

# Determinación y solución a los fallos estructurales en un autobús urbano

## Determination and solution to the structural failures in a urban bus



■ ■ ■ ■ Mario Acosta-Flores<sup>1</sup>, Eusebio Jiménez-López<sup>2</sup> y Francisco Cuenca-Jiménez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías. Avenida Universidad 1001, Col. Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos (México).

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica del Sur de Sonora-ULSA Noroeste-IIIMM, Departamento de Investigación, 85000, Cd. Obregón, Sonora (México).

<sup>3</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, DIMEI, 04510, Cd. de México (México).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8791> | Recibido: 09/04/2018 • Inicio Evaluación: 11/04/2018 • Aceptado: 19/06/2018

### ABSTRACT

• The origin of an automotive structural mechanical failure can be originated by diverse causes, due for example to the structural geometry, the materials of manufacture, the processes of manufacture and the mechanical loads, that appear during the time of service for the that were designed, among other causes. The determination of the mechanical causes that provoke such failures is not a simple task, so it is recommended to apply systematic methods that allow identifying and characterizing them efficiently. Currently, there are experimental and computational tools, which can be used of an integral way to assess failures, locate them and give them a practical solution.

In this article an efficient method is presented, which was used to identify and quantify the causes that originated mechanical structural failures (generated by cracks) in a bus. Through a numerical method, was searched for and found the solution to the problem, which was implemented and evaluated. The method integrates experimental and numerical tools for the analysis of stresses and deformations (photoelasticity and electrical extensometry) required for the study of failures. Static tests (torsion and flexion) and braking, curving and travel tests were carried out, with the purpose of obtaining data of stresses and strains that would allow evaluating the mechanical conditions of the bus. The load conditions of the tests were a Gross Vehicle Weight (PBV) and PBV + 20%. To carry out the road tests, only the information of the edges and potholes was considered, since they turned out to be the events that caused the highest levels of stress.

The study was carried out on a prototype bus, which did not present structural mechanical failures. The case study presented in this paper refers to finding the causes and the solution to a problem of a failure by a fissure located on the floor of a bus. Finally, the results obtained show the efficiency of the proposed analysis method as well as the integration of the experimental and numerical tools used, in a systematic and integral way identifying the causes that originated a failure in the structure of the bus.

• **Keywords:** Mechanical failures, experimental methods, numerical methods for stress analysis, automotive structures.

manufactura y las cargas mecánicas, que se presentan durante el tiempo de servicio para el que fueron diseñadas, entre otras causas. La determinación de las causas mecánicas que provocan dichos fallos, no es tarea simple, por lo que es recomendable aplicar métodos sistemáticos que permitan identificarlos y caracterizarlos de forma eficiente. Actualmente, se cuenta con herramientas experimentales y computacionales las cuales pueden ser utilizadas de manera integral para evaluar los fallos, localizarlos y darles una solución práctica.

En este artículo se presenta un método eficiente, el cual fue utilizando para identificar y cuantificar las causas que originaron fallos estructurales mecánicos (generados por fisuras) en un autobús. A través de un método numérico se buscó y se encontró la solución al problema, la cual fue implementada y evaluada. El método integra herramientas experimentales y numéricas para el análisis de esfuerzos y de deformaciones (Fotoelasticidad y extensometría eléctrica) requerido para el estudio de los fallos. Fueron realizadas pruebas estáticas (torsión y flexión) y pruebas de frenado, curvo y recorrido, con la finalidad de obtener datos de esfuerzos y deformaciones que permitiesen evaluar las condiciones mecánicas del autobús. Las condiciones de carga de las pruebas fueron a Peso Bruto Vehicular (PBV) y PBV+20%. Para realizar las pruebas de recorrido se consideró solo la información de los topes y baches, ya que resultaron ser los eventos que provocaron los mayores niveles de esfuerzos.

El estudio se llevó a cabo sobre un prototipo de un autobús, el cual no presentaba fallos mecánicos estructurales. El caso de estudio que se presenta en este trabajo se refiere a encontrar las causas y la solución a un problema de un fallo por fisura localizado sobre el piso de un autobús.

Finalmente, los resultados obtenidos muestran la eficiencia, tanto del método de análisis propuesto como de la integración de las herramientas experimentales y numéricas utilizadas, al identificar en forma sistemática e integral las causas que originaron un fallo en la estructura del autobús.

**Palabras clave:** Fallos Mecánicos, Métodos Experimentales, Métodos Numéricos para análisis de esfuerzos, Estructuras automotrices.

