

**ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ
INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO IDU**



**INFORME PREELIMINAR
DETERMINACIÓN DEL PESO POR EJE DE LOS BUSES
ARTICULADOS Y BUSES ALIMENTADORES DEL SISTEMA
TRANSMILENIO**



CONSULTOR:

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C., DICIEMBRE DE 2004**



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 2. OBJETIVO | 3 |
| 4. PROCEDIMIENTO DE PESAJE | 4 |
| 4.1. PREELIMINARES | 4 |
| 4.2. CALIBRACIÓN DE LAS BÁSCULAS | 5 |
| 4.2.1. CALIBRACIÓN DE LAS BÁSCULAS EN LABORATORIO | 5 |
| 4.2.2. CALIBRACIÓN DE LAS BÁSCULAS EN CAMPO | 6 |
| 4.3. PROCEDIMIENTO PARA EL PESAJE | 9 |
| 5. RESULTADOS | 11 |
| 5.1. VEHICULOS ALIMENTADORES | 11 |
| 5.2. VEHICULOS ARTICULADOS | 15 |
| 5.2.1. VOLVO | 15 |
| 5.2.2. SCANIA | 16 |
| 5.2.3. MERCEDES BENZ | 17 |
| 5.2.4. IKARUS | 18 |
| 5.2.5. RESULTADOS COMPARATIVOS DE LOS DIFERENTES VEHICULOS ALIMENTADORES | 19 |



DETERMINACIÓN DEL PESO POR EJE DE LOS BUSES ARTICULADOS Y BUSES ALIMENTADORES DEL SISTEMA TRANSMILENIO

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe se entrega cumpliendo lo establecido en el Convenio de Cooperación 034 de 2004, cuyo objeto es “Aunar esfuerzos entre el IDU y la Universidad de los Andes para que la Universidad, adelante los estudios que permitan determinar el peso por eje de los buses articulados y alimentadores del sistema Transmilenio, en Bogotá D.C.”.

El documento incluye la descripción de los trabajos realizados con el fin de obtener las medidas más precisas posibles. Así mismo describe el procedimiento utilizado para la determinación del peso por eje de los buses alimentadores y articulados del sistema de transporte masivo Transmilenio. También se presentan los resultados obtenidos en la medición realizada el día 9 de diciembre del presente año, con el correspondiente análisis de resultados.

Por último se incluyen algunas recomendaciones de acuerdo a los resultados obtenidos.

2. OBJETIVO

Determinar el peso por eje de los buses articulados utilizados en el sistema de transporte masivo Transmilenio, y los buses de las rutas alimentadoras en diferentes condiciones de capacidad, en condiciones estáticas.



4. PROCEDIMIENTO DE PESAJE

4.1. PREELIMINARES

Para llevar a cabo la medición del peso por eje de los vehículos, se utilizaron dos básculas especialmente diseñadas para este propósito. Con el fin de obtener medidas lo más precisas posible fue necesario instalar y asegurar las básculas al nivel de la superficie de la rodadura.

Para cumplir con lo anterior, se procedió a cortar una losa previamente escogida, en el patio de las Américas. Los cortes se realizaron de forma rectangular de tal manera que permitieran la instalación de cada báscula, restringiendo el desplazamiento en sentido longitudinal, y permitiendo el traslado transversal de las básculas para centrarlas con respecto al centro de cada par de ruedas gemelas.

Con el corte se extrajeron los bloques de concreto de espesor de 20 cms aproximadamente. La cavidad resultante se rellenó con un mortero epóxico de alta resistencia, dejando 8 cms de profundidad correspondientes al espesor de cada báscula (ver figura 1 y 2).



Figura 1. Instalación de básculas.

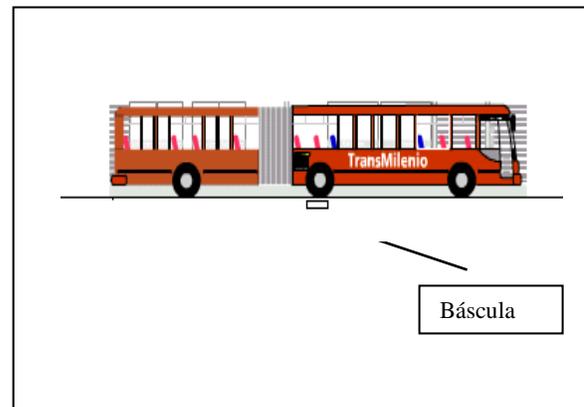


Figura 2. Esquema de ubicación de las Básculas.

4.2. CALIBRACIÓN DE LAS BÁSCULAS

4.2.1. CALIBRACIÓN DE LAS BÁSCULAS EN LABORATORIO

La calibración en laboratorio, se llevó a cabo utilizando la máquina universal dinámica servo-controlada MTS, dicha máquina tiene una capacidad de carga de 100 ton. Esta se encuentra certificada por la Superintendencia de Industria y Comercio.

El procedimiento de calibración se adelantó colocando cada báscula sobre la base de la máquina. Ubicando cada báscula en el centro geométrico de la base. Sobre las celdas se carga de las básculas; se colocó un apoyo cilíndrico de hierro fundido. Esto con el fin de que la máquina aplicara la carga de manera uniforme, y estuviera exenta de excentricidades por parte del cabezal transmisor de carga.

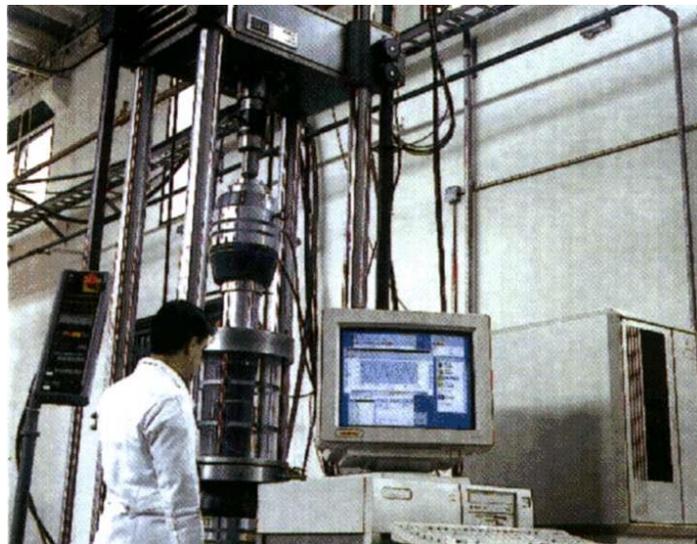


Figura 3. Máquina universal MTS.

Se le practicaron cargas de repetitividad, que iban siendo comparadas con lo mostrado por el convertidor análogo-digital conectado a cada báscula.

4.2.2. CALIBRACIÓN DE LAS BÁSCULAS EN CAMPO

La calibración de las básculas en campo se realizó el 3 de diciembre. El objetivo principal de esta actividad era realizar medidas de repetitividad en relación con todo el proceso de medida. El resultado de las mediciones fue muy alentador encontrando en las diferentes repeticiones de medidas una desviación estándar de (Ver tabla de resultados siguiente pagina).



Figura 4. Calibración de vehículo alimentador



Figura 5. Eje trasero colocado sobre la báscula durante el proceso de calibración.

| <i>PORTAL AMERICAS</i> | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| <i>Fecha</i> | <i>Diciembre 3 de 2004</i> | |
| <i>Tipo</i> | <i>Alimentador</i> | <i>Numero</i> |
| <i>Placa</i> | <i>VDF 964</i> | <i>Mercedez Benz</i> |
| <i>Observaciones</i> | | |
| | | |
| <i>Eje</i> | <i>Pesaje (Kg)</i> | <i>Personas</i> |
| 1 | 3270 | 0 |
| 1 | 3234 | 0 |
| 1 | 3230 | 0 |
| 1 | 3234 | 0 |
| 1 | 3230 | 0 |
| Media | 3240 | |
| Desviación Estandar | 15,3 | |
| | | |
| 2 | 6432 | 0 |
| 2 | 6434 | 0 |
| 2 | 6432 | 0 |
| 2 | 6422 | 0 |
| 2 | 6434 | 0 |
| Media | 6431 | |
| Desviación Estandar | 5,0 | |

Tabla 1. Medidas de repetitividad bus alimentador vacío.

