

Universidad de Holguín

“Oscar Lucero Moya”

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Trabajo de Diploma

**Obtención de un modelo de cargas  
verticales móviles para puentes de  
tipología soviético-cubano, en la  
carretera Holguín –Moa.**

Marlen Carmen Alvarez Suárez

Holguín

2015

Universidad de Holguín

“Oscar Lucero Moya”

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Trabajo de Diploma

**Obtención de un modelo de cargas verticales móviles para puentes de tipología soviético-cubano, en la carretera Holguín –Moa.**

**Autor:** Marlen Carmen Alvarez Suárez

**Tutores:** Ing. Eddy Fernández Ochoa

Holguín

2015

## **PENSAMIENTO**

## **DEDICATORIA**

- ❖ A mis padres y novio por ser el impulso y la fuerza que necesite en todo momento para que este sueño se hiciera realidad.

**Los quiero mucho**

## **AGRADECIMIENTOS**

- ❖ A mi mimucha por siempre darme toda la fuerza y el amor que necesite para emprender este gran reto.
- ❖ A mi padre por ser siempre el ejemplo a seguir profesionalmente.
- ❖ A mi querido novio por darme todo su amor, comprensión y apoyo en todos los difíciles momentos de este trabajo y ser el sostén de mi felicidad.
- ❖ A mi tutor por toda la paciencia y dedicación que siempre tuvo, para usted toda mi admiración y respeto.
- ❖ A mis amigas de la vieja escuela y a Anabel e Ivett que aunque no estuvieron aquí siempre me apoyaron de lejos.
- ❖ A Roberto Pérez y Rene Cruz del departamento de Cad/Cam por su infinita ayuda.
- ❖ A todos los que de una forma u otra siempre estuvieron ahí.

**Mil gracias**

## **RESUMEN**

La presente investigación percibió el propósito de obtener un modelo de cargas verticales móviles para el diseño de puentes de tipología soviético-cubano basado en la simulación del tráfico actual mediante secuencias vehiculares, pues el modelo normado no tiene en cuenta estas características. Para ello se consideraron los conteos vehiculares procedentes de estudios realizados en el enlace vial Holguín-Moa, de donde se seleccionó el puente de Sagua, como prototipo para ilustrar y fundamentar el procedimiento de obtención del nuevo modelo. Mediante la ayuda del software profesional CSi Bridge se construyó el prototipo numérico y se simularon las situaciones reales del tráfico a través de secuencias vehiculares, de las que se obtuvieron las solicitaciones de momento y cortante como efectos más críticos. Además se analizaron estos datos estadísticamente y mediante el ajuste a una distribución, se realizó la extrapolación por el inverso del período de retorno y se obtuvo un momento extrapolado para un tiempo de 50 años de vida útil de la estructura. Con este valor de momento y fijando una configuración geométrica similar al de la norma cubana a través de un proceso de ingeniería inversa se obtuvieron los dos sistemas de cargas que confirmaron el modelo creado: uno compuesto por cargas concentradas y el otro por una carga de carril uniformemente distribuida en dirección longitudinal.

## **ABSTRACT**

The present investigation perceived the purpose of obtaining a model of loads vertical motives for the design of bridges of Cuban-Soviet tipología based on the simulation of the current traffic by means of vehicular sequences, because the pattern normado doesn't keep in mind these characteristics. For they were considered it the vehicular counts coming from studies carried out in the connection vial Holguín-Moa of where it was selected the bridge of Sagua like prototype to illustrate and to base the procedure of obtaining of the new model. By means of the help of the professional software CSi Bridge the numeric prototype was built and the real situations of the traffic were simulated through vehicular sequences of those that the solicitations were obtained at the moment and sharp as more critical effects. These data were also analyzed statistically and by means of the adjustment to a distribution was carried out the extrapolation for the inverse of the period of return and a moment was obtained extrapolated for a time of 50 years of useful life of the structure. With this value at the moment and fixing a similar geometric configuration to that of the Cuban norm dares of a process of inverse engineering the two systems of loads they were obtained that confirmed the created pattern: one composed by concentrated loads and the other one by a rail load evenly distributed in longitudinal address.

# ÍNDICE

<b>PENSAMIENTO</b> .....	<b>3</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>4</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPITULO I. MODELOS DE CARGAS VERTICALES MÓVILES</b> .....	<b>6</b>
1.1    Análisis normativo de los modelos de cargas verticales móviles .....	6
1.1.1    Análisis de los MCVM en diferentes normativas.....	7
1.1.2    Evolución de los modelos de la norma cubana .....	15
1.2    Variables aleatorias que inciden en la obtención de los MCVM.....	19
1.2.1    Número de camiones.....	20
1.2.2    Peso Bruto.....	20
1.2.3    Pesos por ejes.....	21
1.2.4    Espaciamiento entre ejes .....	22
1.3    Métodos que describen modelos de carga móvil .....	24
1.3.1    Modelo de Nowak e Lind (1979).....	25
1.3.2    Modelo de Moses e Ghosn (1985) .....	26
1.3.3    Modelo de Nowak (1999) .....	27
1.3.4    Modelo de Crespo-Minguillón y Casas (1997) .....	29
1.3.5    Modelo de Hwang y Koh (2000) .....	30
1.4    Descripción del tráfico .....	31
1.4.1    Características del parque vehicular cubano.....	31
1.5    Selección del Puente que se empleará como prototipo .....	35
1.5.1    Datos Característicos del puente de Sagua-Moa .....	36
<b>CAPÍTULO II. OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGAS MÓVILES</b> .....	<b>39</b>
2.1.    Procedimiento para la obtención del Modelo .....	39
2.1.1.    Construcción del prototipo numérico del puente seleccionado.....	40
2.1.2.    Selección y caracterización de los vehículos del tráfico real que representarán la carga móvil sobre el prototipo del puente .....	42
2.1.3.    Simulación de las situaciones reales del tráfico a través de secuencias vehiculares.....	43

2.1.4. Obtención de las solicitaciones generadas.....	44
2.1.5. Comparación de los efectos obtenidos por las secuencias vehiculares con el efecto obtenido por el vehículo normado .....	45
2.1.6. Análisis estadístico de los efectos obtenidos.....	47
2.1.7. Extrapolación de los momentos por la inversa del período de retorno ..	50
2.1.8. Obtención del modelo.....	55
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>57</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>61</b>

## INTRODUCCIÓN

Del importante papel que juegan los puentes para la sociedad, se deriva la necesidad de un correcto diseño estructural que garantice un proyecto funcional, seguro y efectivo. Siendo internacionalmente la máxima seguridad estructural uno de los principales factores que se certifican en la construcción de puentes carreteros acorde con las diversas tipologías empleadas.

En Cuba, la tipificación vigente y más extendida que se utiliza para lograr este significativo factor en el diseño es la tipología soviético-cubano, la cual tiene más de 40 años de aplicación representando las obras ingenieriles del país, sin embargo, se presentan ciertos deterioros en la red vial que conllevan a la revisión de parámetros específicos para la calibración del diseño, periodo de vida útil e impacto económico.

Uno de los parámetros primordiales es el tráfico vehicular, del que se analizan las cargas vivas que actúan verticalmente “adoptándose para el diseño ciertos vehículos o modelos cuyos pesos, dimensiones y distribuciones de los pesos por ejes, pueden considerarse representativos de las cargas más desfavorables que circulan por los puentes”.<sup>1</sup>

Aunque, según el análisis del vehículo de diseño en diferentes normativas y en especial al Eurocódigo se cita que: “Estos modelos no describen en sí mismo las cargas actuales, sino que han sido seleccionados de forma tal que sus efectos representen a las del tráfico real, para lo cual se crea un vehículo virtual que represente las condiciones reales del tráfico y no precisamente a un vehículo en particular.”<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Medina Torri Francisco “Cargas para el cálculo de Edificaciones y Puentes”

<sup>2</sup> Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Abril, 1998

Sin embargo en lo que especifica la norma vigente cubana NC: 733-2009, estos vehículos virtuales vienen dado por la representación de dos modelos: el MS-32 de origen americano y el NK-80 de origen ruso como vehículos normativos para el análisis de la carga accidental o móvil. En el caso de MS-32 no describe en sí mismo las condiciones reales del parque vehicular cubano.

En Cuba no se cuenta con los datos característicos del tráfico vehicular pues se toma como referencias normas de diseño basadas en las características del parque vehicular de otros países. Inicialmente se utilizaron reglamentos de Estados Unidos, luego de Francia y posteriormente de la extinta Unión Soviética (URSS).<sup>3</sup> Donde el primer código cubano para puentes de carreteras es creado en 1984, basado en modelos de cargas móviles contenidos en la norma de puentes de la antigua URSS.<sup>4</sup>

Actualmente se cuenta con las características del parque vehicular que recoge la norma American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), lo que trae consigo, que hoy no exista un modelo para el diseño de puentes carreteros acorde con la situación real cubana y que existan trabajos encaminados a la solución de este problema pero sin ningún documento referente a la obtención de modelos de cargas vivas en el país, según declara Infantes (2013)<sup>5</sup>

Si se consideran los trabajos realizados en relación con el comportamiento del tráfico en aforos y el análisis de los histogramas de frecuencia para los camiones más pesados, se puede decir que estos vehículos tienen un efecto igual o superior al vehículo de diseño MS-32 del reglamento cubano para puentes de carreteras.<sup>6</sup>

---

<sup>3</sup> Infantes Suárez, Dania "Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales" , Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO,Cuba,2013, pág. 4 tomado de Dr. Taylor Hernández Gustavo. "Manual para la Inspección y Conservación de Puentes de hormigón".

<sup>4</sup> Ibídem

<sup>5</sup> Ibídem, pág.4

<sup>6</sup> Ramos, M. "Monitoreo y análisis del comportamiento del tráfico en la carretera Holguín-Moa, orientado hacia el estudio de la fuerza de frenado". Trabajo de Diploma para obtener el título de ingeniero civil. UHo, 2012.

Por este motivo se trata de formular un modelo de cargas verticales móviles que al aplicarse el análisis estructural en cada puente arroje momentos flexionantes y fuerzas cortantes mayores a los que ocasionan los vehículos reales más pesados, de manera que con él se logre un nivel de seguridad adecuado en el diseño de nuevos puentes así como para la revisión estructural de los ya existentes.

Lo antes mencionado establece una contradicción entre las solicitaciones generadas por el parque vehicular cubano sobre los puentes de carreteras y las que produce el vehículo normado MS-32 por el reglamento vigente NC: 733-2009, que no están en correspondencia, lo que puede acarrear problemas de seguridad en el diseño de estas obras.

De la contradicción, emerge **el problema fundamental de la investigación** al no existir un modelo de carga vertical móvil para el diseño de puentes carreteros que responda al tráfico vehicular cubano.

**El objeto de la investigación** lo constituyen los puentes de tipología cubano soviético en la carretera Holguín-Moa y el **campo de acción** los modelos de cargas verticales móviles para el diseño de puentes.

**La investigación parte de la Hipótesis Científica:** Si se crea un modelo de carga vertical móvil que origine solicitaciones equivalentes al parque vehicular actual, se podrá establecer una calibración con relación al vehículo normativo MS-32.

**El objetivo general** es obtener un modelo de carga vertical móvil para el diseño de puentes de tipología soviético-cubano a partir del análisis del tráfico actual.

**Los objetivos específicos son:**

- Realizar un análisis histórico referente a los modelos de cargas verticales móviles en diferentes normativas
- Fundamentar el procedimiento para la obtención de modelos de cargas verticales móviles, en puentes modelados mediante el uso del software CsiBridge
- Comparar las solicitaciones obtenidas a partir del modelo creado con las que origina el vehículo normativo MS-32.

### **En relación las tareas de la investigación son:**

1. Recopilación de información histórica, acerca de los modelos de cargas vivas en puentes de carreteras, en lo concerniente al estado de la ciencia en el mundo y Cuba.
2. Caracterización del procedimiento de obtención de los modelos de carga viva y de la tipología constructiva Cubano-Soviético.
3. Representación del tráfico real que circula por el enlace vial Holguín-Moa sobre el prototipo seleccionado para la obtención de un modelo de cargas verticales móviles.
4. Obtención de las solicitaciones de diseño a partir de los modelos creados para establecer una comparación con las que origina el vehículo normativo MS-32.

### **Los métodos de Investigación:**

#### **Métodos Teóricos:**

1. **Histórico-lógico:** Se utilizó para determinar los antecedentes históricos del origen y evolución de los modelos de carga viva. Trasladando la información de un contexto mundial, al nacional y territorial, para así revelar etapas, tendencias y regularidades de los estudios realizados a los puentes de hormigón, de la tipología constructiva antes mencionada.
2. **Hipotético deductivo:** Se empleó en la hipótesis de trabajo para la dirección de la investigación, así como para su aporte científico con el cumplimiento de la misma.
3. **Modelación:** Se usó para la elaboración del modelo estructural sobre el puente seleccionado a través del programa computacional CSi Bridge V15.
4. **Análisis y síntesis:** En la sistematización y caracterización de los modelos de cargas verticales móviles, así como también en todas las bibliografías consultadas para la realización de la investigación.

#### **Métodos Empíricos:**

1. **Observación científica:** Se empleó en el diagnóstico del tráfico real que circula en el prototipo seleccionado para la creación del modelo de carga vertical móvil.
2. **Análisis Documental:** En la citación de documentos que guiarán la investigación.

### **Métodos Estadísticos:**

1. **Estadística Descriptiva:** En la extrapolación de los efectos para los períodos de retornos analizados según los histogramas de frecuencia.

**El aporte de la investigación** es un modelo de cargas verticales móviles que represente las características reales del parque vehicular cubano en los puentes de tipología cubano-soviético.

**La novedad Científica** parte de que este modelo de cargas verticales móviles considera secuencias del tráfico actual en puentes de tipología cubano-soviético en el enlace vial Holguín-Moa, no visto antes, ya que los autores parten de uno o dos camiones en el prototipo de puente, para el análisis en el proceso de obtención del modelo.

**La actualidad del tema de la investigación** es la recalibración del modelo normado de nuestro país, según estudios realizados a nivel nacional y provincial.

**Estructura del informe de investigación:** El presente trabajo estará estructurado por dos capítulos, introducción, conclusiones y recomendaciones. En el primer capítulo se muestra un análisis histórico de los vehículos de diseño en diferentes normativas, la caracterización, métodos de obtención y variables que intervienen en los modelos de cargas verticales móviles, además de diagnosticar el tráfico actual. En el segundo capítulo se establece el procedimiento de obtención del modelo a crear en el prototipo seleccionado y se realiza una comparación entre el modelo obtenido y el normado para darle validación a la hipótesis planteada.

# **CAPITULO I. MODELOS DE CARGAS VERTICALES MÓVILES**

En el presente capítulo se realiza un análisis normativo de los vehículos de diseño en diferentes países y en especial en Cuba como modelos de cargas verticales móviles (MCVM) para el diseño en puentes de carreteras. Dentro de los aspectos fundamentales que se tratan de estos modelos están las variables que intervienen en su concepción, los métodos utilizados para su obtención, la descripción del tráfico vehicular cubano y la selección del puente que se empleará como prototipo en su creación.

## **1.1 Análisis normativo de los modelos de cargas verticales móviles**

Para el diseño de puentes carreteros, en especial su análisis estructural, se tiene en cuenta la acción vertical debido a las cargas accidentales móviles representadas a través de modelos o vehículos normativos que simulen los efectos más desfavorables de la situación real del tráfico sobre el puente. Cada modelo es plasmado en la norma que rige el territorio nacional según las características del flujo vehicular de cada país, aunque no solo dependen del tráfico, sino que existen criterios que lo asocian a la localización del puente:

“El tráfico de vehículos puede variar en cada puente, en función de la composición del tráfico (por ejemplo porcentaje de vehículos pesados), de la intensidad (por ejemplo número medio de vehículos por año), de sus condiciones (por ejemplo frecuencia de los atascos), del máximo peso probable de los vehículos y sus cargas por ejes y, si es preciso, de las señales del tráfico que restringen la capacidad de transporte.”<sup>7</sup>(Sic)

Independiente de estos criterios, cada país en su norma refleja las particularidades de su modelo teniendo en común para la concepción de los mismos dos sistemas de

---

<sup>7</sup> Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Abril, 1998, pág.24.

cargas: uno compuesto por cargas concentradas y el otro por una carga de carril uniformemente distribuida en dirección longitudinal.

“Generalmente, el tren de cargas concentradas, se emplea en el análisis de puentes con tramos relativamente pequeños, mientras que para grandes luces se emplean preferentemente las cargas distribuidas equivalentes”.<sup>8</sup>

Además el **sistema de cargas concentradas** produce efectos en los puentes equivalentes a los que ocasiona un vehículo muy pesado con una probabilidad muy baja de presentarse en el lapso de vida útil de diseño del puente. Por su parte, el **sistema de carga uniforme** genera efectos a los que ocasiona una secuencia (convoy) de vehículos pesados, que al circular en un carril, uno tras otro, producen elementos mecánicos iguales o mayores, dependiendo del claro del puente, que los que origina cualesquiera de ellos individualmente.<sup>9</sup>

De forma general en el diseño conceptual del modelo, los valores que se asignan a las cargas concentradas se calculan mediante diversos análisis probabilísticos de riesgos, en tanto la carga uniforme se determina mediante un proceso de simulación estocástica de secuencia de vehículos pesados.<sup>10</sup>

A continuación se muestra la evolución de los modelos de cargas verticales móviles en la norma cubana y el análisis normativo en diferentes países con los requisitos generales y sobrecarga vehicular que se exigen en el diseño de puentes carreteros.

### **1.1.1 Análisis de los MCVM en diferentes normativas**

Cada modelo de carga debería adecuarse a las características peculiares del tráfico del país en el que se fuese aplicar el diseño, sin embargo, existen reglamentos que norman los modelos vehiculares que se consideran en otros países, como es el caso de Chile,

---

<sup>8</sup>Infantes Suárez, Dania “Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales” , Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO,Cuba,2013, pág 8. Tomado de Álvarez Trujillo, Egberto Jesús, “Diseño de puentes Losa” , Universidad Central de Las Villas, Villa Clara ,Cuba.

<sup>9</sup> Formulación de la Norma SCT de Cargas Vivas Vehiculares para Diseño de Puentes Carreteros, 2004, pág. VII Resumen.

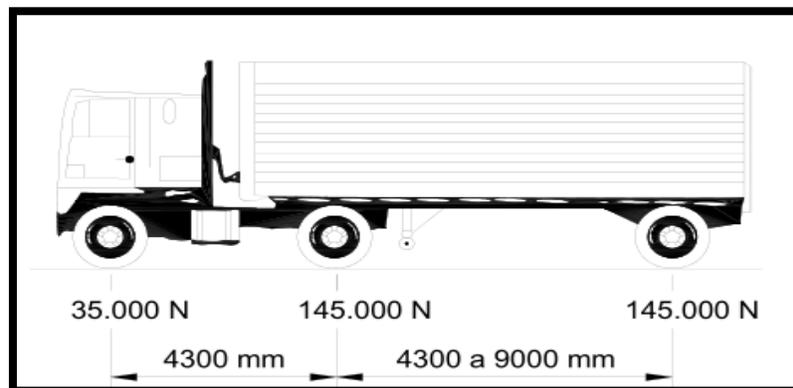
<sup>10</sup> Modelo de cargas vivas vehiculares para el diseño estructural de puentes en México, 1999, pág.III Resumen.

Hondura y Cuba, por citar algunos ejemplos. Estos se basan en la norma AASHTO estadounidense, que se excluye de tal situación junto con la normativa española (Eurocódigo) y la mexicana (SCT) que cuentan con su propio modelo o sistema de cargas vivas vehiculares. A continuación se muestran los prototipos y especificaciones generales de las diferentes normativas citadas en general.

#### ❖ Normativa Estadounidense AASHTO (Método LRFD)<sup>11</sup>

La American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) de Estados Unidos de Norteamérica plantea que: "... este modelo de sobrecarga consistente en un camión o tandem en coincidencia con una carga uniformemente distribuida, fue desarrollado como una representación ideal del corte y momento producidos por un grupo de vehículos habitualmente permitidos en las carreteras de diferentes estados donde el modelo de carga se denomina "ideal" porque no es su intención representar ningún tipo de camión en particular..."

Esta sobrecarga, designada como HL-93 consistirá en la combinación de tres cargas vivas para el diseño de puentes: el camión, el tandem y la carga del carril. En el caso de la carga de camión, los pesos y las separaciones entre los ejes y las ruedas del camión de diseño serán como se especifica en la Figura 1:



**Figura I.1 Características del camión diseño [12]**

<sup>11</sup> American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO), United States, 2004. Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD. Epígrafe 3-26.

Además la carga tandem de diseño consiste en un par de ejes de 110 kN con una separación de 1.2 m, espaciamiento transversal de las ruedas de 1.8 m y la carga del carril o carga equivalente de 9,3 kN/m uniformemente distribuida en dirección longitudinal y transversalmente se supondrá en un ancho de 3 m.

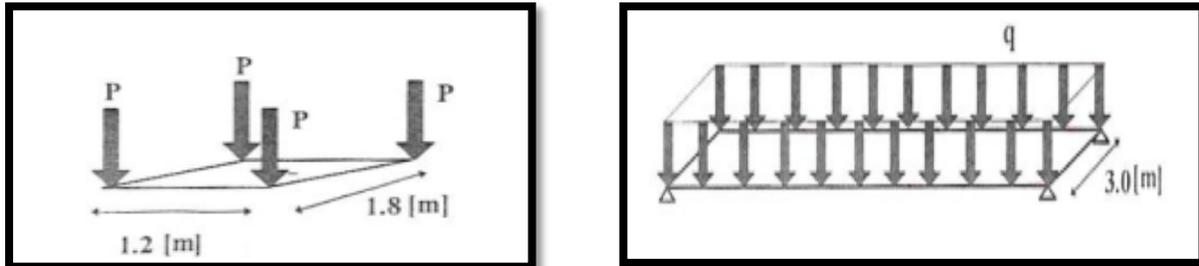


Figura 1.2. Cargas de tándem y de faja [13].