### RESUMEN

El origen de un fallo mecánico estructural automotriz puede ser originado por diversas causas, debido por ejemplo a la geometría estructural, los materiales de fabricación, los procesos de

### 1. INTRODUCCIÓN

Un problema común y frecuente que se presenta en las estructuras automotrices son las fisuras ocasionadas por fallos estructurales. Los fallos pueden ser fisuras simples; sin embargo, exis-

ten casos en que éstos pueden ser más graves y pueden provocar que las estructuras automotrices resulten comprometidas o, en su caso, que pierdan su funcionalidad para la cual fueron diseñadas. La solución a un problema de éste tipo es posible sólo si se identifican claramente las causas que originan los fallos. Cabe mencionar que no es suficiente con conocer dichas causas, necesariamente se requiere de un análisis correcto de la problemática, lo que permitiría proponer soluciones factibles que hagan posible una vez más el funcionamiento de las estructuras para el ciclo de vida para lo cual fueron garantizadas. Las fisuras son problemas que pueden ser causadas por la combinación de varios factores, tales como: la calidad de los materiales de fabricación, la geometría de la estructura y las condiciones de cargas (por ejemplo, flexión, torsión, cargas combinadas, etc.).

Para determinar las causas de los fallos, es necesario utilizar de forma integral las herramientas experimentales y computacionales que existen para tal propósito, así como también de la aplicación del método científico y la teoría de la mecánica durante todo el proceso del análisis. Los métodos experimentales y computacionales utilizados para el análisis de esfuerzos, son utilizados en la industria automotriz para la solución de problemas estructurales. Por ejemplo, en [1] se propuso una metodología para el análisis mecánico de desgaste de válvulas de combustión interna; la metodología integra una combinación de técnicas experimentales y numéricas. En [2] se aplicó el método del elemento finito (FEM) para realizar un análisis estático de un montacargas con la finalidad de evaluar la geometría original de las piezas. En [3] se aplicó FEM para evaluar la distribución de esfuerzos en el chasis de un autobús. En un trabajo presentado en [4], fue utilizado el método experimental de fotoelasticidad para evaluar la resistencia a la fractura de un material compuesto de zirconio. En [5] se presentó un estudio numérico-experimental en el que se analizó el problema del proceso de forjado de un eje automotriz. En [6] se realizó un análisis mecánico a plataformas de dos pisos integradas a camiones de construcción auxiliares. La metodología utilizada en el desarrollo de la plataforma se basó en la aplicación del FEM y la validación de los resultados se realizó mediante pruebas experimentales. En [7] se aplicó una metodología basada en FEM y los métodos experimentales para evaluar el rendimiento estático y dinámico de una estructura de autobús. En [8] se realizó un análisis de la carrocería de un vehículo doméstico utilizando FEM, análisis de rigidez estática y análisis de fatiga, para estudiar la carga segura de trabajo. En [9] se utilizó el software ABAQUS para analizar la frecuencia natural y el modo dinámico de los baleros y de la estructura donde van colocados, en camiones de carga con la finalidad de realizar un diseño óptimo de los mismos.

En este artículo se presenta un método de análisis experimental el cual fue utilizado para localizar y caracterizar puntos críticos en términos de esfuerzos y para determinar las causas que ocasionaron fallos por fisuras en la estructura de un autobús. Para determinar los puntos críticos y para dar solución a la problemática, se utilizaron diferentes tipos de pruebas experimentales, tanto estáticas como dinámicas. También se aplicaron técnicas experimentales y numéricas para evaluar mecánicamente la estructura del autobús.

### 1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Un autobús urbano presentó fallos (fisuras) prematuros en su estructura durante el servicio de transporte público para el cual fue adquirido. Son desconocidas las causas que originan los fallos, así como la posición de los puntos críticos de esfuerzos donde se inician.

El problema específico por resolver se define de la manera siguiente:

*“Determinar las causas que ocasionan los fallos por fisuras en una estructura automotriz sometida a solicitaciones mecánicas”.*

Las restricciones asociadas con el problema descrito anteriormente fueron las siguientes:

- 1) La estructura automotriz estudiada es la de un autobús para uso urbano.
- 2) El estudio se realizó en una estructura sin fallos (nuevo) similar a la estructura que presentaba fallos.