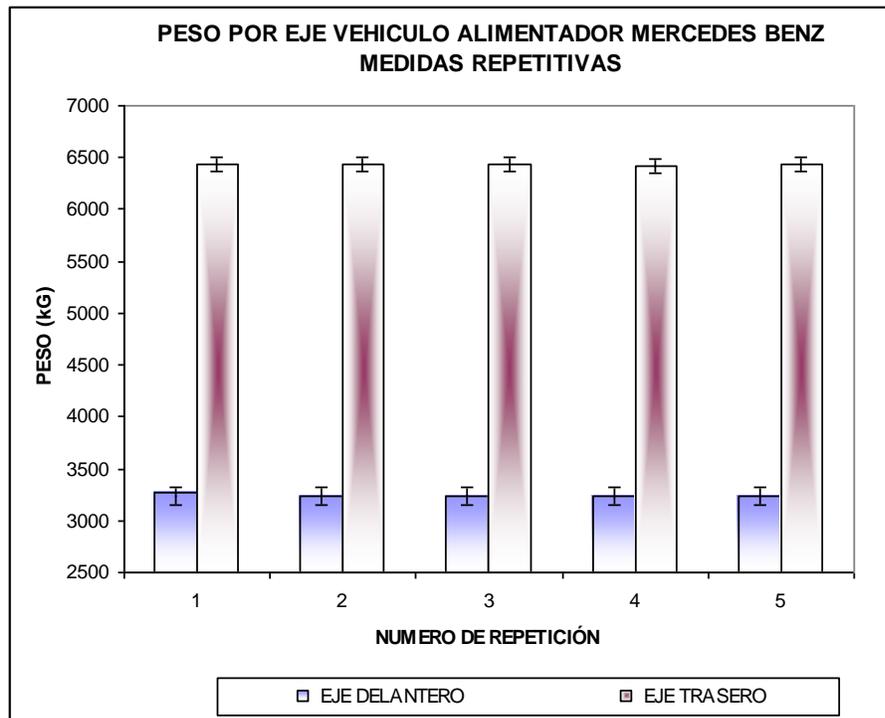


Grafico 1. Medidas de repetitividad con bus alimentador vacío.



Figura 6. Calibración de báscula con vehículo articulado.



Figura 7. Eje trasero colocado sobre la báscula durante el proceso de calibración.



| PORTAL AMERICAS | | |
|----------------------------|---------------------|-----------------|
| Fecha | Diciembre 3 de 2004 | |
| Tipo | Transmilenio | Numero |
| Placa | VDA 385 | K004 |
| Observaciones | | |
| s | | |
| Eje | Pesaje (Kg) | Personas |
| 1 | 4936 | 0 |
| 1 | 4926 | 0 |
| 1 | 4952 | 0 |
| 1 | 4954 | 0 |
| 1 | 4956 | 0 |
| Media | 4945 | |
| Desviación Estandar | 13,2 | |
| 2 | 4320 | 0 |
| 2 | 4350 | 0 |
| 2 | 4378 | 0 |
| 2 | 4356 | 0 |
| 2 | 4366 | 0 |
| Media | 4354 | |
| Desviación Estandar | 21,8 | |
| 3 | 8240 | 0 |
| 3 | 8228 | 0 |
| 3 | 8216 | 0 |
| 3 | 8220 | 0 |
| 3 | 8222 | 0 |
| Media | 8225 | |
| Desviación Estandar | 9,3 | |

Tabla 2. Medidas de repetitividad bus articulado vacío.

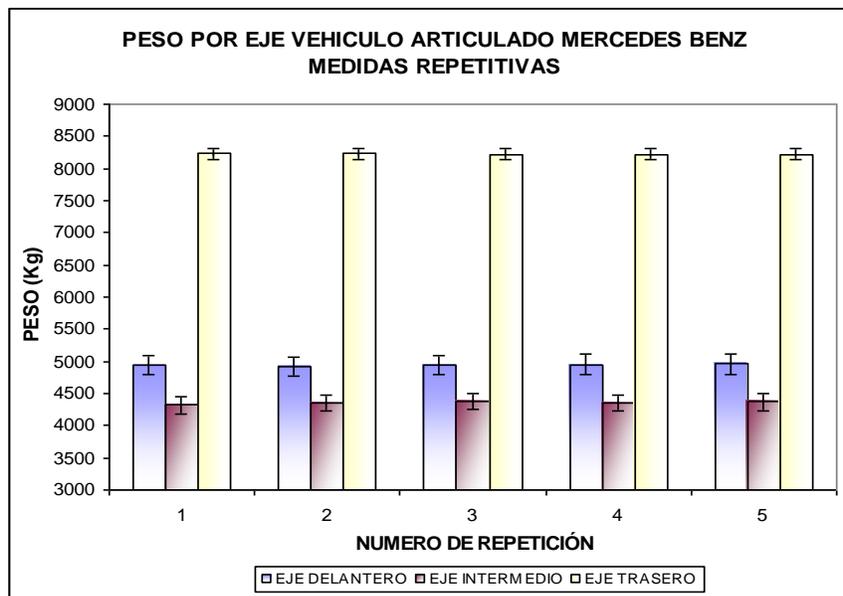


Grafico 2. Medidas de repetitividad con bus articulado vacío.

4.3. PROCEDIMIENTO PARA EL PESAJE

El procedimiento para el pesaje fue el siguiente:

1. Se dispuso de las 7 clases de buses existentes en todo el sistema, estos buses fueron previamente escogidos por el IDU. De las 7 clases de buses 4 fueron buses articulados y 3 buses alimentadores (ver tabla).

| BUSES ARTICULADOS | BUSES ALIMENTADORES |
|-------------------|---------------------|
| VOLVO | ISUZU CHR 7,2 |
| MERCEDES BENZ | MERCEDES BENZ #5027 |
| IKARUS(GNC) | MERCEDES BENZ #4505 |
| SCANIA | |

Tabla 3. Buses utilizados para las mediciones.

2. Se procedió a ubicar cada bus sobre las básculas, colocando cada llanta del eje de manera centrada sobre la respectiva báscula (figura 8 y 9).

Se inició con el eje delantero, luego de tener el eje centrado se tomó la medida con 0, 48, 80 y 160 pasajeros para los buses articulados

Para los buses alimentadores las condiciones de carga fueron las siguientes : 0, 40 y 80 pasajeros.



Figura 8. Se observa ubicación de la llanta sobre la báscula.



Figura 9. Ubicación centrada de la llanta sobre la báscula vista lateral.

Este procedimiento se repitió para cada clase de bus sucesivamente.



El valor obtenido de cada medición era registrado en un convertidor análogo-digital marca OHAUS I-10 tal como se observa en la figura 10.



Figura 10. Convertidor análogo-digital utilizado.