#### ❖ Normativa Europea : Eurocódigo

El Eurocódigo, aprobada por el Comité de Normalización Europea (CEN) analiza las acciones debidas al tráfico de vehículos mediante 4 modelos en específico, representativos del mayor tráfico encontrado o esperado, en las principales carreteras de los países europeos. Aplicable al proyecto de puentes de carreteras con vanos de luz inferior a 200 m y con plataformas de ancho no mayor de 42 m.<sup>14</sup> Estos modelos incluyen todas las situaciones de tráfico de proyecto normalmente previsibles:

**Modelo de Carga 1:** Cargas concentradas y uniformemente distribuidas, que cubren la mayoría de los efectos del tráfico de coches y camiones, definido para comprobaciones locales y generales que consta de dos sistemas parciales:

1) Cargas concentradas en un eje doble (sistema tándem TS) donde cada eje tiene un peso igual a:  $P = \alpha_Q * Q_{1k}$

<sup>12</sup> American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO), United States, 2004. Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD. Epígrafe 3-26

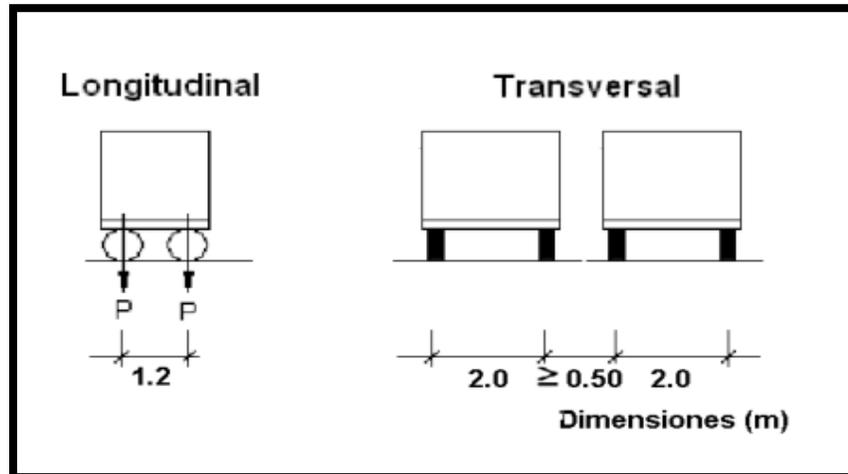
<sup>13</sup> Infantes Suárez, Dania "Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales" , Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO,Cuba,2013.pág.12.

<sup>14</sup> Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Abril, 1998.

Donde:

$\alpha_Q$ : Coeficiente de ajuste

$Q_{ik}$ : Valor característico de la carga en un eje del carril del puente de carretera.



**Figura I.3 Disposición del sistema tandem TS [15]**

2) Cargas uniformemente distribuidas (Sistema UDL), de valor por metro cuadrado:

$$q = \alpha_q * q_{ik}$$

Este modelo se debe aplicar en cada carril teórico y en las áreas residuales donde la magnitud de carga en el carril teórico es  $q_i = \alpha_{qi} * q_{ik}$  y  $\alpha_Q * Q_{ik}$ . En las áreas residuales la magnitud de la carga es  $q_r = \alpha_{qr} * q_{rk}$ .

Donde:

$\alpha_q, \alpha_{qi}, \alpha_{qr}$ : Coeficientes de ajustes que pueden ser diferentes en función del tipo de carretera y del tráfico esperado. En ausencia de especificaciones se tomarán igual a 1. Para puentes que no tengan restricciones del peso de los vehículos se tomará mayor que 0.8.

$q_{ik}$  ó  $q_{rk}$ : Valor característico de las cargas uniformemente distribuidas

Los valores de  $Q_{ik}$ ,  $q_{ik}$  ó  $q_{rk}$  se define en esta tabla:

---

<sup>15</sup> Infantes Suárez, Dania "Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales", Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO, Cuba, 2013, pág. 16.

Tabla I.1 [16]

Situación	Sistema tándem	Sistema UDL
	Cargas por eje $Q_{ik}$ [kN]	$q_{ik}$ o $q_{rk}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Carril nº 1	300	9
Carril nº 2	200	2,5
Carril nº 3	100	2,5
Resto de carriles	0	2,5
Área residual $q_{rk}$	0	2,5

Cada eje del tándem tiene dos neumáticos idénticos donde la carga por neumático es, por tanto, igual a  $0.5 \alpha_Q * Q_{ik}$  y la superficie de contacto de cada neumático se considera como un cuadrado de 0.40 m de lado como se muestra en la figura:

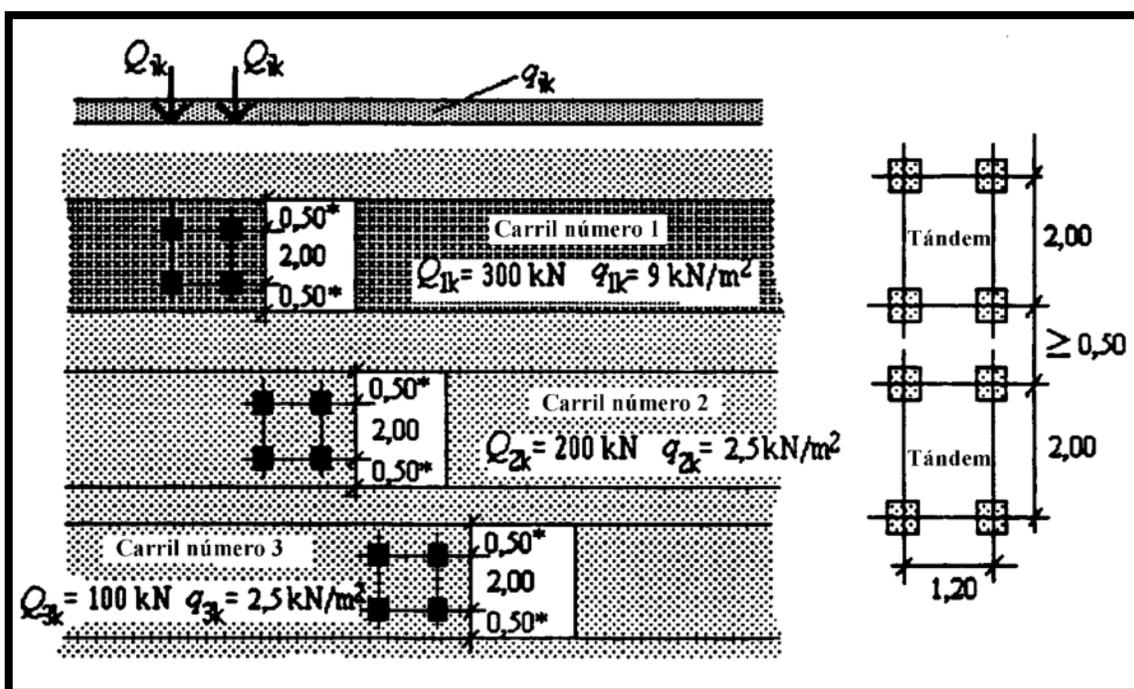
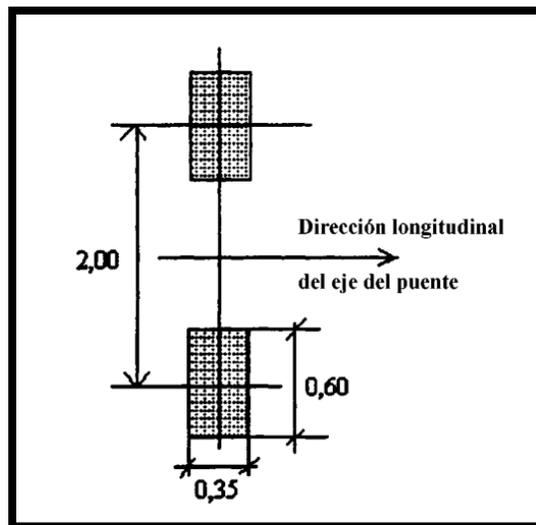


Figura I.4 Modelo de Carga 1 [17]

<sup>16</sup> Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Abril, 1998, pág. 28.

<sup>17</sup> Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Abril, 1998, pág.29.

**Modelo de Carga 2:** Carga de un eje simple con  $P = \beta_Q * Q_{ak}$  donde  $Q_{ak} = 400\text{kN}$  aplicada en un área específica de contacto de la rueda, que cubre los efectos dinámicos del tráfico normal en elementos estructurales muy cortos. Sin embargo, se puede considerar una sola rueda  $P = 200 * Q_{ak}$  (kN). Salvo especificación  $\beta_Q = \alpha_Q$ . Este modelo debe ser considerado aisladamente y solo se utiliza en comprobaciones locales. La superficie de contacto se tomará igual a un rectángulo de 0.35 m x 0.60 m tal y como se muestra en la figura.



**Figura I. 5 Modelo de Carga 2 [18]**

**Modelo de Carga 3:**

Conjunto de modelos de vehículos especiales que se deben considerar exclusivamente con situaciones transitorias.

**Modelo de Carga 4:**

Carga de la muchedumbre que si es necesario se representa por un valor nominal que incluye la amplificación dinámica, que coincide con el valor característico especificado. Debe ser aplicada en las zonas pertinentes a lo largo y ancho del tablero del puente de la carreta. Exclusivamente con situaciones transitorias.

❖ **Norma Mexicana: SCT (2004)**

<sup>18</sup> Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Abril, 1998, pág.30.

A partir de una investigación realizada en México sobre los años 90 se arrojaron datos que reafirmaron la necesidad de crear un modelo de cargas vivas vehiculares ya que el reglamento de la AASHTO no era aplicable al caso de la República Mexicana, pues con él se obtenían momentos y cortantes máximos muy inferiores a los representados por los vehículos más pesados del país.

En el año 1993 y 1996 sean captados por la SCT los datos sobre pesos y dimensiones de vehículos de cargas representativos del país para el desarrollo de dicho modelo, que quedaría conformado en el año 2004 por dos modelos de cargas vivas: uno para carreteras principales, tipos ET, A, B y C; y otro para alimentadoras, tipo D en la formulación de la nueva norma mexicana.<sup>19</sup>

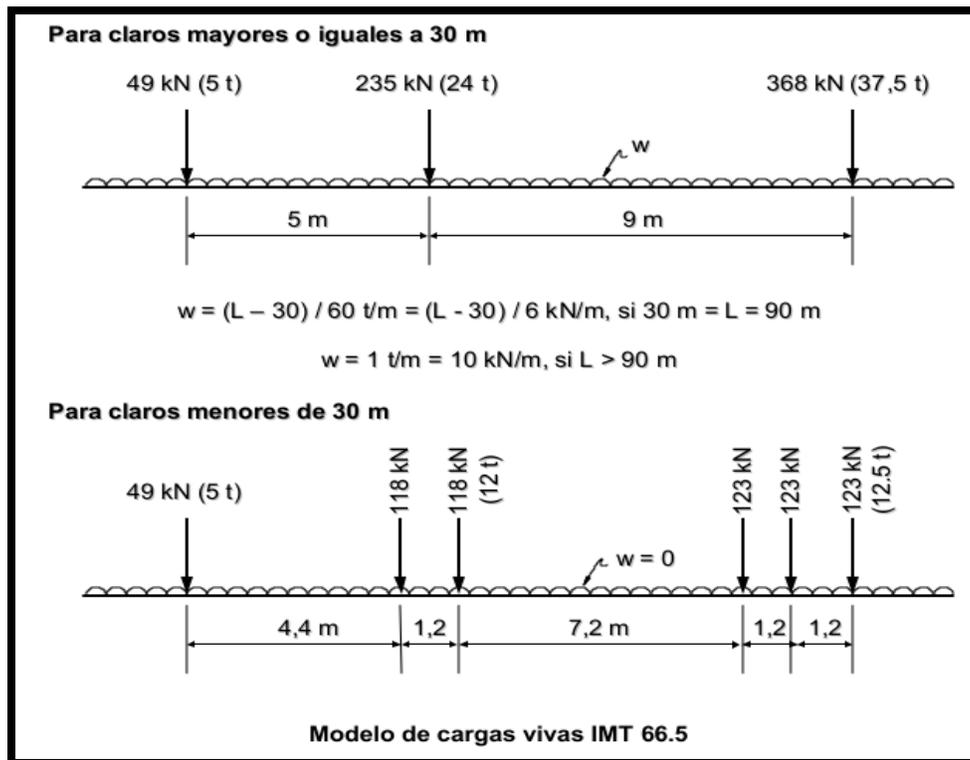


Figura I. 6 [20]

<sup>19</sup> Norma Mexicana SCT de Cargas Vivas 2004, pág. IX

<sup>20</sup> Ídem

Para ambos modelos se comprenden un sistema de cargas concentradas, y uno de carga uniformemente distribuida, donde se toma como punto de partida que todos los modelos que se incluyen en los reglamentos de otros países se consideran los dos sistemas de cargas antes mencionado. Dichos modelos se denominaron IMT 66.5 para carreteras principales e IMT 20.5 para carreteras alimentadoras:

El modelo para carreteras alimentadoras se denomina IMT 20.5 en la norma, y se formuló con igual metodología que el IMT 66.5, pero considerando que los vehículos más grandes que pueden transitar por ellas son los tipo C3, se concibió con dos ejes virtuales de carga.

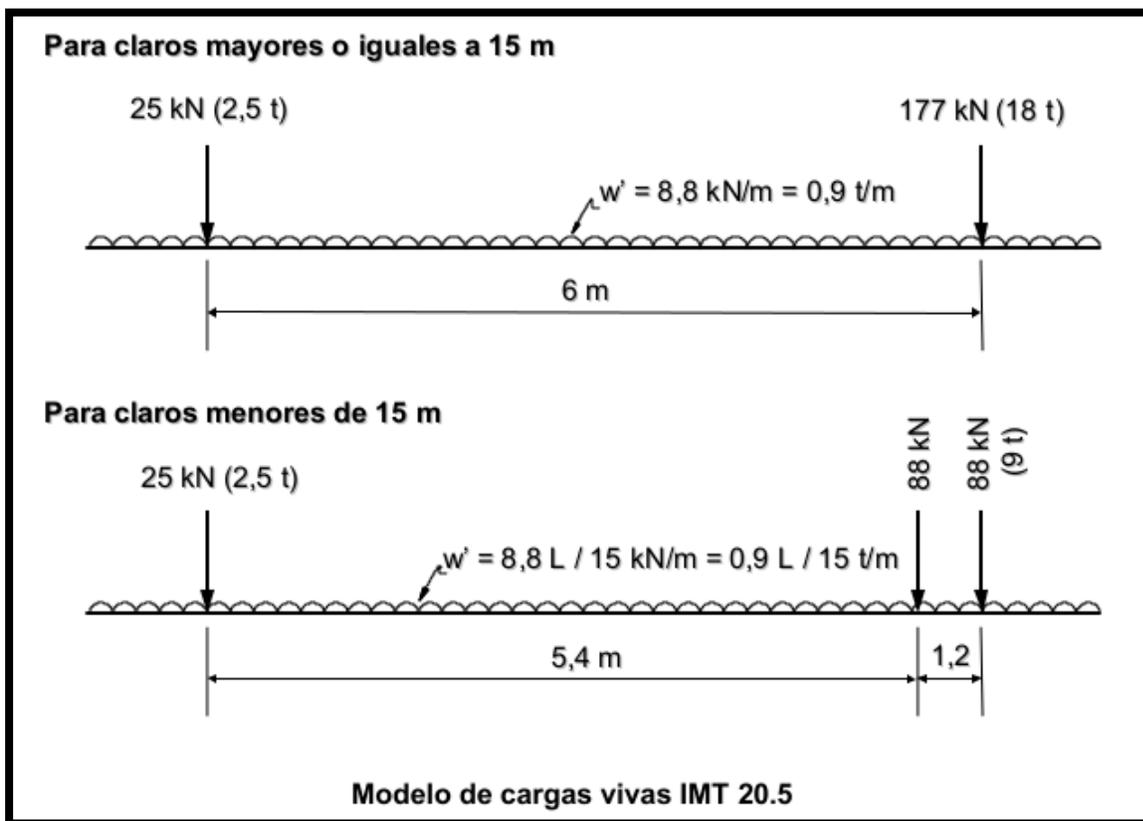


Figura I. 7 [21]

<sup>21</sup> Norma Mexicana SCT de Cargas Vivas 2004, pág. IX

### ❖ Norma Chilena

En Chile no existe una norma nacional para la construcción de puentes. Marcial Baeza Ingeniero estructural y presidente de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica dice que tampoco contamos con una norma propia para el diseño de hormigón armado ni de estructuras en acero. Por eso se recurre a normativas internacionales. Clemente Pérez, subsecretario del Ministerio de Obras Públicas, explica que a los puentes diseñados en Chile se les exige cumplir con las especificaciones de la norma americana AASHTO (Standard Specifications for Highway Bridges) y del Manual de Carreteras recientemente actualizado.

### ❖ Norma Peruana

En Perú durante muchos años se estuvo diseñando según las especificaciones americanas AASHTO, hasta que se realizó un análisis entre los esfuerzos provocados por la carga viva de diseño AASHTO y los que generaban los vehículos que realmente circulaban por las vías peruanas. Los resultados arrojaron que las solicitaciones de los vehículos reales estaban en el orden de un 20~25% más grandes que las de los vehículos estipulados por la AASHTO. Esto los llevó a tomar la decisión transitoria de acogerse al Reglamento Francés, pero con el problema opuesto, las cargas de los vehículos por las que se rige la norma francesa provocaban esfuerzos mayores trayendo esto como consecuencia un sobre diseño. En la actualidad, la norma peruana toma como carga móvil de diseño lo considerado por la AASHTO (LRFD).<sup>22</sup>

#### 1.1.2 Evolución de los modelos de la norma cubana

En Cuba, antes del Triunfo de la Revolución las normas utilizadas eran las de AASTHO y después del Triunfo de la Revolución, hasta la creación del Comité Nacional de

---

<sup>22</sup> Infantes Suárez, Dania "Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales" , Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO,Cuba,2013,pág.15.Tomado de Álvarez Trujillo, Egberto Jesús, "Diseño de puentes Losa", Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba.

Normas para el cálculo estructural aproximadamente en 1964, fue aprobada la norma francesa.<sup>23</sup>

Luego es aprobada por el Comité Estatal de Normalización en diciembre de 1984 y aplicada a partir de mayo de 1985 la norma cubana NC 53:125 Puentes y Alcantarillas Especificaciones de proyecto y Métodos de cálculo, que establecía que para el diseño de los puentes de autopistas, carreteras y vías urbanas se tomarían las cargas características de los vehículos normativo N-30 y el NK-80.<sup>24</sup>

Donde la carga N-30 estaría formada por un convoy ilimitado de vehículos con un peso de 300 kN cada uno y espaciados longitudinalmente a intervalos de 10 m entre ruedas, cuyas características se muestran en la siguiente figura:

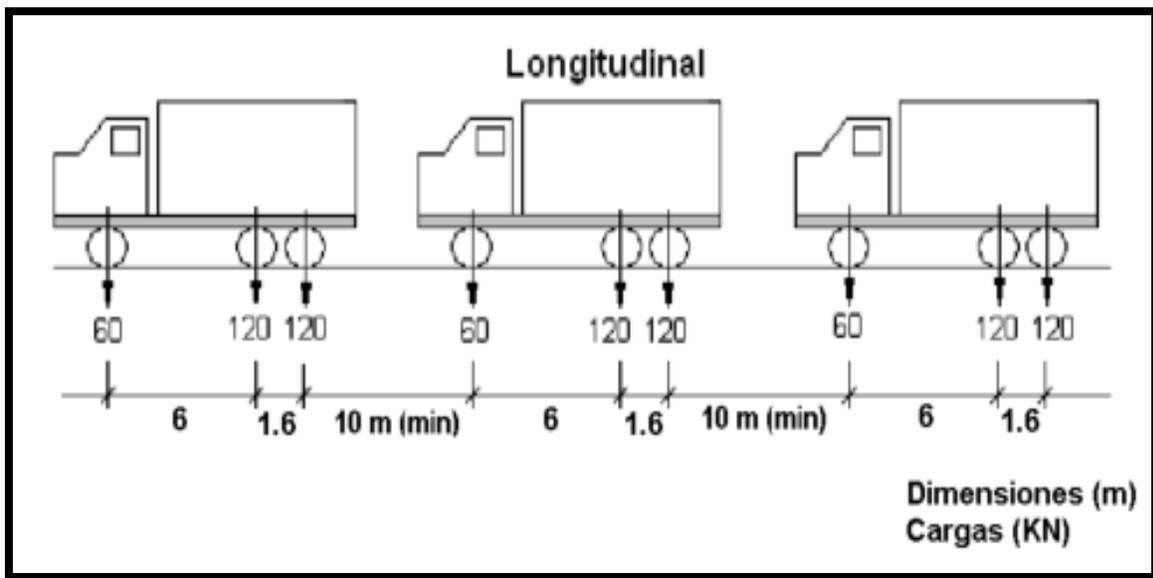
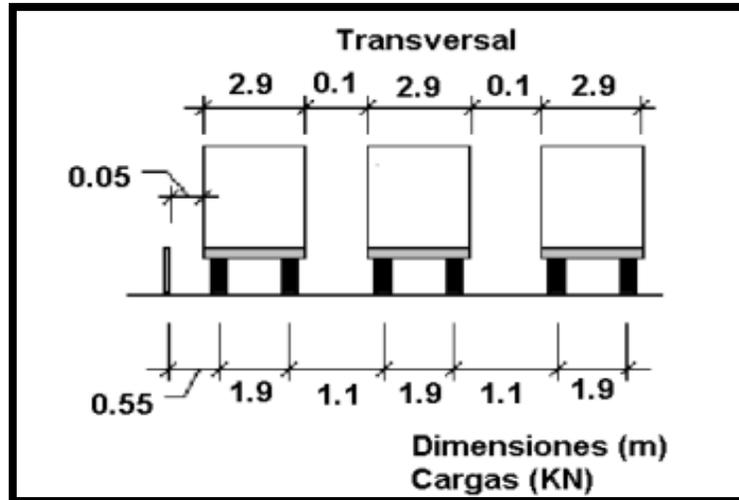


Figura I.8 Carga N-30, Disposición Longitudinal [25]

<sup>23</sup> Infantes Suárez, Dania "Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales", Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO, Cuba, 2013, pág. 18. Tomado de Dr. Taylor Hernández Gustavo. "Manual para la Inspección y Conservación de Puentes de hormigón".

<sup>24</sup> Referenciado de NC 53:125 "Puentes y Alcantarillas". Especificaciones de proyecto y Métodos de cálculo, 1984.

<sup>25</sup> Infantes Suárez, Dania "Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales", Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO, Cuba, 2013. Pág. 19



**Figura I.9 Carga N-30, disposición Transversal [26]**

Posteriormente en el año 2009 se hace una modificación y se crea el actual reglamento en vigor NC: 733/2009 “Carreteras-Puentes y Alcantarillas” Requisitos de diseño y métodos de cálculo, elaborada por el comité Técnico de Normalización NC/CTN 21 de Carreteras que sustituye la NC 53:125/1984 y toma como base para la revisión, la AASHTO Standard Specifications for Bridges, 17th Edition.

