



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

## REPORTE DE EXPERIENCIA PROFESIONAL COMO INGENIERO DE ANÁLISIS CAE EN GENERAL MOTORS

MODALIDAD DE TITULACIÓN:

“TRABAJO PROFESIONAL”

NOMBRE DEL ALUMNO: VIDALES OROZCO RODRIGO

NÚMERO DE CUENTA: 304193408

CARRERA: ING. MECATRÓNICA

ASESOR: DR. FERNANDO VELÁZQUEZ VILLEGAS

2015

## Índice

<b>Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>Capítulo 1. Descripción de la empresa</b> .....	<b>9</b>
Visión.....	9
Misión.....	9
Valores fundamentales de la compañía.....	9
Valores de General Motors de México.....	9
Historia.....	9
Principales Marcas.....	10
Organigrama.....	11
<b>Capítulo 2. Descripción del puesto de trabajo</b> .....	<b>13</b>
Lugar de trabajo.....	13
Objetivo del puesto.....	14
Áreas de comunicación.....	14
<b>Capítulo 3. Descripción de mi participación en la empresa</b> .....	<b>16</b>
Principales funciones y responsabilidades.....	16
Actividades realizadas en base a procedimientos establecidos por GM (Trabajo Estándar). .....	16
Actividades para reducción de costos o re trabajos.....	19
Actividades que se realizan sin procedimiento estándar.....	19
Actividades Design For Six Sigma (DFSS).....	20
<b>Capítulo 4. Proyecto realizado</b> .....	<b>21</b>
Mejora de la correlación para la prueba de indentación del descansa brazos.....	21
Introducción.....	21
Desarrollo.....	26
Recopilación de datos sobre la prueba de indentación para descansa brazos.....	26
Realización de pruebas físicas en la puerta.....	26
Configuración de la nueva prueba de indentación para descansa brazos en CAE.....	29
Toma de datos.....	35
Resultados.....	36
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	<b>39</b>
<b>Bibliografía y referencias</b> .....	<b>41</b>

## **Introducción**

El proceso de desarrollo de un automóvil engloba una serie de procesos complejos puesto que el producto final debe cumplir una serie de requisitos de seguridad global, emisiones y consumo de combustible, principalmente.

Un típico automóvil sedán mediano contiene entre 2500 a 3000 partes que deben pasar por una etapa de diseño, desarrollo, integración, validación, liberación para realizar los herramientas necesarios y finalmente ser ensambladas en planta. En conjunto, dichas partes deben funcionar a la primera vez, y cada vez que el conductor enciende el coche, sin importar la temperatura, humedad, altura o las condiciones del camino.

Independientemente de su función básica que es transportar, los coches de pasajeros y camiones son considerados parte de la moda en la industria, por lo cual también deben satisfacer las necesidades del cliente en cuanto a gusto y espacio personal. Por este motivo el desarrollo del vehículo se enfoca al cliente y a un determinado mercado, de tal forma que los productos sean considerados en la decisión final de compra.

Para lograr que todo esto sea posible en tiempo y forma, General Motors (GM) y otras automotrices utilizan un proceso documentado y cronometrado para el desarrollo del producto. Dicho proceso maneja un estándar a nivel mundial en cuanto a funciones y subsistemas, que permite coordinar y reducir el tiempo en traer nuevos vehículos al mercado.

El Global Vehicle Development Process (GVDP) es la herramienta que usa General Motors que permite desarrollar el vehículo desde la identificación de la oportunidad de cliente hasta la introducción al mercado. Las principales ventajas que ofrece son:

- Uso efectivo de los recursos globales para el desarrollo del producto.
- Integración efectiva de actividades críticas a través de funciones de tiempo. (Ingeniería, manufactura, finanzas, planeación, compras, mercadotecnia)
- Puntualidad para la toma de decisiones críticas.
- Propicia la mejora continua.

El desarrollo del vehículo puede ser separado en tres fases principales: Desarrollo de Arquitectura, Desarrollo de Programa y Ejecución de programa.

### **Desarrollo de Arquitectura**

En esta etapa se planea el diseño de la arquitectura del vehículo, motores y transmisión. Este enfoque busca la maximización del costo y la repartición del trabajo adecuada en todas las regiones.

En este sentido, la arquitectura de los vehículos es el conjunto de partes comunes que tienen la dimensión y el rendimiento de los márgenes de banda para un rango de automóviles. Todos los vehículos de una familia de arquitectura comparten:

- Componentes comunes críticos (chasis).

- Desempeño similar.
- Tamaño similar en la distancia entre ejes.
- Facilidad de producción en la misma planta de ensamblaje.

Los componentes considerados en esta etapa suelen ser los más costosos por sus dimensiones y por sus procesos de manufactura, de igual forma conllevan un extenso diseño y pruebas, no obstante a su vez ayudan para futuros diseños y mejoras.

Por las características de la arquitectura vehicular, es posible satisfacer diferentes tamaños y clases de vehículos que compartan herramientas de montaje y sean construidos en la misma instalación. Una arquitectura se desarrolla una vez y se utiliza a través de múltiples ciclos de desarrollo del producto.

### **Desarrollo del Programa**

En esta etapa se revisa a detalle que la planeación de vehículo vaya bien direccionada en función a la arquitectura dada. Para esto se maneja un número de definiciones que apoyan al diseño y otorgan la dirección de “procede/no procede”. Algunas de características de esta etapa son:

- Posicionamiento del vehículo de acuerdo a peticiones de mercado, clientes y estrategia de accesorios.
- Contenido del producto (contenido de accesorios estándar, opcional, tecnologías clave)
- Requisitos técnicos del vehículo y de manufactura.
- Selección de temas de estilo exterior e interior.
- Direccionamiento de la planta de ensamblaje.
- Ventas potenciales y casos de negocio.
- Desarrollo de las soluciones de ingeniería y rendimiento dentro de los márgenes de la arquitectura.

### **Ejecución del programa**

Siguiendo el GVDP, se llevan a cabo todas las actividades de ejecución de programa de manera de apoyar críticamente el desarrollo, validación y fabricación del vehículo con fecha de inicio y fin, asegurando entregas en tiempo y calidad del producto final.

Las principales fases de esta etapa se pueden resumir en:

- **Desarrollo del estilo:** Creación de diseños atractivos y convincentes para un determinado mercado, comprometido con los gustos del cliente.
- **Desarrollo de la Ingeniería:** Con base a los gustos y necesidades del cliente, determinados en las etapas anteriores, se realizan los requerimientos de carácter técnico que por definición tienen que ser cuantitativos, medibles y alcanzables. Esta fase comprende el desarrollo desde los componentes estructurales del vehículo hasta los componentes finales de estilizado.

- **Validación virtual y física:** El proceso de desarrollo es asistido por evaluaciones virtuales que orientan el diseño ya que permiten identificar tempranamente problemas de ingeniería y manufactura sin necesidad de muestras físicas. Posteriormente se realizan validaciones de “hardware” para evaluar el desempeño real y reducir la cantidad de defectos en el producto final. Este proceso es altamente coordinado y de mejora continua, pues en un futuro el objetivo es realizar todo sin necesidad de recurrir a muestras físicas.
- **Tren motriz:** Está presente a lo largo del desarrollo del vehículo y abarca motores, transmisiones, módulos de control, dispositivos híbridos y nuevas tecnologías de propulsión. Es de importancia crítica pues el tren motriz interactúa con los demás sistemas del carro, como el de enfriamiento, eléctrico o chasis. Dependiendo de éste también se pueden definir otros requerimientos como los frenos o el control de tracción. También se le da una especial importancia al ahorro de combustible y control de emisiones.
- **Producción:** La parte final de esta etapa, guía el sistema de manufactura del vehículo que va desde el proceso de estampado, hasta el taller de pintura y ensamblaje general. Las plantas de ensamble funcionan con estándares rigurosos para asegurar que los vehículos sean construidos con la calidad adecuada y sin la menor cantidad de problemas de montaje.

Independientemente de las actividades técnicas realizadas también trabajan de manera importante otras áreas apoyando el desarrollo del producto tales como finanzas, mercadotecnia, ventas, compras y servicio.

### **Validación virtual CAE**

La evaluación virtual es una parte importante en el proceso de diseño de un vehículo y el presente trabajo se enfocará en dicha área, puesto que es la función básica de un ingeniero de análisis CAE.

Dicha evaluación virtual se respalda de la **Ingeniería Asistida por Computadora (CAE**, por sus siglas en inglés) que se puede definir como el conjunto de herramientas tecnológicas necesarias para poder desarrollar el producto de forma virtual y evaluar condiciones de operación u otras consideraciones físicas que conlleven a su optimización.

Las aplicaciones de CAE otorgan soporte a un amplio rango de disciplinas y fenómenos de la ingeniería tales como el análisis de esfuerzos, análisis dinámicos de componentes y ensambles, análisis térmico, análisis de fluidos, dinámica y cinemática de mecanismos, simulación de procesos de manufactura como pueden ser moldeo o troquelado.

Algunas de las ventajas más importantes del análisis CAE son:

1. De acuerdo a los resultados de los análisis CAE, se pueden tomar decisiones que guíen o mejoren el diseño.
2. Los diseños pueden ser evaluados y redefinidos usando simulaciones a comparación de pruebas físicas en prototipos, lo cual ahorra tiempo y dinero.

3. CAE puede proveer el entendimiento adecuado en tempranas etapas del diseño, donde los cambios son menos costosos.
4. CAE ayuda a los grupos de ingenieros a entender las implicaciones y riesgos de sus diseños.
5. El análisis CAE bien integrado al proceso de diseño, es capaz de identificar problemas potenciales y por lo tanto reducir los llamados a garantía del producto final.

Encontrar las soluciones adecuadas del análisis CAE requiere de aplicar los principios de la física, como balances de masa, conservación de energía y equilibrio, propiedades mecánicas de los materiales en geometrías complejas lo que dirige a la mayoría de los análisis a problemas de ecuaciones diferenciales (Siemens PLM Software, 2014).

Para resolver estas cuestiones de cálculos se utiliza el **Método de Elemento Finito (FEA)**, que es un método numérico para obtener la solución aproximada de ecuaciones diferenciales parciales u ordinarias. Ésta es una herramienta especialmente poderosa para tratar condiciones de frontera definidas en geometrías complejas, las cuales son comunes de encontrar en la mayoría de las aplicaciones.

La idea clave del método de elemento finito es discretizar el dominio de la solución en un dominio más particular de interés llamado **elementos**. Esta subdivisión permite tener elementos de formas regulares las cuales pueden ser analizadas y resueltas matricialmente. Este arreglo de elementos está unido por **nodos**, siendo ambos los componentes principales en un modelo de elemento finito. El proceso de elemento finito resulta en un sistema de ecuaciones con un número de elementos considerable, que deben ser resueltas para determinar valores en nodos desconocidos (Bhatti Asghar M., 2005).

La labor primordial de un ingeniero de análisis CAE consiste en llevar a cabo los pasos elementales para poder realizar el proceso de elemento finito, que son pre-proceso, proceso y post-proceso. Las consideraciones en este respecto van desde el conocimiento técnico en ingeniería, el manejo de software CAD (Diseño Asistido por Computadora, por sus siglas en inglés)/CAE y la interpretación adecuada de los resultados.

### **Pre-proceso**

El ingeniero de análisis CAE es capaz de comenzar la construcción de un modelo específico a analizar. El punto de partida para obtener un modelo de FEA por lo general suele ser un modelo CAD, ya que cuenta con las propiedades del material, forma, volumen y detalles muy específicos como pequeños contornos. Como parte de la definición matemática del modelo se tiene que establecer un criterio para dividir la geometría CAD en pequeños *elementos finitos*, esta acción se le conoce como mallado (meshing, en inglés). Se podría considerar que el proceso de mallado es el máximo exponente de la discretización de un modelo (Kurowski Paul M., 2004).

Los principales criterios para discretizar un modelo son el tamaño y el orden el elemento, que dependen de la decisión del analista para obtener un modelo lo más fiel a la geometría sin incrementar o exceder las capacidades de procesamiento computacional necesarias para la

solución. La idealización de los elementos finitos puede realizarse con elementos en 3D como tetraedros, prismas o hexaedros, o para otros casos también es posible usar planos 2D, conocidos como *shells* que están compuestos por triángulos o cuadrados. El software existente en el mercado por lo general contiene una extensa librería de elementos adecuados para resolver una amplia variedad de problemas prácticos (Bhatti Asghar M., 2005).

En ocasiones esta etapa suele tomar tiempo pues a pesar de existir software especializado en mallar automáticamente, la malla no siempre es la más adecuada para llevar a cabo el análisis y hay que hacer ajustes de forma manual con herramientas del software de mallado.

Una vez obtenido el modelo discretizado, se procede a definir las propiedades del material. Estas propiedades pueden venir incluidas en alguna librería del software, o tomarse de bases de datos de materiales y deben ser asignadas a entidades que describan una geometría completa o solo a ciertos elementos.

De igual forma que con el material, se deben de establecer las condiciones de frontera, es decir los puntos de soporte, restricciones, aplicación de cargas que se pueden realizar para todo el modelo o solo cierto número de elementos. Este proceso de preparar el modelo de CAD para geometría de FEA puede tomar desde horas hasta semanas, dependiendo de la complejidad de la geometría que se quiera analizar.

### **Proceso**

Una vez con el modelo discretizado y con toda la información de la etapa anterior se procede a la etapa de procesamiento del modelo.

La idea básica del elemento finito es tener un modelo más simple de uno complicado, por tal motivo la solución por cada subregión de los elementos suele hacerse eligiendo una función simple. Esto genera modelos de interpolación con ecuaciones de polinomios, en las que es más fácil llevar a cabo diferenciación o integración. Teóricamente un polinomio de orden infinito tiende a la solución exacta, sin embargo en la práctica se usan solo polinomios de orden finito para obtener una aproximación a la solución exacta.