Figura 10. Vehículo alimentador en condición de carga máxima

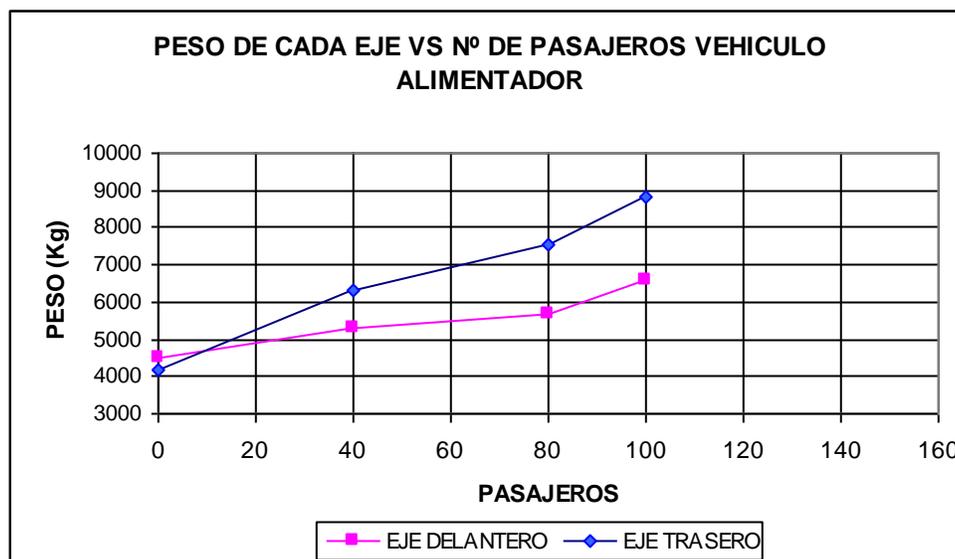


5. RESULTADOS

5.1. VEHICULOS ALIMENTADORES

5.1.1. MERCEDES BENZ SIC 003

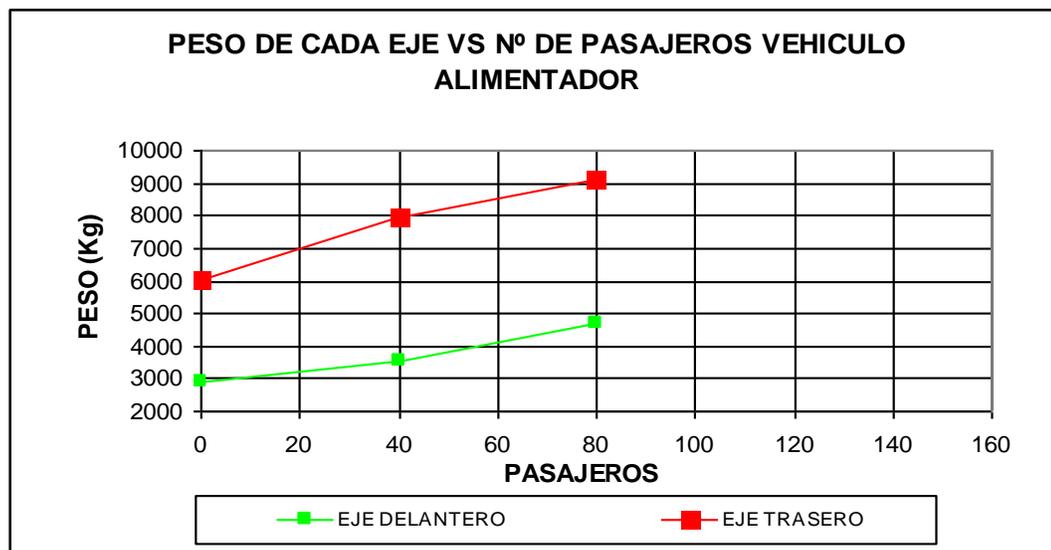
| PORTAL AMERICAS | | | |
|------------------------|---------------------|-----------------|------|
| Fecha | Diciembre 9 de 2004 | | |
| Tipo | Alimentador | Numero | 4505 |
| Placa | SIC 003 | Mercedez Benz | |
| | | | |
| Eje | Pesaje (Kg) | Personas | |
| 1 | 4490 | 0 | |
| 1 | 5288 | 40 | |
| 1 | 5670 | 80 | |
| 1 | 6602 | 100 | |
| | | | |
| 2 | 4196 | 0 | |
| 2 | 6328 | 40 | |
| 2 | 7540 | 80 | |
| 2 | 8840 | 100 | |





5.1.2. IZUZU SIA 851

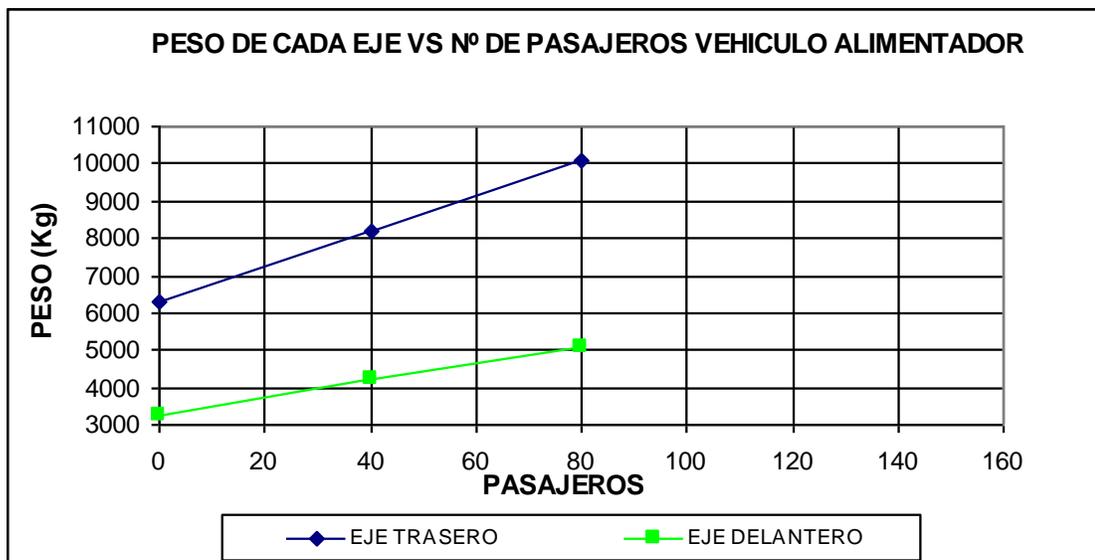
| PORTAL AMERICAS | | | |
|------------------------|---------------------|-----------------|------|
| Fecha | Diciembre 9 de 2004 | | |
| Tipo | Alimentador | IZUZU | 4010 |
| Placa | SIA 851 | | |
| | | | |
| Eje | Pesaje (Kg) | Personas | |
| 1 | 2928 | 0 | |
| 1 | 3524 | 40 | |
| 1 | 4710 | 80 | |
| | | | |
| 2 | 6046 | 0 | |
| 2 | 7940 | 40 | |
| 2 | 9100 | 80 | |