La hipótesis que se planteó para resolver el problema fue la siguiente:

*“Las causas que provocaron las fisuras que se presentan en la estructura automotriz, son cargas mecánicas”.*

Las premisas de referencia fueron las siguientes:

- 1) El estado de esfuerzos en un punto de un cuerpo es función de la geometría, de las cargas aplicadas, del material y de su posición.
- 2) Los fallos son provocados por las operaciones (una operación, varias, o combinaciones de ellas) que se realizan durante los recorridos típicos de servicio del autobús.
- 3) Se asumió que el problema de las fisuras es mecánico estructural y se considera que la calidad de los materiales y los procesos de manufactura son ajenos al problema, aun cuando la fisura se presenta en la unión soldada, Figura 1.

## 2. MÉTODO INTEGRAL DE ANÁLISIS

En esta parte se describe el método propuesto para caracterizar e identificar los puntos críticos en una estructura automotriz y para determinar las causas que los producen, así como dar solución a la problemática.

### 2.1. MÉTODO DE ANÁLISIS

El método propuesto se sintetiza a continuación:

- 1) Análisis preliminar de la estructura: En esta etapa se realiza un estudio visual sobre el estado en que se encuentra la estructura del autobús para identificar las fisuras presentes (localización, forma, etc.).
- 2) Análisis riguroso de la estructura: Con la información preliminar del paso 1), se procede a realizar un análisis riguroso del estado estructural de la carrocería analizando la geometría, las condiciones de trabajo típicas al que se somete el autobús durante su operación normal (estáticas y dinámicas), los materiales de la estructura y las fisuras presentes.
- 3) Definición de los alcances de los estudios a realizar: Tomando en consideración la problemática y los objetivos generales planteados, los resultados obtenidos en los pasos 1) y 2) y, la información de expertos y del usuario, se define el número y la secuencia de actividades a realizar durante el proyecto.
- 4) Diseño de pruebas. En esta etapa se determinan cuáles son las pruebas estáticas y dinámicas mínimas necesarias representativas que ayuden a identificar las posibles causas de los fallos. Por lo general, las pruebas estáticas se consideran prioritarias, pues al ser representativas y con la aplicación de técnicas experimentales, resulta altamente probable identificar los puntos

con mayor nivel de esfuerzos y las causas de los fallos. Se identifican y se definen las condiciones estáticas representativas de la operación del autobús (flexión, torsión, Peso Bruto Vehicular (PBV)), así como condiciones dinámicas que se presentan, tales como cabeceo, movimientos laterales, curvado, frenado, aceleraciones o una combinación de dichas condiciones. Los objetivos que se pretenden alcanzar con las pruebas son los de localizar los puntos críticos, así como determinar las condiciones de operación responsables de ocasionar los fallos por fisuras (topes, baches, paradas, curvas, subidas, frenadas, aceleraciones y velocidad de operación, entre otras). Los resultados obtenidos de las pruebas, se utilizan como referencia para evaluar en qué medida las modificaciones implementadas mejoran la funcionalidad estructural.

- 5) Instrumentación. En este paso se consideran y se estudian los tipos de técnicas experimentales y numéricas que deben utilizarse durante las pruebas. Una vez seleccionadas las pruebas estáticas y dinámicas, y definidos los alcances correspondientes descritos en el paso 4), se procede a instrumentar aquellas zonas en donde se hayan localizado fisuras o, en su caso, en donde por experiencia y análisis se ubiquen concentraciones de esfuerzos. Es importante mencionar que si el objetivo es conocer la posición de los puntos críticos y los puntos de inicio de la fisura, la Fotoelasticidad es una excelente herramienta experimental [10]. Al identificar dichos puntos, es recomendable utilizar la técnica de Extensometría Eléctrica para la medición experimental de sus estados de esfuerzos [11].
- 6) Realización de las pruebas. Una vez instrumentada la estructura del autobús con la técnica de Fotoelasticidad en una primera etapa, y en una segunda etapa con Extensometría Eléctrica, se realizan las pruebas establecidas en el paso 4). Los datos obtenidos son fundamentales para el análisis y la posterior toma de decisiones durante el estudio. Cada prueba debe ser desarrollada en forma sistemática y bajo procedimientos normados de tal manera que se garantice la objetividad de los datos obtenidos. Por ejemplo, las pruebas estáticas y las pruebas dinámicas deben representar los eventos reales a los que el autobús se somete durante su operación, por lo que el análisis y las consideraciones que deben tomarse en cuenta para la realización de dichas pruebas, deben ser valorados por los expertos. Las pruebas y la instrumentación representan dos de los pasos más importantes, pues de no realizar pruebas representativas y de no instrumentar los puntos con mayor nivel de esfuerzos, no será posible llevar a cabo en forma eficiente el rediseño estructural.
- 7) Análisis de resultados. Con la información obtenida y considerando las teorías, los métodos y la experiencia en el área, se procede a analizar los datos para determinar cuál o cuáles son las condiciones mecánicas que originan los fallos en la estructura del autobús. Este paso es de suma importancia dentro del método, puesto que las causas que ocasionan los fallos representan la premisa con la cual se busca en forma numérica la solución al problema.
- 8) Búsqueda de la solución. Conocida la causa del problema que ocasiona la falla estructural y aplicando FEM, se buscan en forma cualitativa posibles soluciones al problema y se determina cuál es la más eficiente. Lo anterior es posible tomando como referencia el valor máximo de esfuerzo de Von Mises en el modelo original, el cual, deberá disminuirse el