A partir de estas formulaciones se obtienen las ecuaciones de equilibrio para el modelo, y se generan los arreglos matriciales necesarios para saber los valores de los nodos “desconocidos” y en función de un vector “P”, que representa las condiciones de frontera del problema. Esta acción es repetitiva durante todo el proceso de simulación del software. Si se requiere también se pueden obtener valores de esfuerzo y deformación usando las ecuaciones correspondientes a mecánica de sólidos (Bhatti Asghar M., 2005).

La gran cantidad de ecuaciones resultantes de este proceso genera la necesidad de utilizar equipo de cómputo con un software especializado, y que a su vez maneje un solver para la iteración de las ecuaciones del modelo FEA. Existe una amplia variedad en el mercado, el usado para realizar este trabajo en GM es la interfaz de Hypermesh y Primer con el solver OptiStruct o Ls-Dyna.

## Post-proceso

Esta etapa debe de entenderse como la interpretación de los resultados que arroja el código del software utilizado y configurado previamente. Por tal motivo debe de considerarse una revisión detallada, pues en base a esto se toman las decisiones de diseño.

De forma general todos los modelos de FEA deben de cumplir ciertas cuestiones como la representación adecuada del fenómeno previsto en la realidad, de acuerdo a las fuerzas y condiciones de frontera, revisar que no haya elementos indebidamente sujetos, restricciones en lugares erróneos, y que los valores de fuerza o esfuerzo estén dentro de los límites razonables del fenómeno simulado. Una herramienta útil para revisar las reacciones en los modelos puede ser el uso de diagramas de cuerpo libre.

En zonas específicas de los resultados donde existan altas concentraciones de esfuerzos, o de la variable física que se desee medir, es recomendable revisar el área para determinar si es necesario mallar el área de nuevo, o posiblemente encontrar errores de elementos que estén distorsionados y provoquen lecturas erróneas. Este tipo de defectos se conocen como errores de discretización y pueden ser corregidos y controlados haciendo uso de diferentes técnicas de mallado (Kurowski Paul M., 2004).

En otras ocasiones lo errores aparecen en las propiedades del material y la geometría CAD, por lo que es recomendable revisar más de una vez el modelo, antes de mandar la instrucción de resolver el código. Por tales motivos este proceso es iterativo ya que requiere de varios ciclos para poder corregir y optimizar el modelo de elemento finito y al final poder obtener certeza en la solución.

Los resultados previamente validados, se disponen a presentarse y se incluyen animaciones y gráficas para poder ser cuestionados y obtener conclusiones de los análisis. Éstas pueden incluir modificaciones de la geometría, del material y por lo general se almacenan para poder ser referencia en diseños futuros que sean similares.

En esencia estos pasos muestran el uso del elemento finito, y describen la labor de un ingeniero de análisis CAE. Como parte de General Motors, desempeño mis actividades en esta área de soporte para el diseño de interiores de puertas, o "Door Trim", trabajando de forma activa durante el desarrollo de la geometría en su etapa temprana, hasta el último diseño del cual sale el herramental final de producción masiva.

Los procedimientos son diversos para puertas, pero el objetivo en conjunto es proteger a los ocupantes de un posible impacto lateral al vehículo, cuidando la prevalencia del diseño interior, la utilidad de sus componentes y su ergonomía.



## **Capítulo1. Descripción de la empresa**

### **Visión de la empresa**

Diseñar, construir y vender los mejores autos del mundo.

Esto con base en:

- Comprometida con los más altos estándares de calidad en producto y servicio al cliente.
- Marcas frecuentes y valiosas.
- Crecimiento con rentabilidad.

### **Misión de la empresa**

Ser la marca automotriz más valiosa del mundo.

### **Valores fundamentales de la compañía**

**Clientes:** Son el centro de todo lo que hacemos. Escuchamos sus necesidades con atención. Todas las relaciones importan. La seguridad y calidad son nuestro principal compromiso.

**Relaciones:** Trabajamos con unidad, transparencia, con respeto y aprecio a las fortalezas de cada miembro de GM. A nivel mundial, alentamos diversas formas de pensar y colaborar, para crear magnificas experiencias a nuestros clientes.

**Excelencia:** Actuamos con integridad. Nos impulsa el ingenio y la innovación. Tenemos coraje de hacer y decir lo que resulta difícil. Tenemos la responsabilidad sobre los resultados y la tenacidad para triunfar.

### **Historia**

De acuerdo con la página de General Motors de México (2015), estos son los puntos más destacados de la historia de la empresa y su presencia en el país:

- 1908. General Motors fue fundada por William “Billy” Durant el 16 de Septiembre de 1908. Pronto la empresa se convirtió en un vasto complejo de plantas armadoras de automóviles y camiones a nivel mundial.
- 1910-1928. GM inicia con marcas como Maxwell, Buick, Oakland, Oldsmobile y Cadillac. Más tarde también se incorporan Vauxhall y Opel.
- 1935. El 23 de Septiembre General Motors de México es constituida e inicia operaciones con 36 empleados en sus oficinas.
- 1937. Arranca operaciones la planta de General Motors en la Ciudad de México fabricando camiones. Se contaba con 22 trabajadores y se generaban 10 unidades diarias.
- 1938. Comienza la producción de los primeros vehículos sedanes en el país.
- 1951. La cifra de fuerza laboral de GM de México (GMM) es de 1750 personas, produciendo una cifra record de 12,000 unidades anuales.
- 1965. Inicia operaciones la planta de motores y fundición de GMM ubicada en Toluca.

- 1979. México produce 50, 000 unidades anuales marcando un nuevo record. GM provee el vehículo oficial en la primera visita de Juan Pablo II a México (Chevrolet Cheyenne color blanco).
- 1981. Se inaugura la planta de ensamble de GM en Ramos Arizpe, Coahuila.
- 1985. GMM celebra su 50 aniversario y se consolida como la empresa privada número uno del país.
- 1995. Inician operaciones la planta de estampado de Ramos Arizpe, la planta de Ensamble de Silao y el centro de Ingeniería albergado en Toluca (TREC).
- 1996. Se abre el servicio de posventa de GM, uno de los 40 almacenes de reparto de refacciones a nivel mundial.
- 1997. Comienzo de operaciones de la planta de estampado del Complejo Silao.
- 1999. Se inaugura el Centro Técnico de Ingeniería y la planta de transmisiones de Ramos Arizpe.
- 2000. Apertura del edificio Siglo XXI, actuales oficinas corporativas de GMM.
- 2001. Inicia operaciones la planta de motores de Silao.
- 2008. GM anuncia el inicio oficial de operaciones de la planta de ensamble de San Luis Potosí, para la fabricación del Chevrolet Aveo. También comienzan a operar la planta de transmisiones en Silao y en el complejo de Ramos Arizpe.
- 2009. Producto de la restauración financiera, se crea la nueva General Motors Company con un enfoque a cuatro marcas principales: Chevrolet, Buick, GMC y Cadillac.
- 2010. GMM celebra 75 años de presencia en México.
- 2011. Chevrolet celebra sus primeros 100 años de vida con más de 209 millones de vehículos vendidos desde su creación.
- 2015. GM es una empresa global con un poco más de 212,000 empleados en 396 complejos con presencia en todos los continentes y con 21,000 proveedores que hacen posible el desarrollo de nuevos vehículos y tecnologías, que contribuyen con la satisfacción del cliente y cuidado del medio ambiente.

## **Principales marcas**

La gama actual de vehículos que tiene General Motors va desde carros eléctricos a camiones de uso rudo, carros de una sola cabina o convertibles, con el fin de ofrecer un amplio rango de modelos en 120 países alrededor del mundo. Con algunas alianzas estratégicas se venden vehículos bajo las siguiente marcas: Chevrolet, Buick, Cadillac, Baoiun, Holden, Isuzu, Jiefang, Opel, Vauxhall y Wuling. También existe una importante participación en algunas armadoras chinas como SAIC-GM, SAIC-GM-Wuling, FAW-GM y GM Korea.

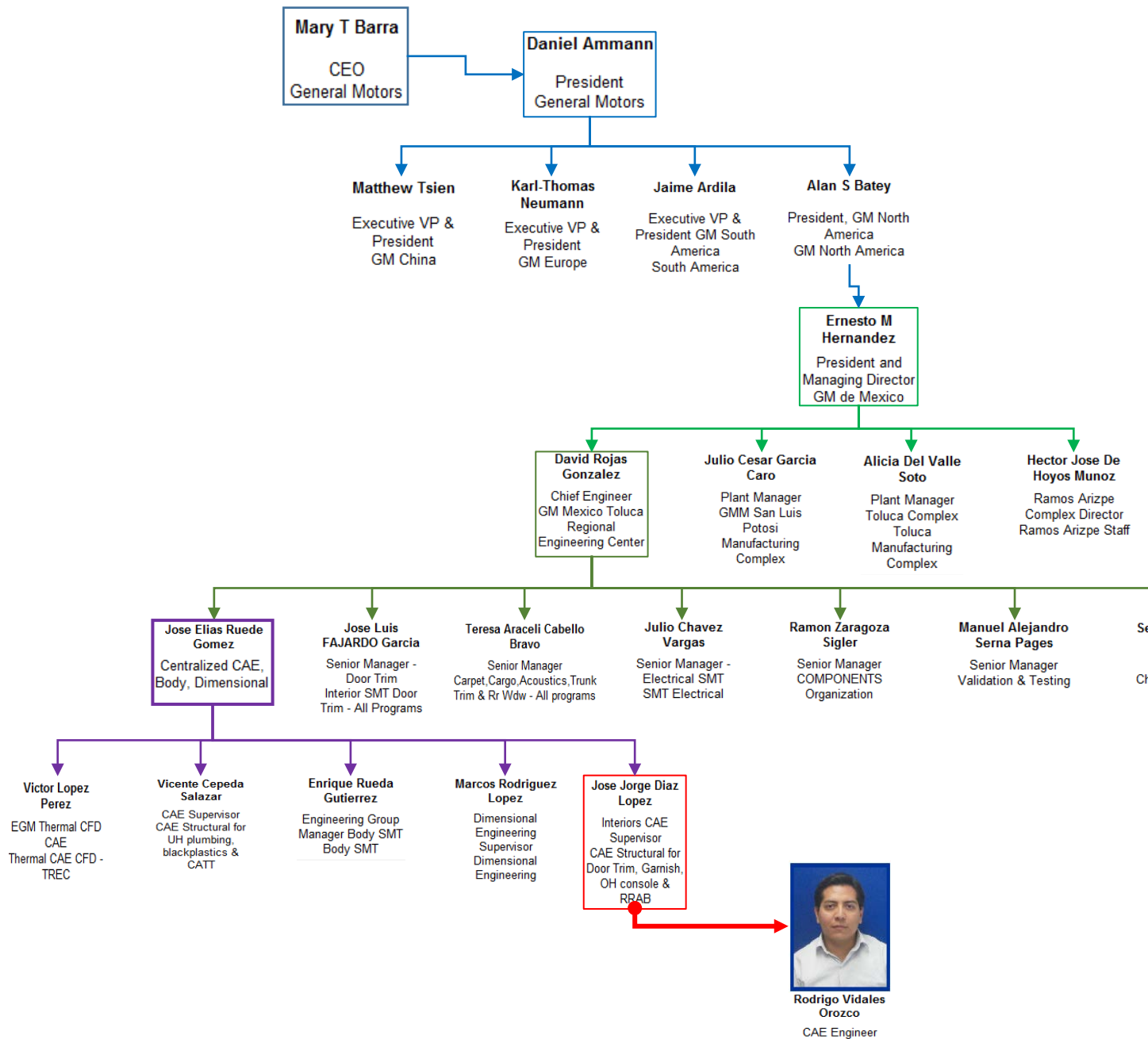
Para el mercado de Norte América, que incluye Estados Unidos, México y Canadá, se distribuyen las siguientes marcas que cubren las necesidades para todo tipo de cliente y uso:

- Chevrolet: Es la marca de mayor tradición y volumen de General Motors. Con un extenso portafolio de productos, Chevrolet tiene un auto y una solución para cada necesidad. La versatilidad y confiabilidad, así como un manejo divertido y seguro son elementos constantes en la marca Chevrolet.

- Buick: Es la marca de autos y crossovers premium que brinda una extraordinaria experiencia de manejo. Desde sus inicios, Buick se ha caracterizado por tener modernos diseños y confortables interiores. Hoy, con la misma atención a cada detalle, Buick continua siendo fiel a esa filosofía con la promesa de ser "The New Class of World Class".
- GMC: Marca especializada en camionetas de General Motors, que ofrece SUVs, pickups y crossovers bajo la filosofía "Professional Grade", lema que refleja el compromiso de la marca por crear productos con tecnología de punta, excelente desempeño y equipamiento más allá de las expectativas.
- Cadillac: Es la marca de lujo de General Motors y representa la fusión del arte y la ciencia. Desde sus inicios, Cadillac se ha considerado el estándar mundial y el punto de referencia de la industria automotriz gracias a que sus vehículos ofrecen tecnología de punta, impresionantes diseños vanguardistas y desempeño extraordinario.

## **Organigrama**

### **Comité ejecutivo**



El organigrama de GM es extenso, no obstante se presenta de manera general la organización desde el comité ejecutivo que guía a la empresa de manera global, hasta el caso particular de GM de México. De ahí se puede dividir en los principales complejos de manufactura, ensamble y el Toluca Regional Engineering Center (TREC), que es el centro de diseño del GM en el país y a la cual pertenezco cubriendo la posición de ingeniero de análisis CAE.

Cabe mencionar que se presentaron las principales divisiones respecto al área de ingeniería y manufactura, pero también existe una compleja organización que comanda las áreas de finanzas, marketing, post venta y recursos humanos.

## **Capítulo2. Descripción del puesto de trabajo**

Nombre de puesto: Ingeniero de Análisis CAE para Paneles de Puertas (CAE Door Trim).

Área: Centralized CAE, Body & Dimensional.

