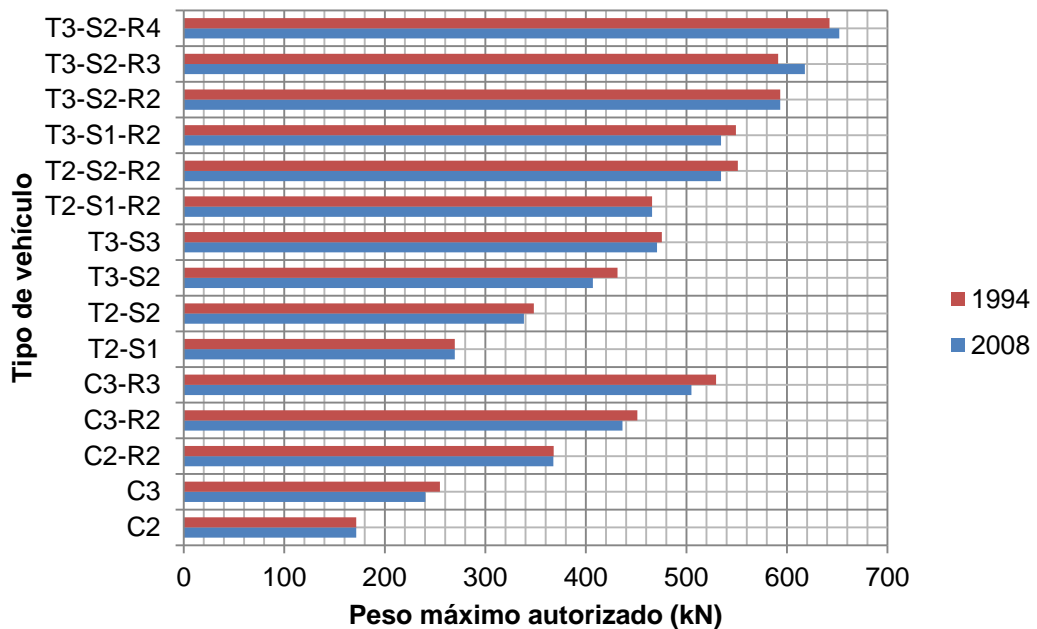


Figura 33. Gráfica de comparación de la carga máxima autorizada por vehículo para 1994 y 2008

En la siguiente tabla se puede observar el porcentaje de cambio que han sufrido los diferentes tipos de vehículos, de acuerdo con su peso máximo autorizado.

**Tabla 10.** Comparación de los pesos máximos autorizados por la SCT en diversos años.

Tipo de camión	Peso máximo autorizado por año		% de cambio
	2008	1994	
C2	171.6	171.6	0.0%
C3	240.3	254.9	-6.1%
C2-R2	367.7	367.9	-0.1%
C3-R2	436.4	451.2	-3.4%
C3-R3	505	529.5	-4.9%
T2-S1	269.7	269.7	0.0%
T2-S2	338.3	348.2	-2.9%
T3-S2	407	431.4	-6.0%
T3-S3	470.7	475.6	-1.0%
T2-S1-R2	465.8	465.9	0.0%
T2-S2-R2	534.5	551.2	-3.1%
T3-S1-R2	534.5	549.2	-2.8%
T3-S2-R2	593.3	593.3	0.0%
T3-S2-R3	617.8	591.3	4.3%
T3-S2-R4	652.1	642.3	1.5%

La disminución o el incremento en la normativa no ha sido significativa con el paso de los años; un ejemplo claro de esto, es el camión T3-S2-R4, para el que la reglamentación actual marca un peso máximo de 66.5 toneladas para carreteras de tipo A. Mientras que en 1994 el peso máximo reglamentado era de 65.5 toneladas, de tal manera que el incremento en el peso máximo autorizado es del 1.5 %, lo cual puede considerarse despreciable.

Acorde con el CAPÍTULO 2, en el siguiente capítulo se propondrán 3 camiones de fatiga que engloben los diversos vehículos, agrupando de la siguiente manera: se propondrá un camión de fatiga que represente los camiones Tipo C (Camión unitario), otro camión que represente

los tipos de camiones C-R y T-S (Camión remolque y tracto-camión articulado) y por último, un camión que represente los camiones T-S-R y T-S-S (tracto-camión doblemente articulado).

Aunque existe una variación en el número de los ejes de los diversos vehículos (Camiones tipo C, C-R, T-S, T-S-R y T-S-S) al agruparlos de la manera anterior, se cree que es mejor agrupar los vehículos en función de la longitud total del vehículo y de las distancias entre los ejes, en vez de por cantidad de ejes, como lo hacen otros investigadores. La razón es que se piensa que esta agrupación representaría de mejor manera la cantidad de ciclos equivalentes por camión que transite, así como el rango de esfuerzos equivalente.

## **CAPÍTULO 4: AJUSTE DE LOS CAMIONES DE FATIGA PARA MÉXICO**

Como se mencionó en el capítulo anterior, algunas de las variables que pueden ajustarse al método desarrollado por Moses et al <sup>(22)</sup> para la República Mexicana son el camión de fatiga, la tasa de crecimiento de los vehículos y el factor de ciclos equivalentes.

Esta investigación aborda la caracterización de los camiones para la evaluación del fenómeno de fatiga, dejando el resto de las variables para investigaciones posteriores.

Estos camiones se determinan de acuerdo con la pendiente de las curvas S-N, para las diversas categorías de detalle y de acuerdo con los pesos de los vehículos de un lugar, representando de manera equivalente al daño causado por un grupo de vehículos en particular.

Dado que se cuenta con los datos de los estudios realizados por el IMT y la SCT, donde se muestran los pesos medios de los diversos vehículos para los diversos puntos encuestados, se utilizarán esos datos para determinar un camión de fatiga para un grupo de vehículos en particular (Camiones C, Camiones T-S y C-R, y Camiones T-S-R y T-S-S) para cada uno de los puntos, partiendo de la consideración de que los pesos de los vehículos permanecen constantes a través del tiempo.

Cabe mencionar que de ahora en adelante se conocerá a la categoría conformada por los vehículos C como **Grupo C**, a la categoría conformada por los vehículos T-S y C-R como **Grupo T-S** y la categoría conformada por los vehículos T-S-R y T-S-S como **Grupo T-S-R**.

No se mencionará en la nomenclatura a los vehículos C-R y T-S-S, dado que representan un pequeño porcentaje de los vehículos en los reportes técnicos <sup>(39)</sup>-<sup>(47)</sup>. Sin embargo, los datos que corresponden a esos tipos de vehículos fueron incluidos en esta investigación.

El objetivo fundamental de esta investigación es la determinación de un camión de fatiga por grupo, que pudiera usarse para la evaluación de la fatiga en cualquier parte de la República Mexicana.

Se propuso la utilización de herramientas estadísticas para el desarrollo de este camión, pensando en que sería posible afectar al peso equivalente de este camión por un factor de dispersión, dado que existe variación en los pesos equivalentes de los camiones de fatiga, en los diversos puntos.

Para llegar al cálculo de los camiones de fatiga fue necesario cubrir ciertas etapas antes de llegar a su culminación en los factores de dispersión. Estas etapas se verán en detalle conforme se vaya profundizando en este capítulo. No obstante, es pertinente la descripción de ellas antes de entrar individualmente a cada una y a cada uno de sus resultados.

La primera etapa correspondió el cálculo del peso del camión equivalente, para las diversas estaciones encuestadas entre los años 1998 y 2008.

Posteriormente, ya calculados los pesos equivalentes, se decidió agrupar las diversas zonas en grupos similares, de acuerdo con la teoría de Minería de Datos, con la finalidad de crear clases de pesos equivalentes, debido a su propia naturaleza.



Con las clases determinadas para cada uno de los grupos, se tomó la decisión de calcular el camión, con base en la clase con mayor cantidad de datos de las estaciones, dado que se plantea la hipótesis de que las dimensiones y el porcentaje de carga para cada camión de fatiga será igual para cada clase, puesto que en todas las estaciones la mayoría de los vehículos encuestados son los camiones C2, C3, T3-S2 y T3-S2-R4. <sup>(39)- (47)</sup>

Se generaron modelos matemáticos de puentes de diversos claros y se hizo la simulación de tráfico real, en la que se obtuvo la respuesta estática del puente, con la finalidad de obtener el rango de momentos equivalente para la clase con mayor cantidad de datos.

Este rango de momentos se comparó con la respuesta obtenida del análisis para los diversos puentes cargados con los camiones de fatiga propuestos, tal que se ajustara este comportamiento lo más posible.

Ya obtenidos los camiones de fatiga, se determinaron los factores de dispersión previamente mencionados y el camión de fatiga para todo el conjunto de estaciones.

En lo sucesivo se abordará detalladamente cada una de las etapas implementadas en esta investigación para el desarrollo de los diversos camiones que fueron propuestos para representar a los Grupos C, T-S y T-S-R.

## 4.1 Cálculo del peso equivalente por estación encuestada y su análisis estadístico.

Considerando los datos recopilados de las 129 estaciones encuestadas en el periodo de 1998 a 2008, se obtuvieron 3 distintos pesos equivalentes de los camiones de fatiga (Grupo C, Grupo T-S, Grupo T-S-R) para cada una de las estaciones.

Estos pesos se evaluaron mediante la **Ecuación (13)**, que expresa:

$$W = (\sum f_i W_i^3)^{1/3}$$

Donde dicha ecuación requiere conocer el peso de los vehículos,  $W_i$ , y la fracción de vehículos,  $f_i$ , que presentaron ese peso.

Se desarrollará un ejemplo para una estación en particular, con el fin de explicar, de manera sencilla, cómo determinar el peso equivalente del camión de fatiga para el Grupo C, T-S y T-S-R.

Posteriormente, se mostrarán los resultados obtenidos de los pesos equivalentes para las 129 estaciones encuestadas que engloban el periodo de 1998 a 2008, así como el resultado del análisis estadístico para cada grupo.

### 4.1.1 Ejemplo de cálculo del peso equivalente del camión de fatiga por estación.

Tomando en consideración para este ejemplo los datos contenidos (pesos medios y la composición vehicular) en el documento técnico no. 40 <sup>(46)</sup>, pertenecientes a la estación 208, cuyo nombre es “PERICO 4” y está situada sobre la carretera federal Ciudad Victoria-Monterrey, se determinarán los pesos equivalentes para los 3 grupos antes mencionados.

De las Tablas 2.4, 2.6 y 2.7 del mismo documento, <sup>(46)</sup> se obtendrá la cantidad de vehículos para cada uno de los diversos tipos de vehículos que circularon a través de la estación, vacíos, cargados y excedidos a la norma. Sumando estos valores, de acuerdo con la agrupación planteada en el CAPÍTULO 3, se obtiene la cantidad total de vehículos para cada grupo.

**Tabla 11.** Cálculo de la composición vehicular expresada en número de vehículos para la estación 208 “PERICO4”

CLASIF.	Grupo C		Grupo T-S y C-R								Grupo T-S-R						
	C2	C3	T2-S1	T2-S2	T3-S2	T3-S3	C2-R2	C2-R3	C3-R2	C3-R3	T2-S1-R2	T3-S1-R2	T3-S2-R2	T3-S2-R3	T3-S3-S2	T3-S2-R4	OTROS
vacío	874	505	8	97	994	498	0	0	0	0	0	5	16	1	17	916	0
cargado	1009	606	2	136	1304	880	10	0	0	0	0	14	62	9	11	1170	0
excedido	42	13	0	10	144	223	0	0	0	0	0	1	13	0	3	509	0
TOTAL POR CAMIÓN	1926	1125	10	243	2443	1601	10	0	0	0	0	20	91	10	30	2595	0
TOTAL GRUPO	3051		4307								2747						

Con la cantidad total de vehículos por grupo y la cantidad de los diversos tipos de vehículos que circularon vacíos, cargados y excedidos, se puede determinar la fracción  $f_i$  simplemente dividiendo la composición vehicular para cada tipo de vehículo entre el total de su respectivo grupo.

**Tabla 12.** Calculo de la fracción de los vehículos  $f$  con peso  $W$  para la estación 208 “PERICO4”

Grupo C		Grupo T-S y C-R								Grupo T-S-R						
C2	C3	T2-S1	T2-S2	T3-S2	T3-S3	C2-R2	C2-R3	C3-R2	C3-R3	T2-S1-R2	T3-S1-R2	T3-S2-R2	T3-S2-R3	T3-S3-S2	T3-S2-R4	OTROS
2.87E-01	1.66E-01	1.76E-03	2.25E-02	2.31E-01	1.16E-01	0	0	0	0	0	1.73E-03	5.71E-03	2.84E-04	6.01E-03	3.33E-01	0
3.31E-01	1.99E-01	4.64E-04	3.16E-02	3.03E-01	2.04E-01	2.32E-03	0	0	0	0	5.10E-03	2.26E-02	3.28E-03	4.00E-03	4.26E-01	0
1.39E-02	4.43E-03	0.00E+00	2.32E-03	3.35E-02	5.17E-02	0	0	0	0	0	4.35E-04	4.58E-03	0	9.52E-04	1.85E-01	0

Asimismo, en las tablas 2.9, 2.10 y 2.11 del documento técnico no. 40 <sup>(46)</sup> se obtiene el peso medio de los diversos tipos de vehículos que circularon vacíos, cargados y excedidos, a través de la estación 208. Estos pesos medios representan el peso  $W_i$  de la fracción  $f_i$ .

**Tabla 13.** Pesos medios de la composición vehicular para la estación 208 "PERICO4" en kN

Grupo C		Grupo T-S y C-R								Grupo T-S-R						
C2	C3	T2-S1	T2-S2	T3-S2	T3-S3	C2-R2	C2-R3	C3-R2	C3-R3	T2-S1-R2	T3-S1-R2	T3-S2-R2	T3-S2-R3	T3-S3-S2	T3-S2-R4	OTROS
45.1	78.5	83.4	120.6	153.0	185.3	0	0	0	0	0	186.3	187.3	244.2	243.2	263.8	0
82.4	155.9	123.6	215.7	295.2	357.9	288.3	0	0	0	345.2	348.1	438.4	427.6	483.5	493.3	0
191.2	268.7	0	450.1	492.3	517.8	0	0	0	0	0	557.0	724.7	0	634.5	752.2	0

Elevando al cubo cada uno de los pesos medios  $W_i$  de la muestra y multiplicando por su respectiva fracción  $f_i$ , se tiene:

**Tabla 14.** Cálculo de  $f_i W_i^3$  para cada vehículo en la estación 208 "PERICO4" en kN<sup>3</sup>

Grupo C		Grupo T-S y C-R								Grupo T-S-R						
C2	C3	T2-S1	T2-S2	T3-S2	T3-S3	C2-R2	C2-R3	C3-R2	C3-R3	T2-S1-R2	T3-S1-R2	T3-S2-R2	T3-S2-R3	T3-S3-S2	T3-S2-R4	OTROS
26307	79953	1022	39543	826339	736166	0	0	0	0	0	11219	37537	4137	86471	6121590	0
184885	753071	876	317071	7786216	9369375	55641	0	0	0	0	215071	1901443	256136	452587	51127999	0
97113	85852	0	211157	3991658	7173758	0	0	0	0	0	75252	1744406	0	243179	78790683	0

Sumando lo anterior, de acuerdo con cada grupo y sacando la raíz cubica a las sumatorias, se determinan los pesos equivalentes de cada uno de los vehículos para la evaluación.

**Tabla 15.** Pesos equivalente para los 3 grupos de vehículos en la estación 208 "PERICO4"

Grupo C	Grupo T-S y C-R	Grupo T-S-R
107.1 kN	312.5 kN	520.6 kN

A continuación se muestran los resultados de los pesos equivalentes para los vehículos, para cada uno de los diversos grupos, al igual que se muestran sus respectivas medidas de dispersión.

#### 4.1.2 Pesos equivalentes del camión de fatiga, grupo C.

En la siguiente tabla se muestran los pesos equivalentes por estación, para el grupo C.

**Tabla 16.** Pesos equivalente para el grupo C, para las estaciones encuestadas entre 1998 y 2008

Estación	Nombre Estación	Carretera	Camiones C (en kN)
99	La Antigua	Cardel-Veracruz	121.0
100	Coacoyul	Acapulco-Zihuatanejo	86.9
101	Puerto Escondido	Pinotepa Nacional-Salina Cruz	89.7
102	CECYTEM	Zihuatanejo-La Mira	111.4
103	San Pedro	Toluca-Zitácuaro	98.5
104	Ojuelos	Ojuelos-Aguascalientes	124.2
105	Malpaso	Guadalajara-Zacatecas	116.1
106	Poste Rojo	Tapanatepec-Talismán	91.8
107	El Rodeo	San Luis Potosí-Zacatecas	160.5
108	Hauy Pix	Escárcega-Chetumal	134.6
109	La Angostura	Concepción del Oro-Saltillo	142.5
110	Tehuizingo	Puebla-Huajuapán	100.9
111	Yautepec	Cuernavaca-Cuautlixco	129.9
112	El Jiadhi	La Colonia-Portezuelo	118.5
113	Apaseo	Apaseo el Alto-Celaya	147.9
114	El Monteón	Tepic-Puerto Vallarta	96.7
115	Jalisco	Guadalajara-Tepic	133.1
116	Guadalupe Victoria	Durango-Torreón	125.7
117	Corralche	Campeche-Mérida	148.3
118	Nuevo Laredo	Monterrey-Nuevo Laredo	97.2
119	Coyame	Chihuahua-Ojinaga	126.0
120	Guaymas	Ciudad Obregón-Hermosillo	128.7
121	Antigua Caseta	Culiacán-Los Mochis	99.6
122	Monterrey	Saltillo-Monterrey	122.9
123	Coyame	Chihuahua-Ojinaga	115.1
124	Fitosanitaria	Janos-Agua Prieta	124.9
125	Cereso	Moctezuma-Agua Prieta	90.5
126	Entronque Moctezuma	Agua Prieta-Ímuris	105.1
127	Lienzo Charro	Sonoíta-Puerto Peñasco	84.1
128	Sonoíta	Santa Ana-Sonoíta	140.6
129	Las Adelitas	Sonoíta-Mexicali	133.4
130	El Fato	Mexicali-San Felipe	108.7
131	Tecate	Mexicali-Tijuana	115.5
132	Tijuana	Tecate-Tijuana	114.5
133	Plan Libertador	Tijuana-San Miguel	108.5
134	Playas de Tijuana	Tijuana-Ensenada	113.2
135	Ejido Monterrey	Sonoíta-Mexicali	113.8

136	El 21	Hermosillo-Nogales	107.3
137	Samalayuca	El Sueco-Ciudad Juárez	98.6
138	La Muralla	Morelos-Ciudad Acuña	99.1
139	Aduana	Monclova-Piedras Negras	112.9
140	El Oasis	Monterrey-Nuevo Laredo	93.5
141	General Bravo	Monterrey-Reynosa	117.9
142	General Bravo	Monterrey-Reynosa	100.5
143	Aduana Capote	Matamoros-Reynosa	100.8
144	Magdalena	Huajuapán de León-Oaxaca	100.1
145	Hutzo	Cuacnopalan-Oaxaca (cuota)	129.4
146	23 de Enero A	Arriaga-Huixtla	110.6
147	23 de Enero B	Tapanatepec-Talismán	100.9
148	Marina	Coatzacoalcos-Salina Cruz	94.6
149	Rancho Nuevo	Tuxtla Gutiérrez-Ciudad Cuauhtémoc	73.8
150	Cruz del Milagro	Ciudad Alemán-Sayula	127.6
151	Apaxtla	Paso del Toro-Acayucan	89.1
152	Caseta Sayula	La Tinaja-Cosoleacaque (cuota)	132.2
153	Colonia Ejidal	Córdoba-Entronque Boticaria	110.9
154	Canal SARH	Córdoba-Veracruz	125.8
155	El Pando	Jalapa-Veracruz	115.7
156	Campo de Tiro	Poza Rica-Veracruz	139.0
157	El Refugio	Portezuelo-Palmillas	133.0
158	Singuilucan	Venta de Carpio-TC(Pachuca-Tulancingo)-Huixtla	131.0
159	Las Rajas	Naucalpan-Toluca	135.8
160	San Mateo	México-Puebla	118.1
161	Caseta San Martín	México-Puebla	143.6
162	Parotales	Ciudad Altamirano-TC(Zihuatanejo-La Mira)	112.5
163	Guacamayas	Zihuatanejo-La Mira	72.0
164	Teloloapan	Iguala-Ciudad Altamirano	98.8
165	Amayuca	Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros	122.5
166	La Caridad	Las Cruces-Pinotepa Nacional	125.5
167	Guadalupe Victoria	Durango-Cuencamé	81.0
168	Ciudad Mier	Monterrey-Ciudad Mier	124.4
169	Lagos de Moreno	León-Aguascalientes	133.3
170	Las Cruces	Oaxaca-Tehuantepec	106.7
171	Herradura	Piedras Negras-Nuevo Laredo	123.2
172	Santa Rosa	Querétaro-San Luis Potosí	119.5
173	Rancho Santa Elena	Coatzacoalcos-Salina Cruz	146.2
174	Naval	Ciudad Victoria-Matamoros	102.3

175	Tequisquiapan	Celaya-Dolores Hidalgo	107.0
176	La Estancia	Toluca-Palmillas	107.8
177	PC las Choapas	Las Choapas-Ocozocoautla	147.0
178	La Colorada	T Morelos-Saltillo	97.5
179	Santa Elena	Francisco Escárcega-Chetumal	122.5
180	PC Yerbaniz	Durango-Gómez Palacio	117.0
181	CS Palo Alto	Ojuelos-Aguascalientes	103.2
182	Tepetate	San Luis Potosí-Lagos de Moreno	135.9
183	Seybaplaya	Ciudad del Carmen-Campeche	111.6
184	PC Seybaplaya	Champotón-Campeche	142.2
185	Casa Blanca	Gómez Palacio-Jiménez	121.9
186	Santo Domingo	Ciudad Valles-San Luis Potosí	131.7
187	Gustavo Garmendia	Ciudad Valles-Ciudad Victoria	211.4
188	Ebtún	Mérida-Puerto Juárez	113.9
189	PC Piste	Kantuníl-Cancún	126.4
190	La Granja I	Durango-Villa Unión	114.9
191	PC Mármol	Mazatlán-Culiacán	120.5
192	Unión de Tula	Ent. Santa Cruz-Melaque	121.4
193	Cementerera	Hermosillo-Yécora	90.8
194	Jaluco	Manzanillo-Puerto Vallarta	111.5
195	Moyahua	Guadalajara-Zacatecas	121.3
196	El Centenario	La Paz-Ciudad Insurgentes	115.4
197	Los Divisaderos	Cabo San Lucas-La Paz	113.7
198	El Moral	Ent. Tesislán-Ent. Malpaso	110.7
199	La Paz	La Paz-Pichilingue	122.8
200	San José el Saladillo	San Luis Potosí-Ent. Arcinas	136.5
201	Cuicatlan	Tehuacán-Huitzo	81.3
202	Santo Tomas	Ensenada-Lázaro Cárdenas	92.4
203	PC Santa Ana	Santa Ana-Sonoita	117.2
204	PC Cuauhtémoc	Chihuahua-Ciudad Cuauhtémoc	108.0
205	La Rosa	Saltillo-Torreón	97.4
206	Hermanas	Monclova-Piedras Negras	125.1
207	Santa Teresa	Saltillo-Monclova	134.3
208	Perico 4	Ciudad Victoria-Monterrey	107.1
209	Espinazo	Monterrey-Castaños	116.3
210	Manuel	Tampico-Ciudad Mante	98.5
211	Allende	Cadereyta-Allende	100.6
212	Tarimbaro	Morelia-Salamanca	108.1
213	Aeropuerto Morelia	Morelia-Zinapécuaro	128.7

214	Aeropuerto	Pachuca-T Cañada Rica	103.7
215	San Rafael	Matehuala-T Puerto México	137.0
216	Nuevo Vivero	Coatzacoalcos-Minatitlán	98.9
217	Cañitas	Villahermosa-Escopetazo	87.9
218	Granja Romo	T Tesistán-T Malpaso	111.4
219	Lo de Guevara	Guadalajara-Tepic	138.4
220	Microondas	Santa Rosalía-Guerrero Negro	110.1
221	Aeropuerto	Topolobampo-Choix	162.2
222	PC El Arenal	Guadalajara-Tepic	139.0
223	San Francisco	Ciudad Obregón-Hermosillo	142.3
224	Tepatitlán	Lagos de Moreno-Zapotlanejo	141.2
225	Los Zapotes	Mazatlán-Culiacán	129.0
226	Benjamín Hill	Hermosillo-Nogales	137.5
227	Campo de Tiro	Hermosillo-Bahía de Kino	124.5

Teniendo en cuenta los valores anteriores, se elaboró una gráfica de dispersión, así como la determinación de algunas medidas de dispersión (media, desviación estándar y coeficiente de variación)

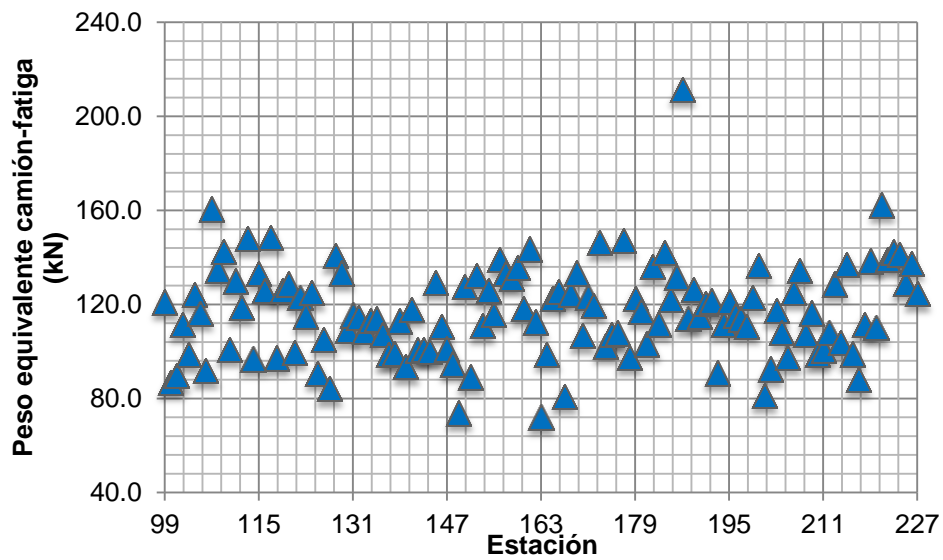


Figura 34. Dispersión de la muestra del grupo C



Para el grupo C, cuyos camiones son C2 y C3, se obtuvo una media  $\mu = 116.9 \text{ kN}$ , una desviación estándar  $\sigma = 19.7 \text{ kN}$  y un coeficiente de variación  $C_v = 16.9\%$ . Con estos valores se puede resumir que es totalmente inadecuado trabajar una media de todos estos valores, dado el valor del coeficiente de variación, ya que se espera tener un coeficiente de variación menor o igual que el 10%.

#### 4.1.3 Pesos equivalentes de camión de fatiga, grupo T-S.

Al igual que para el grupo C, en la siguiente tabla se muestran los pesos equivalentes por estación para el grupo T-S.

**Tabla 17.** Pesos equivalente para el grupo T-S, para las estaciones encuestadas entre 1998 y 2008

Estación	Nombre Estación	Carretera	Camiones T-S (en kN)
99	La antigua	Cardel-Veracruz	305.0
100	Coacoyul	Acapulco-Zihuatanejo	369.0
101	Puerto Escondido	Pinotepa Nacional-Salina Cruz	343.7
102	CECYTEM	Zihuatanejo-La Mira	303.9
103	San Pedro	Toluca-Zitácuaro	318.7
104	Ojuelos	Ojuelos-Aguascalientes	251.9
105	Malpaso	Guadalajara-Zacatecas	312.3
106	Poste Rojo	Tapanatepec-Talismán	287.8
107	El Rodeo	San Luis Potosí-Zacatecas	363.4
108	Hauy Pix	Escárcega-Chetumal	384.8
109	La Angostura	Concepción del Oro-Saltillo	308.7
110	Tehuizingo	Puebla-Huajuapán	323.3
111	Yautepec	Cuernavaca-Cuautlixco	399.6
112	El Jiadhi	La Colonia-Portezuelo	341.9
113	Apaseo	Apaseo el Alto-Celaya	302.0
114	El Monteón	Tepic-Puerto Vallarta	316.4
115	Jalisco	Guadalajara-Tepic	323.0
116	Guadalupe Victoria	Durango-Torreón	327.9

117	Corralche	Campeche-Mérida	360.2
118	Nuevo Laredo	Monterrey-Nuevo Laredo	263.1
119	Coyame	Chihuahua-Ojinaga	242.5
120	Guaymas	Ciudad Obregón-Hermosillo	305.7
121	Antigua Caseta	Culiacán-Los Mochis	269.0
122	Monterrey	Saltillo-Monterrey	314.8
123	Coyame	Chihuahua-Ojinaga	287.6
124	Fitosanitaria	Janos-Agua Prieta	358.3
125	Cereso	Moctezuma-Agua Prieta	340.0
126	Entronque Moctezuma	Agua Prieta-Ímuris	334.7
127	Lienzo Charro	Sonoíta-Puerto Peñasco	272.1
128	Sonoita	Santa Ana-Sonoíta	346.0
129	Las Adelitas	Sonoíta-Mexicali	343.9
130	El Fato	Mexicali-San Felipe	292.5
131	Tecate	Mexicali-Tijuana	308.1
132	Tijuana	Tecate-Tijuana	322.1
133	Plan Libertador	Tijuana-San Miguel	308.7
134	Playas de Tijuana	Tijuana-Ensenada	274.0
135	Ejido Monterrey	Sonoíta-Mexicali	309.7
136	El 21	Hermosillo-Nogales	285.8
137	Samalayuca	El Sueco-Ciudad Juárez	298.1
138	La Muralla	Morelos-Ciudad Acuña	321.8
139	Aduana	Monclova-Piedras Negras	310.8
140	El Oasis	Monterrey-Nuevo Laredo	321.8
141	General Bravo	Monterrey-Reynosa	376.5
142	General Bravo	Monterrey-Reynosa	363.3
143	Aduana Capote	Matamoros-Reynosa	353.1
144	Magdalena	Huajuapán de León-Oaxaca	341.3
145	Hutzo	Cuacnopalan-Oaxaca (cuota)	356.4
146	23 de Enero A	Arriaga-Huixtla	336.5
147	23 de Enero B	Tapanatepec-Talismán	315.6
148	Marina	Coatzacoalcos-Salina Cruz	385.3
149	Rancho Nuevo	Tuxtla Gutiérrez-Ciudad Cuauhtémoc	332.2
150	Cruz del Milagro	Ciudad Alemán-Sayula	355.0
151	Apaxtla	Paso del Toro-Acayucan	319.4
152	Caseta Sayula	La Tinaja-Cosoleacaque (cuota)	411.3
153	Colonia Ejidal	Córdoba-Entronque Boticaria	335.6
154	Canal SARH	Córdoba-Veracruz	374.2
155	El Pando	Jalapa-Veracruz	308.7

156	Campo de Tiro	Poza Rica-Veracruz	362.7
157	El Refugio	Portezuelo-Palmillas	366.8
158	Singuilucan	Venta de Carpio-TC(Pachuca-Tulancingo)-Huixtla	357.7
159	Las Rajas	Naucalpan-Toluca	340.5
160	San Mateo	México-Puebla	333.4
161	Caseta San Martin	México-Puebla	337.3
162	Parotales	Ciudad Altamirano-TC(Zihuatanejo-La Mira)	344.6
163	Guacamayas	Zihuatanejo-La Mira	310.9
164	Teloloapan	Iguala-Ciudad Altamirano	354.1
165	Amayuca	Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros	361.7
166	La Caridad	Las Cruces-Pinotepa Nacional	357.2
167	Guadalupe Victoria	Durango-Cuencamé	270.0
168	Ciudad Mier	Monterrey-Ciudad Mier	374.0
169	Lagos de Moreno	León-Aguascalientes	328.6
170	Las Cruces	Oaxaca-Tehuantepec	367.7
171	Herradura	Piedras Negras-Nuevo Laredo	275.2
172	Santa Rosa	Querétaro-San Luis Potosí	310.2
173	Rancho Santa Elena	Coatzacoalcos-Salina Cruz	319.7
174	Naval	Ciudad Victoria-Matamoros	278.7
175	Tequisquiapan	Celaya-Dolores Hidalgo	324.2
176	La Estancia	Toluca-Palmillas	290.7
177	PC las Choapas	Las Choapas-Ocozocoautla	337.8
178	La Colorada	T Morelos-Saltillo	261.2
179	Santa Elena	Francisco Escárcega-Chetumal	354.7
180	PC Yerbaniz	Durango-Gómez Palacio	247.4
181	CS Palo Alto	Ojuelos-Aguascalientes	290.8
182	Tepetate	San Luis Potosí-Lagos de Moreno	314.4
183	Seybaplaya	Ciudad del Carmen-Campeche	298.5
184	PC Seybaplaya	Champotón-Campeche	337.1
185	Casa Blanca	Gómez Palacio-Jiménez	295.4
186	Santo Domingo	Ciudad Valles-San Luis Potosí	311.3
187	Gustavo Garmendia	Ciudad Valles-Ciudad Victoria	452.5
188	Ebtun	Mérida-Puerto Juárez	270.5
189	PC Piste	Kantunil-Cancún	353.1
190	La Granja I	Durango-Villa Unión	344.0
191	PC Marmol	Mazatlán-Culiacán	287.2
192	Union de Tula	Ent. Santa Cruz-Melaque	317.8
193	Cementera	Hermosillo-Yécora	326.9
194	Jaluco	Manzanillo-Puerto Vallarta	337.5

195	Moyahua	Guadalajara-Zacatecas	319.1
196	El Centenario	La Paz-Ciudad Insurgentes	294.7
197	Los Divisaderos	Cabo San Lucas-La Paz	302.2
198	El Moral	Ent. Tesislán-Ent. Malpaso	337.3
199	La Paz	La Paz-Pichilingue	301.4
200	San Jose el Saladillo	San Luis Potosí-Ent. Arcinas	352.4
201	Cuicatlan	Tehuacán-Huitzo	249.8
202	Santo Tomas	Ensenada-Lázaro Cárdenas	253.0
203	PC Santa Ana	Santa Ana-Sonoita	277.3
204	PC Cuauhtemoc	Chihuahua-Ciudad Cuauhtémoc	282.2
205	La Rosa	Saltillo-Torreón	268.5
206	Hermanas	Monclova-Piedras Negras	301.8
207	Santa Teresa	Saltillo-Monclova	361.3
208	Perico 4	Ciudad Victoria-Monterrey	312.5
209	Espinazo	Monterrey-Castaños	293.6
210	Manuel	Tampico-Ciudad Mante	263.2
211	Allende	Cadereyta-Allende	256.7
212	Tarimbaro	Morelia-Salamanca	310.1
213	Aeropuerto Morelia	Morelia-Zinapécuaro	361.3
214	Aeropuerto	Pachuca-T Cañada Rica	286.1
215	San Rafael	Matehuala-T Puerto México	296.5
216	Nuevo Vivero	Coatzacoalcos-Minatitlán	279.7
217	Cañitas	Villahermosa-Escopetazo	287.1
218	Granja Romo	T Tesislán-T Malpaso	345.9
219	Lo de Guevara	Guadalajara-Tepic	339.9
220	Microondas	Santa Rosalía-Guerrero Negro	313.6
221	Aeropuerto	Topolobampo-Choix	327.4
222	PC El Arenal	Guadalajara-Tepic	338.7
223	San Francisco	Ciudad Obregón-Hermosillo	323.4
224	Tepatitlan	Lagos de Moreno-Zapotlanejo	309.1
225	Los Zapotes	Mazatlán-Culiacán	323.4
226	Benjamin Hill	Hermosillo-Nogales	305.0
227	Campo de Tiro	Hermosillo-Bahía de Kino	273.9

Considerando los valores de la **Tabla 17**, se elaboró su gráfica de dispersión, así como la determinación de sus respectivas medidas de dispersión (media, desviación estándar y coeficiente de variación)

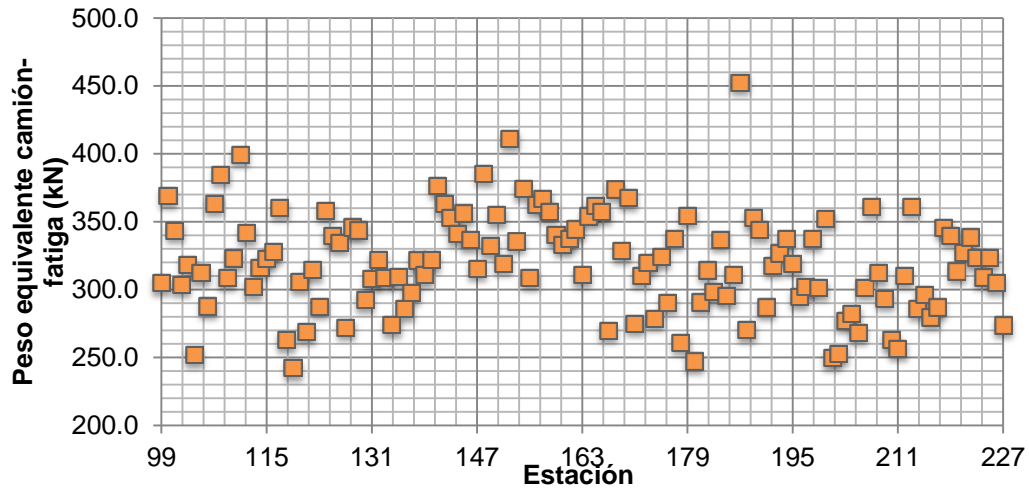


Figura 35. Dispersión de la muestra del grupo T-S

En el grupo T-S, integrado por los camiones T2-S1, T2-S2, T2-S3, T3-S2, T3-S3, C2-R2, C2-R3, C3-R2 y C3-R3, se obtuvo una media de los pesos equivalentes  $\mu = 320.1 \text{ kN}$  con una desviación estándar para la muestra de  $\sigma = 36.6 \text{ kN}$  y un coeficiente de variación de  $C_v = 11.4\%$ . Aunque el coeficiente de variación es menor que el que se encuentra en el grupo C, esto no es suficiente para intentar hacer uso de un solo vehículo ya que se espera una variación máxima del 10%.

#### 4.1.4 Pesos equivalentes de camión de fatiga, grupo T-S-R.

Por último, en **Tabla 18** se muestran los pesos equivalentes por estación, para el grupo T-S-R.

**Tabla 18.** Pesos equivalente para el grupo T-S-R, para las estaciones encuestadas entre 1998 y 2008

Estación	Nombre Estación	Carretera	Camiones T-S-R (en kN)
99	La antigua	Cardel-Veracruz	452.2
100	Coacoyul	Acapulco-Zihuatanejo	275.0
101	Puerto Escondido	Pinotepa Nacional-Salina Cruz	302.7
102	CECYTEM	Zihuatanejo-La Mira	392.7

103	San Pedro	Toluca-Zitácuaro	491.7
104	Ojuelos	Ojuelos-Aguascalientes	306.7
105	Malpaso	Guadalajara-Zacatecas	224.0
106	Poste Rojo	Tapanatepec-Talismán	462.0
107	El Rodeo	San Luis Potosí-Zacatecas	515.6
108	Hauy Pix	Escárcega-Chetumal	607.3
109	La Angostura	Concepción del Oro-Salttillo	487.4
110	Tehuiztzingo	Puebla-Huajuapán	264.1
111	Yautepec	Cuernavaca-Cuautlaxco	439.5
112	El Jiadhi	La Colonia-Portezuelo	500.9
113	Apaseo	Apaseo el Alto-Celaya	434.0
114	El Monteón	Tepic-Puerto Vallarta	560.0
115	Jalisco	Guadalajara-Tepic	411.1
116	Guadalupe Victoria	Durango-Torreón	426.1
117	Corralche	Campeche-Mérida	598.1
118	Nuevo Laredo	Monterrey-Nuevo Laredo	387.2
119	Coyame	Chihuahua-Ojinaga	204.6
120	Guaymas	Ciudad Obregón-Hermosillo	472.9
121	Antigua Caseta	Culiacán-Los Mochis	359.0
122	Monterrey	Saltillo-Monterrey	489.6
123	Coyame	Chihuahua-Ojinaga	202.1
124	Fitosanitaria	Janos-Agua Prieta	535.6
125	Cereso	Moctezuma-Agua Prieta	477.3
126	Entronque Moctezuma	Agua Prieta-Ímuris	504.1
127	Lienzo Charro	Sonoíta-Puerto Peñasco	427.7
128	Sonoíta	Santa Ana-Sonoíta	494.6
129	Las Adelitas	Sonoíta-Mexicali	489.6
130	El Fato	Mexicali-San Felipe	347.7
131	Tecate	Mexicali-Tijuana	455.8
132	Tijuana	Tecate-Tijuana	489.0
133	Plan Libertador	Tijuana-San Miguel	491.8
134	Playas de Tijuana	Tijuana-Ensenada	186.3
135	Ejido Monterrey	Sonoíta-Mexicali	432.5
136	El 21	Hermosillo-Nogales	528.5
137	Samalayuca	El Sueco-Ciudad Juárez	499.9
138	La Muralla	Morelos-Ciudad Acuña	488.5
139	Aduana	Monclova-Piedras Negras	146.9
140	El Oasis	Monterrey-Nuevo Laredo	495.3
141	General Bravo	Monterrey-Reynosa	564.5

142	General Bravo	Monterrey-Reynosa	586.7
143	Aduana Capote	Matamoros-Reynosa	569.6
144	Magdalena	Huajuapán de León-Oaxaca	485.4
145	Hutzo	Cuacnopalan-Oaxaca (cuota)	612.9
146	23 de Enero A	Arriaga-Huixtla	541.1
147	23 de Enero B	Tapanatepec-Talismán	419.7
148	Marina	Coatzacoalcos-Salina Cruz	562.3
149	Rancho Nuevo	Tuxtla Gutiérrez-Ciudad Cuauhtémoc	259.0
150	Cruz del Milagro	Ciudad Alemán-Sayula	585.6
151	Apaxtla	Paso del Toro-Acayucan	449.0
152	Caseta Sayula	La Tinaja-Cosoleacaque (cuota)	589.5
153	Colonia Ejidal	Córdoba-Entronque Boticaria	551.5
154	Canal SARH	Córdoba-Veracruz	551.2
155	El Pando	Jalapa-Veracruz	466.9
156	Campo de Tiro	Poza Rica-Veracruz	564.4
157	El Refugio	Portezuelo-Palmillas	607.2
158	Singuilucan	Venta de Carpio-TC(Pachuca-Tulancingo)-Huixtla	476.6
159	Las Rajas	Naucalpan-Toluca	595.0
160	San Mateo	México-Puebla	525.8
161	Caseta San Martín	México-Puebla	542.8
162	Parotales	Ciudad Altamirano-TC(Zihuatanejo-La Mira)	149.1
163	Guacamayas	Zihuatanejo-La Mira	514.7
164	Teloloapan	Iguala-Ciudad Altamirano	529.6
165	Amayuca	Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros	573.4
166	La Caridad	Las Cruces-Pinotepa Nacional	612.3
167	Guadalupe Victoria	Durango-Cuencamé	479.3
168	Ciudad Mier	Monterrey-Ciudad Mier	585.2
169	Lagos de Moreno	León-Aguascalientes	453.6
170	Las Cruces	Oaxaca-Tehuantepec	586.6
171	Herradura	Piedras Negras-Nuevo Laredo	470.3
172	Santa Rosa	Querétaro-San Luis Potosí	476.6
173	Rancho Santa Elena	Coatzacoalcos-Salina Cruz	537.7
174	Naval	Ciudad Victoria-Matamoros	456.8
175	Tequisquiapan	Celaya-Dolores Hidalgo	243.7
176	La Estancia	Toluca-Palmillas	472.4
177	PC las Choapas	Las Choapas-Ocozacoautla	586.1
178	La Colorada	T Morelos-Salttillo	322.3
179	Santa Elena	Francisco Escárcega-Chetumal	602.2
180	PC Yerbaniz	Durango-Gómez Palacio	522.1

181	CS Palo Alto	Ojuelos-Aguascalientes	494.2
182	Tepetate	San Luis Potosí-Lagos de Moreno	362.6
183	Seybaplaya	Ciudad del Carmen-Campeche	428.2
184	PC Seybaplaya	Champotón-Campeche	574.6
185	Casa Blanca	Gómez Palacio-Jiménez	474.5
186	Santo Domingo	Ciudad Valles-San Luis Potosí	347.0
187	Gustavo Garmendia	Ciudad Valles-Ciudad Victoria	591.0
188	Ebtun	Mérida-Puerto Juárez	331.3
189	PC Piste	Kantunil-Cancún	624.5
190	La Granja I	Durango-Villa Unión	499.6
191	PC Marmol	Mazatlán-Culiacán	434.8
192	Union de Tula	Ent. Santa Cruz-Melaque	525.2
193	Cementera	Hermosillo-Yécora	276.3
194	Jaluco	Manzanillo-Puerto Vallarta	407.5
195	Moyahua	Guadalajara-Zacatecas	0.0
196	El Centenario	La Paz-Ciudad Insurgentes	396.2
197	Los Divisaderos	Cabo San Lucas-La Paz	380.4
198	El Moral	Ent. Tesislán-Ent. Malpaso	497.7
199	La Paz	La Paz-Pichilingue	388.4
200	San Jose el Saladillo	San Luis Potosí-Ent. Arcinas	528.3
201	Cuicatlan	Tehuacán-Huitzo	0.0
202	Santo Tomas	Ensenada-Lázaro Cárdenas	342.3
203	PC Santa Ana	Santa Ana-Sonoita	380.1
204	PC Cuauhtemoc	Chihuahua-Ciudad Cuauhtémoc	411.5
205	La Rosa	Saltillo-Torreón	397.4
206	Hermanas	Monclova-Piedras Negras	505.2
207	Santa Teresa	Saltillo-Monclova	574.3
208	Perico 4	Ciudad Victoria-Monterrey	520.6
209	Espinazo	Monterrey-Castaños	499.0
210	Manuel	Tampico-Ciudad Mante	454.4
211	Allende	Cadereyta-Allende	426.7
212	Tarimbaro	Morelia-Salamanca	521.6
213	Aeropuerto Morelia	Morelia-Zinapécuaro	677.1
214	Aeropuerto	Pachuca-T Cañada Rica	485.6
215	San Rafael	Matehuala-T Puerto México	499.2
216	Nuevo Vivero	Coatzacoalcos-Minatitlán	400.1
217	Cañitas	Villahermosa-Escopetazo	329.5
218	Granja Romo	T Tesislán-T Malpaso	136.2
219	Lo de Guevara	Guadalajara-Tepic	590.5



220	Microondas	Santa Rosalía-Guerrero Negro	606.3
221	Aeropuerto	Topolobampo-Choix	540.2
222	PC El Arenal	Guadalajara-Tepic	582.7
223	San Francisco	Ciudad Obregón-Hermosillo	558.7
224	Tepatitlan	Lagos de Moreno-Zapotlanejo	547.1
225	Los Zapotes	Mazatlán-Culiacán	464.9
226	Benjamin Hill	Hermosillo-Nogales	534.9
227	Campo de Tiro	Hermosillo-Bahía de Kino	508.3

Considerando los valores de esta tabla, al igual que para los grupos C y T-S, se elaboró su gráfica de dispersión y se determinaron las medidas de dispersión previamente mencionadas.

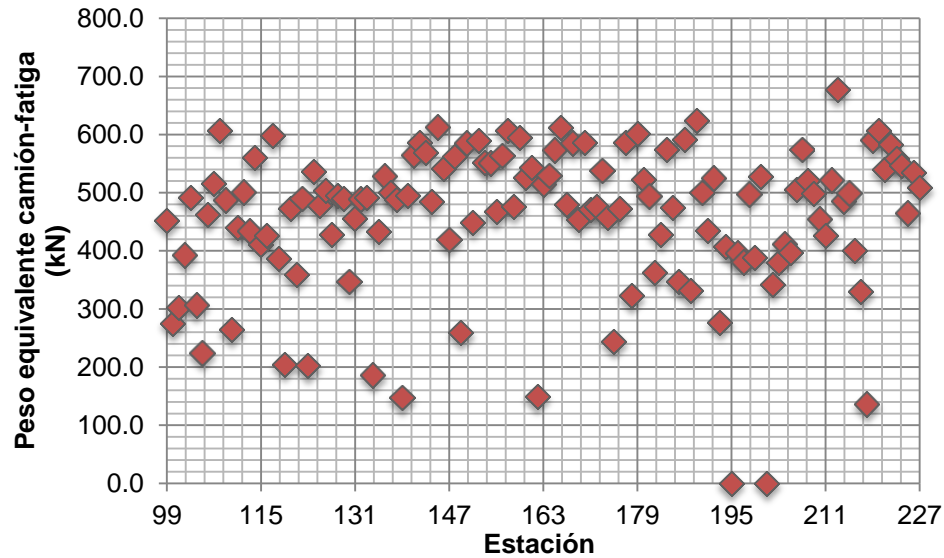


Figura 36. Dispersión de la muestra del grupo T-S-R

Para el grupo T-S-R, integrado por los camiones T2-S1-R2, T3-S1-R2, T3-S2-R2, T3-S2-R3, T3-S3-S2, T3-S2-R4, la media de los pesos equivalentes es  $\mu = 458.1$  kN con una desviación estándar para la muestra de  $\sigma = 125.5$  kN y un coeficiente de variación de  $C_v = 27.4\%$ .

Este grupo es aquél que muestra mayor dispersión de entre los 3 grupos, haciendo totalmente inaccesible la posibilidad de utilizar un único camión para caracterizar al país.