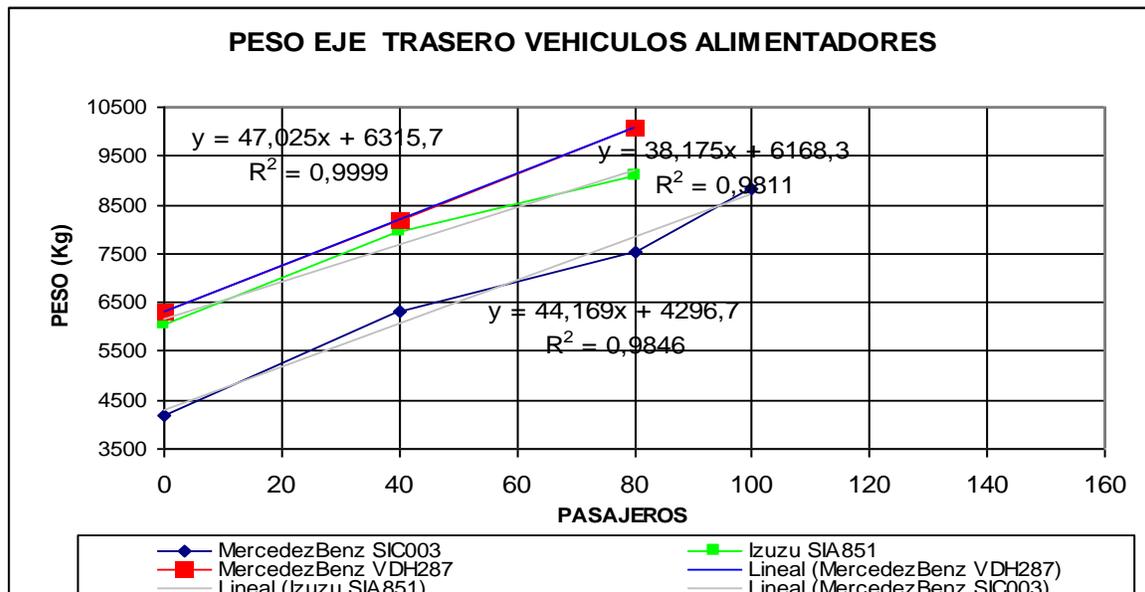
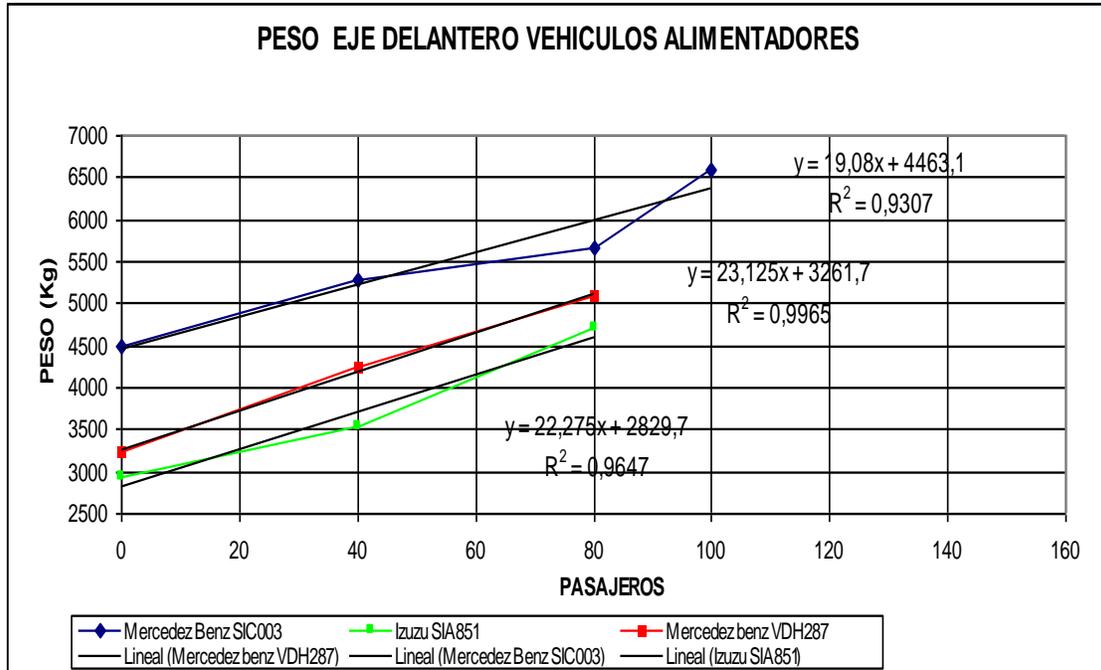
5.1.3. MERCEDES BENZ VDH 287

| PORTAL AMERICAS | | | |
|------------------------|---------------------|--------------------------|------|
| Fecha | Diciembre 9 de 2004 | | |
| Tipo | Alimentador | MERCEDES BENZ | 5027 |
| Placa | VDH 287 | | |
| Eje | | | |
| | Pesaje (Kg) | Personas | |
| 1 | 3230 | 0 | |
| 1 | 4250 | 40 | |
| 1 | 5080 | 80 | |
| Eje | | | |
| 2 | 6328 | 0 | |
| 2 | 8172 | 40 | |
| 2 | 10090 | 80 | |





5.1.4. RESULTADOS COMPARATIVOS DE LOS DIFERENTES VEHICULOS ALIMENTADORES

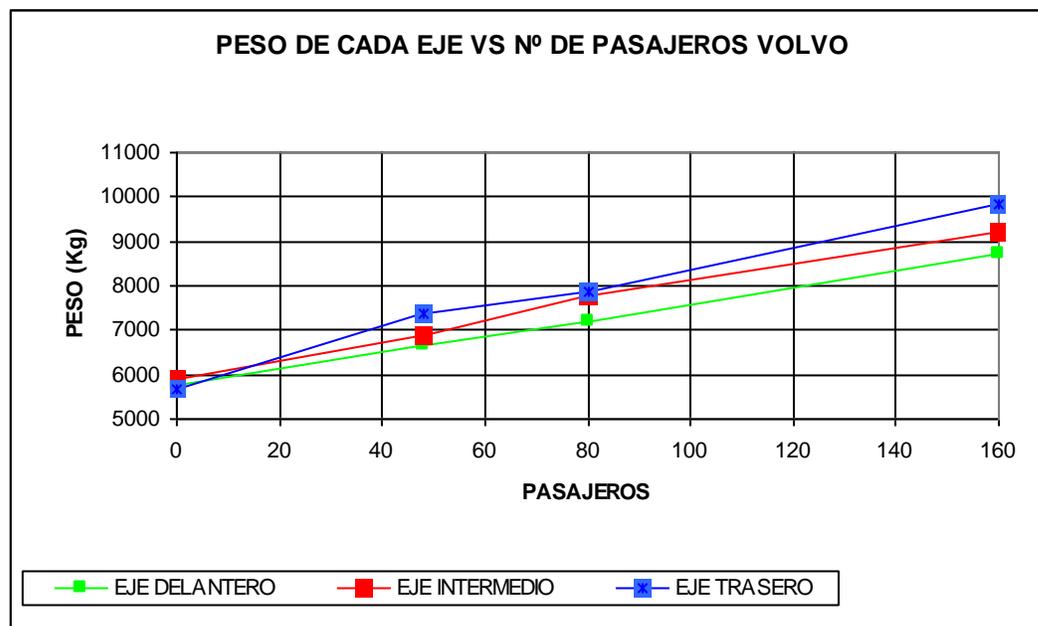




5.2. VEHICULOS ARTICULADOS

5.2.1. VOLVO

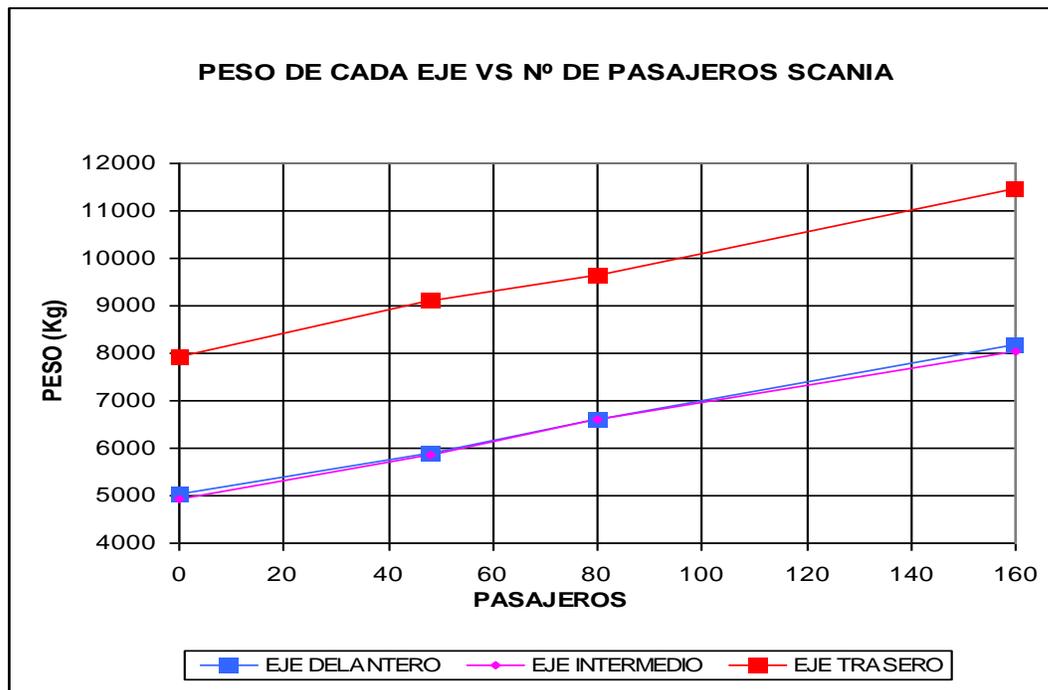
| PORTAL AMERICAS | | |
|------------------------|---------------------|-----------------|
| Fecha | Diciembre 9 de 2004 | |
| Tipo | Transmilenio | VOLVO |
| Placa | | |
| Observaciones | Motor adelante | |
| | | |
| Eje | Pesaje (Kg) | Personas |
| 1 | 5754 | 0 |
| 1 | 6664 | 48 |
| 1 | 7210 | 80 |
| 1 | 8706 | 160 |
| | | |
| 2 | 5880 | 0 |
| 2 | 6864 | 48 |
| 2 | 7780 | 80 |
| 2 | 9196 | 160 |
| | | |
| 3 | 5660 | 0 |
| 3 | 7362 | 48 |
| 3 | 7886 | 80 |
| 3 | 9820 | 160 |