Grupo de trabajo: CAE Structural for Door Trim, Garnish, OH console & RRAB.

Jefe directo: Ing. José Jorge Díaz López.

## **Lugar de trabajo**

Toluca Regional Engineering Center (TREC), es el sitio de trabajo donde se realizan las funciones descritas en este documento. El centro de ingeniería comparte instalaciones con el almacén de post ventas, la planta de fundición y la planta de motores. Su ubicación en el centro del país, cerca del Distrito Federal, y con el aeropuerto internacional de Toluca, otorgan la facilidad para realizar las funciones de diseño y manufactura de manera conjunta con los diferentes proveedores y las rutas adecuadas para la distribución de los productos finales.

Desde su fundación en 1995, el TREC se ha caracterizado por realizar el diseño de componentes para los diferentes subsistemas del vehículo, entregando resultados en tiempo y forma de manera confiable, además de distinguirse por la innovación de nuevas tecnologías y la resolución pronta para diferentes problemas de ingeniería, ya sea de diseño o manufactura.

Hoy en día el TREC es un eje importante de desarrollo para llevar a cabo el diseño de partes de vehículos para cubrir principalmente las necesidades de GM Norteamérica. De acuerdo a su organización, engloba las siguientes áreas y atribuciones:

- Body, CAE & Dimensional SMT: Diseño de bumpers, fascias y grilles. Análisis CAE de puertas, consolas de piso, bolsas de aire, garnish, piso de carro y cajuela, parabrisas, líneas de aire acondicionado. Sistemas dimensionales. Análisis CFD de aire acondicionado al interior del vehículo, frenos, gases de combustión en escapes.
- Electrical SMT: Arquitectura electrónica del vehículo para seguridad del ocupante, entretenimiento, controles y displays. Diseño de arneses vehiculares, sistemas de carga y almacenamiento de energía.
- HVAC, PTC, Thermal: Diseño de líneas de aire acondicionado, sistemas de enfriamiento del vehículo, radiadores, depósitos de anticongelante, brackets de sujeción.
- Powertrain & Chassis engineering: Software y hardware de tren motriz, laboratorios de calibración, suspensiones, estructura del chasis, frenos para autos y camionetas, integración de chasis y tren motriz, líneas de combustible.
- Interior SMT Door Trim: Diseño de paneles de puertas para autos y camionetas de diferentes gamas.
- Carpet, cargo, acoustics & trunk trim: Alfombras para automóvil y camioneta, sistemas de reducción de ruido y vibración, diseño de cajuelas y piso de carro.

## **Objetivo del puesto**

Los objetivos más importantes se pueden englobar en los siguientes apartados:

- Dar soporte por medio de análisis CAE a diferentes áreas del TREC, sobre todo al equipo de diseño de puertas para llevar a cabo validaciones virtuales con base en procedimientos estándar o análisis adicionales que no vengan descritos en ningún apartado o guía de la empresa.

- Involucrarse continuamente en proyectos que involucren nuevas innovaciones, reducción de tiempo o costos para la empresa por medio de la metodología Design For Six Sigma (DFSS).
- Estar en constante proceso de actualización y certificación para el uso adecuado del software y mantener el nivel de conocimientos de ingeniería que requiere el área de CAE.

## Áreas de comunicación

### *Interna*

- CAE Structural for Door Trim, Garnish, OH console & RRAB: Es el grupo al cual pertenezco. Con un total de 20 personas, nos encontramos realizando actividades de CAE para puertas, garnishes, consolas de piso y bolsas de aire. Existe una comunicación constante por cuestiones de trabajo en equipo o asesoría por parte de las personas con más experiencia.
- Centralized CAE, Body & Dimensional: Es el área que corresponde mi grupo de trabajo, y como tal compartimos objetivos y planes de acción para estar en mejora continua, atender algún problema o responder a las inquietudes colectivas que llegasen a existir.
- Grupo de Door Trim TREC: Reúne a ingenieros y diseñadores que se encargan de crear los paneles de puerta con sus respectivos componentes, se trabaja de manera activa con ellos para guiar el diseño de dicho sub sistema.
- Grupos de diseño del TREC: Cualquier grupo de diseñadores en busca de una validación virtual o test de sus componentes puede solicitar un ingeniero de análisis CAE que se encargue de dicha evaluación.
- Recursos humanos y servicio médico: Se atienden solicitudes de permisos laborales, incapacidades, inconformidades relativas al ambiente laboral, consultas médicas, exámenes médicos de ingreso o rutina.

### *Externo*

- GM de México Oficinas Centrales: Mediante comunicados a los empleados se da a conocer la situación de ventas en el país, los objetivos que espera la empresa, así como los nuevos lanzamientos. Promueven el papel de los trabajadores como embajadores de la marca.
- Grupo de CAE GM TCI India: Se encargan de aportar los modelos para los grupos CAE de las puertas discretizados (mallados).
- Global CAE Group Warren, Michigan: Organiza y emite los documentos bajo los cuales se lleva a cabo el trabajo de CAE para los diferentes grupos existentes. También da a conocer los trabajos y aportaciones de otros grupos de CAE que se encuentran en otros países como Corea o Brasil.

### **Capítulo 3. Descripción de mi participación en la empresa**

#### **Principales funciones y responsabilidades**

Las funciones del ingeniero de análisis CAE son diversas y responden a diferentes requerimientos dentro de los cuales se pueden encontrar aquellos que son planeados y con fecha de entrega o los que son de carácter urgente y necesitan respuesta en cuestión de días.



Ambos son de importancia por lo cual las cargas de trabajo deben ser ajustadas con frecuencia, o incluso repartir tiempo para realizar varias tareas a la vez. A continuación se presentan las tareas importantes con una explicación más detallada:

### ***Actividades realizadas en base a procedimientos establecidos por GM (Trabajo Estándar)***

La función primordial de un ingeniero de análisis CAE es participar de forma activa en el desarrollo del producto, que puede ser un carro, pick up o SUV. En mi caso las funciones que me corresponden son las relativas al análisis CAE de Interiores para puertas.

Cada vehículo tiene sus fechas de desarrollo que desde un inicio se definen. Para esto se emplea la herramienta conocida como GVDP que da la pauta para realizar desde el diseño hasta la primera unidad manufacturada. En la etapa de desarrollo de interiores de vehículos uno de los principales subsistemas es el de puertas, ya que cumplen con las siguientes funciones:

- La puerta contiene los controles necesarios para mover las ventanas, seguros así como configurar el posicionamiento de los espejos laterales.
- Es una estructura sólida que sirve para ingresar al vehículo, sin embargo debe de proveer ergonomía y confort para el usuario, al momento de abrir/cerrar la puerta o descansar el brazo.
- Es una barrera física que absorbe gran parte del sonido y vibración provenientes del motor, llantas, tren motriz, viento y del exterior. También es una barrera indispensable para contener el agua. La imagen 3.1 otorga una idea general de todos los tipos de sellos de hule contenidos en la puerta alrededor del metal.
- La estructura de la puerta es capaz de almacenar ciertos objetos como pueden ser paraguas, botellas de agua, mapas, llaves, carteras, lentes y demás cosas empleadas por el usuario.
- La puerta debe funcionar como un sistema de contención de energía en caso de un impacto lateral. Para esto debe de cumplir con varias normas de seguridad y validar cada uno de sus componentes desde el diseño para asegurar una interacción amigable con el ocupante en un evento de choque. En la imagen 3.2 se puede apreciar un ensayo que simula el impacto lateral de un vehículo contra una pick up.
- El diseño del panel interno de la puerta es de importancia ya que debe de ser armónico con respecto a la consola central, los asientos y los acabados generales del vehículo. Entre más equipamiento tenga el vehículo, suele contener también más componentes e interruptores en la puerta, incluso materiales como piel y madera.

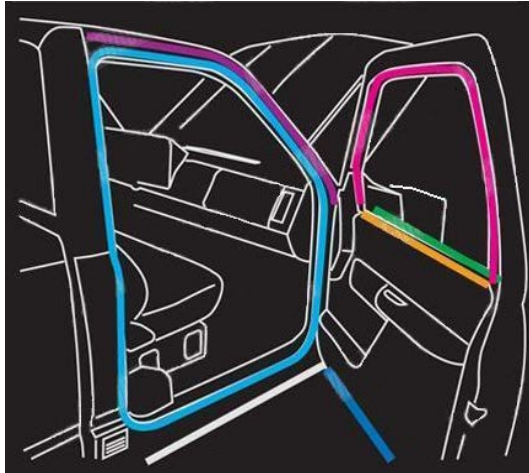


Imagen 3.1 Diferentes sellos de hule en la puerta



Imagen 3.2 Prueba física de Impacto "Lateral Barrier"

El diseño de las puertas es responsabilidad del Interior Door Trim System Management Team, que es un grupo de diseñadores e ingenieros repartidos en diferentes áreas que definen la geometría, los materiales y las características funcionales en base a la categoría del vehículo y siguiendo los requerimientos de seguridad de acuerdo al país de venta del producto. De igual forma ellos son los encargados del trato con los diferentes proveedores de plásticos y materiales compuestos que se encuentran en las puertas.

Mi función como Ingeniero de Análisis CAE para Door Trim es dar soporte de manera activa al SMT Door Trim durante la fase de desarrollo de este subsistema. Para esto llevamos a cabo un periodo de evaluación virtual por medio de software CAE en el cual evaluamos el desempeño general de la puerta de acuerdo a procedimientos estándar emitidos por el grupo de interiores de CAE. Estos procedimientos se aplican a nivel mundial y entre los más importantes están:

- **Procedimiento de cargas de abuso y estabilidad en puertas:** Se encarga de evaluar los diferentes componentes de la puerta aplicando cargas que simulan el uso normal y situaciones de abuso. Se realizan a diferentes temperaturas (-30°C, 23°C, y 80°C) y se miden desplazamientos de las partes y esfuerzo en los materiales que por lo general suelen ser plásticos. Son aproximadamente 50 casos de carga y existe una tendencia a ir optimizando este procedimiento para que sean menos y por ende más eficaz.
- **Procedimiento de impacto lateral:** El objetivo es impactar un disco rígido en zonas específicas de la puerta para simular los puntos críticos del ocupante en caso de un impacto lateral de vehículo. Dichos puntos se dividen por zonas torácica, abdominal y pélvica, y el resultado de evaluarlos es obtener información sobre qué tan rígido es el panel de la puerta. De esa forma se busca asegurar que la geometría no provoque daños graves a la integridad física del ocupante.
- **Impacto en la rejilla de la bocina:** Simulación de un péndulo impactando en la cubierta de la bocina situada en la puerta. Se realiza a baja temperatura, pues se considera el caso más crítico dado que a una temperatura inferior se rigidiza el material y es más susceptible

a falla. Por lo general el patrón de estos componentes suelen ser orificios hexagonales contenidos en forma de óvalo o círculo.

- **Frecuencias naturales de la puerta:** Se analiza las frecuencias más bajas que se puedan encontrar en el sistema global de la puerta. También sirve para verificar que todos los componentes estén bien unidos para llevar a cabo un análisis correcto.
- **Ruidos y rechinos:** Es un análisis para evaluar la interacción de los componentes de la puerta entre sí, y estudiar qué zonas pueden provocar algún ruido. No es un requerimiento que tenga que ver con la seguridad el ocupante, pero cubre una demanda de comodidad para cliente.

Las fechas y los tiempos de esta evaluación virtual cambian de acuerdo a cada vehículo. Conforme avanza el tiempo la geometría de la puerta evoluciona y por lo tanto es necesario realizar la validación de nuevo. Este proceso también se puede dar por cambio de material, y se extiende hasta el último escenario que es el diseño productivo. Algunas de estas cuestiones se pueden resumir en el siguiente diagrama:

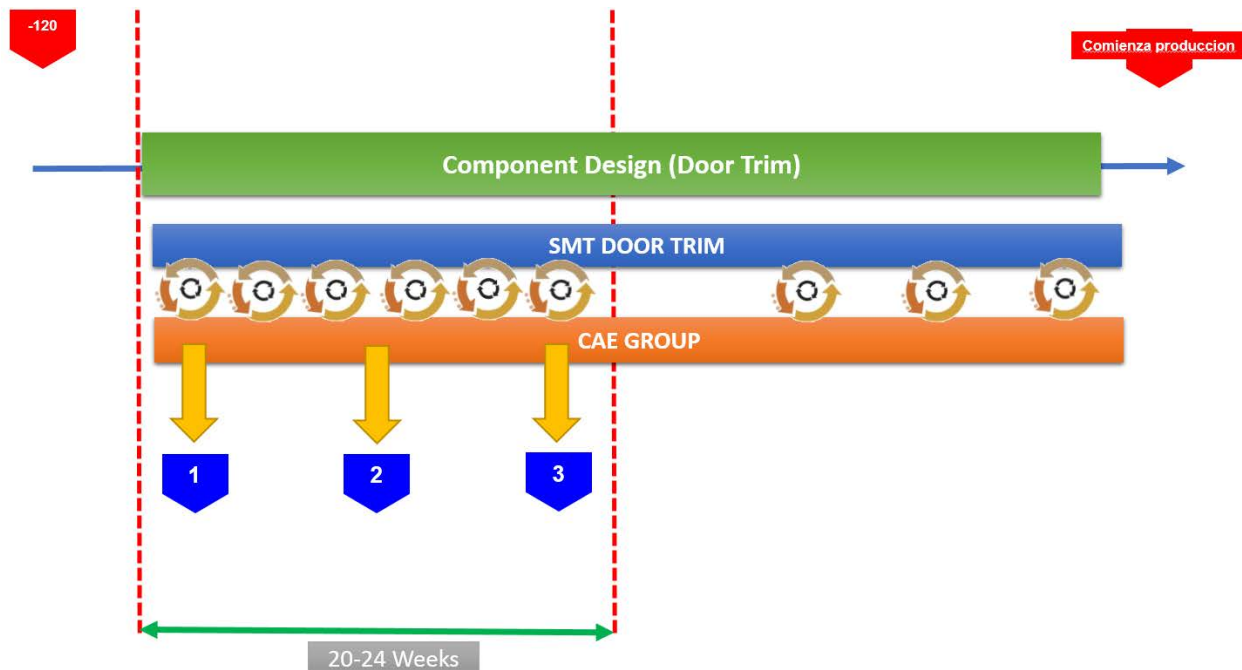


Imagen 3.3 Diagrama del ciclo de trabajo con el Door Trim SMT

Como se muestra en el esquema, quedando 120 semanas para el inicio de producción (fechas aproximadas), se inicia la interacción del SMT de Door Trim con el grupo de CAE de manera activa para lograr el diseño de la puerta con la validación virtual.

