Simulación y análisis de una prueba de choque de un automóvil tipo deportivo, utilizando un software basado en el método de los elementos finitos

Simulation and analysis of a crash test of a sporty type car, using software based on the finite element method

Portillo, Martin[1*]; Chacón, Rubén[1]; Moreno, Miguel[2] y Bongiorno, Francisco[3]
[1]Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. ULA
[2]Departamento de Ciencias Agrícolas y Ambientales. IUTE
[3]Grupo de Investigaciones en Geología Aplicada GIGA. Facultad de Ingeniería. ULA
Mérida-Venezuela
*martinjportillom@yahoo.es

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo la simulación y el análisis de una prueba de choque frontal de un automóvil tipo deportivo, realizada mediante herramientas de Elementos de Análisis Computarizado (CAE). En primer lugar, se establecieron las condiciones para el modelo, para que representara un choque real. Luego, mediante la simulación, se determinaron las deformaciones y estados de tensiones del modelo, y de esta forma estudiar las condiciones de carga y restricción de movimiento que, presuntamente, actúan durante un choque frontal. Además, se estudiaron las características más comunes de las colisiones de automóviles enfocadas en: velocidad, ángulo de impacto, objeto impactado y tipo de vehículo, con la finalidad de comparar el comportamiento del modelo con el de otros vehículos similares. Para el análisis se utilizó el paquete de software ABAQUS 6.5.4. de Abaqus inc. Además, se digitalizaron las geometrías y las características de diseño, utilizando herramientas de Diseño Asistido por Computador (CAD). La verificación del modelo se basó en información disponible, como reglamentos internacionales de seguridad, fotografías y videos de choques de alta y baja velocidad de este tipo de automóvil. Básicamente y debido a la limitada información existente para realizar las evaluaciones del modelo ensayado, se realizaron evaluaciones visuales apoyadas en el estudio de las deformaciones y esfuerzos ocurridos en el modelo. Una vez culminada la prueba, se determinó que las bajas deformaciones en el habitáculo no generarían daños a sus ocupantes. Los esfuerzos máximos no superan los límites del material, por tanto, no conllevan a falla estructural grave que ocasione lesiones a los ocupantes del vehiculo, lográndose así con la intención de salvaguardar y proteger a los ocupantes del mismo.

Palabras clave: Simulación, análisis, choque, automóvil, elementos finitos.

Abstract

This study aimed to simulation and analysis of a frontal crash test of a sporty type car using the finite element method, performed by Computerized Analysis Element (CAE) tools. First, conditions were established for the model, to represent a real crash. Then, through simulation, are determined deformations and stresses of the model states, and thus the conditions under which loading and restriction of movement, presumably, act during a frontal crash. In addition, we studied the most common automobile collisions focused on speed, angle of impact, struck the object and type of vehicle in order to compare the model behavior with that of similar vehicles. For the analysis, the software packet ABAQUS 6.5.4 of Abaqus inc., was used. Also, the geometries and design characteristics were digitalized using computer-aided design tools (CAD). The model verification was based on available information, international safety regulations, photographs and videos of collisions of high and low speed of this type of car. Basically, due to the limited information for evaluation of the model tested, visual assessments were supported by the study of the strains and stresses occurring in the model. Once the test was completed, it was determined that low deformation of the carrier does not generate damage to passengers. The higher stretches do not

exceed the limits of the material; therefore, do not lead to serious structural fault that could cause injuries to the vehicle passengers, which allow achieving the purpose of safeguard and protecting the occupants of the vehicle.

Key words: Simulation, analysis, crash, car, finite element.

1 Introducción

Las pruebas de choque para vehículos constituyen un factor que ha tomado gran importancia en las últimas décadas, en el proceso de la fabricación de automóviles de cualquier tipo. Estas pruebas son elementos primordiales a la hora de determinar el futuro y la puesta en producción de un nuevo modelo.

En la actualidad, se está haciendo cada vez más frecuente el uso de herramientas computarizadas, tales como, ABAQUS CAE 6.4.5, ANSYS WORKBENCH, AUTODESCK ALGOR SIMULATION, FEMAP, AUTOFEM y otros, que permiten determinar el estado de tensiones, realizar las simulaciones de carga, entre otras funciones.

Autores como Kirkpatrick, Simons, Antou, 1998, MacNeill, Kirkpatrick, 2002, Riley, 2005, y Sieminski, 2005, han realizado diversos estudios de situaciones de impacto reales y utilizando estas herramientas lograron replicar los estados de deformación y de tensión en sus modelos a la situación real.

Estas herramientas, están basadas en el Método de los Elementos Finitos (MEF), esto se debe principalmente a las ventajas que el método presenta a la hora de aportar información sobre el posible comportamiento del vehículo ante un impacto. El Método de los Elementos Finitos aporta información valiosa, utilizada por los ingenieros y fabricantes de automóviles, para obtener una visión más clara de las reacciones, estado de tensiones y de las deformaciones de los vehículos, para así poder diseñar sistemas más confiables, estructuras más rígidas (donde sean necesarias) y zonas de absorción de energía más eficientes, todo esto para garantizar el éxito del nuevo modelo en relación a la seguridad.

Esta metodología de diseño busca aportar información previa a las pruebas obligatorias de choque y confirmar que su prototipo de vehículo cumplirá con los máximos requerimientos de seguridad. La seguridad de los ocupantes del vehículo, se ha convertido en una de las principales características que busca el consumidor y también los organismos encargados del resguardo de la población de cada país, quienes persiguen garantizar la integridad y la supervivencia de los ocupantes a la hora de un choque (National Highway Traffic Safety Administration, 2006).