5.2.2. SCANIA

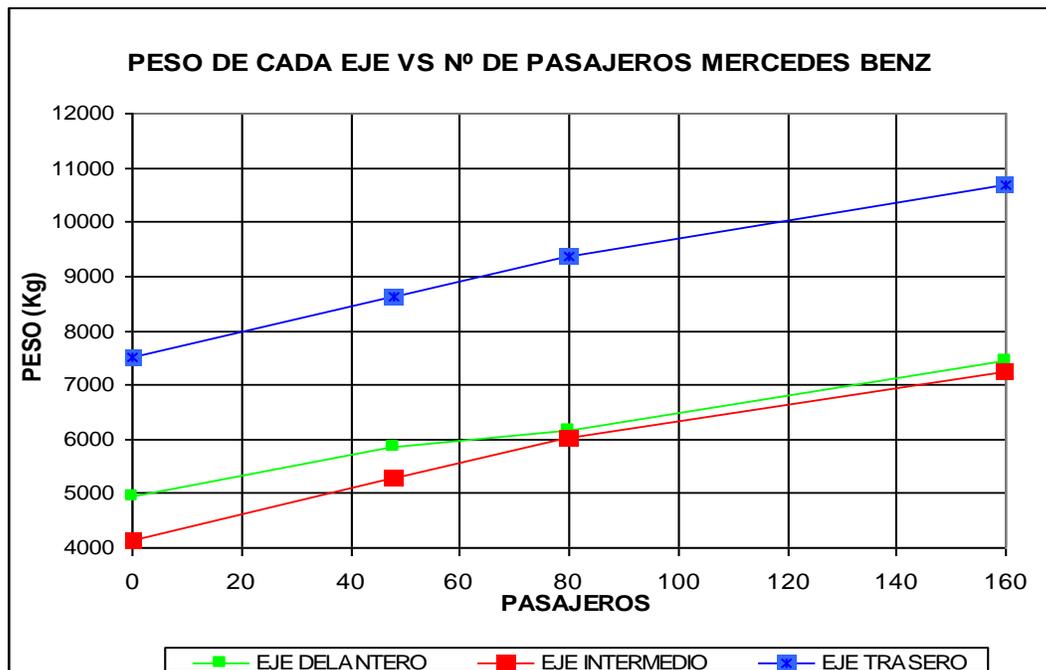
| PORTAL AMERICAS | | | |
|------------------------|---------------------|-----------------|------|
| Fecha | Diciembre 9 de 2004 | | |
| Tipo | Transmilenio | SCANIA | S013 |
| Placa | VDA 473 | | |
| Observaciones | Motor atrás | | |
| Eje | Pesaje (Kg) | Personas | |
| 1 | 5048 | 0 | |
| 1 | 5890 | 48 | |
| 1 | 6592 | 80 | |
| 1 | 8178 | 160 | |
| 2 | 4914 | 0 | |
| 2 | 5870 | 48 | |
| 2 | 6610 | 80 | |
| 2 | 8050 | 160 | |
| 3 | 7924 | 0 | |
| 3 | 9090 | 48 | |
| 3 | 9660 | 80 | |
| 3 | 11480 | 160 | |





5.2.3. MERCEDES BENZ

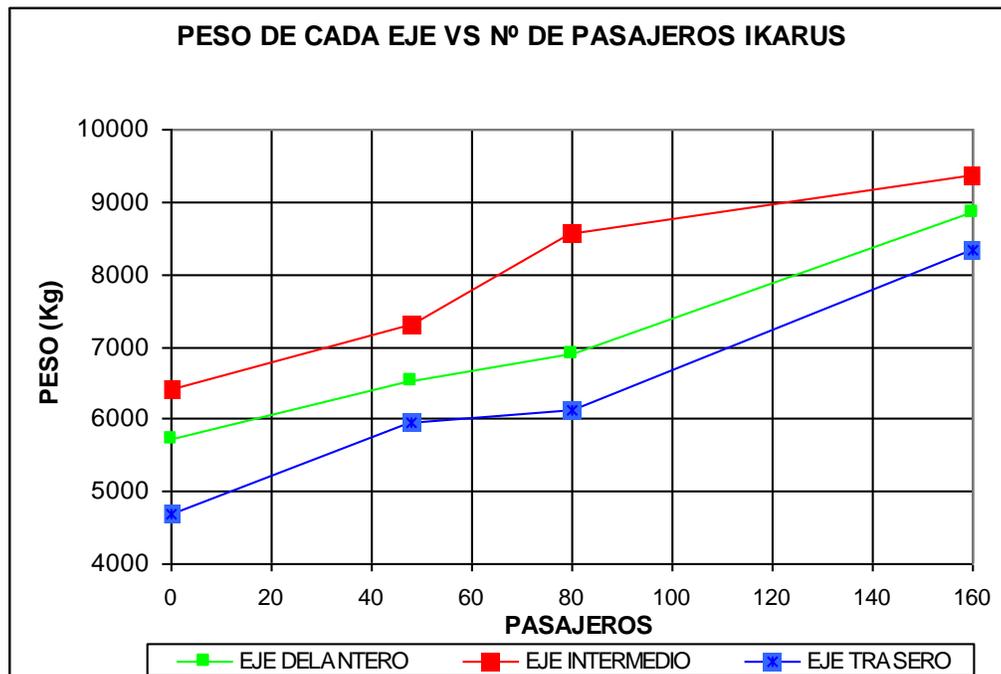
| PORTAL AMERICAS | | | |
|------------------------|---------------------|--------------------------|------|
| Fecha | Diciembre 9 de 2004 | | |
| Tipo | Transmilenio | MERCEDES BENZ | K009 |
| Placa | VDA 083 | | |
| Observaciones | Motor atrás | | |
| Eje | Pesaje (Kg) | Personas | |
| 1 | 4942 | 0 | |
| 1 | 5862 | 48 | |
| 1 | 6150 | 80 | |
| 1 | 7456 | 160 | |
| 2 | 4122 | 0 | |
| 2 | 5292 | 48 | |
| 2 | 6030 | 80 | |
| 2 | 7240 | 160 | |
| 3 | 7494 | 0 | |
| 3 | 8610 | 48 | |
| 3 | 9360 | 80 | |
| 3 | 10700 | 160 | |