Esta norma sustituye la caravana de vehículos N-30, por un vehículo denominado MS-32, o una carga de carril sustitutiva, manteniéndose el vehículo NK-80, establecido para el diseño de todo tipo de puentes. Donde la carga MS-32 se considera como un solo camión tipo en el tramo analizado o una carga de carril o carga distribuida sustitutiva que incluye una carga concentrada para el cálculo de momento y una concentrada para el cálculo de cortante.<sup>27</sup>



**Figura I.10 Cargas distribuidas y concentradas para el MS-32 [28]**

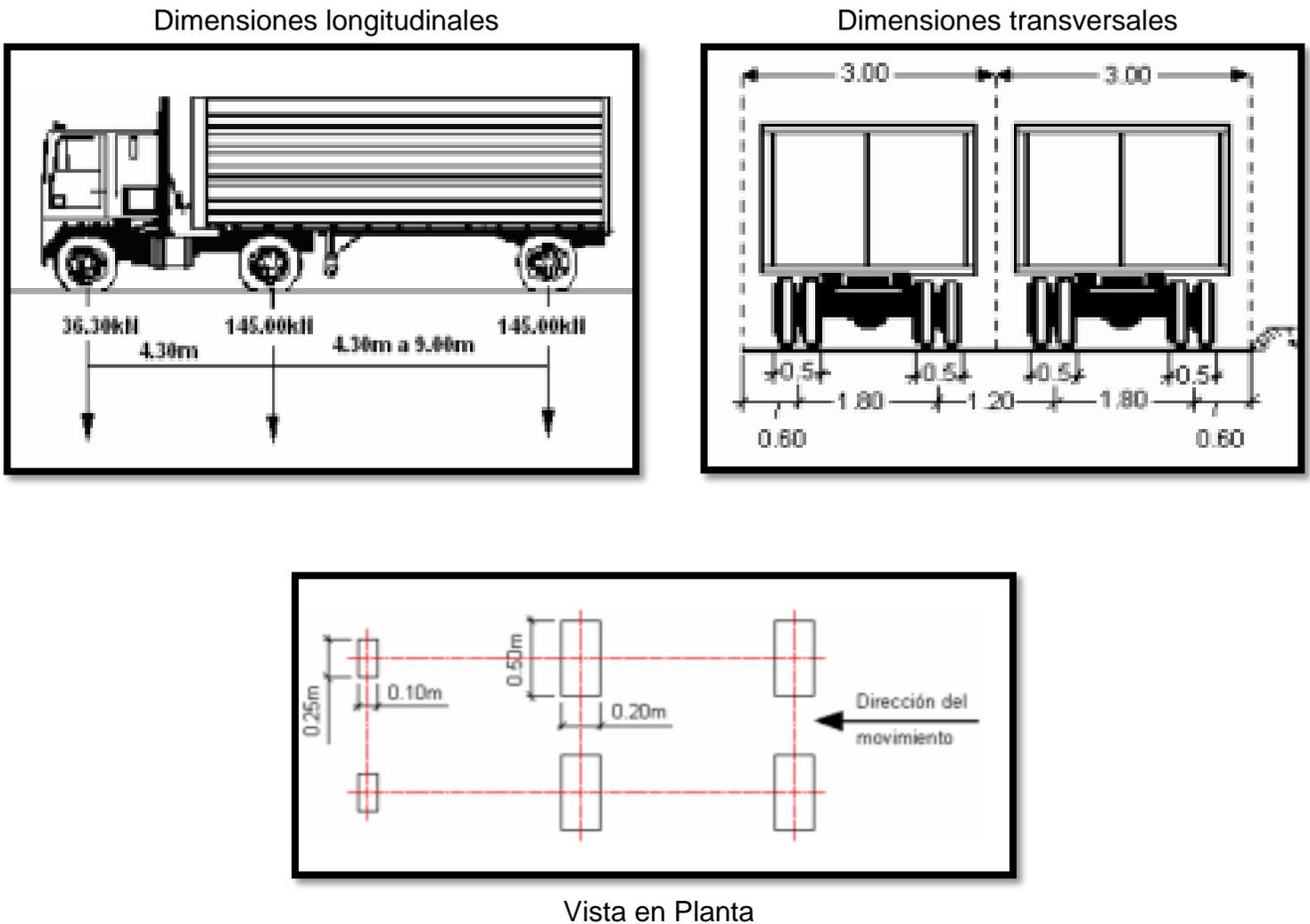
<sup>26</sup> Ídem Pág.19

<sup>27</sup> NC: 733/2009 “Carreteras-Puentes y Alcantarillas” Requisitos de diseño y métodos de cálculo. Pág. 30

<sup>28</sup> Ibídem Pág. 30

A continuación se muestra las características establecidas por la presente norma del modelo MS-32 que se debe utilizar para el diseño de puentes de carreteras:

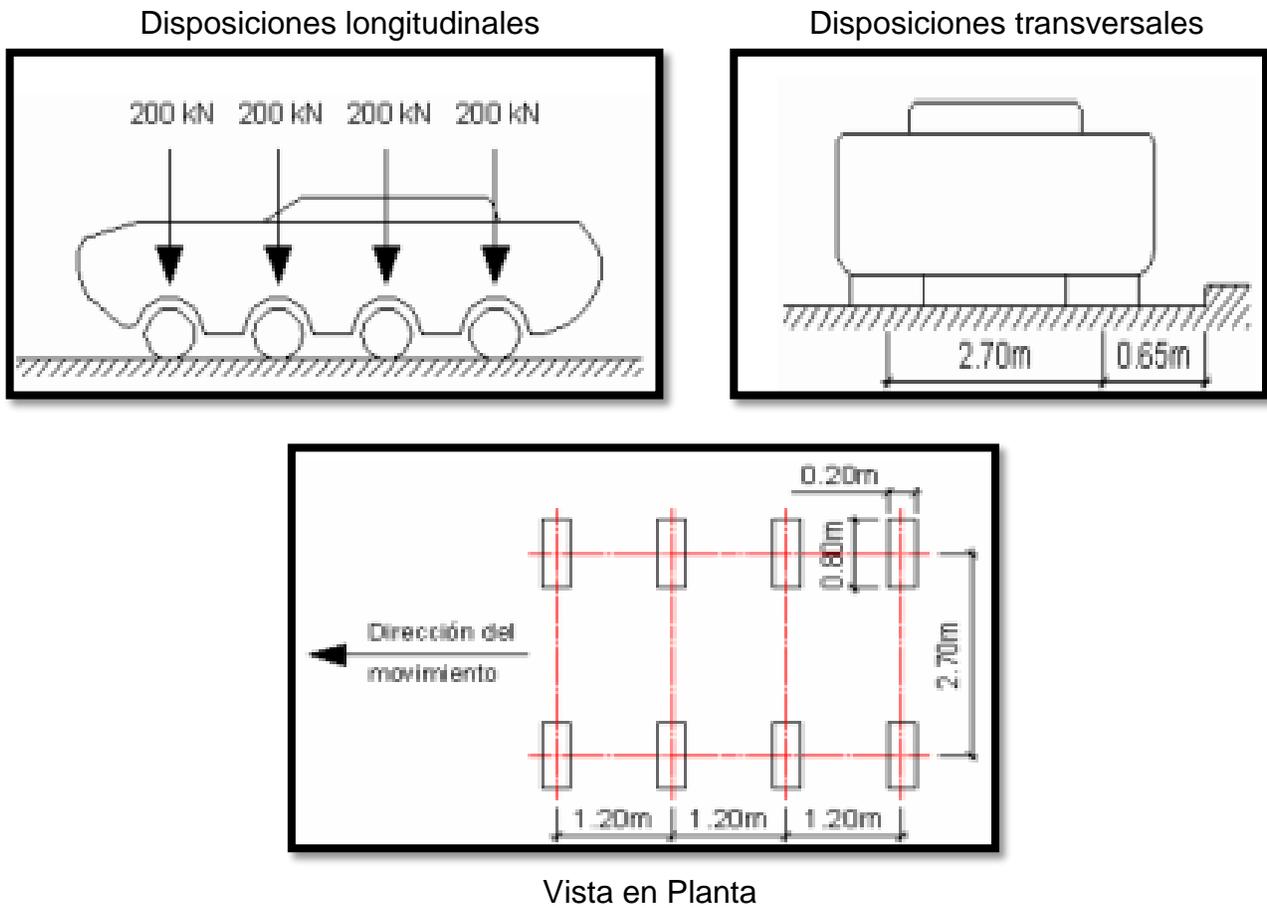
**Figura I.11 Características del Vehículo MS-32. [29]**



La carga característica correspondiente al vehículo NK-80 se deberá considerar constituida por cuatro ejes espaciados a 1.20 m en la dirección del tránsito, sin la actuación simultánea del vehículo MS-32 establecido. El peso total será de 800 kN.<sup>30</sup>

<sup>29</sup> NC: 733/2009 "Carreteras-Puentes y Alcantarillas" Requisitos de diseño y métodos de cálculo. Pág. 26

<sup>30</sup> NC: 733/2009 "Carreteras-Puentes y Alcantarillas" Requisitos de diseño y métodos de cálculo



**Figura I.12 Características del vehículo NK-80. [31]**

### 1.2 Variables aleatorias que inciden en la obtención de los MCVM

La presencia múltiple de vehículos pesados sobre el puente es apreciada como eventos de cargas que admiten variables aleatorias o estocásticas. Estas variables están relacionadas con las características geométricas de cada vehículo según procesos de muestreo.

Dentro de estas variables se destacan el número de camiones y posición relativa, peso bruto, espaciamiento y peso de los ejes, donde cada variable es tomada en consideración en el modelo para el cálculo del efecto máximo sobre la estructura.<sup>32</sup>

<sup>31</sup> Ibídem pág. 27

<sup>32</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de

A continuación se presenta un estudio de estas variables de manera incidente en los modelos de cargas verticales móviles:

### **1.2.1 Número de camiones**

El número de camiones, según afirma Gohson (1995) es una variable aleatoria que aumenta con el curso del tiempo debido a las nuevas legislaciones y al aumento del volumen del tráfico.<sup>33</sup> Se determina el promedio de intensidad diaria del tráfico a través de conteos vehiculares y se tiene en cuentas sus peculiaridades a la hora de incidir en el modelo.

Se tiene que destacar que previéndose un posible crecimiento en el peso y el volumen del tráfico a lo largo de la vida útil de la estructura, hay autores como Moses y Ghosn (1985) que consideran un factor de crecimiento promedio de 1.15 y coeficiente de variación del 10% por el estudio de tendencias de crecimiento.<sup>34</sup>

### **1.2.2 Peso Bruto**

El Peso Bruto Total (PBT), referido a los vehículos monolíticos se define por la suma algebraica de las cargas máximas permitidas en todos sus ejes componentes. Cuando se trata de vehículos compuestos el Peso Bruto Total Combinado (PBTC) parte de la misma definición lo que valiéndose para todos los ejes de combinación.<sup>35</sup>

Esta variable influye directamente en el modelo de la carga móvil, ya que es uno de los principales factores que generan el esfuerzo vertical. De la cual varios autores destacan su importancia a través de criterios como Rossigali (2006):

“el tránsito de vehículos pesados con mayor frecuencia y el exceso de peso en los puentes tiende a acelerar la deterioración de los elementos estructurales, por tanto el

---

Carga em pontes de concreto”, Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 36

<sup>33</sup> Ibidem, pág.30

<sup>34</sup> Ibidem, pág. 41

<sup>35</sup> Rossigali, C. “Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil”. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2006, pág. 14

control del peso de los vehículos a través de las limitaciones en las cargas por eje es el principio fundamental para conservar la integridad de los puentes.”<sup>36</sup>

Los camiones de las configuraciones vehiculares a ser considerado en el desarrollo del modelo de carga serán aquellos que tengan el mayor peso bruto conforme al procedimiento ya adoptado por otros autores en los métodos que describen los modelos de cargas móviles que se presentarán más adelante.

### **1.2.3 Pesos por ejes**

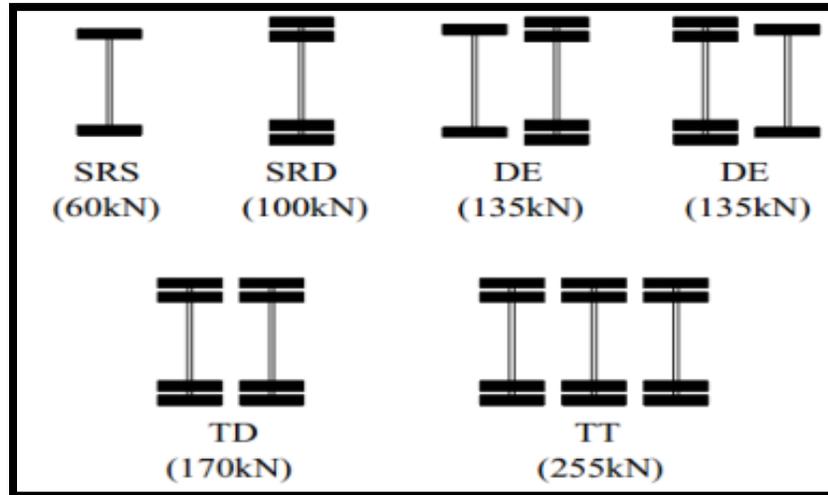
Tras el análisis del peso bruto se estudian los pesos por ejes que en inciden en el modelo, ya que cada configuración presenta un tipo de eje. Los ejes pueden ser simples o tandem según la clasificación que establece la norma cubana de pavimento NC-334 en el espectro de cargas, aunque existen otros circulando por el país como los ejes tridem que no contempla la norma. Además se identifican por sus neumáticos. En general existen ejes simples con ruedas simples (ESRS) y duales (ESRD) y ejes tandem con ruedas duales y triples.

Otros autores como Rossigali (2006) definen los pesos por eje como:

- eje separado de 2 neumáticos (SRS): 60kN;
- eje separado de 4 neumáticos (SRD): 100kN;
- eje tándem duplo (TD): 170kN;
- eje tándem triple (TT): 255kN;
- eje duplo especial (DE): 135kN.

---

<sup>36</sup> Rossigali, C. “Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil”. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2006, pág. 14



**Figura I.13 Peso por ejes [37]**

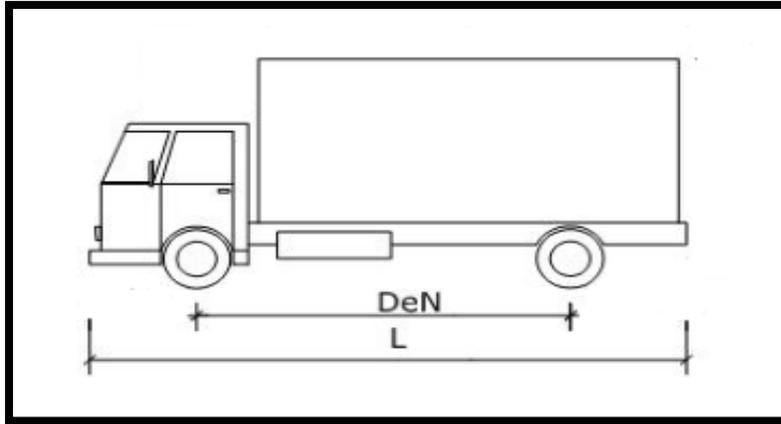
Estos pesos se distribuyen por ejes generalmente expresados en por ciento, dependiendo del tipo de vehículo y variando con su peso total, por ejemplo: estando vacío, la mayor parte del peso baja por el eje delantero debido a la presencia del motor en la parte delantera de la gran mayoría de los vehículos; a medida que aumenta la carga para un mismo vehículo, el eje trasero se sobrecarga más que el delantero estando lleno.<sup>38</sup>

#### **1.2.4 Espaciamiento entre ejes**

La distancia entre ejes varía significativamente para cada vehículo o silueta analizada, ya que depende del tipo de camión del parque vehicular cubano que se estime. Esta variable tiene igual influencia que el peso bruto, pues con ambas se obtienen las solicitaciones más críticas del puente que se tendrán en cuenta para el desarrollo del modelo.

<sup>37</sup> Rossigali, C. "Estudios probabilísticos para modelos de cargas móviles em pontes rodoviárias no Brasil". Dissertação para a obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2006, pág. 15

<sup>38</sup> Infantes Suárez, Dania "Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales" , Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO,Cuba,2013.



**Figura I.14 Vista Longitudinal del Vehículo [39]**

**DeN:** Distancia entre ejes consecutivos.

**L:** Longitud total del vehículo.

**Tabla I.2 [40]**

Silueta	Resultados obtenidos por Almaguer					Longitud
	DeN1	DeN2	DeN3	DeN4	DeN5	
<b>S2</b>	4.47	-	-	-	-	7.83
<b>S3</b>	4.36	1.33	-	-	-	8.84
<b>S4</b>	5.17		-	-	-	9.33
<b>S5</b>	3.44	5.04	-	-	-	10.98
<b>S6</b>	3.66	5.8	1.19	-	-	13.21
<b>S7</b>	3.14	1.35	6.05	1.23	-	14.88
<b>S10</b>	4.98	1.45	7.17	1.19	1.15	18.47
<b>S13</b>	4.64	4.71	3.96			15.47
<b>S14</b>	4.56	1.56	5.03	3.85		17.37

<sup>39</sup> Almaguer González. Joaquín "Contribuciones a la caracterización geométrica y estimación simplificada del estado de carga por siluetas del parque vehicular existente en Holguín". Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba, 2011. pág.26

<sup>40</sup> Ramos, M. "Monitoreo y análisis del comportamiento del tráfico en la carretera Holguín-Moa, orientado hacia el estudio de la fuerza de frenado". Trabajo de Diploma en opción el título de ingeniero civil. UHo, 2012.

Tabla I.3 [41]

	Resultados obtenidos por Rossigali				
Siluetas	DeN1	DeN2	DeN3	DeN4	DeN5
<b>S2</b>	4.47	-	-	-	-
<b>S3</b>	4.36	1.33	-	-	-
<b>S4</b>	5.17	-	-	-	-
<b>S6</b>	3.66	5.8	1.19	-	-

Tabla I.4 [42]

	Resultados obtenidos por Sardiñas				
Siluetas	DeN1	DeN2	DeN3	DeN4	DeN5
<b>S2</b>	4.0	-	-	-	-
<b>S3</b>	4.9	1.3	-	-	-
<b>S4</b>	5.9	-	-	-	-
<b>S6</b>	3.9	7.3	1.3	-	-

Existen otras variables que intervienen en el progreso del modelo como la **velocidad de circulación** a 60 km/h, la **geometría del puente** que se explicará más adelante en la selección del prototipo analizado y la **longitud cargada** que es la distancia entre los ceros de la línea de influencia que se tendrá en cuenta a la hora de obtener las sollicitaciones.

### 1.3 Métodos que describen modelos de carga móvil

Son diversos los modelos para la consideración del efecto de la carga móvil. En general ellos se basan en la teoría de los procesos estocásticos y en la simulación de las configuraciones del tráfico real.<sup>43</sup>A continuación se presentarán algunos de los métodos que describen su procedimiento.

<sup>41</sup> Ramos, M. "Monitoreo y análisis del comportamiento del tráfico en la carretera Holguín-Moa, orientado hacia el estudio de la fuerza de frenado". Trabajo de Diploma en opción el título de ingeniero civil. UHo, 2012.

<sup>42</sup> Ibidem.

<sup>43</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 37

### 1.3.1 Modelo de Nowak e Lind (1979)

Este método usa datos de una inspección del tráfico en Ontario, 1975. Para la previsión del esfuerzo máximo en los puentes en 50 años de vida útil, los momentos flectores a partir de los datos del tráfico real son extrapolados, pues el período de medición es inferior al de la vida útil considerada. Se asume que la cola superior de la distribución sea exponencial:  $F_{L50}(x) = 1 - e^{-x}$

En la escala exponencial, esta extrapolación corresponde a una línea recta. Ajustada a la cola superior de la distribución de los momentos flectores (para varios espacios, simplemente apoyado o continuo), determinada a partir de los 6 los camiones más pesados en la muestra.(NOWAK e ZHOU, 1985)

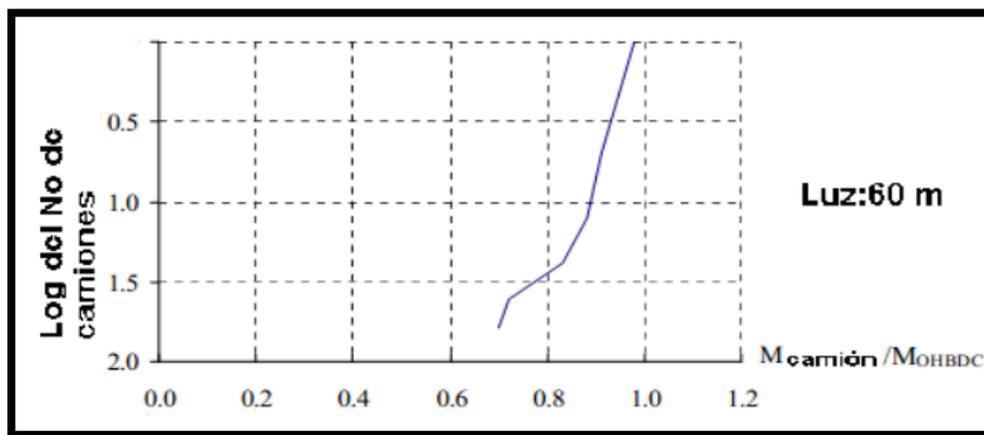


Figura I.15 Cola superior de distribución de los momentos flectores [44]

La escala horizontal corresponde a la relación entre el momento flector del camión de la muestra y el momento flector obtenido de acuerdo con la norma canadiense (OHBD) de la época. La escala vertical es el logaritmo del número de camiones que exceden o igualan la relación de momentos flectores. Por ejemplo la relación mayor corresponde al cero en la escala vertical, pues sólo 1 camión en la muestra causa momento igual al superior y  $\ln(1) = 0$ . La segunda mayor relación corresponde al  $\ln(2) = 0.693$ , porque 2 camiones de la muestra igualan o superan el segundo momento flector mayor y así consecutivamente.

<sup>44</sup> Ídem

En general, el procedimiento consiste en extrapolar el número de camiones, interceptar la curva con dicha extrapolación y obtener en el eje x el valor de momento. El análisis también consideró que 1 o los 2 camiones más pesados de la muestra pueden ser despreciados.

(NOWAK e ZHOU, 1985)

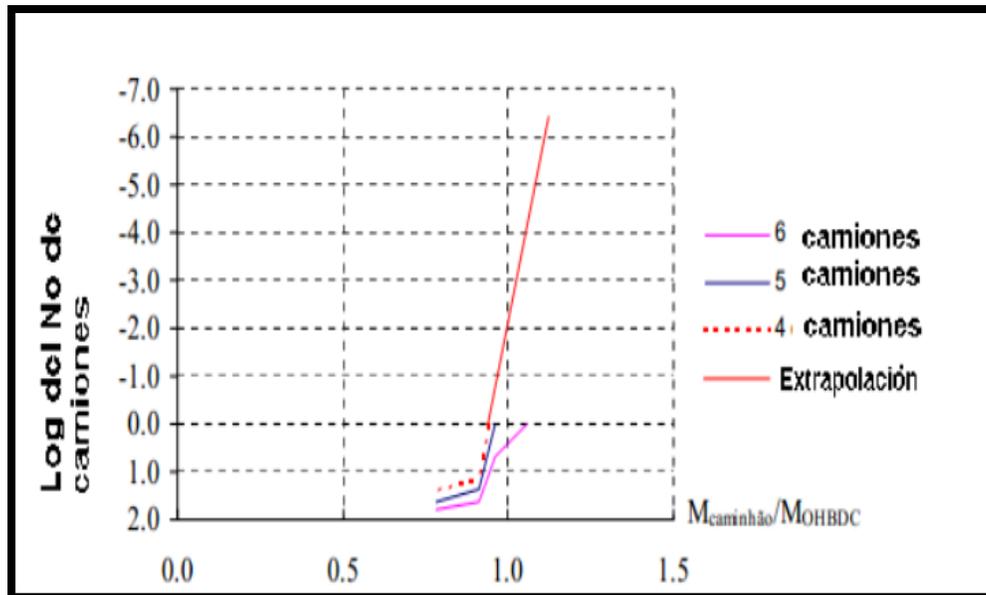


Figura I.16 Extrapolación para una vida útil de 50 años [45]

### 1.3.2 Modelo de Moses e Ghosn (1985) <sup>46</sup>

Ghosn y Moses resalta la teoría de los procesos estocásticos como una herramienta útil para el análisis de estructuras sometidas a cargas aleatorias. La técnica utilizada se basa en el modelo de renovación de Markov, capaz de ser adaptado para considerar tanto el modelo de llegada de camiones al puente (medido o idealizado) como las características de los camiones (los pesos y espaciamento de los ejes). La distribución

<sup>45</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 38

<sup>46</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 39-40

de probabilidad del efecto máximo de la carga móvil es determinada para el tiempo de vida útil de la estructura.