porcentaje necesario y suficiente que garantice la solución del problema. Se asume que el comportamiento mecánico de la estructura es lineal y que el material con el que se fabrica es: elástico-lineal, homogéneo, isotrópico y continuo.

- 9) Implementación de la solución. Una vez obtenida una solución eficiente al problema (refuerzo) derivada del paso 8), se procede a su implementación en la estructura del autobús.
- 10) Evaluación numérico-experimental de la solución. En esta etapa se evalúa la solución implementada utilizando técnicas experimentales y numéricas. El número y el tipo de pruebas depende de los requerimientos del cliente, que van desde la seguridad de la propuesta hasta el análisis de fatiga, entre otras pruebas.

### 3. APLICACIÓN DEL MÉTODO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presenta la aplicación de los pasos descritos en la sección anterior. En primer lugar se realizó un estudio visual a la estructura. Las fisuras observadas y consideradas como problema en este trabajo, se presentan en las Figura 1 y 2.

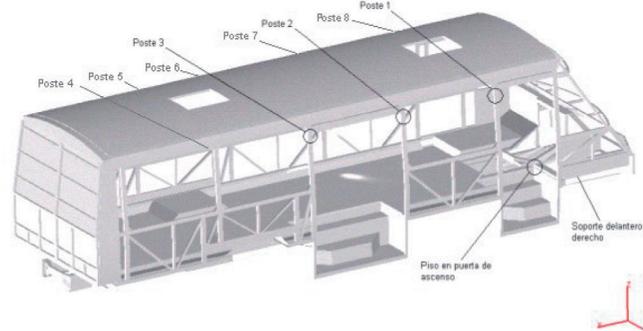


Figura 1: Localización de las fisuras en la carrocería del autobús

En este trabajo sólo se mostrará el procedimiento que se llevó a cabo para analizar un fallo localizado en el piso del autobús. Es importante mencionar que cuando se presentó el problema, el autobús tenía tres meses de servicio y que para el estudio se utilizó una estructura nueva, libre de fallas. De no contar con un autobús nuevo, se deberá sustituir la pieza o reparar la zona dañada, de manera tal que las condiciones iniciales (antes de la falla) queden reestablecidas.

La estructura fue sometida a un análisis riguroso considerando las opiniones de los expertos y la experiencia de los fabricantes. Se obtuvo información valiosa del fabricante, como la manera de ope-



Figura 2: Fallo de análisis en el piso delantero de la puerta de ascenso

rar el autobús, la ruta de recorrido y sus características, la capacidad de transporte, los materiales, entre otra información importante. Posteriormente, se identificaron los tipos de operaciones mecánicas a las que se somete el autobús. Se consideró que la operación del autobús implicaba llevar a cabo tanto pruebas estáticas como pruebas dinámicas. Las pruebas dinámicas contemplaron un recorrido típico (con baches, topes, movimientos de frenado y arranque, así como curvado y cabeceo), y pruebas de frenado, de aceleración del motor y de cambio de carril. Asimismo, se consideró que las pruebas se deberían realizar bajo las condiciones de carga a Peso Bruto Vehicular también conocida como Masa Máxima Técnica (PBV, Peso Vehicular del Autobús, más el peso de 60 pasajeros cada uno con un peso promedio de 70 kg.) y un Peso bruto vehicular más una sobre carga de aproximadamente una tonelada (PBV+20%).