Durante un tiempo de 20 a 24 semanas se trabaja aplicando los procedimientos de CAE descritos anteriormente para puertas, también conocido como Trabajo Estándar (Standard Work). Durante este periodo el grupo de CAE entrega resultados en 3 fechas oficiales, los cuales son revisados y analizados por ambos grupos para determinar si el diseño de la puerta cumple con todos los requisitos necesarios.

En una suposición ideal conforme avanza el tiempo el diseño mejora y para la fecha de revisión oficial 3 que es la última, se tendrían que cumplir con todos los objetivos. Sin embargo por cuestiones de geometría, modificaciones para reducir costos, cambios de material o cuestiones relativas a mejorar la seguridad del ocupante, el grupo de CAE sigue dando soporte de manera continua hasta fechas cercanas al inicio de la producción. En total el tiempo que se invierte en la puerta va de un año a un año y medio aproximadamente.

### ***Actividades para reducción de costos o re trabajos***

Este tipo de actividades que realizo están relacionadas con uno o varios componentes de la puerta y consisten en actividades que por lo regular no tienen una planeación precisa o fecha de entrega.

Por lo general los requerimientos de este tipo son de componentes que ya se fabricaron, pero por cambio de material para reducir costo o de proveedor de plásticos, se tiene que efectuar nuevamente evaluaciones de su desempeño. En otras ocasiones también se busca la reducción de masa, pero siempre se debe de cumplir con los requisitos descritos en los procedimientos para asegurar su óptimo funcionamiento.

Otras situaciones que requieren la intervención del grupo de CAE es cuando se detecta algún defecto de los componentes en la planta de ensamble, ya sea por su dificultad para ensamblar o presentar cuestiones negativas para el cliente. En casos menos frecuentes, malos funcionamientos o apariencia reportados por el comprador. Por lo general este tipo de requerimientos suelen ser de carácter urgente ya que ni la producción ni la venta al cliente se puede detener fácilmente.

### ***Actividades que se realizan sin procedimiento estándar***

El grupo de CAE es capaz de dar soporte con análisis adicionales a los estrictamente indicados por los procedimientos. La gran diversidad de componentes y avances en la industria automotriz condicionan casos específicos para el análisis que no tienen un trabajo estándar. En este tipo de situaciones se toman criterios de ingeniería y se llevan a cabo análisis CAE para emitir un juicio que sea fiable y ayude al diseño o la resolución de un problema.

Casos específicos de este tipo de trabajo pueden ser pruebas de retención de los interruptores (switches) de las ventanas sometidas a cargas de abuso, o diferentes análisis de inserción para conocer la fuerza necesaria para instalar algún componente con clips y lograr una sujeción mecánica. De igual forma en este tipo de pruebas se evalúa que no existan concentraciones elevadas de esfuerzos que provoquen la ruptura en la instalación o en su vida útil.

En ocasiones especiales también se puede dar soporte a otras áreas como el grupo de exteriores para evaluar la sujeción y retención de las fascias (delantera/trasera), de los espejos laterales o de los logos del vehículo.

### ***Actividades Design For Six Sigma (DFSS)***

En GM se utiliza la metodología DFSS para llevar a cabo avances e innovaciones significativas que ayuden a la empresa a mejorar sus diseños, reducir tiempo o costos de forma sustancial y con un impacto a nivel regional o global. Dentro de los objetivos del puesto se tiene que dedicar parte del tiempo y trabajo para alcanzar las certificaciones de Green Belt o Black Belt.

Para lograr estos objetivos se maneja una matriz de entrenamiento que abarca cursos sobre cómo aplicar la metodología en equipos de trabajo, manejo estadístico, realización de muestreos, identificar áreas de mejora, patentes. Dependiendo la certificación que se busque también es el nivel de profundización de los cursos.

Una vez con las nociones básicas de la metodología, se puede participar de manera activa en uno o varios proyectos. Usualmente son trabajos que requieren mucho tiempo y tareas repetitivas que arrojan muchos datos, pero ya una vez procesada la información se obtienen conclusiones que pueden ser determinantes para cambiar, impulsar nuevos procedimientos o en el caso particular de CAE mejorar la correlación con la prueba física.

El trabajo realizado para DFSS es supervisado por una persona con Master Black Belt que se encarga de guiar la metodología o resolver dudas durante el proceso. Así mismo el trabajo debe ser convincente y de utilidad, cuestiones que son determinadas por un grupo conformado por los supervisores y el senior manager del área. Si al final obtiene la aprobación, el trabajo se da a conocer a todas las regiones de GM, y se muestra como evidencia para cambiar, rechazar o crear procedimientos o guías de diseño.

El área de CAE tiene cierta particularidad en este tipo de actividades puesto que no solo cubre con las certificaciones para los miembros del grupo, sino que tiene que dar soporte a otras áreas con otros proyectos de DFSS debido a su naturaleza de guiar el diseño y de evitar costos por pruebas en prototipos físicos.

Este tipo de actividades en la mayoría de los casos se realizan a la par del trabajo del día a día, y en caso de existir espacios de tiempo por algún retraso de las partes o componentes, es requerido dedicarse de tiempo completo en lo que la carga de trabajo se normaliza.

## Capítulo 4. Proyecto realizado

### Mejora de la correlación para la prueba de indentación del descansa brazos.

#### Introducción

El descansa brazos o “armrest”, es una parte vital de cualquier puerta de automóvil. Por lo general se sitúa en la parte media del panel de la puerta y la principal función que tiene es la de proveer una interacción amigable entre la puerta y el ocupante. Dicha interacción debe de proporcionar la suficiente comodidad para descansar el brazo, e incluso soportar el peso del usuario de forma confortable.

El armrest también contiene varios de los botones para controlar las ventanas y espejos exteriores. En muchos casos su diseño contiene al “pull cup”, que es una parte de agarre que debe de tener la suficiente rigidez y durabilidad para abrir y cerrar la puerta.

En el caso de un impacto lateral, el armrest debe de ser un componente que pueda manejar la energía del evento y tener una interacción lo más suave posible en la zona torácica del ocupante.

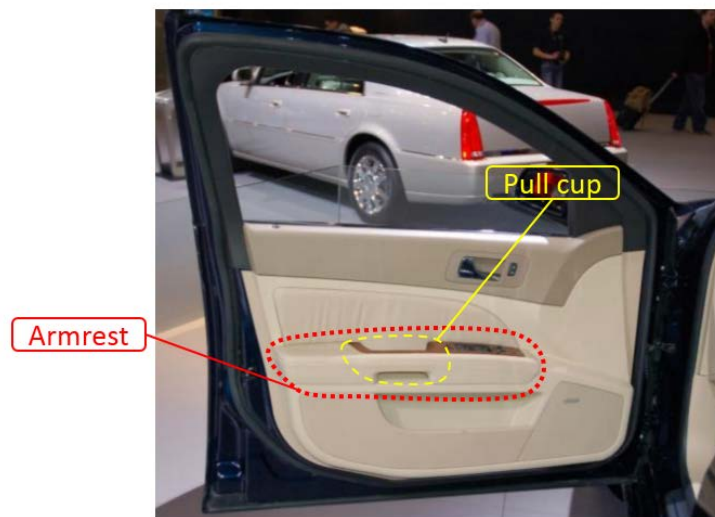


Imagen 4.1 Armrest

Por tal motivo la evaluación de dicha parte de la puerta es importante y se contempla en el “Procedimiento de cargas de abuso y estabilidad en puertas” el cual contiene una descripción detallada de cada una de las diferentes pruebas a realizar en puerta delantera como trasera de cada vehículo.

Uno de los ensayos que vienen en el procedimiento se conoce como “**Prueba de indentación en el descansa brazos**” (Armrest Indentation) y se encarga de evaluar el desempeño estructural de dicho componente. La prueba consiste en ejercer una fuerza de 220 Newtons (N) en dirección vertical por medio de una esfera metálica de 38 mm de diámetro, sobre el plano horizontal del descansa brazos. Las dimensiones de la esfera y magnitud de la carga están

relacionadas a situaciones de la vida real como recargar el codo en esa zona, o simular el apoyo del pie por parte de un niño pequeño.

Dependiendo de la geometría del componente se debe de seleccionar la parte más débil sobre la cual aplicar la fuerza, considerando este como el peor caso. Se lleva a cabo a temperatura ambiente, que es aproximadamente a 23-25°C.

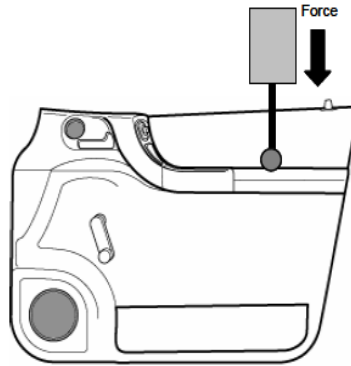


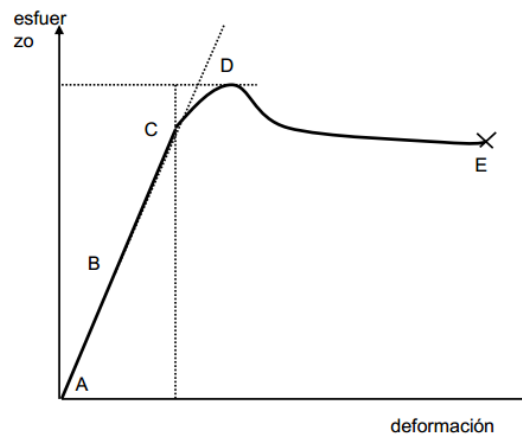
Imagen 4.2 Prueba de Identación en el Armrest

El procedimiento dicta que la meta de dicha prueba es no dejar desplazamientos o deformaciones permanentes en la estructura del armrest. Esto significa que las lecturas de esfuerzo realizadas en el software CAE no deben de superar al **esfuerzo de cedencia** del material, de forma matemática se puede expresar:

$$\sigma < \sigma'_{Mat}$$

El esfuerzo se define como  $\sigma = \frac{F}{A}$ , donde F es la fuerza axial aplicada sobre el material y A es el área transversal sobre la cual se aplica dicha fuerza (Askeland, 1998).

El esfuerzo de cedencia se puede definir como el punto en el cual el material comienza a presentar deformación plástica y en la curva esfuerzo-deformación deja de cumplir con la ley de Hooke (De Silva, 2014). En la gráfica se puede apreciar dicho fenómeno a partir del punto C.



Gráfica 4.1 Curva esfuerzo - deformación

Con este requerimiento se asegura que a pesar de aplicar una carga en el armrest, el material podrá ceder a ciertas deformaciones, pero recuperara su forma original una vez que se deje de aplicar la carga. Para este tipo de análisis se ocupa el software Hypermesh con el solver Optistruct que es capaz de resolver análisis estructurales para problemas lineales o no lineales y con cargas estáticas o dinámicas.

En el caso de la prueba del Armrest Indentation, el procedimiento indica que dicha evaluación es un análisis lineal con una carga estática, es decir que el software utiliza las propiedades del material de la zona elástica (Segmento A-C Grafica. 4.1) y cumple con la ley de Hooke. Dichas propiedades son:

1. Módulo de elasticidad o módulo de Young. El módulo es una medida de la rigidez del material y es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en su región elástica. Matemáticamente se expresa como:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde,  $\sigma$  es el esfuerzo, y  $\varepsilon$  es la deformación que sufre el material (Askeland, 1998). Un material con alto módulo de elasticidad requiere de grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se deforme elásticamente. Las unidades empleadas por el software son megapascuales ( $1Pa = 1 \frac{kg}{ms^2}$ ).

2. Coeficiente de Poisson. Relaciona la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo simple a tensión o compresión, con la deformación lateral que ocurre (Askeland, 1998). Se representa como:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}}$$

3. Densidad. Es una propiedad física de los materiales que expresa la masa por unidad de volumen. Suele representarse en unidades del sistema internacional como  $\frac{kg}{m^3}$  (Askeland, 1998), sin embargo el solver Optistruct maneja las unidades de densidad como  $\frac{Mg}{mm^3}$ .