Por otra parte, la minimización de los costos, interviene de forma importante en el aumento del número de estas nuevas investigaciones que representan un primer paso en los estudios estructurales de vehículos puestos en producción. Los costos para la realización de las pruebas de choque representan una inversión importante, ya que estas pruebas consisten en fabricar un auto real, con todas las características que serán otorgadas a los vehículos de producción masiva y simular el choque del vehículo, con la finalidad de determinar la seguridad que este sea capaz de brindarles a los ocupantes.

En consiguiente, esta investigación persigue conocer principalmente las deformaciones y la cantidad de energía que es capaz de absorber el chasis del diseño propuesto, antes de presentar una falla estructural que conlleve a lesiones graves a los ocupantes en una colisión frontal, utilizando el paquete de software Abaqus CAE 6.4.5.

2 Automóvil deportivo

El diseño básicamente radica en una combinación de ligereza, potencia, manejo y una baja resistencia aerodinámica. En el diseño de un automóvil (en especial los deportivos), la apariencia externa y su función es de carácter subjetivo, es decir, diseñar un auto deportivo radica en el simple deseo de la velocidad y la emoción que estos logran brindar a los usuarios del mismo. Sin embargo, las líneas que moldean y rigen el comportamiento aerodinámico, logran generar formas que de alguna manera, son estilizadas y armoniosas. Las características principales de este diseño se muestran en la Tabla 1. Este modelo es un diseño propio, por lo que la mayor parte de sus componentes, dimensiones, así como sus partes mecánicas, comportamiento y desempeño son confidenciales. En la Fig. 1 se muestra el modelo del prototipo de vehículo completamente cerrado. En la Fig. 2 se muestra el auto con las puertas abiertas.

Tabla 1. Características del vehículo

Dimensiones, peso, capacidades	
Tipo Carrocería	deportivo
Número de puertas	2
Largo / ancho / alto (mm)	4005 / 1900 / 1100
Peso (kg)	1400
Capacidad del depósito de combustible (l)	110
Número de plazas	2
Motor	
Combustible	gasolina sin plomo
Potencia máxima CV / rpm	660 / 12000
Situación	central trasero longitudinal
Número de cilindros	8 en V 60º
Material del bloque / culata	aluminio / aluminio
Diámetro x carrera (mm)	11,28x 75
Cilindrada (cm3)	6000
Relación de compresión	12
Distribución	4 válvulas por cilindro. Dos árboles de levas en cada culata. Distribución Variable

Alimentación	iny. indirecta multipunto. admisión variable
Transmisión	
Tracción	posterior
Caja de cambios	manual , seis velocidades
Chasis: tubular en aleación de aluminio y laminas de 1,5 mm de espesor endurecidas	
Suspensión delantera	Independiente. Doble Paralelogramo deformable. Resorte helicoidal.
Suspensión trasera	Independiente. Doble Paralelogramo deformable. Resorte helicoidal.
Frenos delanteros (mm)	disco ventilado (380 mm)
Frenos traseros (mm)	disco ventilado (380 mm)
Tipo de dirección	Asistida
Neumáticos	del/tras: 245/35 ZR19 ; 345/30 ZR20
Llantas	del/tras: 10,0 x 19 ; 13.0 x 20

Estas características son importares a la hora de determinar la carga a la que será sometido el vehículo en la prueba de impacto frontal.

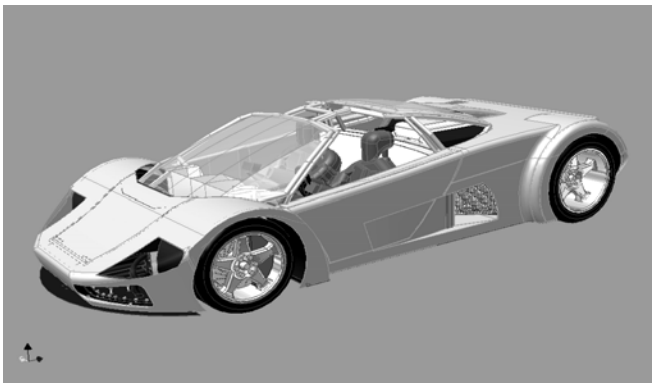

Fig. 1. Forma final del modelo propuesto

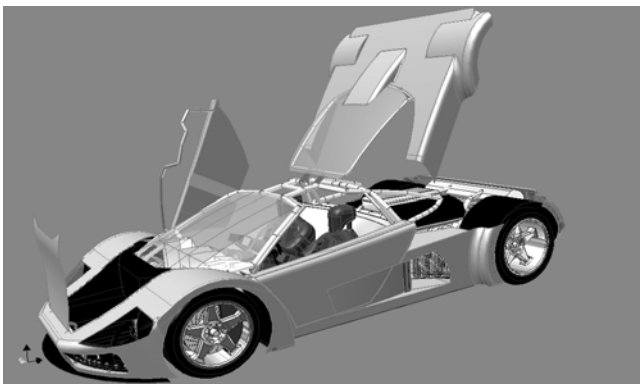

Fig. 2. Prototipo con las puertas abiertas

Entre los rasgos más resaltantes de los autos deportivos o súperdeportivos están las dimensiones y el aspecto; y como estos vehículos son capaces de alcanzar altas velocidades, sus formas están regidas por líneas aerodinámicas, logrando un modelo que resulta eficiente y vistoso. La resistencia aerodinámica o la resistencia al avance, es también un factor muy importante, por lo tanto, estos vehículos deben ser capaces de generar el mínimo arrastre y obtener un bajo coeficiente aerodinámico. Es por esto, que se trata de reducir la superficie expuesta, cuyo vector normal sea paralelo a la dirección del avance y en sentido opuesto al avance del auto.