De los anteriores resultados estadísticos y sus respectivas medidas de dispersión, se puede resumir que no es posible determinar un camión característico para cada grupo, que permita evaluar la fatiga en cualquier puente carretero del país.

Dada la naturaleza de los datos, es necesario identificar las zonas que tengan características similares, en cuanto a peso equivalente de los camiones de fatiga.

La zonificación estará dada por lo que se conoce como la teoría de Minería de Datos (Data Mining); en especial, utilizando técnicas de agrupación.

#### **4.2 El algoritmo “K-Means Clustering” y su aplicación a la clasificación de los pesos equivalentes de los camiones de fatiga.**

Como se pudo constatar en el apartado anterior, ya que existe demasiada dispersión en los pesos equivalentes de camiones de fatiga, se propone crear una regionalización de los puntos encuestados mediante la utilización de técnicas de agrupación de datos.

Estas técnicas, contenidas en la Minería de Datos, han sido de gran utilidad para otras ramas de la ciencia y se conocen como: “Análisis de clústeres o clases”<sup>(52)</sup>.

Dentro de estas técnicas de agrupación de datos se encuentran algunos algoritmos como el K-Means y la Aglomeración Jerárquico-Ascendente.

En esta investigación se utilizará el algoritmo K-means, que permite separar una serie de datos en sub-grupos (clústeres) tal que minimice la distancia euclidiana (distancia entre dos puntos de acuerdo con la geometría analítica) de cada punto del subgrupo a su respectivo centroide (tómese por centroide a la media del clúster).

La división por clúster depende únicamente de la cantidad en que se desee dividir la muestra; por tal motivo, se decidió dividir el total de estaciones en varios grupos (4 clústeres, 5 clústeres, 6 clústeres, etc.) tal que permita minimizar el coeficiente de variación.

Este algoritmo ha permitido desarrollar regionalizaciones o zonificaciones en otras áreas de la ciencia <sup>(53)</sup> <sup>(54)</sup> <sup>(55)</sup>, mediante la caracterización de la similaridad entre los datos.

Por tal razón, es de gran importancia para esta investigación la utilización de este algoritmo, ya que se pretende encontrar una posible caracterización de los pesos de los vehículos de fatiga, para las distintas carreteras que fueron encuestadas durante el periodo de 1998 a 2008.

La aplicación del algoritmo se hizo mediante el software para tratamiento estadístico XLSTAT 2010, donde se utilizó de entre los múltiples factores de discriminación de variables, la **Lambda de Wilks**.

La Lambda de Wilks es una medida multivariante de las diferencias entre grupos, donde los valores próximos a cero indican alta diferencia entre sus variables (en este caso los centroides de los clústeres) <sup>(56)</sup>.

A continuación se presentan los resultados encontrados para cada grupo de camiones.

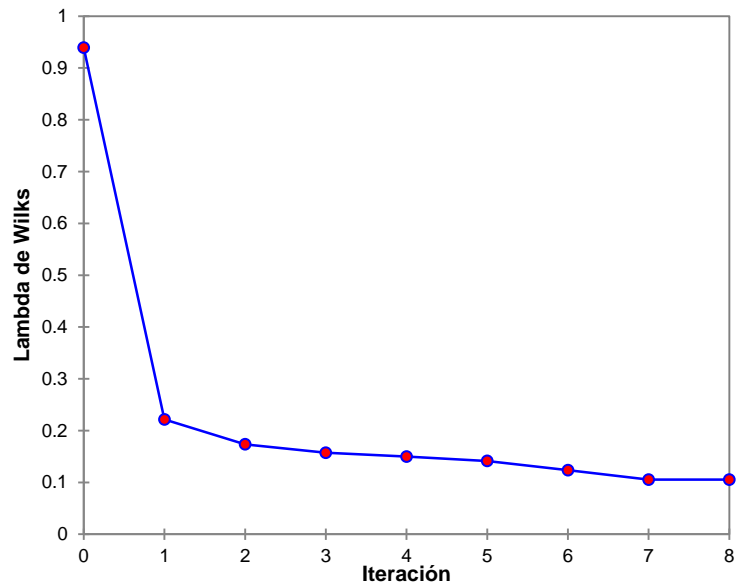
#### **4.2.1 “K-Means” para los pesos equivalentes del camión de fatiga grupo C.**

Para este grupo de vehículos se tomó la consideración de dividir la muestra en 5 partes, de tal manera que se determinarían 5 centroides distintos y para cada centroide se determinaría qué estaciones le corresponden.

De acuerdo con los pesos de los vehículos de fatiga para el grupo C (**Tabla 16**) y aplicando el algoritmo K-Means, se determina qué estación corresponde a cada clúster,

mediante la minimización de la Lambda de Wilks, iterando hasta que el valor que se obtenga sea similar a la iteración anterior y sea tal que se aproxime a cero (**Figura 37**).

Para este grupo, en particular, se obtuvo un valor para la Lambda de Wilks es de  $\lambda = 0.105$ .



**Figura 37.** Minimización de lambda de Wilks para los Clústeres del grupo C

Una vez determinado el valor de la Lambda de Wilks que lleve a la solución para 5 clústeres, se determinó la magnitud de los centroides para cada clúster, cuyos valores son:

**Tabla 19.** Centroides de cada uno de los clústeres del grupo C

Clúster	Grupo C (en kN)
1	119.803
2	86.631
3	104.118
4	178.052
5	136.971

Conocer las estaciones que pertenecen a cada clúster es de gran importancia, dado que el interés en la aplicación de este método, además de reducir la dispersión de los datos, es proponer una posible zonificación con base en los pesos equivalentes.

En la **Tabla 20** se muestran las estaciones que pertenecen a cada uno de los clústeres.

**Tabla 20.** Estaciones que pertenece a cada clúster para el grupo C

Clústeres							
1	2	3	4	5			
99	166	100	102	175	107	108	186
104	168	101	103	176	187	109	200
105	171	106	110	178	221	111	207
112	172	125	114	181		113	213
116	179	127	118	183		115	215
119	180	140	121	194		117	219
122	185	148	126	198		120	222
123	188	149	130	204		128	223
124	189	151	133	205		129	224
131	190	163	136	208		145	225
132	191	167	137	210		152	226
134	192	193	138	211		156	
135	195	201	142	212		157	
139	196	202	143	214		158	
141	197	217	144	216		159	
150	199		146	218		161	
154	203		147	220		169	
155	206		153			173	
160	209		164			177	
162	227		170			182	
165			174			184	

Es importante denotar que el primer clúster tiene la mayor cantidad de observaciones, mientras que el cuarto clúster muestra la menor cantidad de observaciones.

De esta manera, se trabajará con el clúster I, para la determinación del vehículo de fatiga para el grupo C (distribución de carga por eje y distancia entre los ejes).

Ahora bien, si se grafican los pesos de los vehículos de fatiga de cada uno de los clústeres en una gráfica de puntos, se ilustraría:

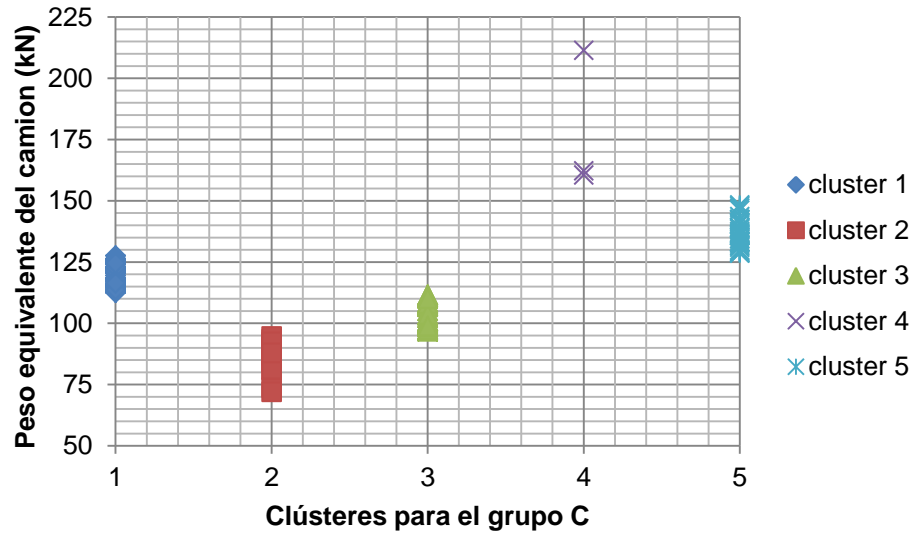


Figura 38. Gráfico de puntos de los diversos clústeres del peso equivalente del grupo C

Además, si se calculan las medidas de dispersión (media, desviación estándar y coeficiente de variación) para cada uno de los clústeres, se tendrá:

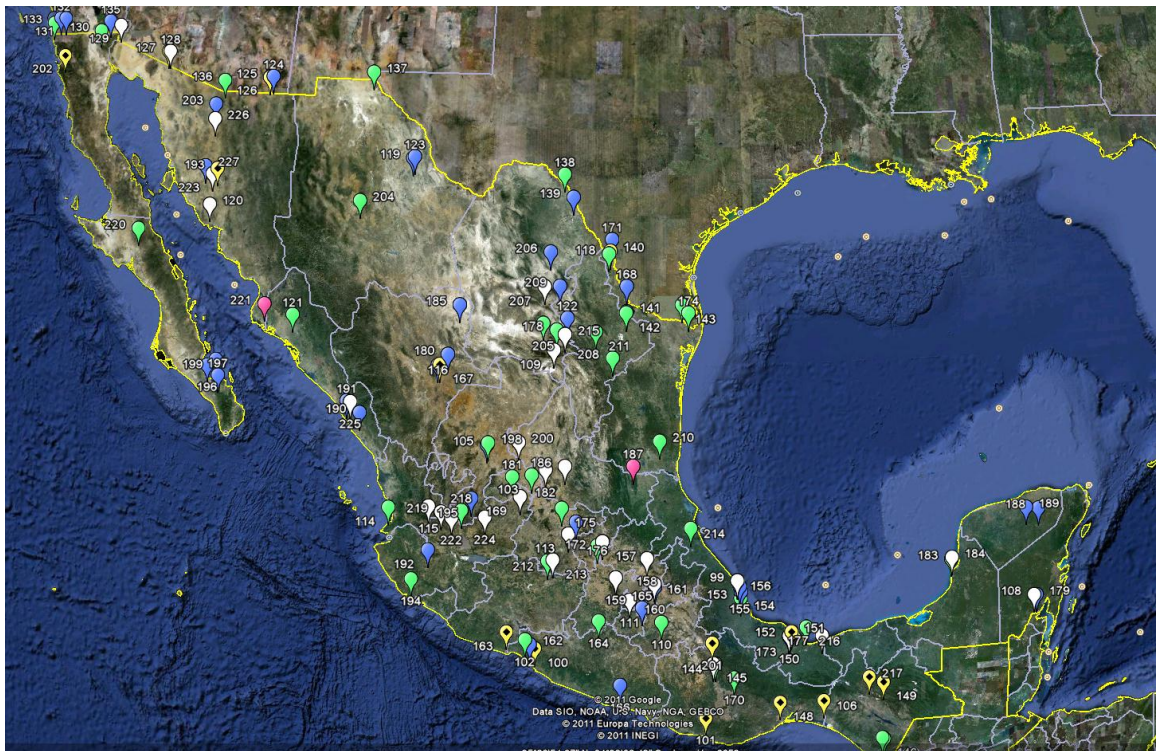
Tabla 21. Medidas de dispersión para los clústeres del grupo C

Medidas de Dispersión	Clústeres				
	1	2	3	4	5
$\mu$	119.8	86.6	104.1	178.1	137.0
$\sigma$	4.6	6.9	5.1	28.9	5.9
$C_v$	3.8%	8.0%	4.9%	16.2%	4.3%

Observando la **Figura 37** y la **Tabla 21**, se puede denotar fácilmente que el cuarto clúster tiene un coeficiente de variación mayor que el 10%. Sin embargo, dado que este clúster cuenta con 3 estaciones de un total de 129, estos datos pueden considerarse no representativos de la muestra; así pues, se trabajará con 4 clústeres dentro del grupo de vehículos C.

Es importante decir que de ahora en adelante se conocerá a cada clúster como clase y los números serán cambiados por letras; así que el primer clúster se conocerá como Clase A, el segundo clúster se nombrará Clase B y así, sucesivamente.

Es de gran importancia observar la distribución de las estaciones para el grupo C, de acuerdo con las clases obtenidas en el mapa de la República Mexicana, con la finalidad identificar la zonificación del país. (**Figura 39**).



**Figura 39.** Mapa de la República Mexicana con las estaciones que pertenecen a cada clase del grupo C.

En la **Figura 39** no es posible identificar con facilidad un patrón de comportamiento en las características de peso equivalente en el mapa de la República Mexicana, por esto es mejor realizar esta zonificación con base en las carreteras federales que fueron encuestadas. La clasificación de las carreteras está dada de la siguiente manera. (**Tabla 22**)

**Tabla 22.** Clasificación de las carreteras con base en los pesos equivalentes del grupo C.

Clase	Estación	Nombre Estación	Carretera
A	99	La antigua	Cardel-Veracruz
	104	Ojuelos	Ojuelos-Aguascalientes
	105	Malpaso	Guadalajara-Zacatecas
	112	El Jiadhi	La Colonia-Portezuelo
	116	Guadalupe Victoria	Durango-Torreón
	119	Coyame	Chihuahua-Ojinaga
	122	Monterrey	Saltillo-Monterrey
	123	Coyame	Chihuahua-Ojinaga
	124	Fitosanitaria	Janos-Agua Prieta
	131	Tecate	Mexicali-Tijuana
	132	Tijuana	Tecate-Tijuana
	134	Playas de Tijuana	Tijuana-Ensenada
	135	Ejido Monterrey	Sonoíta-Mexicali
	139	Aduana	Monclova-Piedras Negras
	141	General Bravo	Monterrey-Reynosa
	150	Cruz del Milagro	Ciudad Alemán-Sayula
	154	Canal SARH	Córdoba-Veracruz
	155	El Pando	Jalapa-Veracruz
	160	San Mateo	México-Puebla
	162	Parotales	Ciudad Altamirano-TC(Zihuatanejo-La Mira)
	165	Amayuca	Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros
	166	La Caridad	Las Cruces-Pinotepa Nacional
	168	Ciudad Mier	Monterrey-Ciudad Mier
	171	Herradura	Piedras Negras-Nuevo Laredo
	172	Santa Rosa	Querétaro-San Luis Potosí
	179	Santa Elena	Francisco Escárcega-Chetumal
	180	PC Yerbaniz	Durango-Gómez Palacio
	185	Casa Blanca	Gómez Palacio-Jiménez
	188	Ebtun	Mérida-Puerto Juárez
	189	PC Piste	Kantuníl-Cancún
190	La Granja I	Durango-Villa Unión	
191	PC Marmol	Mazatlán-Culiacán	
192	Union de Tula	Ent. Santa Cruz-Melaque	
195	Moyahua	Guadalajara-Zacatecas	
196	El Centenario	La Paz-Ciudad Insurgentes	



A	153	Colonia Ejidal	Córdoba-Entronque Boticaria
	164	Teloloapan	Iguala-Ciudad Altamirano
	170	Las Cruces	Oaxaca-Tehuantepec
	174	Naval	Ciudad Victoria-Matamoros
	197	Los Divisaderos	Cabo San Lucas-La Paz
	199	La Paz	La Paz-Pichilingue
	203	PC Santa Ana	Santa Ana-Sonoita
	206	Hermanas	Monclova-Piedras Negras
	209	Espinazo	Monterrey-Castaños
	227	Campo de Tiro	Hermosillo-Bahía de Kino
B	100	Coacoyul	Acapulco-Zihuatanejo
	101	Puerto Escondido	Pinotepa Nacional-Salina Cruz
	106	Poste Rojo	Tapanatepec-Talismán
	125	Cereso	Moctezuma-Agua Prieta
	127	Lienzo Charro	Sonoíta-Puerto Peñasco
	140	El Oasis	Monterrey-Nuevo Laredo
	148	Marina	Coatzacoalcos-Salina Cruz
	149	Rancho Nuevo	Tuxtla Gutiérrez-Ciudad Cuauhtémoc
	151	Apaxtla	Paso del Toro-Acayucan
	163	Guacamayas	Zihuatanejo-La Mira
	167	Guadalupe Victoria	Durango-Cuencamé
	193	Cementería	Hermosillo-Yécora
	201	Cuicatlan	Tehuacán-Huitzo
	202	Santo Tomas	Ensenada-Lázaro Cárdenas
217	Cañitas	Villahermosa-Escopetazo	
C	102	CECYTEM	Zihuatanejo-La Mira
	103	San Pedro	Toluca-Zitácuaro
	110	Tehuiztingo	Puebla-Huajuapán
	114	El Monteón	Tepic-Puerto Vallarta
	118	Nuevo Laredo	Monterrey-Nuevo Laredo
	121	Antigua Caseta	Culiacán-Los Mochis
	126	Entronque Moctezuma	Agua Prieta-Ímuris
	130	El Fato	Mexicali-San Felipe
	133	Plan Libertador	Tijuana-San Miguel
	136	El 21	Hermosillo-Nogales
137	Samalayuca	El Sueco-Ciudad Juárez	

C	138	La Muralla	Morelos-Ciudad Acuña
	142	General Bravo	Monterrey-Reynosa
	143	Aduana Capote	Matamoros-Reynosa
	144	Magdalena	Huajuapán de León-Oaxaca
	146	23 de Enero A	Arriaga-Huixtla
	147	23 de Enero B	Tapanatepec-Talismán
	175	Tequisquiapan	Celaya-Dolores Hidalgo
	176	La Estancia	Toluca-Palmillas
	178	La Colorada	T Morelos-Salttillo
	181	CS Palo Alto	Ojuelos-Aguascalientes
	183	Seybaplaya	Ciudad del Carmen-Campeche
	194	Jaluco	Manzanillo-Puerto Vallarta
	198	El Moral	Ent. Tesislán-Ent. Malpaso
	204	PC Cuauhtemoc	Chihuahua-Ciudad Cuauhtémoc
	205	La Rosa	Salttillo-Torreón
	208	Perico 4	Ciudad Victoria-Monterrey
	210	Manuel	Tampico-Ciudad Mante
	211	Allende	Cadereyta-Allende
	212	Tarimbaro	Morelia-Salamanca
	214	Aeropuerto	Pachuca-T Cañada Rica
216	Nuevo Vivero	Coatzacoalcos-Minatitlán	
218	Granja Romo	T Tesislán-T Malpaso	
220	Microondas	Santa Rosalía-Guerrero Negro	
D	108	Hauy Pix	Escárcega-Chetumal
	109	La Angostura	Concepción del Oro-Salttillo
	111	Yautepec	Cuernavaca-Cuautlixco
	113	Apaseo	Apaseo el Alto-Celaya
	115	Jalisco	Guadalajara-Tepic
	117	Corralche	Campeche-Mérida
	120	Guaymas	Ciudad Obregón-Hermosillo
	128	Sonoita	Santa Ana-Sonoíta
	129	Las Adelitas	Sonoíta-Mexicali
	145	Hutzo	Cuacnopalan-Oaxaca (cuota)
	152	Caseta Sayula	La Tinaja-Cosoleacaque (cuota)
	156	Campo de Tiro	Poza Rica-Veracruz
157	El Refugio	Portezuelo-Palmillas	

D	158	Singuilucan	Venta de Carpio-TC(Pachuca-Tulancingo)-Huixtla
	159	Las Rajas	Naucalpan-Toluca
	161	Caseta San Martin	México-Puebla
	169	Lagos de Moreno	León-Aguascalientes
	173	Rancho Santa Elena	Coatzacoalcos-Salina Cruz
	177	PC las Choapas	Las Choapas-Ocozocoautla
	182	Tepetate	San Luis Potosí-Lagos de Moreno
	184	PC Seybaplaya	Champotón-Campeche
	186	Santo Domingo	Ciudad Valles-San Luis Potosí
	200	San Jose el Saladillo	San Luis Potosí-Ent. Arcinas
	207	Santa Teresa	Saltillo-Monclova
	213	Aeropuerto Morelia	Morelia-Zinapécuaro
	215	San Rafael	Matehuala-T Puerto México
	219	Lo de Guevara	Guadalajara-Tepic
	222	PC El Arenal	Guadalajara-Tepic
	223	San Francisco	Ciudad Obregón-Hermosillo
224	Tepatitlan	Lagos de Moreno-Zapotlanejo	
225	Los Zapotes	Mazatlán-Culiacán	
226	Benjamin Hill	Hermosillo-Nogales	

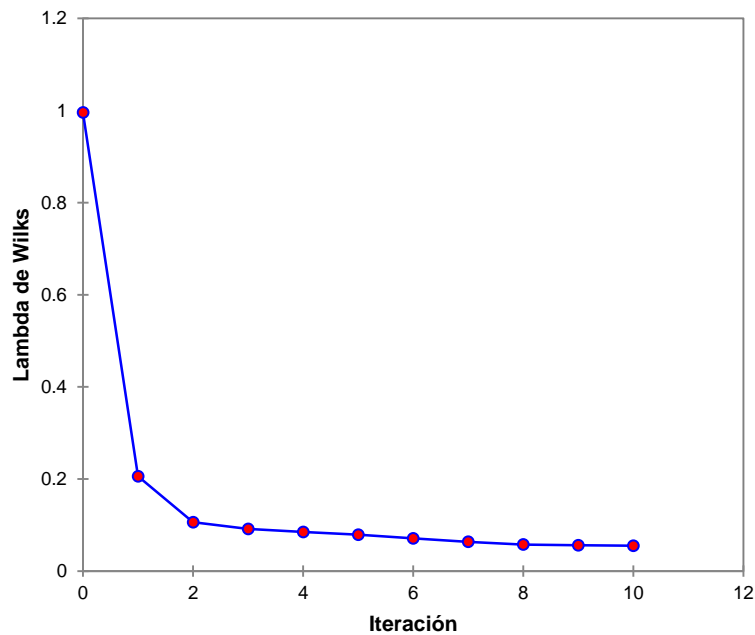
Con los centroides determinados para cada categoría mediante este algoritmo y el peso equivalente del camión de fatiga para el grupo C de todo el conjunto de estaciones entre 1998 y 2008, se cree que será posible definir un factor tal que permita evaluar la fatiga para las diversas carreteras del país. Este centroide será utilizado como peso equivalente para cada una de las clases. Sin embargo, antes de utilizar el centroide como peso equivalente de cada clase es necesario demostrar que este valor se aproxima al peso equivalente obtenido en la **Ecuación (13)** para cada clase.

La demostración en la que el peso equivalente de una clase es igual al centroide de su respectiva clase se presenta en la sección 4.3 de este capítulo.

#### 4.2.2 “K-Means” para los pesos equivalentes del camión de fatiga grupo T-S

Para este grupo de vehículos se consideró dividir el total de los datos en 6 partes. Son entonces 6 centroides distintos y para centroide se determinaron las estaciones que le corresponden.

Con los pesos de los vehículos de fatiga para el grupo T-S (tabla 17), y aplicando el algoritmo K-Means, se determinó qué estación corresponde a cada clúster; de igual manera que para el grupo C, mediante la minimización de la Lambda de Wilks, cuyo valor para este grupo de vehículos es  $\lambda = 0.056$  (**Figura 40**).



**Figura 40.** Minimización de Lambda de Wilks para los clústeres del grupo T-S

Es importante notar que para el grupo T-S la convergencia en la solución es mucho más uniforme que la solución para el grupo C (**Figura 40**), además de que la Lambda de Wilks

presenta un valor bastante próximo al cero, caso contrario al grupo C, lo cual se debe a la cantidad de subdivisiones propuestas (para este caso 6 clústeres).

Una vez obtenido el valor de la Lambda de Wilks que aporte la solución para la cantidad de clústeres propuesta, se determinaron las magnitudes de los centroides para cada clúster. Los valores de dichos centroides son:

**Tabla 23.** Centroides de cada uno de los clústeres del grupo T-S

Clúster	Grupo T-S (en kN)
1	313.091
2	361.483
3	337.709
4	262.463
5	288.961
6	406.679

Al igual que para el grupo de vehículos C, es importante conocer qué estaciones pertenecen a cada clúster, dado que la finalidad de la aplicación de este algoritmo es la de crear una zonificación, con base en los pesos equivalentes de los vehículos que componen el grupo T-S. En la **Tabla 24** se muestran las estaciones que pertenecen a cada uno de los clústeres.

**Tabla 24.** Estaciones que pertenecen a cada clúster para el grupo T-S.

Clústeres						
1	2	3	4	5	6	
99	186	100	101	104	106	108
102	192	107	112	118	123	111
103	195	117	116	119	130	148
105	197	124	125	121	136	152
109	199	141	126	127	137	187
110	206	142	128	134	174	
113	208	143	129	167	176	
114	212	145	144	171	181	
115	220	150	146	178	183	
120	223	154	149	180	185	
122	224	156	153	188	191	
131	225	157	159	201	196	
132	226	158	160	202	203	
133		164	161	205	204	
135		165	162	210	209	
138		166	169	211	214	
139		168	177	227	215	
140		170	184		216	
147		179	190		217	
151		189	193			
155		200	194			
163		207	198			
172		213	218			
173			219			
175			221			
182			222			

Es posible notar en la tabla 24 que el Primer clúster tiene la mayor cantidad de observaciones; mientras que el sexto clúster muestra la menor cantidad de observaciones. De esta manera, se trabajará con el clúster 1, para la determinación del vehículo de fatiga para el grupo T-S (distribución de carga por eje y distancia entre los ejes).

Si se grafican los pesos de los vehículos de fatiga de cada uno de los clústeres en una gráfica de puntos, se ilustraría:

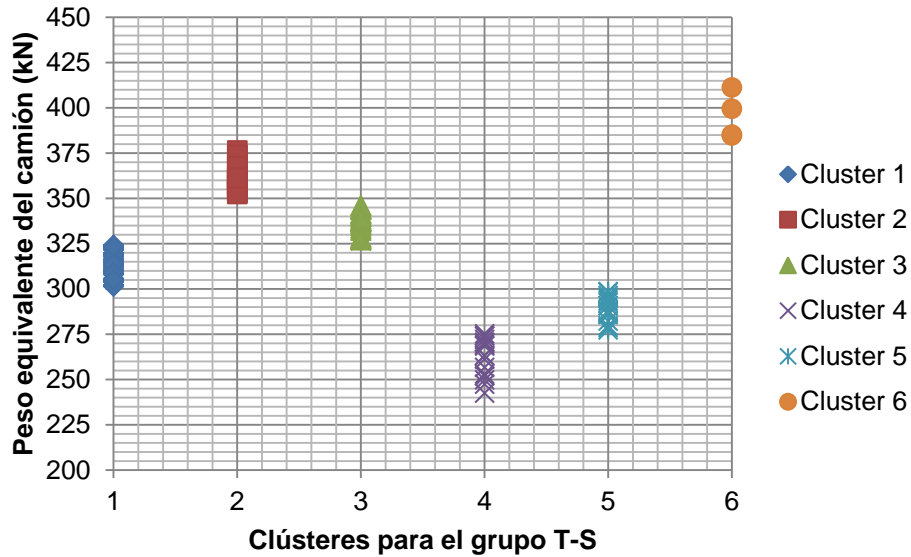


Figura 41. Gráfico de puntos de los diversos clústeres del peso equivalente del grupo T-S

Además, si se calculan las medidas de dispersión (media, desviación estándar y coeficiente de variación) para cada uno de los clúster, se tendrá:

Tabla 25. Medidas de dispersión para los clústeres del grupo T-S

Medidas de dispersión	Clústeres					
	1	2	3	4	5	6
$\mu$	313.1	361.5	337.7	262.5	289.0	406.7
$\sigma$	7.0	7.1	5.7	10.4	6.4	27.9
$Cv$	2.3%	2.0%	1.7%	4.0%	2.2%	6.9%

Observando la **Figura 41** y la **Tabla 25**, es posible denotar fácilmente que el sexto clúster tiene un coeficiente de variación mayor que todos los de la muestra. Sin embargo, ya que la muestra de las 129 estaciones, para este grupo en particular, presenta datos bastante similares, la variación para las subcategorías o clústeres también es similar.

Con lo anterior, puede resumirse que es posible utilizar los 6 clústeres, no importando si existen pocos datos, puesto que todos los coeficientes de variación son menores que el 10%.

Conózcase ahora a cada clúster como clase y nombrémoslas de igual modo que se hizo para el grupo C, siendo el clúster 1 conocido como clase A, al clúster 2 como clase B, etc.

De igual modo que para el grupo C, es de gran relevancia observar la distribución de las estaciones para el grupo T-S, de acuerdo con las clases obtenidas en el mapa de la República Mexicana, con la finalidad identificar el patrón de comportamiento, por región del país, para este tipo de vehículos. (Figura 42).

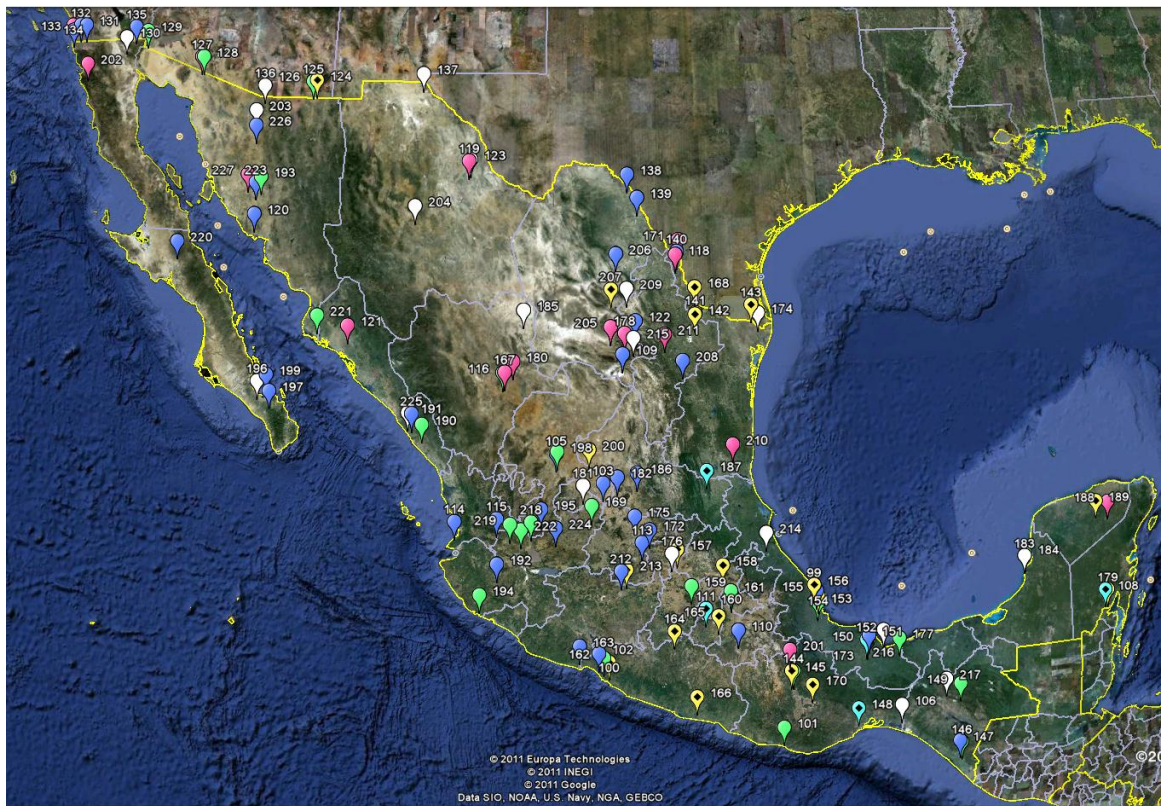


Figura 42. Mapa de la República Mexicana con las estaciones que pertenecen a cada clase para el grupo T-S.

Al igual que el grupo de camiones C, el grupo T-S no presenta un patrón de comportamiento regional fácil de identificar; de tal manera que es mucho más sencillo caracterizar las clases con base en las carreteras. En la siguiente tabla se presenta esta clasificación donde, de ahora en adelante, se conocerá a cada clúster como clase.



**Tabla 26.** Clasificación de las carreteras con base en los pesos equivalentes del grupo T-S

Clase	Estación	Nombre Estación	Carretera
A	99	La Antigua	Cardel-Veracruz
	102	CECYTEM	Zihuatanejo-La Mira
	103	San Pedro	Toluca-Zitácuaro
	105	Malpaso	Guadalajara-Zacatecas
	109	La Angostura	Concepción del Oro-Saltillo
	110	Tehuizingo	Puebla-Huajuapán
	113	Apaseo	Apaseo el Alto-Celaya
	114	El Monteón	Tepic-Puerto Vallarta
	115	Jalisco	Guadalajara-Tepic
	120	Guaymas	Ciudad Obregón-Hermosillo
	122	Monterrey	Saltillo-Monterrey
	131	Tecate	Mexicali-Tijuana
	132	Tijuana	Tecate-Tijuana
	133	Plan Libertador	Tijuana-San Miguel
	135	Ejido Monterrey	Sonoíta-Mexicali
	138	La Muralla	Morelos-Ciudad Acuña
	139	Aduana	Monclova-Piedras Negras
	140	El Oasis	Monterrey-Nuevo Laredo
	147	23 de Enero B	Tapanatepec-Talismán
	151	Apaxtla	Paso del Toro-Acayucan
	155	El Pando	Jalapa-Veracruz
	163	Guacamayas	Zihuatanejo-La Mira
	172	Santa Rosa	Querétaro-San Luis Potosí
173	Rancho Santa Elena	Coatzacoalcos-Salina Cruz	
175	Tequisquiapan	Celaya-Dolores Hidalgo	
182	Tepetate	San Luis Potosí-Lagos de Moreno	
186	Santo Domingo	Ciudad Valles-San Luis Potosí	

A	192	Union de Tula	Ent. Santa Cruz-Melaque
	195	Moyahua	Guadalajara-Zacatecas
	197	Los Divisaderos	Cabo San Lucas-La Paz
	199	La Paz	La Paz-Pichilingue
	206	Hermanas	Monclova-Piedras Negras
	208	Perico 4	Ciudad Victoria-Monterrey
	212	Tarimbaro	Morelia-Salamanca
	220	Microondas	Santa Rosalía-Guerrero Negro
	223	San Francisco	Ciudad Obregón-Hermosillo
	224	Tepatitlan	Lagos de Moreno-Zapotlanejo
	225	Los Zapotes	Mazatlán-Culiacán
	226	Benjamin Hill	Hermosillo-Nogales
B	100	Coacoyul	Acapulco-Zihuatanejo
	107	El Rodeo	San Luis Potosí-Zacatecas
	117	Corralche	Campeche-Mérida
	124	Fitosanitaria	Janos-Agua Prieta
	141	General Bravo	Monterrey-Reynosa
	142	General Bravo	Monterrey-Reynosa
	143	Aduana Capote	Matamoros-Reynosa
	145	Hutzo	Cuacnopalan-Oaxaca (cuota)
	150	Cruz del Milagro	Ciudad Alemán-Sayula
	154	Canal SARH	Córdoba-Veracruz
	156	Campo de Tiro	Poza Rica-Veracruz
	157	El Refugio	Portezuelo-Palmillas
	158	Singuilucan	Venta de Carpio-TC(Pachuca-Tulancingo)-Huixtla
	164	Teloloapan	Iguala-Ciudad Altamirano
	165	Amayuca	Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros
	166	La Caridad	Las Cruces-Pinotepa Nacional
	168	Ciudad Mier	Monterrey-Ciudad Mier
	170	Las Cruces	Oaxaca-Tehuantepec
	179	Santa Elena	Francisco Escárcega-Chetumal
	189	PC Piste	Kantuníl-Cancún
200	San Jose el Saladillo	San Luis Potosí-Ent. Arcinas	
207	Santa Teresa	Saltillo-Monclova	
213	Aeropuerto Morelia	Morelia-Zinapécuaro	

C	101	Puerto Escondido	Pinotepa Nacional-Salina Cruz
	112	El Jiadhi	La Colonia-Portezuelo
	116	Guadalupe Victoria	Durango-Torreón
	125	Cereso	Moctezuma-Agua Prieta
	126	Entronque Moctezuma	Agua Prieta-Imuris
	128	Sonoita	Santa Ana-Sonoíta
	129	Las Adelitas	Sonoíta-Mexicali
	144	Magdalena	Huajuapán de León-Oaxaca
	146	23 de Enero A	Arriaga-Huixtla
	149	Rancho Nuevo	Tuxtla Gutiérrez-Ciudad Cuauhtémoc
	153	Colonia Ejidal	Córdoba-Entronque Botকারিয়া
	159	Las Rajas	Naucalpan-Toluca
	160	San Mateo	México-Puebla
	161	Caseta San Martín	México-Puebla
	162	Parotales	Ciudad Altamirano-TC(Zihuatanejo-La Mira)
	169	Lagos de Moreno	León-Aguascalientes
	177	PC las Choapas	Las Choapas-Ocozacoautla
	184	PC Seybaplaya	Champotón-Campeche
	190	La Granja I	Durango-Villa Unión
	193	Cementería	Hermosillo-Yécora
	194	Jaluco	Manzanillo-Puerto Vallarta
	198	El Moral	Ent. Tesislán-Ent. Malpaso
218	Granja Romo	T Tesislán-T Malpaso	
219	Lo de Guevara	Guadalajara-Tepic	
221	Aeropuerto	Topolobampo-Choix	
222	PC El Arenal	Guadalajara-Tepic	
D	104	Ojuelos	Ojuelos-Aguascalientes
	118	Nuevo Laredo	Monterrey-Nuevo Laredo
	119	Coyame	Chihuahua-Ojinaga
	121	Antigua Caseta	Culiacán-Los Mochis
	127	Lienzo Charro	Sonoíta-Puerto Peñasco
	134	Playas de Tijuana	Tijuana-Ensenada
	167	Guadalupe Victoria	Durango-Cuencamé
	171	Herradura	Piedras Negras-Nuevo Laredo
	178	La Colorada	T Morelos-Saltillo
	180	PC Yerbaniz	Durango-Gómez Palacio
	188	Ebtun	Mérida-Puerto Juárez
	201	Cuicatlan	Tehuacán-Huitzo

D	202	Santo Tomas	Ensenada-Lázaro Cárdenas
	205	La Rosa	Saltillo-Torreón
	210	Manuel	Tampico-Ciudad Mante
	211	Allende	Cadereyta-Allende
	227	Campo de Tiro	Hermosillo-Bahía de Kino
E	106	Poste Rojo	Tapanatepec-Talismán
	123	Coyame	Chihuahua-Ojinaga
	130	El Fato	Mexicali-San Felipe
	136	El 21	Hermosillo-Nogales
	137	Samalayuca	El Sueco-Ciudad Juárez
	174	Naval	Ciudad Victoria-Matamoros
	176	La Estancia	Toluca-Palmillas
	181	CS Palo Alto	Ojuelos-Aguascalientes
	183	Seybaplaya	Ciudad del Carmen-Campeche
	185	Casa Blanca	Gómez Palacio-Jiménez
	191	PC Marmol	Mazatlán-Culiacán
	196	El Centenario	La Paz-Ciudad Insurgentes
	203	PC Santa Ana	Santa Ana-Sonoita
	204	PC Cuauhtemoc	Chihuahua-Ciudad Cuauhtémoc
	209	Espinazo	Monterrey-Castaños
	214	Aeropuerto	Pachuca-T Cañada Rica
215	San Rafael	Matehuala-T Puerto México	
216	Nuevo Vivero	Coatzacoalcos-Minatitlán	
217	Cañitas	Villahermosa-Escopetazo	
F	108	Hauy Pix	Escárcega-Chetumal
	111	Yautepec	Cuernavaca-Cuautlixco
	148	Marina	Coatzacoalcos-Salina Cruz
	152	Caseta Sayula	La Tinaja-Cosoleacaque (cuota)
	187	Gustavo Garmendia	Ciudad Valles-Ciudad Victoria

Con los centroides determinados para cada categoría mediante este algoritmo y el peso equivalente del camión de fatiga para el grupo T-S, de todo el conjunto de estaciones entre

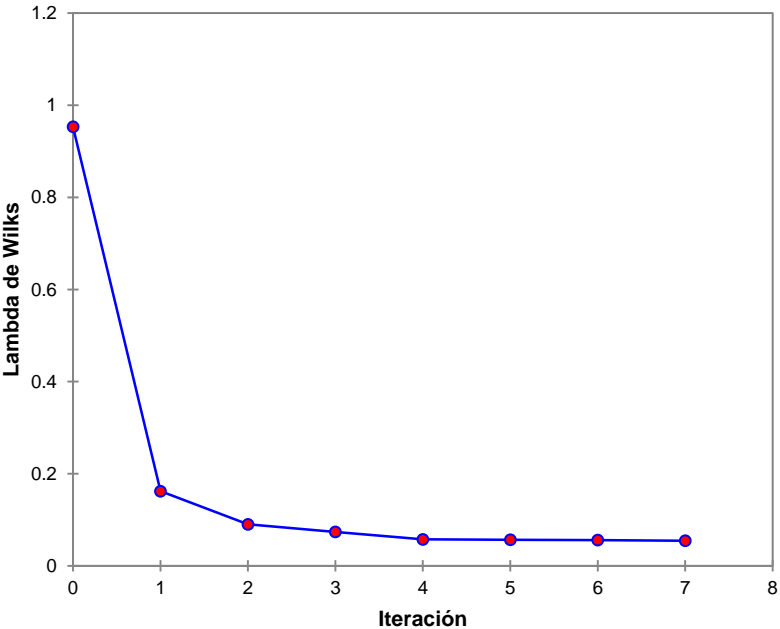
1998 y 2008, se podrá definir un factor tal que permita evaluar la fatiga para las diversas zonas. Sin embargo, al igual que en el Grupo C esta afirmación debe demostrarse.

### 4.2.3 “K-Means” para los pesos equivalentes del camión de fatiga del grupo T-S-R

Como se hizo con los grupos C y T-S, el grupo T-S-R también debe ser subdividido.

Para la división de este grupo se propusieron 6 clústeres, en los cuales se determinaron los respectivos centroides.

Tomando en consideración los pesos de los vehículos de fatiga para el grupo T-S-R (**Tabla 18**) se utilizó el algoritmo K-Means, cuyo parámetro de discriminación fue la Lambda de Wilks. Para esta categoría, la Lambda de Wilks presentó un valor de  $\lambda = 0.055$  (**Figura43**).



**Figura 43.** Minimización de la Lambda de Wilks para los clústeres del grupo T-S-R

De acuerdo con la **Figura 43**, es posible notar que para el grupo T-S-R la convergencia en la solución es uniforme, al igual que la del grupo T-S, e igualmente presenta un valor bastante cercano a cero.

Ya obtenida la Lambda de Wilks, se determinaron las magnitudes de los centroides para cada clúster. Los valores de dichos centroides son:

**Tabla 27.** Centroides de cada uno de los clústeres del grupo T-S-R

Clúster	Grupo T-S-R (en kN)
1	481.895
2	297.971
3	406.513
4	538.496
5	596.469
6	128.154

Es vital conocer las estaciones que pertenecen a cada clúster, dado que la intención es zonificar las carreteras de acuerdo con los pesos equivalentes del grupo T-S-R; de igual modo como se hizo con los otros 2 grupos. En la **Tabla 28** se muestran las estaciones que pertenecen a cada una de los clústeres.

En la **Tabla 28** es posible notar que el primer clúster presenta la mayor cantidad de observaciones, mientras que el sexto clúster muestra la menor. De esta manera se puede concluir que el clúster 1 servirá para la determinación del vehículo de fatiga para el grupo T-S-R (distribución de carga por eje y distancia entre los ejes).

**Tabla 28.** Estaciones que pertenecen a cada clúster, para el grupo T-S-R

Clústeres						
1	2	3	4	5	6	
99	172	100	102	107	108	119
103	174	101	111	114	117	123
106	176	104	113	124	142	134
109	181	105	115	136	143	139
112	185	110	116	141	145	162
120	190	130	118	146	150	195
122	198	149	121	148	152	201
125	206	175	127	153	157	218
126	209	178	135	154	159	
128	210	186	147	156	165	
129	214	188	182	160	166	
131	215	193	183	161	168	
132	225	202	191	163	170	
133	227	217	194	164	177	
137			196	173	179	
138			197	180	184	
140			199	192	187	
144			203	200	189	
151			204	208	207	
155			205	212	213	
158			211	221	219	
167			216	223	220	
169				224	222	
171				226		

Ahora bien, si se grafican los pesos de los vehículos de fatiga de cada uno de los clústeres en una gráfica de puntos, se ilustraría de la siguiente manera:

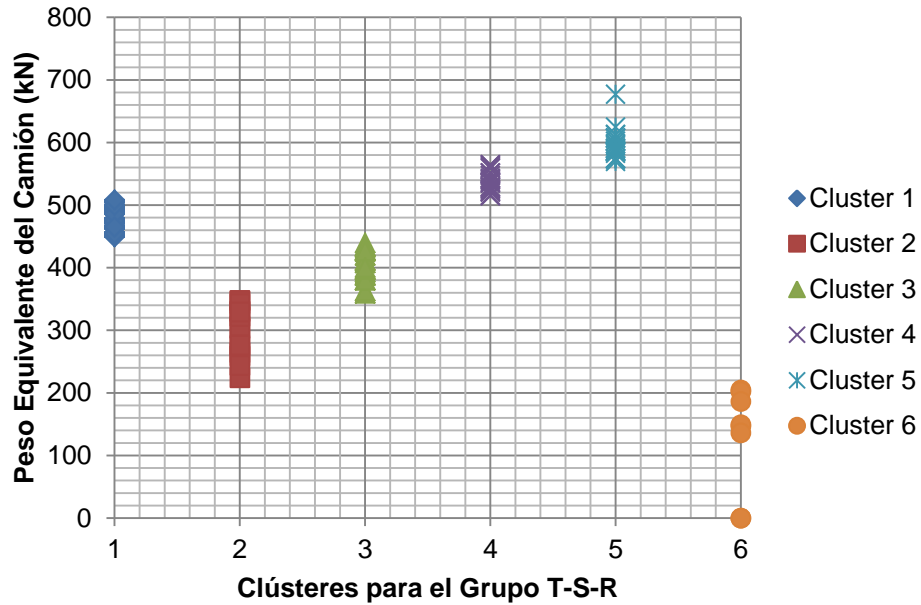


Figura 44. Gráfico de puntos de los diversos clústeres del peso equivalente del grupo T-S-R

Calculando las medidas de dispersión (media, desviación estándar y coeficiente de variación) para cada uno de los clúster, se tendrán:

Tabla 29. Medidas de dispersión para los clústeres del grupo T-S-R

Medidas de Dispersión	Clústeres					
	1	2	3	4	5	6
$\mu$	481.9	298.0	406.5	538.5	596.5	128.2
$\sigma$	17.0	40.9	23.8	15.9	22.6	83.2
$C_v$	3.5%	13.7%	5.9%	3.0%	3.8%	64.9%

Observando la **Figura 44** y la **Tabla 29**, es posible denotar fácilmente que el clúster 6 tiene un coeficiente de variación bastante elevado. Esto se debe a las estaciones que presentan cero vehículos encuestados, de este tipo. Además, siendo este clúster el que presenta menor cantidad de datos, esa cantidad puede despreciarse.



Otro dato interesante es el que se presenta en el clúster 2, que muestra un coeficiente de variación del 13.7%. Aunque este clúster presenta una variación mayor que el 10%, lo cual contradice el planteamiento, aun así se ha decidido trabajar con él.

Lo anterior se debe a que no es conveniente dividir en más subcategorías, puesto que si se dividiese el grupo en 7 clústeres distintos, aún se presentaría un coeficiente de variación, para este clúster, del 12.7%, y ésta es una reducción no significativa.

Otra razón por la que es inaceptable que el clúster 2 sea despreciado, es que presenta una cantidad de 14 observaciones, lo que representa aproximadamente un 10% del total de las estaciones encuestadas.

Si se denota ahora a cada clúster de igual manera como se hizo para los grupos anteriores, se conocería al primer clúster como Clase A y así sucesivamente.

Puede concluirse que existirán 5 clases para este grupo, dado que se tiene una clase que será despreciada por la poca cantidad de datos con la que cuenta y la gran cantidad de dispersión en ella, lo que hace que sea esta clase no sea representativa.

Elegida la cantidad de clases, es importante observar la distribución de las estaciones para el grupo T-S-R en el mapa de la República Mexicana, con la misma finalidad que se hizo para los grupos C y T-S. (**Figura 45**).