Ellos consideran sólo dos tipos de camiones en los eventos de cargas. Dependiendo del tipo, cada camión es asociado a un peso y a la probabilidad obtenida en los histogramas de peso bruto. Dado las posiciones de los dos camiones y el peso de todos los camiones en el evento, el efecto máximo es calculado a través de la línea de influencia del puente y asociado a una probabilidad (la probabilidad de la hilera ocupada por el camión principal, la probabilidad condicional de las hileras ocupadas para los camiones siguientes, tiempos de probabilidad de la posición longitudinal del vehículo en el puente, la probabilidad de los pesos brutos). Este procedimiento asume la independencia entre las posiciones relativas de los dos camiones y los pesos brutos de los diferentes camiones en el evento.

El cálculo del esfuerzo en la sección más crítica, se ejecuta para todas las combinaciones de camiones en el puente y para todos los pesos de los camiones. Siguiendo esa metodología, se obtiene un histograma que proporciona el efecto del momento flector asociado a su probabilidad. La distribución de probabilidad del máximo efecto para la vida útil de la estructura, depende del número de eventos de cargas en un día y de la vida útil de la estructura.

### **1.3.3 Modelo de Nowak (1999) <sup>47</sup>**

En la calibración de coeficientes parciales para AASHTO (1994), Nowak (1999) usa los resultados de una inspección del tráfico de camiones logrado en 1975 por el Ministerio del Transporte de Ontario. En ese estudio, ellos observaron aproximadamente 10.000 camiones (sólo camiones que parecían poseer elevado peso bruto de la totalidad, que eran medidos e incluido en la base de datos), representando 2 semanas de tráfico. Vale la pena destacar que por ese tiempo la población de camiones de Ontario era representativa de los camiones que circulaban en los Estados Unidos.

---

<sup>47</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 43.

De acuerdo con Nowak (1999), son varias las incertidumbres en el análisis debido a las limitaciones de los datos obtenidos del tráfico, entre ellas: la muestra de camiones estudiada es pequeña en comparación con el número real de camiones durante la vida útil del puente (75 años), algunos camiones sobrecargados intencionalmente evitan las estaciones de pesaje, y las futuras inclinaciones en distribuciones de pesos y ejes son desconocidas. En el trabajo, se asume que la población de camiones irá a permanecer inalterada.

Para cada camión de la muestra eran calculados los momentos flectores y fuerzas cortantes. Considerando luces simplemente apoyadas y dos luces idénticas continuas. Las funciones de distribución acumuladas eran ploteadas en un papel de probabilidad normal. Los máximos momentos flectores y las fuerzas cortantes para varios períodos (superior a 2 semanas) eran determinados por extrapolación. Por ejemplo, en 75 años el número de camiones sería aproximadamente  $20 \text{ N} = \text{millón}$ , cuyo nivel de probabilidad es  $1/\text{N}$ , o sea  $5 \times 10^{-8}$ .

Ese valor corresponde a  $z = 5.33$  ( $Z = -\phi(1/\text{N})$ ) en la escala vertical. En la figura se muestra la extrapolación para el momento flector negativo en una luz de 9m.

A partir de los gráficos, se hacen tablas que suministran la relación entre el esfuerzo causado por el camión observado y el esfuerzo logrado con la carga HS-20 para varias luces y períodos.

Estas tablas muestran el promedio de momentos flectores máximos para luces con un solo camión aislado. Pueden obtenerse además gráficos similares para la fuerza cortante y momento flectores negativos en las luces continuas. A partir de esos datos el coeficiente de variación también es determinado.

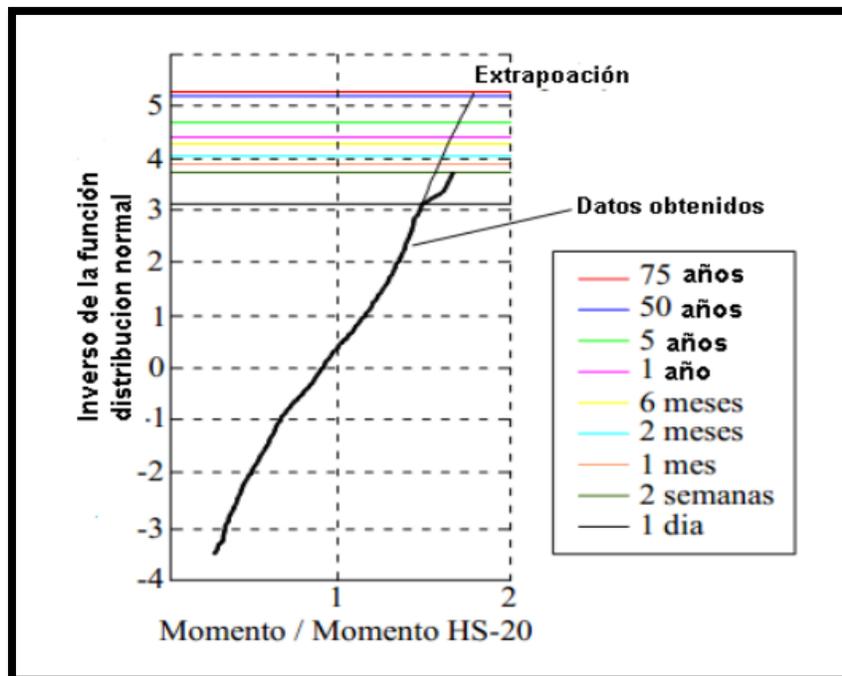


Figura I.17 Extrapolación para el momento flector negativo en una luz 9m [48]

### Métodos para momentos flectores y fuerzas cortantes en puentes de dos carriles de tráfico.

#### 1.3.4 Modelo de Crespo-Minguillón y Casas (1997) <sup>49</sup>

De acuerdo con Crespo-Minguillón y Casas (1997), los modelos de tráfico existente no son completamente generales pues son orientados para la previsión de los efectos máximos en un período de tiempo definido o para la definición de los efectos de fatiga. Las suposiciones y las simplificaciones adoptadas (debido a las herramientas computacionales o a los datos del tráfico necesario) en modelos no se tornan suficientemente confiable. Por otro lado, los modelos de carga disponibles son dirigidos

<sup>48</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 44-45.

<sup>49</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 51.

para la definición de las acciones en nuevos puentes o para la evaluación de puentes existentes.

Así, Crespo-Minguillón y Casas (1997) concluyen que un modelo completo, válido para todo efecto de carga (carga máxima en un período de referencia, fatiga, carga frecuente para la verificación de los estados límites de utilización), para cualquier situación (proyecto de un nuevo puente o para la evaluación de una estructura existente), considerando las correlaciones más importantes presentes en el tráfico real, no está disponible actualmente.

El efecto del tráfico sobre el puente es simulado cada 0,20 segundos, durante una semana. El cálculo de los momentos flectores es realizado a través de la superficie de influencia de la estructura. Los autores no proporcionan ningún tipo de comparación con otros métodos. Los detalles sobre las hipótesis asumidas y los procedimientos matemáticos y estadísticos, incluso la extrapolación de los resultados para la vida útil de la estructura, no se especifican en este estudio.

### **1.3.5 Modelo de Hwang y Koh (2000) <sup>50</sup>**

Hwang y Koh (2000) utilizan como base para el desarrollo de su modelo datos del peso en movimiento (WIM) en 3 localidades, cerca de 100 mil en el total. La información sobre la presencia múltiple de vehículos en los puentes se obtienen a través de las grabaciones en videos que fueron consideradas en el análisis de los tipos de camiones más pesados y los otros eran despreciado. De esa manera fueron considerados 7 tipos de camiones.

Para cada localidad y tipo de camión, el 10% de los mayores pesos brutos eran ploteados en el papel de probabilidad normal. Utilizando una regresión lineal y considerando la relación entre el número de camiones observados y previsto para la

---

<sup>50</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 53

vida útil de la estructura (75 años), los máximos pesos brutos fueron extrapolados. Este procedimiento es similar al que plantea por Nowak (1999) en el 1.3.3 de este capítulo.

Los mayores pesos brutos provenientes de la extrapolación para cada tipo de camión fueron usados para el cálculo de momentos flectores máximos en las estructuras simplemente apoyadas. Los resultados demuestran que un solo camión produce el esfuerzo máximo para los espacios pequeños y 2 camiones con la correlación total de peso gobiernan en el caso de las mayores luces.

Los autores sugieren una combinación de camión y carga distribuida para la obtención de los esfuerzos en los proyectos o normas. Además resaltan que la carga distribuida debe tener la magnitud disminuida con el aumento de las luces, de modo que los momentos flectores calculados no sobrestimen el efecto del tráfico real. Ellos recomiendan que los datos del tráfico sean obtenidos en diferentes localidades, debido a su variabilidad.

#### **1.4 Descripción del tráfico**

Existen diferencias entre los vehículos que circulan por las carreteras fundamentalmente por la diversidad de cargas que transportan. Estas cargas pueden clasificarse de acuerdo un sin número de criterios debido a la gran variedad de tamaño, formas y diferentes pesos específicos que presentan para la trasportación de personas, líquidos, materiales de la construcción, alimentos entre otros, por así caracterizar el tráfico del parque vehicular cubano.

Para su análisis, se usan tipos o clases de vehículos referenciadas por nomenclaturas especiales que identifican el universo de las configuraciones vehiculares. En Cuba se identifican en la norma cubana (433/2004), como siluetas que están agrupadas según el tipo de vehículos: camiones, vehículos articulados, camiones con remolques y ómnibus.

##### **1.4.1 Características del parque vehicular cubano**

A nivel nacional, debido a la carencia de tecnología de punta, se ha utilizado para el conteo vehicular, el llamado Método Indirecto para la medición de las cargas del

tráfico<sup>51</sup>, del cual se parte para clasificar el transporte automotor. Aunque este método está orientado fundamentalmente para el diseño de pavimentos flexibles aporta datos referentes a los pesos promedios y las características medias por cada tipo de silueta de algunos camiones representativos que circulan por el país, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla I. 5 Banco de datos. Pesos promedios por siluetas <sup>52</sup>**

Nº	TIPO DE VEHÍCULO	Nº DE EJES	SILUETAS	Peso media (ton)	Carga máxima (ton)
1	CAMIONES (Vehículos rígidos)	2 ejes simples 4 ruedas		1	1,53
2		2 ejes simples 6 ruedas		5,3	6,6
3		1 eje simple 1 eje tandem		8,8	11,2
4	VEHÍCULOS ARTICULADOS	3 ejes simples		11,6	21,9
5		2 ejes simples 1 tandem		14,5	26,4
6		1 eje simple 2 tandem		14,5	31,9
7	CAMIONES CON REMOLQUES	4 ejes simples		9,7	14,9
8		al menos 1 tandem		12	26,2
9	OMNIBUS	OMNIBUS RÍGIDO	2 ejes simples 6 ruedas	5	10
10		OMNIBUS ARTICULADO	3 ejes simples	8	12
11			al menos 1 tandem	9	19

Sin embargo con el paso del tiempo y desarrollo económico han aumentado las configuraciones del tránsito y con ellas las variables aleatorias que corresponden a su caracterización geométrica en general, trayendo consigo que no existe una base de datos actualizada del tráfico más representativo del país. No obstante existen estudios encaminados al comportamiento y actualización del tráfico desde el año 2009 hasta 2013 que reflejan el estado variable del parque vehicular cubano con respecto al banco

<sup>51</sup> Villalón, Leonardo. "Estudio tipológico del parque vehicular existente en Holguín. Monitoreo y análisis del comportamiento del tránsito en la carretera Holguín-Moa". Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba, 2011. Pág.resumen.

<sup>52</sup> NC 334:2004,"Carreteras- Pavimentos Flexibles de Cálculo". 1ra Edición, Marzo 2004, Anexo A pag.18.

de datos que se muestra anteriormente por el método indirecto de la norma cubana 334/2004 para el cálculo de pavimentos flexibles.

De tal situación surge otra metodología llamada Método Indirecto Modificado como alternativa del Método Indirecto, orientado en investigaciones referidas a la futura estimación de la fuerza de frenado. Estas investigaciones Sardiñas (2009), Villalón (2011) y Almaguer (2012) aunque no están referidas a la obtención de un modelo de cargas verticales móviles, aportan datos referentes al peso bruto, capacidad máxima, distancia entre ejes y otras características de vehículos que circulan por las vías cubanas, que arrojan diferencias en lo establecido en la norma cubana 433:2004 de Pavimentos Flexibles.

La siguiente tabla recoge los datos de los estudios mencionados. Se adiciona otras siluetas no contempladas en la norma cubana, para incluir tipos de vehículos con ejes tridem que se encuentran circulando por el país actualmente.

**Tabla I.6 Investigaciones realizadas.**

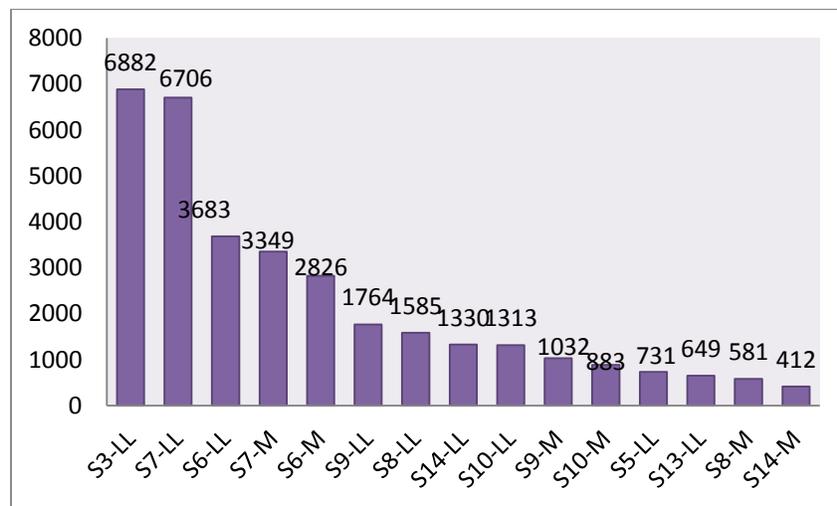
No	Ejes	Silueta	Alaín Sardiñas (2009)			Joaquín Almaguer (2011)			Leonardo Villalón (2011)		
			Tara (t)	Carga máx(t)	Peso Bruto (t)	Tara (t)	Carga máx(t)	Peso Bruto (t)	Tara Pro (t)	Carga máx(t)	Peso Bruto (t)
S0	Lig		<b>No se analizan por su bajo peso ya que no tienen significación estructural</b>								
S1	2S-4R		1.0	1.5	2.5				2.4	1.5	<b>3.9</b>
S2	2S-6R		5.3	6.6	11.9	7.89	6.81	14.7	6.64	6.6	<b>13.24</b>
S3	1S-1T		8.8	11.2	20	11	19.17	30.17	10.7 9	11.2	<b>21.99</b>
S4	2S-6R		5.0	10.0	15	11.25	3.26	14.51	7.52	10.0	<b>17.5</b>
S5	3S		11.6	21.9	33.5	11.3	18	29.3	-		
S6	2S-1T		14.5	26.4	40.9	14.23	25.73	39.96	11.6	26.4	<b>38</b>
S7	1S-2T		14.5	31.9	46.4	15.75	27.57	43.32	14.9	31.9	<b>46.8</b>
S8	2T		15.0	18.5	33.5						
S9	2S-Tr		17.5	23.0	40.5						

S10	1S-1T-1Tr		17.5	30.0	47.5	16.97	43.33	63.3			
S13	4S		5.3	6.6	11.9	12.68	18	30.68			
			4.4	8.3	12.7						
S14	Al menos 1T		8.8	11.2	20	18	30	48	11.14	11.2	<b>22.34</b>
			5	15	<b>20</b>				<b>5.04</b>	15	<b>20.04</b>

De tales investigaciones según conteos vehiculares (anexo1) se calculan los histogramas de frecuencia absoluta y relativa del total de vehículos que circulan por el enlace vial Holguín-Moa teniendo en cuenta el tipo de silueta, su estado de carga y cantidad de veces que circulan cada una de ellas.

De una población de 170210 siluetas registradas se toman como muestra 33726 vehículos ya que se toman las siluetas que tiene un peso igual o mayor al 75 % del peso del modelo MS-32 como efecto más desfavorable.

**Registro Holguín –Moa (Total de vehículos 33726)**

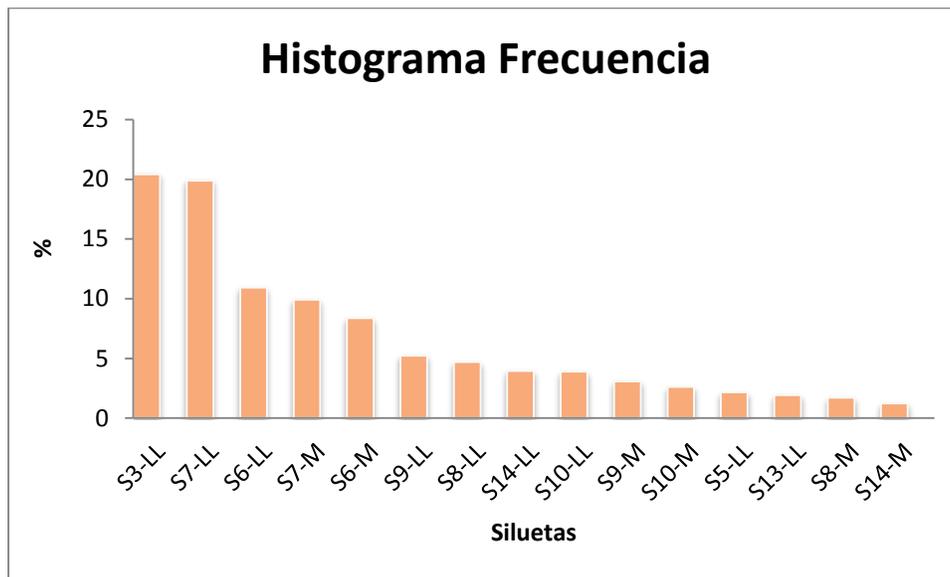


**Figura I.18 Histograma de Frecuencia absoluta [53]**

<sup>53</sup> Villalón, Leonardo. "Estudio tipológico del parque vehicular existente en Holguín. Monitoreo y análisis del comportamiento del tránsito en la carretera Holguín-Moa". Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba, 2011. Pág.50

Con este histograma se muestra que 33726 vehículos pesados, tienen un peso igual o superior al vehículo de diseño MS-32 del reglamento cubano de puentes de carreteras correspondientes a las siluetas comprendidas entre la S3-S14 que serán consideradas en la obtención del modelo de cargas verticales móviles.

Dividiendo la cantidad de silueta según su estado de carga entre el total de vehículos seleccionados como muestra, se obtuvo la frecuencia relativa de cada una de ellas que se muestra en el siguiente histograma de frecuencia relativa.



**Figura I.19 Histograma de frecuencias relativas (S3-S14) [54]**

Las configuraciones que se seleccionaron a partir del tráfico real del enlace vial Holguín-Moa son las que se tomaran en el siguiente capítulo para el desarrollo del modelo, pero caracterizadas geoméricamente.

### **1.5 Selección del Puente que se empleará como prototipo**

Como objeto de estudio para esta investigación se analizaron los puentes del enlace vial Holguín-Moa, ya que se contaba con los datos del tráfico del parque vehicular que transita por esta carretera, según estudios realizados por el Ingeniero Villalón (2011) en su tesis, referida al monitoreo y análisis del comportamiento del tráfico en esta vía. El

<sup>54</sup> Ibidem, pág.52

objetivo era seleccionar el prototipo más adecuado en cuanto a aspectos que simularan un modelo lo más cercano posible a la realidad.

Dentro de estos aspectos se admite que los elementos estructurales que se modelan no presentan patologías de la ejecución o deterioro que puedan comprometer su capacidad estructural, además se cuenta con sus dimensiones y tipología estructural, dentro de sus características principales.

A partir del análisis de esta documentación, se escoge de 19 puentes que existen en el vial Holguín-Moa como prototipo el puente que une Sagua-Moa en el kilómetro 139, de tipología soviética-cubano con 338,7 m de longitud total, por ser el más largo del enlace vial y el segundo en luces más grande entre una de las principales características que lo definen.

#### **1.5.1 Datos Característicos del puente de Sagua-Moa**

Este puente fue proyectado en la Habana por Carmen Panizo , de tipología soviético-cubano, versión isostática. Tiene 13 luces, once de 27 m y dos de 16.85 m para una longitud total de 338.7 m, gálibo de 12.50 m.

**Tipo de superestructura:** tablero de vigas prefabricadas y losa “in situ”

**Angulo de esviaje:** normal

#### **Superestructura**

La superestructura es una losa de hormigón reforzado, apoyada en 10 vigas de 1.10m de peralte y 0.40 de ancho. Las vigas se apoyan en los cabezales de las pilas y de los estribos cerrados rectos. La obra tiene una sección típica especial, es decir, tiene aceras de 1 m cada una y 0.05 m sobre el pavimento, también tiene dos contenes simples que separan los paseos de las aceras, estos paseos tienen 1.80m de ancho y están formados por la propia losa del puente, los pretilos son de angulares y platinas con 1 m de alto y ancho del pavimento 7.40 m.

#### **Subestructura**

Las vigas transmiten la carga a la subestructura mediante aparatos de apoyo de 0.36 x 0.18 m y un espesor de 0.02-0.04 m. Estos aparatos son juntas de neopreno. Las pilas

y los estribos están compuestos por un pórtico genérico que consta de columnas y cabezales en este caso específicamente, tres columnas cuadradas de 0.60 x 0.6 con la excepción de las segundas pilas a partir de los estribos que tienen dos columnas circulares de 1.30 m de diámetro cada una. El cabezal prefabricado conforma una viga continua sobre las columnas y se conforma a base de cabezales interiores de 4.1m de longitud y extremos, cuya longitud se enmarca entre 4.90-6.40m. Presenta cimentación indirecta con pilotes de 32 m.