Otra característica importante es la disposición del motor, este se encuentra en la parte central trasera del vehículo, con la finalidad de alcanzar una óptima distribución del peso del mismo en las ruedas. La disposición longitudinal se debe al limitado espacio que existe a lo ancho del vehículo, ya que se debe colocar además del motor, la caja de velocidades y la transmisión. En la fig. 3 se muestra el ensamble de la suspensión trasera, el parachoques, la caja de velocidades y el motor anclados al chasis.

El sistema de enfriamiento del motor se encuentra a los costados del vehículo, justo por detrás de la línea de los ocupantes, esto también tiene como finalidad situar la mayor cantidad de componentes en el centro del vehículo. En la Fig. 3 se muestra el ensamble del sistema de enfriamiento.

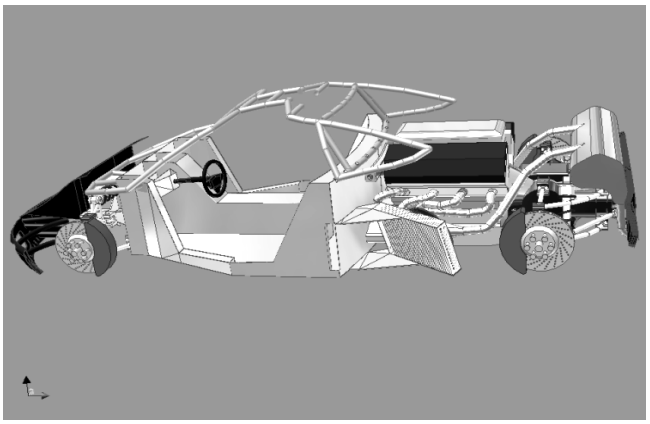

Fig. 3. Ensamble del conjunto motor, caja, suspensión y parachoques y del sistema de enfriamiento

Estas particularidades logran que el vehículo tenga una distribución de peso de 45:55, es decir, que el 45 % del peso lo soportan las ruedas delanteras y el 55 % las ruedas traseras; aunado a esto, se logró que el vehículo tuviera su centro de gravedad justo por debajo de la línea de ejes de las ruedas, lo que podría garantizar una conducción muy firme y estable.

Los brazos, amortiguadores y resortes de la suspensión trasera y parachoques trasero, están sujetos a la caja de velocidades, y esta a su vez está unida al motor. El motor se une al chasis del auto en 5 puntos, es decir, el auto podría dividirse en 3 partes importantes: La primera es el chasis, en donde se sujetan todos los componentes de la suspensión delantera, la dirección del vehículo, el parachoques delantero y un pequeño porta equipaje. La segunda de ellas sería la sección compuesta por el motor, la caja de velocidades, parachoques trasero y todos los componentes de la suspensión trasera. Por último, la tercera subdivisión sería el fondo y la carrocería del auto. Todas estas características tienen la fi-

nalidad de reducir el peso de todo el automóvil.

Durante el desarrollo del diseño se presentó la interrogante de utilizar un chasis de fabricación tradicional, de secciones de láminas unidas mediante diversos métodos o la construcción de un chasis de tipo tubular. Ambos tipos presentan grandes ventajas y desventajas. Una de las ventajas de los modelos laminares es que son de fácil construcción, comparándolo con el modelo tubular. Otra de sus ventajas es su costo y simplicidad. Entre las desventajas de estos mismos modelos tenemos, una resistencia limitada, así como una rigidez inferior, en comparación con los tubulares. Por otra parte, los modelos de chasis tubulares son altamente costosos en su fabricación, debido a su complejidad, sin embargo, son altamente resistentes y rígidos; estas son dos características fundamentales en la construcción de modelos de autos deportivos. Sumado a esto, se tomaron en cuenta las fuerzas generadas por el motor sobre el chasis, así como la configuración de automóvil; por lo que se decidió que un chasis compuesto de tubos sería más viable para los objetivos que se deseaban alcanzar con el vehículo.

Por otra parte, existen vehículos de la categoría superdeportivos, que están siendo fabricados en materiales compuestos y fibras de carbono, sin embargo, esto representa un altísimo costo en el vehículo. Un ejemplo de ello serían automóviles como el Porsche Carrera Gt (Santana, 2005) y el Mercedes-McLaren SLR (A.M.S. y O.D., 2004), cuyos precios superan los 400 mil dólares, así como el Ferrari Enzo, que alcanza los 2 millones de dólares (A.M.S. y O.D., 2004). Por el contrario, otros superdeportivos como el Lamborghini Countacht (Car and Driver, 2001), Lamborghini Diablo (Automobiles Classiques, 2002), Lamborghini Murciélago (A.M.S. y O.D., 2004), entre otros, cuyos chasis son conformados principalmente por "estructuras o jaulas de tubos", sus precios van de 65 mil a 400 mil dólares (el precio varía según la marca y el año del vehículo). En la Fig. 4 se muestra el chasis final del prototipo.