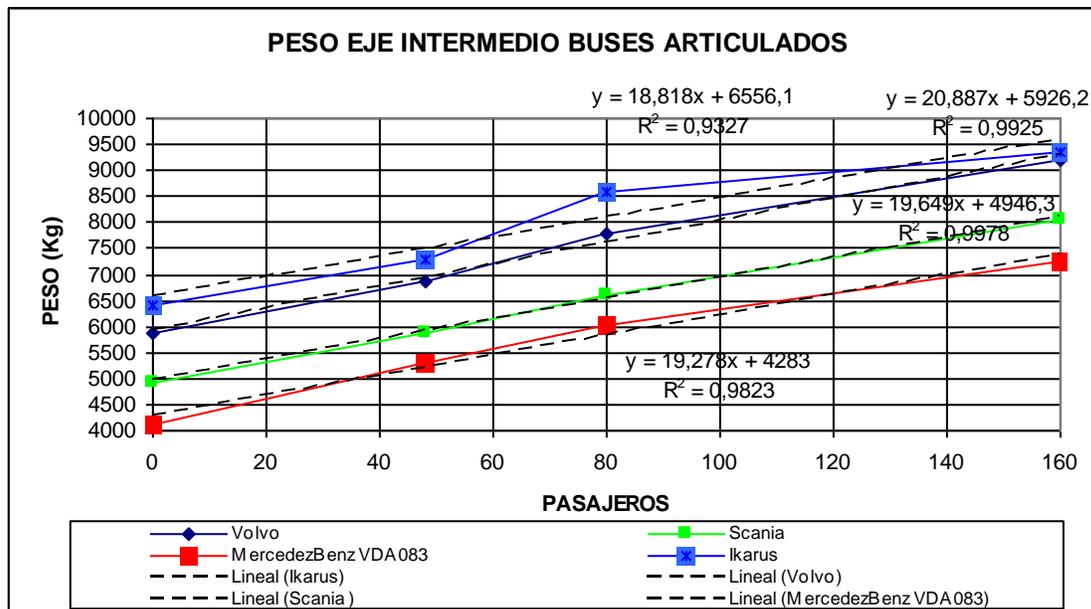
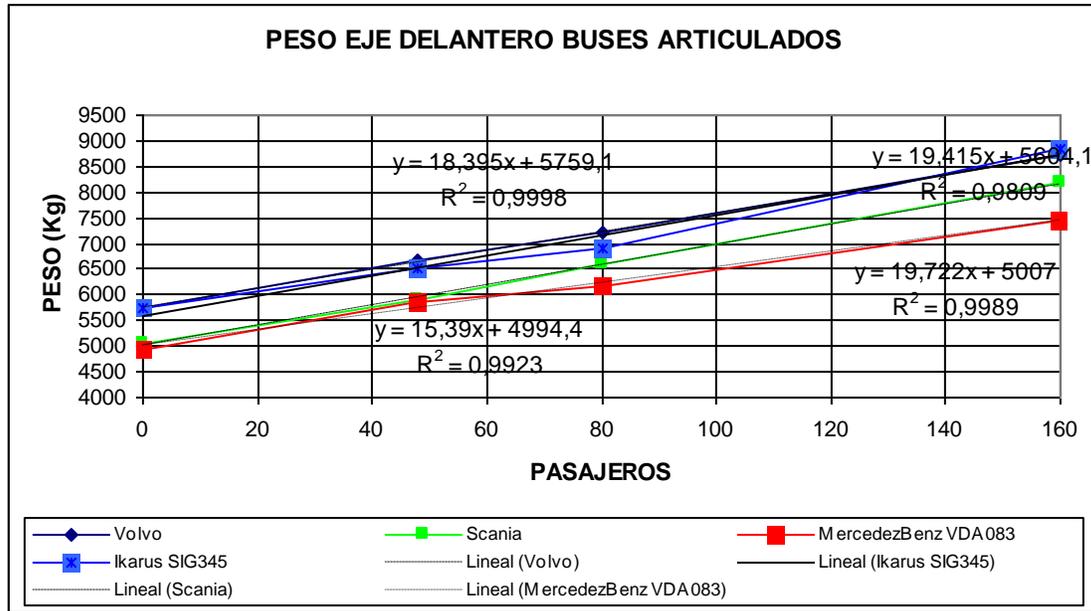
5.2.4. IKARUS

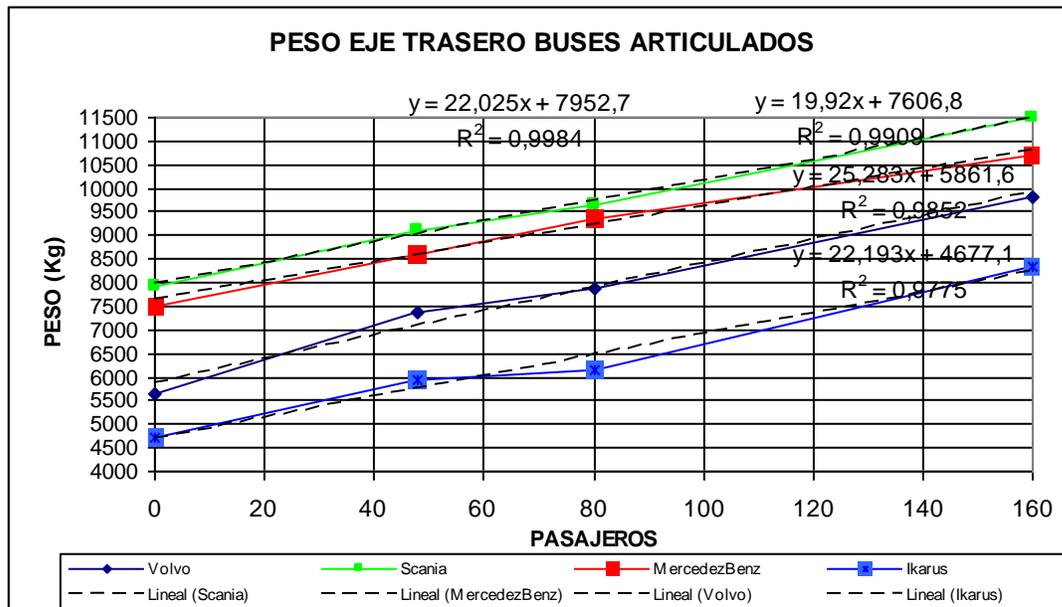
| PORTAL AMERICAS | | | |
|------------------------|---------------------|-----------------|------|
| Fecha | Diciembre 9 de 2004 | | |
| Tipo | Transmilenio | IKARUS | M126 |
| Placa | SIG 345 | | |
| Observaciones | Motor adelante | | |
| Eje | Pesaje (Kg) | Personas | |
| 1 | 5736 | 0 | |
| 1 | 6530 | 48 | |
| 1 | 6902 | 80 | |
| 1 | 8840 | 160 | |
| | | | |
| 2 | 6412 | 0 | |
| 2 | 7302 | 48 | |
| 2 | 8570 | 80 | |
| 2 | 9360 | 160 | |
| | | | |
| 3 | 4700 | 0 | |
| 3 | 5940 | 48 | |
| 3 | 6130 | 80 | |
| 3 | 8330 | 160 | |





5.2.5. RESULTADOS COMPARATIVOS DE LOS DIFERENTES VEHICULOS ALIMENTADORES





6. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES PRODUCIDOS POR LAS CARGAS

Cálculo de Esfuerzos y Deformaciones En las Losas de Concreto Hidráulico

Debido al alto módulo de elasticidad del concreto hidráulico, los esfuerzos inducidos por el tránsito son fundamentalmente absorbidos por flexión de la capa de concreto y los esfuerzos de compresión que se transmiten al suelo son relativamente bajos. Con el fin de analizar el efecto de cada tipo de bus se calculó el daño que cada uno de ellos puede producir en una estructura típica utilizada en las troncales que actualmente se construyen.

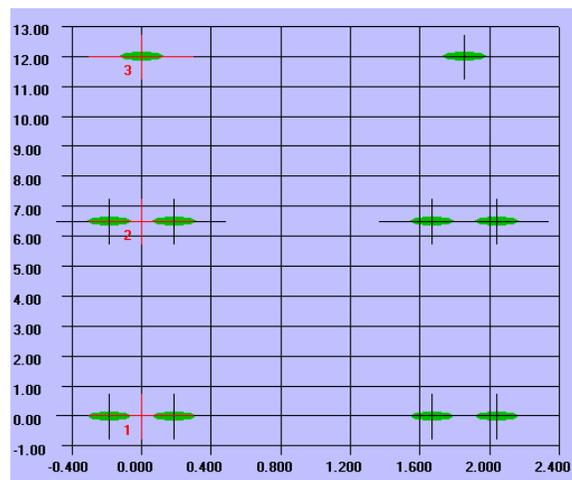


Figura 1: Geometría de las cargas del bus Transmilenio

Para este trabajo, el cálculo de esfuerzos y deformaciones en la capa de concreto hidráulico se realizó utilizando el programa Alizé Win. Este programa permite realizar cálculos que involucran la geometría y las cargas reales de un bus del sistema Transmilenio. En la figura 1 se muestra la configuración utilizada en los cálculos.