En las pruebas estáticas se decidió someter el autobús a flexión y torsión, y para las pruebas dinámicas se consideró el frenado, barrido, cambio de carril y pruebas de recorrido. En las pruebas dinámicas también se consideró el peso del autobús a PBV y a PBV + 20%. Las técnicas utilizadas durante las pruebas estáticas fueron las de Fotoelasticidad y Extensometría Eléctrica. Las secuencias de las tareas seleccionadas fueron las siguientes: A) Instrumentar con placas fotoelásticas las regiones de las fisuras en el autobús no fallado, realizar las pruebas estáticas y posteriormente instrumentar con extensómetros eléctricos puntos de interés o de concentración de esfuerzos interpretados de las placas fotoelásticas. Las pruebas consistieron en levantar cada una de las ruedas del autobús sobre una rampa; las pruebas se llevaron a cabo a PBV y a PBV + 20% y B). Las pruebas dinámicas de frenado, aceleración del motor y cambio de carril se realizaron en un lugar controlado, posteriormente, se realizaron las pruebas de recorrido, tomando registro de los baches y topes por los que el autobús pasó en su trayecto. La información relevante (generada de los extensómetros instalados) levantada durante el trayecto fue obtenida por medio un escáner.

### 3.1. INSTRUMENTACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES ESTÁTICAS CON FOTOELASTICIDAD

En esta etapa se instrumentaron con placas fotoelásticas las zonas en donde se localizan las fisuras en el autobús. También se presentan los resultados de las pruebas realizadas. La estructura fue sometida a sollicitaciones estáticas de flexión y de torsión, simulando así los movimientos que se presentan en un autobús en operación. Para este artículo sólo se consideró una falla localizada en el piso del autobús (esquina inferior derecha del marco del motor).

El método fotoelástico proporciona la posibilidad de realizar un análisis cualitativo de la distribución general de esfuerzos en la zona instrumentada [10]. En este estudio se instrumentó la zona del fallo con una placa Fotoelástica PSM-1 de 1/8" de espesor. Las placas se marcaron dimensionalmente para identificar claramente la posición de los puntos con mayor nivel de esfuerzos. Las placas se pegaron perfectamente a las piezas en las zonas seleccionadas, Figura 3.

Con el autobús instrumentado, se procedió a realizar las pruebas estáticas bajo las siguientes condiciones:

- 1) Flexión y torsión. La prueba de flexión implicó subir en rampas metálicas las dos ruedas delanteras a una altura de 30 cm con respecto del piso y las pruebas de torsión consistieron de levantar cada una de las cuatro ruedas 30 cm.
- 2) Condiciones de carga: Las pruebas se llevaron a cabo a Peso Vehicular (PV), Peso Bruto Vehicular (PBV) y prueba a PBV+20% de sobrecarga. Para las últimas condiciones el autobús se lastró con garrafones de agua distribuidos de tal forma que simulara un lleno de pasajeros.

Las pruebas se realizaron para determinar el punto o conjunto de puntos que presentan el mayor valor de franja isocromática en cada una de las zonas instrumentadas y para evaluar qué condiciones de carga generaban las más altas concentraciones de esfuerzos en la zona de fallo.

El análisis de los resultados mostrados en las placas fotoelásticas durante las pruebas se realizó utilizando un Polariscope básico de reflexión, SERIE O30. Se tomaron registros fotográficos con una cámara de las placas fotoelásticas durante las pruebas de flexión y torsión. Los registros de colores observados son directamente proporcionales a las diferencias de esfuerzos principales que se presentan en la estructura. Con los patrones fotoelásticos se localizaron los puntos críticos, los cuales posteriormente fueron instrumentados con extensómetros eléctricos.

En la prueba de flexión y en la condición de PV, el autobús fue colocado en un terreno nivelado y se subieron las dos ruedas delanteras a unas rampas metálicas a una altura de 30 cm, y se tomaron registros fotográficos. Para las condiciones de PBV y PBV+20% se repitió la prueba de flexión, Figura 3. Como se puede observar en dicha figura, la prueba de flexión no genera niveles de diferencia de esfuerzos principales (isocromáticas) relevantes en las zonas.

La prueba de torsión se realizó bajo tres condiciones de carga (PV, PBV y PBV+20%) y considerando el procedimiento siguiente:

- 1) Cada una de las ruedas del autobús (delantera derecha, delantera izquierda, trasera derecha y trasera izquierda), se levantaron 30 cm con respecto al piso.
- 2) Para cada tipo de prueba y para cada condición de carga (PV, PBV y PBV+20%), se tomaron registros fotográficos de los patrones de franja resultantes en las zonas instrumentadas.

La Figura 4 muestra las franjas isocromáticas relacionadas con la prueba de torsión a PV con el levantamiento de la rueda delantera izquierda y la rueda trasera derecha.