### **Aproches**

Los aproches se componen de losas de aproche interiores y exteriores (derecha e izquierda), las que se apoyan en un extremo del cabezal del estribo y en los tacones de apoyo. Las piezas de brida además de contener el terraplén de aproche detrás de las vigas- ayudan a realizar una transición más gradual de la explanación a la obra de fábrica. Se incluyen en esta zona los elementos de defensa (barandas y pretilas), así como las losas de recubrimiento de taludes.

La estructura está en buen estado aunque presenta corrosión y aceros expuestos en las vigas. El vado se construyó en terreno arcilloso con taludes 5:1.

### **Conclusiones Parciales**

En este capítulo se destacaron aspectos principales que inciden en el desarrollo de los modelos de cargas verticales móviles, para profundizar y comprender su posterior procedimiento. En resumen se analizaron las diferentes normativas, resaltando ventajas y diferencias entre ellas. Dentro de las que se abordaron, existían las que contaban con su propio modelo, basado en las características del flujo vehicular de su país como es el caso de España (Eurocódigo), México (SCT), Estados Unidos (AASHTO) y las que dependían de las características de los modelos de las antes mencionada (AASHTO), como la norma Chilena, Peruana y Cubana. Además se estudiaron las variables aleatorias que inciden en los modelos, así como los diferentes métodos que lo describen. Aunque el aspecto de relevancia fue el análisis del tráfico vehicular cubano, del cual se determinaron las siluetas más pesadas y que tenían un efecto igual o superior al vehículo de diseño MS-32. Estas correspondían a los tipos de vehículos de la S5-S10, según investigaciones realizadas por Villalón (2011) y Almaguer (2011) y

definirán el proceso de obtención del modelo sobre el prototipo seleccionado con las características reales del parque vehicular cubano.

## **CAPÍTULO II. OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGAS MÓVILES**

En el presente capítulo se describe el procedimiento para la obtención de un modelo de cargas verticales móviles sobre el prototipo de puente seleccionado en el capítulo anterior, con la ayuda del software SCI Bridge para su modelación. Además se obtiene una comparación de los resultados entre el modelo obtenido por el momento extrapolado y el normado para la aceptación del modelo creado.

### **2.1. Procedimiento para la obtención del Modelo**

A partir del análisis de los aspectos planteados en el capítulo anterior, tales como las variables que inciden directamente en un modelo, la descripción del tráfico mediante conteos vehiculares realizados y la selección del puente que se empleará como prototipo según sistemas estructurales representativos; se lleva a cabo un procedimiento similar al de otros investigadores, aunque un poco conservador en cuanto a la extrapolación de los pesos y al mismo tiempo renovador en cuanto a los efectos producidos por el tráfico real de vehículos pesados que influye directamente en la vida útil de la estructura.

Este procedimiento varía sus pasos en cuanto a sintetizar una metodología, ya que no hay bibliografía que defina un procedimiento exacto que globalice el proceso de obtención de un modelo de cargas verticales móviles, pues varía en la herramienta computacional que se utilice y los criterios personalizados que se asumen en cada investigación.

A continuación se plantea un procedimiento que será descrito en los subepígrafes de este epígrafe, con el objetivo de que quede plasmado el proceso de obtención del modelo que se cree al concluir el capítulo.

#### **Procedimiento:**

1. Construcción del prototipo numérico del puente seleccionado.
2. Selección y caracterización de los vehículos del tráfico real que representarán la carga móvil sobre el prototipo del puente seleccionado.

3. Simulación de las situaciones reales del tráfico a través de secuencias vehiculares.
4. Obtención de las solicitaciones generadas.
5. Comparación de los efectos obtenidos por las secuencias vehiculares con el efecto obtenido por el vehículo normado
6. Análisis estadístico de los efectos obtenidos.
7. Extrapolación de los momentos por el inverso del período de retorno.
8. Obtención del modelo de Carga.

Cada uno de estos pasos se describirá a continuación, detallando los aspectos fundamentales que se tuvieron en cuenta en su realización.

#### **2.1.1. Construcción del prototipo numérico del puente seleccionado**

Para la construcción y modelación del prototipo numérico del puente seleccionado se empleó el Software profesional CSi Bridge. El cuál es un paquete comercial basado en el método de elementos finitos que permite el modelado de un gran rango de sistemas estructurales, tanto para el análisis de estructuras planas como tridimensionales.

El mismo se organiza en forma de módulos que permiten el uso fácil y comprensible del programa que varían en cuanto a la geometría de la estructura, los materiales empleados, las condiciones de apoyo así como las cargas impuestas sobre las características del prototipo de puente representado. El programa busca la combinación más crítica de carga para obtener el esfuerzo en cualquier punto de la estructura mediante una superficie de influencia.

Las dimensiones y los datos característicos del puente de Sagua que se modeló como prototipo en este programa se presentan a continuación en su sección transversal:



## 2.1.2. Selección y caracterización de los vehículos del tráfico real que representarán la carga móvil sobre el prototipo del puente

Para la selección de estos vehículos se mantuvo el criterio asumido en la descripción del tráfico 1.4 que recogen los histogramas de frecuencias expuestos anteriormente (pesos mayores que el 75 % del peso del MS-32). Seguidamente se caracterizan geoméricamente cada una de las configuraciones seleccionadas a partir del tráfico real del enlace vial Holguín-Moa mostrando su máximo peso, distancia entre ejes y % distribución de los pesos por ejes recogidos en el (anexo 3) como variables fundamentales para generar las secuencias y obtener los efectos.

Estos datos se le introducen al Software profesional CSi Bridge con el objetivo de que contenga las características geométricas de las siluetas seleccionadas que representarán el tráfico real para el desarrollo del modelo. Esta acción se realiza mediante el comando **Vehicles /Define show Vehicles** de la ventana **Bridge Wizard**.

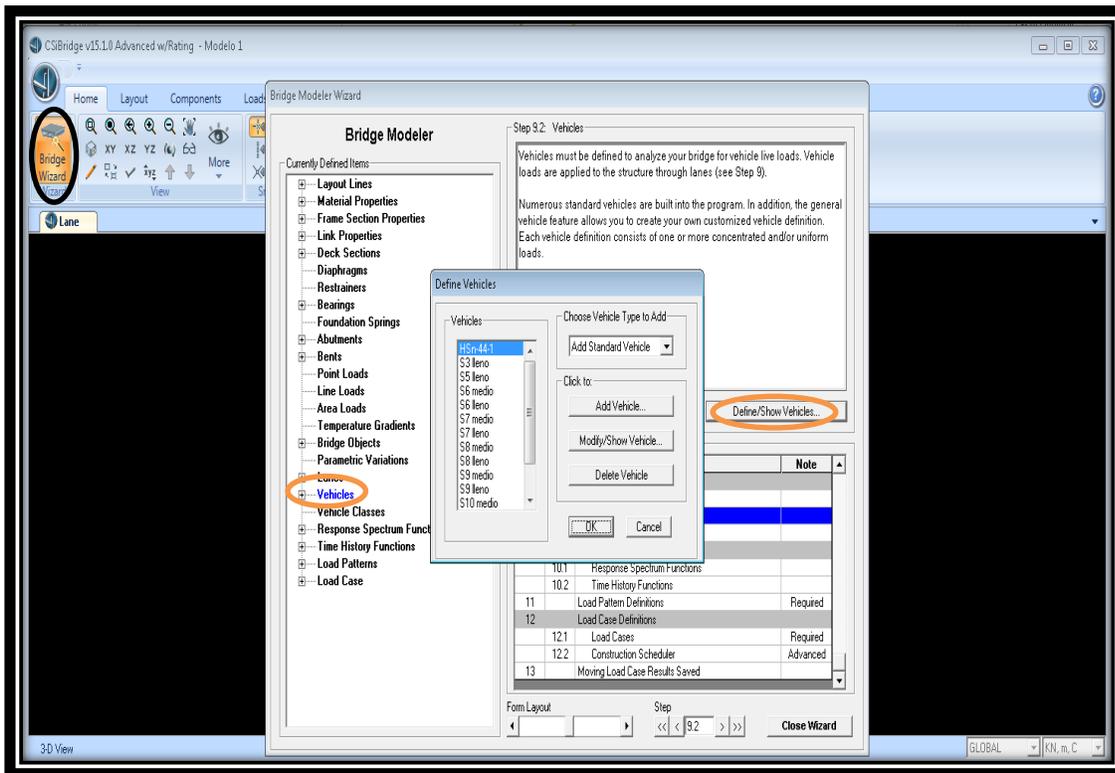
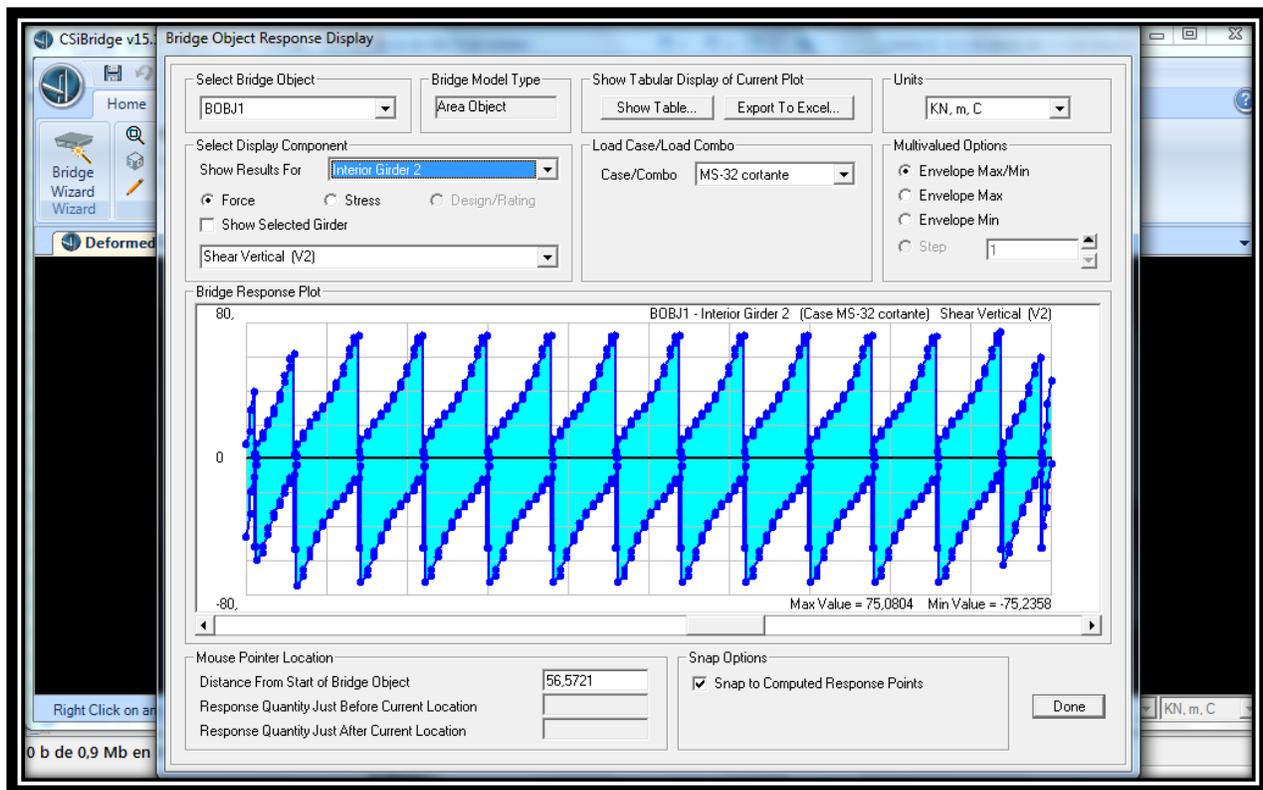


Figura II.3 Definición de cada silueta o vehículo





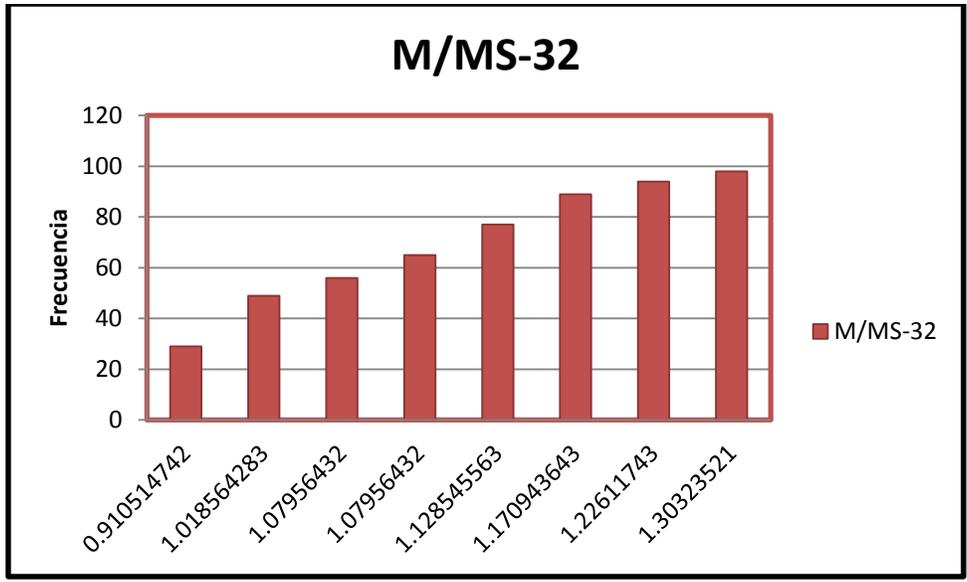


**Figura II.6 Obtención de las sollicitaciones de cortante**

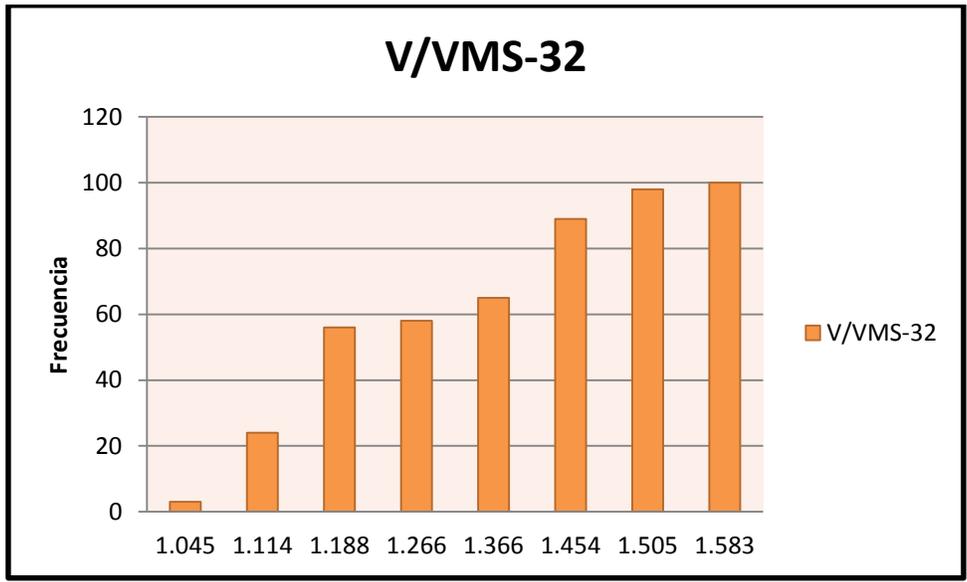
Estos efectos generados por cada una de las 100 secuencias vehiculares que se toman como muestra en esta investigación, se registran en una tabla resumen (documento complementario) en la que se analizan todas las vigas, arrojando a la conclusión que la viga 2 es la más solicitada o con mayores efectos de momento y cortante, por tanto es la que se escoge como caso de estudio en esta investigación. En la tabla II.4 del anexo 4 se muestran los resultados máximos de momento en esta viga 2 por secuencias de tráfico.

### **2.1.5. Comparación de los efectos obtenidos por las secuencias vehiculares con el efecto obtenido por el vehículo normado**

Graficando los resultados de los efectos obtenidos mediante una distribución de frecuencias se puede establecer una comparación entre los efectos de momento por intervalos de las secuencias vehiculares con respecto al efecto obtenido por el vehículo normativo MS-32. A continuación se grafican estos valores:



**Figura II.7 Distribución de frecuencia de momentos debidos al tráfico real por secuencias y el generado por el MS-32**



**Figura II.8 Distribución de frecuencia de cortantes debidos al tráfico real por secuencias y el generado por el MS-32**

De estos resultados se puede decir que los efectos de momento exceden hasta un 30 % al efecto obtenido por el MS-32 y los efectos de cortante hasta un 33% lo que permite establecer las primeras conclusiones de estudio corroborando a la situación

problemática de esta investigación de que las solicitudes generadas por el parque vehicular cubano no están en correspondencia con el vehículo normado.

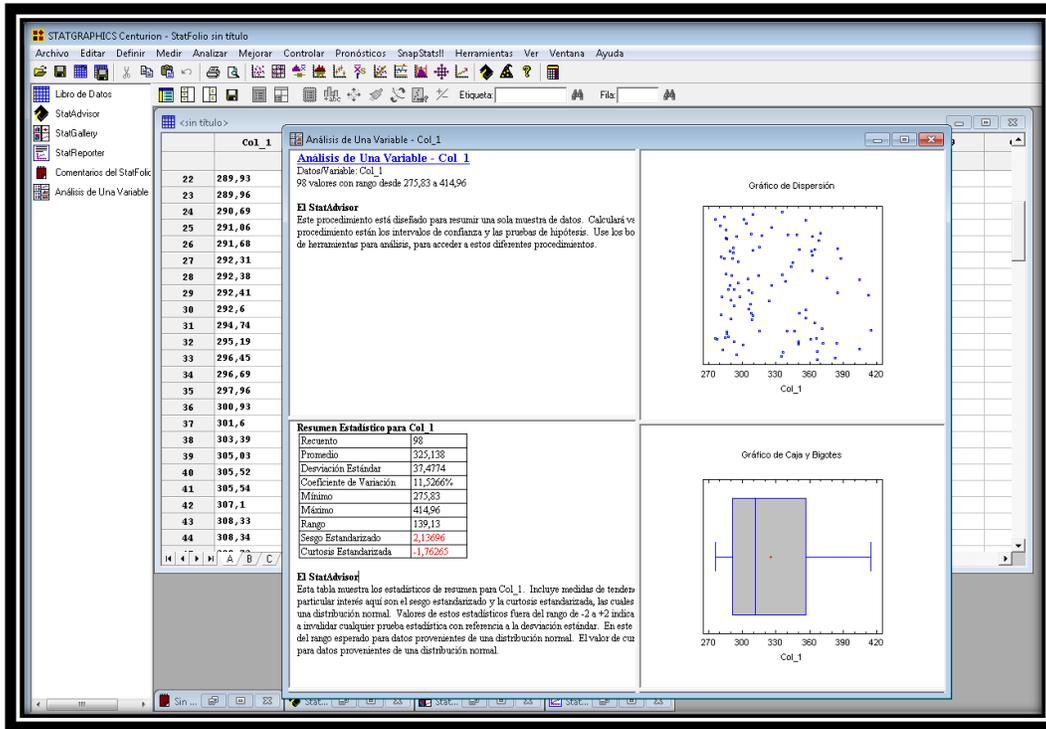
#### **2.1.6. Análisis estadístico de los efectos obtenidos**

Los efectos obtenidos se analizan estadísticamente mediante el programa STAT GRAPHICS versión 15 con el objetivo de agrupar la masa de datos que no está numéricamente organizada y ajustarla a una distribución. Al respecto Rossigali (2006) considera que el procedimiento ideal sería el ajuste de una distribución probabilística a la muestra de datos observados donde la información obtenida a través de la muestra dada es usada para hacer generalizaciones sobre la población, de la cual la muestra fue obtenida, unida al mundo real con los modelos probabilísticos ideales asumidos.

En este trabajo se utiliza las pruebas de bondad de ajuste para la representación del fenómeno por medio de las diferentes funciones probabilísticas, con el fin de facilitar su análisis, conocer las distribuciones que describen estas variables aleatorias y sus parámetros.

En este caso se consideran los efectos obtenidos por las 100 secuencias vehiculares, de ellos solo 98 se analizan estadísticamente como muestra pues los restantes 2 valores se desechan a la hora de ajustar estos datos continuos por razones probabilísticas, ya que a partir de un determinado valor de datos las frecuencias se tornan muy pequeñas y dispersas y no podrán ser usadas en el modelo.

Primeramente se analiza estadísticamente una variable mediante el uso del programa STATGRAPHICS para ver si la muestra de datos proviene de una distribución normal donde valores estadísticos fuera del rango de -2 a +2 del sesgo y la curtosis estandarizada indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tiende a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor de sesgo estandarizado no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura II.8 Análisis de una variable mediante el STATGRAPHICS**

Como los datos planteados no provienen de una distribución normal se analizan otras distribuciones mediante el comando **Analizar/Datos continuos/Ajuste de distribuciones/Ajuste de datos no censurados**.