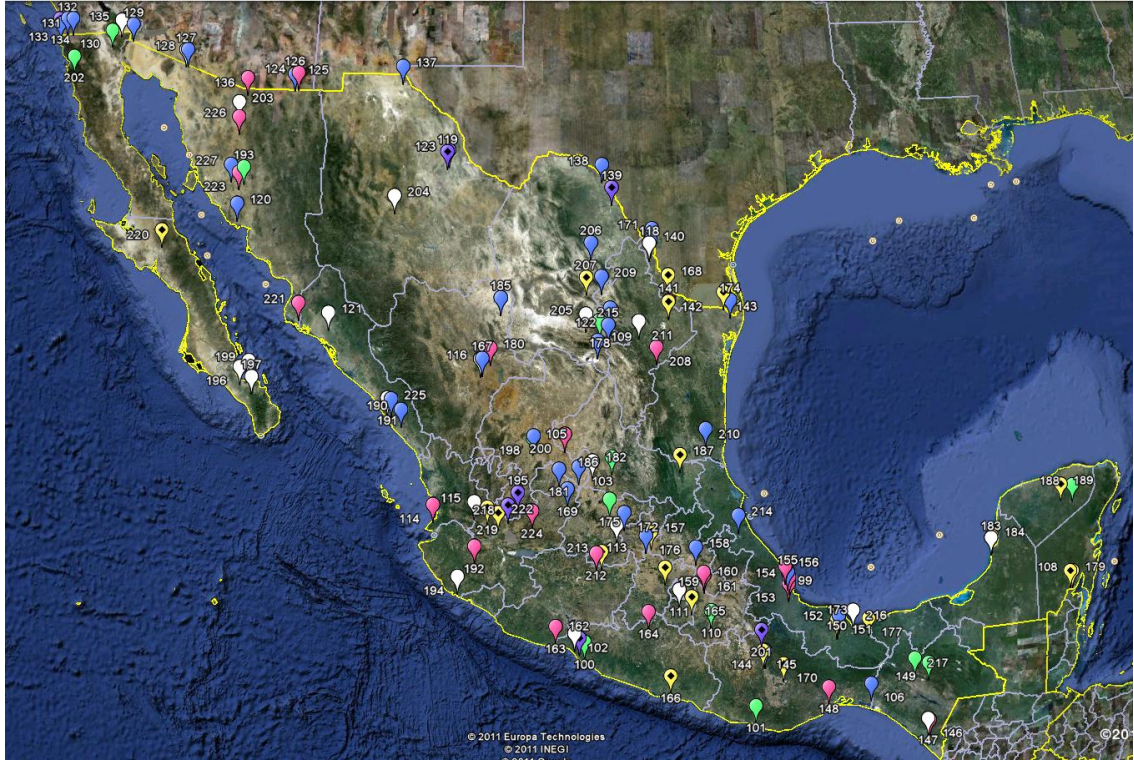


Figura 45. Mapa de la República Mexicana con las estaciones que pertenecen a cada clase, para el grupo T-S-R

Puesto que es difícil visualizar alguna posible distribución regional adecuada para los diversos Estados, será mejor caracterizar las carreteras nacionales en función del peso equivalente de los vehículos.

A continuación se presenta la caracterización, de acuerdo con los datos obtenidos en la aplicación del algoritmo K-Means.

**Tabla 30.** Clasificación de las carreteras con base en los pesos equivalentes del grupo T-S-R

Clase	Estación	Nombre Estación	Carretera
A	99	La antigua	Cardel-Veracruz
	103	San Pedro	Toluca-Zitácuaro
	106	Poste Rojo	Tapanatepec-Talismán
	109	La Angostura	Concepción del Oro-Saltillo
	112	El Jiadhi	La Colonia-Portezuelo
	120	Guaymas	Ciudad Obregón-Hermosillo
	122	Monterrey	Saltillo-Monterrey
	125	Cereso	Moctezuma-Agua Prieta
	126	Entronque Moctezuma	Agua Prieta-Ímuris
	128	Sonoita	Santa Ana-Sonoita
	129	Las Adelitas	Sonoita-Mexicali
	131	Tecate	Mexicali-Tijuana
	132	Tijuana	Tecate-Tijuana
	133	Plan Libertador	Tijuana-San Miguel
	137	Samalayuca	El Sueco-Ciudad Juárez
	138	La Muralla	Morelos-Ciudad Acuña
	140	El Oasis	Monterrey-Nuevo Laredo
	144	Magdalena	Huajuapán de León-Oaxaca
	151	Apaxtla	Paso del Toro-Acayucan
	155	El Pando	Jalapa-Veracruz
	158	Singuilucan	Venta de Carpio-TC(Pachuca-Tulancingo)-Huixtla
	167	Guadalupe Victoria	Durango-Cuencamé
	171	Herradura	Piedras Negras-Nuevo Laredo
	172	Santa Rosa	Querétaro-San Luis Potosí
	174	Naval	Ciudad Victoria-Matamoros
	176	La Estancia	Toluca-Palmillas
	181	CS Palo Alto	Ojuelos-Aguascalientes
	185	Casa Blanca	Gómez Palacio-Jiménez
190	La Granja I	Durango-Villa Unión	
198	El Moral	Ent. Tesistán-Ent. Malpaso	
206	Hermanas	Monclova-Piedras Negras	
209	Espinazo	Monterrey-Castaños	
210	Manuel	Tampico-Ciudad Mante	

A	214	Aeropuerto	Pachuca-T Cañada Rica
	215	San Rafael	Matehuala-T Puerto México
	225	Los Zapotes	Mazatlán-Culiacán
	227	Campo de Tiro	Hermosillo-Bahía de Kino
B	100	Coacoyul	Acapulco-Zihuatanejo
	101	Puerto Escondido	Pinotepa Nacional-Salina Cruz
	104	Ojuelos	Ojuelos-Aguascalientes
	105	Malpaso	Guadalajara-Zacatecas
	110	Tehuiztingo	Puebla-Huajuapán
	130	El Fato	Mexicali-San Felipe
	149	Rancho Nuevo	Tuxtla Gutiérrez-Ciudad Cuauhtémoc
	175	Tequisquiapan	Celaya-Dolores Hidalgo
	178	La Colorada	T Morelos-Saltillo
	186	Santo Domingo	Ciudad Valles-San Luis Potosí
	188	Ebtun	Mérida-Puerto Juárez
	193	Cementera	Hermosillo-Yécora
	202	Santo Tomas	Ensenada-Lázaro Cárdenas
	217	Cañitas	Villahermosa-Escopetazo
C	102	CECYTEM	Zihuatanejo-La Mira
	111	Yautepec	Cuernavaca-Cuautlixco
	113	Apaseo	Apaseo el Alto-Celaya
	115	Jalisco	Guadalajara-Tepic
	116	Guadalupe Victoria	Durango-Torreón
	118	Nuevo Laredo	Monterrey-Nuevo Laredo
	121	Antigua Caseta	Culiacán-Los Mochis
	127	Lienzo Charro	Sonoíta-Puerto Peñasco
	135	Ejido Monterrey	Sonoíta-Mexicali
	147	23 de Enero B	Tapanatepec-Talismán
	182	Tepetate	San Luis Potosí-Lagos de Moreno
	183	Seybaplaya	Ciudad del Carmen-Campeche
	191	PC Marmol	Mazatlán-Culiacán
	194	Jaluco	Manzanillo-Puerto Vallarta
	196	El Centenario	La Paz-Ciudad Insurgentes
	197	Los Divisaderos	Cabo San Lucas-La Paz
	199	La Paz	La Paz-Pichilingue
203	PC Santa Ana	Santa Ana-Sonoita	

C	204	PC Cuauhtemoc	Chihuahua-Ciudad Cuauhtémoc
	205	La Rosa	Saltillo-Torreón
	211	Allende	Cadereyta-Allende
	216	Nuevo Vivero	Coatzacoalcos-Minatitlán
D	107	El Rodeo	San Luis Potosí-Zacatecas
	114	El Monteon	Tepic-Puerto Vallarta
	124	Fitosanitaria	Janos-Agua Prieta
	136	El 21	Hermosillo-Nogales
	141	General Bravo	Monterrey-Reynosa
	146	23 de Enero A	Arriaga-Huixtla
	148	Marina	Coatzacoalcos-Salina Cruz
	153	Colonia Ejidal	Córdoba-Entronque Boticaria
	154	Canal SARH	Córdoba-Veracruz
	156	Campo de Tiro	Poza Rica-Veracruz
	160	San Mateo	México-Puebla
	161	Caseta San Martin	México-Puebla
	163	Guacamayas	Zihuatanejo-La Mira
	164	Teloloapan	Iguala-Ciudad Altamirano
	173	Rancho Santa Elena	Coatzacoalcos-Salina Cruz
	180	PC Yerbaniz	Durango-Gómez Palacio
	192	Union de Tula	Ent. Santa Cruz-Melaque
	200	San Jose el Saladillo	San Luis Potosí-Ent. Arcinas
	208	Perico 4	Ciudad Victoria-Monterrey
	212	Tarimbaro	Morelia-Salamanca
221	Aeropuerto	Topolobampo-Choix	
223	San Francisco	Ciudad Obregón-Hermosillo	
224	Tepatitlan	Lagos de Moreno-Zapotlanejo	
226	Benjamin Hill	Hermosillo-Nogales	
E	108	Hauy Pix	Escárcega-Chetumal
	117	Corralche	Campeche-Mérida
	142	General Bravo	Monterrey-Reynosa
	143	Aduana Capote	Matamoros-Reynosa
	145	Hutzo	Cuacnopalan-Oaxaca (cuota)
	150	Cruz del Milagro	Ciudad Alemán-Sayula
	152	Caseta Sayula	La Tinaja-Cosoleacaque (cuota)
	157	El Refugio	Portezuelo-Palmillas
	159	Las Rajas	Naucalpan-Toluca

E	165	Amayuca	Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros
	166	La Caridad	Las Cruces-Pinotepa Nacional
	168	Ciudad Mier	Monterrey-Ciudad Mier
	169	Lagos de Moreno	León-Aguascalientes
	170	Las Cruces	Oaxaca-Tehuantepec
	177	PC las Choapas	Las Choapas-Ocozocoautla
	179	Santa Elena	Francisco Escárcega-Chetumal
	184	PC Seybaplaya	Champotón-Campeche
	187	Gustavo Garmendia	Ciudad Valles-Ciudad Victoria
	189	PC Piste	Kantunil-Cancún
	207	Santa Teresa	Saltillo-Monclova
	213	Aeropuerto Morelia	Morelia-Zinapécuaro
	219	Lo de Guevara	Guadalajara-Tepic
	220	Microondas	Santa Rosalía-Guerrero Negro
	222	PC El Arenal	Guadalajara-Tepic

Mediante la determinación de los centroides y el peso equivalente del camión de fatiga para el grupo T-S-R de todo el conjunto de estaciones entre 1998 y 2008, se podrá definir un factor que permita determinar el peso equivalente estimado para las diversas clases descritas anteriormente.

#### **4.3 Determinación del peso equivalente del camión de fatiga para las clases elegidas de cada grupo.**

De acuerdo con el apartado anterior, se tomó la decisión de trabajar con una clase específica para cada grupo de camiones, con la finalidad de obtener las características de distribución de la carga por eje, del total del peso equivalente, así como obtener las distancias entre los ejes para los camiones que representarán a los grupos C, T-S y T-S-R.

Antes de empezar a calcular las propiedades de distribución de la carga por eje y las distancias, es importante determinar el peso equivalente del camión de fatiga para la clase seleccionada, para cada uno de los grupos previamente mencionados.

Una vez obtenido este peso, se hará una comparación del peso obtenido con respecto al centroide obtenido en la aplicación de algoritmo K-means. Esto con la finalidad de saber si es posible utilizar el centroide de cada clase de los diversos grupos y así evitar el cálculo del camión de fatiga para cada una de las clases o clústeres.

Para el cálculo del peso de cada camión de fatiga para cada grupo, se utilizó la Clase A conforme a lo obtenido en el Apartado 4.2 de este capítulo.

#### **4.3.1 Peso equivalente del camión de fatiga para el grupo C de la clase A**

Conforme a la introducción de este subcapítulo, es necesario calcular el peso equivalente para el camión de fatiga que pertenece a la clase A (clúster I).

El peso equivalente, de igual manera, se calculó conforme a la **Ecuación (13)** del CAPÍTULO 2. Sin embargo, la totalidad de los vehículos para cada clase está en función de la suma de todos los vehículos que pertenecen a cada grupo, que transitaron por las estaciones agrupadas para la clase A. Así pues, se ven afectados los porcentajes de los diversos vehículos.

En la figura siguiente se muestra el peso equivalente que debe tener el camión de fatiga que representará a la clase A del grupo C.



**Figura 46.** Peso equivalente del camión de fatiga para la clase A para el grupo C.

Si se observa la **Tabla 19**, es posible visualizar que para la clase A (clúster I) se tiene un centroide  $\mu_1 = 119.803 kN$ ; con esto es posible denotar que el centroide calculado para la clase A es muy similar al peso equivalente calculado en la **Ecuación (13)** del CAPÍTULO 2, ya que presenta un error  $e = 0.7\%$

Dado que el error es casi nulo, se puede concluir:

*“El peso equivalente, obtenido agrupando el total de vehículos de las estaciones que pertenecen a una clase, es igual al valor medio de los pesos equivalentes de las estaciones que componen dicha clase”.*

$$W_{eqn} = \mu_n \quad (19)$$

Donde:

$W_{eqn}$  = Peso equivalente del camión de fatiga para la  $n$ ésima clase

$\mu_n$  = Centroide o media de los pesos equivalentes para la  $n$ ésima Clase

De esa manera es posible utilizar los centroides para cada clase, como peso equivalente del camión de fatiga, como se propuso en el apartado 4.2 de este capítulo.



### 4.3.2 Peso equivalente del camión de fatiga para el grupo T-S de la clase A

Al igual que para el peso equivalente del grupo C, este peso equivalente fue calculado conforme a la **Ecuación (13)** del CAPÍTULO 2.

La totalidad de los vehículos para cada clase está en función de la suma de todos los vehículos que pertenecen al grupo T-S, que transitaron por las estaciones agrupadas para la clase A.

En la figura siguiente se muestra el peso equivalente que debe tener el camión de fatiga que representará a la clase A, del grupo T-S.



**Figura 47.** Peso equivalente del camión de fatiga para la clase A, para el grupo T-S

Si se observa la **Tabla 23**, la clase A (clúster I) tiene un centroide  $\mu_1 = 313.091 kN$ . Con esto se puede concluir que el centroide calculado para la clase A es muy similar al peso equivalente calculado en la **Ecuación (13)** del CAPÍTULO 2, ya que se tiene un error  $e = 0.2\%$ . Éste es menor que el presentado en la clase A del grupo C.

Al conocer los valores anteriores, éstos se equiparan con los de la **Ecuación (19)** dado que son muy semejantes.

#### 4.3.3 Peso equivalente del camión de fatiga para el grupo T-S-R, de la clase A

Conforme a la **Ecuación (13)** y considerando la totalidad de vehículos para el grupo T-S-R de las estaciones que se engloban en la clase A, se tiene que el peso equivalente del camión de fatiga será de  $W_{eq} = 479.3kN$ . En la siguiente figura se muestra el camión que representará a esta clase.



**Figura 48.** Peso equivalente del camión de fatiga para la clase A, para el grupo T-S-R

Si de igual manera que para los grupos de vehículos anteriores se observa la tabla en la que se listan los centroides por cada clúster (**Tabla 27**) es posible denotar que para la clase A se cuenta con un centroide  $\mu_1 = 481.895 kN$  y siendo el error calculado  $e = 0.55\%$ , se puede concluir que también es factible tomar los centroides como pesos equivalentes de cada una de las clases ya que cumple con los datos de la **Ecuación (19)** que fue propuesta en esta investigación.

#### **4.4 Simulación de tráfico real y el rango de momentos, para las clases elegidas de cada grupo.**

Calculado el peso equivalente para camión de fatiga para la clase A, para cada uno de los grupos, es necesario obtener las acciones mecánicas debidas al tráfico real; puesto que con ellas se determinan las características de las dimensiones y la distribución de la carga por eje para cada camión de fatiga

Para la determinación de la carga por eje de cada vehículo que conforma el tráfico real de la clase A, de cada uno de los grupos, se utilizó la tabla de los factores de distribución obtenidos en el CAPÍTULO 3 (**Tabla 6**) y las tablas de pesos medios de las diversas estaciones de los documentos técnicos del IMT <sup>(39)</sup>- <sup>(47)</sup>.

Adicionalmente, se tomó la **Tabla 8** del Capítulo 3, cuyo contenido indica la separación entre los ejes de los vehículos que transitan dentro de la República Mexicana.

Conocidas estas cargas y la nomenclatura utilizada, se procedió a introducir estos datos en el programa SAP2000, como casos de carga móvil (**Figura 49**).

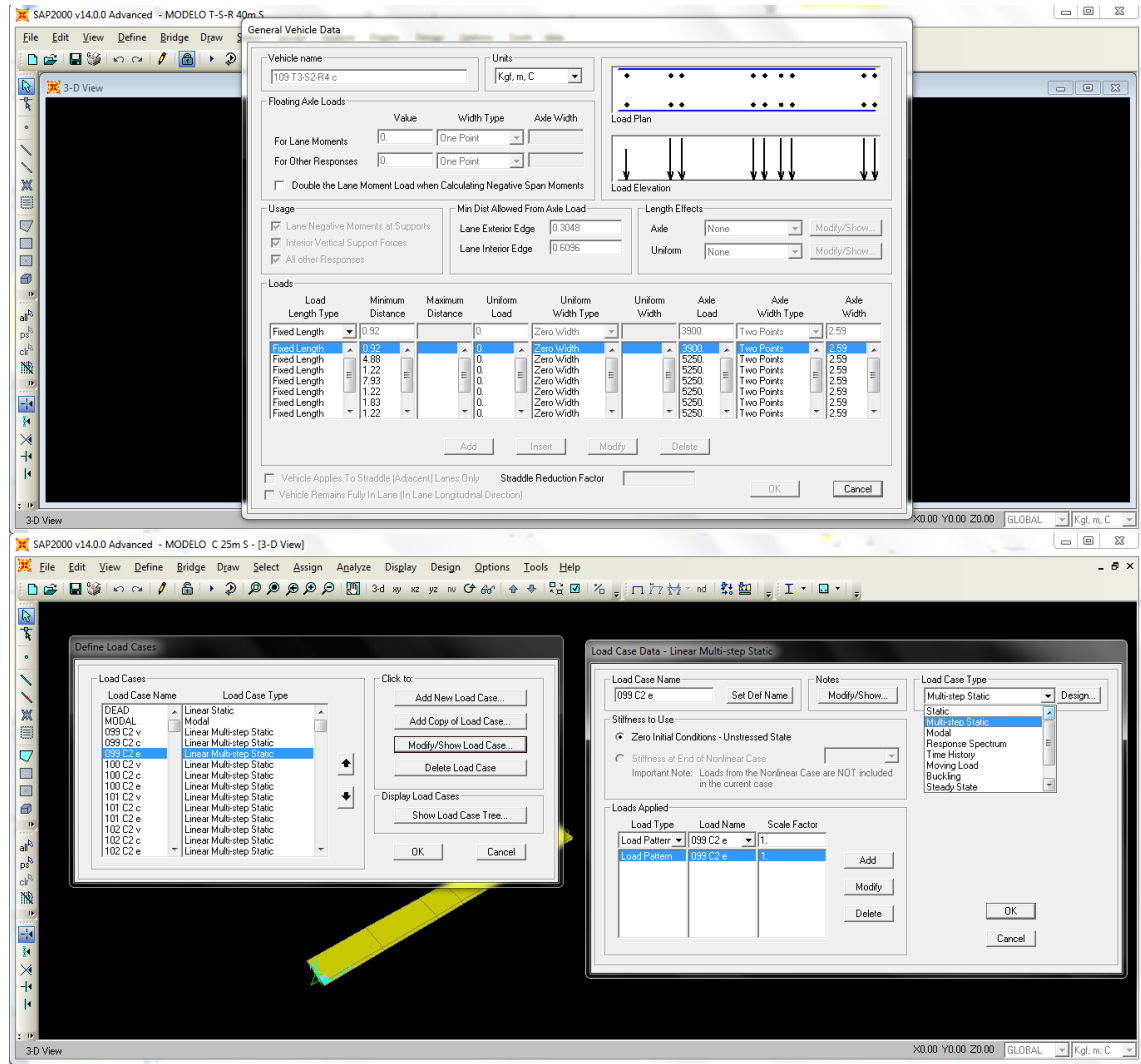
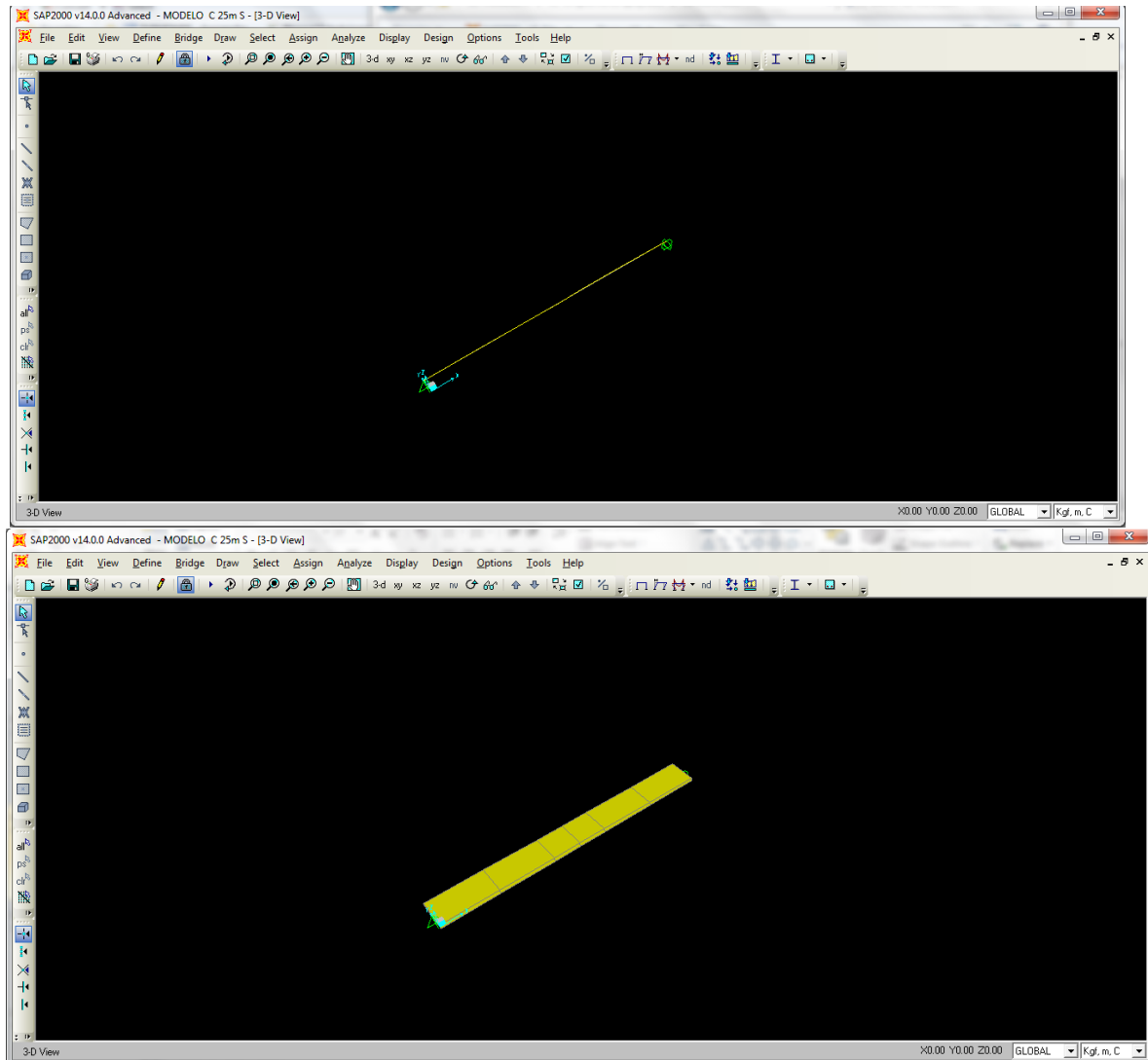


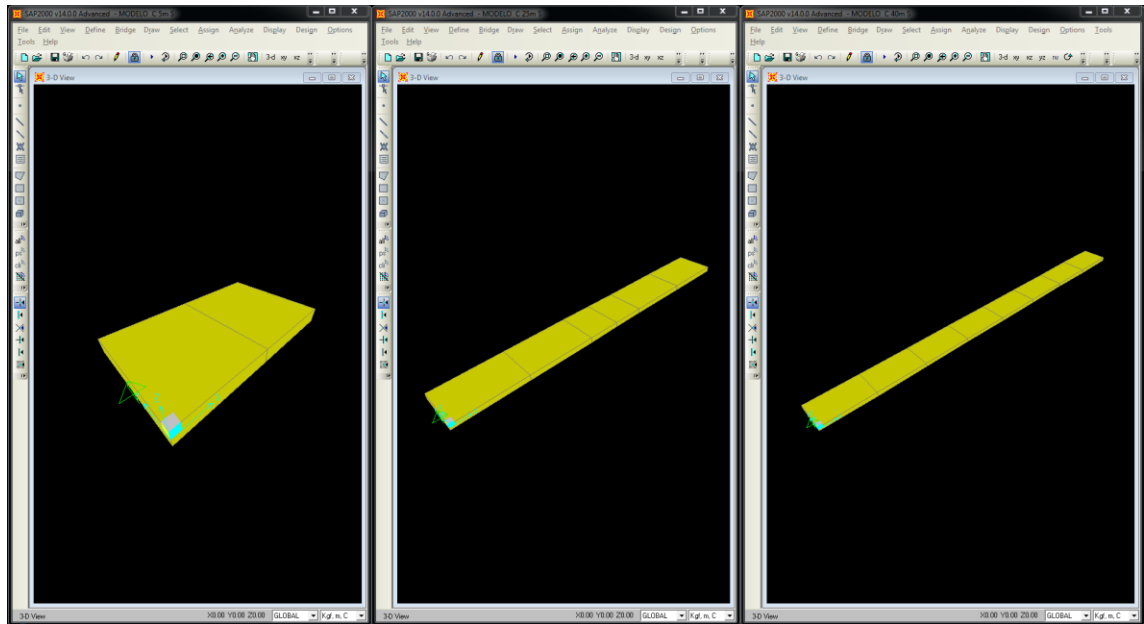
Figura 49. Ingreso de los datos de las cargas de camiones en el programa SAP2000

Los modelos matemáticos generados en el software SAP2000 fueron conformados por elementos “tipo barra”, con un ancho de carril de 4.00 metros (**Figura 50**). Se decidió utilizar elementos “tipo barra” debido a que el análisis para elementos simplemente apoyados es un análisis basado en la estática, tal que sólo se necesita conocer las fuerzas externas y las condiciones de apoyo para obtener las fuerzas internas y no las secciones transversales ni el tipo de material como el análisis realizado por desplazamientos.



**Figura 50.** Modelo matemático tridimensional para el análisis

Los claros libres entre los apoyos para los modelos matemáticos para el grupo de camiones C fueron de 5 metros y hasta 40 metros, en incrementos de 5 metros. Se tomó la decisión de utilizar estos claros (**Figura 51**), ya que éstos representan puentes comunes en México; además de que se requieren varios puntos para las diversas graficas que se obtendrán.



**Figura 51.** Claros libres utilizados

Una de las herramientas con las que cuenta el SAP2000 para el análisis es el módulo de puentes. Este módulo permite obtener la respuesta dinámica o estática de un puente sujeto a carga móvil (vehículos), que transita sobre un carril con un ancho que puede ser definido por el usuario, así como la dirección que llevará el vehículo.

Para esta investigación se utilizó el análisis estático (lineal multi-step static) en el que se obtiene el comportamiento estructural a flexión del puente, para la carga móvil, para diferentes intervalos.

Para la utilización de este análisis estático para cargas móviles es necesario asignarles una velocidad a los vehículos y un tiempo en el que se registrarán mediciones. Sin embargo, ese tiempo debe ser discretizado en varios intervalos idénticos, de manera que debe considerarse un incremento de tiempo en el cual el programa registrará las acciones mecánicas para obtener una respuesta completa.

De acuerdo con el CAPÍTULO 3, se encontró que existe una normativa <sup>(48)</sup> que regula la velocidad con la que se permite circular a los camiones. Esta velocidad es la menor entre  $80 \text{ km/hr}$  o la velocidad máxima marcada en la carretera.

Ya que no se cuenta con una carretera específica, se decidió utilizar la velocidad de  $80 \text{ km/hr}$  como la velocidad requerida para el análisis estático, para los modelos matemáticos.

Respecto al tiempo elegido, se consideró (dada la velocidad antes mencionada) un incremento de tiempo  $\Delta t = 0.1s$  (0.1 segundos), tal que permita registrar los suficientes puntos de momentos lo más fidedignamente posible.

De acuerdo con las cargas móviles, las dimensiones libres entre los apoyos de los puentes y la velocidad, fue posible generar el análisis estructural para los diferentes modelos.

Obtenido este análisis, se generó el rango de momentos equivalentes para cada intervalo de tiempo de la clase A, de cada grupo, de acuerdo con la **Ecuación (16)** del CAPÍTULO 2; con lo que se obtuvo un espectro de amplitud variable que debe ser lo más similar posible al obtenido en el análisis estructural, donde las cargas actuantes son los camiones que se propondrán.

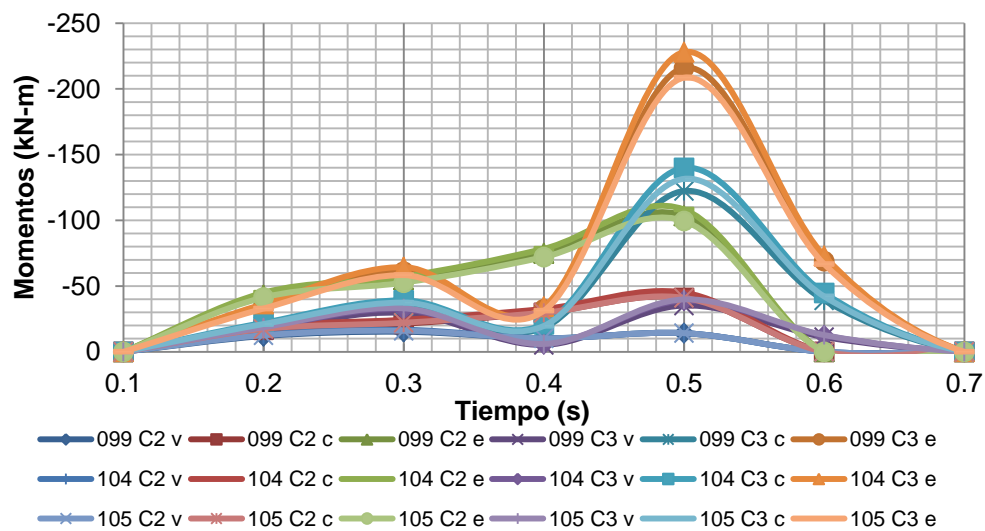
#### **4.4.1 Simulación de tráfico real para los vehículos de la clase A del grupo C y sus rangos de momentos equivalentes.**

Realizado el análisis estructural, se tomaron en consideración los valores de los momentos flexionantes únicamente al centro del claro, para diversos intervalos de tiempo y para los

diversos claros libres propuestos. Estos resultados no se presentan en este documento, debido al tamaño de las tablas.

Estos valores se graficaron con respecto al tiempo para obtener el comportamiento del puente sujeto al paso de los diversos vehículos.

Ya que existe una gran cantidad de vehículos para el grupo C, en este capítulo sólo se presentan algunas gráficas de comportamiento del puente que está expuesto al paso de los vehículos C2 y C3, tanto vacíos, como cargados y excedidos (**Figuras 52 a 59**).

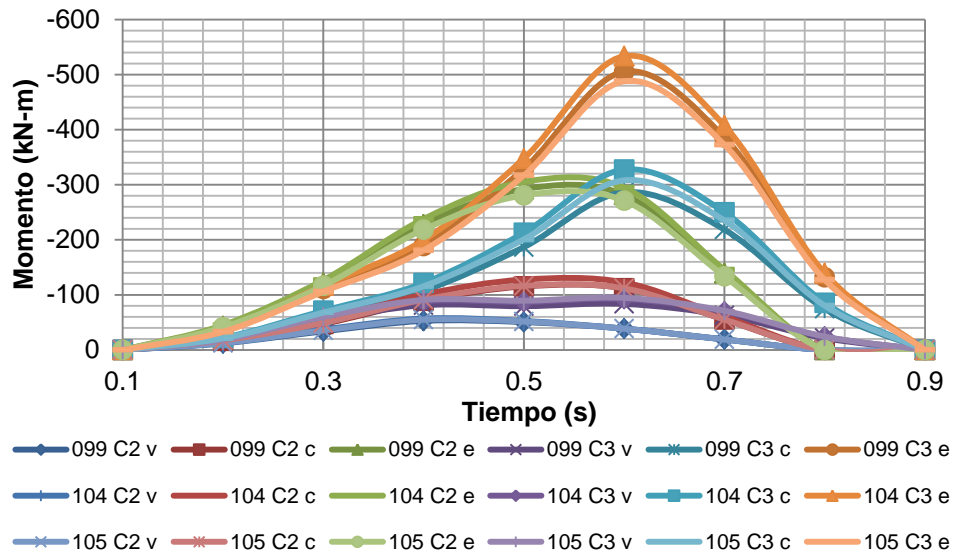


**Figura 52.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 5m

Nótese en la **Figura 52** que para el vehículo C2 vacío se presenta un momento máximo en un tiempo de 0.3 segundos, mientras que los vehículos cargados y excedidos presentan un momento máximo en 0.5 segundos. Esto se debe a que el eje más cargado para un vehículo vacío es el eje delantero, por tal motivo el momento máximo se presenta en un tiempo menor.

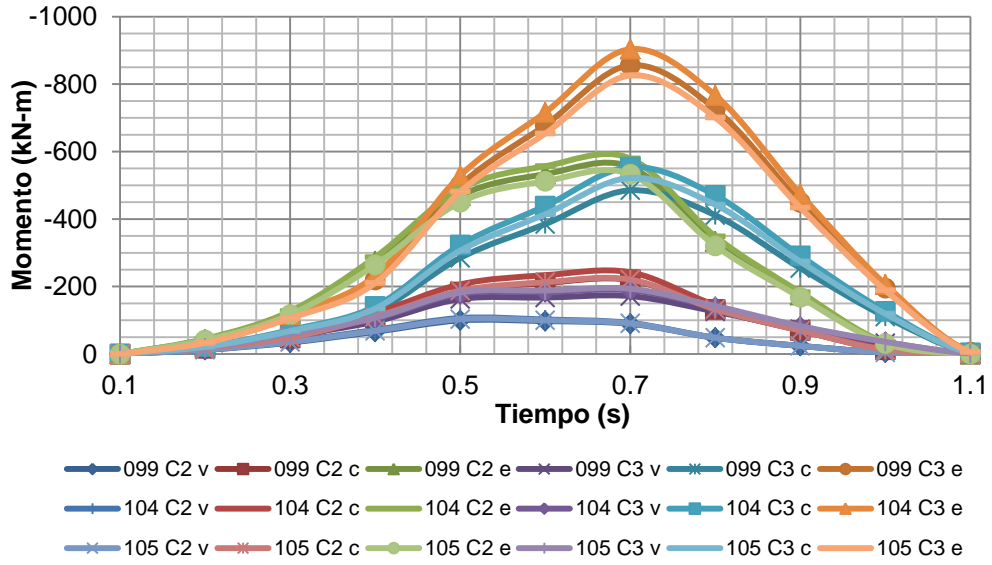


Ahora bien, los vehículos C3 presentan un momento máximo para un vehículo vacío en un tiempo de 0.3 segundos, al igual que el en vehículo C2 y de igual manera el momento máximo positivo es presentado dentro del intervalo de 0.5 segundos al igual que el en el vehiculó C2. Sin embargo, dado que el vehículo C3 presenta un eje más que el C2 este vehículo puede soportar más carga y por ende el momento máximo será mayor en la mayoría de los casos.

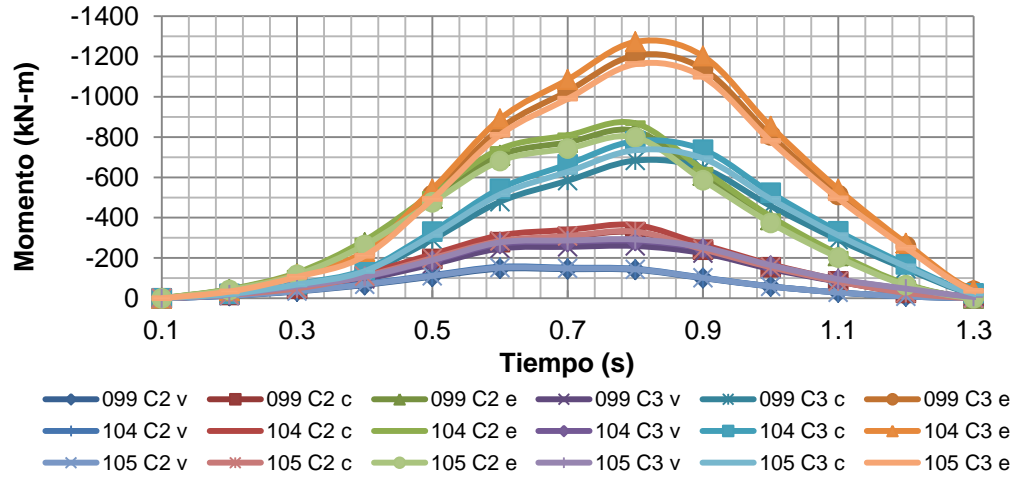


**Figura 53.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 10m

Observando la **Figura 53** se puede denotar que no hay una disminución de momento como se presentaba en un tiempo igual a 0.4 segundos en la **Figura 52**. Esto se debe a que ya que los vehículos son lo suficientemente compactos como para entrar en su totalidad en los puentes con claros de 10 metros. De esta manera se puede concluir que a partir de una distancia de 10 metros (considerando que no se tienen modelos matemáticos para los claros que se encuentren entre 5 y 10) la curva de momentos en el centro del claro será constante sin mostrar un decremento intermedio.



**Figura 54.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 15m



**Figura 55.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 20m

Se puede denotar que las curvas de comportamiento se vuelven más estables después de entrar al intervalo de claro de 15 a 40 metros (**Figuras 54 a 59**), donde el termino estabilidad se utiliza para denotar cómo el comportamiento tiende a ser parabólico cuadrático.

La estabilidad se debe a que siendo el claro muy grande con respecto a las longitudes de los camiones C, las cargas desglosadas empiezan a concentrarse en una zona muy pequeña, tal que la separación entre los ejes empieza a ser no significativa con respecto a la distancia libre entre los apoyos del puente.

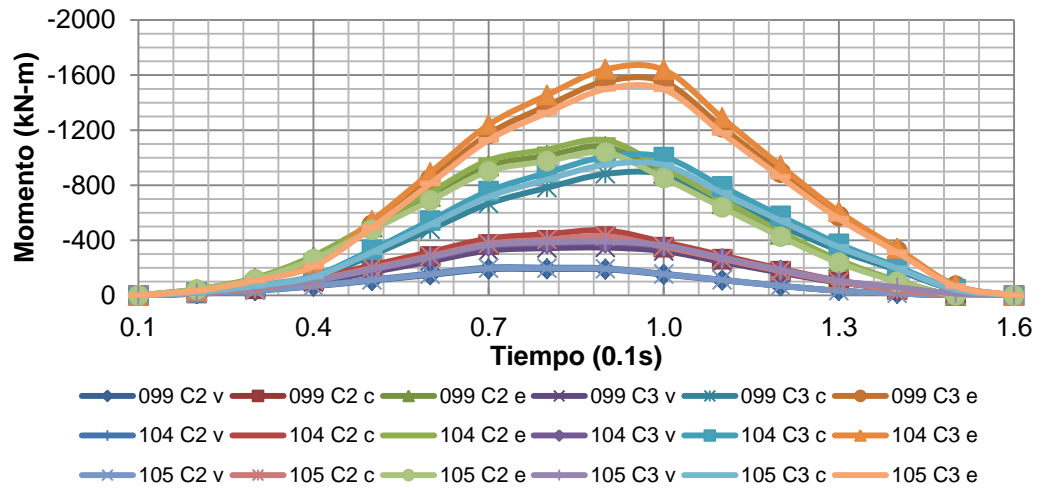


Figura 56. Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 25m

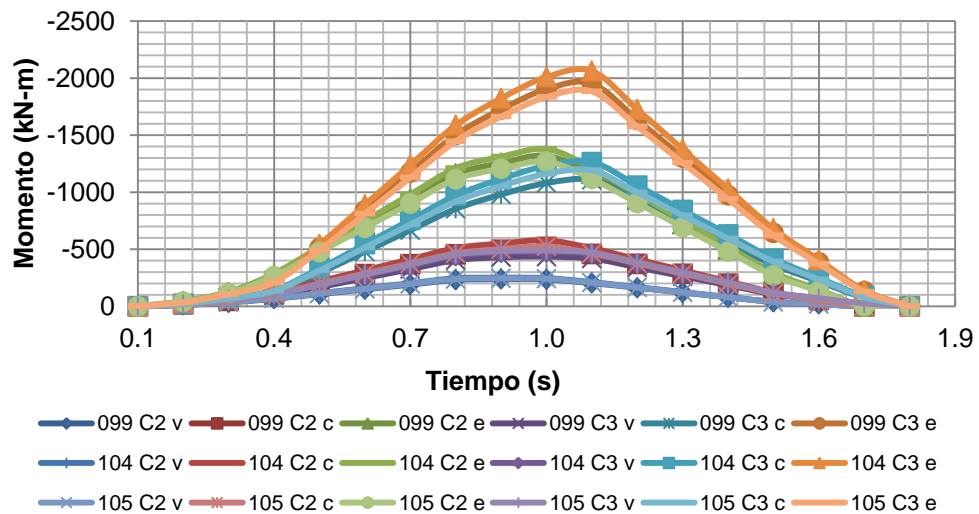
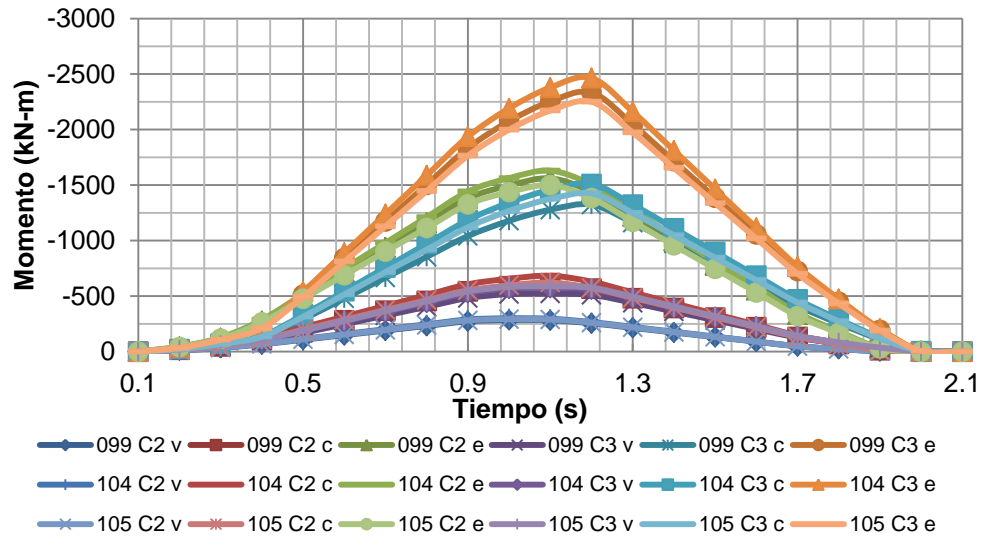
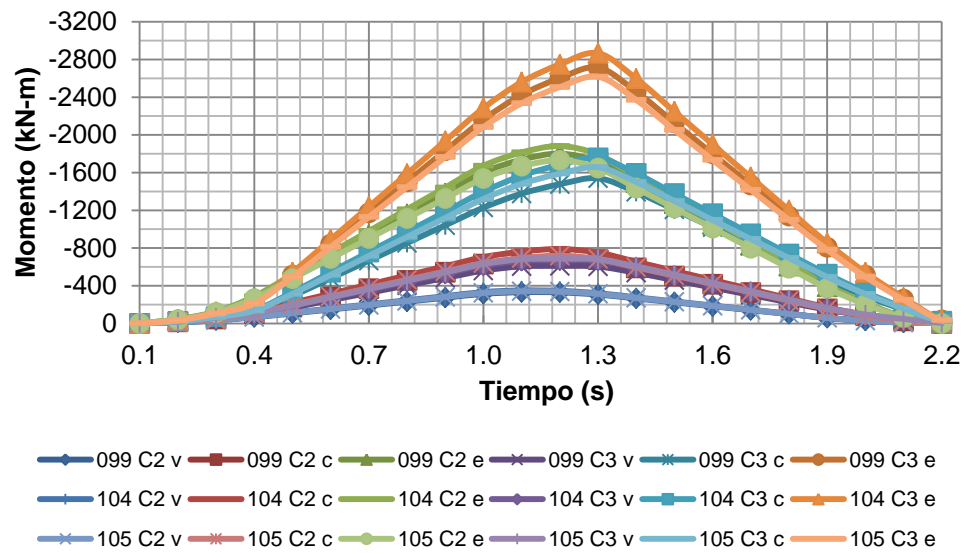


Figura 57. Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 30m



**Figura 58.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 35m



**Figura 59.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 40m

Esto mismo acontece con el tándem que se presenta en el camión C3. La distancia que hay entre las dos ruedas del tándem empieza a ser de poca importancia con respecto a la longitud

total del claro. Por tal motivo, se propondrá un camión que se represente por 2 ejes únicamente, tal que represente el comportamiento de los vehículos C2 y C3.

El resto de las gráficas obtenidas para el comportamiento a flexión al centro del claro de los vehículos que pertenecen al grupo C y la clase A, para los diversos claros, no se presentan debido a la cantidad de datos que se están manejando, puesto que se dificultaría la impresión.

Con el total de los valores para la clase A, se empleó la **Ecuación (16)** del CAPÍTULO 2, que expresa:

$$M_{eq} = (\sum f_i M_i^3)^{1/3}$$

Donde:

$f_i$  = Frecuencia de vehículos con peso  $W_i$  que producen un momento  $M_i$

$M_i$  = Rango de momentos producidos por el vehículo con peso  $W_i$  en el intervalo  $i$

Ahora pues, considérese que  $M_i$  es el momento evaluado en el centro del claro y que, además, es función del tiempo, tal que se expresa:

$$M_i = f(t) \tag{20}$$

Dado que se cuenta el valor de los momentos para un cierto intervalo de tiempo, debido a la discretización que se realizó en el análisis en SAP2000; es posible expresar ese momento  $M_i$  para cada uno de esos intervalos, tal que la **Ecuación (16)** se expresará como:

$$M_{eqn} = \{\sum f_i [M_i(t)^3]\}^{1/3} \tag{21}$$

Donde:

$M_{eqn}$  = Rango de momentos equivalentes para la  $n$ -ésima clase

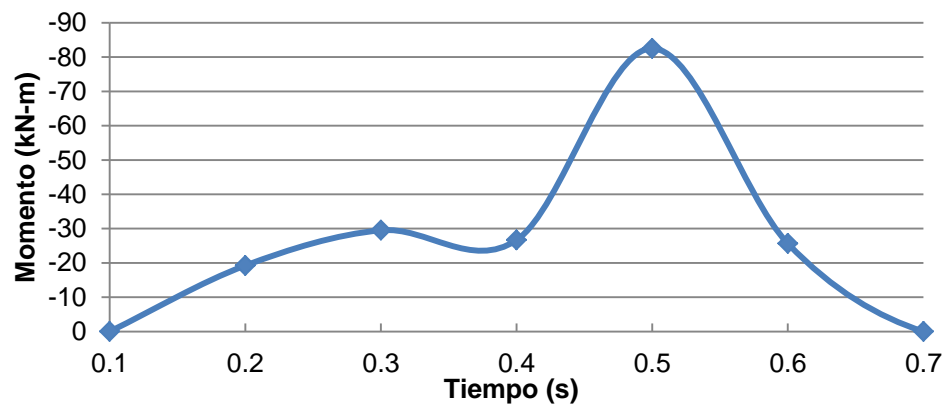
$f_i$  = Frecuencia de los vehículos con peso  $W_i$  que producen un rango de momento  $M_i(t)$

$M_i(t)$  = Rango de momentos producido por los vehículos en un tiempo  $t$  dado

Con la **Ecuación (21)** y los datos contenidos en el análisis del tráfico real para cada tiempo,  $t$ , es posible generar un rango de momentos equivalentes. Con estos rangos de momentos se obtendrá una curva que se comparará con el análisis del sistema cargado, con el camión propuesto para esta clase y este grupo.

De esta manera, el rango de momentos equivalentes obtenido deberá ser igual o al menos muy similar al calculado con el camión propuesto, debido a que se partió de la consideración de que los pesos de los vehículos y los momentos obtenidos son equivalentes.

A continuación se presentan en las siguientes graficas (**Figuras 60 a 67**) los rangos de momentos equivalentes para los camiones de fatiga que corresponden a la clase A del grupo C, que servirán como punto de comparación con el resultado obtenido del camión propuesto para esta clase.