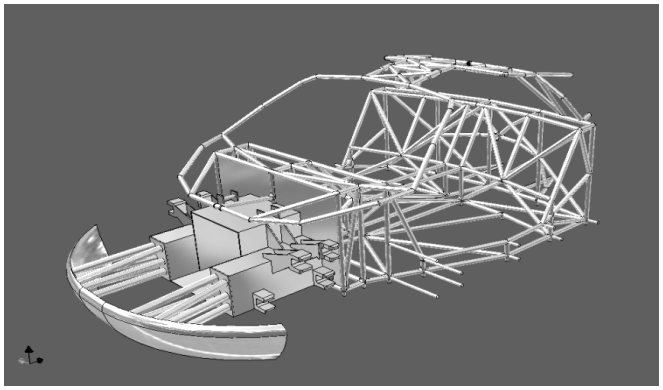

Fig. 4. Chasis final de estructura tubular compuesta

3 Creación del modelo

En esta etapa se elaboró un modelo tridimensional del vehículo, basándose en los bocetos originales de diseño. Inicialmente se realizaron dos propuestas de diseño, una de ellas fue el modelo de tipo laminar y la otra fue el de tipo tubular. Sin embargo, por lo expuesto anteriormente el modelo finalmente seleccionado fue el tubular.

Para la creación del modelo se empleó el programa AutoCad 2006 de Autodesk Inc, por medio del cual la geometría pudo ser modificada y analizada para distintas configuraciones geométricas.

4 Cargas y aplicación

Debido a la complejidad de las fuerzas y condiciones presentes en un impacto de automóvil, la definición de las cargas aplicadas, así como de los apoyos, para tratar de simular un impacto real, son el objeto principal y fundamental de esta investigación; para así, con esto, obtener resultados que conlleven a afirmar que son representativos a la situación real.

Diferentes estudios se han realizado con este objeto (Riley, 2005); (Sieminski, 2005), pero debido a la complejidad de los mismos y de las inversiones que las diferentes compañías de vehículos han tenido que realizar, estas investigaciones no son de dominio público, es decir, los resultados, así como las condiciones de carga, son un secreto celosamente guardado por estas compañías; por lo tanto, la información disponible de las condiciones de carga y de apoyos o restricciones de movimiento no son conocidas.

Si a esto le sumamos el hecho de que cada impacto es un conjunto de fuerzas que no pueden ser medidas o estimadas, nos da como resultado un complejo conjunto de condiciones, donde solo se conocen algunas de las variables que intervienen en la compleja situación de un impacto de automóvil.

Para el estado de carga se estudiaron diferentes videos y fotografías de impactos frontales de vehículos deportivos, para tratar de replicar las fuerzas que intervienen en el choque (Wreckedexotics, 2005), tal como se muestra en la Fig. 5.

Fig. 5. Choque frontal, Lamborghini Diablo 1998

Se estudiaron variables como la masa del vehículo, velocidad de impacto, aceleración o desaceleración, forma del impacto, zona de impacto, deslizamiento del vehículo. La carga determinada para la prueba es equivalente a un impacto de un vehículo de 1500 kg, que se desplaza a una velocidad de 90 km/h y una aceleración equivalente a $10 m/s^2$,

con un deslizamiento de contacto con el pavimento mojado.

Con el objeto de dar condiciones extremas al impacto y por tratarse de un vehículo capaz de alcanzar altas velocidades, la escogencia de 90 km/h en lugar de los estándares de un máximo de 60 km/h, obedece al simple hecho de que la velocidad que llevaría un auto de este tipo al momento de que el conductor presione el pedal del freno, es mayor a la velocidad que llevaría un auto de pasajeros común. Así como los tiempos de reacción de un ser humano promedio, no varían según la velocidad a la que se desplaza, es decir, si una persona que se desplaza a 60km/h posee "t" tiempo de reacción ante una situación que amerite presionar el pedal del freno, tendrá el mismo tiempo de reacción al desplazarse a 150km/h.

Por esto, un estudio de impacto a mayor velocidad para estos vehículos, se hace más representativo de los datos obtenidos de las colisiones reales, aun cuando estos autos cuentan con un muy eficiente y mejorado sistema de frenado, esto no garantiza que la desaceleración del auto sea tal que al momento del impacto, este lleve una velocidad aproximada de 60km/h.

Estas condiciones dan como resultado, una carga estática equivalente, aplicada de forma instantánea, en la zona de primer contacto del vehículo con el objeto impactado, que en este caso fue el canto de una pared de propiedades de rigidez absoluta. Esta única carga aplicada es la equivalencia de todas las condiciones del impacto y la misma es ingresada al módulo de condiciones de carga del Software Abaqus CAE 6.4.5, en donde se puede variar el tipo de carga, así como la duración de aplicación de la misma en caso de estudios dinámicos. Para este estudio la carga será estática ya que la duración del impacto es muy corta. La carga se aplica en su totalidad en este instante de tiempo. En la Fig. 6 se muestra un esquema de la carga aplicada y de la disposición de los apoyos.