Con las propiedades descritas anteriormente, son suficientes para llevar a cabo un análisis lineal estático (Altair, 2015), es decir que no depende del tiempo, pues dicha formulación plantea la siguiente ecuación:

$$[K]\{u\} = \{f\}, \text{ Donde:}$$

[K]: matriz de rigidez

{u}: vector de desplazamiento

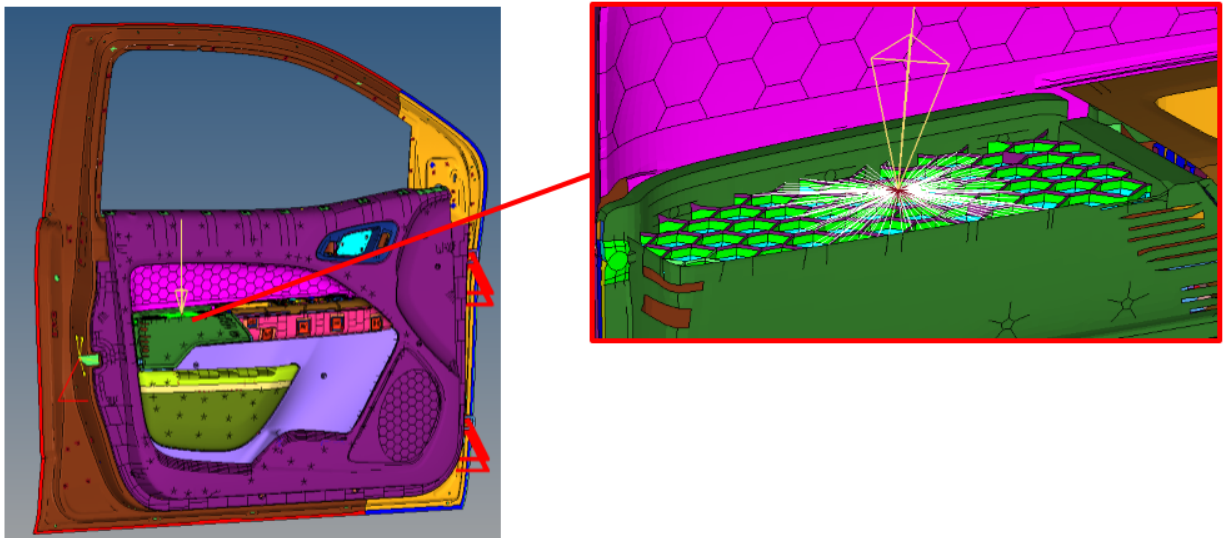
{f}: vector de carga.



Las cargas se aplican lenta y gradualmente hasta que alcanzan sus magnitudes completas. A continuación, las cargas permanecen constantes (sin variación en el tiempo). Las aceleraciones y velocidades del sistema excitado son insignificantes y, por tanto, no se tienen en cuenta fuerzas de inercia o amortiguamiento en la fórmula. La solución solo produce desplazamientos y tensiones que son constantes (Hugnes Thomas, 2000).

Otra de las consideraciones del análisis para el armrest indentation es el tamaño típico de elemento en la malla (TEL), que en la zona del armrest es de 3 mm.

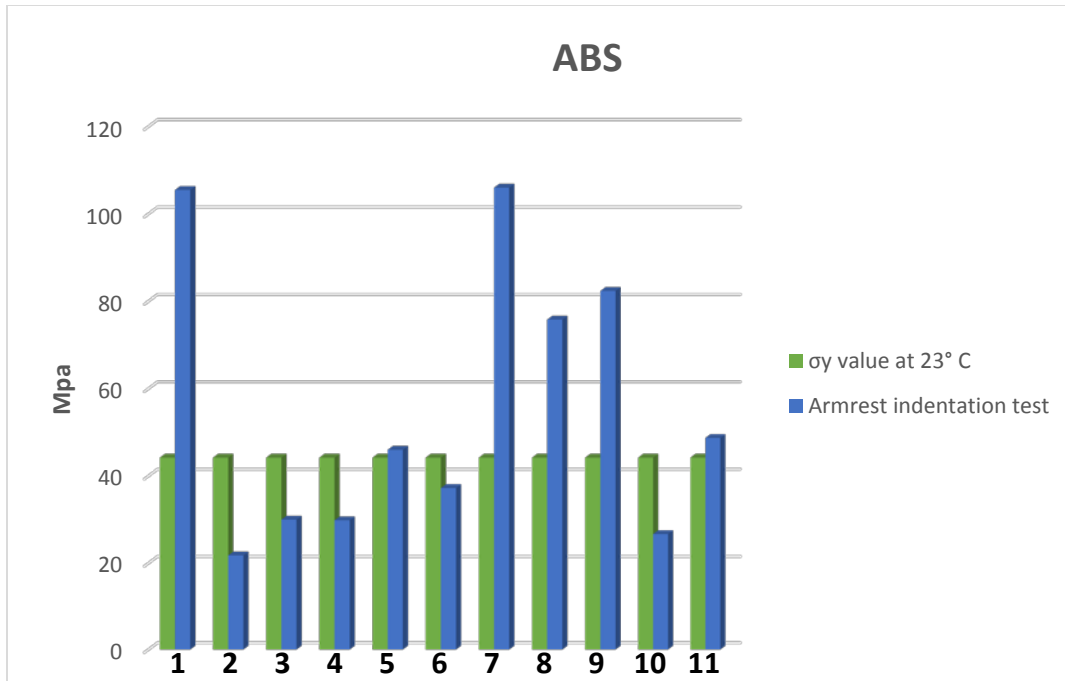
La carga que se imprime hacia armrest es por medio de un elemento **RB3** o “telaraña” (spider), que básicamente es un arreglo que conecta a diferentes nodos de la malla, calculando un nodo central sobre el cual se aplica la fuerza. Dicho RB3, distribuye la carga hacia cada uno de los nodos que conecta, de manera uniforme. Por último la puerta se encuentra en posición vehicular y restringida de las bisagras, como lo ilustra la siguiente imagen.



△ Restricciones

*Imagen 4.3 Configuración general de la prueba CAE con análisis estático*

Dicho análisis es el encargado de validar la prueba del armrest indentation haciendo uso de CAE, sin embargo a través de diversas pruebas y con diferentes modelos de puertas se ha encontrado que dicha información no es la más exacta porque arroja valores por encima del **esfuerzo de cedencia**, que es el valor límite para validar la prueba. Como se puede observar en la Gráfica 4.2, cada uno de los números representa una puerta ya sea frontal o trasera de algún vehículo GM, las geometrías en cada caso son diferentes, sin embargo el material es el mismo, un polímero ABS que tiene un **Mat'oy=44 Mpa** y un módulo de elasticidad **E=2100 Mpa**.



Gráfica 4.2 Resultados de la prueba de "armrest indentation"

Las barras en azul representan las lecturas para el esfuerzo máximo del armrest para CAE, como se puede observar 6 de las 11 puertas superan el Mat'σy, incluso dos de ellas por encima de 100 Mpa, los cuales son valores muy elevados.

En la fase de desarrollo de la puerta, se llega a la fabricación de los paneles y el metal y dichos componentes son evaluados con las pruebas de CAE, pero ahora de manera física. La baja correlación en algunas de las puertas entre prueba virtual y física propicia en ocasiones cierta confusión para los diseñadores del SMT de Door Trim, por lo cual existe una necesidad en el grupo de CAE de mejorar la evaluación del descansa brazos para emitir un mejor juicio y guiar el diseño de este componente desde una etapa temprana ya que la validación virtual se lleva a cabo mucho antes que la física.

Por tal motivo surge la necesidad de encontrar mejores formas a las establecidas en el procedimiento para llevar a cabo la prueba del descansa brazos, y dentro de estas opciones la más viable es mover este análisis a un ensayo CAE **Dinámico No Lineal**, simulando el movimiento real de una esfera rígida sobre el descansa brazos en un tiempo dado.

## Desarrollo

Junto a un grupo de 4 ingenieros del área, me dedique a analizar la información existente sobre la prueba de indentación en el descansa brazos para poder emitir ideas y opiniones que resultaran en la mejora del análisis CAE. El proyecto tuvo las siguientes etapas de desarrollo:

- Recopilación de datos sobre la prueba de indentación para descansa brazos.
- Realización de pruebas físicas en puertas.
- Configuración de la nueva prueba de indentación para descansa brazos en CAE.
- Toma de datos.
- Resultados.

### Recopilación de datos sobre la prueba de indentación para descansa brazos

En la etapa inicial era necesario recabar datos sobre los valores que se tenían o se habían reportado para la prueba de indentación en el descansa brazos. Dichos valores son lecturas de esfuerzos internos de los materiales medidos en Mega Pascales (Mpa) y realizados en casos de carga estáticos con el software Hypermesh y el solver Optistruct. Con dicha información fue posible recabar información para realizar gráficas, como la presentada anteriormente (Gráfica 4.2), donde se encuentran los esfuerzos obtenidos con el modelo CAE comparando con el esfuerzo de cedencia del material ( $\sigma_y$ ).

Aproximadamente 20 puertas fueron analizadas con el software CAE, y en un poco más de la mitad se encontraron valores de esfuerzo que sobrepasaron por el doble o triple el esfuerzo del material. Con estos datos obtenidos significa que la mayoría de las puertas no cumplen con los requerimientos de CAE.

Sin embargo para la prueba física, los reportes emitieron que para la mayoría de puertas la integridad del armrest **no había mostrado deformación permanente**. Por lo tanto la diferencia entre el procedimiento CAE y la prueba física, condujo a la conclusión de que el esfuerzo de cedencia del material **no era el objeto de comparación**, puesto que en prueba física no hay forma de medir los esfuerzos internos de armrest en el laboratorio de GM.

Es por ello que dadas estas circunstancias el equipo busco una forma alterna de comprobar la integridad del armrest por medio de la prueba física, para lo cual fue necesario pedir paneles de puerta de modelos productivos o prototipos para llevar a cabo ensayos en el laboratorio de validación.

### Realización de pruebas físicas en la puerta

Una vez obtenidos ciertos paneles de puerta, se dispuso a montarlas en los bancos de pruebas pertenecientes al laboratorio de validación. La prueba solicitada para comprobar la integridad del armrest fue la misma que dicta el procedimiento, es decir, haciendo uso de un pistón neumático se aplica una fuerza de manera vertical sobre la zona más débil y por medio de una media esfera de 38mm de diámetro.

Sin embargo, en este caso difiere la fuerza aplicada comúnmente. En una prueba física normal para armrest indentation se aplica 222 N, y con ello es suficiente para asegurar la integridad del componente. No obstante, como se vio anteriormente, esa fuerza aplicada en los análisis de CAE, produce valores muy por encima del esfuerzo de cedencia del material.

La composición de un armrest tiene varios elementos, siendo la parte estructural un substrato de plástico ABS por lo general. Adicionalmente se incluyen una serie de espumas y cubiertas para darle una textura suave y el forro que es de un color determinado para mantener la armonía del interior en el vehículo. Así mismo se incluye una serie de piezas que funcionan como refuerzos a la estructura principal (Pull Straps) y la parte conocida como Switch Bazel que tiene por función ser la caja contenedora de los interruptores (switches) para abrir/cerrar ventanas y los controles de los espejos laterales. Los materiales, así como también el número de switches dependen en mayor medida del nivel de equipamiento del vehículo. Como se puede observar en la siguiente imagen, esta es la composición del armrest que por lo general tienen todos los vehículos:

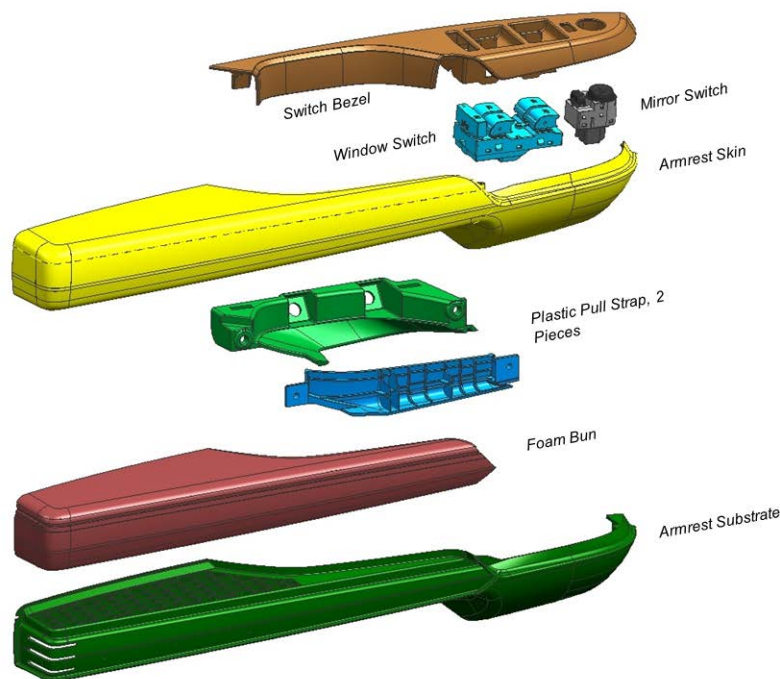


Imagen 4.4 "Boom" del Armrest Vehicular

Esta configuración es compleja en cuanto a componentes y para la construcción del modelo CAE no se pueden modelar todos los componentes. Esto se debe en gran parte a que la base de datos de materiales de la empresa no contiene todos los plásticos y espumas para caracterizar la malla del forro y la piel del armrest. Por tal motivo solo se limita el mallado a los componentes de polímero ABS, que son la parte estructural de la pieza.

Para llevar a cabo la prueba se decidió correr una condición "crítica" en la zona del honeycomb con la finalidad de obtener un **métrico de comparación** entre **CAE y prueba física**, y por ende se decidió que el pistón en la prueba física aplicara una fuerza tal que **llevara a la fractura** al

material del armrest en su zona más débil. Las únicas consideraciones de la prueba física fueron el quitar el forro y la piel o plástico que cubre la estructura de “honeycomb”, para evitar la absorción de energía por dichos componentes.

A continuación se muestra la configuración de la prueba física montada, en el cual el pistón hace contacto directo con el plástico ABS:



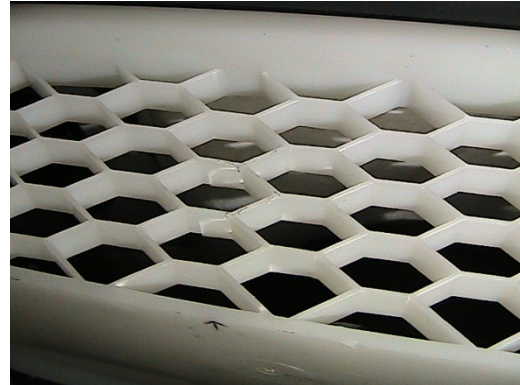
*Imagen 4.5 Configuración de la prueba física*

De la misma forma que dicta el procedimiento, se buscó inicialmente aplicar la fuerza del pistón sobre la zona más débil. No obstante por la escasez de muestras para las pruebas, se decidió realizar el experimento en 3 zonas del armrest, y en dos puertas se tomó un par de zonas debido al reducido tamaño del armrest. Dichas ubicaciones básicamente situadas en el centro, parte frontal y trasera del armrest. De esta forma también fue posible obtener más datos para analizar.