**Figura 60.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 5m

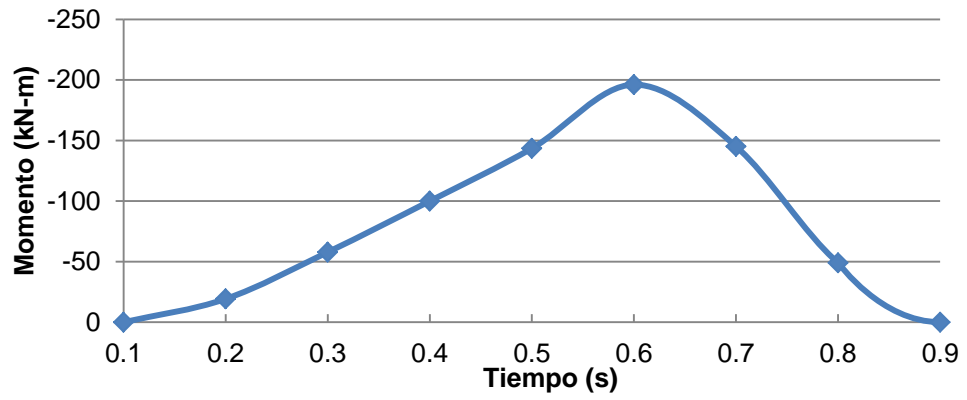


Figura 61. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 10m

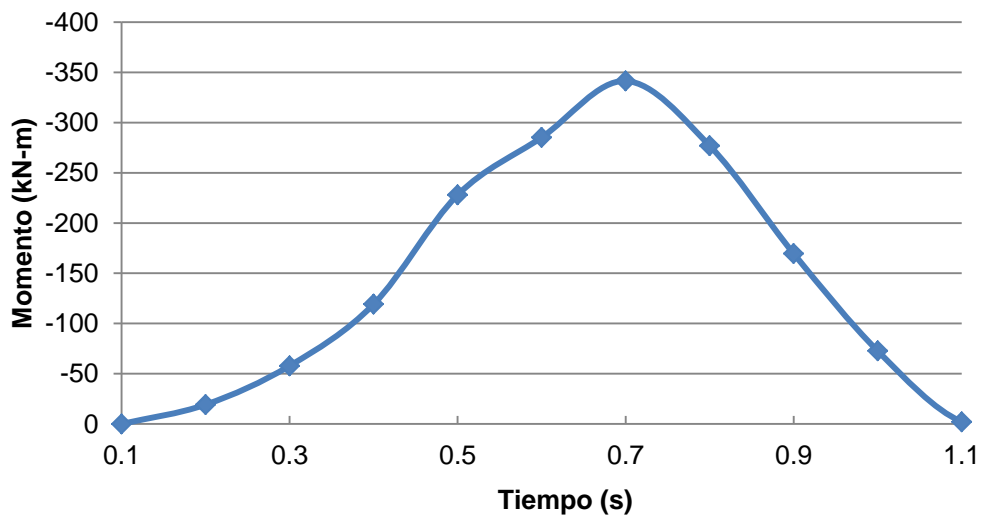
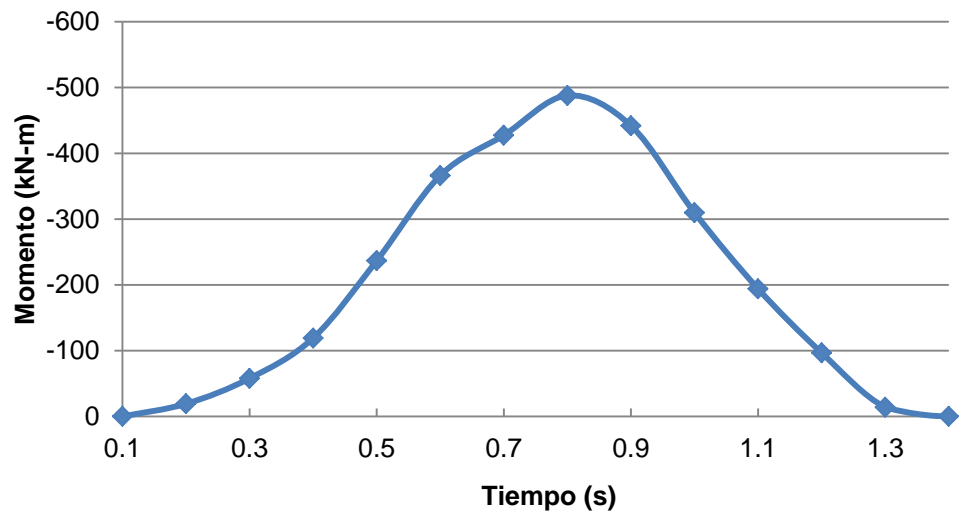
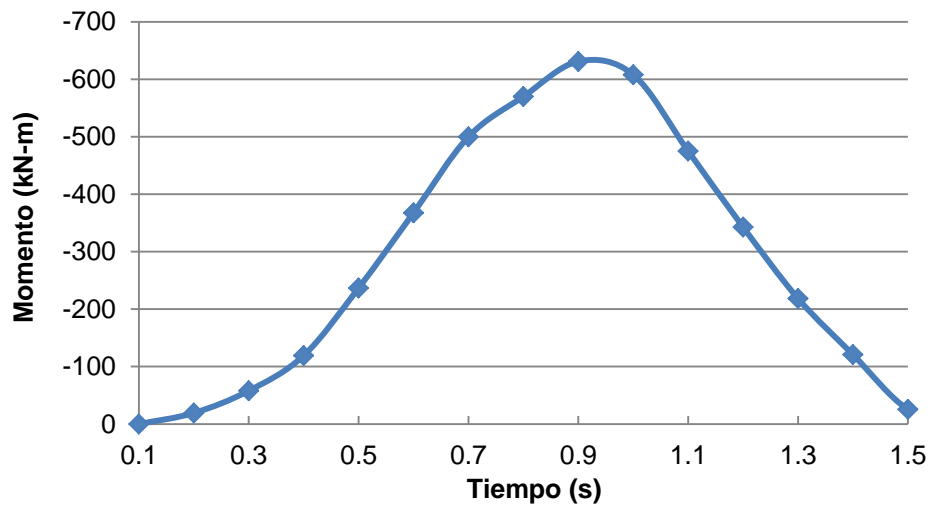


Figura 62. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 15m

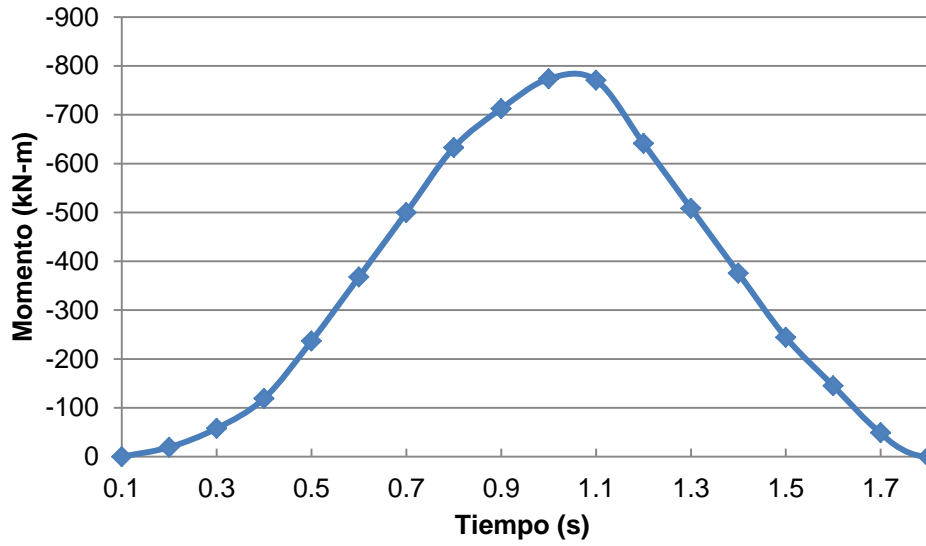


**Figura 63.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 20m

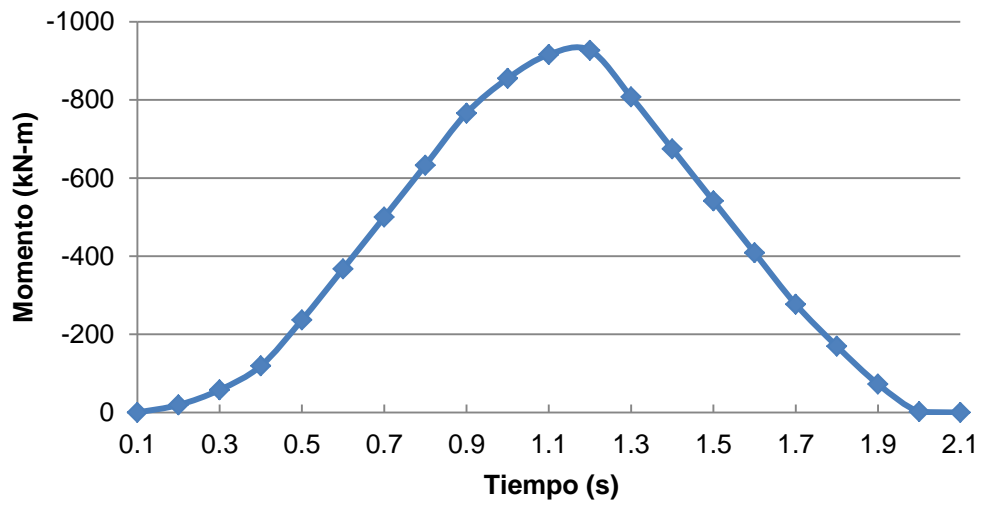


**Figura 64.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 25m

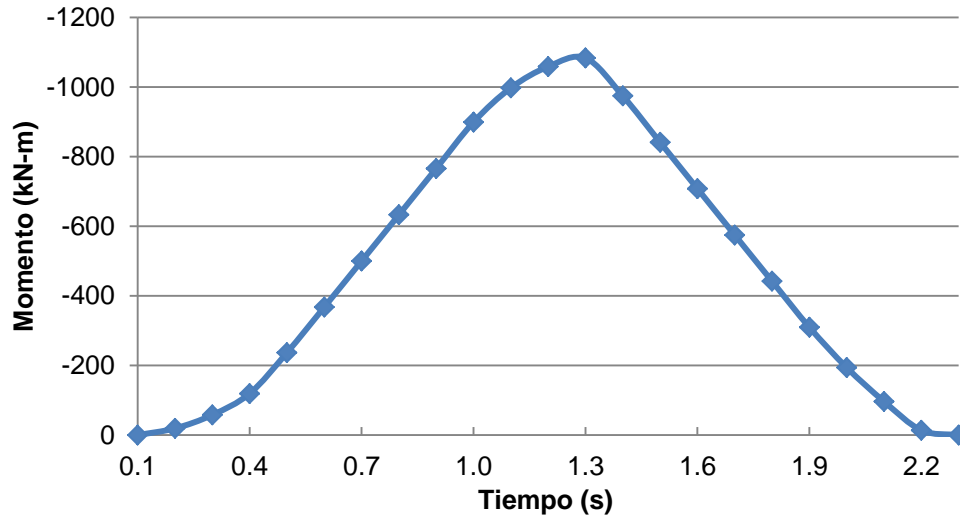




**Figura 65.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 30m



**Figura 66.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 35m



**Figura 67.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 40m

Cabe resaltar que cada una de las curvas que se presentan, y que representan el rango de momentos en un puente con claros de 5 a 40 metros (**Figuras 60 a 67**), se asemejan al comportamiento causado por un camión C3 cargado. Esto quizá se deba a que la mayoría de los vehículos del total de la muestra son vehículos C3 cargados; sin embargo, su comportamiento no describe a la perfección un vehículo tipo C3.

#### 4.4.2 Simulación de tráfico real para los vehículos de la clase A del grupo T-S y sus rangos de momentos equivalentes.

Una vez resueltos los rangos equivalentes para el grupo C, se procedió a calcular los rangos equivalentes para el grupo T-S.

Ya efectuado el análisis estructural, se tomaron los momentos al centro del claro para cada intervalo de tiempo, así como para los diversos claros que fueron modelados, tal como se hizo con el grupo C.

Los resultados de las “corridas” para la clase A del grupo T-S, conjuntamente con la totalidad de las gráficas en las que se presentan los momentos en el centro del claro para los diferentes vehículos que componen el tráfico real, no se presentan en este documento debido a la cantidad de valores que dificultan la impresión.

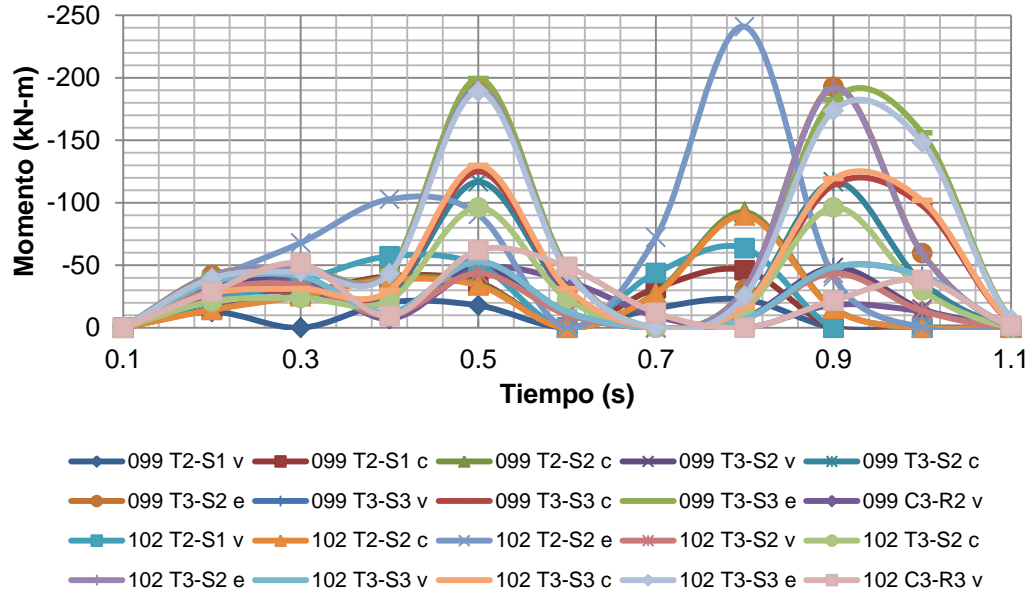
Al igual que se hizo para el grupo C y se hará para el grupo T-S-R, los momentos al centro del claro se graficaron contra el tiempo, con el incremento de tiempo  $\Delta t$  que se enunció en el inicio 4.4. de este capítulo.

Dado que este grupo es el que contiene la mayor cantidad de vehículos diferentes, se tratará de observar y justificar el comportamiento de la mayor cantidad de vehículos distintos posibles para este grupo.

A continuación se presentan las gráficas de comportamiento de los modelos matemáticos, cuyas fuerzas externas son las cargas de los vehículos que componen el grupo T-S, y de igual manera se graficarán vehículos cargados, vacíos y excedidos a la normatividad vigente (**Figuras 68 a 75**).

Si se observa la **Figura 68**, es posible visualizar que el comportamiento de estos vehículos varía mucho, dependiendo del tipo de vehículo de que se trate.

Un ejemplo de esta variación se puede denotar entre el camión T2-S2 y el camión T3-S3 (ambos vehículos cargados). En el primero, el momento máximo se presenta en un tiempo de 0.8segundos, en un puente con claro de 5m; mientras que para el camión T3-S3 existen dos picos de momento máximo: uno en 0.5segundos y el otro que se encuentra en un tiempo aproximado de 0.9segundos.

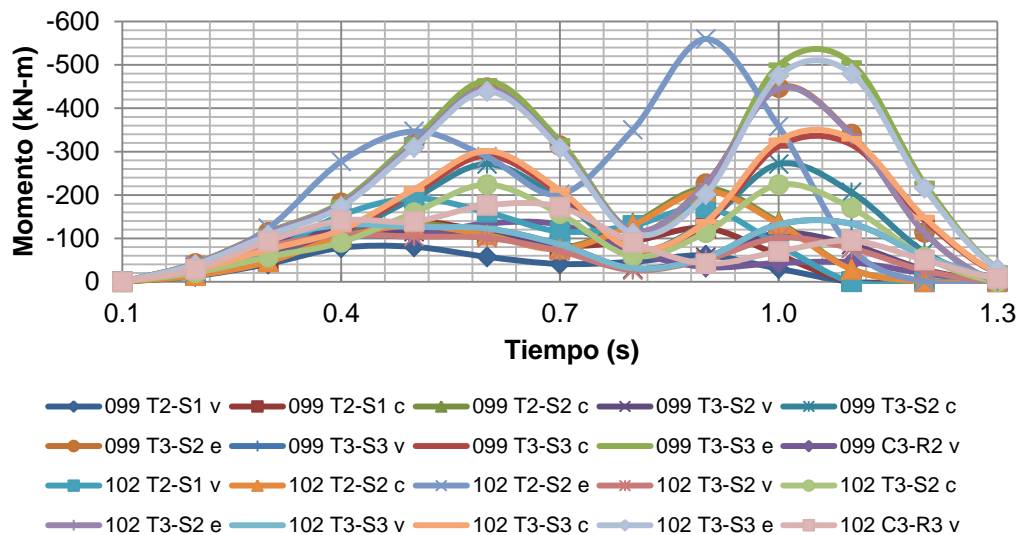


**Figura 68.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A en un claro de 5m

Si se compara ahora el comportamiento a flexión para un vehículo T3-S2 y un vehículo T3-S3, el comportamiento es muy similar. Esto se debe a que los momentos máximos se presentan en tiempos similares para ambos vehículos.

Además, cabe resaltar que, de acuerdo con los reportes técnicos de la IMT <sup>(39)- (47)</sup>, la mayoría de los vehículos que componen este grupo son vehículos T3-S2 y T3-S3, tal que el comportamiento del rango de momentos equivalentes para este grupo se asemeje al comportamiento de estos dos tipos de vehículos.

Por último, se puede observar que para puentes con un claro de 5m (**Figura 68**) hay ciertos intervalos para los cuales los momentos flexionantes al centro del claro son cero. Esto se debe a lo corto del claro del puente

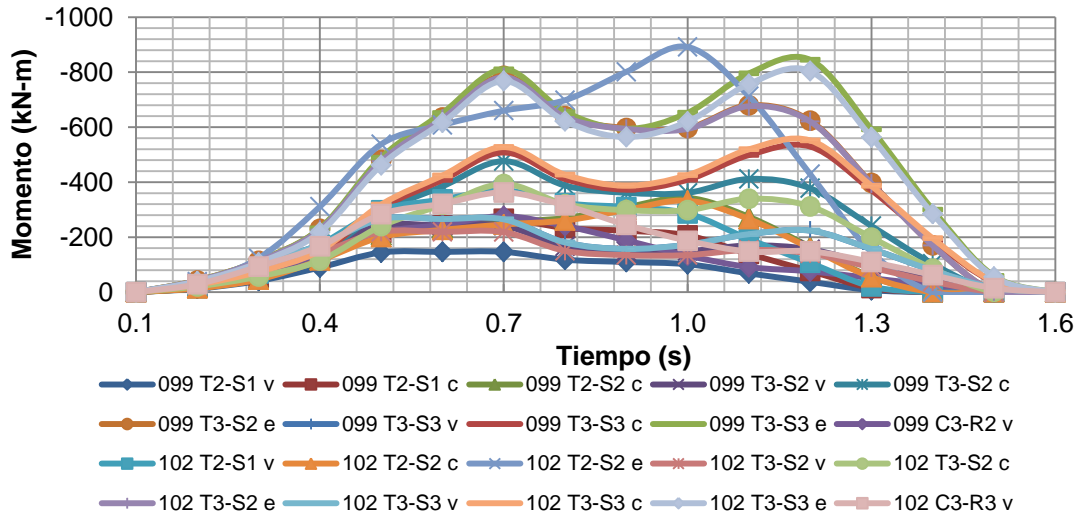


**Figura 69.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 10m

Observando la **Figura 69** y comparándola con la **Figura 68**, se puede denotar que ya no existen tiempos en los que el momento en el centro del claro sea igual a cero. Sin embargo, aún así existe un decremento en el valor de los momentos, debido a la longitud de los vehículos.

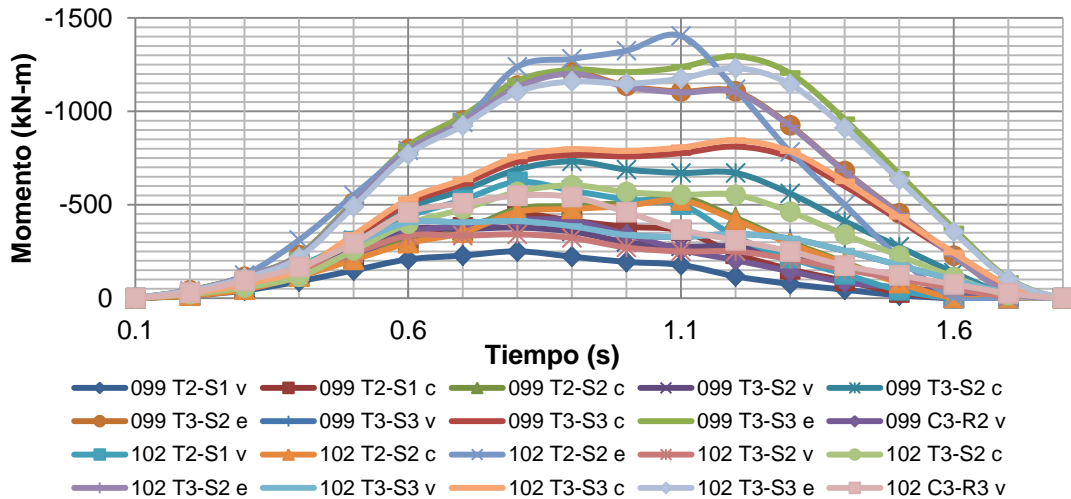
En la **Figura 69** y la **Figura 70** es ve fácilmente que para todos los vehículos existen dos curvas; es decir, que para este tipo de vehículos existen dos máximos relativos en la curva de momento contra el tiempo, sin importar que varíe el tiempo en el que aparecen esos máximos y la magnitud de los mismos.

Con lo anterior es posible concluir que fue adecuada la propuesta de agrupar estos vehículos en un solo grupo, dado que la cantidad de ciclos equivalentes que se obtendrán en investigaciones posteriores será muy similar.

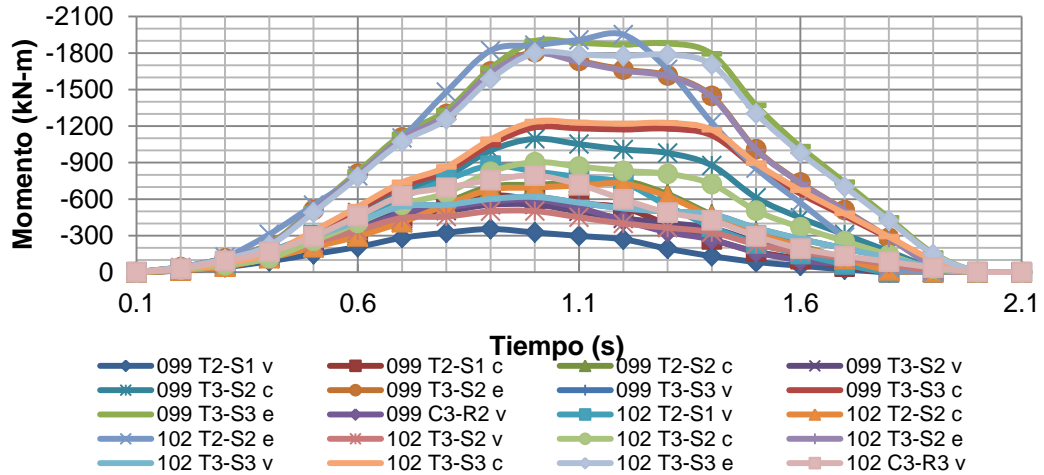


**Figura 70.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 15m

Si se observa la **Figura 71**, se puede notar que ya no pueden observarse con facilidad los máximos relativos que conforman la curva de comportamiento, ya que el claro del puente empieza a ser suficientemente grande como para alojar los vehículos completos, sin que haya una disminución de los momentos en ciertos intervalos de tiempo.



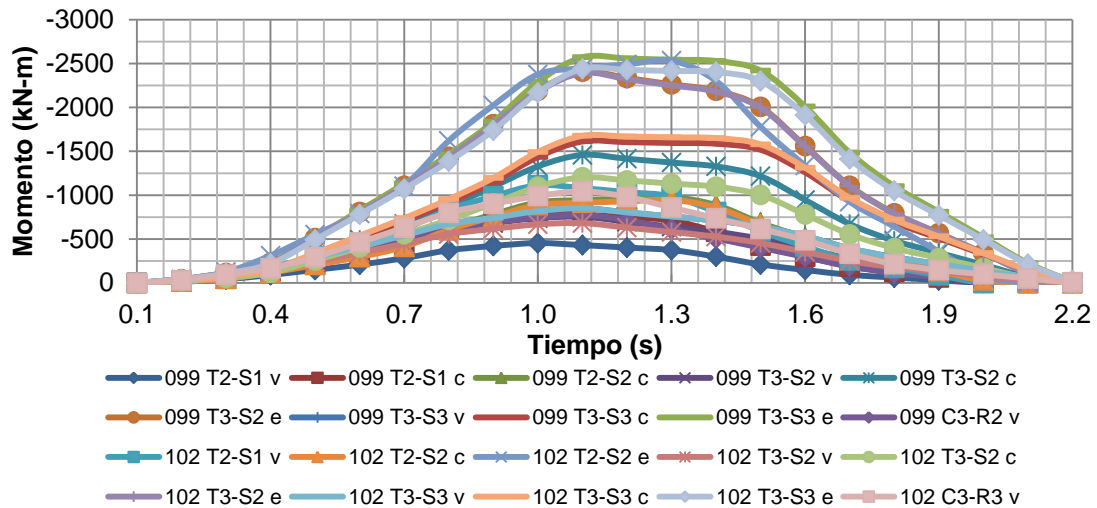
**Figura 71.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 20m



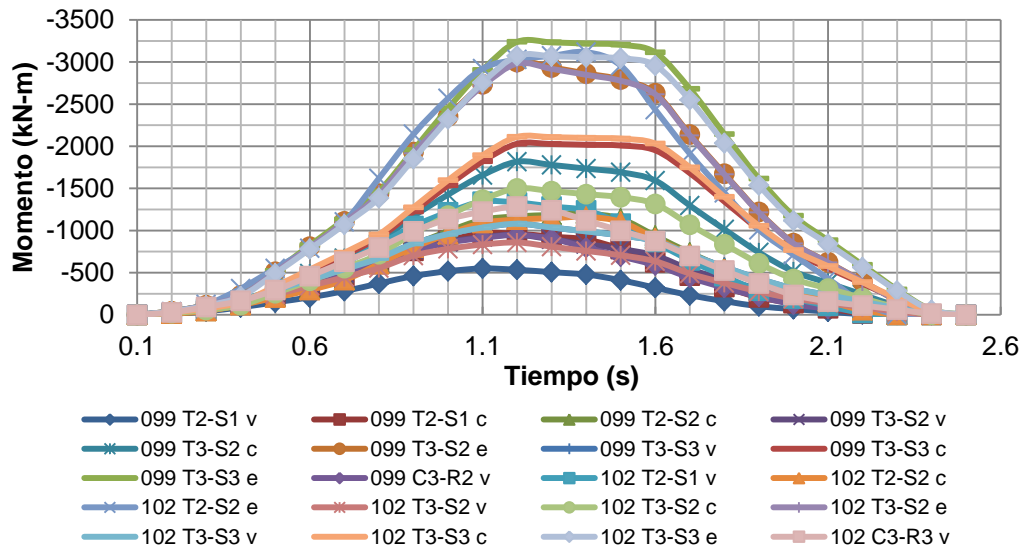
**Figura 72.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 25m

Se puede denotar que las curvas de comportamiento se vuelven más estables, después de entrar al intervalo de claro de 30 a 40 metros (**Figuras 73 a 75**).

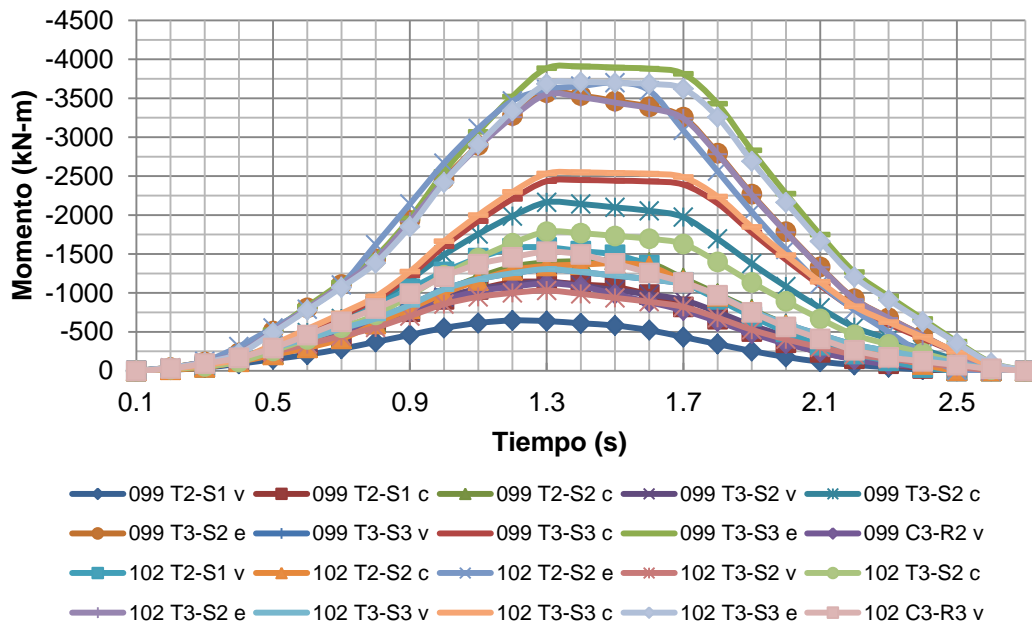
Además del comportamiento estable, aún existe un pequeño decremento que se puede asemejar a una meseta; pudiéndose considerar, en dado caso, que se requiera como un momento constante a lo largo del intervalo de tiempo.



**Figura 73.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 30m.



**Figura 74.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 35m.



**Figura 75.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 40m.

El resto de las gráficas obtenidas para el comportamiento a flexión al centro del claro, de los vehículos que pertenecen al grupo T-S y a la clase A, para los diversos claros, no se

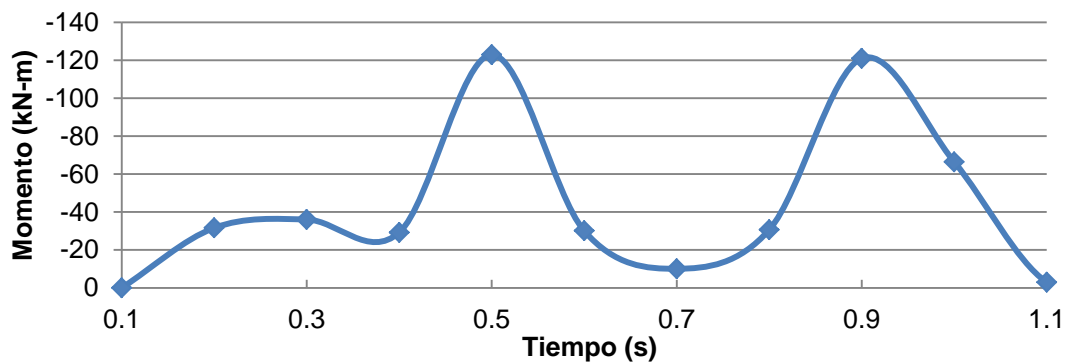


presentan en este documento debido a la cantidad de datos, que requerirían una gran cantidad de hojas de impresión.

Con la **Ecuación (21)** y los datos contenidos en el análisis de tráfico real para cada tiempo  $t$ , es posible generar un rango de momentos equivalentes. Con estos rangos de momentos se obtendrá una curva que se comparará con el análisis que se obtendrá cargando el sistema estructural con el camión propuesto para esta clase y este grupo.

De esta manera, el rango de momentos equivalentes obtenido deberá ser igual o al menos muy similar al calculado con el camión propuesto, debido a que se partió de la consideración de que los pesos de los vehículos y los momentos obtenidos son equivalentes.

A continuación se presentan en la siguientes graficas (**Figuras 76 a 83**) los rangos de momentos equivalentes para los camiones de fatiga que corresponden a la clase A del grupo T-S, que servirán como punto de comparación con el resultado obtenido del camión propuesto para esta clase.



**Figura 76.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 5m.

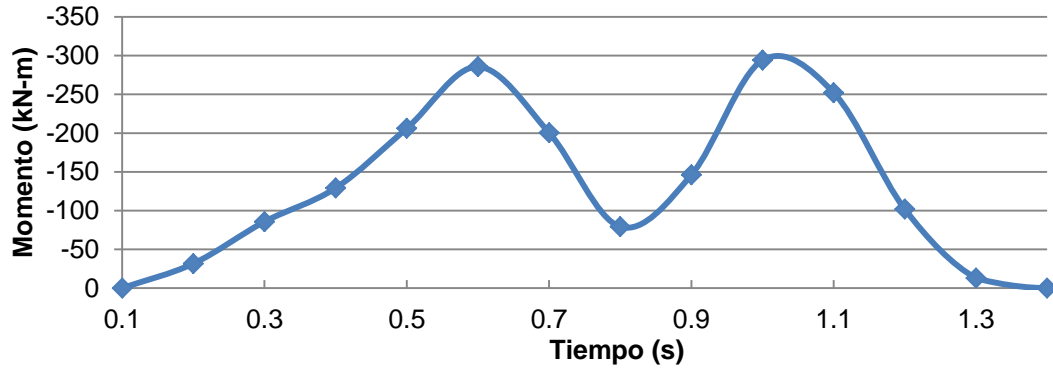


Figura 77. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 10m.

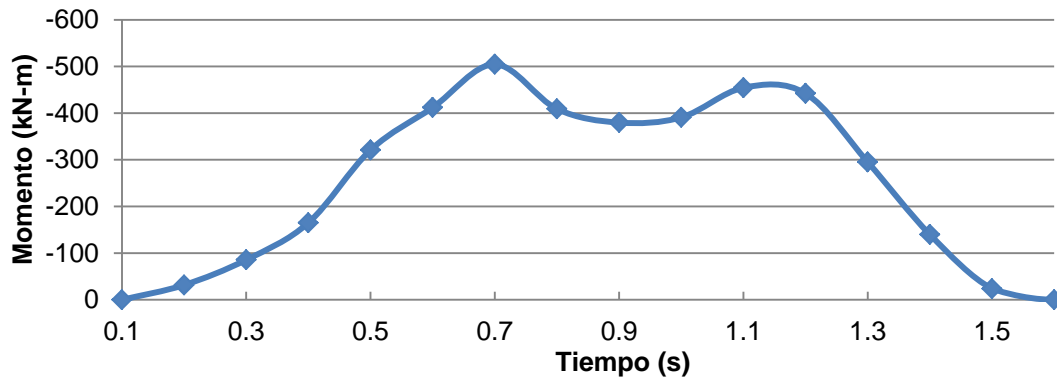


Figura 78. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 15m.

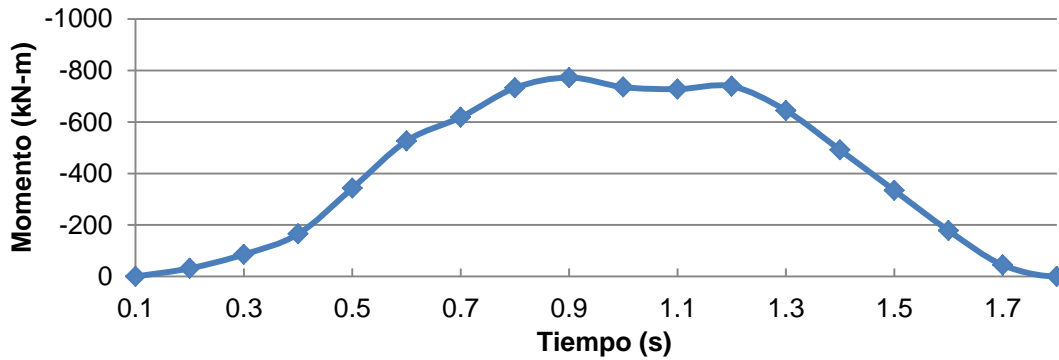


Figura 79. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 20m.

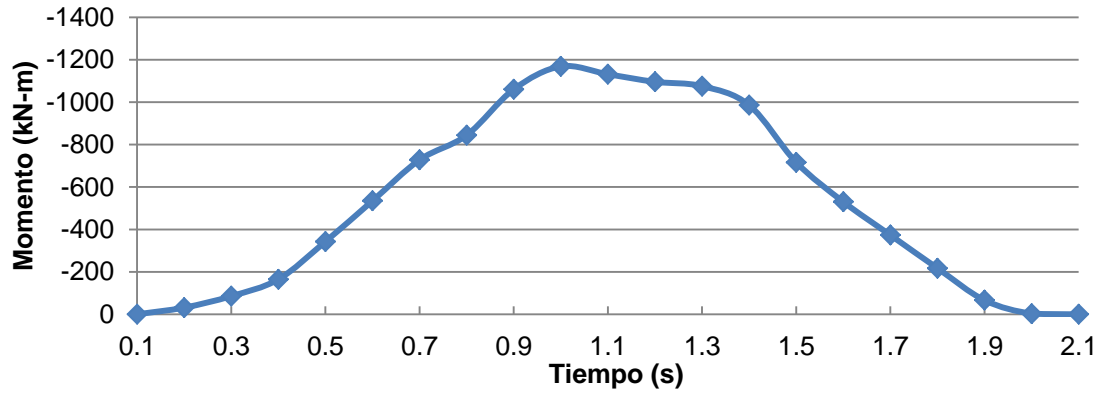


Figura 80. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 25m.

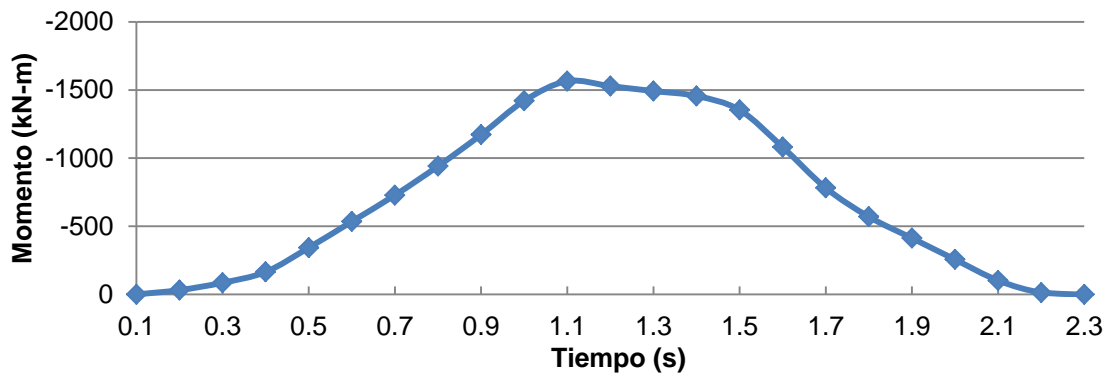


Figura 81. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 30m.

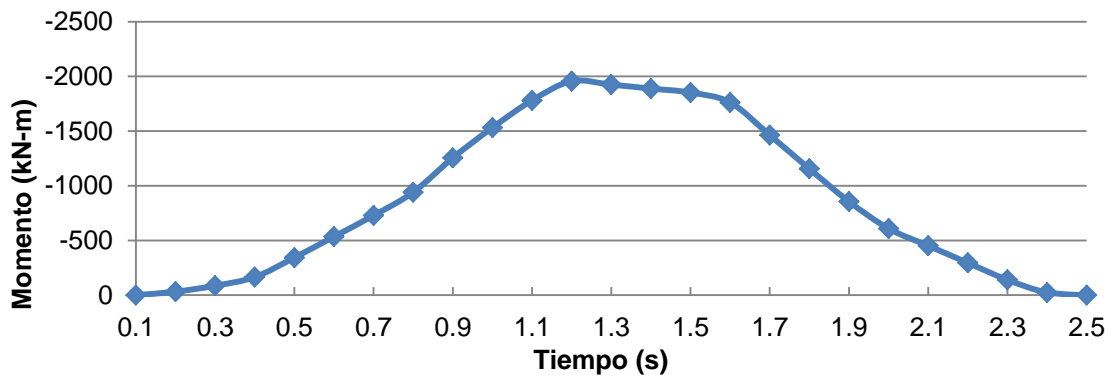


Figura 82. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 35m.

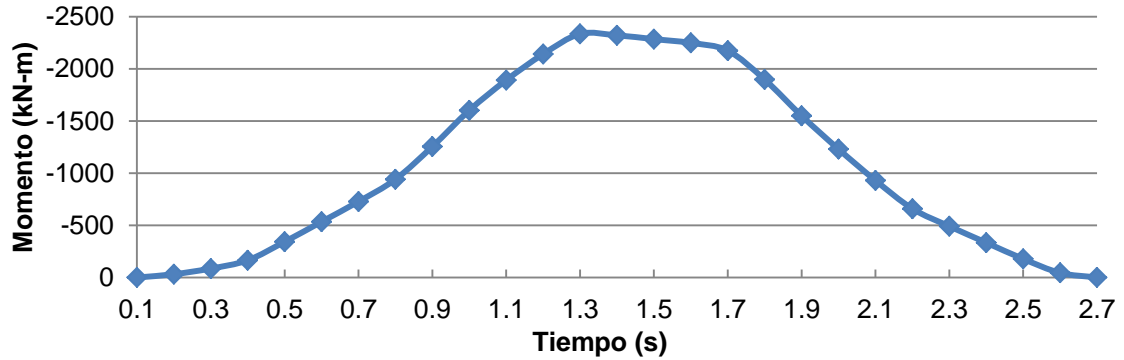


Figura 83. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 40m.

En lo que respecta a este grupo de camiones, se calculará más adelante un camión con 3 ejes, tales que simulen de la mejor manera el comportamiento del rango de momentos calculado con la **Ecuación (21)**, revisando el error para cada intervalo de tiempo, además del error para el momento máximo.

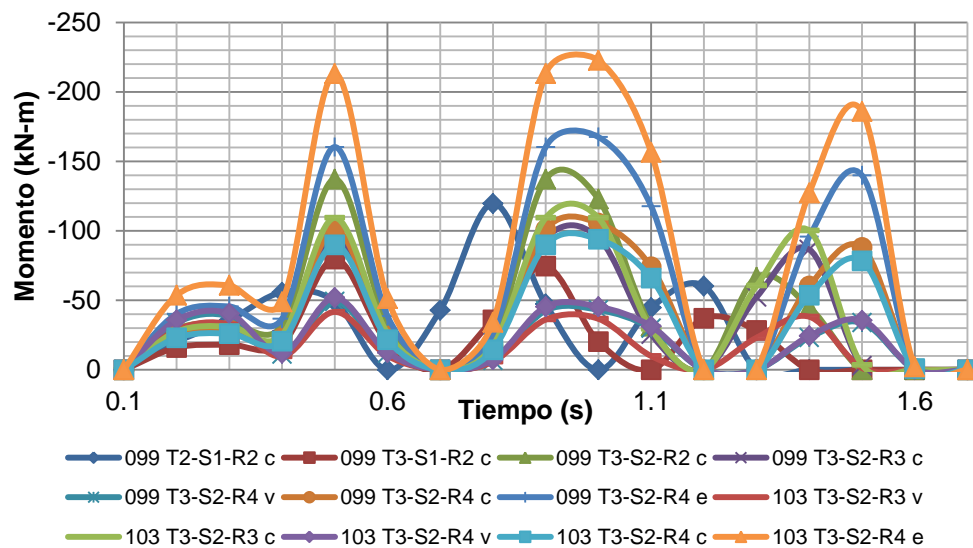
#### 4.4.3 Simulación del tráfico real para los vehículos de la clase A, del Grupo T-S-R y sus rangos de momentos equivalentes.

De la misma manera que para los grupos de vehículos anteriores, se obtuvo el análisis correspondiente a la clase A, para el grupo C, con la pura finalidad de determinar el rango de momentos equivalentes, que servirá como punto de comparación con respecto al rango de momentos que se obtendrá con la propuesta del camión T-S-R.

Para este inciso, al igual que en los anteriores, se analizará primeramente el comportamiento estructural del puente sometido a las cargas vivas producto del tráfico real. Habiendo asumido este análisis, se procederá a observar los rangos de momentos obtenidos para la clase A de este grupo.

Los resultados de las “corridas” para la clase A, del grupo T-S-R, conjuntamente con la totalidad de las gráficas en las cuales se presentan los momentos en el centro del claro para los diferentes vehículos que componen el tráfico real, no se presentan en este documento, debido a la cantidad de datos que se manejan.

A continuación se presentan las gráficas de comportamiento de los modelos matemáticos donde las fuerzas externas están representadas por los vehículos que componen el grupo T-S-R, y, de igual manera, se graficarán vehículos cargados, vacíos y excedidos a la normatividad vigente (Figuras 84 a 91).



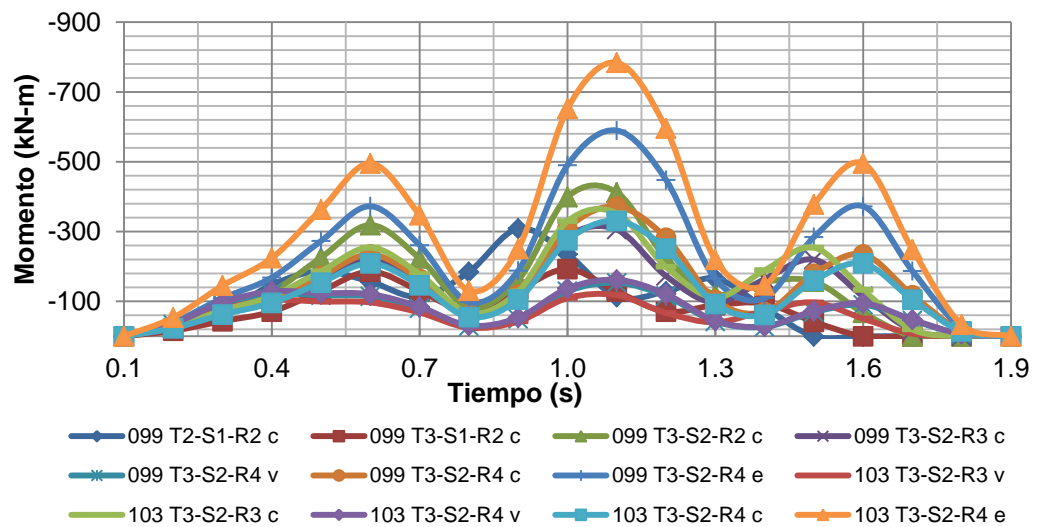
**Figura 84.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 5m.

Si se observa la **Figura 84**, es posible visualizar que el comportamiento de estos vehículos varía mucho, dependiendo del tipo de vehículo de que se trate, al igual que para los grupos anteriores de vehículos.

Un ejemplo de esta variación se puede encontrar entre el camión T2-S1-R2 y el camión T3-S2-R4 (ambos vehículos cargados). En el primero, el momento máximo se presenta en un tiempo de 0.8 segundos, en un puente con claro de 5m; mientras que para el camión T3-S2-R4, el momento máximo se presenta a 1.0 segundos, a partir de que se empiezan a registrar valores.

Cabe resaltar que, de acuerdo con los reportes técnicos de la IMT <sup>(39)- (47)</sup>, la mayoría de los vehículos que componen este grupo son vehículos T3-S2-R4, de manera que el comportamiento del rango de momentos equivalentes para este grupo se asemeje al comportamiento de este tipo de vehículos.

Por último, al igual que para el grupo T-S, el grupo T-S-R para puentes con un claro de 5m (**Figura 84**) presenta puntos en los que los momentos flexionantes son cero, debido a la longitud corta del puente.

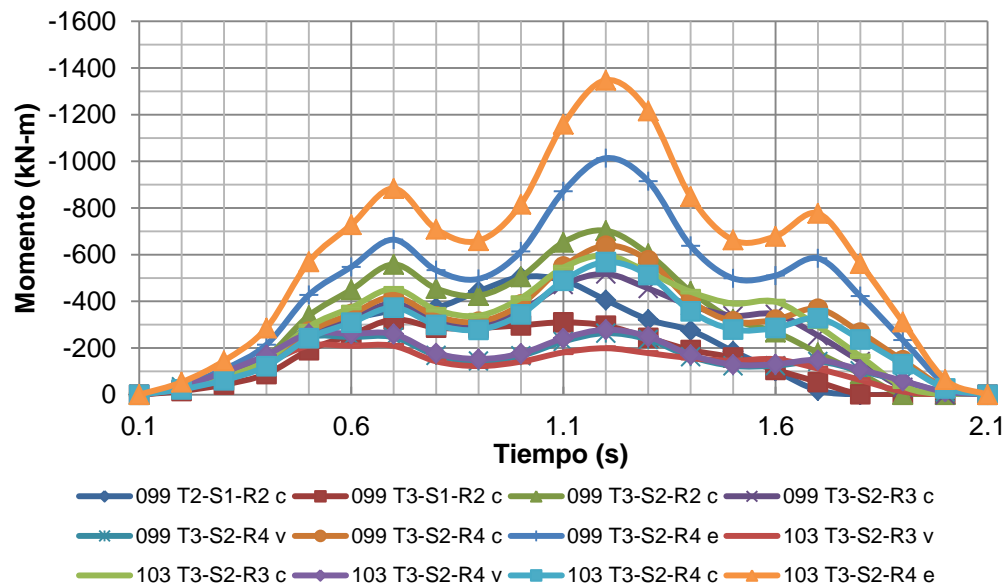


**Figura 85.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 10m.

Para los claros de 10 a 40 metros, para el comportamiento de los momentos ya no se presenta el cero. Esto se debe a que los puentes para cualquier claro mayor que 5 metros presentan carga a lo largo del claro para cualquier tiempo  $t$  (**Figuras 85 a 91**).