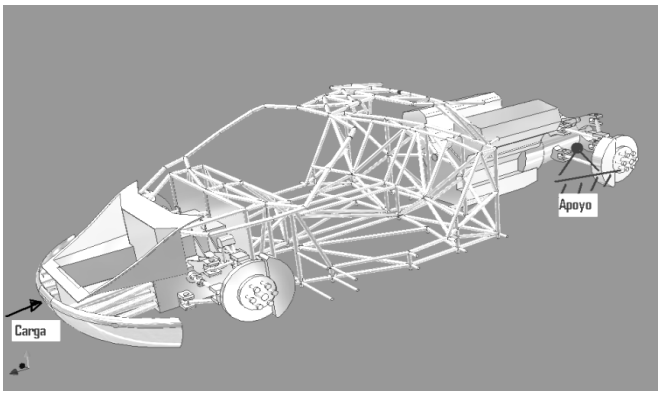

Fig. 6. Aplicación de la carga y ubicación de los apoyos

5 Modelo

5.1 Definición de los materiales

El estudio se realizó en el rango elástico y plástico, isotrópico y homogéneo para una aleación de aluminio, utilizando las teorías de corte y esfuerzo máximo. Los valores de las propiedades metal-mecánicas para este material utilizado se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de la aleación de aluminio utilizada en el modelo

	Aleación de aluminio
Módulo de Elasticidad	71.0 GPa
Relación de Poasson	0.33
Densidad del material	2770 Kg./m^3
Limite de Fluencia a la tracción	288 MPa
Limite de Fluencia a compresión	288 MPa
Esfuerzo último	310 MPa

5.2 Características del discretizado

Se utilizó el elemento tipo triedro lineales de 3 nodos con un ajuste de tolerancia a curva de 0,1 incremento y decrecimiento lineal de los elementos en zonas localizadas. Las condiciones del discretizado se obtuvieron a partir del tamaño predeterminado que ofrece el módulo mesh del software Abaqus CAE 6.5.4 del paquete de Análisis de Elemento Finito. Un punto importante que se debe hacer notar, es el hecho de que, debido a la complejidad de la estructura estudiada, la variación del tamaño de elemento no pudo hacerse en un rango amplio, ya que estos no podían ajustarse a la estructura del chasis. Esto se debe a la complejidad geométrica del modelo, lo que dificultó en gran medida el discretizado del modelo. Sin embargo, estas limitaciones o condiciones conllevan a un mejor resultado, debido a que cada superficie del modelo fue analizada para así, tratar de optimizar el tipo y tamaño de elemento utilizado en el modelo del discretizado final. Todo esto dio como resultado un tamaño de 40 mm, con una relación de curva de aspecto de 0,1 y tamaño mínimo del elemento de 0.2 mm. El número total de los elementos es de 219753, con una relación de aspecto de los elementos de 4, para más de un 90 % del modelo. En la Fig. 7 se muestra el discretizado del modelo propuesto.

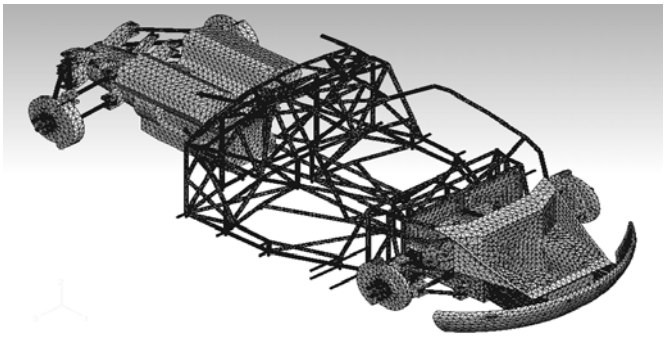

Fig. 7. Discretizado final del modelo con un tamaño promedio de elemento de 40 mm

5.3. Definición de los apoyos

Para simular las condiciones de impacto, los apoyos asignados para el modelo son de dos tipos. El primero de ellos, es un apoyo de restricción total de movimientos en todos los ejes coordenados, aplicado en el extremo opuesto a la carga aplicada al vehículo. El tiempo de impacto o el tiempo de aplicación de carga es muy reducido, por esto la condición de restricción total de todo movimiento replicará los daños causados en una colisión real. Por otro lado, esta restricción de movimiento implica que las fuerzas aplicadas sean absorbidas por todo el vehículo, para con esto evaluar su desempeño a la hora del impacto y pueda estudiarse toda la estructura y no solo una sección de la misma.

El segundo apoyo o restricción de movimiento, está dado en el eje vertical, con la finalidad de no permitir el movimiento hacia abajo o hacia arriba del vehículo, es decir, en las colisiones también están presente las fuerzas de la gravedad, por lo que esta fuerza no permite que el vehículo pueda despegarse considerablemente del suelo. Por otro lado el suelo mismo representa una condición de restricción de movimiento natural, que no podemos dejar de lado. En una colisión la complejidad de las fuerzas, así como de las zonas de impacto no pueden ser predefinidas, ni la forma en que el vehículo absorberá las cargas, por esto debemos entonces considerar y replicar en el modelo, las condiciones naturales de los movimientos y de desplazamiento, que nos permita el entorno en el que sucede la colisión.

6 Verificación del modelo

La verificación de los resultados está basada únicamente en las fotografías y videos de colisiones de vehículos de este tipo (Wreckedexotics, 2005), ya que las investigaciones que empresas realizan en sus modelos, son de carácter restringido y confidencial. La información que estas empresas obtienen de sus estudios, no son datos que estén disponibles. En muchos de los casos, estos estudios son trabajos que compañías de análisis estructural realizan para fabricantes de vehículos, así como para algunos organismos gubernamentales. Existen empresas que evalúan el comportamiento del vehículo ante los impactos (Riley,2005), (Sieminski, 2005), pero estas evaluaciones, si se quiere, son de tipo subjetivas, ya que la condición más importante que debe cumplirse en cuanto a la estructura es, que el habitáculo de los ocupantes no sufra daños que conlleven a lesiones serias en los mismos, es decir, la aceptación o rechazo en cuanto a la capacidad estructural de un nuevo modelo es basado en la capacidad del vehículo de mantener la forma inicial del habitáculo luego de una colisión.