En su totalidad fueron 5 puertas las que se consiguieron para el proyecto, 3 delanteras (A,B,C) y 2 traseras (D,E). En todas ellas se ocupó el mismo procedimiento de prueba, que básicamente consistió en que una vez montadas se comenzara a aplicar gradualmente la fuerza por medio del pistón hasta que llegara a la fractura.

Dicha condición de fractura fue corroborada por una atenta inspección visual del material, ya que comenzaba a ver un momento donde el material comenzaba a presentar ciertos “blanqueamientos” los cual era un indicativo de que las líneas del material se estaban concentrando y alineando por la presencia de la fuerza del pistón. Poco tiempo después de los blanqueamientos del material, llegaba a percibirse un claro ruido de “crack”, que era la confirmación de que el material había fallado en cuanto a su integridad. Para confirmar la falla también se podía percibir las grietas y separación de material por lo cual en ese momento se dejaba de aplicar la fuerza, para después observar la zona e inspeccionar a detalle las consecuencias en la estructura que había dejado la esfera.

Durante la aparición de los primeros blanqueamientos en el material se hacía el registro de la fuerza aplicada por el pistón en ese instante, los valores obtenidos estuvieron en un rango de 500 a 800 N aproximadamente para todas las puertas. En las siguientes imágenes (4.6) se puede observar cómo fue el aspecto final del componente y la forma de falla del material.



*Imagen 4.6 Detalle de la zona de los honeycombs después de la prueba física*

Con dichas fotografías quedo el registro del lugar del comienzo de falla y también de cómo se repartió por la estructura del honeycomb. Por lo general la falla comienza por la parte de debajo de la estructura, puesto que la fuerza aplicada por el pistón provoca mayor tensión en esa zona.

Con las cinco puertas se obtuvo información valiosa de la fuerza necesaria para provocar la falla del armsrest, con estas acciones se complementó la parte de experimentación en el laboratorio que conducirá a establecer nuestro procedimiento con el software CAE y tener un punto de comparación.

### **Configuración de la nueva prueba de indentación para descansa brazos en CAE**

Una vez obtenidos los datos de prueba física, el reto fue establecer un procedimiento en CAE capaz de simular la prueba física. Debido a que se había tenido baja correlación con el análisis estático en Optistruct y que la mayoría de los análisis daban por encima del esfuerzo de cendencia, el primer paso fue convertir los modelos para un **Análisis Dinámico No Lineal**.

En análisis dinámicos no lineales, las cargas aplicadas varían con el tiempo, así como las aceleraciones y velocidades del sistema son considerables y por lo tanto se deben incluir fuerzas de amortiguamiento e inercia, por lo tanto en un esquema general las ecuaciones de equilibrio del sistema dinámico en el paso de tiempo,  $t+Dt$ , son:

$$[M] \ddot{U}(i) + [C] \dot{U}(i) + t+Dt[K](i) t+Dt[DU](i) = t+Dt\{R\} - t+Dt\{F\}(i-1)$$

Donde:

[M] = Matriz de masa del sistema

$[C]$  = Matriz de amortiguamiento del sistema

$t+Dt[K](i)$  = Matriz de rigidez del sistema

$t+Dt\{R\}$  = Vector de cargas nodales de aplicación externa

$t+Dt\{F\}(i-1)$  = Vector de fuerzas nodales generadas internamente en la iteración (i-1)

$t+Dt[DU](i)$  = Vector de los desplazamientos nodales incrementales en la iteración (i)

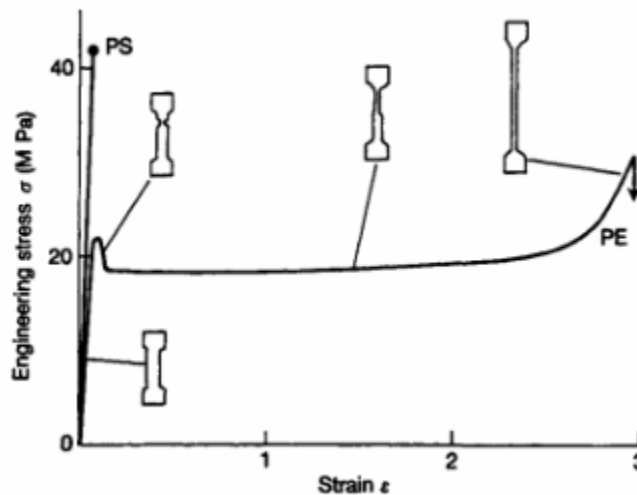
$t+Dt\{U\}(i)$  = Vector de los desplazamientos totales en la iteración (i)

$t+Dt\{U'\}(i)$  = Vector de las velocidades totales en la iteración (i)

$[M] t+Dt\{U''\}(i)$  = Vector de las aceleraciones totales en la iteración (i)

El conjunto de ecuaciones deben ser resueltas en cualquier paso de tiempo  $t+Dt$ . Debido a que las fuerzas nodales internas dependen de los desplazamientos nodales en el tiempo, se debe usar un método iterativo (Ayuda de SolidWorks, 2015).

Adicional a toda esta descripción del análisis, otra consideración es que es **no lineal**, esto se debe a que los materiales de los que se compone la puerta en ocasiones son sometidos a grandes desplazamientos y condiciones de contacto, lo que provoca que un análisis lineal no sea suficiente. La no linealidad proviene de las propiedades mecánicas del material ya que al someterse a grandes cargas los valores para la curva esfuerzo-deformación tiene un comportamiento que deja de cumplir la Ley de Hooke después del esfuerzo de cedencia.



Gráfica 4.3 Curva esfuerzo-deformación polietileno

Como se puede observar en la curva esfuerzo-deformación superior, se describe el comportamiento de una prueba de tensión de dos probetas, una de poliestireno (PS) y la otra de polietileno (PE). En el caso del PS se comporta de tal manera que alcanza un esfuerzo significativo hasta llegar a un punto de fractura que no muestra una desviación significativa de una curva de esfuerzo-deformación lineal.

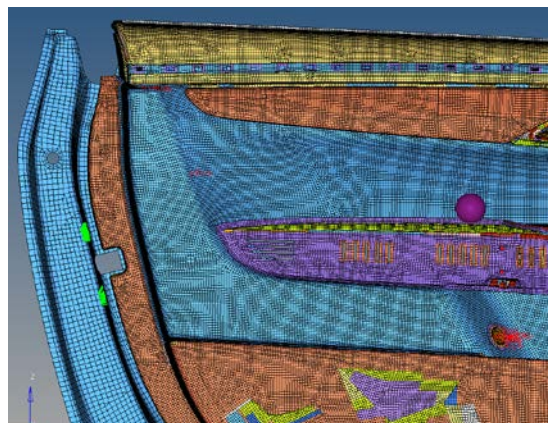
Por otro lado, materiales como el PE suelen ser dúctiles. La ductilidad es la capacidad de algún material para admitir grandes deformaciones antes de llegar a la fractura y dicha capacidad describe un comportamiento no lineal, puesto que como se puede observar en la gráfica 4.3 la curva de la probeta PE, una vez que se supera el esfuerzo de cedencia, se llega a un valor máximo después del cual el material “fluye” mostrando un valor casi constante de esfuerzo (Mc Grum N. G., 1997).

Físicamente la probeta sufre una dilatación del material, conocida como “neck”, que se define como una reducción en el área transversal de la probeta (Mc Grum N. G., 1997). Por algún tiempo se estabiliza ya que arrastra material de las regiones aledañas pero poco a poco se continúa adelgazando hasta llegar a la ruptura.

El valor de esfuerzo en la zona plástica de la curva de PE se mantiene casi constante por algún tiempo y tiene un incremento significativo hasta el final donde llega al “esfuerzo de fractura”. No obstante el valor de “strain” o deformación, se incrementa de manera continua. Dichas consideraciones son importantes pues permite determinar el **Plastic Strain to Failure (PSF)**, que es el punto dentro del strain rate de la curva, en el cual se puede precisar que el material sufre fractura. Este punto es relevante puesto que el material pierde su integridad y cambia drásticamente los valores de esfuerzo alrededor de la falla, en la mayoría de las ocasiones se propaga a todo el material o sección (De Silva, 2014).

Estos criterios de análisis dinámico no lineal, son los empleados para proponer la nueva prueba de CAE para el armrest, y comparando con el análisis lineal, se ocupó el software Hypermesh para mallar algunas secciones del armrest y el solver de LS-Dyna.

La nueva propuesta para correr la prueba del armrest consistió en primeramente modelar la esfera que representa el indentador. Es una esfera de 38 mm de diámetro y se le añadieron las propiedades del acero para darle la rigidez real. Posteriormente, el modelo de las puertas se preparó en posición vehicular y restringida de las bisagras de la puerta. A continuación se muestra la configuración básica de la prueba en CAE.



*Imagen 4.7 Nueva configuración CAE de Armrest Indentation*



Los puntos de aplicación de la carga al armrest se obtuvieron de la prueba física, considerando mediante una exploración visual y táctil las zonas más débiles o con menos refuerzo. Es importante remarcar que todas las puertas analizadas presentan un patrón estructural de “honeycombs” que ayudan a reforzar la zona, de manera que no sea necesario cubrir todo el armrest de material, lo que adicionalmente contribuye con la reducción de masa del vehículo.

Las posiciones de aplicación de la carga, se presentan a continuación en este compilado de imágenes para cada una de las cinco puertas:

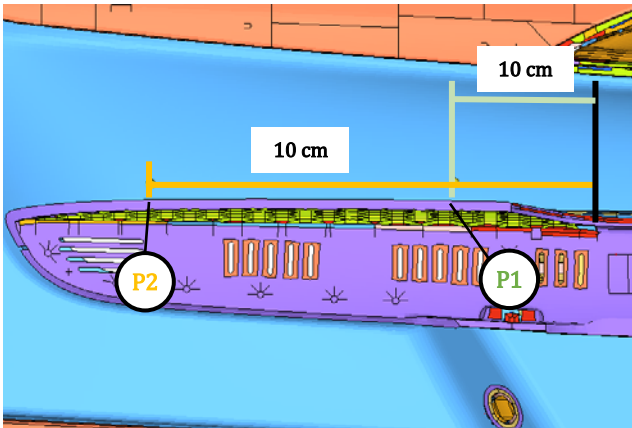


Imagen 4.8 Puerta A

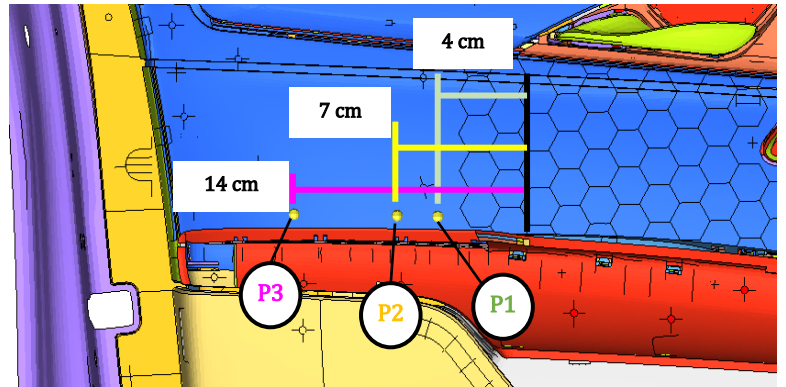


Imagen 4.9 Puerta B

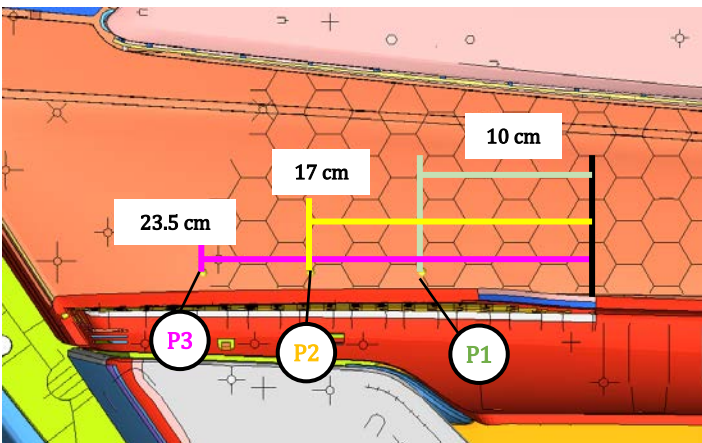


Imagen 4.10 Puerta C

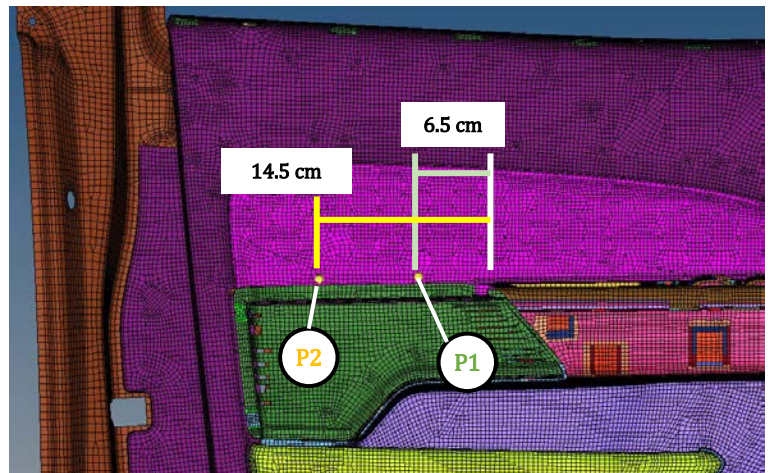


Imagen 4.11 Puerta D

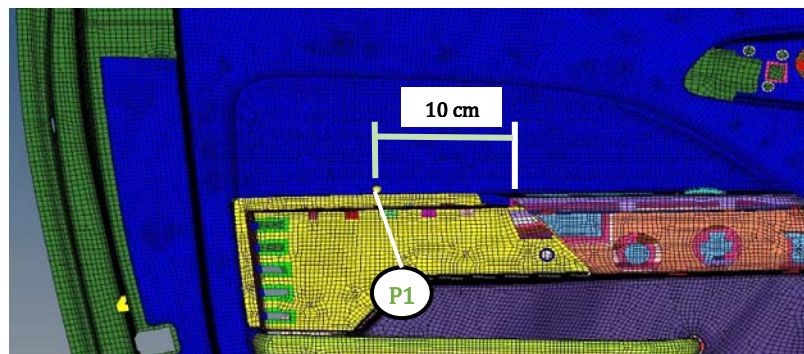


Imagen 4.12. Puerta E

Como se puede observar, los puntos donde se aplican la carga varían en cada puerta, esto se debe principalmente a que en cada caso la geometría es diferente, en algunos hay más área de honeycombs o hexágonos, y eso proporciona mayor espacio para aplicar la carga.