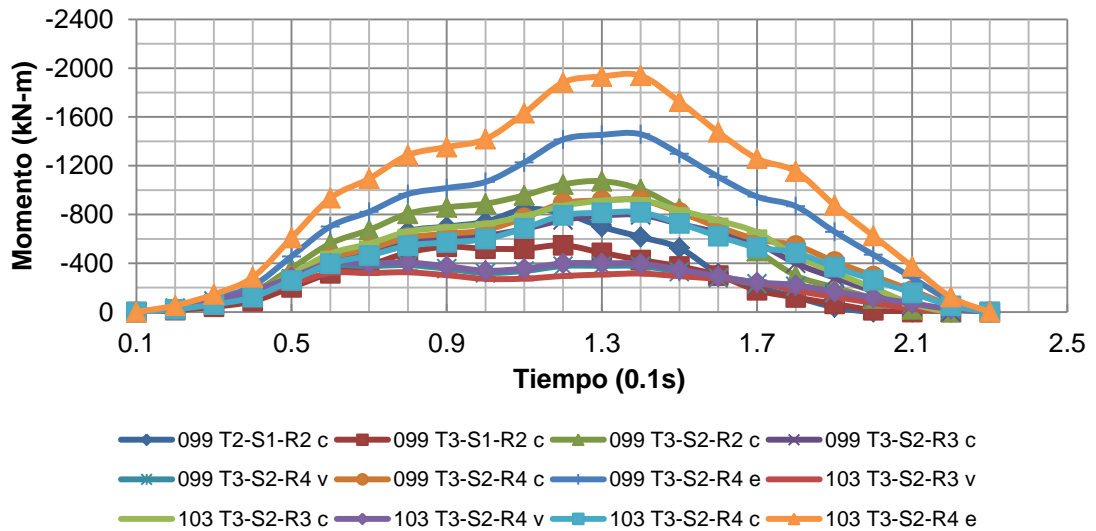
En las gráficas de los claros de 5, 10, 15 y 20 metros (**Figuras 84 a 87**) es fácilmente visible que para todos los vehículos existen tres curvas; es decir, que para este tipo de vehículos existen tres máximos relativos en la curva de momento contra tiempo, sin importar que varíe el tiempo en el que aparecen esos máximo y la magnitud de los mismos.

Lo anterior se debe a la adición del eje trasero, que pertenece al remolque que se anexa al grupo de vehículos T-S, convirtiéndose de esta manera en un vehículo doblemente articulado T-S-R.

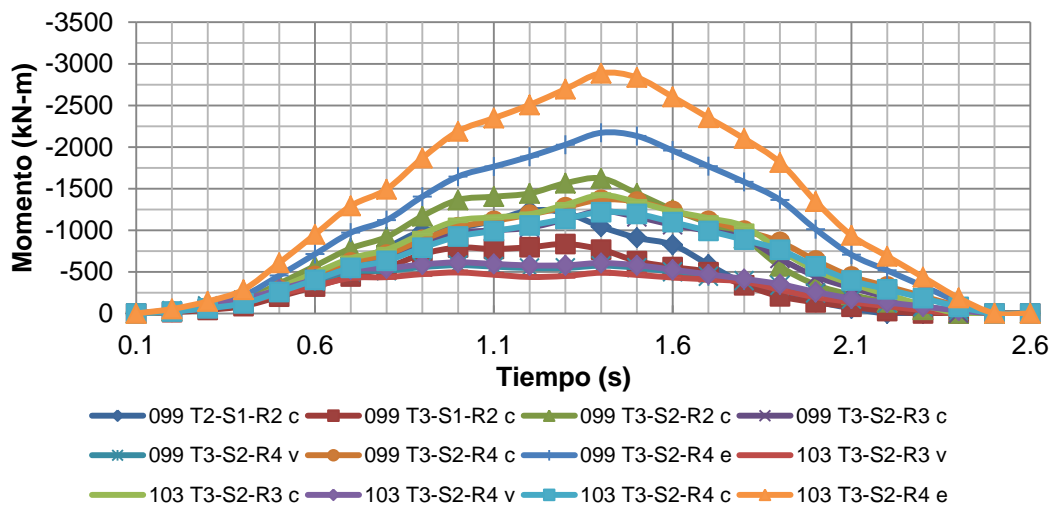


**Figura 86.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 15m.

Si se observa la **Figura 87**, que pertenece al comportamiento para un claro de 20m, se pueden notar los máximos relativos que conforman la curva de comportamiento. Sin embargo, ya no es posible denotarlos con tanta facilidad, como para los claros de 5 a 15 metros.



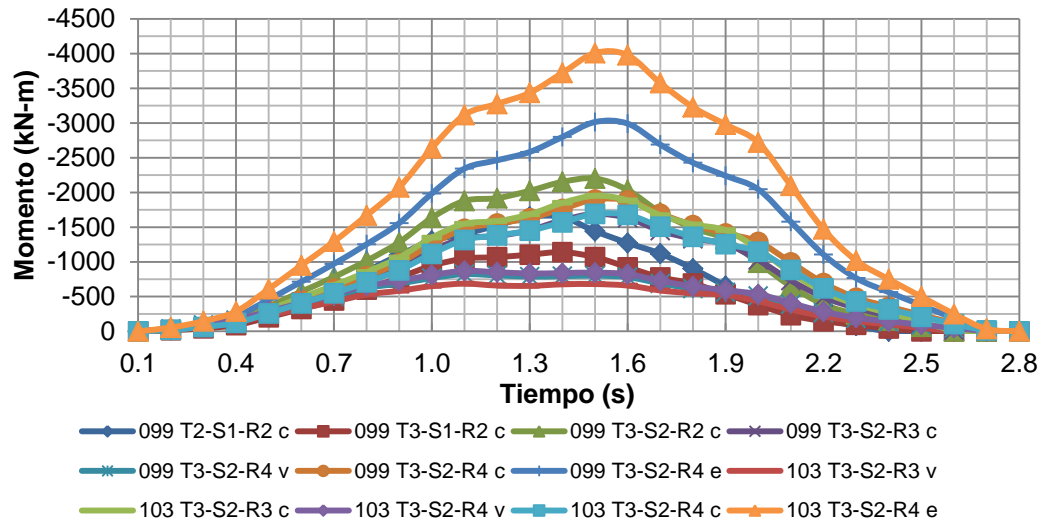
**Figura 87.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 20m.



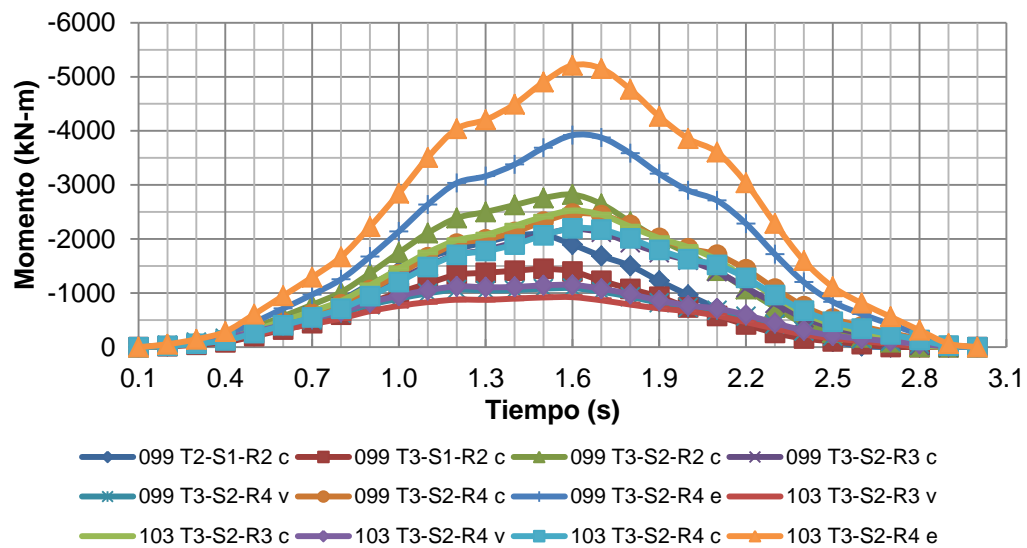
**Figura 88.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 25m.



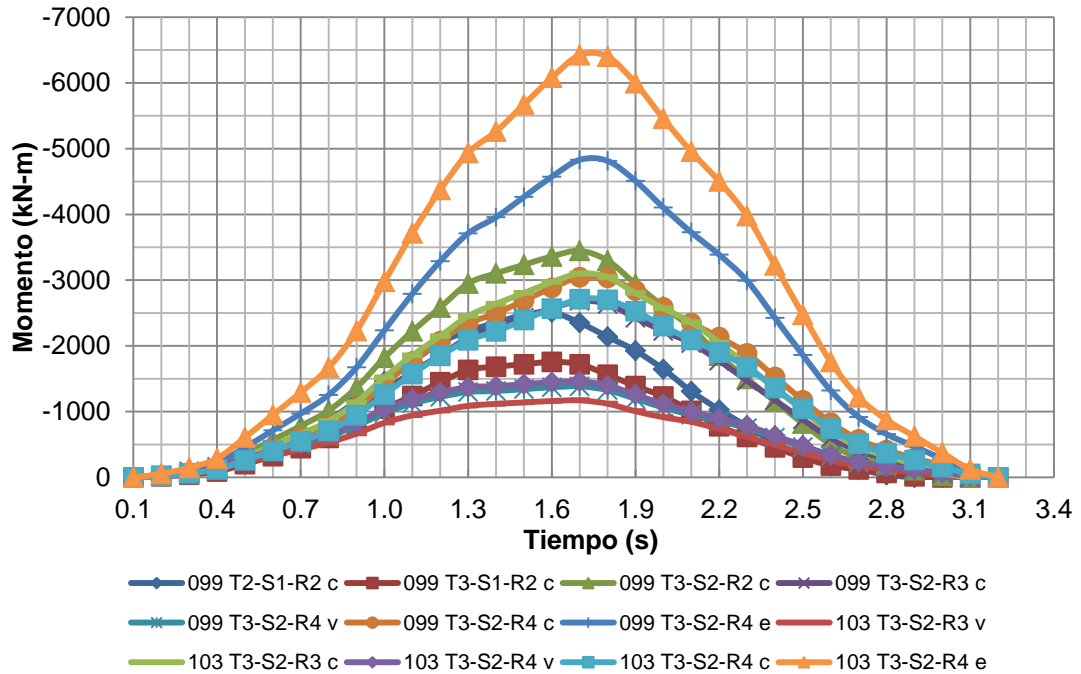
Se puede denotar que las curvas de comportamiento se vuelven más estables después de entrar al intervalo de claro de 25 a 40 metros (Figuras 88 a 91). Entendiéndose por estabilidad a un comportamiento parabólico simple.



**Figura 89.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 30m.



**Figura 90.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 35m.



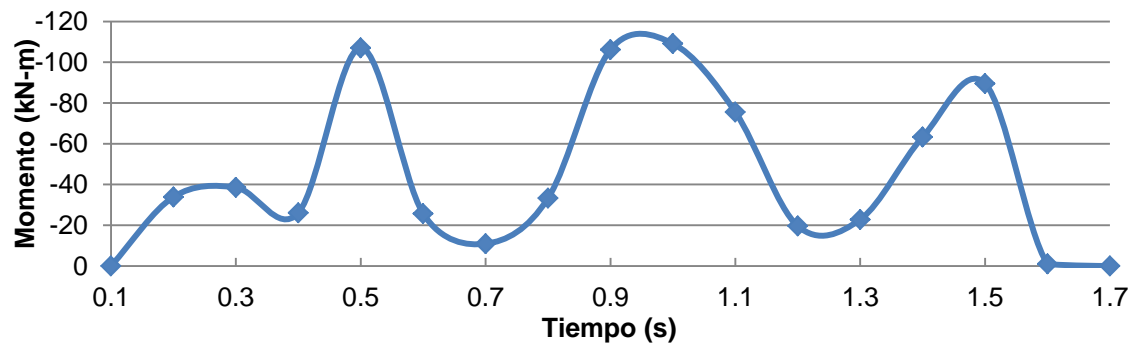
**Figura 91.** Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 40m.

El resto de las gráficas obtenidas para el comportamiento a flexión al centro del claro de los vehículos que pertenecen al grupo T-S-R y a la clase A, para los diversos claros, no se presentan debido a la gran cantidad de información que se está manejando y que dificulta la impresión.

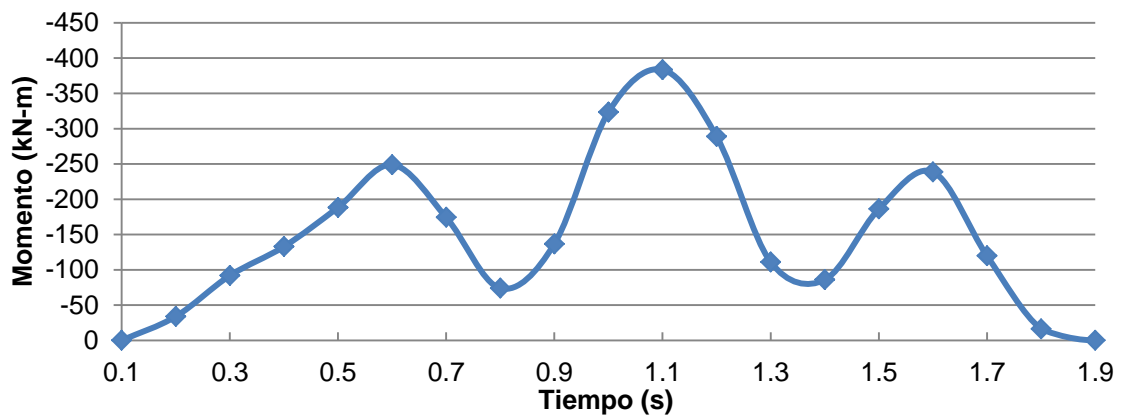
Con la **Ecuación (21)** y los datos contenidos en el análisis del tráfico real para cada tiempo  $t$ , es posible generar un rango de momentos equivalente, tal como se hizo para los grupos C y T-S. Con estos rangos de momentos se obtendrá una curva que se comparará con el análisis que se tendrá al cargar el sistema estructural con el camión propuesto para esta Clase y este Grupo.

De esta manera, el rango de momentos equivalentes obtenido para el camión propuesto para el grupo T-S-R deberá ser igual o al menos muy similar al calculado con la **Expresión (21)** de este capítulo.

A continuación, se presentan en la siguientes gráficas (**Figuras 92 a 99**) los rangos de momentos equivalentes para los camiones de fatiga que corresponden a la clase A, del grupo T-S, para los diversos claros, los que servirán como punto de comparación con el resultado obtenido del camión propuesto para esta Clase.



**Figura 92.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 5m.



**Figura 93.** Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 10m.

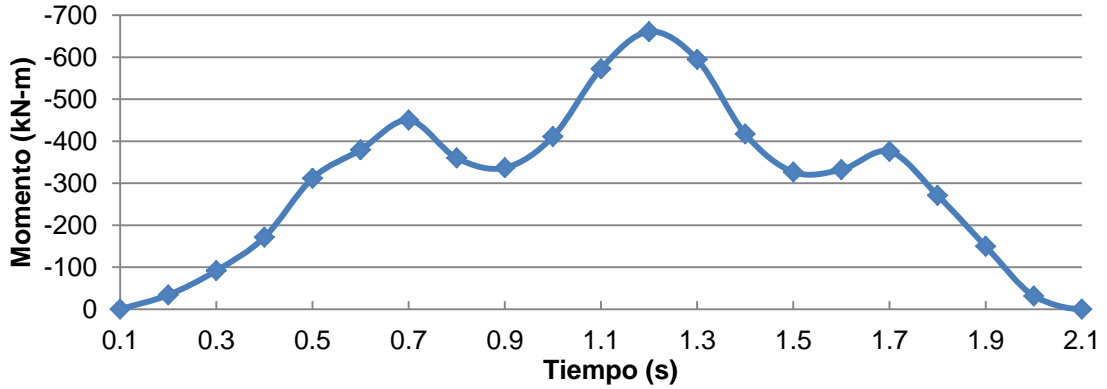


Figura 94. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 15m.

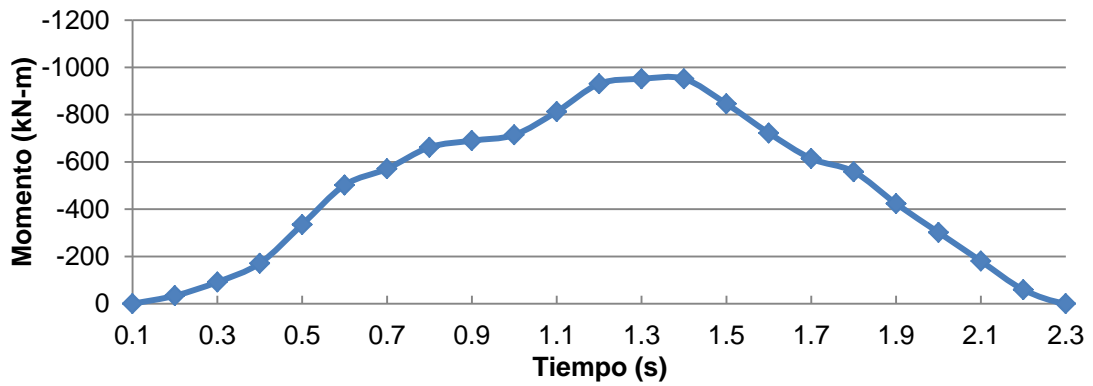


Figura 95. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 20m.

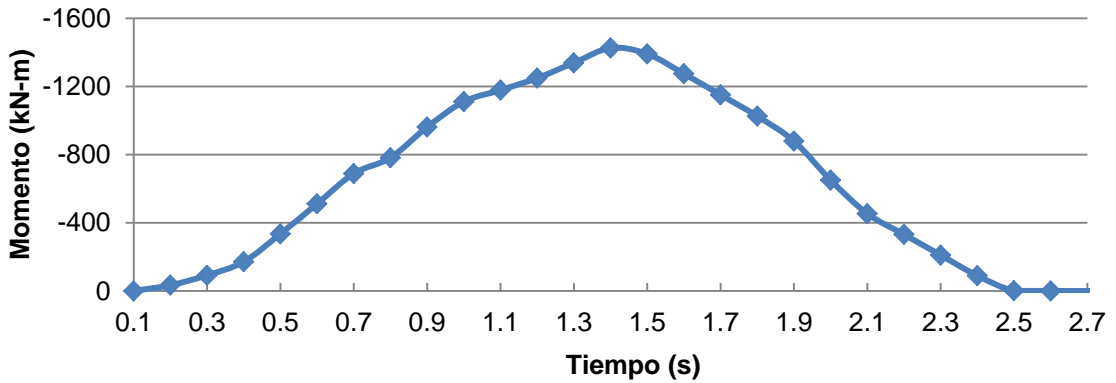


Figura 96. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 25m.

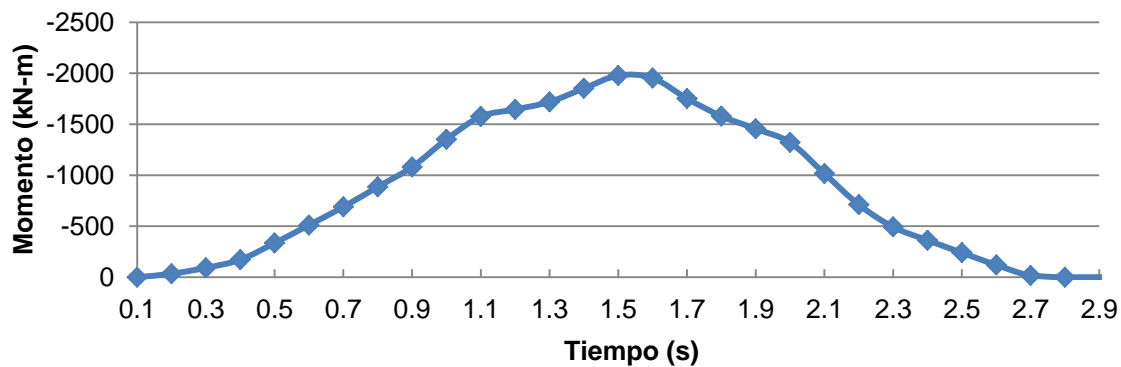


Figura 97. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 30m.

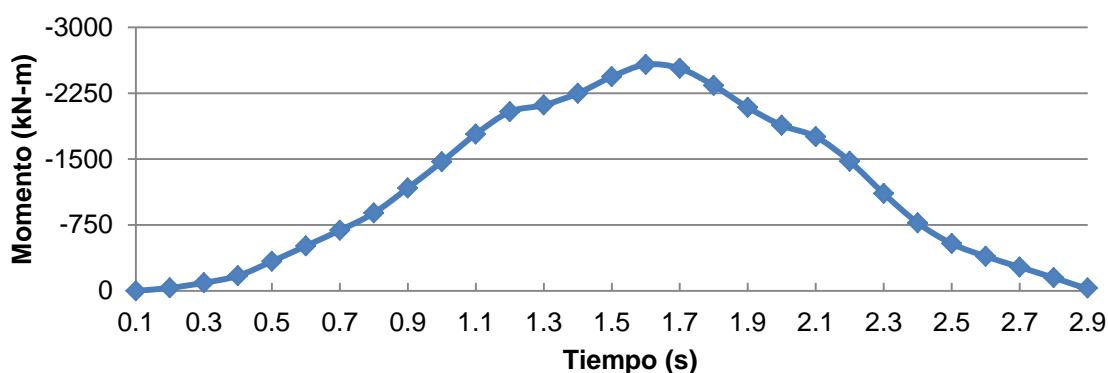


Figura 98. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 35m.

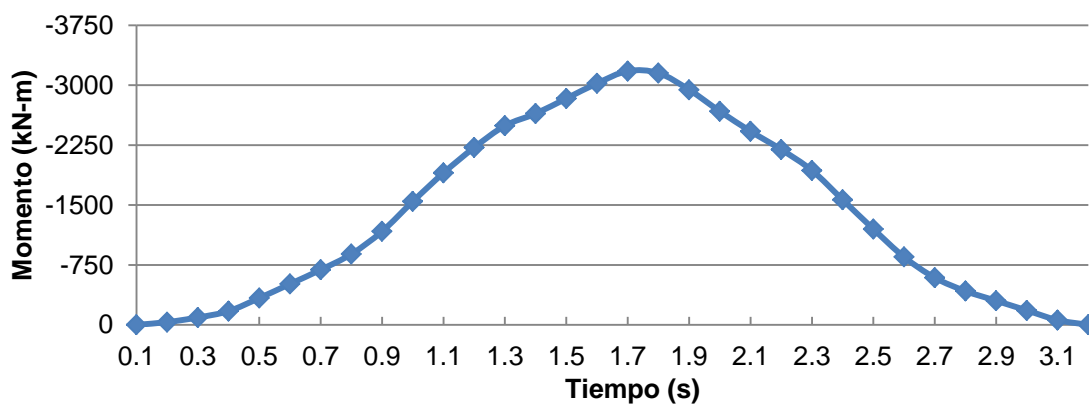


Figura 99. Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 40m.

En lo que respecta a este grupo de camiones, se calculará más adelante un camión con 4 ejes (uno con 5 ejes para claros menores que 20 metros) tales que simulen de la mejor manera el comportamiento del rango de momentos calculado con la **Ecuación (21)** y que se presentan

en las figuras anteriores, a fin de revisar el error para cada intervalo de tiempo además del error para el momento máximo.

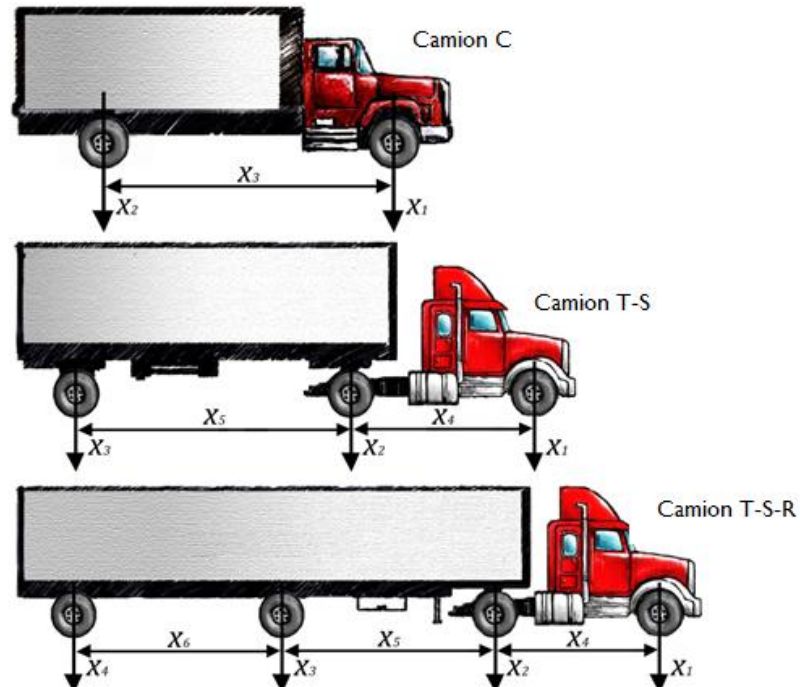
#### **4.5 Determinación aproximada de la carga por eje para los diversos vehículos de fatiga.**

Una vez determinados los rangos de momentos equivalentes, aplicando la **Expresión (21)** a los resultados obtenidos del análisis en el software SAP2000, es necesario determinar los camiones de fatiga con los cuales se habrá de comparar el comportamiento de los obtenidos de la **Ecuación (21)**.

Para determinar los camiones de fatiga que representarán a la clase A, para los diversos grupos previamente mencionados, es necesario evaluar las variables contenidas en cada uno de ellos.

Dichas variables son la distribución de la carga por eje y la separación entre los ejes que tendrán estos camiones. De suerte que para el grupo C, donde se plantea obtener un camión de 2 ejes separados por una distancia, se deberán resolver 3 incógnitas o variables; mientras que para el grupo T-S en el que se estima que la solución esté dada por un camión con 3 ejes y las 2 distancias entre los ejes (la primera que separaría al eje delantero del eje central y la segunda que separaría al eje central del eje trasero) de manera que el total de variables para este camión es de 5; por último, para el camión T-S-R, que representará al grupo conformado por los camiones T-S-R, se plantea una solución de 4 ejes, separados por 3 distancias (la primera que separa el eje delantero del segundo, la segunda que separaría al segundo eje del tercero y por último, la tercera que separaría al eje tercero del último eje), siendo 7 el total de las variables

para este último camión(y un camión de 5 ejes para claros menores que 20 metros). En la siguiente figura se representa la propuesta para estos 3 camiones y las variables mencionadas



**Figura 100.** Propuesta de camiones para los diversos grupos y la cantidad de variables por camión, que deben ser resueltas.

Dada la gran cantidad de variables que deben ser satisfechas para obtener la mejor aproximación para estos modelos de carga, es necesario fijar algunas de las variables, ya que si esto no se hiciera, la solución matemática sería demasiado compleja.

Por la razón anterior, se decidió fijar las variables que representan la carga que debe tener cada eje de los diversos camiones. Esto se debe a que se cuenta con la **Ecuación (13)**, contenida en el CAPÍTULO 2 de este documento, la cual expresa:

$$W_{eq} = (\sum f_i W_i^3)^{1/3}$$

Donde:

$f_i$  = Frecuencia de camiones con un peso  $W_i$  sobre el puente.

$W_i$  = Peso del camión para el intervalo  $i$ .

$W_{eq}$  = Peso equivalente total del camión de fatiga.

Si se anexa a esta ecuación la sumatoria de las fracciones de distribución de la carga por eje, para los diversos vehículos, se obtiene:

$$W_{eq} = \left\{ \sum f_i \left[ \left( \sum_{m=1}^n a_{mi} \right) W_i \right]^3 \right\}^{1/3} \quad (22)$$

Donde:

$f_i$  = Frecuencia de camiones con un peso  $W_i$  sobre el puente.

$W_i$  = Peso del camión para el intervalo  $i$ .

$W_{eq}$  = Peso equivalente total del camión de fatiga.

$\sum a_{mi}$  = Sumatoria de las fracciones de distribución para el total del eje uno hasta el enésimo para cada uno de los diversos vehículos.

Se conoce que esto no afecta a la expresión, dado que la sumatoria de las fracciones de distribución es igual a la unidad, como fue descrito en la **Ecuación (18)** del CAPÍTULO 3.



Si se separa la sumatoria en la  $n$ -ésima cantidad de fracciones de distribución que tiene un vehículo con peso  $W_i$  y se multiplica cada fracción de distribución por el respectivo peso del vehículo, se tiene:

$$W_{eq} = \{\sum f_i (a_{1i}W_i + a_{2i}W_i + \dots + a_{ni}W_i)^3\}^{1/3} \quad (23)$$

Observando la **Ecuación (23)** es posible denotar que  $(a_{1i}W_i + a_{2i}W_i + \dots + a_{ni}W_i)$ , representa un polinomio que se elevará a una potencia cubica. Si se eleva el polinomio al exponente 3, la solución algebraica completa sería demasiado compleja, tal que no se podría separar una fracción de distribución porque se vería afectada por las demás fracciones.

Para efectos de esta investigación, dada la naturaleza de los datos y la cantidad de datos que se manejan, se demostrará que la solución aproximada que se propondrá para la solución a la **Ecuación (23)** se asemeja en gran manera a la solución matemática exacta.

La solución aproximada que se planteará se basa tanto en la **Ecuación (23)** como en la suposición de que la sumatoria de las acciones generadas por un eje individual de un camión con peso  $W_i$  es equivalente a las acciones generadas por el total del peso del vehículo  $W_i$ .

Si bien, lo anterior no tiene una fundamentación matemática adecuada, los resultados obtenidos para esta solución aproximada muestran un error del 3 por ciento, con respecto al peso total calculado con la **Expresión (13)** para las diversas clases. Esto sugiere que la aproximación planteada es bastante cercana a la solución completa.

Entonces considérese la **Ecuación (23)** y al potencializar ambos lados de la expresión al cubo para eliminar el radical, se tiene:

$$(W_{eq})^3 = \sum f_i (a_{1i}W_i + a_{2i}W_i + \dots + a_{ni}W_i)^3$$

Ahora bien, la solución aproximada se encuentra en el siguiente paso, que consiste en elevar al cubo el polinomio que aparece en la expresión anterior. Sin embargo, únicamente se considera que cada término del polinomio está elevado a la potencia 3; de esta manera no aparecerá la solución completa al polinomio. Así se representará, matemáticamente, que la sumatoria de los pesos en los diversos ejes de un camión con peso  $W_i$  es semejante al peso equivalente obtenido de la **Ecuación (13)**, es decir:

$$(W_{eq})^3 \approx \sum f_i(a_{1i}W_i)^3 + \sum f_i(a_{2i}W_i)^3 + \dots + \sum f_i(a_{ni}W_i)^3 \quad (24)$$

Dado que el resultado de la **Ecuación (24)** no es igual al peso equivalente obtenido, se nombrará a la sumatoria de esos datos: “**Peso equivalente aproximado**” y se denotará el valor con  $\widetilde{W}_{eq}$ , tal que:

$$(\widetilde{W}_{eq})^3 = \sum f_i(a_{1i}W_i)^3 + \sum f_i(a_{2i}W_i)^3 + \dots + \sum f_i(a_{ni}W_i)^3 \quad (25)$$

Si se considera ahora que cada uno de los términos de la **Ecuación (25)** representa el peso equivalente para los diversos ejes del camión de fatiga y sabiendo que la sumatoria representa el total de  $(\widetilde{W}_{eq})^3$ , entonces cada término expresa una parte  $a$  del total  $(\widetilde{W}_{eq})^3$ , es decir:

$$(a_1\widetilde{W}_{eq})^3 = \sum f_i(a_{1i}W_i)^3$$

$$(a_2\widetilde{W}_{eq})^3 = \sum f_i(a_{2i}W_i)^3$$

...

$$(a_n\widetilde{W}_{eq})^3 = \sum f_i(a_{ni}W_i)^3$$

Al escribir las ecuaciones anteriores de manera general, se tiene:

$$(a_k \widetilde{W}_{eq})^3 = \sum f_i (a_{mi} W_i)^3 \quad (26)$$

Donde  $k$  representa alguno de los ejes que tiene el camión de fatiga y  $m$  representa alguno (o varios) de los ejes de los camiones convencionales.

Es importante decir que  $m$  y  $k$  no son iguales, dado que dependen del grupo de camiones que se evalúe. Entonces se agruparán algunos ejes de los camiones reales para conformar un eje del camión de fatiga.

Por último, sacando raíz cubica a ambos lados de la **Ecuación (26)** y despejando  $a_k$ , se obtiene el factor de distribución para cada uno de los ejes del camión de fatiga, lo cual se expresa:

$$a_k = \frac{[\sum f_i (a_{mi} W_i)^3]^{1/3}}{\widetilde{W}_{eq}} \quad (27)$$

Donde:

$a_k$  = Factor de distribución para el k-ésimo eje del camión de fatiga.

$a_{mi}$  = Fracciones de distribución para el m-ésimo eje del camión con peso  $W_i$ .

$f_i$  = Frecuencia de camiones con un peso  $W_i$  sobre el puente.

$W_i$  = Peso del camión para el intervalo  $i$ .

$\widetilde{W}_{eq}$  = Peso equivalente aproximado del camión de fatiga.

Con la **Expresión (27)** es posible determinar el porcentaje del total de la carga  $\widetilde{W}_{eq}$  que le corresponde a cada eje, para los diversos camiones de fatiga.

Esta fracción de distribución  $a_k$  se multiplicará por el peso equivalente  $W_{eq}$  que se obtuvo en el apartado 4.3 de esta investigación, para obtener un valor más apegado al valor esperado de la solución matemática compleja.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los factores de distribución de los diversos vehículos de fatiga, además de la carga por eje que deberán tener los camiones que representen a la clase A de los diversos grupos.

#### 4.5.1 Fracciones de distribución para el camión C y el peso por eje para la clase A del grupo C.

Aplicando de la **Ecuación (26)** se obtuvieron las cargas por eje para el vehículo C de fatiga que representará a la clase A.

**Tabla 31.** Peso aproximado por eje y peso equivalente aproximado para el vehículo C de fatiga de la clase A

Tipo de carga	Nomenclatura	Peso (kN)
Eje delantero	$a_1 \widetilde{W}_{eq}$	34.9
Eje trasero	$a_2 \widetilde{W}_{eq}$	89.2
Peso Equivalente Aproximado	$\widetilde{W}_{eq}$	124.1

Nótese que el peso equivalente aproximado es  $\widetilde{W}_{eq} = 124.1 kN$ , mientras que el calculado en el apartado 4.3 para esta clase A es  $W_{eq} = 120.7 kN$ . De esta manera, el error que se

presenta es  $e = 2.9\%$ , lo cual confirma que la solución aproximada es equiparable a la solución completa.

Utilizando el peso aproximado para cada uno de los ejes y el peso equivalente aproximado (**Ecuación 27**) se encuentran las siguientes fracciones de distribución para el camión de fatiga:

**Tabla 32.** Fracciones de distribución para el camión de fatiga C

Tipo de fracción	Nomenclatura	Valor
Fracción de distribución para el eje delantero	$a_1$	0.28
Fracción de distribución para el eje trasero	$a_2$	0.72

Estas fracciones de distribución se utilizarán no sólo para la clase A, sino también para las demás clases que pertenecen al grupo C.

Si se multiplican estas fracciones de distribución por el peso equivalente  $W_{eq}$ , calculado en el apartado 4.3, se tienen las siguientes cargas por eje, para la clase A

**Tabla 33.** Carga por eje para la clase A, del vehículo C de fatiga.

Eje	Nomenclatura	Peso (kN)
Eje delantero	$W_{CA1}$	34.0
Eje trasero	$W_{CA2}$	86.7

Ya que estas cargas están determinadas, las variables desconocidas para el grupo C se reducen a una variable, que es la distancia que separará a estos ejes.

Se calcularán, a continuación, las cargas para los camiones T-S y T-S-R. Habiendo concluido esta fase, se realizará el análisis estructural correspondiente a los diversos vehículos, proponiendo la separación entre los ejes e iterando hasta obtener la mejor aproximación a los rangos de momentos obtenidos en 4.4.

#### 4.5.2 Fracciones de distribución para el camión T-S y el peso por eje para la clase A del grupo T-S.

Mediante la **Ecuación (26)** se obtuvieron las cargas por eje para el vehículo T-S de fatiga, que representará a la clase. Sin embargo, dado que interesa representar este camión únicamente con 3 ejes, se agruparon algunos ejes de los diversos vehículos, en particular los vehículos C-R, ya que se sabe que cuentan con un eje (eje individual o bien eje tándem) más que los vehículos T-S.

De lo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 34.** Peso aproximado por eje y peso equivalente aproximado para el vehículo T-S de fatiga, de la clase A

Tipo de Carga	Nomenclatura	Peso (kN)
Eje delantero	$a_1 \widetilde{W}_{eq}$	50.5
Eje central	$a_2 \widetilde{W}_{eq}$	130.4
Eje trasero	$a_3 \widetilde{W}_{eq}$	140.6
Peso equivalente aproximado	$\widetilde{W}_{eq}$	321.6

Nótese que el peso equivalente aproximado es  $\widetilde{W}_{eq} = 321.6 \text{ kN}$  para este grupo, mientras que el calculado en el apartado 4.3 para esta clase A es  $W_{eq} = 313.0 \text{ kN}$ . De esta manera, el error que se presenta es  $e = 2.7\%$ , lo cual confirma que la solución aproximada es similar a la solución que se obtuvo para el grupo C.

Utilizando el peso aproximado para cada uno de los ejes y el peso equivalente aproximado, (**Ecuación 27**) se encuentran las siguientes fracciones de distribución para el camión de fatiga:

**Tabla 35.** Fracciones de distribución para el camión de fatiga C

<b>Tipo de fracción</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>
Fracción de distribución para el eje delantero	$a_1$	0.16
Fracción de distribución para el eje central	$a_2$	0.40
Fracción de distribución para el eje trasero	$a_3$	0.44

Estas fracciones de distribución se utilizarán no sólo para la clase A, sino también para las demás clases que pertenecen al grupo T-S; de igual modo que se propuso para el grupo C.

Si se multiplican estas fracciones de distribución por el peso equivalente  $W_{eq}$  calculado en el apartado 4.3, se tienen las siguientes cargas por eje para la clase A.

**Tabla 36.** Carga por eje para la clase A del vehículo C de fatiga.

<b>Eje</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Peso (kN)</b>
Eje delantero	$W_{TSA1}$	49.2
Eje central	$W_{TSA2}$	127.0
Eje trasero	$W_{TSA3}$	136.9

Al determinar estas cargas, las variables desconocidas para el grupo T-S, se reducen a la solución de dos variables, las variables de la separación entre los ejes.

#### 4.5.3 Fracciones de distribución para el camión T-S-R y el peso por eje para la clase A del grupo T-S-R

Al igual que para el Grupo C y T-S, se obtuvieron las cargas por eje para el vehículo T-S-R de fatiga, que representará a la clase con la aplicación de la **Ecuación (26)**. Sin embargo, dado que interesa representar este camión únicamente con 4 ejes, se agruparon los ejes traseros del semirremolque con los ejes delanteros del remolque (ambos pudieron ser ejes individuales o tándems) con la finalidad de formar un único eje (en claros menores que 20 metros, se obtendrá un camión con 5 ejes, para una mejor simulación, desglosando el 3er eje).

En la **Tabla 37** se presentan los resultados de la aplicación de la **Ecuación (26)**, así como la sumatoria de las 4 cargas por eje del camión.

**Tabla 37.** Peso aproximado por eje y peso equivalente aproximado para el vehículo T-S-R de fatiga de la clase A

Tipo de carga	Nomenclatura	Peso (kN)
Eje delantero	$a_1 \widetilde{W}_{eq}$	50.9
Eje central 1	$a_2 \widetilde{W}_{eq}$	110.8
Eje central 2	$a_3 \widetilde{W}_{eq}$	215.3
Eje trasero	$a_4 \widetilde{W}_{eq}$	107.7
Peso Equivalente Aproximado	$\widetilde{W}_{eq}$	484.7

El peso equivalente aproximado es  $\widetilde{W}_{eq} = 484.7 \text{ kN}$  para este grupo, mientras que el calculado en el apartado 4.3 para esta clase A es  $W_{eq} = 479.3 \text{ kN}$ , tal que el error que se presenta es  $e = 1.1\%$ , siendo este error el más pequeño de las 3 muestras o grupos.



Utilizando la **Ecuación (27)**, que involucra la fracción de distribución para el camión de fatiga, el peso aproximado para cada uno de los ejes y el peso equivalente aproximado se encuentran las siguientes fracciones de distribución para el camión de fatiga:

**Tabla 38.** Fracciones de distribución para el camión de fatiga C

<b>Tipo de fracción</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>
Fracción de distribución para el eje delantero	$a_1$	0.11
Fracción de distribución para el eje central 1	$a_2$	0.23
Fracción de distribución para el eje central 2	$a_3$	0.44
Fracción de distribución para el eje trasero	$a_4$	0.22

Estas fracciones de distribución se utilizarán no sólo para la clase A, sino también para las demás clases que pertenecen al grupo T-S; de igual modo que se propuso para el grupo C.

Si se multiplican estas fracciones de distribución por el peso equivalente  $W_{eq}$ , calculado en el apartado 4.3, se tienen las siguientes cargas por eje para la clase A:

**Tabla 39.** Carga por eje para la clase A del vehículo C de fatiga

<b>Eje</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Peso (kN)</b>
Eje delantero	$W_{TSRA1}$	50.4
Eje central 1	$W_{TSRA2}$	109.5
Eje central 2	$W_{TSRA3}$	212.9
Eje trasero	$W_{TSRA4}$	106.5

Definidas estas variables, las variables para la solución de este camión son 3, que son las 3 separaciones entre los ejes del camión.

#### **4.6 Determinación de la distancia entre los ejes para los diversos vehículos de Fatiga y la comparación de los rangos de momentos.**

Definida la cantidad de carga por eje que deberán contener los camiones de fatiga, para los diversos grupos de vehículos, es necesario definir ahora las distancias entre los ejes. Una vez definidas estas distancias, será necesario comparar los rangos de momentos obtenidos en el apartado 4.4, contra un análisis en cuyas cargas actuantes sobre los puentes serán las cargas por eje, camiones representativos que se pondrán para la evaluación.

Dado que en el apartado 4.5 se fijaron las variables de cargas de una manera aproximada, esto nos obliga a proponer las distancias entre ejes, tales que al determinar el análisis estructural con los camiones propuestos se encuentre el menor error a lo largo de toda la curva de comportamiento y de los momentos máximos, tomando como punto de comparación el rango de momentos obtenido en el apartado 4.4.

Dada la complejidad de las expresiones matemáticas que representarían los momentos al centro del claro, para los diversos camiones, en función del tiempo, se decidió realizar un análisis iterativo tal que se encuentre el mejor proporcionamiento de estas distancias para minimizar el error.

Además, dada la importancia de obtener el rango equivalente máximo de momentos, ya que con él se evaluará la fatiga, se realizó una comparación del momento máximo obtenido por la **Ecuación (21)** y el momento máximo que se obtuvo del análisis con los camiones de fatiga.

Por último, y no menos importante, se realizó una comparativa de los momentos máximos obtenidos para cada caso, por los diversos vehículos que componen el tráfico real y los momentos máximos obtenidos por los camiones de fatiga. Esto es con la finalidad de observar en qué posición se encuentra el rango de momentos máximos del camión, comparado con lo del tráfico real.

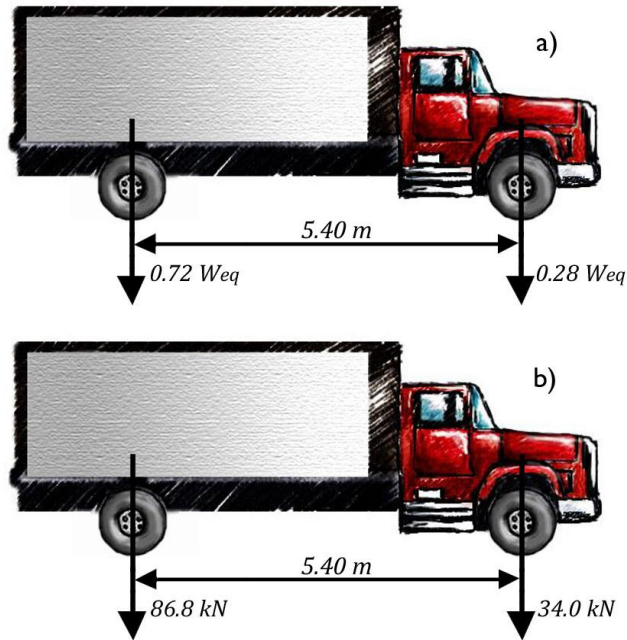
Lo anterior es importante, dado que se conoce que si algún vehículo del tráfico real sobrepasa en cualquier instante de tiempo al límite de fatiga, dicho vehículo debe considerarse para la evaluación de la fatiga en el puente, sin importar que el camión representativo de fatiga no llegue a ese nivel de esfuerzos. <sup>(22)</sup>

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los diversos vehículos de fatiga.

#### **4.6.1 Resultados de la comparación de los rangos de momento para del camión de fatiga C.**

Realizando varias iteraciones para este camión, se encontró que la separación entre los ejes que mejor representa al rango de momentos es de 5.4m.

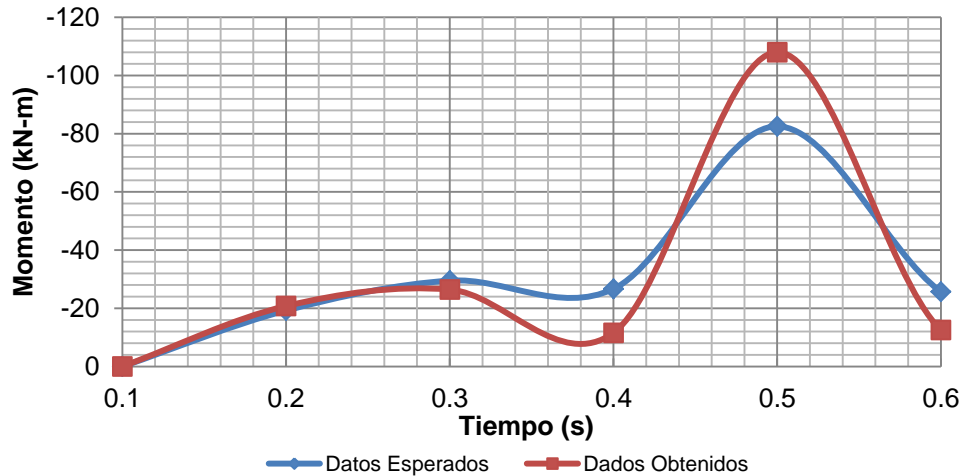
En la **Figura 101** se presenta el camión que representará a la clase A del grupo C. Además, se muestra el camión de manera general, en función de su carga, que servirá para representar a las demás clases de este grupo de camiones.



**Figura 101.** Camión de fatiga grupo C, clase A y camión C generalizado.

En las siguientes figuras se presentan las gráficas para los diversos casos de la comparación realizada entre el rango de momentos esperados (obtenidos por la **Ecuación 21**) y el rango de momentos obtenido con el camión propuesto.

Es importante recordar que esta comparación se usará para futuras investigaciones, donde se mencionará que los ciclos equivalentes producidos por el camión propuesto se asemejan a los ciclos equivalentes producidos por el rango de momentos esperado. No obstante, en esta investigación se debe demostrar que los datos obtenidos en esta aproximación son bastante cercanos a los esperados.



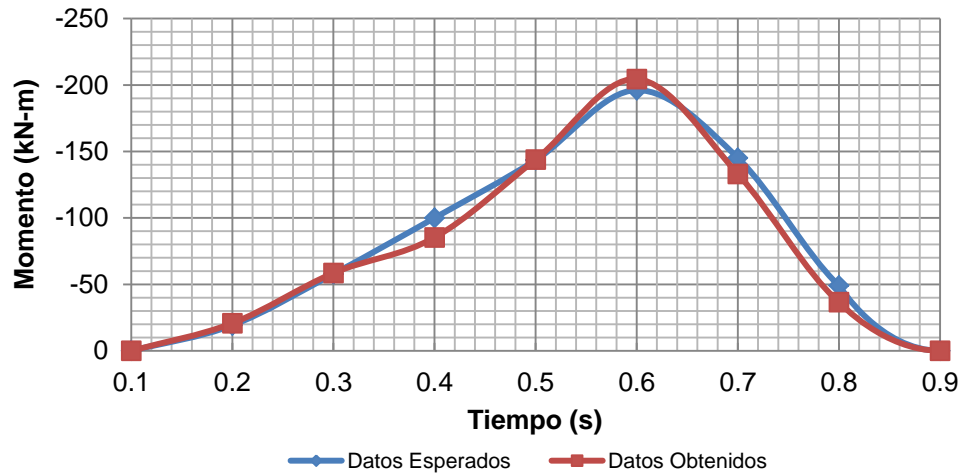
**Figura 102.** Comparación para un claro de 5m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.

Para el claro de 5 metros (**Figura 102**), se encontró un porcentaje de error absoluto cuadrático  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 14\%$ , donde la raíz cuadrada de este último representará el error cuadrático medio, tal que  $ECM = 37\%$ .

El error cuadrático medio dice que hay una coincidencia de un 63%, a lo largo del tiempo en que se evaluaron los momentos. Con esto se puede concluir que, para este claro, la aproximación es inadecuada. Es posible reducir este error si se desglosa el eje trasero en un tándem. Sin embargo, ya que son escasos los puentes de acero con claros de 5 metros, es posible despreciar este error y considerar únicamente si se ajusta adecuadamente para claros superiores a los 5 metros.