Con esto no se quiere decir que esta es la única condición que determina la seguridad del vehículo; la seguridad está dada por la suma de factores como el riesgo de incendio, las zonas de acceso al habitáculo luego de una colisión, desprendimiento de materiales que puedan causar daños a los ocupantes, entre otros. Todos estos aspectos, son evaluados luego de las colisiones, pero se debe recordar que debido a que no se pueden aplicar ningún tipo de teorías que determine que tipo de carga máxima, corte máximo, deformación máxima, entre otras, deba soportar el vehículo para afirmar que es seguro, solo resta la evaluación subjetiva por parte de organismos de seguridad, quienes de acuerdo a desplazamiento, deformaciones, roturas, desprendimientos y otras características visibles, así como análisis de esfuerzos y de limite máximo de esfuerzo en la estructura afectada luego del impacto, dan su opinión y evaluación del comportamiento del vehículo ante un tipo de colisión específica.

Aunado a esto, el hecho real de que cada vehículo y cada impacto sean diferentes, solo podemos estandarizar y controlar algunas de las características más comunes en los diferentes tipo de choques.

En la Fig. 8 y la Fig. 9 se muestran algunos de los modelos deportivos que fueron sometidos a las pruebas de choque a una velocidad de 60 km/h frontales (Wreckedexotics, 2005). En estas imágenes se puede apreciar el daño que ocasiona un impacto a esta velocidad.

Fig. 8. McLaren f1, impacto frontal. 60km/h

Fig. 9. Lamborghini countach, impacto frontal 60km/h

7 Discusión y análisis de los resultados del modelo

Los resultados están basados en la información visual de vehículos catalogados como deportivos, cuyas colisiones pueden ser atribuidas a impactos frontales (Wreckedexotics, 2005). Los resultados obtenidos en la simulación realizada con el Abaqus CAE 6.4.5, corresponden a una velocidad de impacto de 90 km/h de un vehículo de 1500 kg de peso, contra el canto de un muro completamente rígido e indeformable, incapaz de absorber energía, con un área de contacto inicial de 10 cm x 2.54 cm, que se mantiene inalterable a lo largo del impacto, en un tiempo de 0.02 segundo de duración de impacto y con una aceleración de 10 mts/seg^2.

Una vez realizada la simulación del impacto en el mode-

lo, con las condiciones de carga, restricción de movimiento, características de discretizado y con las condiciones del impacto; se observan dos regiones de máxima deformación y por consiguiente de máximo esfuerzo. La primera de ellas, en su parte frontal, justo en la zona de impacto, donde las magnitudes de los vectores de deformación ascienden a 60cm en la dirección axial del vehículo, las magnitudes de las deformaciones de los ejes perpendiculares son de muy baja magnitud, en el orden de 2 a 4cm de su posición original; también se observa un desplazamiento del eje de las ruedas delanteras, de más de 40cm, en la dirección opuesta al movimiento inicial del vehículo. Estas deformaciones indican que dicho impacto es capaz de generar deformaciones permanentes en estas áreas, sin embargo, aun cuando han presentado deformaciones muy altas del orden de 60cm/m, en la zona de impacto y esfuerzos, cuyas magnitudes superan el esfuerzo de fluencia del material, estas zonas no presenta un falla o ruptura por tracción o compresión del mismo, ya que las magnitudes de estos esfuerzos de Von Mises no superan el esfuerzo de rotura del material.

La segunda zona de máxima deformación, se encuentra justo en la sección de unión del motor con el chasis de vehículo, en esta zona se ve claramente una seria deformación, así como posible rotura del material en las uniones de motor con el chasis; estas magnitudes de deformación ascienden igualmente a más de 20cm/m de deformación en la zona más crítica. La estructura de seguridad ubicada justo detrás del habitáculo y antes del motor del vehículo, sufre deformaciones y falla por carga estática, los esfuerzos superaron en algunas de las zonas el esfuerzo último del material. Sin embargo, estas zonas o áreas solo representan un 0.5% del total de área deformada del vehículo.

Es importante hacer notar que aún cuando el vehículo a soportado toda la carga aplicada, el porcentaje de deformación o de daños en el auto abarca un 75 % de la superficie en general. Si bien los desplazamientos de algunos nodos o elementos del habitáculo son muy elevados, las deformaciones de estos nodos no superan los 3cm/m en promedio. Encontrándose que sólo los nodos deformados en un 60cm/m, equivalen al 8 % del total del auto. Con esto, la pérdida de longitud del vehículo se calcula en más de 60 cm con respecto al estado inicial. En las Fig. 10, 11 y 12 se muestran las deformaciones sufridas por el vehículo tras el impacto. En las Fig. 13, 14 y 15 se puede apreciar como el habitáculo de los ocupantes no se ve seriamente afectado por el impacto.

El habitáculo de los pasajeros presenta deformaciones de solo 3 cm, ubicadas en la base inferior del parabrisas delantero y deformaciones que van desde 1cm a 0.2 cm, a lo largo de los parales del techo, donde la menor deformación está ubicada en el techo del vehículo. Por otro lado, las deformaciones dentro del habitáculo no superan los 5 cm como máximo, en el área que ocupa los pies de los pasajeros y deformaciones de solo 5 mm en la base de los asientos de los pasajeros, es decir, el volumen del habitáculo permaneció casi constante.