Este análisis muestra los resultados de ajustar 3 distribuciones a los datos observados donde valores-P mayores que 0,05 indican que los datos provienen de la distribución seleccionada con 95% de confianza según la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la prueba del estadístico Log verosimilitud que compara distribuciones alternas. En la siguiente tabla se recogen los valores de las pruebas o distribuciones de las que provienen los valores de momentos:

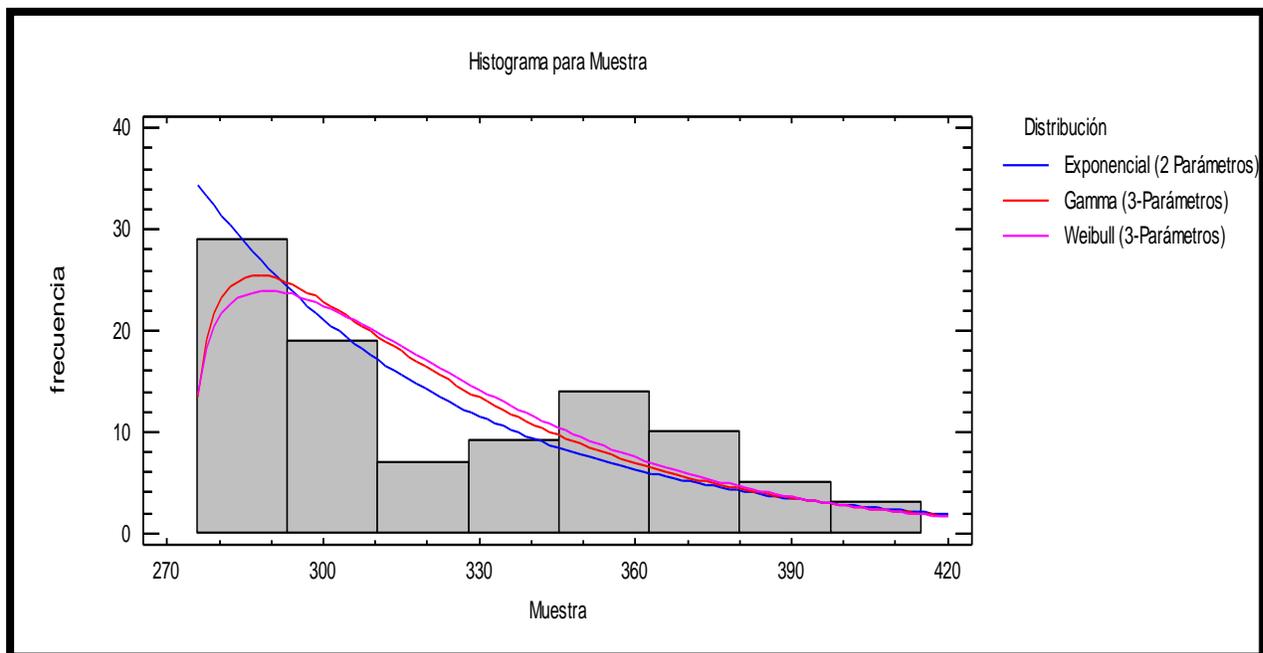
**Tabla II.5 Prueba de Kolmogorov-Smirnov**

	<b>Exponencial (2 Parámetros)</b>	<b>Gamma (3-Parámetros)</b>	<b>Weibull (3-Parámetros)</b>
Valor-P	0,0899975	0,122437	<b>0,174943</b>

**Tabla II.6 Comparación de Distribuciones Alternas**

Distribución	Parámetro	Log Verosimilitud
Weibull (3-Parámetros)	3	-477,863
Gamma (3-Parámetros)	3	-478,81
Exponencial (2 Parámetros)	2	-480,013
Lognormal (3-Parámetros)	3	-483,409

De estas distribuciones se escoge la Weibull (3-Parámetros) con parámetros de forma igual a 1.23 y de escala de 52.99, por ser el mayor valor-P y la distribución que más se ajusta según el histograma de frecuencias que se muestra a continuación:



**Figura II.9 Histograma de Frecuencia con las distribuciones ajustadas**

De la distribución ajustada en esta caso la Weibull de 3 parámetros, se escogen los valores críticos según el nivel de confianza como valores característicos de la muestra para realizar la segunda comparación. A continuación se presenta una tabla con estos valores según su nivel de confianza:

**Tabla II.7 Valores Críticos de momentos de la Weibull (3 parámetros)**

<b>Nivel confianza</b>	<b>Weibull (3-Parámetros)</b>
0,1	283,978
0,5	314,803
0,9	379,695
<b>0,95</b>	<b>404,509</b>
0,99	458,388

Con este valor marcado se establece la segunda comparación de los efectos de momentos obtenido por las 100 secuencias vehiculares con respecto al valor de momento del vehículo normado MS-32, donde el 49% de los efectos obtenido de la muestra exceden hasta un 32 % el efecto obtenido por el MS-32.

Para el caso del cortante se emplea el mismo procedimiento antes descrito con diferencia que los valores de cortante se ajustan a una distribución uniforme.

#### **2.1.7. Extrapolación de los momentos por la inversa del período de retorno**

Las situaciones extremas futuras es el principio fundamental en la elaboración de los códigos normativos, sin embargo la mayoría de los valores extremos de las variables observadas no están disponibles para la adquisición de valores futuros extremos, sino que exigen una extrapolación en un período de tiempo considerable.<sup>55</sup>

En esta investigación las extrapolaciones son necesarias para estimar el comportamiento del evento a largo plazo ya que no están disponibles los efectos de momentos para un período de tiempo determinado, por lo que se efectúa en primer lugar el ajuste de la mejor distribución a los datos medidos en corto plazo, para seguir posteriormente con la extrapolación en largo plazo según el período de vida útil de la estructura.

---

<sup>55</sup> Rossigali, C. "Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil". Dissertação para a obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2006, pág. 63.

Después de determinar en el epígrafe anterior que la distribución más ajustada es la Weibull de 3 parámetros para los valores de momento y la distribución Uniforme para los valores de cortante se crea un gráfico con la inversa de la probabilidad relativa acumulada para cada distribución con respecto a la relación de M/M (MS-32) según el análisis que se establece en la siguiente tabla:

**Tabla II.8 Valores de frecuencias y abscisas para la Weibull (3 parám.)**

Promedio	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.	M/M-MS-32	Inv.(F.Rel.Acum)
285,80	29	0,2959	1,23	0,427
303,27	49	0,5	1,31	0,743
319,72	56	0,5714	1,38	0,874
338,86	65	0,6633	1,46	1,071
354,24	77	0,7857	1,53	1,42
367,55	89	0,9082	1,58	2,026
384,87	94	0,9592	1,66	2,569
409,07	98	0,99	1,76	3,452
<b>total</b>	98	1		

**Tabla II.9 Valores de frecuencias y abscisas para la Uniforme**

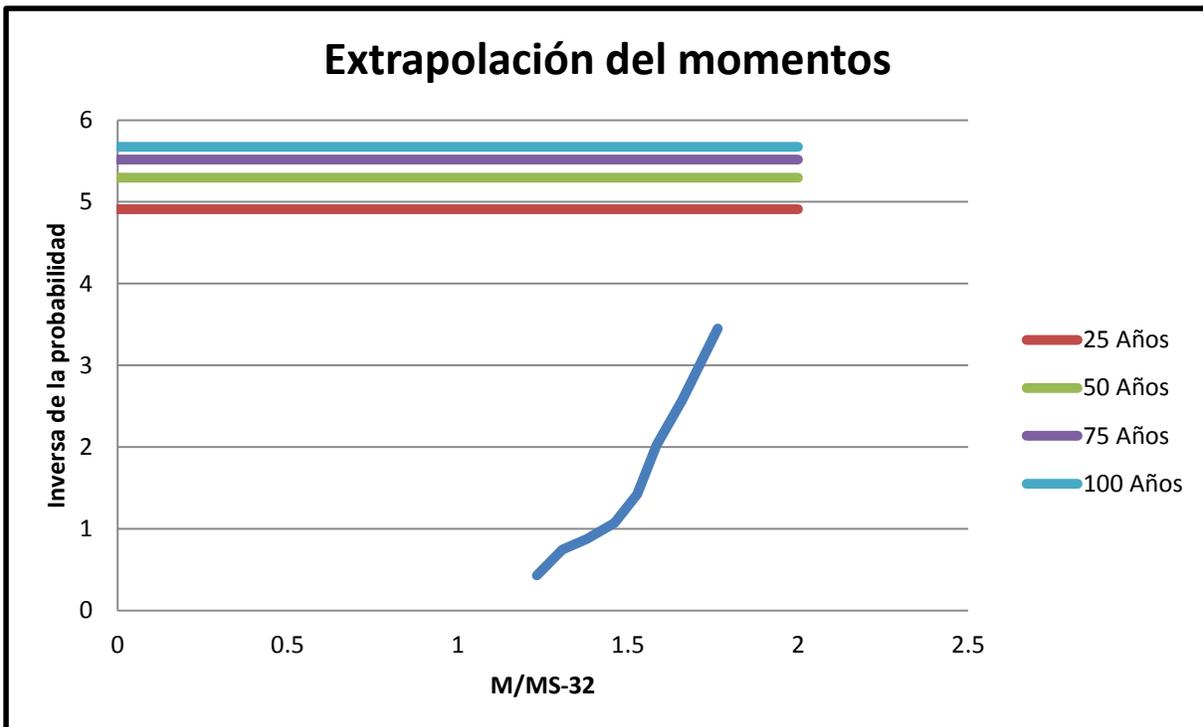
Promedio	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.	M/M-MS-32	Inv.(F.Rel.Acum)
78,495	3	0,03	1,045	77,67
83,621	24	0,24	1,114	86,608
89,196	56	0,56	1,188	100,22
95,068	58	0,58	1,266	101,07
102,548	65	0,65	1,366	104,048
109,187	89	0,89	1,454	114,256
113	98	0,98	1,505	118,08
118,852	100	1	1,583	118,5
<b>total</b>	100	1		

La función inversa de la probabilidad relativa acumulada de la distribución Weibull se halló con la ayuda del programa Mathcad versión 14 utilizando la ecuación **qweibull(p, s)** donde **p** es una probabilidad real entre 0-1, **s** es un parámetro de forma real superior a 0 que en este caso  $S = 1.23$  y la inversa de la distribución uniforme utilizando la ecuación **qunif(p, a, b)** donde **a** y **b** son números reales, con  $a < b$  correspondiente a los límites inferior 76,4 y superior 118.94 de esta función.

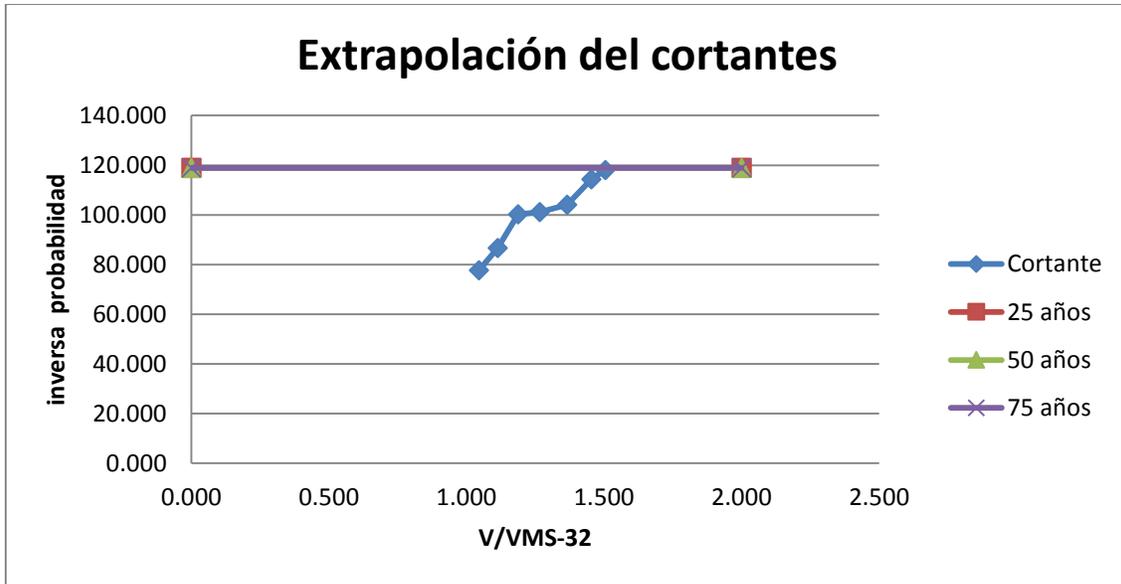
De los siguientes datos se construye dos gráficos (**figura II.9-II.10**) correspondiente a la distribución de los momentos secuenciales, con el objetivo de extrapolar los efectos futuros para un período de vida útil de la estructura en 25, 50,75 y 100 años partiendo del procedimiento seguido por otros autores y tomando que la muestra (N) fue obtenida en un intervalo de 2 años como período de retorno (1-1/N). La siguiente tabla recoge los datos utilizados en las extrapolaciones:

**Tabla II.6 Valores de las extrapolaciones**

Años	N	1-1/N	Inv. (Z)
2	98	0,9897959	3,44
25	1225	0,9991837	4,911
50	2450	0,9995918	5,296
75	3675	0,9997279	5,518
100	4900	0,9997959	5,674

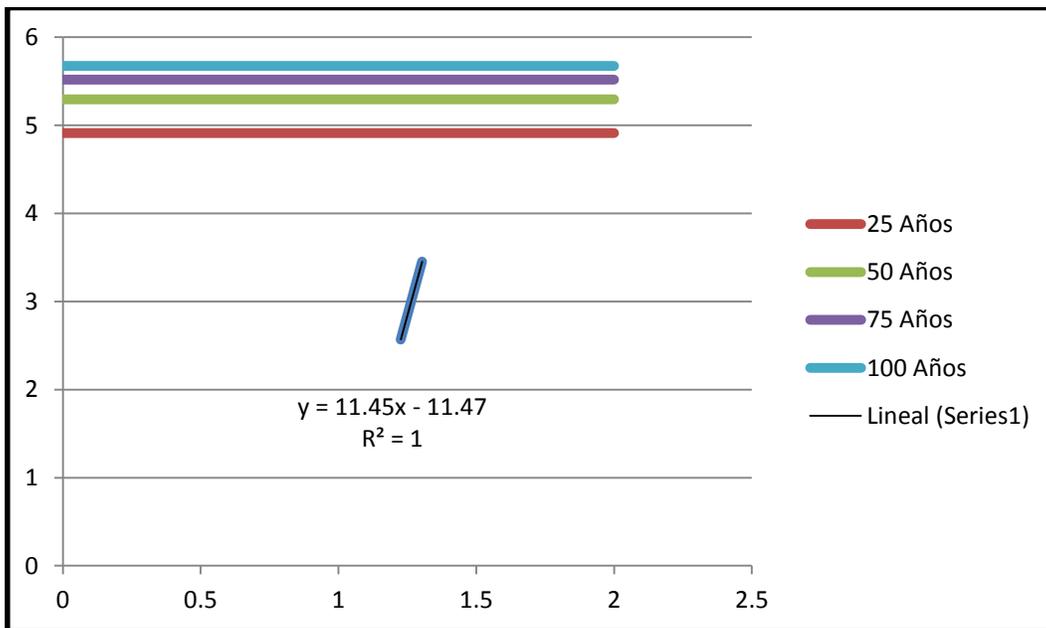


**Figura II.10 Extrapolaciones por el inverso del período de retorno para el efecto de momento**

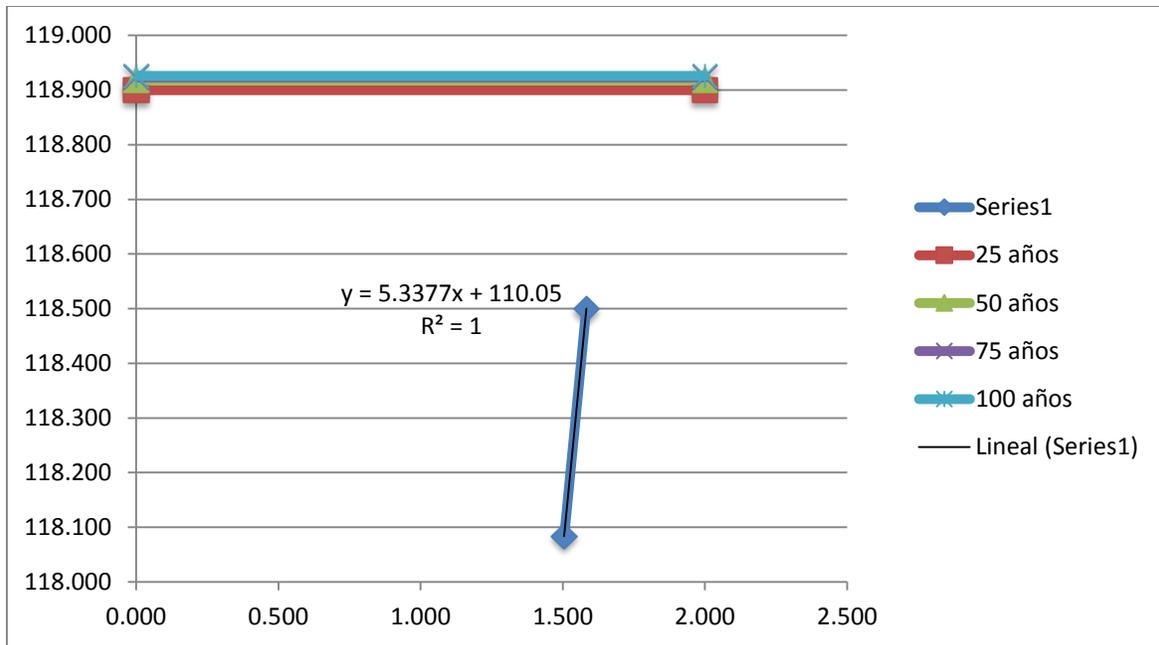


**Figura II.10 Extrapolaciones por el inverso del período de retorno para el efecto de cortante**

Sobre el gráfico se busca la línea de tendencia que más se ajusta obteniéndose una ecuación lineal que permite buscar la variable x que está relacionada con el efecto de momento sobre momento del vehículo normado MS-32 como se refleja en el siguiente gráfico:



**Figura II.11 Línea de tendencia lineal para momento**



**Figura II.11 Línea de tendencia lineal para cortante**

Sustituyendo los resultados de la extrapolación y despejando, se obtiene el momento extrapolado para los diferentes períodos de vida de la estructura. También se puede realizar buscando manualmente el valor de la intersección con cada una de las extrapolaciones. A continuación la siguiente tabla recoge los resultados de las extrapolaciones correspondientes a los efectos de momento y cortante:

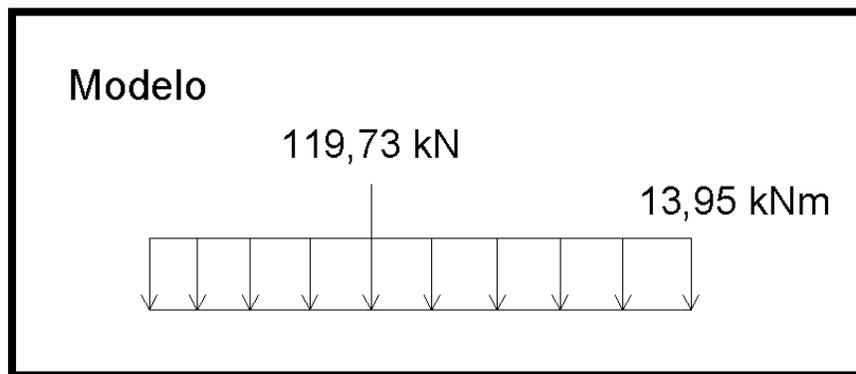
**Tabla II.6 Resultados de las extrapolaciones**

Período	Momento Extrap. (kNm)	Cortante
<b>25</b>	448,86	124,48
<b>50</b>	<b>459.53</b>	<b>124,73</b>
<b>75</b>	465.81	124,81
<b>100</b>	469.8	124,84

Se toma el momento y cortante extrapolado para un período de 50 años de vida útil de la estructura para la obtención del modelo.

### 2.1.8. Obtención del modelo

A partir del momento extrapolado para el período de tiempo determinado y la configuración típica cubana del MS-32, se busca en el prototipo numérico un modelo que genere tal efecto. Considerando los valores de cargas unitaria para cargas uniformemente distribuidas y concentradas se llega mediante un proceso de tanteo a obtener la configuración de modelo siguiente:



**Figura II.12 Configuración del Modelo**

Este modelo supera la carga de momento y carga distribuida del MS-32 hasta un 68 % según los estudios realizados mediante secuencias vehiculares además su efecto de momento 560 kNm excede en un 56 % al efecto producido por el modelo normado según el prototipo numérico de puente empleado.

Como resultado de este modelo se considera que los efectos provenientes de cargas distribuidas son mayores que aquellos obtenidos a través que cualquier número de fuerzas igualmente espaciadas y concentradas. Basándonos en Ghosn (2000) se llega a la conclusión que el efecto de momento generado por la carga uniformemente distribuida es mayor que el momento generado por la carga concentrada.<sup>56</sup>

---

<sup>56</sup> Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág 150.

## **CONCLUSIONES PARCIALES**

En este capítulo se planteó el procedimiento para la obtención de un modelo de cargas verticales móviles para el diseño de puentes a través de la simulación del tráfico real mediante secuencias vehiculares obteniendo 100 valores de solicitaciones de momentos producto de las situaciones más críticas en el prototipo de puente empleado. Además mediante un análisis estadístico de los datos observados se ajustó una distribución probabilística a la muestra y se obtuvo un valor característico de momento que arrojó la primera conclusión, de que el efecto generado por el fenómeno de secuencias vehiculares es mayor al provocado por el MS-32 como vehículo normativo corroborando a la hipótesis planteada. Mediante la extrapolación de los momentos por el inverso del período de retorno de la probabilidad relativa acumulada de la distribución Weibull de 3 parámetros, se obtuvo un momento de 560 kN para la obtención del nuevo modelo que supliera tal efecto.

## CONCLUSIONES

- Se realizó un análisis histórico referente a los modelos de cargas verticales móviles en diferentes normativas y la evolución en la norma cubana para puentes carreteros.
- Se caracterizaron las variables que inciden y los métodos de obtención de los modelos de carga verticales móviles.
- Se describe el tráfico actual y las características del parque vehicular cubano para su posterior representación en el modelo de cargas verticales móviles en el prototipo de puente seleccionado.
- Se ilustró el procedimiento para la obtención de modelos de cargas verticales móviles en el prototipo basado en la tipología constructiva del Puente Sagua.
- Se obtuvo un modelo de carga vertical móvil para el diseño de puentes de hormigón cubano-soviético a partir del análisis de secuencias vehiculares del tráfico actual que a partir de un valor de momento extrapolado de 460 kN excede en un 47 % al vehículo normado MS-32.

## RECOMENDACIONES

1. Evaluar esta modelo en otros puentes de diferentes tipologías constructiva de la red vial cubana y comparar sus efectos con respecto al vehículo normado con el objetivo de actualizar el código normativo cubano.
2. Aplicar este procedimiento de secuencias vehiculares partiendo de una muestra más amplia de efectos obtenidos para el análisis estadístico y el ajuste a la distribución probabilístico para hacer más exacta la investigación.
3. Continuar este trabajo con secuencias vehiculares pero cargando 2 carriles al mismo tiempo y variando las distancias entre ejes y la velocidad con el objetivo de evaluar el comportamiento de las variables que inciden en la obtención de los modelos de cargas verticales móviles.
4. Analizar el efecto de otras solicitaciones como cortante, torsión y desplazamiento.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Medina Torres, Francisco “Cargas para el cálculo de edificaciones y puentes” Ciudad Habana, editora ISPJAE, 1987.
2. Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. Asociación española de normalización y Certificación, AENOR. Abril, 1998.
3. Infantes Suárez, Dania “Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales” , Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO,Cuba,2013.
4. Taylor Hernández Gustavo. “Manual para la Inspección y Conservación de Puentes de hormigón”.
5. Ramos, M. “Monitoreo y análisis del comportamiento del tráfico en la carretera Holguín-Moa, orientado hacia el estudio de la fuerza de frenado”. Trabajo de Diploma en opción el título de ingeniero civil. UHo, 2012.
6. Rascón Chávez, Octavio. “Formulación de la Norma SCT de cargas vehiculares para diseño Estructural de puentes Carreteros”, Publicación Técnica No. 243 Sanfandila, México, 2004.
7. Modelo de cargas vivas vehiculares para el diseño estructural de puentes en México ,1999.
8. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), United States, 2004, LFRD Bridge Design Specifications.
9. Norma Mexicana SCT de Cargas Vivas, 2004.
10. NC 53:125 Puentes y Alcantarillas “Especificaciones de proyecto y Métodos de cálculo, 1984.
11. NC 733: 2009. “Carreteras—pavimentos flexibles— Método de cálculo. Oficina nacional de normalización. 1ra. Edición Noviembre 2009.
12. Maldonado Ferreira, Luciano, “Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto”. Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em

Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Brasil, 2006. [En pdf].