Referente al claro de 10 metros (**Figura 103**), se encontró un porcentaje de error absoluto cuadrático  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 1.4\%$ . Calculando la raíz cuadrada se tiene el error cuadrático medio, que es  $ECM = 12\%$ . Si se considera que una buena aproximación para los ciclos

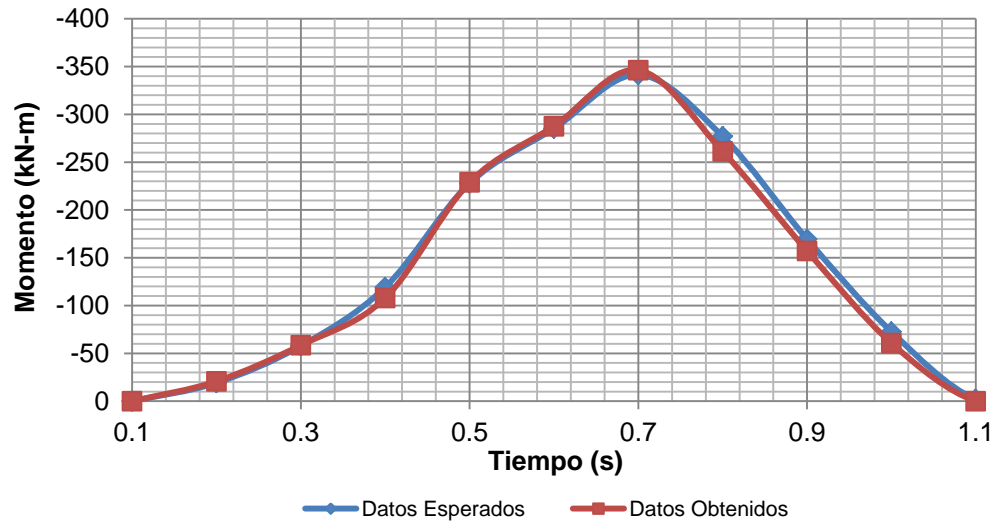
equivalentes es de una coincidencia del 85%, es posible decir que para el claro de 10 metros se tiene una aproximación aceptable.



**Figura 103.** Comparación para un claro de 10m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.

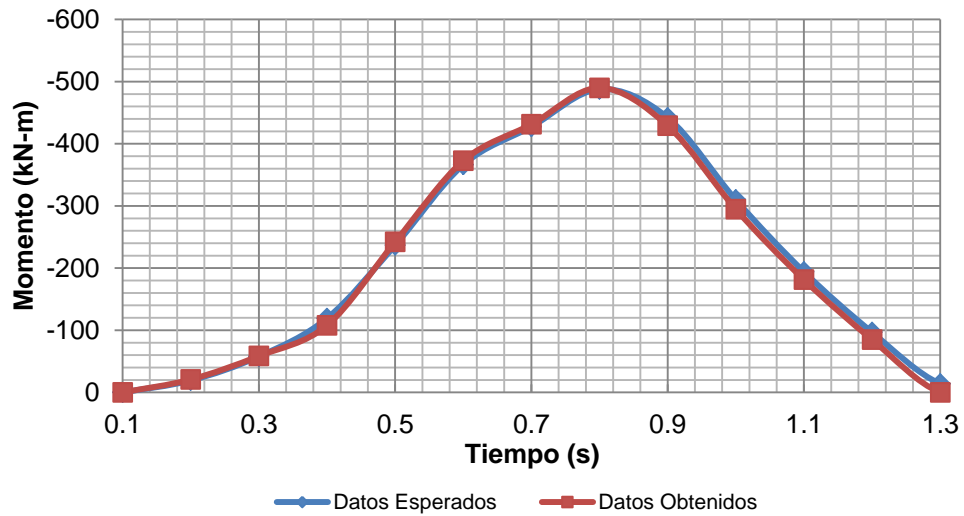
Ahora, si se analiza la información con la que se cuenta para el claro de 15 metros (**Figura 104**), donde se tiene un porcentaje de error absoluto cuadrático de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.6\%$ , donde el error cuadrático medio es  $ECM = 7.6\%$ , se tiene una coincidencia del 92.4%, que es bastante aceptable.

Es importante decir que se despreció el punto obtenido para 1.1s (**Figura 104**), dado que con este camión se obtiene un valor de cero, lo cual aumenta considerablemente el porcentaje de error. Sin embargo, ya que el rango de momentos en 1.1s presenta un momento de 2kN-m que es equiparable a cero, dada la magnitud de los momentos en el resto del tiempo encuestado.



**Figura 104.** Comparación para un claro de 15m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.

Para el claro de 20 y 25 metros (**Figuras 105 y 106**), se encontró que existe un porcentaje de error absoluto de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.4\%$  y  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.25\%$  respectivamente, donde sus errores cuadráticos medios son  $ECM = 5.9\%$  para 20 metros y  $ECM = 5.0\%$  para 25 metros.



**Figura 105.** Comparación para un claro de 20m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.

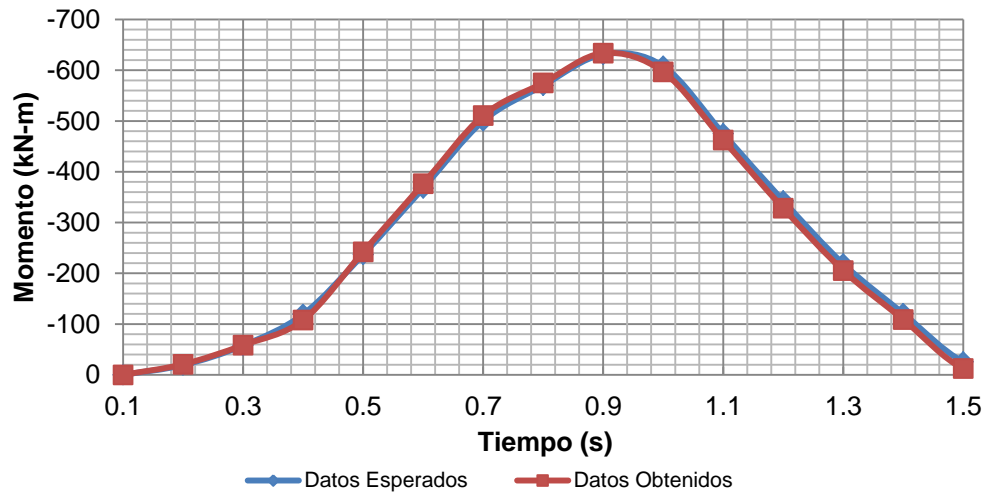


Figura 106. Comparación para un claro de 25m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.

Por último, para los rangos de momentos comprendidos entre 30 y 40 metros (**Figuras 107 a 109**), se encontró un porcentaje de error absoluto de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.6\%$ , para 30 metros, de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.3\%$  para 35 metros y  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.2\%$  para 40 metros, donde sus respectivos errores cuadráticos medios son de 7.7%, 5.5% y 4.5%.

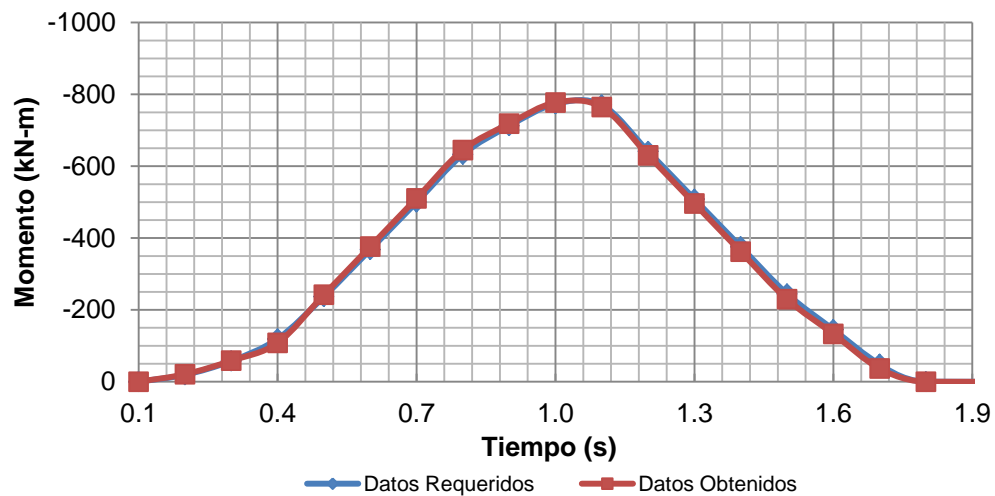
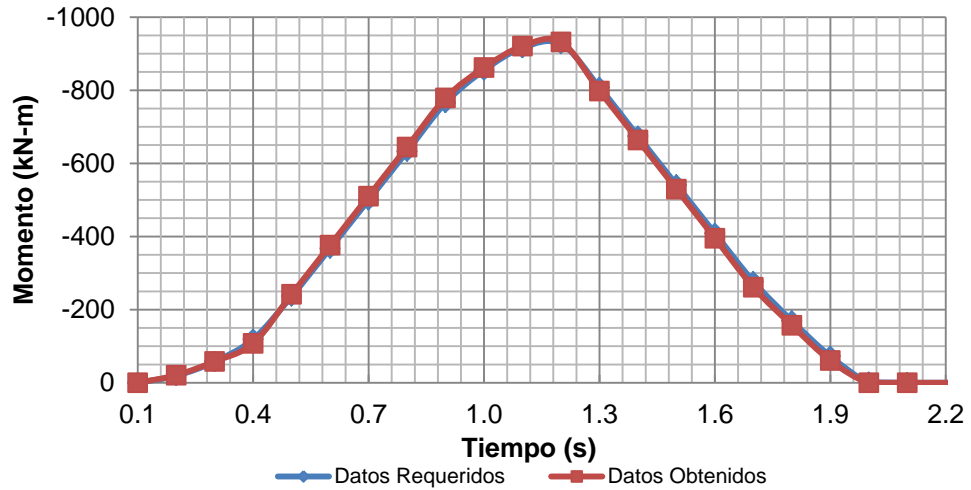
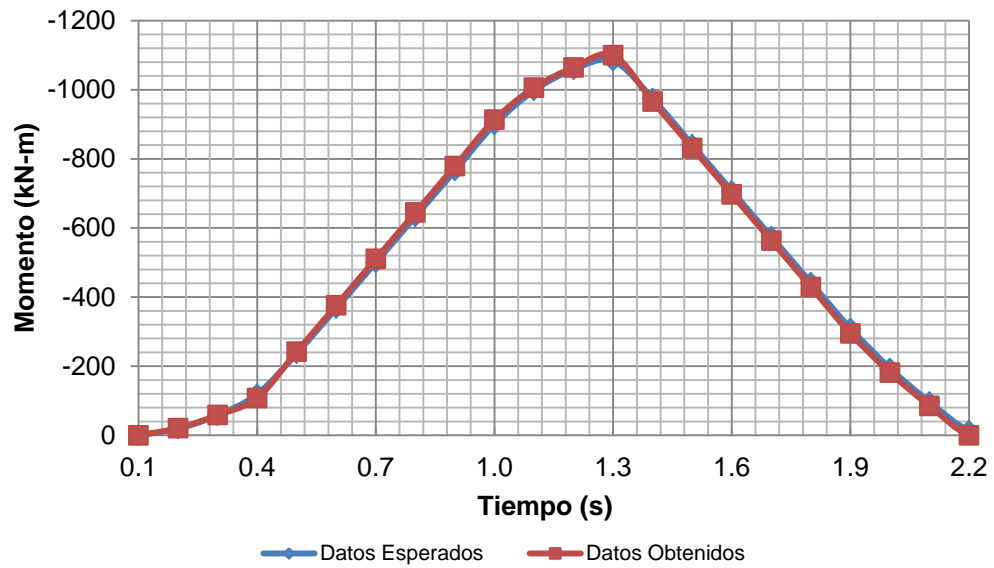


Figura 107. Comparación para un claro de 30m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.





**Figura 108.** Comparación para un claro de 35m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.



**Figura 109.** Comparación para un claro de 40m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.

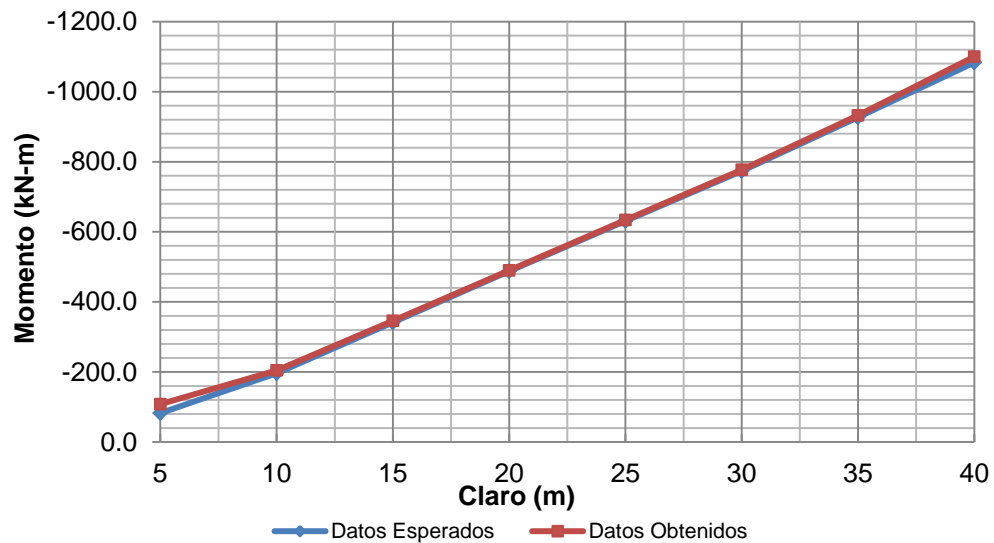
Tomando en cuenta los momentos máximos de todos los rangos de momentos para este camión, se encontró la siguiente tabla, con sus respectivos errores, para cada uno de los claros encuestados.

**Tabla 40.** Momentos máximos en los diversos claros encuestados para la clase A del grupo C

Claro (m)	Rango de momentos máximos esperados (kN-m)	Rango de momentos máx. obtenidos con el camión C (kN-m)	Error
5	-82.5	-108.0	30.9%
10	-196.1	-204.5	4.2%
15	-341.4	-346.2	1.4%
20	-487.8	-489.9	0.4%
25	-631.2	-633.6	0.4%
30	-773.7	-777.2	0.5%
35	-926.8	-932.3	0.6%
40	-1083.2	-1100.1	1.6%

Nótese que los momentos obtenidos son mayores que los esperados, lo cual nos dice que se ha sobreestimado el comportamiento de la fatiga para este camión.

Si se grafican los valores de los momentos máximos de la tabla anterior, se puede observar el comportamiento de nuestra estimación, con respecto a la esperada.

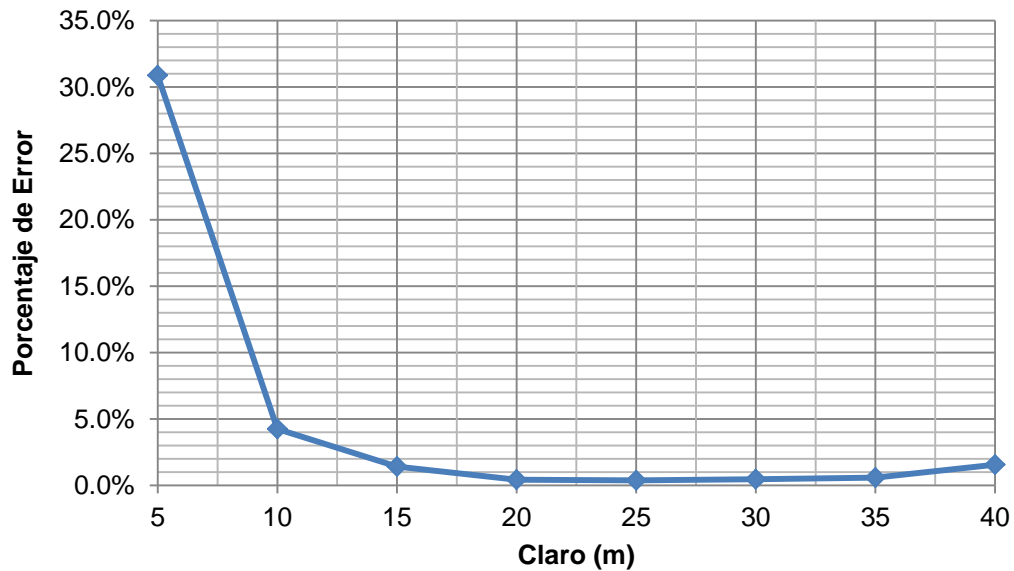


**Figura 110.** Gráfica de momentos máximos de los rangos de momentos para la clase A del grupo C, para diferentes longitudes de claro de puentes.

Observando la **Figura 110**, es posible denotar que el comportamiento es muy similar a lo largo de toda la gráfica, lo cual sugiere que hay una buena aproximación.

Si se observa nuevamente la **Tabla 40**, se puede denotar que para el puente con 5 metros de claro, el camión de fatiga sobreestimaré en un 30% la vida remanente. Sin embargo, dado que es un puente de acero con 5 metros de claro, esto es totalmente inaceptable, pero dada la eficiencia de otra clase de sistemas, éste puede considerarse un valor aceptable.

Si se grafican ahora los errores en función del claro, es posible observar el comportamiento del error para este camión.



**Figura 111.** Gráfica de los errores de los rangos de momentos máximos, para la clase A, del grupo C, para diferentes longitudes de claro de puentes.

Puede denotarse que el error más evidente existe en el claro de 5 metros. A partir de ese punto, el error empieza a decrecer, encontrándose los mínimos relativos en algún punto

intermedio entre los claros de 20 y 25 metros. Sin embargo, el error aumenta de manera pequeña en los claros posteriores, siendo la tendencia a aumentar.

Dado que no se cuenta con puntos situados después de los 40 metros, debido a que se decidió trabajar únicamente con esta proporción de claros, por ser estos claros de puentes convencionales, se debe esperar que el error siga aumentando, pero sin ser tal que el camión propuesto pierda su validez.

El estudio de los puentes con claros mayores que los 40 metros puede realizarse en investigaciones posteriores, con la finalidad de comprobar que el error no variará excesivamente, como se planteó anteriormente.

Adicionalmente, se muestra la siguiente gráfica (**Figura 112**), en la cual se presentan los momentos máximos obtenidos por los camiones del tráfico real que componen la clase A. Aunque esta gráfica no representa algo tangible para el problema que se ha abordado, es importante listarla para saber de qué magnitud se presentarían los momentos máximos en puentes reales.

Dado que se tomó en consideración de que los momentos son proporcionales a los esfuerzos, se pueden tomar en consideración estos momentos a la hora de hacer un ejemplo de aplicación, para determinar que camiones del tráfico real generan efectos de fatiga a lo largo del puente.

En la **Figura 112** se presenta el comportamiento del camión de fatiga C, para la clase A, comparado contra los diversos vehículos que circularon y que se consideran parte de la clase A. Además de lo anterior, se muestra la media calculada para los momentos máximos que

producen los diferentes vehículos y las líneas de tendencia para  $\pm 1$  desviación estándar, y  $-2$  desviaciones estándar a partir de la media.

Nótese que más del 90% de los momentos producidos por el tráfico real se encuentra a  $\pm 2$  desviaciones estándar de la media calculada.

Es importante denotar que el camión determinado genera valores de momento menores que la media y conforme se aumenta el claro, la media tiende a separarse de la aproximación del camión de fatiga del grupo C.

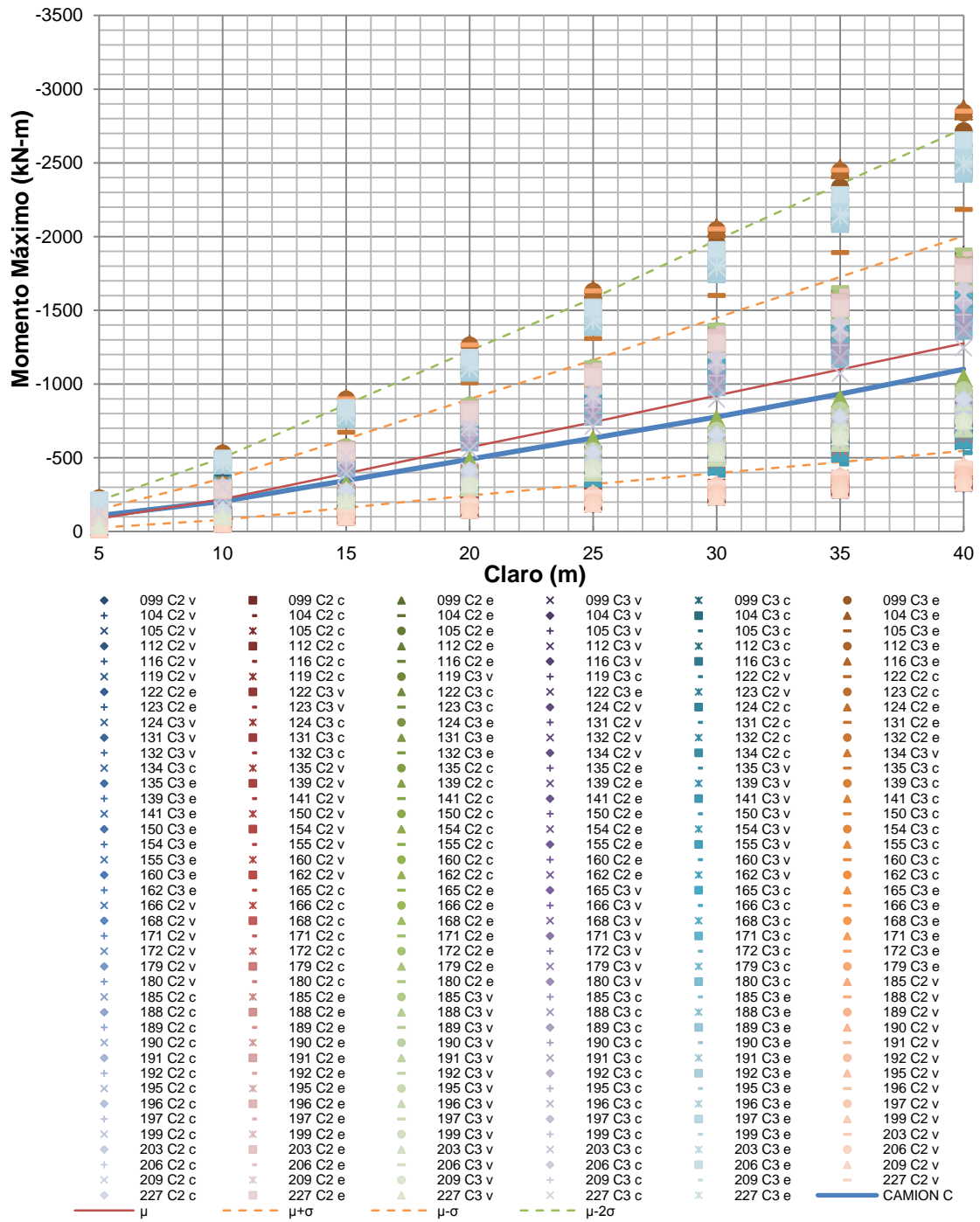
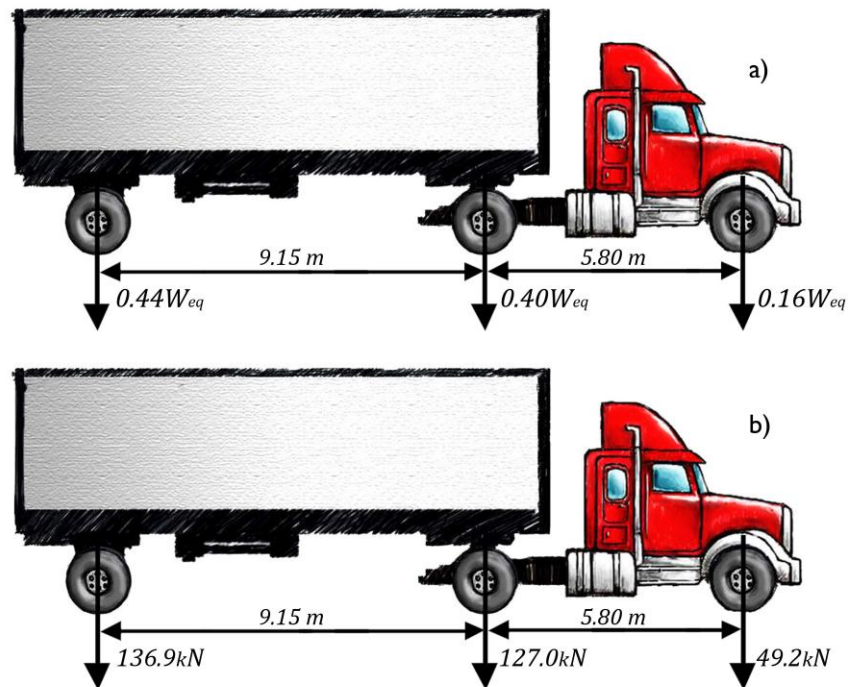


Figura 112. Gráfica de los momentos máximos del tráfico real de la clase A del grupo C, tango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes.

#### 4.6.2 Resultados de la comparación de los rangos de momento para el camión de fatiga T-S.

Al igual que para el grupo C, para este grupo se realizaron diversas iteraciones, en las que se encontró que la separación que mayor ajustaba a los rangos de momentos fueron: 5.8m para el eje delantero al eje central y 9.15m para el eje central del eje trasero.

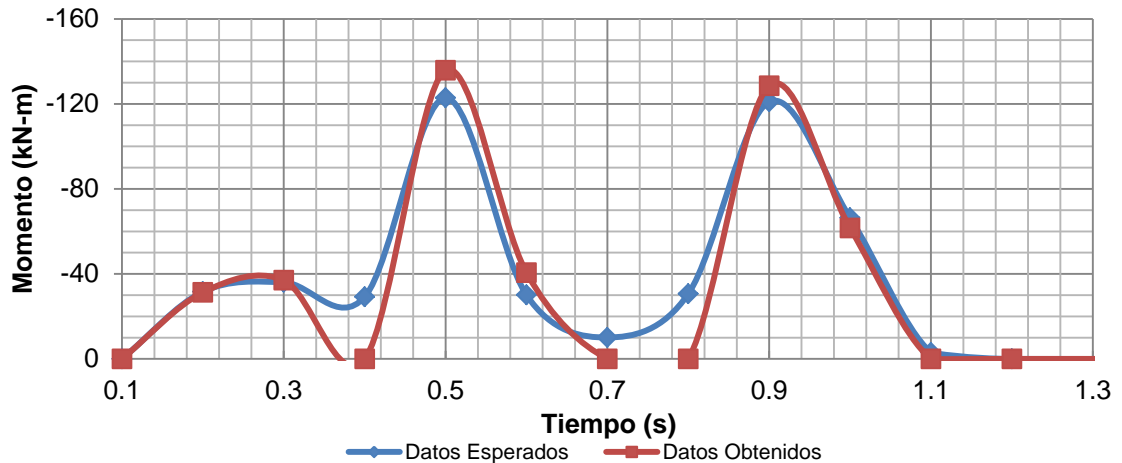
En la **Figura 113** se muestra el camión de fatiga que representará a la clase A del grupo T-S. Además, se muestra el camión de manera general, en función de su carga, el cual servirá para representar a las demás clases de este grupo de camiones.



**Figura 113.** Camión de fatiga grupo T-S clase A y camión T-S generalizado.

En las siguientes figuras se presentan las gráficas para los diversos casos de la comparación realizada entre el rango de momentos esperados (obtenidos por la **Ecuación 21**) y el rango de momentos obtenido con el camión propuesto para el grupo T-S y su clase A

Igual que lo se mencionó en el camión del grupo C, esta comparación se utilizará en futuras investigaciones, donde los ciclos equivalentes producidos por el camión de fatiga propuesto son iguales o al menos semejantes a los ciclos producidos por el rango de momentos esperado. Sin embargo, en esta investigación se debe demostrar que los datos obtenidos de esta aproximación son similares a los datos esperados.



**Figura 114.** Comparación para un claro de 5m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A.

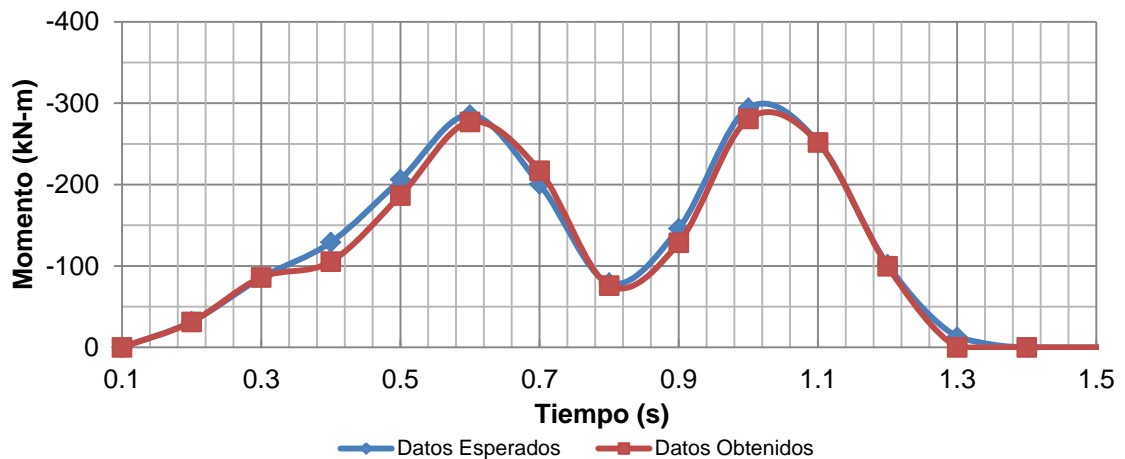
Para el claro de 5 metros (**Figura 114**), se encontró un porcentaje de error absoluto cuadrático  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 35\%$ , donde la raíz cuadrada de este último representará el error cuadrático medio, tal que  $ECM = 59\%$ . Esto representa que se tiene un ajuste del 41%, lo cual sugiere una mala aproximación. Sin embargo, considerando que los puentes de acero con 5 metros de claro son poco comunes, es posible aceptar la hipótesis.

Cabe resaltar que, de acuerdo con las ecuaciones en las que se obtienen los ciclos equivalentes, se obtendrían dos ciclos principales (entre los tiempos 0.4 s y 1.1 s) y un ciclo de orden superior (entre 0.1s y 0.4s). Este último ciclo es el que ocasiona la mayor discrepancia al



aplicar la ecuación mencionada. Lo anterior se comprobará en una investigación en la que se determinen los números de ciclos equivalentes.

Referente al claro de 10 metros (**Figura 115**), se encontró un porcentaje de error absoluto cuadrático  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.7\%$ . Obteniendo la raíz cuadrada se obtiene el error cuadrático medio, que es  $ECM = 8.3\%$ . De lo anterior se puede deducir que la aproximación es aceptable, dado que se cuenta con un ajuste del 91.7%

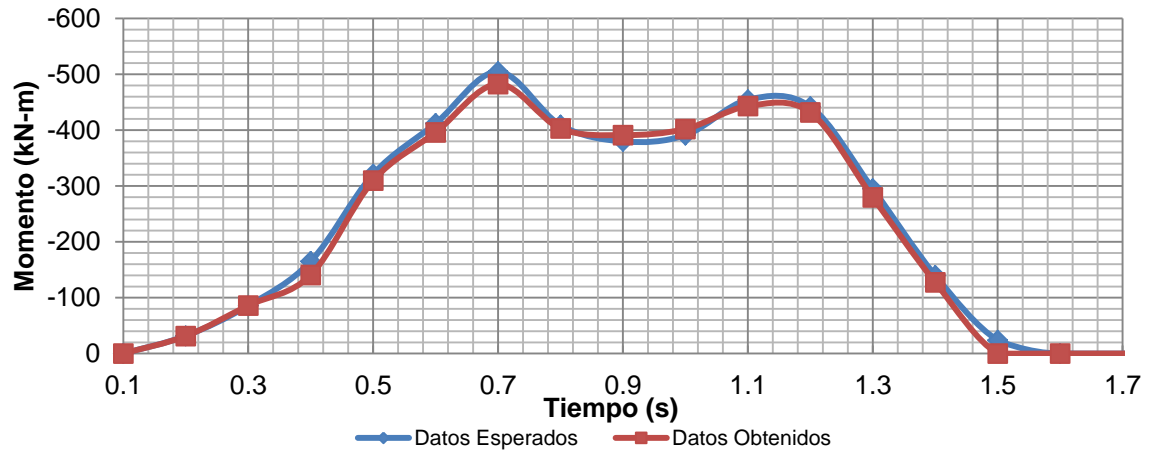


**Figura 115.** Comparación para un claro de 10m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A.

Analizando la información del claro de 15 metros (**Figura 116**), donde se tiene un porcentaje de error absoluto cuadrático de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.3\%$ , y donde el error cuadrático medio es  $ECM = 5.6\%$ , con esto se concluye que el ajuste es aceptable.

Es importante decir que, al igual que para el grupo C, se han despreciado los puntos extremos de las curvas para la valoración de los errores cuadráticos medios, debido a que se incrementa considerablemente el error, dado que este camión de fatiga muestra valores de momentos iguales a cero, mientras que el rango de momentos esperado muestra valores muy

cercanos a cero, los cuales dejan de ser significativos para la valoración de los ciclos equivalentes.



**Figura 116.** Comparación para un claro de 15m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A.

Para el claro de 20 y 25 metros (**Figuras 117 y 118**), se encontró que existe un porcentaje de error absoluto de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 1.6\%$  y  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.18\%$  respectivamente, donde los errores cuadráticos medios son  $ECM = 12.5\%$ , para 20 metros y  $ECM = 4.25\%$ , para 25 metros.

Es posible denotar que el error cuadrático medio para el claro de 20 metros es mayor que para el de 25 metros. Esto se debe a que el valor extremo obtenido en el tiempo de 1.7s no es igual a cero, pero sí mucho menor que el esperado, siendo el error particular de casi un 50%, con respecto al esperado.

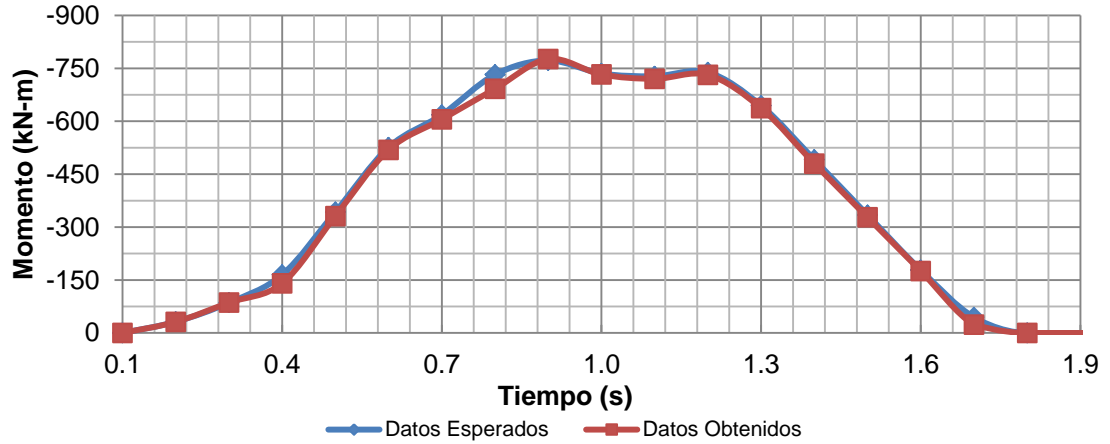


Figura 117. Comparación para un claro de 20m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A.

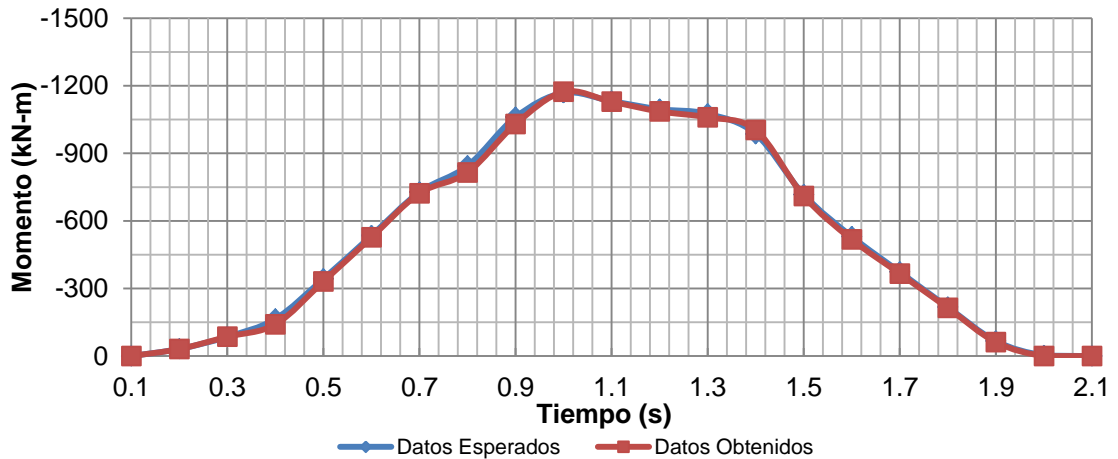
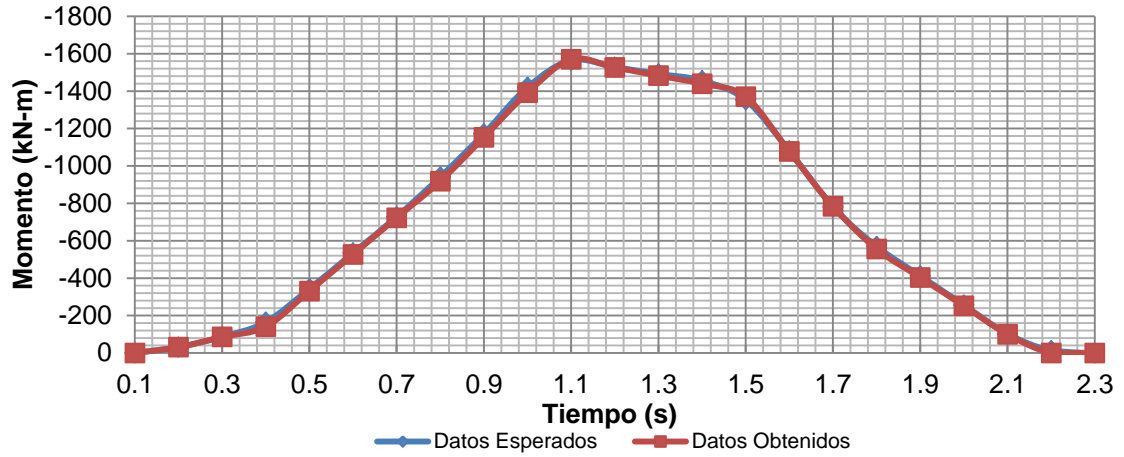
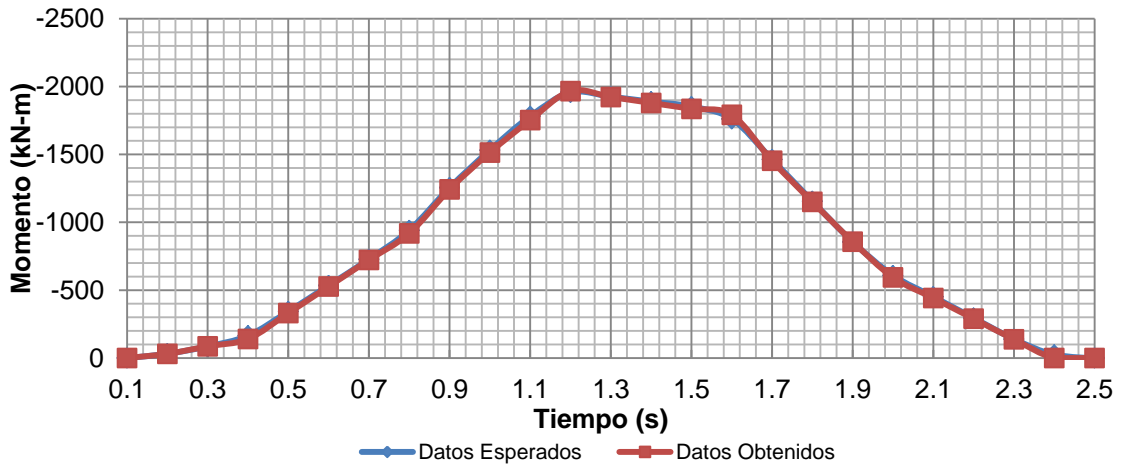


Figura 118. Comparación para un claro de 25m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A.

Por último, para los rangos de los momentos comprendidos entre los 30 y los 40 metros (Figuras 119 a 121), se encontró un porcentaje de error absoluto de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.13\%$ , para 30 metros; de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.12\%$ , para 35 metros y  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 1.0\%$  para 40 metros, donde sus respectivos errores cuadráticos medios son del 3.7%, el 3.5% y el 10%.



**Figura 119.** Comparación para un claro de 30m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A.



**Figura 120.** Comparación para un claro de 35m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A.

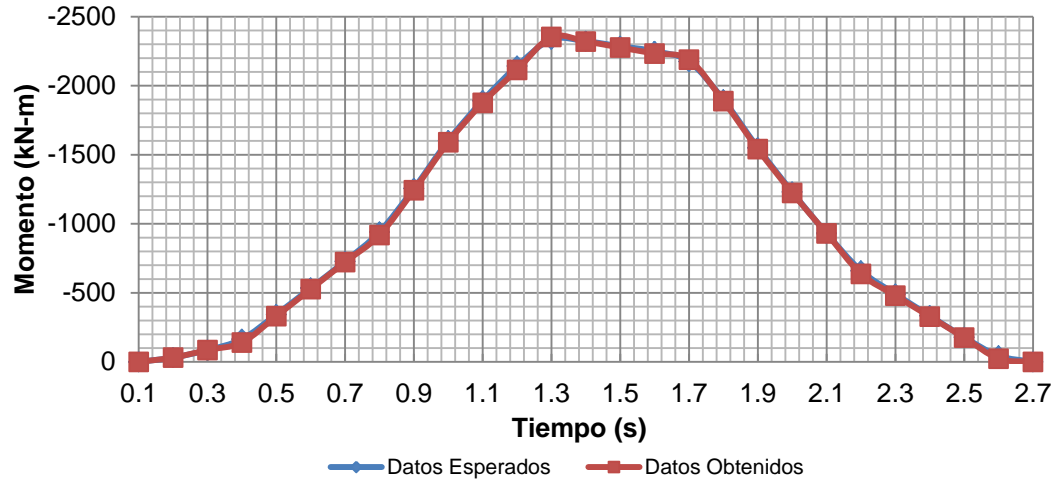


Figura 121. Comparación para un claro de 40m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A.

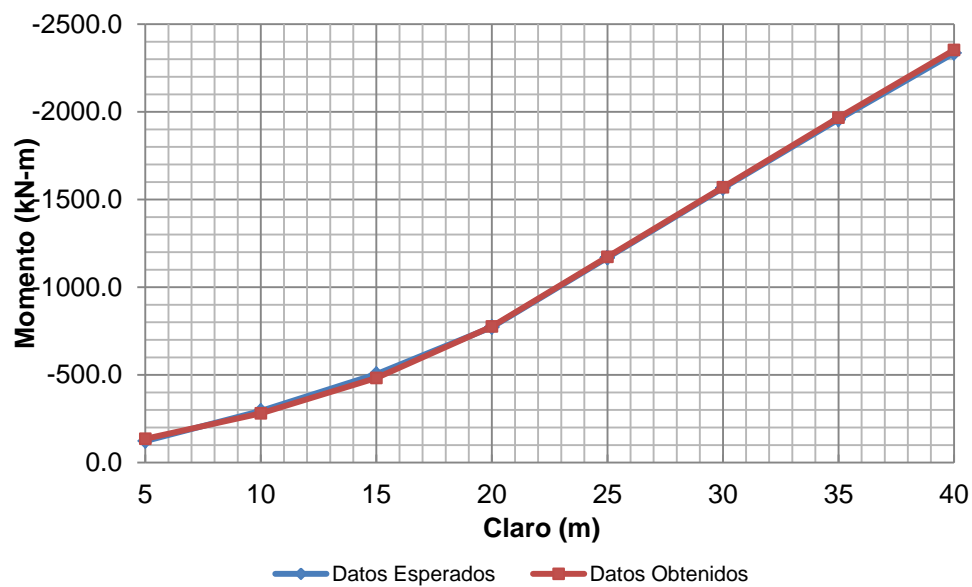
Si se toman los momentos máximos de todos los rangos de momentos esperados y obtenidos con el camión de fatiga T-S, se obtienen los siguientes errores:

Tabla 41. Momentos máximos en los diversos claros encuestados, para la clase A del grupo T-S.

Claro (m)	Rango de momentos máximos esperados (kN-m)	Rango de momentos máx. obtenidos con el camión C (kN-m)	Error
5	-122.9	-135.8	10.5%
10	-294.1	-280.6	-4.6%
15	-504.6	-482.4	-4.4%
20	-772.4	-776.3	0.5%
25	-1168.5	-1173.1	0.4%
30	-1565.0	-1570.0	0.3%
35	-1956.7	-1966.8	0.5%
40	-2335.6	-2353.1	0.7%

En esta tabla se puede notar que la mayoría de los errores son positivos, lo que indica que se ha sobreestimado el valor del momento. Sin embargo, esto es contrario para los claros de 10 y 15 metros, donde el valor es subestimado por tener errores negativos.

Lo anterior puede ser mejor entendido si se grafican los valores de los momentos máximos de la **Tabla 41**. En esta gráfica se observa el comportamiento de esa estimación, con respecto a la esperada.

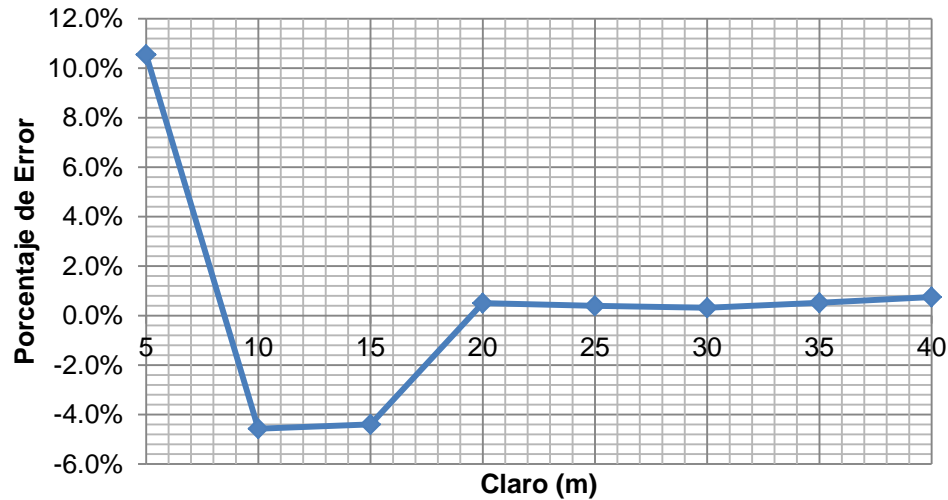


**Figura 122.** Gráfica de momentos máximos de los rangos de momentos para la clase A, del grupo T-S, para diferentes longitudes de claro de los puentes.

De la **Figura 122** es posible deducir que el comportamiento obtenido de los valores es muy similar al comportamiento de los valores esperados, lo cual sugiere que la aproximación obtenida es buena.

Si se revisa la **Tabla 41**, se puede observar que, para el puente con 5 metros de claro, el camión de fatiga sobreestimará en 10.5% la vida remanente. Sin embargo, por la misma razón que para el grupo anterior, puede considerarse adecuada esta aproximación.

Se graficarán ahora los errores en función del claro, con la finalidad de observar el comportamiento del error para este grupo.



**Figura 123.** Gráfica de los errores de los rangos de momentos máximos para la clase A, del grupo T-S, para diferentes longitudes de claro de los puentes.

El error más evidente existe en el claro de 5 metros. A partir de ese punto, el error a modificarse empieza de tal manera que para los 10 metros se encontró un error negativo, donde se expresa la subestimación del valor esperado.

Posteriormente, el error aumenta y llega a valores positivos, a partir de un punto intermedio entre los 15 y los 20 metros. El mínimo relativo de los errores positivos (es decir el error más próximo a cero) es el que se encuentra en el claro de 30 metros.

De igual modo que para el camión C, el camión T-S incrementa su error después del claro de 30 metros. Dado que no se cuenta con valores después de los 40 metros, se debe suponer que el error no es de tal grado que el camión T-S deje de ser válido.

Los valores de los momentos máximos para claros mayores que 40 metros se obtendrán en otra investigación, con la finalidad de demostrar que el error no es significativo para que el camión T-S deje de ser válido para esos claros.

Adicionalmente, se muestran las siguientes graficas (**Figuras 124 y 125**), en las que se presentan los momentos máximos obtenidos por los camiones del tráfico real que componen la clase A para el grupo T-S. Aunque estas gráficas no representan algo tangible para el problema que se ha abordado, es importante listarlas para saber de qué magnitud se presentarían los momentos máximos en los puentes reales para el problema de fatiga.

Mediante estas gráficas se mostrará el comportamiento del camión de fatiga para el Grupo T-S y su clase, además de otras medidas de dispersión útiles.