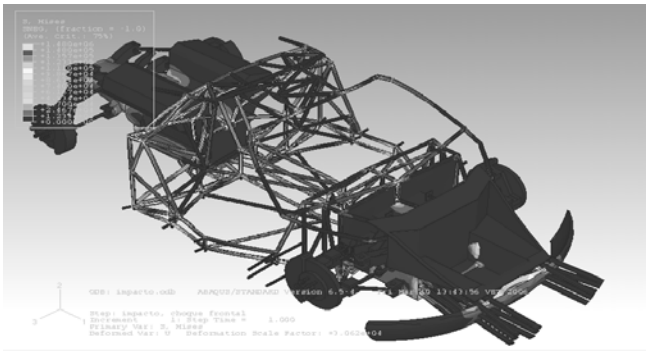

Fig. 10. Vista isométrica del vehículo después del impacto. Las zonas en rojo muestran las máximas deformaciones del vehículo

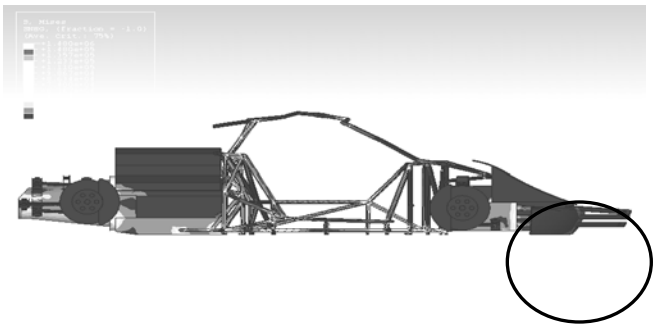

Fig. 11. Vista lateral del vehiculo después del impacto frontal, los tubos salientes de la parte frontal muestran la posición original de estos antes del impacto

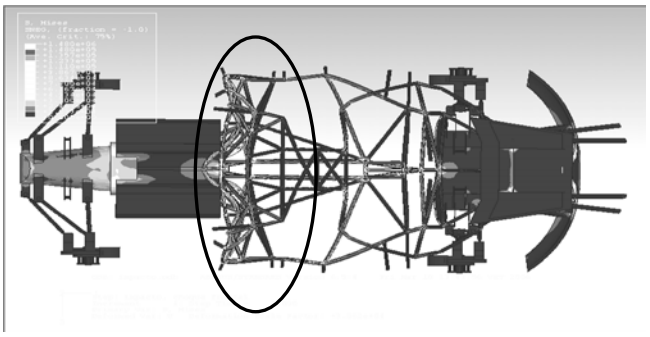

Fig. 12. Vista superior del vehículo. En esta vista se puede observar como el motor del vehículo se desplaza hacia adelante pero sin llegar a penetrar el volumen de los ocupantes

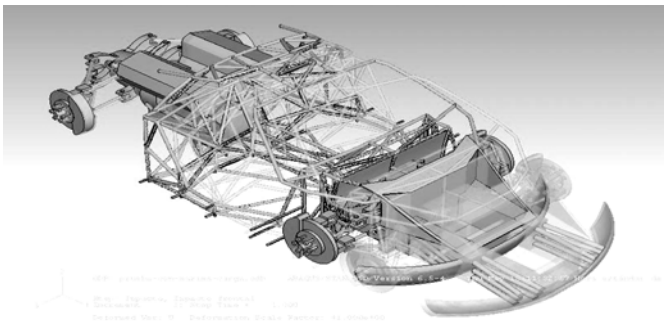

Fig. 13. Comparación de los estados: el color verde representa el vehículo antes del impacto, y el color naranja representa el vehículo después del impacto

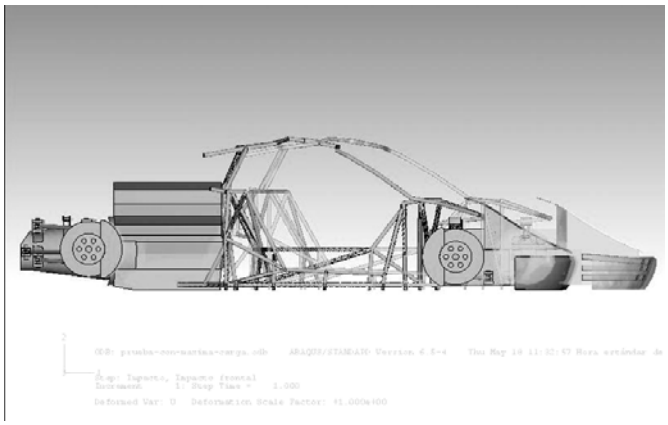

Fig. 14. En esta figura se puede observar como la zona justo por detrás del habitáculo logra deformarse a tal punto que es capaz de absorber gran parte de la carga actuante

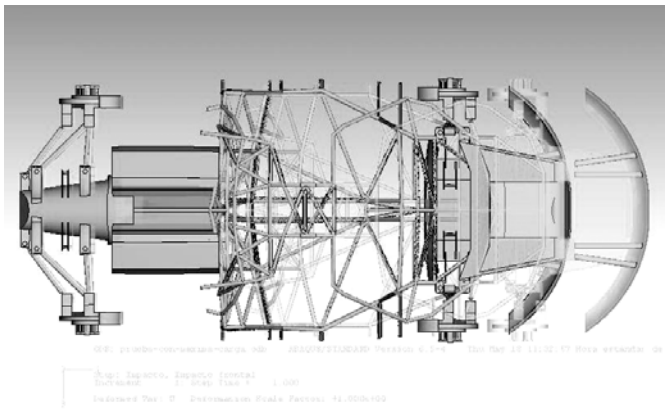

Fig. 15. Vista superior comparativa entre antes y después del impacto

8 Conclusiones

Este vehículo fue diseñado con el propósito de asegurar la mayor integridad de su estructura ante una colisión frontal, sin comprometer su ligereza y aspecto. Obteniéndose así, un automóvil deportivo que puede asegurar mínimos daños al momento de un impacto frontal a 90 km/h.