Los resultados obtenidos de las pruebas estáticas se resumen a continuación:

Con la técnica de fotoelasticidad se logró identificar cuáles fueron los puntos que mostraron el valor máximo de orden de franja. Además, con la interpretación del campo de las franjas isocromáticas se estimó qué condición de carga podría ser la causante del fallo.



Figura 3: Patrón de franjas durante la prueba a flexión a PV



Figura 4: Patrón de franjas isocromáticas en la prueba de torsión a PV, levantamiento rueda delantera izquierda y levantamiento de rueda delantera derecha

### 3.2. INSTRUMENTACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES ESTÁTICAS Y DINÁMICAS, MEDIANTE LA TÉCNICA DE EXTENSOMETRÍA ELÉCTRICA

Con los resultados de campo completo obtenidos con el método de fotoelasticidad se seleccionaron dos puntos, los cuales por su condición relevante, fueron instrumentados con rosetas de tres elementos como se muestra en las Figuras 5 y 6.

Las pruebas con extensometría eléctrica se llevaron a cabo levantando 30 cm cada una de las cuatro ruedas sobre una rampa, induciendo así la condición de torsión. Los valores de las deformaciones proporcionados por las rosetas fueron corregidos por efectos de sensibilidad transversal (nota técnica TN509). Para la adquisición de los valores de las deformaciones en los elementos de las rosetas, se utilizó un escáner 6000 de la marca Vishay (Strain Smart 6000).

Una vez comprobada la representatividad de los valores de la deformación y el correcto estado de la instrumentación, se realizaron las pruebas dinámicas bajo las tres condiciones de carga (PV, PBV y PBV+20%). Las pruebas dinámicas fueron las siguientes:

- a) Curveo.
- b) Frenado y acelerado.
- c) Se realizó un recorrido típico del autobús durante su servicio diario, el cual es una ruta representativa del recorrido durante su tiempo de vida útil, la cual incluyó: topes, baches, curvas, empedrado y vados.

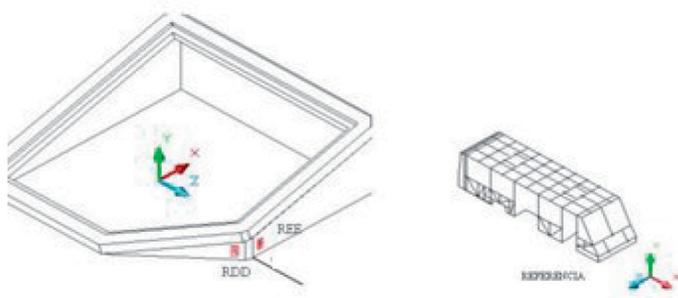


Figura 5: Localización en el piso de las Rosetas RDD y REE



Figura 6: Rosetas instrumentadas en los puntos que durante las pruebas presentaron mayor nivel de esfuerzos, Rosetas RDD y REE

### 3.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Del análisis riguroso de la información gráfica proporcionada por los puntos instrumentados a partir de las pruebas realizadas, se resaltan los siguientes puntos:

- A) Prueba de aceleración (acelerando el motor del autobús sin movimiento): Los niveles de las deformaciones principales máximos obtenidos durante la prueba de aceleración (700 RPM-2900 RPM) no rebasaron los niveles de 20  $\mu\epsilon$ . Los niveles de tales deformaciones no fueron relevantes.

- B) Pruebas de frenado: No se observaron diferencias significativas entre los niveles de la deformación mostrados para las pruebas de frenado realizadas a PBV que a PV para la prueba de frenado de 40 km/h - 0 km/h. Los valores positivos de las deformaciones principales más altos obtenidos en los puntos instrumentados fueron de 300  $\mu\epsilon$ .
- C) Pruebas de cambio de carril: En las pruebas de cambio de carril se observó que el nivel de las deformaciones en la prueba realizada a PV fue de un 30% a un 50% mayor que los obtenidos en la realizada a PBV.
- D) Pruebas de recorrido: En las pruebas de recorrido realizadas en un trayecto con pendiente pronunciada (ascenso y descenso) se observó durante el descenso, que las deformaciones máximas obtenidas para la prueba en condición de carga PBV son aproximadamente un 90% mayores a la realizada a PV. En la prueba de recorrido de ascenso, el valor máximo de la deformación obtenido a PBV fue de aproximadamente un 50% mayor al valor máximo obtenido a PV. Los elementos RDD, Figura 6, dieron un valor de la deformación máxima mayor a 1000  $\mu\epsilon$  durante el recorrido. Se hicieron dos recorridos y la duración del primer descenso y la duración del segundo descenso fueron de 46 minutos y de 39 minutos, respectivamente. Los puntos instrumentados presentaron valor de esfuerzo máximo mayores al esfuerzo de fluencia (200 MPa) durante las diversas pruebas.