Dado que se tomó en consideración que los momentos son proporcionales a los esfuerzos, se puede tomar en consideración a estos camiones (Grupo T-S) si se requiere realizar un ejemplo de aplicación



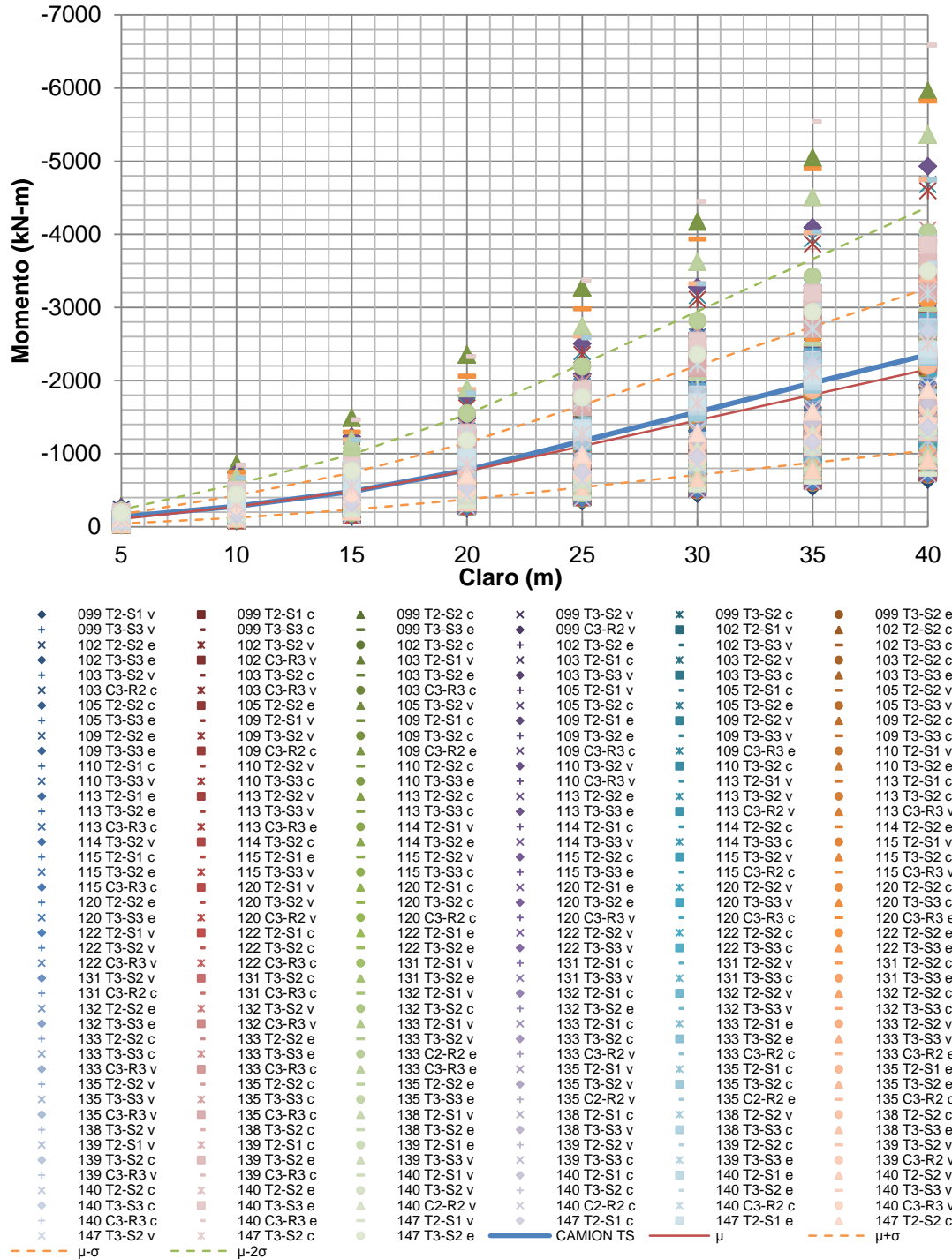
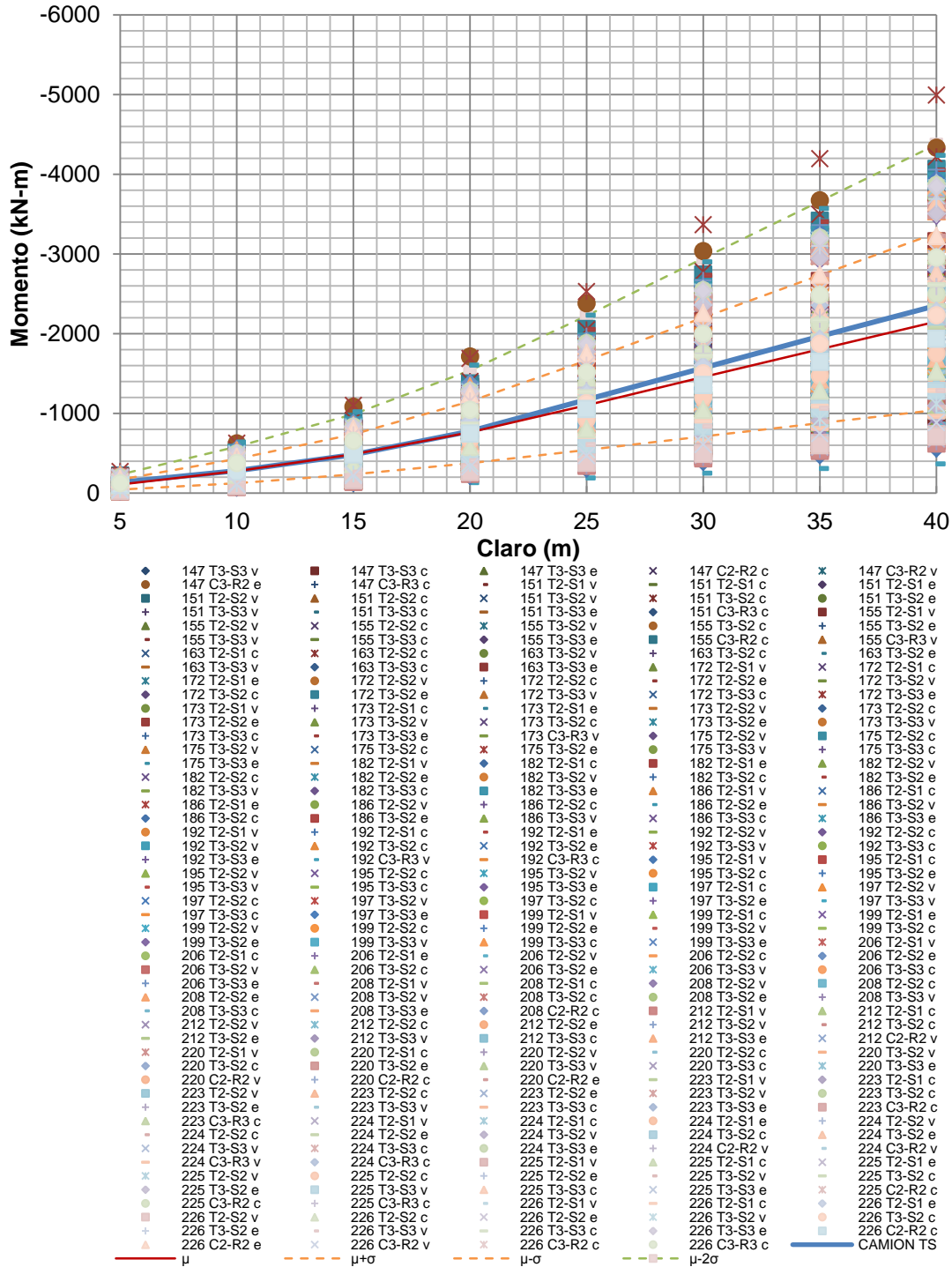


Figura 124. Gráfica de los momentos máximos del tráfico real de las estaciones 099 a 147 que conforman la clase A, del grupo T-S y el rango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes.



**Figura 125.** Gráfica de los momentos máximos del tráfico real de las estaciones 147 a 226, que conforman la clase A, del grupo T-S y el rango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes.

En las **Figuras 124 y 125** se presenta el comportamiento del camión de fatiga T-S para la clase A, comparado contra los diversos vehículos que circularon y que forman parte de la clase A.

Además de lo anterior, se muestra la media calculada para los momentos máximos que producen los diferentes vehículos y las líneas de tendencia para  $\pm 1$  desviación estándar y  $-2$  desviaciones estándar, a partir de la media.

Nótese que, prácticamente, más del 90% de los momentos producidos por el tráfico real se encuentra a  $\pm 2$  desviaciones estándar de la media calculada.

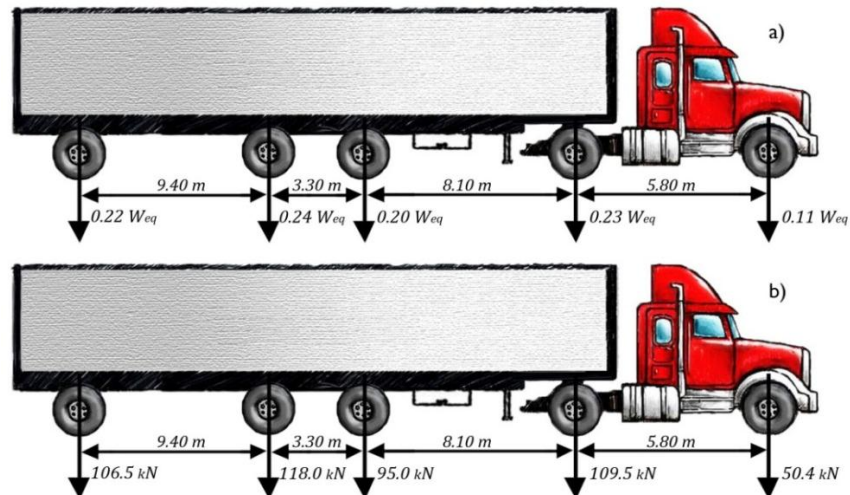
Es importante notar que el camión determinado genera valores de momento mayores que la media y, conforme se aumenta el claro, la media tiende a separarse de la aproximación del camión de fatiga del grupo T-S, lo cual se contrapone con los datos obtenidos para el grupo C.

#### **4.6.3 Resultados de la comparación de los rangos de momento para del camión de fatiga T-S-R.**

Se realizaron diversas iteraciones, en las que se encontró que, para claros menores o iguales que 20 metros, el camión de fatiga para este grupo debería contar con 5 ejes. Mientras que para claros mayores que 20 metros y hasta los 40 metros, es posible utilizar un camión característico con únicamente 4 ejes.

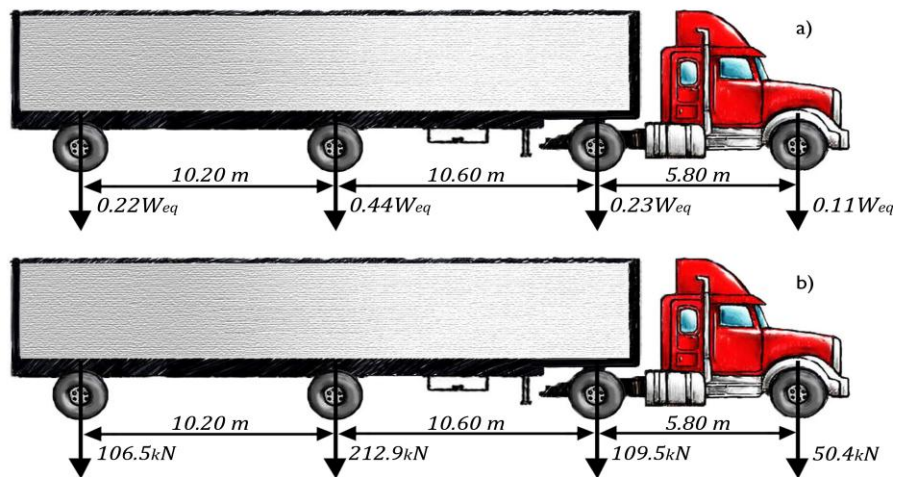
En las **Figuras 126 y 127** se muestran los camiones de fatiga que representarán a la clase A del grupo T-S-R, mostrándose conjuntamente con ellos los camiones generalizados que servirán para obtener los camiones representativos de las demás clases.

Estos camiones generalizados se presentan en función de su peso equivalente total y fueron obtenidos de acuerdo con el apartado 4.5 de este capítulo.



**Figura 126.** Camión de fatiga, grupo T-S-R clase A y camión generalizado T-S-R, para los claros menores que 20 metros.

Si se observan las **Figuras 126 y 127**, se puede notar que el tercer eje para el camión de fatiga de la **Figura 127** se desglosa en dos ejes, de tal manera que se obtiene el camión representado en la **Figura 126**.

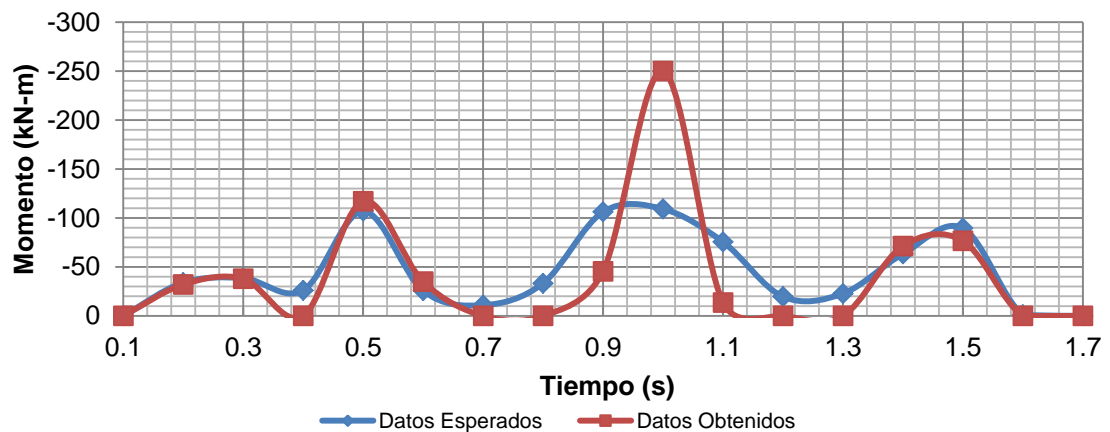


**Figura 127.** Camión de fatiga, grupo T-S-R clase A y camión generalizado T-S-R, para los claros mayores o iguales a 20 metros.

En las figuras siguientes se presentan las gráficas para los diversos claros, con la comparación realizada entre el rango de momentos esperados (obtenidos por la **Ecuación 21**) y el rango de momentos obtenido con el camión propuesto para el grupo T-S-R y su clase A.

Es importante señalar que ya que se tienen los datos de los dos camiones que representarán a este grupo de vehículos (uno con 5 ejes y el segundo con 4 ejes) se debe mostrar el criterio que se consideró para la decisión de desglosar el tercer eje del camión de fatiga (**Figura 127**) en dos ejes. Por esta razón se ilustrará el comportamiento del rango de momentos para ambos vehículos, para los claros menores o iguales que 20 metros.

Se realizará la comparación de los rangos de momentos que se usarán para futuras investigaciones, donde los ciclos equivalentes producidos por el camión de fatiga propuesto son iguales o al menos semejantes a los ciclos producidos por el rango de momentos esperado. Sin embargo, esta revisión es importante para esta investigación, dado que se requiere demostrar que el comportamiento obtenido por este camión de fatiga es similar al rango de los momentos esperados.

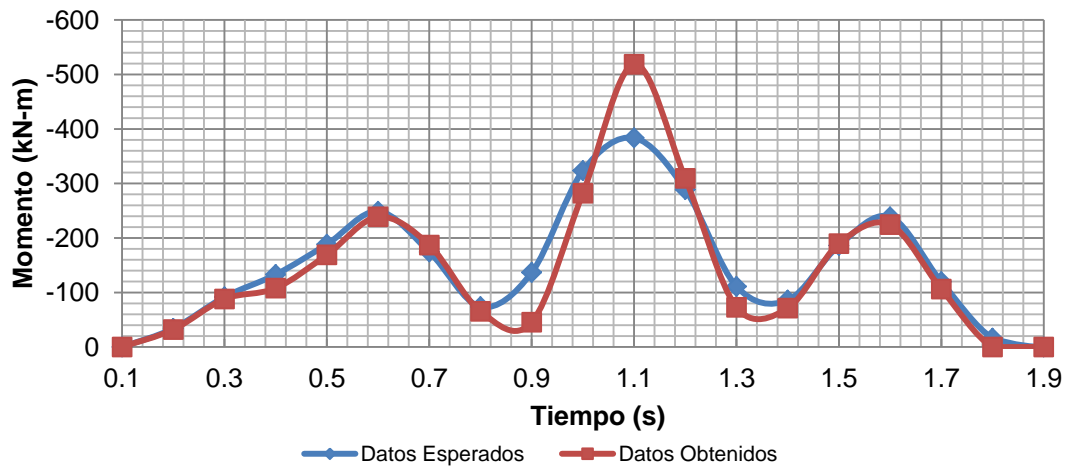


**Figura 128.** Comparación para un claro de 5m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A.

Para el claro de 5 metros, con el camión de fatiga de 4 ejes (**Figura 128**), se encontró un porcentaje de error absoluto cuadrático  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 60\%$ , donde la raíz cuadrada de este último representará el error cuadrático medio, tal que  $ECM = 77\%$ .

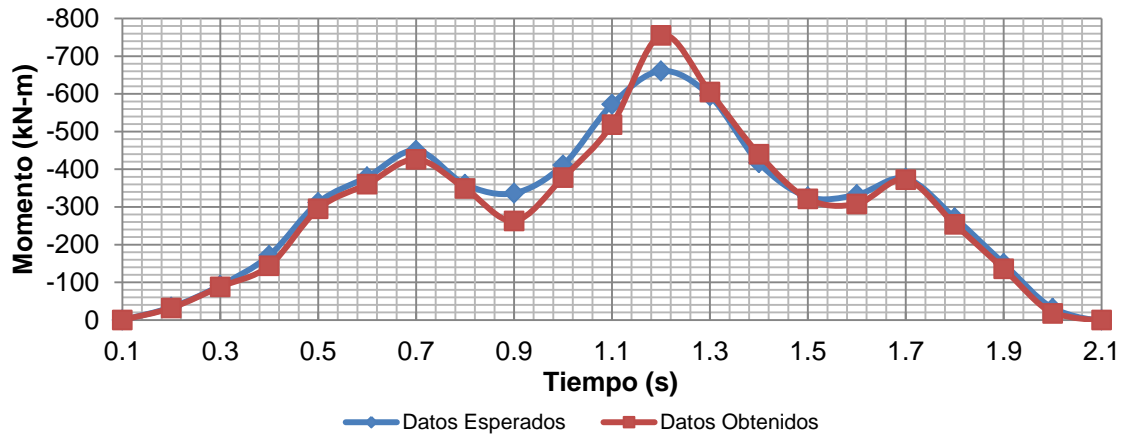
De acuerdo con los camiones de fatiga obtenidos para los grupos C y T-S, es posible despreciar esta aproximación, dado que se cuenta con pocos registros de puentes de 5 metros. No obstante, como se verá a continuación, el error persiste para los claros de 10 y 15 metros, que entran en la categoría de puentes comunes.

Si se grafica ahora el comportamiento para el claro de 10 metros (**Figura 129**), con un camión de fatiga de 4 ejes, el error cuadrático absoluto y su respectivo error cuadrático medio son de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 5.2\%$  y  $ECM = 23\%$ . Estos valores muestran un cierto desajuste en el comportamiento, lo cual no es aceptable.



**Figura 129.** Comparación para un claro de 10m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A.

Ahora se considerarán los errores absolutos para cada uno de los puntos en la gráfica de comportamiento para el claro de 15 metros (**Figura 130**); con un camión de fatiga de 4 ejes se obtiene un error cuadrático absoluto de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 1.7\%$  cuyo error cuadrático medio es  $ECM = 13\%$ .



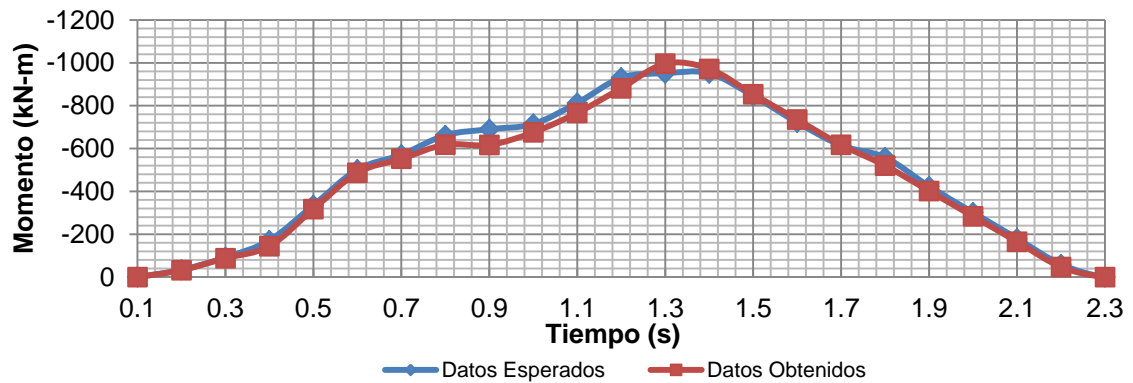
**Figura 130.** Comparación para un claro de 15m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A.

Si bien, estos valores ya son aceptables para un buen ajuste, es posible observar que para el tiempo de 1.2 segundos se tiene el momento máximo obtenido mucho mayor que el valor esperado. Esto daría una sobreestimación de fatiga en el puente, tal que sería sumamente conservadora. Es por tal razón que se debe ajustar, además de los claros de 5 y 10 metros, el comportamiento del camión de fatiga para 15 metros de claro, proponiendo un 5 eje para el camión de fatiga.

Como se verá más adelante, en la **Figura 131**, el comportamiento del camión de fatiga con 4 ejes muestra un adecuado ajuste, tanto de momento máximo, como de comportamiento en función del tiempo. Sin embargo, no se debe olvidar que, aunque se tienen puntos a cada 5

metros, los puntos intermedios también deben ser satisfechos, por lo que es conveniente utilizar el camión de fatiga de 5 ejes, para claros menores a 20 metros.

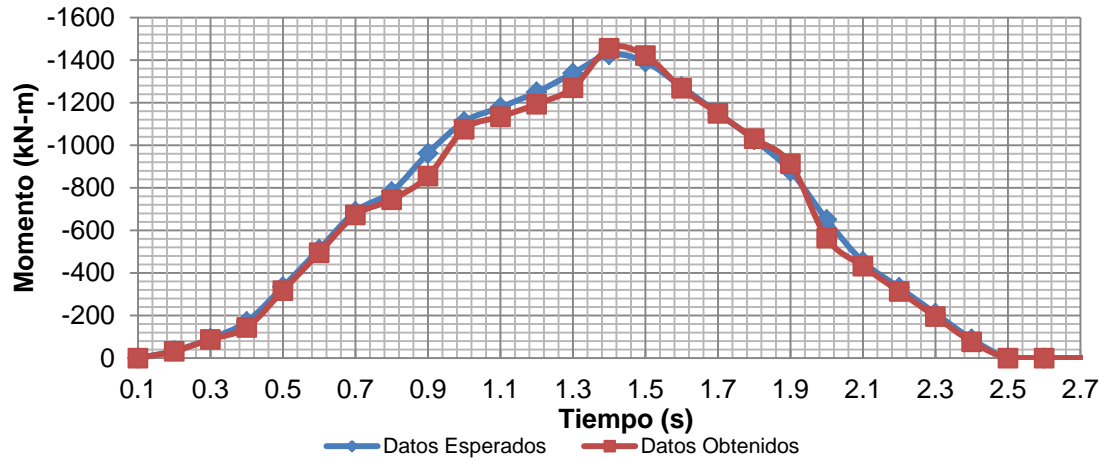
No obstante, antes de entrar al comportamiento del camión de fatiga con 5 ejes, es prudente observar los resultados obtenidos para los demás claros, con un camión de fatiga de 4 ejes.



**Figura 131.** Comparación para un claro de 20m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A.

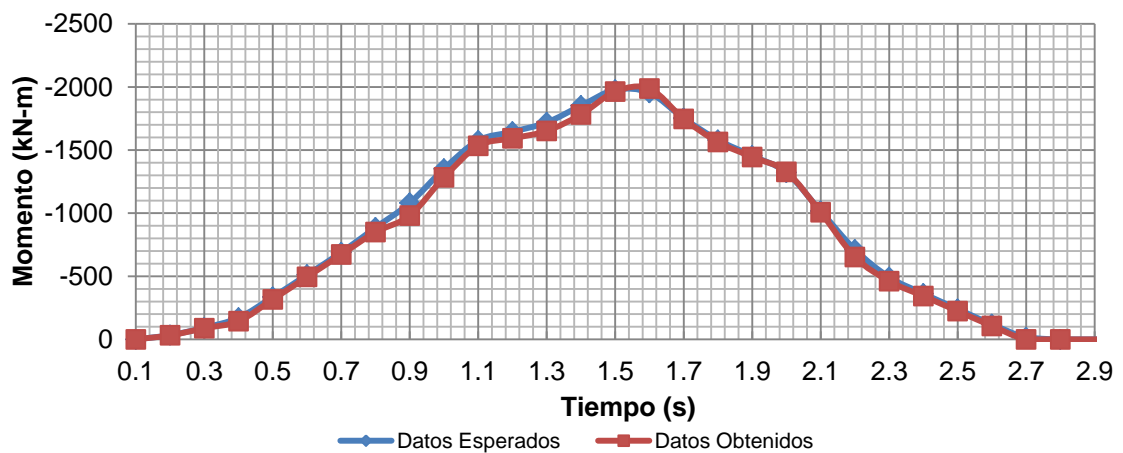
Para este claro de 20 metros (**Figura 131**), se encontró un error absoluto de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.6\%$  y  $ECM = 7\%$ . Con estos datos y el error del momento máximo, que se presentará un poco más adelante en este apartado, se podrá decir que se considera una buena aproximación como se expresó previamente.





**Figura 132.** Comparación para un claro de 25m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A.

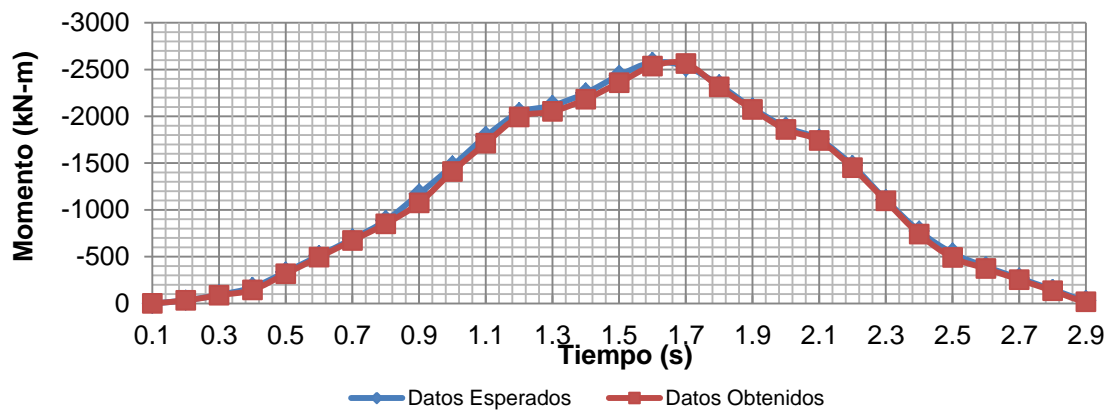
De los datos obtenidos para el claro de 25 y 30 metros (**Figuras 132 y 133**), y comparándolos con los valores esperados, se tiene el siguiente error absoluto y el error cuadráticos medio  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.47\%$  y  $ECM = 6.8\%$ , para el claro de 25 metros y  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.33\%$  y  $ECM = 5.8\%$  para el claro de 30 metros.



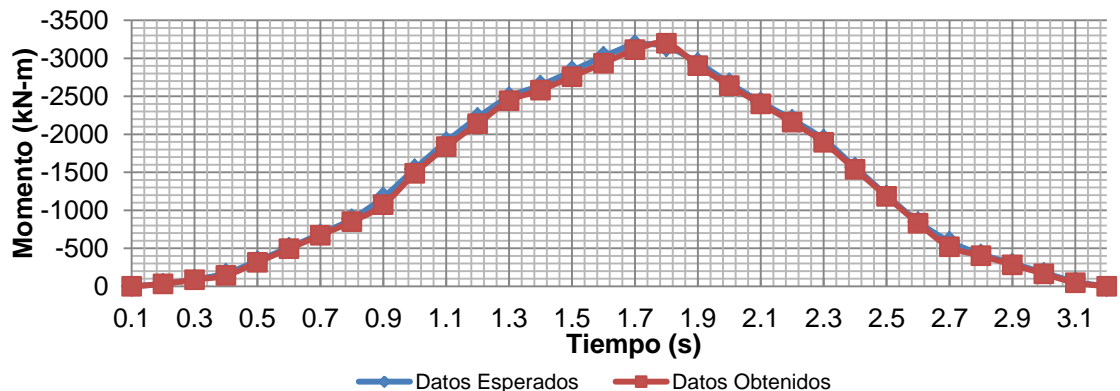
**Figura 133.** Comparación para un claro de 30m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A.

Por último, si se compara el comportamiento de los datos obtenidos con los datos esperados para un camión de fatiga de 4 ejes, en claros de 35 y 40 metros, para puentes simplemente apoyados, se observa lo siguiente:

Para 35 metros de claro se tiene un error absoluto medio cuadrático de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.96\%$  y un error cuadrático medio de  $ECM = 9.8\%$ . Mientras que para el claro de 40 metros se tiene  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.4\%$  y  $ECM = 6.4\%$ . Ambos ajustes se pueden considerar adecuados, dado que no cuentan con mucho error respecto a los datos esperados.



**Figura 134.** Comparación para un claro de 35m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A.



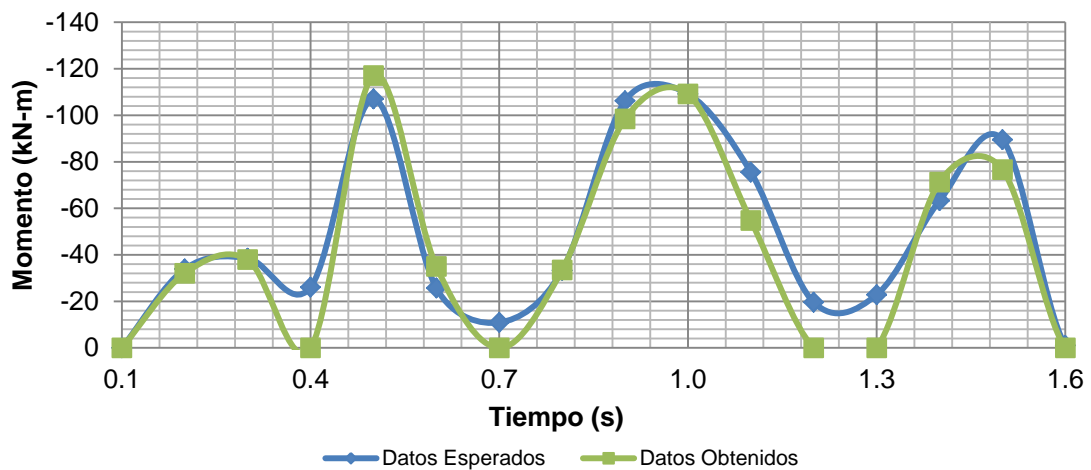
**Figura 135.** Comparación para un claro de 40m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A.

Regresando a los claros de 5, 10 y 15 metros, se analizará ahora el caso de un camión de fatiga de 5 ejes para estos claros, para obtener los errores, así como los errores absolutos para cada tiempo, el error absoluto cuadrático y el error cuadrático medio.

Obsérvese que el comportamiento para un claro de 5 metros (**Figura 136**), si se determinan los errores absolutos para cada tiempo, se tienen las siguientes medidas estadísticas:

error cuadrático absoluto  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 30\%$  y error cuadrático medio  $ECM = 55\%$ .

Esto no indica una configuración adecuada para el ajuste; pero, como se vio con anterioridad, este punto no es significativo, dado el claro del puente.



**Figura 136.** Comparación para un claro de 5m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 5 ejes, para la clase A.

En las **Figuras 137 y 138** se cuentan las siguientes medidas estadísticas:  $ECM = 13.6\%$  con un  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 1.8\%$  para el claro de 10m y  $ECM = 12.2\%$  con un  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 1.5\%$  para el claro de 15. Ambos resultados sugieren ajustes adecuados.

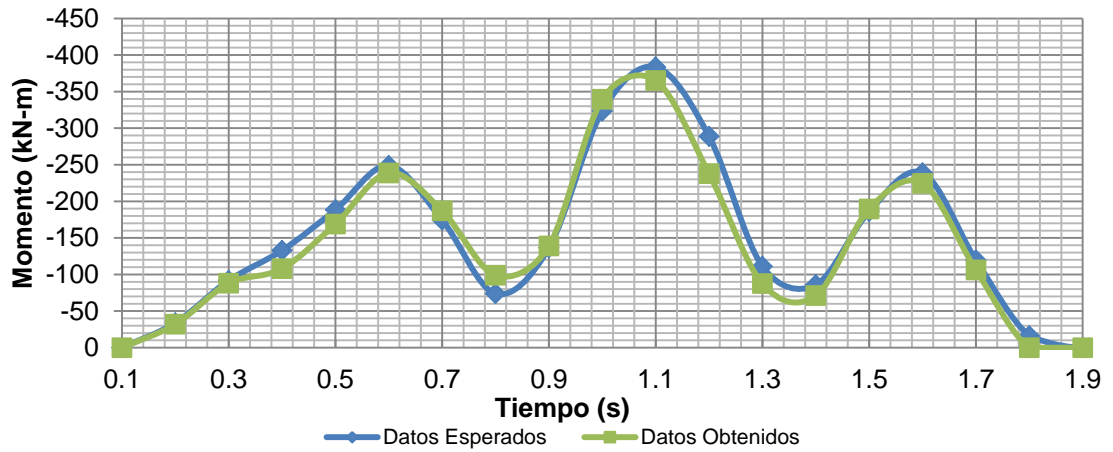


Figura 137. Comparación para un claro de 10m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 5 ejes, para la clase A.

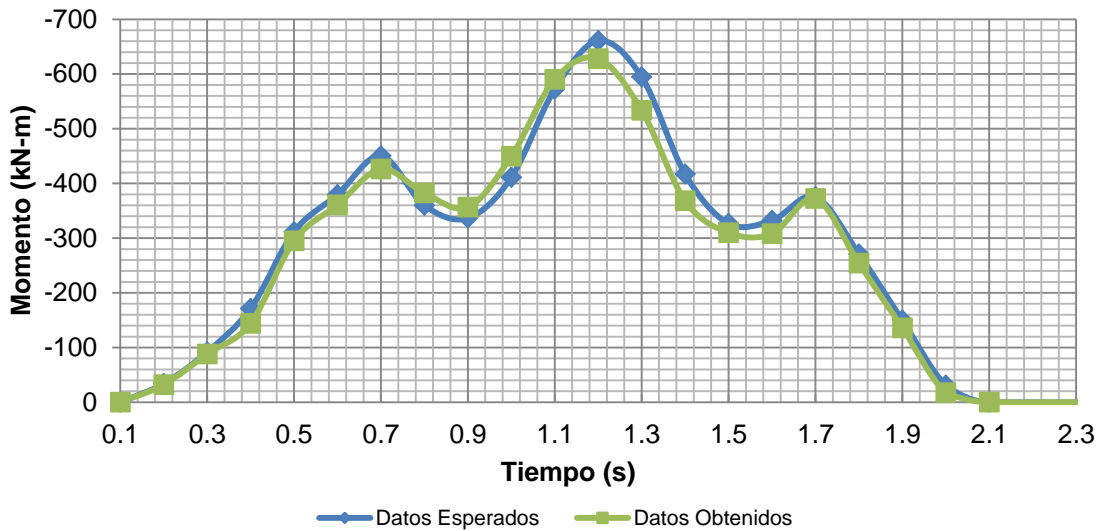
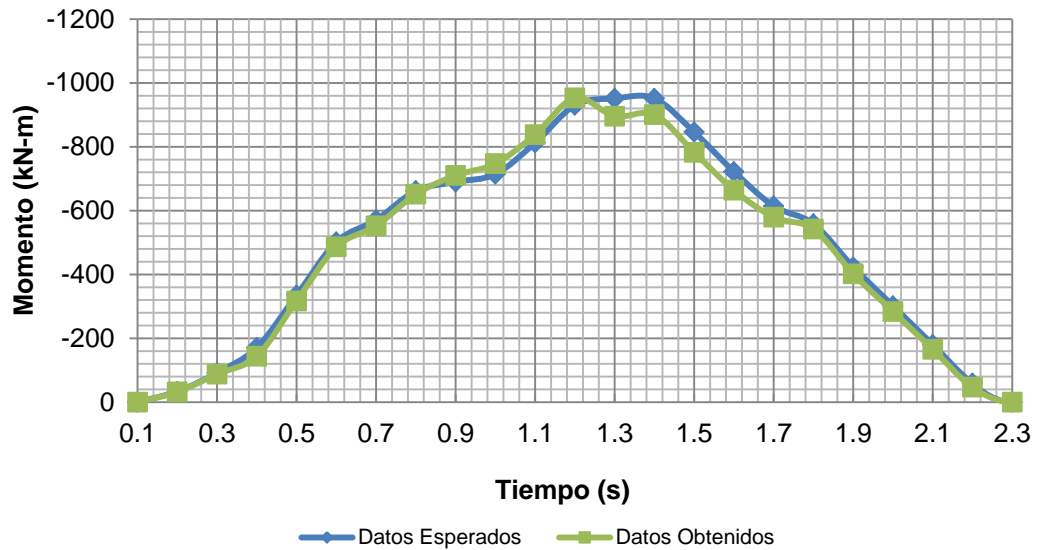


Figura 138. Comparación para un claro de 15m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 5 ejes, para la clase A.



**Figura 139.** Comparación para un claro de 20m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 5 ejes, para la clase A.

Por último, la **Figura 139** muestra el comportamiento del camión de fatiga T-S-R con 5 ejes, en un claro de 20 metros. Con los datos obtenidos y los esperados, se calculó un error cuadrático absoluto de  $\frac{\sum e_i^2}{N} = 0.57\%$  con su respectivo error cuadrático medio  $ECM = 7.5\%$ .

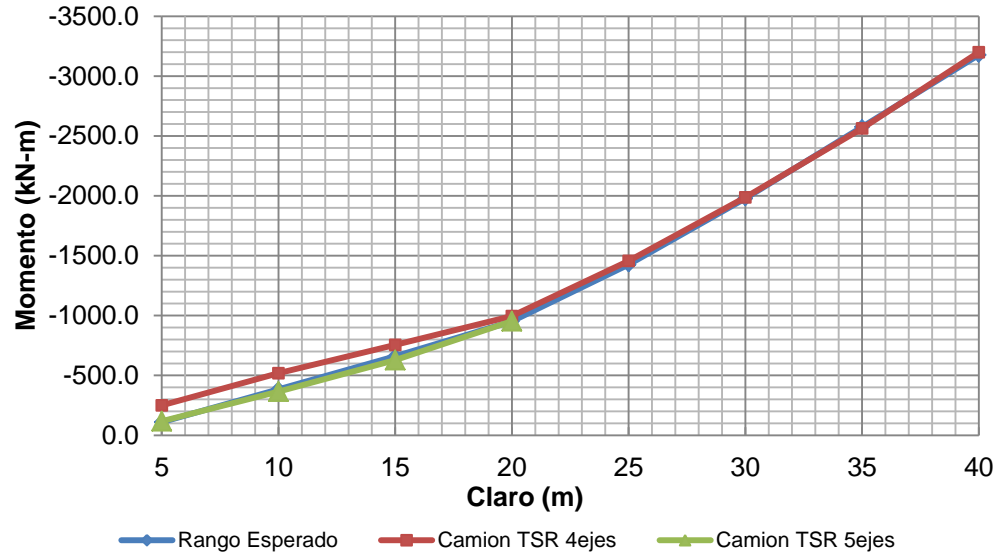
Tómense ahora los momentos máximos de todos los rangos de momentos esperados y obtenidos con un camión de fatiga T-S-R, en los que se presenta el siguiente error, para cada claro:

**Tabla 42.** Momentos máximos en los diversos claros encuestados para la clase A del grupo T-S-R

Claro (m)	Rango de momentos máximos esperados (kN-m)	Rango de momentos máx. obtenidos con el camión T-S-R, con 4 ejes (kN-m)	Rango de momentos máx. obtenidos con el camión T-S-R, con 5 ejes (kN-m)	Error para TSR 4 Ejes	Error para TSR 5 Ejes
5	-109.1	-250.2	-117.1	129.2%	7.3%
10	-383.5	-518.6	-365.1	35.2%	-4.8%
15	-660.8	-755.2	-628.1	14.3%	-4.9%
20	-951.5	-996.3	-953.3	4.7%	0.2%
25	-1425.6	-1456.3	-	2.2%	-
30	-1977.9	-1987.1	-	0.5%	-
35	-2575.4	-2563.2	-	-0.5%	-
40	-3177.2	-3199.3	-	0.7%	-

En esta tabla se puede notar que la mayoría de los errores para un camión de fatiga T-S-R con 4 ejes son positivos, lo que indica que se ha sobreestimado el valor del momento. En el caso contrario, al camión con 5 ejes, en el cual se subestiman los momentos para los claros de 10 y 15 metros.

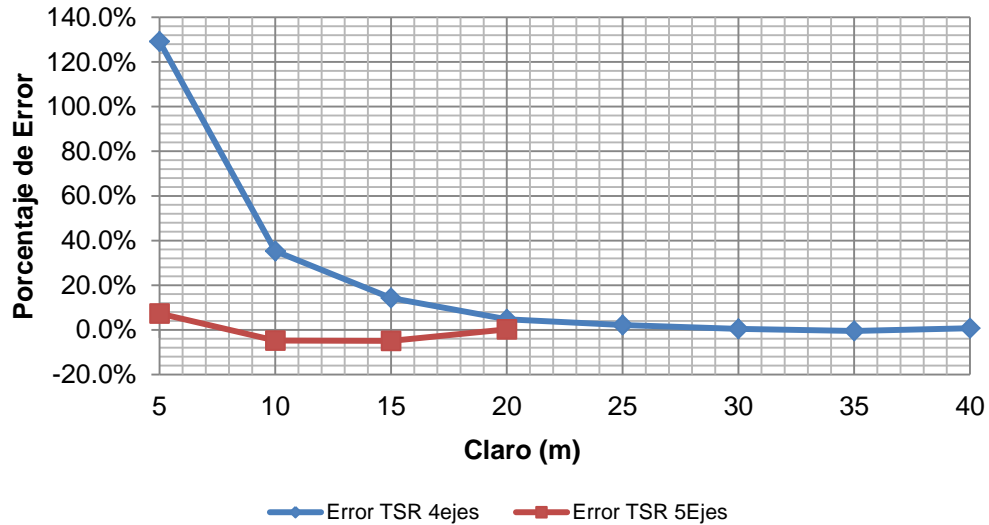
En la gráfica (**Figura 140**) se observa el comportamiento de esta estimación, con respecto a la esperada. La línea azul indica los datos esperados, mientras que la roja y verde indican los datos obtenidos mediante el camión de fatiga de 4 y 5 ejes, respectivamente.



**Figura 140.** Gráfica de momentos máximos de los rangos de momentos para la clase A del grupo T-S-R, para diferentes longitudes de claro de los puentes.

Es posible decir que el comportamiento de los valores obtenidos es muy similar al comportamiento de los valores esperados, lo cual sugiere que la aproximación obtenida es adecuada, tanto en el rango de momentos máximos como en los momentos al centro del claro a lo largo del tiempo, para cada claro.

Grafíquense ahora los errores, en función del claro, con la finalidad de observar el comportamiento del error para este grupo de vehículos.



**Figura 141.** Gráfica de los errores de los rangos de momentos máximos para la clase A del grupo T-S-R, para diferentes longitudes de claro de los puentes.

Es evidente que el mayor error para el camión T-S-R de 4 ejes se presenta para el claro de 5 metros. A partir de ese punto el error empieza a descender, de tal manera que para el claro de 35 metros se encuentra el mínimo relativo del error.

El error mínimo para el camión de fatiga con 5 ejes lo se puede encontrar para el claro de 10 metros, mientras que el máximo se presenta, de igual manera, para el claro de 5 metros.

Aunque posteriormente el error comienza a aumentar, se considera que el ajuste es adecuado dada la naturaleza de los errores. Si bien, no se han obtenido, en esta investigación, momentos para claros mayores que los 40 metros, se pretende obtenerlos en investigaciones posteriores, con la finalidad de corroborar la propuesta que se está planteando de los camiones de fatiga.



Con los datos anteriores, tanto de errores debidos a momentos máximos y el manejo del error cuadrático medio, es posible concluir que el ajuste obtenido, tanto para el camión T-S-R de 4 y de 5 ejes es un ajuste adecuado.

En las gráficas siguientes (**Figuras 142 y 143**), se presentan los momentos máximos obtenidos por los camiones del tráfico real, que componen la clase A, para el grupo T-S-R. Es importante listar este tipo de gráficas, para saber de qué magnitud se presentarían los momentos máximos en los puentes reales y decidir, en el momento de la aplicación, si estos camiones representan un riesgo para el puente, en cuestiones de fatiga.

En las **Figuras 142 y 143** se presenta el comportamiento del camión de fatiga T-S-R, para la clase A, comparado contra los diversos vehículos de tráfico real que pertenecen a la clase A. Además, se muestra la media calculada para los momentos máximos que producen los diferentes vehículos y las líneas de tendencia para  $\pm 1$  desviación estándar y  $-2$  desviaciones estándar, a partir de la media.

Nótese que prácticamente más del 90% de los momentos producidos por el tráfico real se encuentra a  $\pm 2$  desviaciones estándar de la media calculada.

Es importante notar que el camión determinado genera valores de momento mayores que la media, al igual que se observó para el grupo T-S y contrario al camión de fatiga para el grupo C.



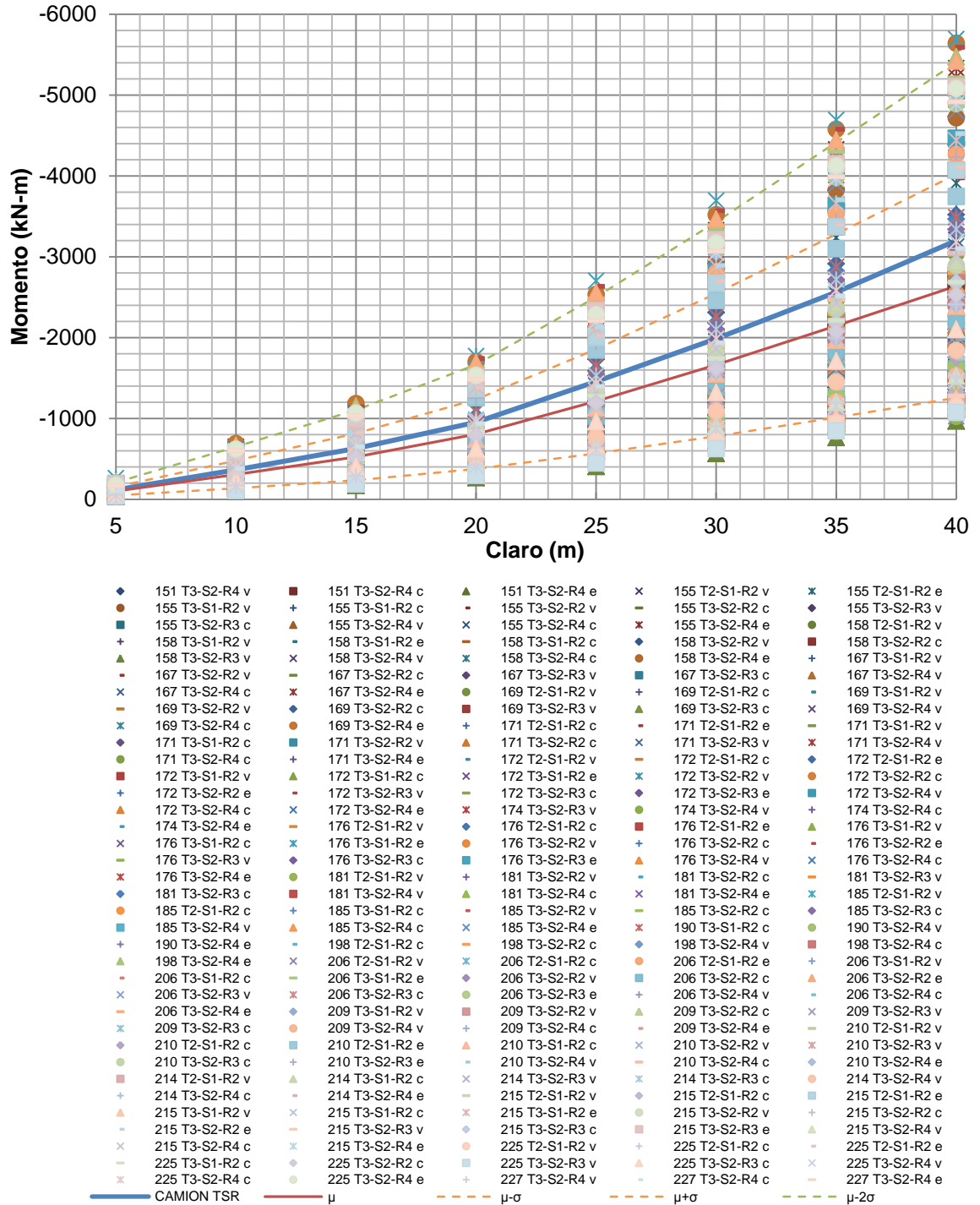


Figura 143. Gráfica de momentos máximos del tráfico real de las estaciones I51 a 227 que conforman la clase A del grupo T-S-R y el rango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes.

#### 4.7 Cálculo del peso equivalente del total de estaciones y los factores de dispersión propuestos para las diversas clasificaciones de los grupos de vehículos.

Ya definidos los camiones de fatiga, será posible la evaluación para cualquier puente vehicular de acero. Sin embargo, recuérdese que los camiones obtenidos en el apartado 4.6 de esta investigación son solamente aplicables para la clase A de los diferentes grupos.

Ya que interesa evaluar la fatiga en las diversas zonas del país, recuérdese que han sido obtenidos centroides o valores medios para las diferentes zonas, con la aplicación del algoritmo K-means del apartado 4.2.