Mediante este programa es posible calcular las deflexiones producidas por el bus, así como también los esfuerzos de tensión en la parte inferior de la capa de concreto y las deformaciones verticales en la subrasante entre otras cosas. En las figuras 2 a 4 se muestran ejemplos de los resultados obtenidos aplicando sobre una estructura de pavimento el conjunto de cargas correspondientes al bus Transmilenio. Las gráficas corresponden a un mallado que parte desde el eje de simetría (eje central del bus), hasta 2 m a la derecha del extremo de los ejes trasero e intermedio.

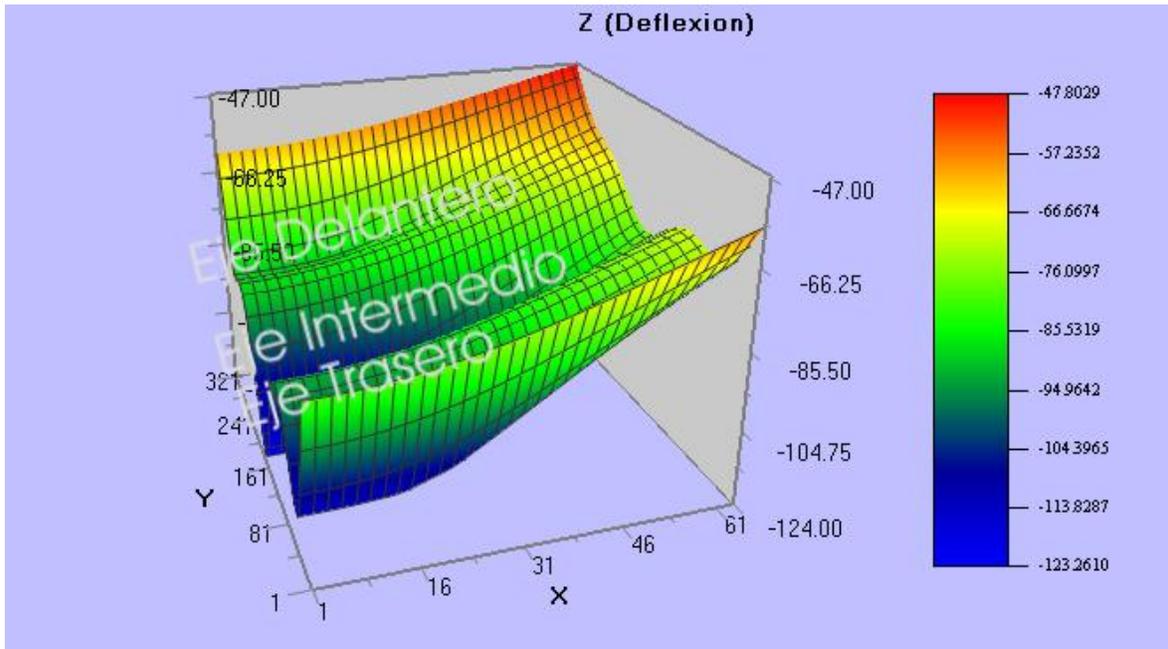


Figura 2: Deflexiones producidas por el conjunto de cargas del bus Transmilenio

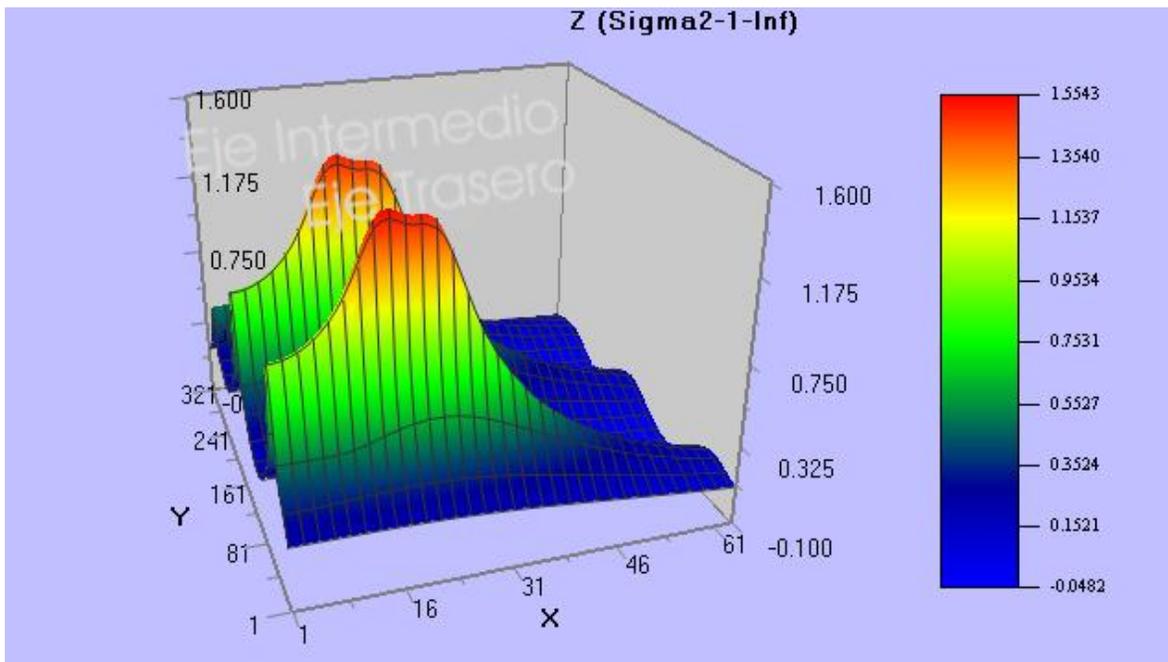


Figura 3: Esfuerzos de tensión en la parte inferior de la capa de concreto hidráulico producidas por el conjunto de cargas del bus Transmilenio.