## 4. ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN Y DISCUSIÓN

Al considerar los resultados obtenidos en las pruebas estáticas (derivados de la técnica de fotoelasticidad) en la zona de fallo, el análisis gráfico (relacionando los niveles máximos de las deformaciones contra cada evento) de los resultados obtenidos durante las pruebas de recorrido y analizando los puntos instrumentados con extensómetros con mayor nivel de esfuerzos, se concluyó con un alto grado de certeza que las condiciones mecánicas que podrían causar las fisuras eran las de torsión. Es importante mencionar que se llegó a los resultados mencionados analizando las gráficas que proporcionaron los extensómetros durante las diferentes pruebas. Los eventos en los que se presentaron los valores máximos de deformación, identificados con apoyo de la grabación de un video, fueron los baches y los topes, sobre todo si éstos se tomaban en dirección diagonal.

Los puntos instrumentados presentaron un valor de esfuerzo máximo entre el rango de esfuerzo de 62 MPa y el esfuerzo de cedencia (200 MPa) durante las diversas pruebas estáticas.

### 4.1. ANÁLISIS NUMÉRICO

Los eventos operacionales considerados como los causantes de las fallas (torsiones) se evaluaron con un software FEM el cual fue NISA/DISPLAY IV versión 11.0. En el modelo desarrollado se asumió que el material de la estructura del autobús es: elástico-lineal, homogéneo, isotrópico y continuo [10]. Para el análisis, estático-lineal, se consideró únicamente el fallo estructural que se localiza en el piso delantero del autobús.

El modelo de elemento finito consiste principalmente de elementos placa cuadrangular de 25X25 mm. El modelo tiene 129,123 elementos y 131,418 nodos, e incluye solamente a la carrocería y al bastidor. Las condiciones de carga y sujeción para el caso del levantamiento de la rueda trasera derecha se muestran en la Tabla 1.

Con el modelo representativo en forma cualitativa, considerando el levantamiento de rueda trasera derecha como condicio-

RUEDA	TRASLACIONES			ROTACIONES		
	x	y	z	x	y	z
Trasera derecha	0.0	0.0	15.0 mm	NO	NO	NO
Trasera izquierda	0.0	NO	0.0	NO	NO	NO
Delantera derecha	NO	0.0	0.0	NO	NO	NO
Delantera izquierda	NO	NO	0.0	NO	NO	NO

Tabla 1: Condiciones de sujeción y levantamiento de la rueda trasera derecha

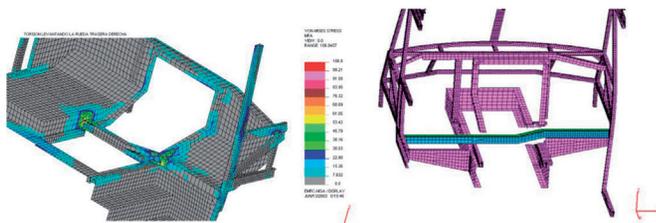


Figura 7: Evaluación numérica de la condición de torsión en la zona del piso con modificación propuesta. Los valores para esta condición fueron cualitativos

Zona de interés	Esfuerzos con configuración de origen [MPa]	Esfuerzos con Refuerzo Solución [MPa]
Piso delantero	133	106

Tabla 2: Esfuerzos Von Mises en la propuesta de solución



Figura 8: Modificación en el piso, zona de escalones de la puerta de ascenso

nes de frontera (Tabla 1) y buscando disminuir al menos un 20% los niveles de esfuerzos máximos, se evaluaron posibles soluciones, hasta encontrar la solución al problema de origen, Figuras 7 y 8. En la Tabla 2 se muestra en forma comparativa los esfuerzos máximos de Von Mises para las condiciones de origen y con refuerzo.

El autobús, con la estructura reforzada, fue evaluado llevando a cabo un estudio integral de fatiga numérico- experimental, dando buenos resultados. El camión trabajó en forma segura, estructuralmente hablando, durante el tiempo de servicio garantizado y solicitado por el fabricante.