Calcúlese ahora el peso equivalente de camión de fatiga que represente al cien por ciento de las estaciones con la **Expresión (13)**, del CAPÍTULO 2; pero separando los vehículos, del mismo modo que se hizo previamente, generando un peso equivalente para el grupo C, otro para el Grupo T-S y otro para el Grupo T-S-R. Una vez calculados estos pesos equivalentes, se obtendrán los factores de dispersión para las diferentes clasificaciones encontradas en el apartado 4.2 de esta tesis.

El factor de dispersión no es otra cosa que la división del centroide de cada una de las clases, entre el peso equivalente del cien por ciento de las estaciones encuestadas. Expresado matemáticamente:

$$FD_n = \frac{\mu_n}{W_{eq}}$$

Donde:

$\bar{W}_{eq}$  = Peso equivalente del camión de fatiga para el cien por ciento de las estaciones.

$\mu_n$  = Centroide o media de los pesos equivalentes para la  $n$ -ésima clase.

$FD_n$  = Factor de dispersión para la  $n$ -ésima clase.

A continuación se presentarán los resultados obtenidos de los pesos equivalentes para el cien por ciento del total de las estaciones y sus respectivos factores de dispersión, para las diversas clases que conforman cada grupo.

#### **4.7.1 Peso equivalente del total de las estaciones para el grupo C y sus respectivos factores de dispersión.**

Aplicando la **Ecuación (13)**, para determinar el peso equivalente del cien por ciento de las estaciones, pero ahora utilizando la sumatoria de los vehículos que conforman el grupo C de las 129 estaciones y sus respectivos pesos medios, se encontró que el peso equivalente, que es:

$$\bar{W}_{eq} = 122.8 \text{ kN}$$

Recuérdese que, aunque se dividió la muestra del grupo C en 5 clústeres, se decidió trabajar únicamente con 4 clases.

Con el peso equivalente se calcularon los factores de dispersión para las cuatro clases propuestas. Estos resultados se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 43.** Factor de dispersión para las diversas clases del grupo C.

Clase	$FD_n$
A	0.98
B	0.71
C	0.85
D	1.12

Es posible denotar que para la Clase A, el valor se aproxima a la unidad, siendo la estimación del camión de fatiga para esta clase bastante similar al peso equivalente total.

#### 4.7.2 Peso equivalente del total de las estaciones para el Grupo T-S y sus respectivos factores de dispersión.

Utilizando la **Ecuación (13)**, se obtuvo el peso equivalente de  $\bar{W}_{eq} = 317.2 \text{ kN}$ . Dicho valor se calculó tomando en cuenta los datos de las 129 estaciones encuestadas entre 1998 y 2008, correspondientes al grupo T-S.

Para este grupo, en particular, se tomó la decisión de no eliminar ninguna clase; de tal modo que se requieren obtener 6 factores de dispersión para las 6 diversas clases. El resultado de este cálculo se presenta en la tabla siguiente:

**Tabla 44.** Factor de dispersión para las diversas clases del grupo T-S

Clase	$FD_n$
A	0.99
B	1.14
C	1.06
D	0.83
E	0.91
F	1.28

Es posible denotar que para la clase A, el valor se aproxima a la unidad, siendo la estimación del camión de fatiga para esta clase bastante similar al peso equivalente total.

#### **4.7.3 Peso equivalente del total de las estaciones para el grupo T-S-R y sus respectivos factores de dispersión.**

Empleando la **Ecuación (13)**, se obtuvo el peso equivalente de  $\bar{W}_{eq} = 521.4 \text{ kN}$ . Dicho valor se calculó tomando en cuenta los datos de las 129 estaciones, como se hizo para los grupos C y T-S.

Para este grupo, en particular, se tomó la decisión de eliminar la clase representada por el clúster 6; de tal modo que se determinaron únicamente 5 factores de dispersión, del total de 6 clases.

**Tabla 45.** Factor de dispersión para las diversas clases del Grupo T-S-R.

<b>Clase</b>	<b><math>FD_n</math></b>
A	0.92
B	0.57
C	0.78
D	1.03
E	1.14

A diferencia del resto de los grupos, la clase D, para este grupo, es la que más se aproxima a la unidad.

#### **4.8 Propuesta de aplicación práctica de los modelos de carga viva determinados.**

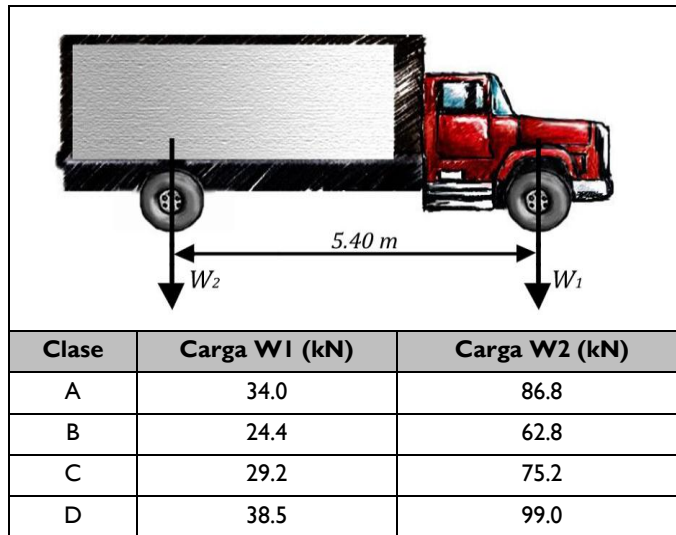
En este apartado se presentan, de manera resumida, los camiones característicos obtenidos a lo largo del CAPÍTULO 4. En este resumen se muestran los camiones de fatiga para cada grupo de vehículos y para cada clase.

Estos camiones servirán para determinar los rangos de esfuerzos en los puentes reales, los que permitirán determinar un índice de vida remanente de fatiga.

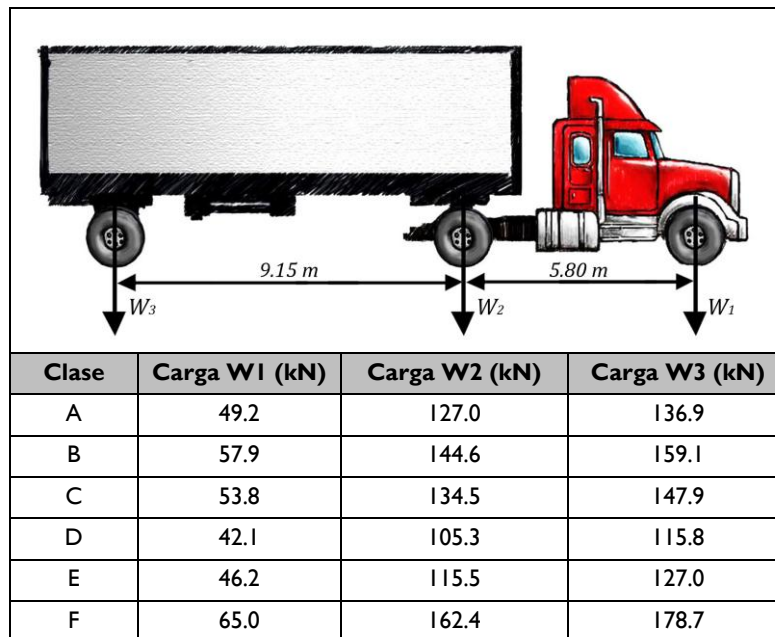
A continuación se presentan, en las siguientes tablas, los camiones de fatiga para cada uno de los grupos, con sus respectivas dimensiones y cargas por ejes, para cada una de las clases encuestadas.



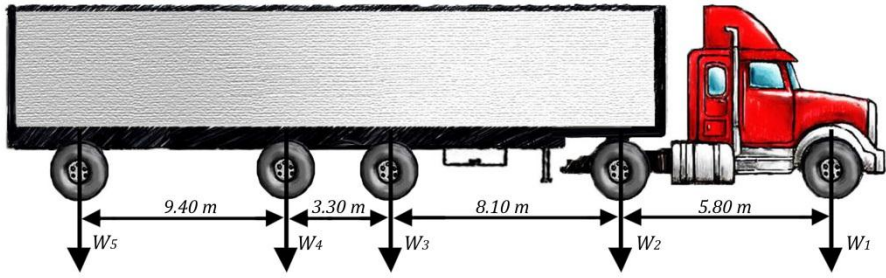
**Tabla 46.** Camión de fatiga C.



**Tabla 47.** Camión de fatiga T-S.

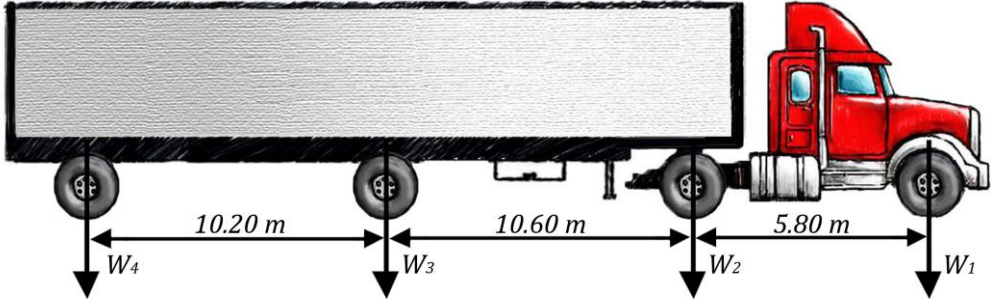


**Tabla 48.** Camión de fatiga T-S-R, para claros menores que 20 metros.



Clase	Carga W1 (kN)	Carga W2 (kN)	Carga W3 (kN)	Carga W4 (kN)	Carga W5 (kN)
A	50.4	109.5	95.0	118.0	106.5
B	32.7	68.4	58.9	71.9	65.4
C	44.7	93.5	80.5	98.4	89.5
D	59.1	123.5	106.3	130.0	118.2
E	73.4	153.5	132.2	161.5	146.8

**Tabla 49.** Camión de fatiga T-S-R, para claros mayores o iguales que 20 metros.



Clase	Carga W1 (kN)	Carga W2 (kN)	Carga W3 (kN)	Carga W4 (kN)
A	50.4	109.5	213.0	106.5
B	32.7	68.4	130.8	65.4
C	44.7	93.5	178.9	89.5
D	59.1	123.5	236.3	118.2
E	73.4	153.5	293.7	146.8

\*Nota: Para observar cuales carreteras pertenecen a cada clase se sugiere ver las **tablas 22, 26 y 30** del apartado 4.2 de este

capitulo

Con estos camiones listados arriba particularmente, es posible obtener una aplicación práctica parcial del método, siempre y cuando se considere que los demás factores que intervienen en los métodos mencionados en el CAPÍTULO 2 (como por ejemplo: el factor de impacto, la superposición de camiones, etc.) son válidos para el país.

A continuación se enunciarán, de manera ordenada, los pasos que deben considerarse para obtener la vida remanente de un puente vehicular de acero. Estos pasos están secuenciados conforme al método descrito en el **Manual de Evaluación de Puentes del AASHTO** <sup>(26)</sup>, mismos que pueden vislumbrarse con un diagrama de flujo en la **Figura 27** del CAPÍTULO 2:

1. Primeramente se debe considerar que el puente será evaluado considerando el régimen de **carga que induce fatiga**; ya que, como se sabe, estos camiones de fatiga se obtuvieron bajo ese régimen de evaluación.
2. Posteriormente ya que este método de evaluación se basa en una aproximación S-N (curva esfuerzo-n ciclos) se debe estar seguro de que el puente no presente grietas debidas a fatiga. En caso de presentarse grietas, se recomienda la aplicación de la mecánica de la fractura como método de evaluación.
3. Estos camiones pueden aplicarse tanto para evaluaciones en elementos remachados o no remachados, ya que el rango de esfuerzos es independiente a la susceptibilidad de la falla descrita por categorización de las curvas S-N. (**Figura 26**)
4. Es indispensable conocer en qué carretera se encuentra el puente en cuestión y revisar en las tablas donde se clasifican las carreteras (**Tablas 22, 26 y 30**). Esto con la finalidad de determinar qué peso equivalente (**Tablas 46, 47, 48 y 49**) debe tener cada vehículo de fatiga que se considerará para la evaluación, de acuerdo con esta clasificación.

5. Realizado lo anterior y sabiendo qué peso deben tener los vehículos, es posible determinar el rango de esfuerzos, aplicando los camiones obtenidos a un **modelo matemático representativo** del puente. Estas cargas vivas deben ubicarse en la zona donde produzcan el mayor efecto sobre el detalle o conexión que se desea evaluar.
6. Adicionado a lo anterior, el rango de esfuerzos obtenido debe incrementarse por el **factor de impacto**, para obtener el rango de esfuerzos que deberá considerarse en la evaluación. Este **factor de impacto es de 15%** de la carga viva, conforme a la Especificación AASHTO (29).
7. Deberán determinarse también los factores de incertidumbre de evaluación, conforme a la Tabla 7.2.2.1-1 del Manual de Evaluación de Puentes <sup>(26)</sup>. Estos factores de incertidumbre dependen de la carga que se está utilizando para la evaluación y dependiendo del tipo de análisis (modelo matemático) que se realizará para la obtención de los esfuerzos.
8. Los factores de incertidumbre se aplicarán al multiplicarlos por el rango de esfuerzos obtenidos en los pasos 5 y 6 descritos previamente.
9. Se determinará el rango de esfuerzos máximos, que será 2 veces el rango de esfuerzos obtenido en el paso 8.
10. Se revisará el nivel de esfuerzos de los elementos en compresión y el límite de fatiga, conforme a cada detalle (revisar sección 6 de la especificación AASHTO <sup>(28)</sup>) que se va a evaluar<sup>1</sup>, contra el rango de esfuerzos máximos determinado. En ambos casos, si el rango de esfuerzos máximos no excede al límite de fatiga o al rango de esfuerzos del elemento en compresiones, la vida remanente será considerada infinita.

---

<sup>1</sup> Si el detalle de conexión es remachado la Categoría de Detalle se considerará C en vez de D

11. En caso de que el rango de esfuerzos máximo exceda, se debe determinar la vida remanente en años, utilizando la **ecuación 7.2.5.1-1**, que se encuentra en el Manual de Evaluación previamente descrito.
12. Siendo que la **ecuación 7.2.5.1-1** depende, entre otras cosas, del tránsito diario promedio anual sobre el puente, se recomienda utilizar los datos viales de la SCT <sup>(38)</sup> más recientes, para determinar este valor, en caso de no contar con la información de campo.
13. Si se requiere realizar una aproximación más detallada, incluyendo un factor que represente el incremento en la cantidad de vehículos de la zona (tasa de crecimiento anual), éste puede determinarse mediante los datos viales de la zona, de los años previos, y crear una proyección esperada de tráfico para los años posteriores.
14. Los resultados de la evaluación ayudarán a decidir qué se debe hacer con el puente; v.gr., un reforzamiento, programar revisiones periódicas al puente o cerrar el puente a la circulación, entre otras opciones.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES DE ESTA INVESTIGACIÓN**

### **5.1 Conclusiones generales**

Esta investigación ha tratado de ir de un enfoque general a lo particular en las fallas de fatiga. Como se vio en un principio, la fatiga es un fenómeno progresivo de cambios en las propiedades en los materiales; en este caso en particular, el cambio en las propiedades del material estará dado por cargas cíclicas producto de la acción de los vehículos.

Adicionalmente, se sabe que la línea de influencia de momentos que produce un vehículo en un puente se asemeja al régimen de estudio de la fatiga de amplitud variable. Este régimen parte de la simplificación de descomponer el espectro de amplitud variable en un espectro de amplitud constante, con la finalidad de obtener un rango de esfuerzos constante.

El rango de esfuerzos, en este método que se pretende crear, estará dado por el esfuerzo producido por los vehículos que fueron calculados en esta investigación. Si bien, sabemos que el simple hecho de haber obtenido estos vehículos no es el total del método, sino más bien una parte inicial del estudio en el campo de la fatiga, puesto que la fatiga en los puentes es un fenómeno multi-variable.

Principalmente, la agrupación en tipos de vehículos se realizó bajo la idea de que cada eje produce una parte del rango de esfuerzos de amplitud variable. Ya que se desea cuantificar el

daño realizado por cada eje, estos camiones permitirán determinar ese daño causado por cada eje, adicionando además a éste, los efectos dinámicos que pueden ser causados por la velocidad de los vehículos y el movimiento de las masas debido a los amortiguadores en los vehículos.

El ajuste en el comportamiento a flexión producido por los vehículos, fue cercano a lo esperado (al menos en la etapa del análisis estático). En la siguiente investigación, que se enfocará en la determinación del daño ocasionado por los diversos ejes (ciclos equivalentes), este ajuste tendrá una mayor significación, ya que se tiene la hipótesis que de si el comportamiento coincide de manera adecuada, en el nivel de análisis estático, se tendrán mayores posibilidades que de este comportamiento también coincida de manera más eficiente, en el análisis dinámico, para diversos tipos de puentes.

Los resultados del ajuste (de lo cual trata particularmente esta investigación) pueden observarse detalladamente en el apartado 4.6 de este documento. En él se muestran las aproximaciones y los errores obtenidos para cada estimación de los diversos grupos.

La aplicación práctica puede llevarse a cabo mediante la utilización del método propuesto por el AASHTO, considerando los modelos de carga viva propuestos en esta investigación, en vez de la utilización del modelo característico de la reglamentación americana, Sin embargo, se deben considerar las incertidumbres que se discutirán más adelante en estas conclusiones. La explicación detallada de la aplicación práctica se encuentra en el apartado 4.8 de esta investigación.

## 5.2 Incertidumbres en la investigación y las áreas de oportunidad.

Al haber realizado un ajuste con mayor cantidad de ejes, se tiene una gran ventaja. Esta ventaja radica primordialmente en que estos camiones pueden ser utilizados en un sin número de puentes diferentes; es decir, que pueden usarse para evaluar puentes carreteros curvos, rectos, puentes de traveses, en puentes de armaduras, en puentes atirantados, etc. No obstante, deben realizarse estudios previos para determinar los ciclos equivalentes que se producirían para cada uno de estos tipos de puentes y para cada uno de sus componentes.

Por otra parte, una de las incertidumbres que se enfrentan es el material, ya que se debe comprobar si el material se comporta con una pendiente igual a 3, en una gráfica logarítmica-logarítmica. Esto importante, dado que si la pendiente para las categorías de detalle fuera totalmente distinta a 3, entonces esta investigación dejaría de tener validez y deberían recalcularse los pesos equivalentes para todas las estaciones con la pendiente dada por las pruebas experimentales realizadas en nuestro país.

Recuérdese que para la determinación de los vehículos de fatiga se propuso la hipótesis de que, aunque el tráfico haya aumentado en la zona, las cargas que transportan los vehículos no han cambiado, a lo largo del tiempo. Esto debe ser comprobado, ya sea haciendo estudios WIM o estudios de origen y destino, como los que ha realizado la Secretaría de Comunicaciones y Transporte en las zonas que fueron encuestadas a lo largo del periodo comprendido entre 1998 y 2000. Si estas investigaciones refutaran nuestras consideraciones y el peso ha cambiado a lo largo del tiempo, es posible crear un índice que describa el crecimiento (o decrecimiento) del peso a lo largo del tiempo, para evitar la modificación de estos modelos de carga viva.



## **CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES DE POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.**

### **6.1 Recomendaciones.**

Si se considera que el objetivo de este estudio es el de crear un método que permita la evaluación de la fatiga en México, de esta simple idea se desprende una serie de ideas que deben ser estudiadas para llegar a la culminación del método.

La primera investigación a realizar sería la de la obtención de los ciclos equivalentes. Esta investigación puede orientarse para cualquier clase de puentes; sin embargo, considerando que el 80% de los puentes de acero en México son rectos, esa investigación estará enfocada hacia ellos.

Referente a la obtención del factor de impacto, en los Estados Unidos se realizaron algunas mediciones, para obtener los valores de la amplificación de las deformaciones sufridas por los efectos dinámicos. Sin embargo, estos datos no fueron suficientes para determinar un factor de impacto acorde con la regla de Miner, sino que fue calculado de forma aproximada.

Una de las posibles investigaciones para determinar el factor de impacto sería la instrumentación de puentes que permitan obtener la respuesta dinámica de la estructura, para así determinar un correcto factor de impacto, mediante la regla de Miner.

Es también de gran importancia la realización de pruebas experimentales para determinar si las categorías de detalle presentan fallas con una pendiente de 3. Esto podría variar debido a que la mano de obra del país podría no tener con la calidad, que permita desarrollar pendientes de 3, aunque el material presente las mismas características aunque esta razón anterior es muy poco probable, debe verificarse. Además, esta investigación serviría para determinar los límites de fatiga adecuados para nuestro país, puesto que, dependiendo el método, ya sea americano o europeo, los límites de fatiga no coinciden.

Para los demás factores que intervienen en el método norte-americano, también se plantean investigaciones de ajuste para nuestro país. Un ejemplo de esto sería una investigación para determinar la superposición de vehículos sobre el puente. Sin embargo, esos estudios deberían ser también estudios de campo donde se harían aforos para determinar la cantidad de vehículos de carga en los puentes y, además, mediante la realización de un análisis probabilístico, determinar cuál sería la probabilidad de que los vehículos ocuparan la misma posición a lo largo del claro, en carriles adyacentes.

Una investigación independiente, paralela a ésta, debería realizarse para los puentes atirantados para determinar las probabilidades de camiones simultáneos y la posición de los camiones a lo largo del claro, con la finalidad de obtener los espectros de respuesta dinámica para el conjunto de los vehículos.

Para las variables que engloban la vida finita, como el tráfico diario promedio anual, no es necesario realizar una investigación de campo, ya que se tienen documentos como los datos viales de la SCT, donde se muestran valores de tránsito diario promedio anual, para las diversas carreteras federales. Simplemente se tendría que hacer un estudio analítico de estos documentos, con la finalidad de determinar alguna tasa de incremento de tráfico, así como el

límite de tráfico por vialidad y además de realizar una clasificación del país, con base en esas carreteras, como se realizó para la determinación de nuestros camiones de fatiga.

En el apartado de las conclusiones se habló sobre la implantación de los camiones para puentes curvos y atirantados. Sin embargo, existiría una serie de problemas para implantar estos modelos en el estudio de puentes curvos y atirantados.

Uno de los problemas que surgirían para el análisis de puentes curvos sería el de los efectos de la flexión secundaria, debido a la curvatura de la sección. En la actualidad, no existe gran cantidad de estudios de este tipo, sino que es un tema reciente que puede abordarse en investigaciones futuras.

En puentes con cables existe el problema de la longitud del puente: donde, debido a las grandes dimensiones de los claros, la ocurrencia de que un camión individual pase por el puente es poco probable, lo que ocasionaría efectos combinados en el puente y la evaluación de la fatiga sería compleja.

Por último, se pueden realizar investigaciones en el área de la mecánica de la fractura, así como pruebas “load spectra”. Sin embargo, para este tipo de pruebas se deberían instrumentar los puentes y hacer lecturas de barrido para determinar los espectros de carga, además de adquirir equipos para realizar las pruebas donde se permita variar el esfuerzo a lo largo de la prueba, por medio de una computadora.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Terán-Torres, B.Tadeo.** *Conversación con el Investigador David Muriá (Profesor-Investigador de la UNAM) sobre la Evaluación de Puentes Vehiculares.* Puebla de Zaragoza : s.n., 2009.
2. **Rascón Chávez, Octavio Agustín.** *Formulación de la Norma SCT de Cargas Vehiculares para Diseño Estructural de Puentes Carreteros.* 2004.
3. **Terán-Torres, B. Tadeo.** *Conversación por medios electrónicos con el Investigador Francisco Carrión (Investigador del IMT) sobre la Evaluación de la Fatiga en Puentes de Acero en México.* Monterrey : s.n., 2011.
4. **ASM International Handbook Committee.** *ASM Handbook Vol. 19: Fatigue and Fracture.* United States of America : ASM International, 1996. ISBN 0-87170-385-8.
5. **Suresh, S.** *Fatigue of Materials.* s.l. : Cambridge University Press, 1998. ISBN-0521578477.
6. **Schijve, Jaap.** *Fatigue of Structures and Materials.* Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001. ISBN 0-306-48396-3.
7. —. *Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art.* s.l. : International Journal of Fatigue, 2003. págs. 679-702. Vol. 25.
8. **Timoshenko, S.P y Goodier, J.N.** *Theory of Elasticity.* Tokyo, Japan : McGraw-Hill, 1970.
9. **ASTM.** *ASTM standard E-647.*
10. **ASM International Handbook Committee.** *ASM Handbook Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation.* United States of America : ASM International, 2000. ISBN: 0-87170-389-0.
11. **Paris, P.C., Gomez, M.P. y W.E., Anderson.** *A rational analytical theory.* s.l. : The Trend of Engineering, 1961. págs. 9–14. Vol. 13.
12. **ASTM.** *ASTM standard E-466.*
13. **Murakami, Yukitaka.** *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions.* Kidlington, UK : Elsevier, 2002. ISBN: 0-08-044064-9.
14. **Bathias.** *There is no infinite fatigue life in metallic materials.* s.l. : Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1999. págs. 559-565. Vol. 22.

15. **Cui, Weicheng.** *A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures.* s.l. : J Mar Sci Technol, 2002. págs. 43–56. Vol. 7.
16. **Pook, Les.** *Metal Fatigue: What It Is, Why It Matters.* Dordrecht, The Netherlands. : Springer, 2007.
17. **ASTM.** *ASTM standard E-1049.*
18. **Pålmgren, A.** *The endurance of ball bearings.* s.l. : Z Ver Deut Ing, 1923. págs. 339–341. Vol. 68.
19. **Miner, MA.** *Cumulative damage in fatigue.* s.l. : J Appl Mech, 1945. págs. A159–A164. Vol. 12.
20. **Fricke, Wolfgang.** *Recommended Hot-Spot Analysis Procedure for Structural Details of Ships and FPSOs Based on Round-Robin FE Analyses.* Stavanger : Proceedings of the 11th ISOPE.
21. **Biggs, John.** *Introduction to Dynamics of Structures.* s.l. : McGraw-Hill, Inc., 1964. ISBN 07-005255-7.
22. **Moses, F., C.G., Schilling y and Raju, K.S.** *Report 299: Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges.* Washington : National Cooperative Highway Research Program, 1987. ISBN: 0-309-04568-1.
23. **Schilling, Charles G.** *Stress Cycles for Fatigue Design of Steel Bridges.* s.l. : Journal of Structural Engineering ASCE, 1984. págs. 1222-1234. Vol. 110.
24. **European Convention for Constructional Steelwork.** *Recommendations for the Fatigue Design of Structures.* 1982.
25. **British Standards Institution.** *Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10: Code of Practice for Fatigue, BSI BS 5400.* England : British Standards Institution, 1980.
26. **American Association of State Highway and Transportation Officials.** *The Manual for Bridge Evaluation.* Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008, Section 7: Fatigue Evaluation of Steel Bridges.
27. **Keating, P.B. y Fisher, J.W.** *Review of Fatigue Tests and Design Criteria on Welded Details.* Lehigh University, Bethlehem, PA. : Fritz Engineering Laboratory Report 488-1, 1985.
28. **American Association of State Highway and Transportation Officials.** *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.* Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005, Section 6. Steel Structures.

29. —. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005, Section 3. Loads and Load Factors.
30. —. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005, Section 4. Structural Analysis and Evaluation.
31. —. Guide Specifications for Fatigue Evaluation of Existing Steel Bridges. Washington, DC. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 1990.
32. —. *Guide Specifications for Fatigue Design of Steel Bridges*. Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, 1989.
33. **Schilling, Charles G. y Klippstein, K.H.** *New Method for Fatigue Design of Bridges*. s.l. : Journal of the Structural Division, ASCE, 1978. Vol. 104.
34. **Schilling, C. G.** Highway Structures Design Handbook. Pittsburgh, PA : United States Steel Corporation, 1981, Chapter I/6: Fatigue Section I - Fatigue Loading.
35. **Laman, J.A. y Nowak, A.S.** *Fatigue-load models for girder bridges*. s.l. : Journal of Structural Engineering, ASCE, 1996. págs. 726–733. Vol. 122.
36. **Chotickai, P. y Bowman, M.D.** *Truck Models for Improved Fatigue Life Predictions of Steel Bridges*. s.l. : Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2006. págs. 71-80. Vol. 11.
37. **Bowman, Mark D.** *NCHRP 12-81 [Active]: Evaluation of Fatigue on the Serviceability of Highway Bridges*. s.l. : National Cooperative Highway Research Program, 2008-2011.
38. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** *Datos Viales*.
39. **Gutiérrez H., J. L. y Mendoza D., Alberto.** *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 1998, 1999 y 2000*. Sandandila, Qro. : Instituto Mexicano del Transporte, 2001.
40. —. *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 2001*. Sanfadila, Qro. : Instituto Mexicano del Transporte, 2002.
41. —. *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Análisis Estadístico de la Información Recopilada en Las Estaciones Instaladas en 2002*. Sanfadila, Qro. : Instituto Mexicano del Transporte, 2003.

42. —. *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 2003*. Sanfandila, Qro. : Instituto Mexicano del Transporte, 2004.
43. —. *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 2004*. Sanfadila, Qro. : Instituto Mexicano del Transporte, 2006.
44. **Gutiérrez H., J. L., Villegas V., Noelia y Soria A., V. J.** *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas 2005*. Sanfadila, Qro. : Instituto Mexicano del Transporte, 2006.
45. **Gutiérrez H, J. L., Villegas V., Noelia y Soria A., V. J.** *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Análisis Estadístico de la Informacion Recopilada en las Estaciones Instaladas 2006*. Sanfandila, Qro. : Instituto Mexicano del Transporte, 2008.
46. **Gutiérrez H., J. L., Villegas V., Noelia y Soria A., V. J.** *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 2007*. Safandila, Qro : Instituto Mexicano del Transporte, 2008.
47. **Gutiérrez H, J. L., Villegas V., Noelia y Soria A., V. J.** *Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional: Analisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 2008*. Sanfandila, Qro : Instituto Mexicano del Transporte, 2009.
48. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** *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.* s.l. : Dirección General de AutoTransporte Federal, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2008.
49. **Secretaria de Desarrollo Social.** Manual Normativo TOMO XIV.
50. —. Manual Normativo TOMO IV.
51. **Secretaria de Comunicaciones y Transporte.** *Estudios de Origen y Destino.* 2001-2008.
52. **Tan, Pang-Ning, Steinbach, Michael y Kumar, Vipin.** *Introduction to Data Mining.* Minnesota, United States of America : Addison-Wesley, 2006, Chapter 8. Cluster Analysis: Basic Concepts and Algorithms.

53. **Bernábe-Loranca, Ma. Beatriz y López-Sales, Ramiro.** *Statistical Classificatory Analysis Applied to Zonification.* Cancun, Mexico : 6th WSEAS Int.Conf. on Algorithms, Scientific Computing, Modelling and Simulation, 2004.
54. **Riccardi, G.A., Zimmermann, E.D. y Navarro, R.A.** *Zonification of areas with inundation risk by means of mathematical modelling in the Rosario region, Argentina.* s.l. : Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control (Proceedings), 1997.
55. **Morales S., Luis y al, et.** *Characterization and edafic and climatic zonification in the Region of Coquimbo, Chile.* s.l. : J. Soil Sc. Plant. Nutr 6, 2006.
56. **Legato, A.M y al, et.** *Stepwise Method to Obtain a Model for Predicting Finacial Difficulties in Small and Medium Size Enterprises.* s.l. : Información Tecnológica, 2003. págs. 63-69. Vol. 14.



## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

### Tablas

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de vehículos con base en su clase. ....	82
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de vehículos con base en la nomenclatura y el número de ejes.....	83
<b>Tabla 3.</b> Carga máxima por eje autorizada por la SCT en el año 2008.....	86
<b>Tabla 4.</b> Carga máxima autorizada por la SCT para los vehículo dependiendo del tipo de carretera en el año 2008.....	87
<b>Tabla 5.</b> Pesos máximos autorizados para circular en las carreteras nacionales en el año 1994 .....	88
<b>Tabla 6.</b> Fracción de distribución para los diversos vehículos.....	91
<b>Tabla 7.</b> Dimensiones de diferentes clases de vehículos, de acuerdo con el Manual normativo de la SEDESOL .....	92
<b>Tabla 8.</b> Distancias entre los ejes de los diversos vehículos que circulan en el país .....	93
<b>Tabla 9.</b> Cantidad de vehículos encuestados en las estaciones, entre 1998 y 2008.....	97
<b>Tabla 10.</b> Comparación de los pesos máximos autorizados por la SCT en diversos años. ....	104
<b>Tabla 11.</b> Cálculo de la composición vehicular expresada en número de vehículos para la estación 208 “PERICO4” .....	110
<b>Tabla 12.</b> Calculo de la fracción de los vehículos $f$ con peso $W$ para la estación 208 “PERICO4”.....	110
<b>Tabla 13.</b> Pesos medios de la composición vehicular para la estación 208 “PERICO4” en kN.....	111
<b>Tabla 14.</b> Cálculo de $fiWi3$ para cada vehículo en la estación 208 ”PERICO4” en kN <sup>3</sup> .....	111
<b>Tabla 15.</b> Pesos equivalente para los 3 grupos de vehículos en la estación 208 ”PERICO4” .	111
<b>Tabla 16.</b> Pesos equivalente para el grupo C, para las estaciones encuestadas entre 1998 y 2008 .....	112
<b>Tabla 17.</b> Pesos equivalente para el grupo T-S, para las estaciones encuestadas entre 1998 y 2008.....	116
<b>Tabla 18.</b> Pesos equivalente para el grupo T-S-R, para las estaciones encuestadas entre 1998 y 2008.....	120
<b>Tabla 19.</b> Centroides de cada uno de los clústeres del grupo C.....	127
<b>Tabla 20.</b> Estaciones que pertenece a cada clúster para el grupo C.....	128
<b>Tabla 21.</b> Medidas de dispersión para los clústeres del grupo C .....	129
<b>Tabla 22.</b> Clasificación de las carreteras con base en los pesos equivalentes del grupo C.....	131
<b>Tabla 23.</b> Centroides de cada uno de los clústeres del grupo T-S .....	136
<b>Tabla 24.</b> Estaciones que pertenecen a cada clúster para el grupo T-S.....	137
<b>Tabla 25.</b> Medidas de dispersión para los clústeres del grupo T-S.....	138
<b>Tabla 26.</b> Clasificación de las carreteras con base en los pesos equivalentes del grupo T-S..	140
<b>Tabla 27.</b> Centroides de cada uno de los clústeres del grupo T-S-R.....	145

<b>Tabla 28.</b> Estaciones que pertenecen a cada clúster, para el grupo T-S-R .....	146
<b>Tabla 29.</b> Medidas de dispersión para los clústeres del grupo T-S-R.....	147
<b>Tabla 30.</b> Clasificación de las carreteras con base en los pesos equivalentes del grupo T-S-R .....	150
<b>Tabla 31.</b> Peso aproximado por eje y peso equivalente aproximado para el vehículo C de fatiga de la clase A.....	199
<b>Tabla 32.</b> Fracciones de distribución para el camión de fatiga C.....	200
<b>Tabla 33.</b> Carga por eje para la clase A, del vehículo C de fatiga. ....	200
<b>Tabla 34.</b> Peso aproximado por eje y peso equivalente aproximado para el vehículo T-S de fatiga, de la clase A .....	201
<b>Tabla 35.</b> Fracciones de distribución para el camión de fatiga C.....	202
<b>Tabla 36.</b> Carga por eje para la clase A del vehículo C de fatiga. ....	202
<b>Tabla 37.</b> Peso aproximado por eje y peso equivalente aproximado para el vehículo T-S-R de fatiga de la clase A.....	203
<b>Tabla 38.</b> Fracciones de distribución para el camión de fatiga C.....	204
<b>Tabla 39.</b> Carga por eje para la clase A del vehículo C de fatiga .....	204
<b>Tabla 40.</b> Momentos máximos en los diversos claros encuestados para la clase A del grupo C.....	213
<b>Tabla 41.</b> Momentos máximos en los diversos claros encuestados, para la clase A del grupo T-S. ....	224
<b>Tabla 42.</b> Momentos máximos en los diversos claros encuestados para la clase A del grupo T-S-R.....	241
<b>Tabla 43.</b> Factor de dispersión para las diversas clases del grupo C.....	249
<b>Tabla 44.</b> Factor de dispersión para las diversas clases del grupo T-S.....	250
<b>Tabla 45.</b> Factor de dispersión para las diversas clases del Grupo T-S-R.....	251
<b>Tabla 46.</b> Camión de fatiga C.....	252
<b>Tabla 47.</b> Camión de fatiga T-S. ....	252
<b>Tabla 48.</b> Camión de fatiga T-S-R, para claros menores que 20 metros. ....	253
<b>Tabla 49.</b> Camión de fatiga T-S-R, para claros mayores o iguales que 20 metros. ....	253

## Figuras

<b>Figura 1.</b> Algunas estructuras sometidas a la falla por fatiga.....	11
<b>Figura 2.</b> Diagrama de las fases y sub-fases de la vida de un espécimen sometido a fatiga y sus factores más relevantes. ....	17
<b>Figura 3.</b> Deslazamiento cíclico la cual genera nucleación.....	18
<b>Figura 4.</b> Crecimiento de grieta. ....	20
<b>Figura 5.</b> Placa con una abertura circular y su distribución de esfuerzos en la sección crítica. ....	21
<b>Figura 6.</b> Placa con grieta y esfuerzos en la punta de la grieta. ....	22
<b>Figura 7.</b> Curva de propagación de grieta del acero ASTM A533 BI .....	24
<b>Figura 8.</b> Espécimen agrietado para la prueba ASTM E-647 .....	25
<b>Figura 9.</b> Espécimen compacto prueba ASTM E-647.....	25
<b>Figura 10.</b> Especímenes para la prueba curva S-N fatiga.....	29
<b>Figura 11.</b> Resultados de la prueba de especímenes sin abertura en un acero de baja aleación .....	30
<b>Figura 12.</b> Punto de rodilla en la prueba de especímenes sin abertura en un acero de baja aleación.....	32
<b>Figura 13.</b> Secuencia del desarrollo de grietas sin propagación. ....	33
<b>Figura 14.</b> Esfuerzo cíclico senoidal donde se expresa la notación de CA-amplitud.....	34
<b>Figura 15.</b> Otra clase de esfuerzos cíclico en CA-Amplitud .....	34
<b>Figura 16.</b> Principio de similaridad aplicado a espécimen de ensaye .....	36
<b>Figura 17.</b> Esfuerzo cíclico en VA-Amplitud en donde se observa las cargas individuales .....	37
<b>Figura 18.</b> Esfuerzo cíclico en VA-Amplitud en donde no se observa las cargas individuales ..	37
<b>Figura 19.</b> Ejemplo de la descomposición de ciclos en base al “Rainflow count” .....	38
<b>Figura 20.</b> Tráfico vehicular en un puente común .....	47
<b>Figura 21.</b> Espectro de amplitud variable de un puente con diferentes condiciones de apoyo. ....	48
<b>Figura 22.</b> Descomposición de un espectro de amplitud variable a espectro de amplitud constante.....	49
<b>Figura 23.</b> Gráfica de número de ciclos equivalentes para el camión propuesto por Schilling.....	51
<b>Figura 24.</b> Camiones de fatiga propuestos por diversos autores en los Estados Unidos.....	52
<b>Figura 25.</b> Curva S-N típica en el método ECCS.....	53
<b>Figura 26.</b> Curvas S-N desarrolladas por Fisher y Keating .....	56
<b>Figura 27.</b> Diagrama de flujo de los pasos para la evaluación de la fatiga por el método del AASHTO .....	58
<b>Figura 28.</b> Camión de fatiga propuesto por Schilling.....	62
<b>Figura 29.</b> Camiones de fatiga propuestos por Laman y Nowak; a) Camión que representa vehículos de 2 a 9 ejes; b) Camión que representa de 10 a 11 ejes .....	63

<b>Figura 30.</b> Camiones de fatiga propuestos por Bowman y Chotickai; a) Camión que representa a camiones de 2 a 9 ejes; b) Camión que representa a camiones de 10 a 11 ejes .....	64
<b>Figura 31.</b> Camión con peso total $W_i$ para obtener fracción de distribución por eje.....	89
<b>Figura 32.</b> Mapa de las estaciones encuestadas entre 1998 y 2008.....	102
<b>Figura 33.</b> Gráfica de comparación de la carga máxima autorizada por vehículo para 1994 y 2008 .....	103
<b>Figura 34.</b> Dispersión de la muestra del grupo C .....	115
<b>Figura 35.</b> Dispersión de la muestra del grupo T-S.....	120
<b>Figura 36.</b> Dispersión de la muestra del grupo T-S-R .....	124
<b>Figura 37.</b> Minimización de lambda de Wilks para los Clústeres del grupo C .....	127
<b>Figura 38.</b> Gráfico de puntos de los diversos clústeres del peso equivalente del grupo C....	129
<b>Figura 39.</b> Mapa de la República Mexicana con las estaciones que pertenecen a cada clase del grupo C.....	130
<b>Figura 40.</b> Minimización de Lambda de Wilks para los clústeres del grupo T-S.....	135
<b>Figura 41.</b> Gráfico de puntos de los diversos clústeres del peso equivalente del grupo T-S .	138
<b>Figura 42.</b> Mapa de la República Mexicana con las estaciones que pertenecen a cada clase para el grupo T-S.....	139
<b>Figura 43.</b> Minimización de la Lambda de Wilks para los clústeres del grupo T-S-R .....	144
<b>Figura 44.</b> Gráfico de puntos de los diversos clústeres del peso equivalente del grupo T-S-R.....	147
<b>Figura 45.</b> Mapa de la República Mexicana con las estaciones que pertenecen a cada clase, para el grupo T-S-R .....	149
<b>Figura 46.</b> Peso equivalente del camión de fatiga para la clase A para el grupo C.....	155
<b>Figura 47.</b> Peso equivalente del camión de fatiga para la clase A, para el grupo T-S.....	156
<b>Figura 48.</b> Peso equivalente del camión de fatiga para la clase A, para el grupo T-S-R .....	157
<b>Figura 49.</b> Ingreso de los datos de las cargas de camiones en el programa SAP2000 .....	159
<b>Figura 50.</b> Modelo matemático tridimensional para el análisis .....	160
<b>Figura 51.</b> Claros libres utilizados.....	161
<b>Figura 52.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 5m .....	163
<b>Figura 53.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 10m.....	164
<b>Figura 54.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 15m.....	165
<b>Figura 55.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 20m.....	165

<b>Figura 56.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 25m.....	166
<b>Figura 57.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 30m.....	166
<b>Figura 58.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 35m.....	167
<b>Figura 59.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos C2 y C3 vacíos, cargados y excedidos que pertenecen a la clase A en un claro de 40m.....	167
<b>Figura 60.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 5m.....	169
<b>Figura 61.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 10m.....	170
<b>Figura 62.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 15m.....	170
<b>Figura 63.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 20m.....	171
<b>Figura 64.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 25m.....	171
<b>Figura 65.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 30m.....	172
<b>Figura 66.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 35m.....	172
<b>Figura 67.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A del grupo C, en un claro de 40m.....	173
<b>Figura 68.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A en un claro de 5m .....	175
<b>Figura 69.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 10m.....	176
<b>Figura 70.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 15m.....	177
<b>Figura 71.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 20m.....	177

<b>Figura 72.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 25m.....	178
<b>Figura 73.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 30m.....	178
<b>Figura 74.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 35m.....	179
<b>Figura 75.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S y pertenecen a la clase A, en un claro de 40m.....	179
<b>Figura 76.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 5m. ....	180
<b>Figura 77.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 10m.....	181
<b>Figura 78.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 15m.....	181
<b>Figura 79.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 20m.....	181
<b>Figura 80.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 25m.....	182
<b>Figura 81.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 30m.....	182
<b>Figura 82.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 35m.....	182
<b>Figura 83.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro, para la clase A del grupo T-S, en un claro de 40m.....	183
<b>Figura 84.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 5m.....	184
<b>Figura 85.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 10m.....	185
<b>Figura 86.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 15m.....	186
<b>Figura 87.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 20m.....	187

<b>Figura 88.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 25m.....	187
<b>Figura 89.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 30m.....	188
<b>Figura 90.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 35m.....	188
<b>Figura 91.</b> Comportamiento a flexión en el centro del claro para algunos vehículos vacíos, cargados y excedidos que componen el grupo T-S-R y pertenecen a la clase A, en un claro de 40m.....	189
<b>Figura 92.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 5m. ....	190
<b>Figura 93.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 10m. ....	190
<b>Figura 94.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 15m. ....	191
<b>Figura 95.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 20m. ....	191
<b>Figura 96.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 25m. ....	191
<b>Figura 97.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 30m. ....	192
<b>Figura 98.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 35m. ....	192
<b>Figura 99.</b> Rango de momentos equivalentes en el centro del claro para la clase A, del grupo T-S-R, en un claro de 40m. ....	192
<b>Figura 100.</b> Propuesta de camiones para los diversos grupos y la cantidad de variables por camión, que deben ser resueltas. ....	194
<b>Figura 101.</b> Camión de fatiga grupo C, clase A y camión C generalizado.....	207
<b>Figura 102.</b> Comparación para un claro de 5m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.....	208
<b>Figura 103.</b> Comparación para un claro de 10m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.....	209
<b>Figura 104.</b> Comparación para un claro de 15m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.....	210
<b>Figura 105.</b> Comparación para un claro de 20m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.....	210
<b>Figura 106.</b> Comparación para un claro de 25m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.....	211

<b>Figura 107.</b> Comparación para un claro de 30m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.....	211
<b>Figura 108.</b> Comparación para un claro de 35m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.....	212
<b>Figura 109.</b> Comparación para un claro de 40m del rango de momentos esperados vs. rango de momentos, camión C, clase A.....	212
<b>Figura 110.</b> Gráfica de momentos máximos de los rangos de momentos para la clase A del grupo C, para diferentes longitudes de claro de puentes.....	213
<b>Figura 111.</b> Gráfica de los errores de los rangos de momentos máximos, para la clase A, del grupo C, para diferentes longitudes de claro de puentes.....	214
<b>Figura 112.</b> Gráfica de los momentos máximos del tráfico real de la clase A del grupo C, tango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes.....	217
<b>Figura 113.</b> Camión de fatiga grupo T-S clase A y camión T-S generalizado.....	218
<b>Figura 114.</b> Comparación para un claro de 5m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A. ....	219
<b>Figura 115.</b> Comparación para un claro de 10m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A. ....	220
<b>Figura 116.</b> Comparación para un claro de 15m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A. ....	221
<b>Figura 117.</b> Comparación para un claro de 20m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A. ....	222
<b>Figura 118.</b> Comparación para un claro de 25m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A. ....	222
<b>Figura 119.</b> Comparación para un claro de 30m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A. ....	223
<b>Figura 120.</b> Comparación para un claro de 35m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A. ....	223
<b>Figura 121.</b> Comparación para un claro de 40m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos, camión T-S, clase A. ....	224
<b>Figura 122.</b> Gráfica de momentos máximos de los rangos de momentos para la clase A, del grupo T-S, para diferentes longitudes de claro de los puentes. ....	225
<b>Figura 123.</b> Gráfica de los errores de los rangos de momentos máximos para la clase A, del grupo T-S, para diferentes longitudes de claro de los puentes. ....	226
<b>Figura 124.</b> Gráfica de los momentos máximos del tráfico real de las estaciones 099 a 147 que conforman la clase A, del grupo T-S y el rango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes.....	228
<b>Figura 125.</b> Gráfica de los momentos máximos del tráfico real de las estaciones 147 a 226, que conforman la clase A, del grupo T-S y el rango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes.....	229



<b>Figura 126.</b> Camión de fatiga, grupo T-S-R clase A y camión generalizado T-S-R, para los claros menores que 20 metros. ....	231
<b>Figura 127.</b> Camión de fatiga, grupo T-S-R clase A y camión generalizado T-S-R, para los claros mayores o iguales a 20 metros. ....	231
<b>Figura 128.</b> Comparación para un claro de 5m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A. ....	232
<b>Figura 129.</b> Comparación para un claro de 10m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A. ....	233
<b>Figura 130.</b> Comparación para un claro de 15m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A. ....	234
<b>Figura 131.</b> Comparación para un claro de 20m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A. ....	235
<b>Figura 132.</b> Comparación para un claro de 25m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A. ....	236
<b>Figura 133.</b> Comparación para un claro de 30m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A. ....	236
<b>Figura 134.</b> Comparación para un claro de 35m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A. ....	237
<b>Figura 135.</b> Comparación para un claro de 40m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 4 ejes, para la clase A. ....	237
<b>Figura 136.</b> Comparación para un claro de 5m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 5 ejes, para la clase A. ....	238
<b>Figura 137.</b> Comparación para un claro de 10m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 5 ejes, para la clase A. ....	239
<b>Figura 138.</b> Comparación para un claro de 15m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 5 ejes, para la clase A. ....	239
<b>Figura 139.</b> Comparación para un claro de 20m del rango de momentos esperados vs. el rango de momentos del camión T-S-R de 5 ejes, para la clase A. ....	240
<b>Figura 140.</b> Gráfica de momentos máximos de los rangos de momentos para la clase A del grupo T-S-R, para diferentes longitudes de claro de los puentes. ....	242
<b>Figura 141.</b> Gráfica de los errores de los rangos de momentos máximos para la clase A del grupo T-S-R, para diferentes longitudes de claro de los puentes. ....	243
<b>Figura 142.</b> Gráfica de momentos máximos del tráfico real de las estaciones 099 a 151 que conforman la clase A del grupo T-S-R y el rango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes. ....	245
<b>Figura 143.</b> Gráfica de momentos máximos del tráfico real de las estaciones 151 a 227 que conforman la clase A del grupo T-S-R y el rango de momentos máximos obtenidos en diferentes longitudes de claro de los puentes. ....	246