Las deformaciones ocurridas en el chasis del vehículo no representan amenaza para los ocupantes, ya que las cargas a las que se sometería el vehículo al impactar contra un muro a 90 km/h, es absorbida en su totalidad por las zonas diseñadas para tal fin. Esto nos lleva a asegurar que las posibilidades de daños a los ocupantes es mínima, siempre que dichos ocupantes utilicen los cinturones de seguridad.

Los resultados obtenidos en la simulación son altamente representativos, en comparación con vehículos de tipo deportivos que han sufrido impactos de similares condiciones.

El chasis de este tipo de autos, se diseñó con la principal característica de brindar seguridad a los ocupantes. Siempre que dichos ocupantes cumplan las medidas de seguridad impuestas por los organismos competentes de cada país, no sufrirán lesiones debidas a falla en el chasis.

Es importante destacar, que los resultados pueden variar en el modelo real, ya que este contaría con cada uno de los componentes que integran el vehículo, como la carrocería, luces, vidrios, plásticos, entre otros. Por otro lado, estas partes del vehículo también son capaces de absorber impactos, aún cuando la simulación del auto con todos sus componentes es muy complicada y trae diversas limitantes de tipo técnicas, como insuficiencia de cómputo, interacción entre elementos, aleatoriedad de los movimientos, entre otras. Sin embargo, se puede asegurar que la variación del comportamiento del vehículo ante el impacto no se verá seriamente afectada, ya que estas partes, si bien poseen capacidad para absorber impactos, fácilmente fallan ante magnitudes de carga tan elevadas. Tal vez, la mayor contribución de estas partes sea dada por la carrocería, ya que esta representa una importante área de absorción y deformación ante una colisión.

Este modelo es un prototipo de automóvil deportivo, los resultados aquí obtenidos servirán solo para lograr obtener las mejores características de seguridad estructural para el modelo real. Sin embargo, podemos afirmar que el comportamiento del modelo frente a un impacto frontal ha sido excelente, pudiéndose asegurar de una forma objetiva que el habitáculo de los pasajeros no se ha deformado a tal punto que pudiera causar daños a sus ocupantes.

Referencias

Abaqus CAE 6.4.5, Abaqus products, 2005, Abaqus CAE help, Abaqus Inc.

A.M.S. y O.D., 2004, Realidad Limite, Automóvil Fórmula, No. 320, pp. 25.

Ansys W, 2010, Ansys Products, Ansys Inc.

Autocad, 2006, Reference Manual, Autodesk Inc.

Autodesck Algor Simulation, 2010, Autodesck inc, Algor Inc.

AutoFEM, 2011, Autofemsoft products, AutoFEM Software, JSC.

Automobiles Classiques, 2002, Le prix des voitures de collection, Automóviles classiques, No. 121, pp. 111.

Car and Driver, 2001, Lamborghini Countach, Car and Driver en Español, Año 3, No. 32, pp. 42.

FEMAP, 2011, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.

Kirkpatrick S, Simons J, Antou T, Development and Validation of High Fidelity Vehicle Crash Simulation Models. International Crashworthiness Conference. Se encuentra en: http://www.ara.com/Projects/SVO/Papers_white/IJC98_CVic.pdf, Fecha de consulta: 10 Noviembre 2005.

Macneill R, Kirkpatrick S, Post-Collision Inspection and Data Analysis of a Passenger Rail Car, ASME/IEEE Joint Rail Conferenc. Se encuentra en: http://www.ara.com/Projects/SVO/Papers_white/postmortem.pdf, Fecha de consulta: 10 Noviembre 2005.

National Highway Traffic Safety Administration. Crash Test and Rollover Ratings at Safercar. Se encuentra en:

http://www.nhtsa.dot.gov/, Fecha de consulta: 10 Enero 2006.

Riley B, Computational Modeling in Automotive Research: Vehicles for the Next Generation. Se encuentra en: http://www.csm.ornl.gov/SC98/car.html, Fecha de consulta: 25 Noviembre 2005.

Santana M, 2005, Porsche Carrera GT, Auto Pasión, Vol. 1, No. 1, pp. 226.

Sieminski D, 2005, Formula 1 Race Car Design Takes Finite Element Analisis to the Next Level. Se encuentra en http://www.nenastran.com/newnoran/pressPDF/Formula%201%20Race%20Car%20Design%20Takes%20Finite%20Element%20Analysis.pdf , Fecha de consulta: 20 Enero 2005.

Wreckedexotics 2005, Se encuentra en http://www.wreckedexotics.com, Fecha de consulta: 25 Noviembre 2005.

Recibido: *15 de enero 2011*

Revisado: *27 de febrero de 2011*