Otra cuestión a destacar de la zona del armrest es el material, puesto que como ya se mencionó anteriormente la estructura de todo el panel de la puerta está compuesta en su mayoría por termoplásticos y la zona del armsrest no es la excepción. En el software de hypermesh, se introducen las propiedades mecánicas y físicas de cada uno de los materiales, y adicionalmente las curvas de esfuerzo-deformación, que servirán como guía para ver el comportamiento del material en su zona de deformación plástica.

Cada uno de los polímeros es caracterizado por medio de ensayos de tensión y se introducen las propiedades así como las curvas en una base de datos que emplea toda la empresa. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los materiales de las 5 puertas para la zona del armrest, que es nuestra zona de interés:

Puerta	Material	23° C				
		Modulo de Young (Mpa)	Esfuerzo de cedencia (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (Kg/mm <sup>3</sup> )	Plastic Strain to Failure
A	ABS 1	1971	39	0.36	1.05E-06	0.4
B	ABS 2	2200	46	0.4	1.05E-06	0.25
C						
D						
E						

Tabla 4.1. Propiedades del ABS a 23°C para cada puerta

De la información representada en la tabla se puede observar que el material para la zona del armrest suele ser un termoplástico ABS, que tiene unas propiedades que otorgan mayor rigidez en comparación a otros polímeros como el polietileno. Por lo general esta decisión sobre el material está asentada en los procedimientos que emplean los diseñadores a la hora de modelar los diferentes componentes, basándose también en algunas cuestiones adicionales como el costo del material, y la compatibilidad química con otros polímeros del door trim panel para que sea posible realizar las uniones. La prueba se establece a 23°C que es una temperatura cercana a la que se realizaron las pruebas físicas.

Por lo tanto las propiedades de la tabla anterior representa solo la zona le armrest, típicamente en todo el trim panel podemos encontrar otros termoplásticos como polietileno, poliestireno o nylon, cada uno con su correspondientes propiedades y curvas de esfuerzo deformación.

Una vez determinados todos los materiales para el análisis el siguiente paso fue establecer todas las condiciones del ensayo en el software CAE. Una vez con el trim panel en posición vehicular y la posición de la esfera en los puntos de interés, procedí a realizar las siguientes tareas, con asesoría de los ingenieros del grupo:

1. La esfera se colocó en el punto a evaluar, y aproximadamente 3 mm arriba del armrest.

- Para aplicar la fuerza por medio de la esfera se asignó un “set” o grupo de nodos pertenecientes a la malla de la esfera, para asemejar a la función del vástago del pistón.

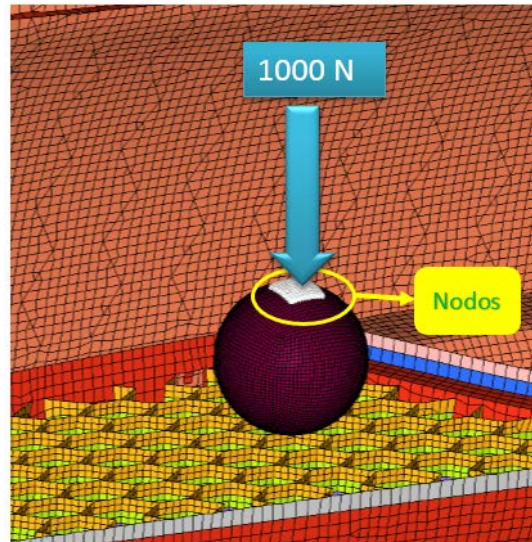
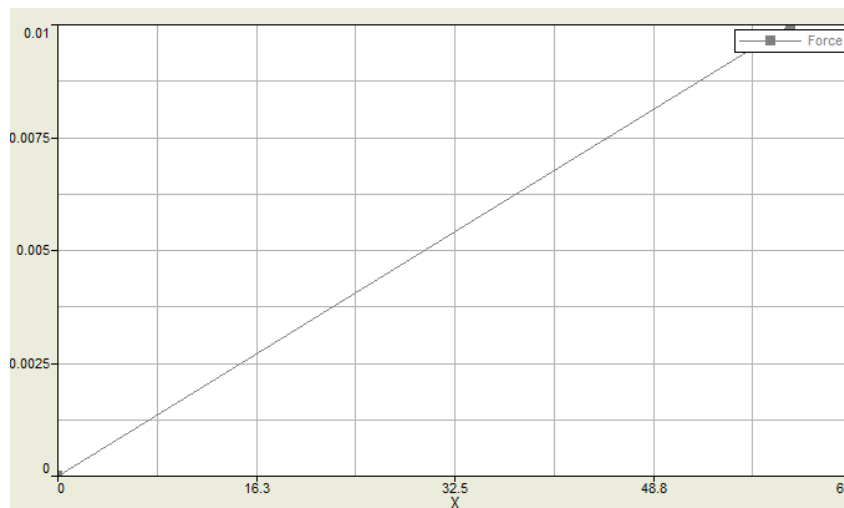


Imagen 4.13. Set de nodos de aplicación de la carga

- Una vez determinado ese grupo de nodos, se aplicó una fuerza en Newtons a cada uno de ellos en dirección al eje -Z. La suma de todos los nodos da un total de 1000 N. Esta magnitud de carga se determinó con base en los valores máximos de fuerza con la que falló el armrest durante la prueba física. Para aplicar la fuerza se utilizó un perfil rampa, como lo muestra la siguiente gráfica:



Gráfica 4.4 Fuerza que se aplica sobre la esfera (se incrementa de cero a 1000 N en un lapso de 65 milisegundos).

- Se definió un contacto general (Single Surface) que reconoce todos los componentes del modelo CAE como entidades separadas para evitar las penetraciones de material, y así evadir lecturas erróneas o comportamientos irreales.

5. Para la esfera se definió un **“transductor de fuerza”**, es decir una instrucción que genera un archivo que registra la fuerza que la esfera “siente” o sensa en cuanto entra en contacto con la zona del armrest. Este punto es de vital importancia puesto que nos interesa conocer la fuerza con la que se fractura el material.
6. Se configuraron los parámetros para poder correr el modelo, dentro de los cuales destacan el tiempo de corrida que en total es de 65 ms (la misma de la aplicación de la fuerza) y los intervalos en los que se manda o imprime resultados, que fueron de 0.01 ms.

De manera general son los pasos esenciales para la construcción de la prueba virtual. Cabe destacar que el tiempo total de la corrida es breve (65 ms), puesto que hacer pruebas de duración prolongada o que imiten el tiempo de la prueba física real consume demasiados recursos y espacio de almacenamiento, aunado a que se tenía que repetir el proceso varias veces para los 11 puntos que se tenían en total para las 5 puertas.

### Toma de datos

Una vez puesto todos los parámetros se mandó a obtener la solución, que en promedio por cada modelo de CAE, tarda aproximadamente dos horas. Con los resultados obtenidos lo primero fue revisar que el evento describiera el fenómeno como en la realidad, así como una revisión de las energías del sistema y que no hubiera penetraciones entre componentes.

El objetivo (para comparar con la prueba de laboratorio), era la medición de la **fuerza necesaria para fracturar el material**. Para esto el valor de interés principal en este estudio fue la medición del **Plastic Strain to Failure (PSF)**. De esta forma una vez identificado el primer elemento en alcanzar el PSF del material, **se registraba el tiempo** en milisegundos y gracias a este se podía determinar la fuerza exacta que aplicaba la esfera en ese instante gracias a la gráfica del transductor de fuerza. Como lo muestran las siguientes imágenes, se puede visualizar el proceso:

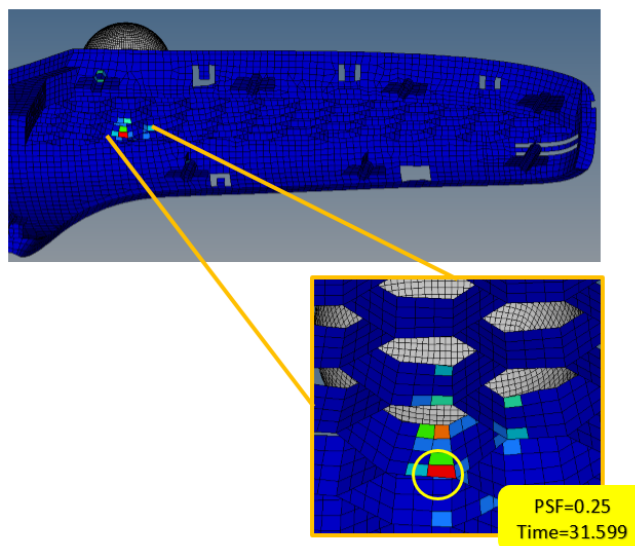
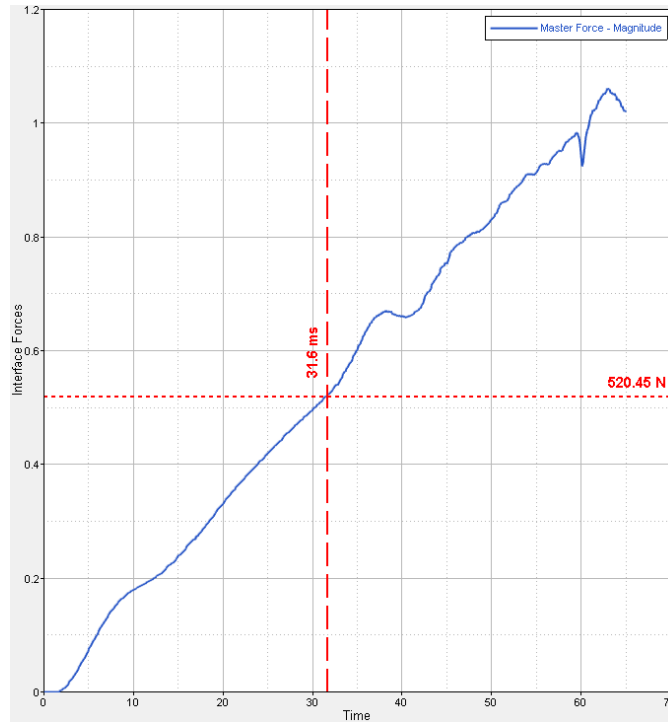


Imagen 4.14 “Contour” de Plastic Strain to Failure para la zona de armrest Puerta B



Gráfica 4.5 Force Trasducer Tiempo vs Fuerza Puerta B (Para el tiempo 31.599 ms alcanza el PSF, la fuerza es igual a 520.48 N)

Como se puede apreciar en la gráfica superior, el transductor de fuerza que se declara, traza una curva de Fuerza (N) vs Tiempo (ms), en la cual se puede conocer la magnitud de la fuerza que se imprime sobre el armrest durante toda la duración del evento. La grafica se lee a partir del tiempo en milisegundos donde alcanza el PSF y se busca su correspondiente valor de fuerza en dicho instante. Dicha forma de obtener los resultados se replicó para todos los puntos pertenecientes a todas las puertas del estudio.

## Resultados

Con esta metodología se obtuvieron todas las lecturas de fuerza requeridas para poder comparar con la prueba física. No obstante durante todo el proceso se hicieron varias pruebas y experimentos en las corridas CAE, dado la relativa facilidad que se tiene y que no representa un coste significativo, y en cada una de ellas se buscó refinar el valor de la fuerza para acercarse al valor de la prueba real.

En ocasiones se cambiaba la posición del identador por un rango de milímetros con el objetivo de imitar la zona de la falla como en la prueba física. Después de modificar varias cuestiones se pudo observar que el tamaño promedio de los elementos “quads” en el honeycomb era de 3.0 mm, por lo tanto se decidió cambiar a un tamaño promedio de 2 mm, con la idea que se obtendría un valor más preciso, puesto que con elementos más pequeños tenemos mayor número de puntos de integración.

Por este motivo en la zona de los honeycombs se sometió a un remallado de los elementos para cumplir con  $TEL=2$ , mientras que el resto del armrest y del door trim mantuvo los

elementos con los que se construyó originalmente el modelo. A continuación se ilustra el cambio de tamaño en los elementos que ayudo a la mejora de la correlación.