- 13.** Rossigali, C. “Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil”. Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia da universidade federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia civil, Brasil, 2006. [En pdf].
- 14.** Almaguer González, Joaquín. “Contribuciones a la caracterización geométrica y estimación simplificada del estado de carga por siluetas del parque vehicular existente en Holguín”. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba, 2011.
- 15.** Villalón, Leonardo. “Procedimiento de generación automática de valores aleatorios según distribución uniforme”. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba, 2011.
- 16.** Sardiñas A. “Método para el cálculo de pavimento rígido”. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Civil. CUJAE, Habana 2009.
- 17.** NC: 334/2004 Carreteras-Pavimentos Flexibles- Métodos de Cálculo.

## ANEXOS

### Anexo 1: Conteo Vehicular (2013)

Tabla II.1

Siluetas	Cantidad	Peso
S2-V	32777	7,82
S2-M	24112	11,25
S2-LL	17791	11,9
S4-LL	12941	17,17
S4-V	11628	10,31
S4-M	10643	13,74
S3-V	8568	10,14
S3-LL	6882	25,84
S7-LL	6706	40,85
S3-M	6242	17,99
S7-V	4013	15,75
S6-LL	3683	39,95
S7-M	3349	28,11
S6-V	3246	14,26
S6-M	2826	27,09
S9-LL	1764	40,5
S8-LL	1585	33,5
S14-LL	1330	43,7
S10-LL	1313	50,8
S9-M	1032	29
S10-M	883	34,01
S9-V	855	17,5
S10-V	790	17,5
S5-LL	731	29,6
S8-V	650	15
S13-LL	649	28,14
S8-M	581	24,25
S5-M	556	20,85
S14-V	524	16
S13-M	466	19,85
S14-M	412	29,85
S5-V	341	11,6
S13-V	341	11,82

Tabla II.2

Siluetas selecc	Cantidad	% Frec relativa
S3-LL	6882	20,41
S7-LL	6706	19,88
S6-LL	3683	10,92
S7-M	3349	9,93
S6-M	2826	8,38
S9-LL	1764	5,23
S8-LL	1585	4,70
S14-LL	1330	3,94
S10-LL	1313	3,89
S9-M	1032	3,06
S10-M	883	2,62
S5-LL	731	2,17
S13-LL	649	1,92
S8-M	581	1,73
S14-M	412	1,22
<b>Total</b>	<b>33726</b>	<b>100</b>

## Anexo 2: Detalles de la construcción del prototipo numérico

Ejecutando el programa **CSI Bridge**, se accede a **Bridge Wizard**:

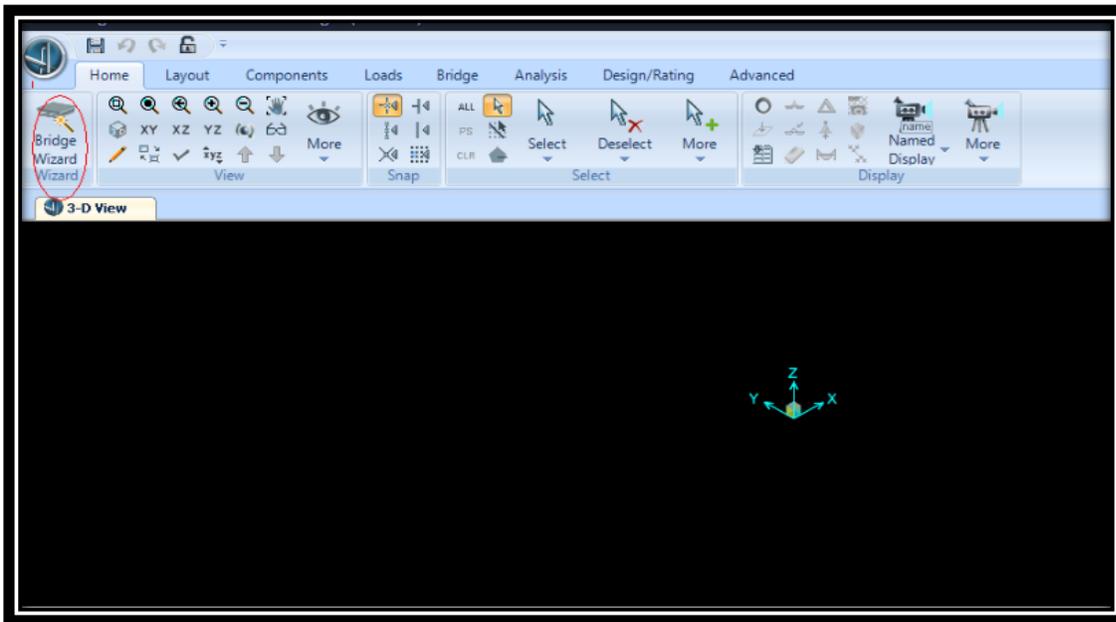


Figura II.1 Ventana Principal del Software

Dentro del Wizard (Asistente):

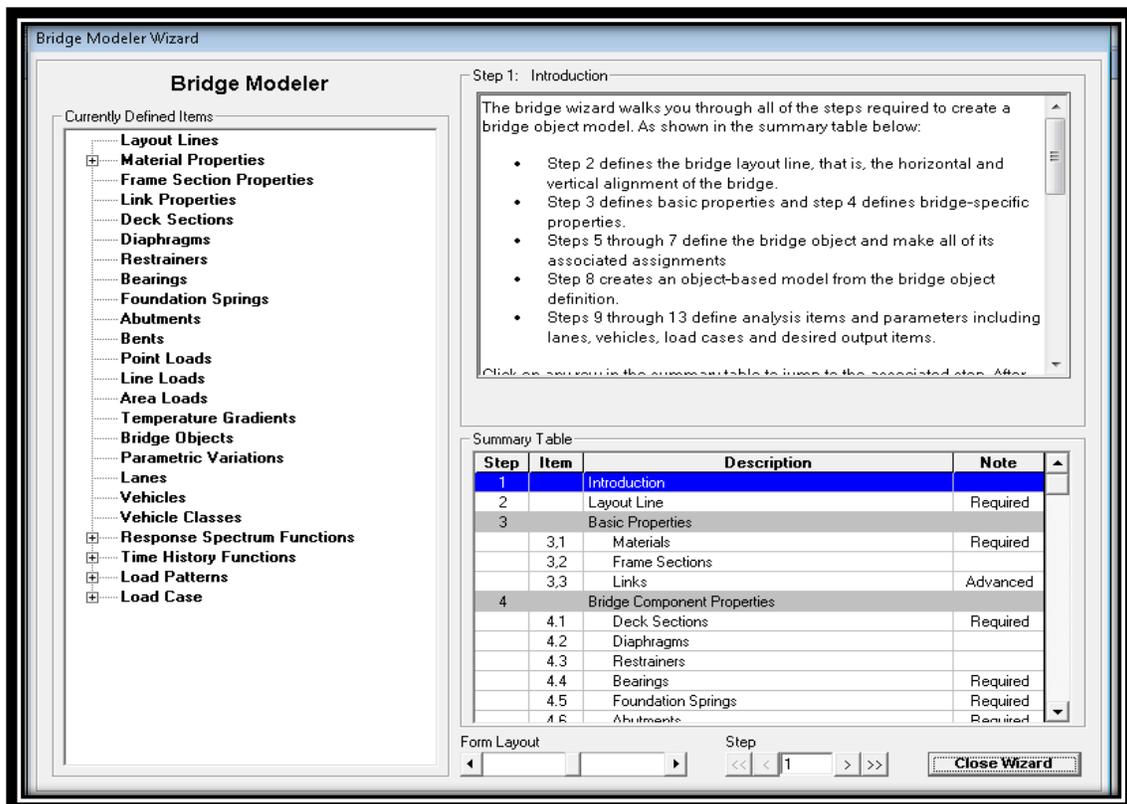
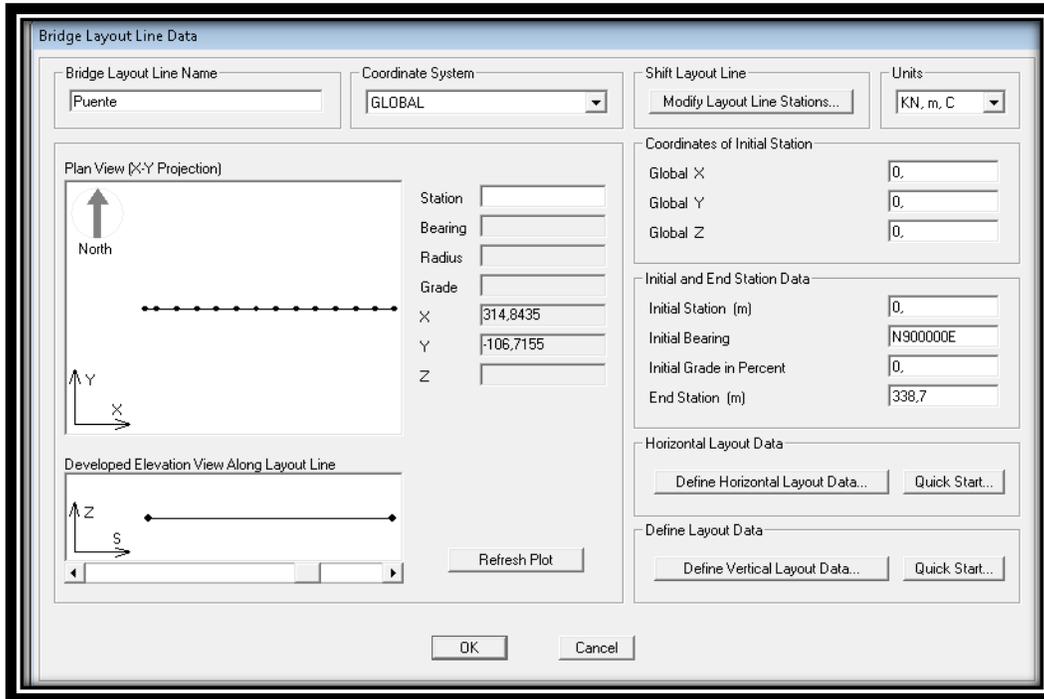


Figura II.2 Ventana del Wizard

1. Siguiendo el camino: **Layout lines/ Add new line** se accede a la ventana **Bridge layout line data** donde se define la longitud total del puente (338.7m)



**Figura II.3 Ventana Bridge Layout Line Data**

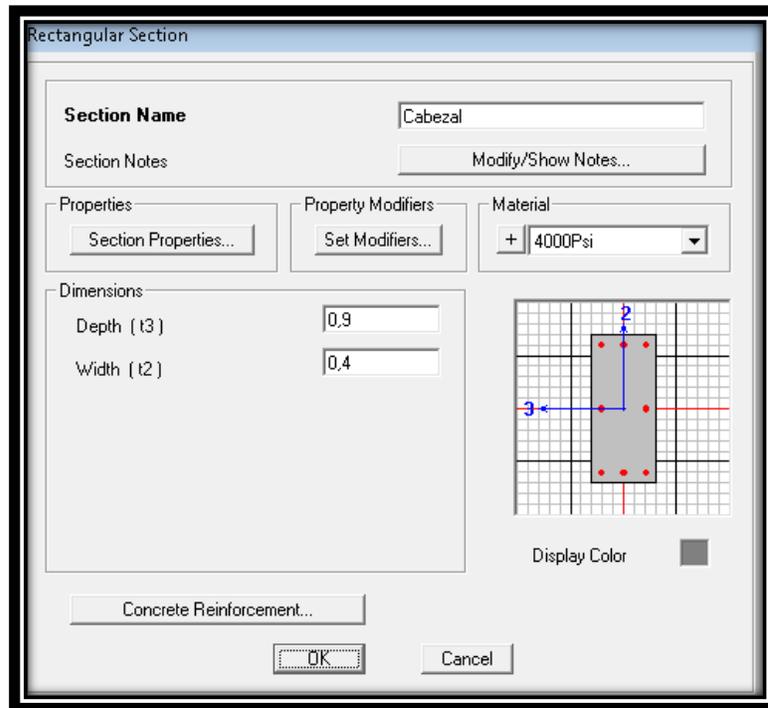
2. Se define las propiedades del material accediendo a: **Material properties/ Define/show material properties/ Add New Material.**

El material que se usó para la confección del prototipo numérico del puente de Sagua fue llamado Hormigón 25 Mpa, este posee 24 000 000 kN/m de módulo de elasticidad (E) y 0.17 de módulo de Poisson (I) y 25 MPa de resistencia característica a la compresión.

**Figura II.4 Ventana Material Property Data**

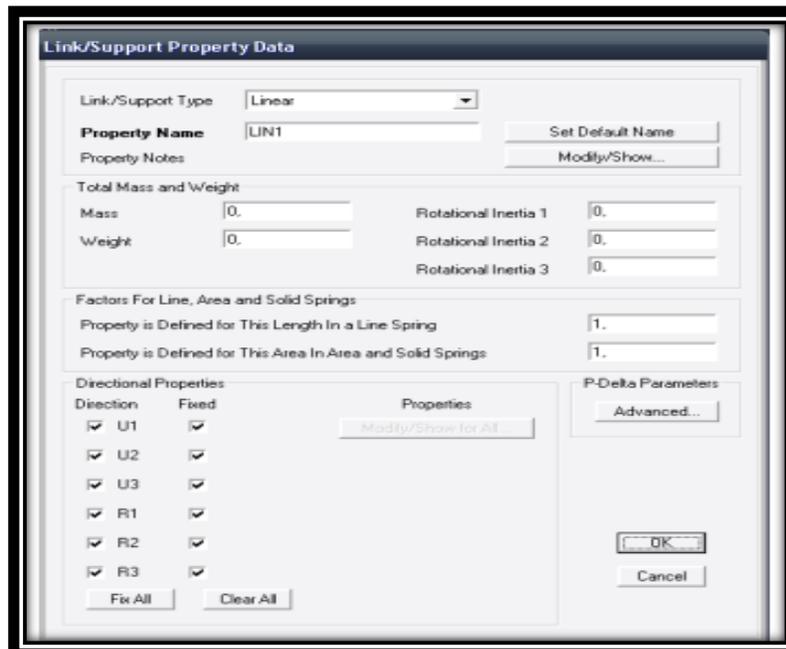
3. Se definen las secciones de los elementos que forman la subestructura accediendo a: **Frame Section Properties/ Define/Show Frame Sections.**

En este caso se definieron las secciones del cabezal (0.9 m x 0.4m), columna-Circular ( $\phi$  1.3m), columna rectangular (0.6 mx 0.6 m) y vigas rectangulares (1.1 m x 0.4 m), con sus dimensiones predeterminadas través del comando **Add Copy of Property.**



**Figura II.5 Sección Rectangular**

4. Se definen las propiedades de los aparatos de apoyo a través del comando **Link Properties/ Define/Show Link Properties / Add New Property** se accede a la ventana **Link/Support Property Data**.



**Figura II.6 Link/Support Property Data**

- Se definen las características de la sección transversal de la superestructura accionando: Deck Sections /Define/Show Deck Sections /Add New Section y se accede a la ventana Select Bridge Deck Section Type y se selecciona Tee Beam (vigas y losa del tablero).

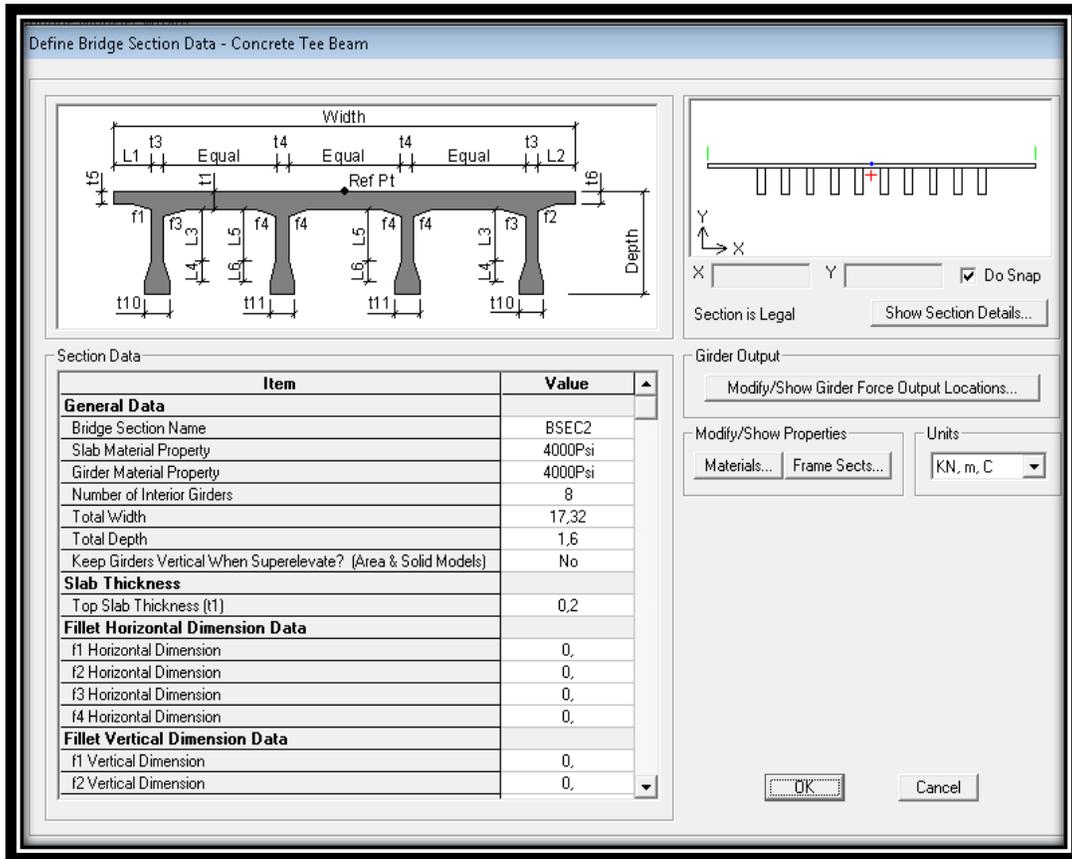


Figura II.7 Define Bridge Section Data- Concrete Tee Beam

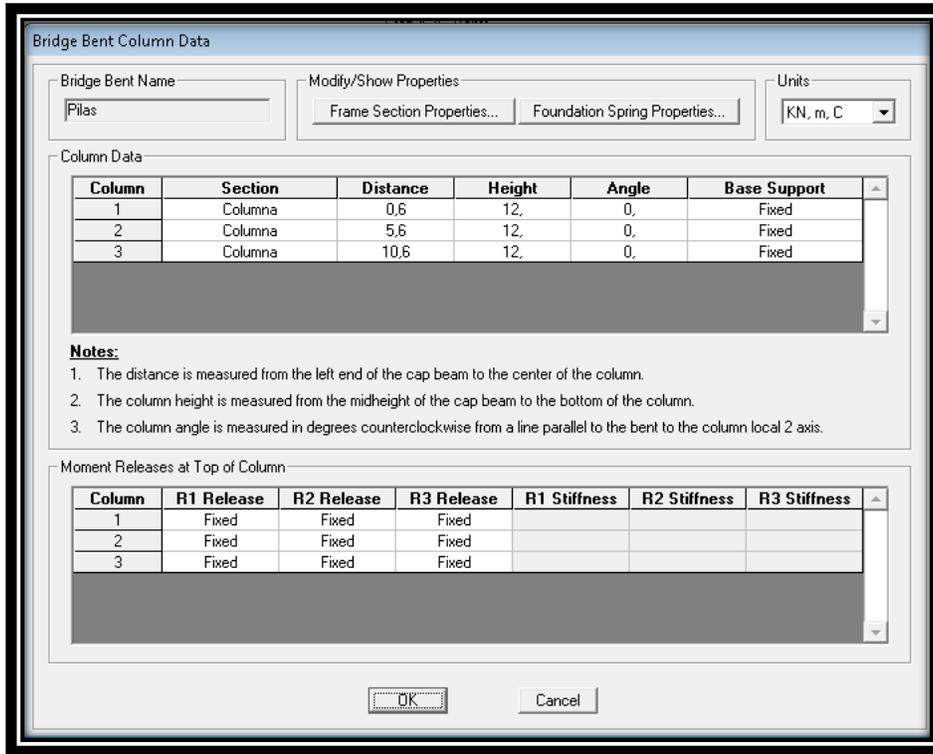
- Se definen los estribos utilizando el botón **Define/Show Abutments / Add New Bridge Abutments** y se accede a la ventana Bridge Abutment Data.

**Figura II.8 Bridge Abutment Data**

7. Se definen las pilas utilizando el comando **Define/Show Bents / Add New Bridge Bent /Bridge Bent Data**. En este caso se definieron pilas circulares y rectangulares.

**Figura II.9 Bridge Bent Data**

Para introducir la posición transversal y la altura de las pilas y estribos se marca **Modify/ Show Column Data.**



**Figura II.10 Bridge Bent Column Data**

El puente de Sagua posee 12 pilas, las pilas 1 y 12 fueron modeladas a una distancia de 16.85 m de los estribos, mientras que la 2-11 están espaciadas a 27 m. Estos datos se le introducen al programa en la ventana **Bridge Object Data** ubicada en: **Bridge/ Bridge Object/ Add new Bridge Object.**

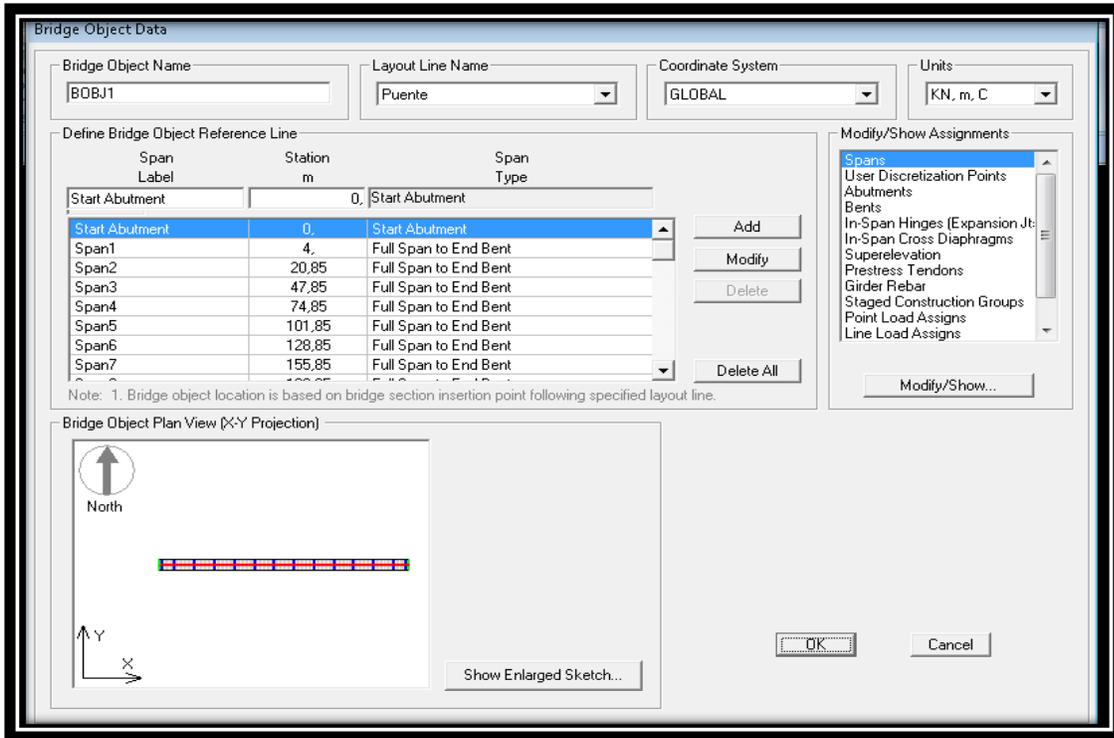


Figura II.11 Bridge Object Data

8. Actualización del modelo

En este paso se actualiza el puente, de manera que todos los datos que se le han introducido al software CSi Bridge se reflejen en el modelo definitivo, en la ventana **Update Bridge Structural Model**. El puente de Sagua se actualizó usando objetos de área. La ventana está ubicada en **Bridge/ Update Linked Bridge Model**.