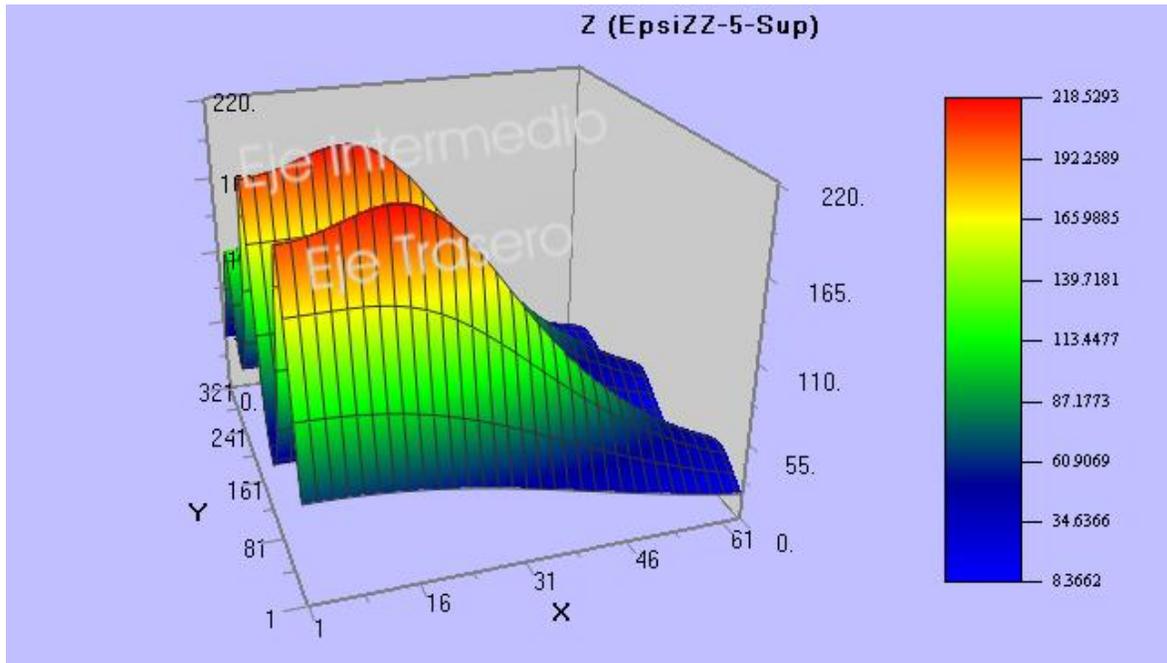


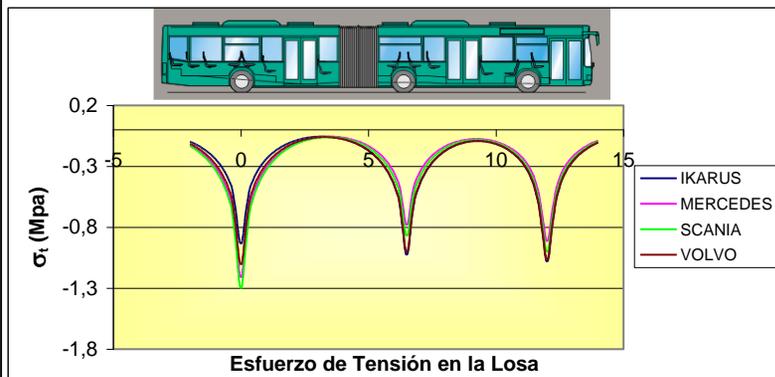
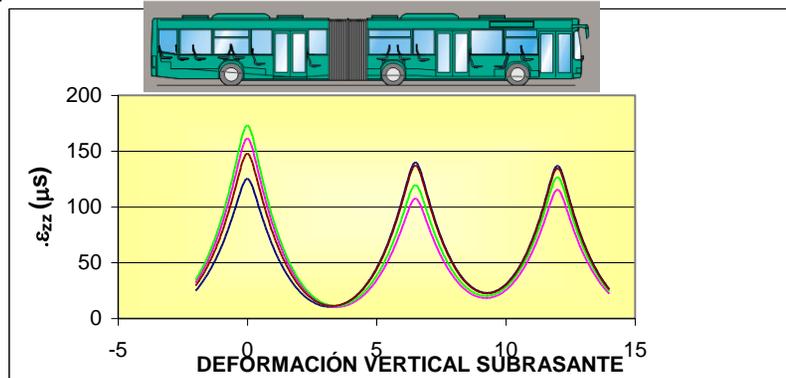
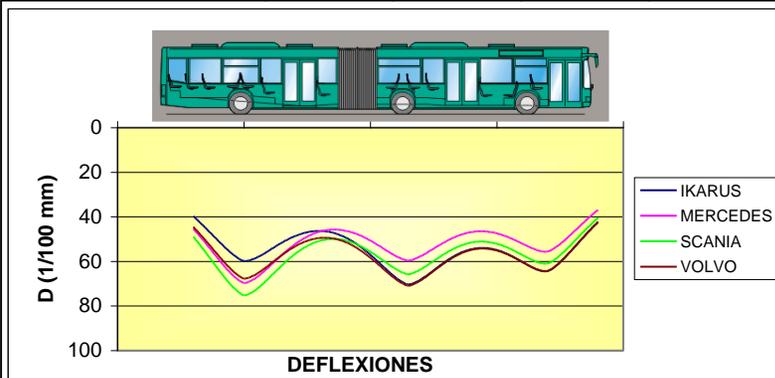
Figura 4: Deformaciones verticales en la subrasante producidas por el conjunto de cargas del bus Transmilenio.

Los resultados de deflexiones y esfuerzos producidos por los diferentes tipos de buses se muestran en la figura 5. Se observa que dependiendo del tipo de bus el daño unitario producido por el pavimento es diferente. En efecto, para la estructura típica utilizada el daño varía entre $1.17 \cdot 10^{-10}$ para el bus Ikarus a $1.19 \cdot 10^{-9}$ para el bus Scania. Lo anterior significa que la estructura utilizada en los cálculos soportaría 8500 millones de repeticiones del tren de cargas del bus Ikarus y 840 millones de repeticiones de cargas del bus Scania. Estos valores son sensiblemente altos y dependen de las hipótesis utilizadas con respecto a la calidad de los materiales.

En la figura 6 se muestra el daño producido por los diferentes tipos de buses comparado con el daño producido por un eje simple de 13 toneladas. Se observa que el daño producido por el bus articulado es inferior al que produce un eje simple de 13 toneladas. Lo anterior permite concluir que la utilización para el diseño del pavimento de un tren de cargas de compuesto por dos ejes de 12.5 toneladas y uno de 7.5 toneladas es conservativo para propósitos de diseño de pavimento.

CÁLCULO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES CALZADAS TRANSMILENIO

| ESTRUCTURA DE PAVIMENTO | | | | |
|---------------------------|----------|-------------|------------------|--------|
| MATERIAL | ESPESOR | PROPIEDADES | | |
| | | E(Mpa) | σ_6 (Mpa) | (-1/b) |
| Concreto Hidráulico MR=50 | Variable | 27000 | 2 | 15 |
| Base Asfáltica | 0,06 | 4000 | | |
| Suelo-Cemento | 0,125 | 1700 | | |
| Material Granular | 0,15 | 100 | | |
| Subrasante | Inf | 40 | | |



| Tipo de Bus | DAÑO UNITARIO Pf=50% | | |
|----------------|----------------------|---------------|---------------|
| | Daño (fatiga) | Daño/Daño 13t | Daño/Daño 8.2 |
| IKARUS | 1,17E-10 | 0,09 | 81,12 |
| MERCEDES | 4,15E-10 | 0,33 | 288,62 |
| SCANIA | 1,19E-09 | 0,96 | 830,32 |
| VOLVO | 1,88E-10 | 0,15 | 130,69 |
| Eje Simple 13t | 1,24E-09 | | |
| Eje Simple 8.2 | 1,44E-12 | | |

Figura 5: Esfuerzos y deformaciones producidos por los diferentes tipos de buses articulados

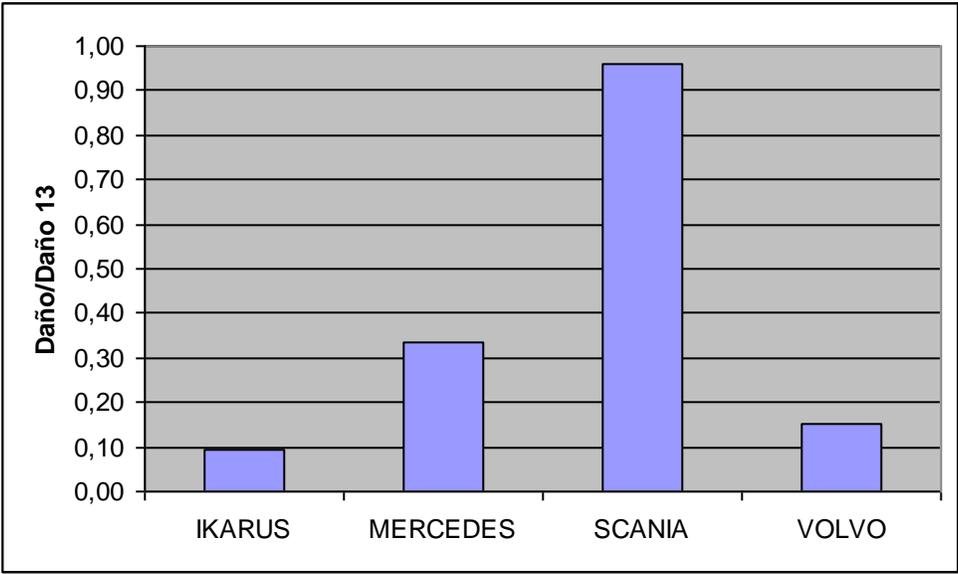


Figura 6: Daño bus articulado/Daño eje 13 toneladas



7 CONCLUSIONES

De las medidas y los cálculos realizados se puede concluir lo siguiente:

- 1) Las cargas que transmiten al pavimento los buses articulados Transmilenio son inferiores a las especificadas por el fabricante.
- 2) Dependiendo del tipo de bus y en particular de la ubicación del motor existen buses que producen más daño sobre el pavimento. Esta diferencia puede llegar incluso a un factor de 10.
- 3) Los diseños de pavimento realizados con el tren de cargas propuesto por el fabricante son sensiblemente conservativos. Sin embargo para precisar esta conclusión se debe conocer mejor las características de los materiales de pavimento lo cual supera el alcance de este estudio.