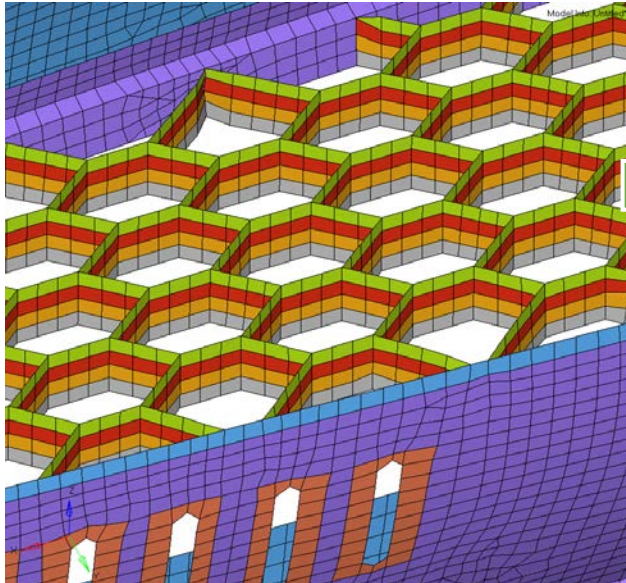


Imagen 4.15 Honeycombs TEL=3

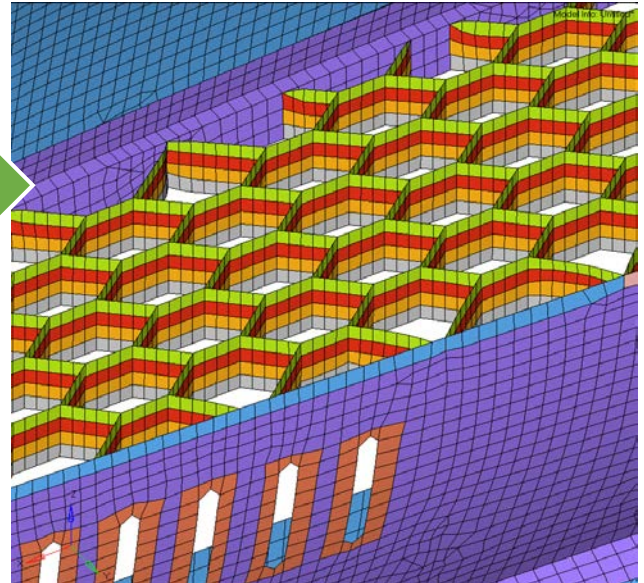
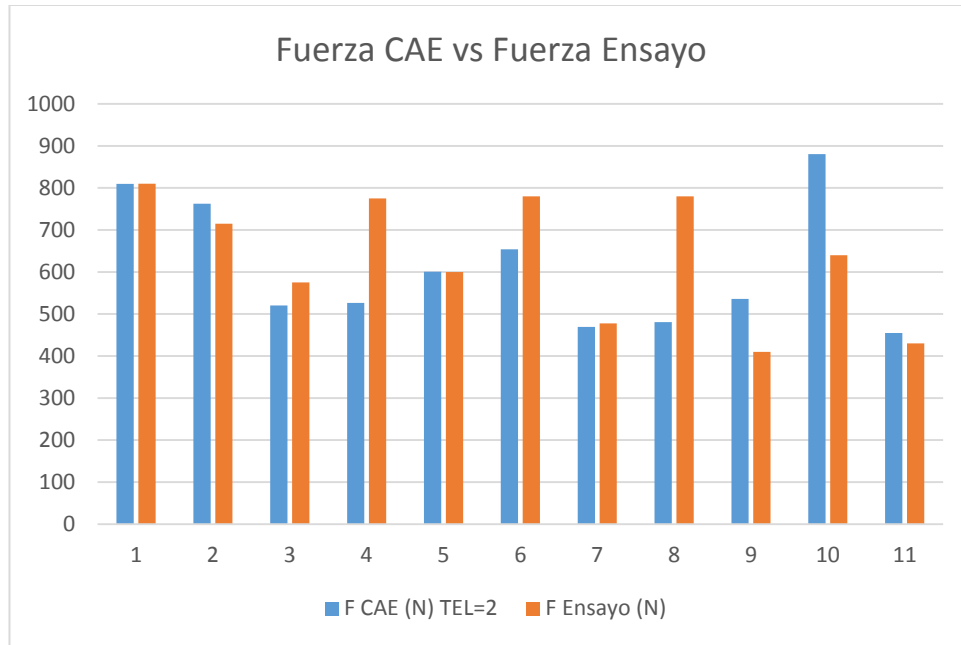


Imagen 4.16 Honeycombs TEL=2

Siendo esta la mejora más significativa para el proceso de CAE, se corroboraron algunos valores de la fuerza con los modelo de TEL=3 y TEL=2. La conclusión fue contundente al observar que los valores de la malla de 2 se acercan más a los valores de la fuerza medida en la prueba física. Por lo tanto el valor final con el cual se reportaron las fuerzas proviene de estos modelos:

Puerta	F CAE (N) TEL=2	F Ensayo (N)	Correlacion (%)
A-Punto 1	809.88	810	99.99
A-Punto 2	762.562	715	106.65
B-Punto 1	520.36	575	90.50
B-Punto 2	526.547	775	67.94
B-Punto 3	600.634	600	100.11
C-Punto 1	654.005	780	83.85
C-Punto 2	469.492	477.5	98.32
C-Punto 3	480.611	780	61.62
D-Punto 1	535.849	410	130.69
D-Punto 2	880.47	640	137.57
E-Punto 1	454.834	430	105.78
		<b>Promedio</b>	<b>98.46</b>

Tabla 4.1 Correlación para valores de fuerza de CAE y prueba física



Gráfica 4.6. Fuerza en CAE vs Fuerza en prueba física.

Como se puede apreciar, la comparación que arroja tener los datos de la prueba virtual como física resulta similar y en algunos casos llega a ser casi idéntica. En otros como la puerta C en el punto 3, o la D punto 2, los valores resultaron ser distantes entre sí, a pesar de haber revisado en repetidas ocasiones los modelos y haciendo ajustes finos de la posición del indentador.

Aún con la existencia de algunos datos equidistantes entre sí para el mismo punto, la tendencia y el promedio de correlación, respalda que es más fiable este tipo análisis dinámico y con las propiedades no lineales del material, a comparación del estudio llevado a cabo como un caso estático de carga, tal cual lo dicta el procedimiento original.

Esto se debe a que en el caso estático de carga obtenemos valores muy elevados y que sobrepasan el esfuerzo de cedencia, sin embargo no podemos saber con exactitud el comportamiento real de material puesto que las propiedades del material siempre serán lineales. Por otro lado, con las propiedades no lineales podemos hacer una lectura acertada de esfuerzos internos no solo para la zona elástica, si no para la zona plástica, e incluso determinar la falla gracias al PSF que es un valor que se encuentra en nuestra base de datos para cada material.

Por estas razones, aunque el procedimiento original no dicte llevar a la fractura al material de armrest, gracias a este estudio tenemos un punto de partida en el cual la correlación resulta buena, de aquí podemos partir a realizar un escalamiento para una fuerza menor aplicada por el indentador tal cual dicta el procedimiento (220 N), pero con la certeza de que los resultados serán más parecidos a la realidad y encontrar más puntos de convergencia en cuanto a la deformación o forma de falla de la prueba física.

## Capítulo 5. Conclusiones

El trabajo realizado fue un ejercicio presenta todo el proceso para lograr una mejora en un procedimiento ya establecido y aprobado por la empresa. Sin embargo como se observó, este procedimiento es cuestionable ya que en muchas ocasiones arroja información que no cumple con los requerimientos y no determina con exactitud lo que sucede en el laboratorio cuando se valida físicamente.

La propuesta del análisis dinámico no lineal, presenta un método alternativo que tiene un mejor acercamiento con la realidad y que involucra todo un estudio de caso para poder obtener conclusiones. Es preciso recalcar que a pesar de ser mejor, también demanda más recursos en cuanto a tiempo, capacidad de procesamiento y espacio de almacenamiento, lo cual en su conjunto son cuestiones que necesitan ser valoradas por que en muchas ocasiones no se cuenta con el tiempo o los recursos suficientes puesto que hay que considerar que solo es parte de varios casos de carga que se aplican a la puerta.

Otra limitante del análisis puede ser la existencia de datos fiables y recientes en la base de datos de materiales, pues en ocasiones la necesidad de innovación o reducción de costos empuja a incluir nuevos materiales que no están caracterizados para un análisis no lineal. En otros casos el material puede que no esté bien descrito o falten datos vitales para este análisis como el Plastic Strain to Failure.

Por tales cuestiones es recomendable realizar un juicio de ingeniería, y no solo para este tipo de análisis si no que en general puede aplicar a varios casos de estudio en CAE. Este juicio consiste en confiar en los resultados de los análisis con carga estática siempre y cuando los esfuerzos **no superen el esfuerzo de cedencia**. Para este tipo de cargas el análisis lineal suele ser acertado, por otra parte, si se tienen casos donde el esfuerzo sea demasiado grande, es altamente recomendable **llevar a cabo un análisis dinámico no lineal**, para saber con mayor exactitud en qué parte de la zona de deformación plástica se encuentra el material a una determinada fuerza.

Con este tipo de observaciones se puede encontrar que solamente se podría invertir tiempo y recursos de hardware en situaciones específicas o que presenten comportamientos críticos de carga, y seguir considerando confiables los análisis estáticos, ya que estos últimos resultan ser más de fáciles de realizar y consumen muchos menos recursos.

Otra cuestión que se descubrió fue que detallar las zonas de interés por medio de una malla de menor tamaño resulta en una mejoría de los resultados. El modelo en CAE discretizado es finalmente una aproximación, y como tal está sujeta a factores de calidad en la malla siendo uno de estos el tamaño de elemento. No obstante el realizar una malla muy detallada para todo un subsistema como lo es la puerta de un carro, resulta en un consumo importante de tiempo que no siempre se tiene disponible.

A pesar de esta situación, en caso de querer ser más precisos se puede recurrir a mallar a con un tamaño más pequeño la zona de aplicación de carga, o simplemente poner más detalle a la



calidad de malla en esa zona de interés, considerando poner más elementos cuadrados que triángulos, y procurando que la malla sea uniforme.

Con éste proyecto realizado no solamente fue necesario involucrar las partes correspondientes a los conceptos de ingeniería y manejo del software, sino que también se llevó una intensa labor de equipo en la que varias personas se involucraron para coordinar las pruebas, intercambiar datos y llevar funciones de asesoría. Así mismo los resultados han trascendido puesto que este estudio está sirviendo de argumento para modificar el procedimiento oficial establecido por la empresa, juntos con otros casos de carga.

Personalmente enfatizo sobre la formación académica que me otorgó la Facultad de Ingeniería de la UNAM, pues cumplió cabalmente cubriendo los conceptos básicos sobre estática, dinámica, mecánica de sólidos, ingeniería de materiales, y manejo de modelos en software CAD que fueron muy útiles de trasfondo para poder llevar a cabo este proyecto y en general todas las actividades que involucra mi puesto de trabajo. Así mismo también se presentó como un reto, debido a que teníamos un tiempo limitado de 4 meses para concluir el proyecto y en mi caso fue necesario aprender nuevas instrucciones y comandos de software CAE que no había utilizado.

En la actualidad la industria automotriz demanda muchos recursos y tiempos cada vez más estrechos para lanzamiento de nuevos vehículos. Evidentemente el gran abanico de marcas, el nacimiento de nuevas tecnologías, así como la demanda de diseños cada vez más arriesgados, propicia esta mejora continua que requiere de una guía que CAE puede proporcionar, ya que a su vez esta herramienta de la ingeniería ha ido evolucionando con el desarrollo de nuevos algoritmos y funciones más robustas. Por tal motivo considero que una instrucción más ardua en el campo del elemento finito y su aplicación con el software, facilitaría la inserción de los futuros ingenieros en la industria automotriz, que es una rama incipiente en nuestro país y no solo como lugar de manufactura, sino también como plataforma donde se realiza ingeniería automotriz, desde el diseño de superficies hasta innovaciones tecnológicas.

Con la evidencia de los resultados de este proyecto y mi experiencia en estos meses, considero que las evaluaciones realizadas con CAE otorgan mucha libertad para experimentar con los componentes del automóvil, y aparte ahorran sustancialmente recursos económicos. Imitar los fenómenos físicos no es cosa sencilla, pero gracias al desarrollo de estos algoritmos continuamos en la carrera por acercarnos cada vez más a la realidad y en un futuro prescindir de las pruebas físicas, o por lo menos reducir el volumen de éstas.

## Bibliografía y referencias

- [1] Kurowski, Paul M., *Finite Element Analysis for Design Engineers*, SAE International, 2004.
- [2] Hughes, Thomas J.R., *Finite Element Method-Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Dover Publications, 2000.
- [3] Bhatti Asghar M., *Fundamental Finite Element Analysis and Applications*, Ed. John Wiley & Sons, 2005.
- [4] Askeland Donald R., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, International Thomson, 3ra Edición, 1998.
- [5] McCrum, N. G., Buckley C. P., Bucknall C. B., *Principles of Polymer Engineering*, Oxford University Press, 2nd Edition, 1997.
- [6] De Silva, Clarence W., *Mechanics of Materials*, Taylor & Francis, 2014.
- [7] General Motors de México (2015). GM de México: Nuestra Historia. Recuperado de [http://www.gm.com.mx/corporativo/gm\\_mexico/historia/](http://www.gm.com.mx/corporativo/gm_mexico/historia/).
- [8] Siemens PLM Software (2014). CAE/Computer-Aided Engineering. Recuperado de [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/plm/cae.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/plm/cae.shtml).
- [9] Altair (2015). Altair OptiStruct Optimization Driven Desing. Recuperado de [http://www.altairhyperworks.com/HWTemp1Product.aspx?product\\_id=19](http://www.altairhyperworks.com/HWTemp1Product.aspx?product_id=19).
- [10] Ayuda de SolidWorks (2015). Análisis estático lineal, Estudios dinámicos no lineales. Recuperado de [http://help.solidworks.com/2010/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/NonlinearAnalysis/Nonlinear\\_Dynamic\\_Studies.htm?id=082d25c383954ad78b19f17304a739b5#Pg0](http://help.solidworks.com/2010/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/NonlinearAnalysis/Nonlinear_Dynamic_Studies.htm?id=082d25c383954ad78b19f17304a739b5#Pg0).