## 5. CONCLUSIÓN

En este artículo fue propuesta y aplicada una metodología para la determinación de las causas que originan los fallos en estructuras automotrices. Se presentó su aplicación en el análisis de una carrocería de un autobús y se describió una solución al problema. Las conclusiones se resumen a continuación:

- A partir de los resultados obtenidos de este estudio, puede decirse que el grado de certeza en la solución de problemas mecánicos complejos, aumenta de forma significativa si se aplica una metodología científica. Esta sistematización per-

mite decidir con los mejores elementos de juicio qué tipos de pruebas son las necesarias y suficientes para realizar el estudio y para identificar cuáles son las zonas y puntos que deben ser instrumentados, permitiendo obtener datos fidedignos y confiables con los cuales sea posible proponer posibles soluciones al problema durante la etapa del re-diseño.

- La metodología utilizada en este trabajo permitió analizar, planear y ejecutar en forma sistemática, cada una de las pruebas diseñadas en el estudio. Las pruebas estáticas y dinámicas, permitieron obtener información confiable mediante la cual fue posible concluir que la causa del problema de las fisuras fue la condición de frontera relacionada con la torsión, debida a los topes y baches que se localizan en la ruta del recorrido del autobús.
- La metodología utilizada y propuesta en este trabajo se fundamenta en la aplicación permanente del Método Científico como herramienta, y es consistente con respecto a los principios de la teoría de la elasticidad lineal y al comportamiento mecánico de una estructura automotriz. Lo anterior, proporciona certeza en los resultados y hace posible la utilización de la metodología para el análisis en diversas estructuras automotrices.
- La confiabilidad en la toma de decisiones y en los resultados obtenidos, se debe en gran medida a la eficiente integración de los métodos experimentales (Fotoelasticidad y Extensometría Eléctrica) como parte fundamental en la metodología propuesta, y al análisis numérico en la búsqueda para encontrar la solución.

## REFERENCIAS

- [1] Federico, J. C., Zenklusen, F., Cardona, A. "A methodology for the analysis of wear in internal combustion engine valves is proposed, which is the result of the combined use of numerical and experimental techniques". Mechanism and Machine Theory. 2016,104, pp. 81-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.017>.
- [2] Bozkurt, Ö.Y., Dai, I.C., Özbek, Ö. "The Finite Element Analysis and Geometry Improvements of Some Structural Parts of a Diesel Forklift Truck". Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2017, Vol.5, No.2, pp. 202-209. <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v5i2.118>
- [3] Ghazaly, N. M. "Applications of Finite Element Stress Analysis of Heavy Truck Chassis: Survey and Recent Development." Journal of Mechanical Design and Vibration. 2014. 2.3: 69-73. DOI: <https://doi.org/10.12691/jmdv-2-3-3>.
- [4] Rodrigues, D., Espíndola, R., Galob, R., Cecilia C., De Carvalho F., Panzeria, H. "Analysis of Stress and Fracture Strength of Zirconia Implants after Cyclic Loading". Materials Research. 2015; 18(5): 1082-1088. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.010815>
- [5] Zhuang, W., Hua, L., Wang, X., Liu, Y., Han, X., Dong, L. "Numerical and experimental investigation of roll-forging of automotive front axle beam". Int J Adv Manuf Technol. 2015. 79:1761-1777. DOI 10.1007/s00170-015-6905-9
- [6] Malon, H., Castrejón, L., Cuartero, J., Martín, P. "Numerical-experimental analysis of two floor platform designs for auxiliary construction truck". Experimental Techniques, 2015, 39:53. DOI: <https://doi.org/10.1111/ext.12032>.
- [7] Gauchia, A. Olmeda, E., Boada, M., Boada, B., Díaz, V. "Methodology for bus structure torsion stiffness and natural vibration frequency prediction based on a dimensional analysis approach". Int. J Automot. Technol. 2014, 15: 451. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-014-0047-1fe>
- [8] Wen, X., Du, Z. (2012). Analysis of Structure Strength and Fatigue of Mini Body. In: Zhang W. (eds) Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice. Advances in Intelligent and Soft Computing, Vol 162. Springer, Berlin, Heidelberg.. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29455-6\\_77](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29455-6_77)
- [9] Ren, Y., Yu, Y., Zhao, B., Fan, C., Li, H. "Finite Element Analysis and Optimal Design for the Frame of SX360 Dump Trucks". Procedia Engineering 174, 2017, 638 - 647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.201>
- [10] Durelli, A. J., Phillips, E. A., and Tsao, C. H. Introduction To The Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain. 1958. McGraw-Hill Book Company, Inc.
- [11] Dally, J. W., Riley, W. F., Experimental Stress Analysis. 1978. New York: McGraw-Hill, 374.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen, a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, a la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Universidad La Salle Noroeste y a la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora, por apoyar el desarrollo del presente artículo.