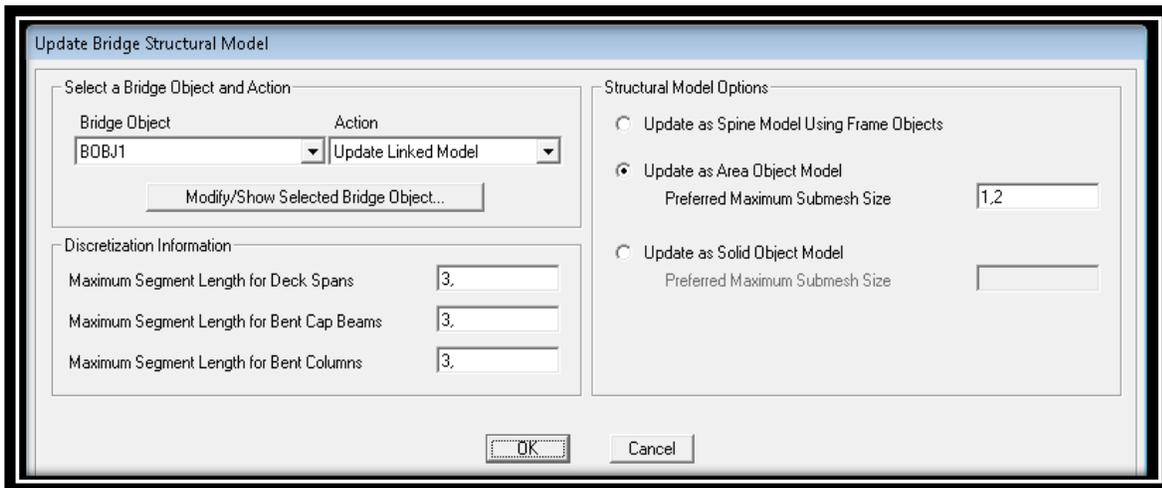
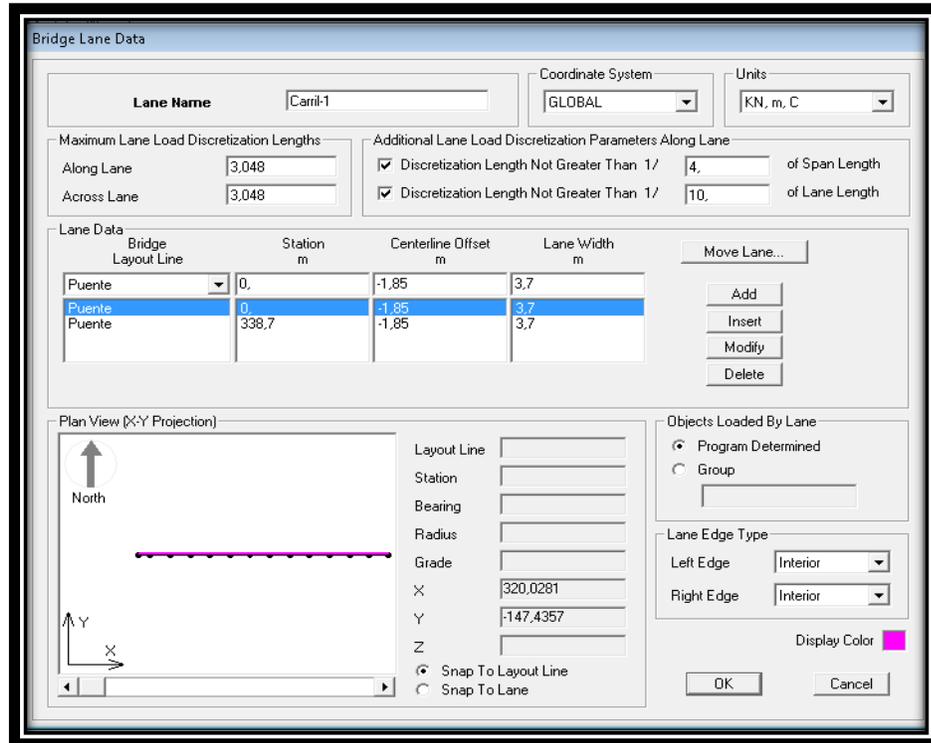


Figura II.12 Update Bridge Structural Model

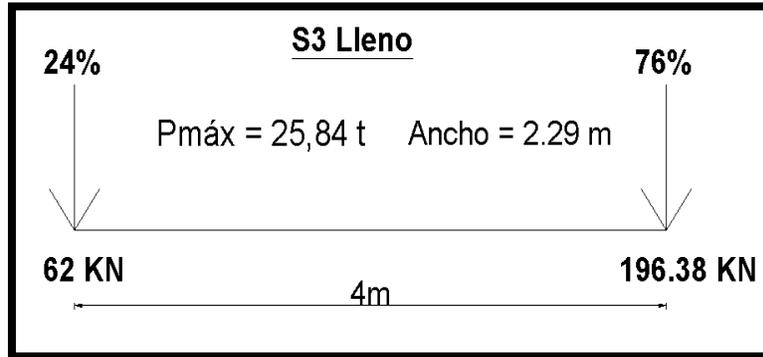
9. Se definen las fajas del tráfico por donde transitan los vehículos seleccionados. En este paso el prototipo numérico del puente de Sagua tiene 3.7 m de ancho de carril y 1.5 m de paseo. Estos datos se le introducen al software en la ventana **Wizard/ Lanes/ Define Show Lanes/Add new Lane Defined from Layout Line.**



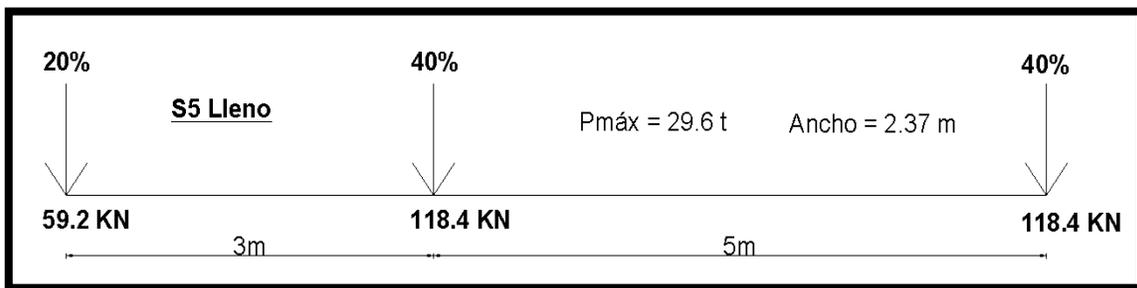
**Figura II.13 Bridge Lane Data**

Los otros pasos del procedimiento se explican en el capítulo II a medida que se ejecutan como parte de la obtención del modelo.

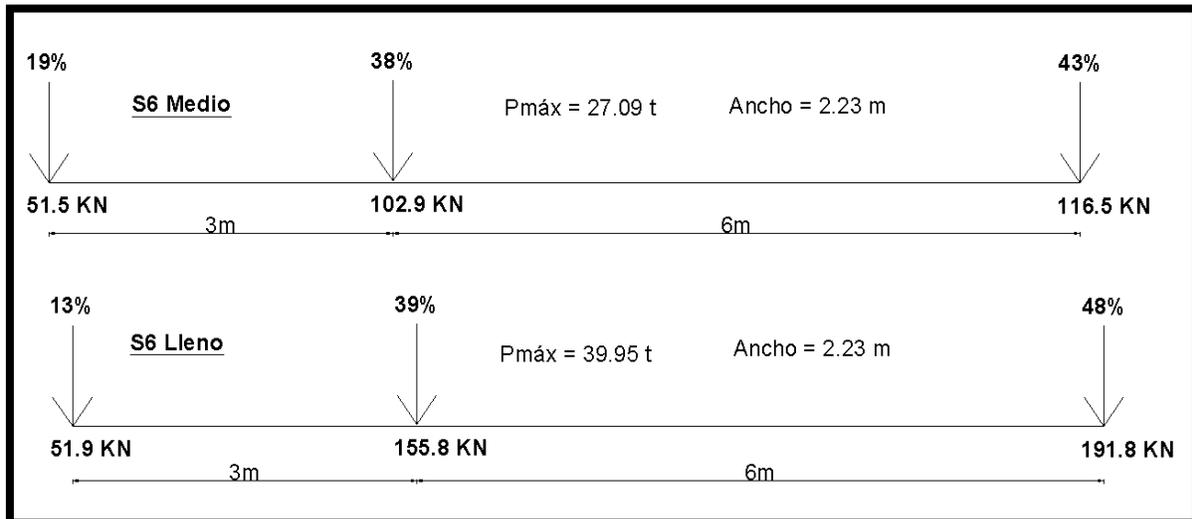
**Anexo 3:** Caracterización geométrica de las siluetas seleccionadas



**Figura 3.1** caracterización de la silueta S3



**Figura 3.2** caracterización de la silueta S5



**Figura 3.3** caracterización de la silueta S6

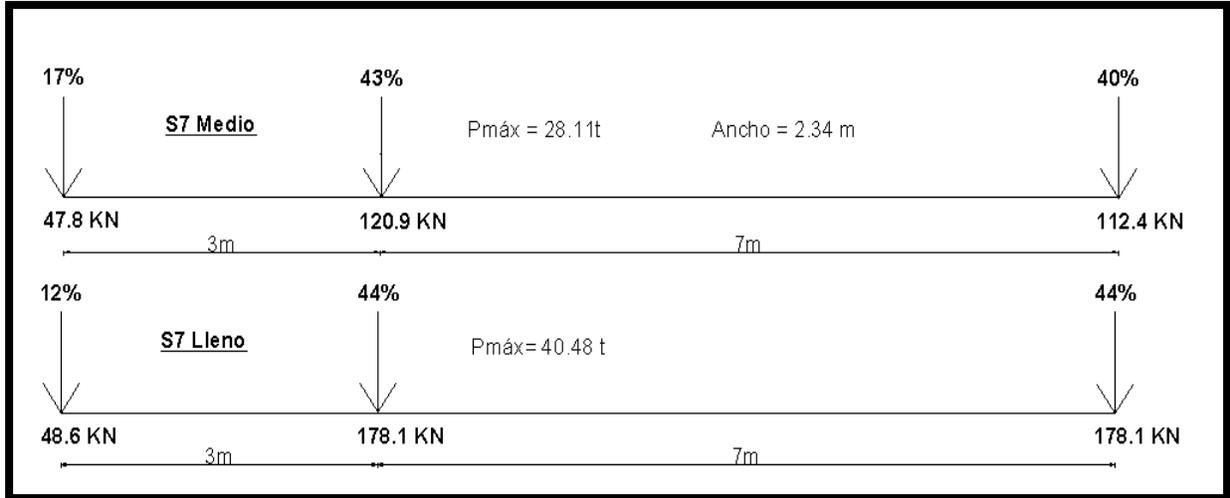


Figura 3.4 caracterización de la silueta S7

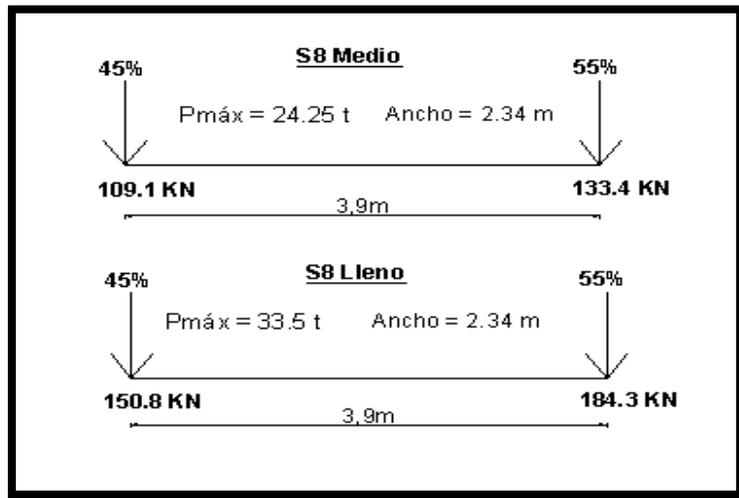


Figura 3.5 caracterización de la silueta S8

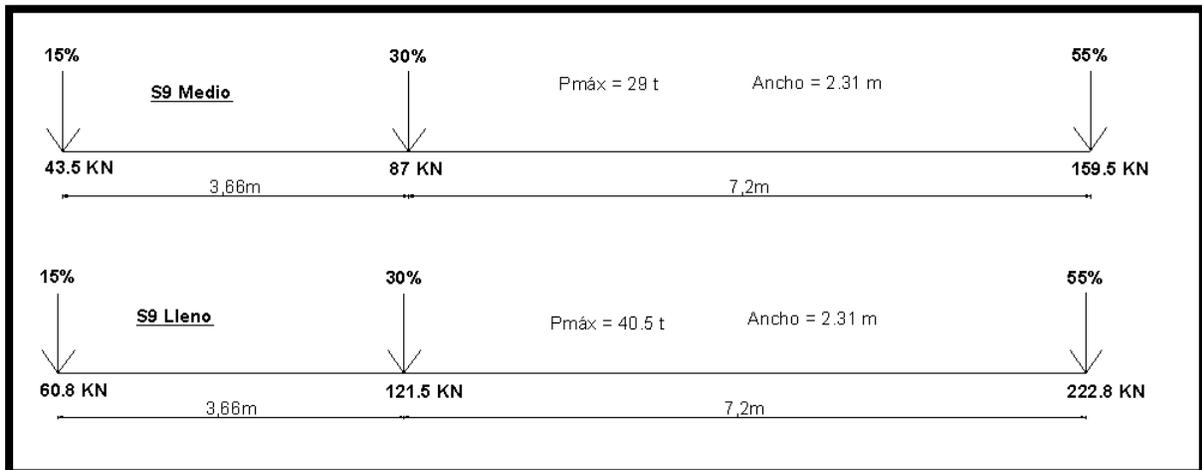


Figura 3.6 caracterización de la silueta S9

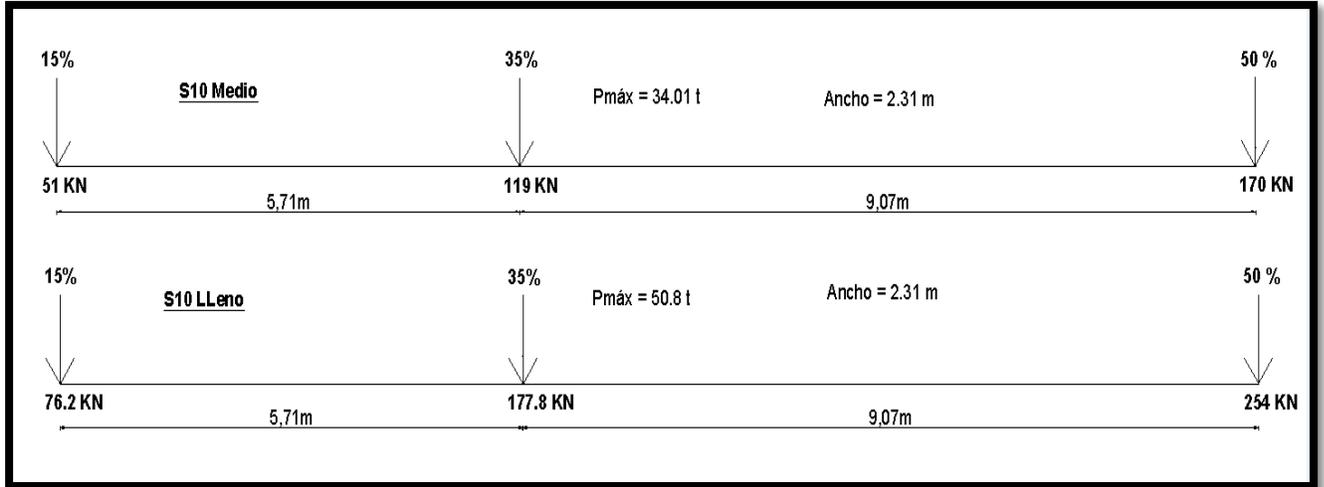


Figura II.20 caracterización de la silueta S10

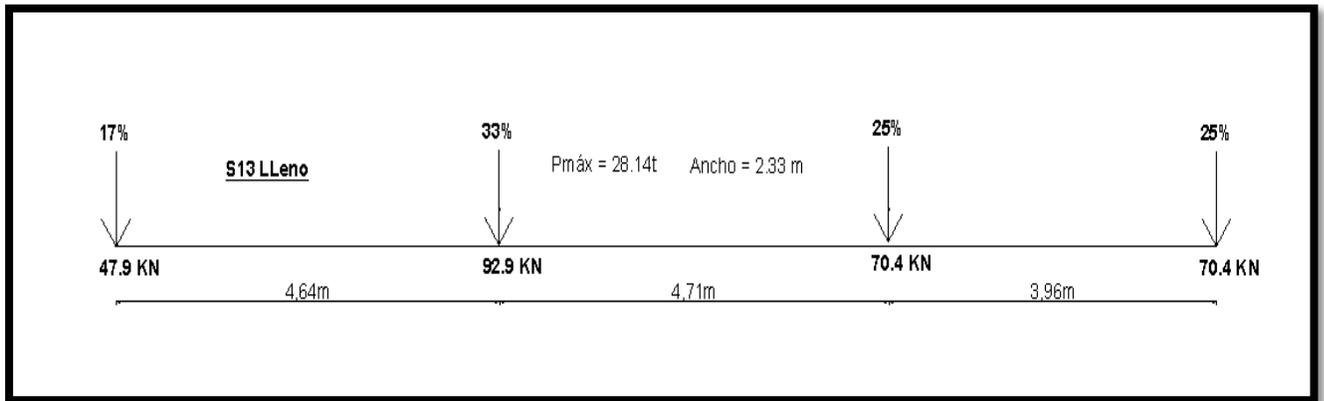


Figura II.21 caracterización de la silueta S13

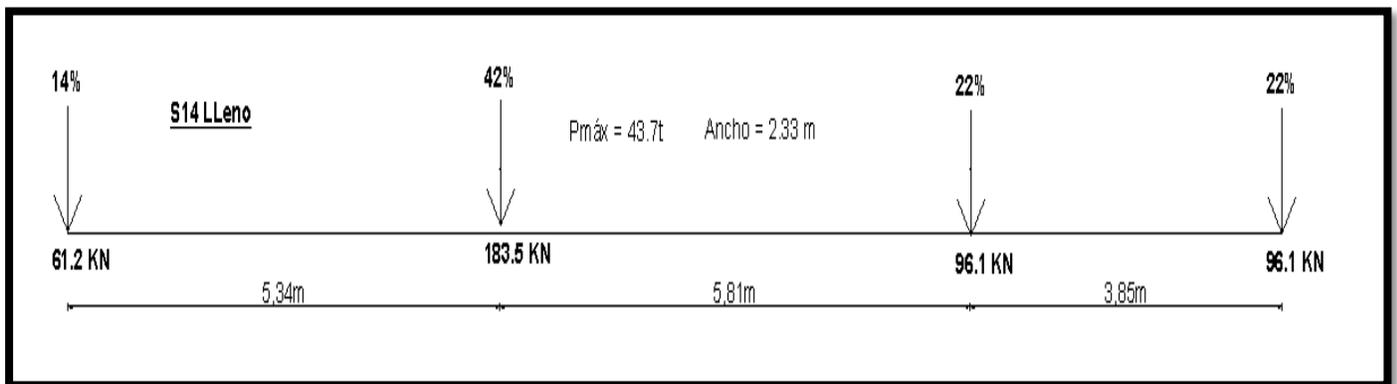


Figura II.22 caracterización de la silueta S14

**Anexo 4: Tabla II.4** Esfuerzos de momentos por secuencia en la viga 2

<b>Secuencia</b>	<b>Momentos</b>	<b>Secuencia</b>	<b>Momentos</b>	<b>Secuencia</b>	<b>Momentos</b>
0	281,2727	34	364,85	VP-68	516,53
1	292,6	35	308,73	VP-69	366,73
2	288,86	36	315,13	VP-70	296,45
3	350,54	37	285,5	VP-71	384,97
4	294,74	39	289,21	VP-72	375,51
5	340,41	40	285,85	VP-73	384,26
6	290,69	41	314,23	VP-74	309,02
7	308,34	42	285,73	VP-75	356,55
8	297,96	43	292,41	VP-76	336,49
9	289,96	44	309,24	VP-77	510,28
10	282,83	45	281,92	VP-78	356,29
11	309,33	46	296,69	VP-79	346,71
12	303,39	47	292,31	VP-80	339,96
13	300,93	48	286,01	VP-81	334,74
14	364,84	49	287,65	VP-82	305,52
15	280,79	50	338,4	VP-83	356,79
16	285,85	51	292,38	VP-84	350,62
17	309,7	52	307,1	VP-85	285,64
18	387,61	53	349,74	VP-86	317,61
19	305,03	54	287,68	VP-87	05,54
20	291,06	55	284,11	VP-88	335,86
21	291,68	56	275,94	VP-89	382,83
22	335,85	57	414,96	VP-90	362,6
23	343,24	58	369,55	VP-91	350,04
24	348,95	59	295,19	VP-92	360,79
25	280,39	60	325,88	VP-93	365,96
26	371,93	VP-61	325,87	VP-94	412,28
27	344,83	VP-62	404,32	VP-95	368,2
28	277,72	VP-63	284,68	VP-96	371,13
29	301,6	VP-64	315,13	VP-97	362,21
30	289,93	VP-65	308,33	VP-98	361,64
31	284,36	VP-66	404,73	VP-99	362,76
32	324,17	VP-67	384,66	VP-100	366,51
33	275,83				

