



**DISEÑO DE INICIADORES DE FALLA APLICADO AL
REPOSABRAZOS AUTOMOTRIZ PARA EL IMPACTO LATERAL**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. JORGE ISRAEL BARRERA RENDÓN
ASESOR: DR. JOSÉ MANUEL ROJAS GARCÍA**

LERMA DE VILLADA, EDOMEX, DICIEMBRE 2019.

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



Lerma de Villada, Estado de México, a 22 de Noviembre de 2019.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

PRESENTE

El abajo firmante miembro del Comité Tutorial del Ing. Jorge Israel Barrera Rendón, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis, titulado "Diseño de iniciadores de falla aplicado al resposabrazos automatiz para el impacto lateral" **AUTORIZO** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de maestro en manufactura avanzada.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada a la presente.

Atentamente,

Dr. José Manuel Rojas García
Investigador Titular "C". CIATEQ

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Lerma de Villada, Estado de México, 09 de diciembre de 2019.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) **Jorge Israel Barrera Rendon**, cuyo título es:

"DISEÑO DE INICIADORES DE FALLA APLICADO AL RESPOSABRAZOS AUTOMOTRIZ PARA EL IMPACTO LATERAL"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

Dr. Luis Edmundo Lugo Uribe

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Lerma, Edo. de Méx.

+52 (722) 262 0750

| 01 800 800 3798

| mkt@ciateq.mx

www.ciateq.mx

RESUMEN

Diversos plásticos se han utilizado en la industria automotriz para la manufactura de autopartes de interiores en vehículos, siendo de alta prioridad que éstas cumplan normas de seguridad en caso de, por ejemplo, un impacto lateral. El impacto lateral es importante ya que representa aproximadamente una cuarta parte de las lesiones graves o mortales que se producen en las carreteras. En el presente trabajo se analizan cuatro plásticos para fabricar un reposabrazos: el copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), un polipropileno reforzado con fibra de vidrio (PP/20GF), una olefina termoplástica reforzada con fibra de vidrio (TPO/25GF) y una olefina termoplástica reforzada con talco (TPO/Talc). Asimismo, se revisan sus propiedades viscoelásticas determinadas por análisis dinámico-mecánico (DMA) y se varía el tipo de iniciadores de falla ubicados en la autoparte, los cuales son utilizados para propiciar su colapso durante un impacto lateral. El diseño del reposabrazos está definido por el espesor nominal de 2.5 mm con una restricción del espesor mínimo de 1.8 mm para evitar marcas visibles. La simulación del impacto lateral se realizó a una masa constante de 1368 Kg y a una velocidad de 55 Km/h alcanzando una fuerza de choque lateral de 4.180 KN. Entre los resultados obtenidos se destaca que el ABS permitió un desplazamiento de la pared lateral de 30 mm y redujo la fuerza de reacción de 675 KN a 549 KN logrando encontrar una buena correlación con sus propiedades de módulo elástico (G') determinado por DMA. De acuerdo con la normatividad americana FMVSS214 se requiere que el desplazamiento de la pared lateral del reposabrazos después de la prueba de impacto lateral sea mínimo de 35 mm en el eje X del componente automotriz. Así, los resultados en este trabajo permiten concluir que el tipo de plástico, sus propiedades viscoelásticas y las consideraciones de diseño de iniciadores de falla en un reposabrazos tienen un efecto en la forma de colapsar la autoparte durante un impacto lateral.

Palabras clave: Reposabrazos, Impacto lateral, Propiedades viscoelásticas.

ABSTRACT

Several Plastics have been used in the automotive industry for manufacturing inner and outer auto parts, which they need to accomplish security standards in order to preserve passenger's safety, as example, in a side impact crash event. Side impact is important because it accounts for approximately a quarter of the serious or fatal injuries that occur on the roads. In this work, four plastics are used to produce an armrest: an acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS), a glass fiber-reinforced polypropylene (PP/20GF), a glass fiber-reinforced thermoplastic olefin (TPO/25GF) and a talc-reinforced thermoplastic olefin (TPO/20Talc) , their viscoelastic properties were evaluated by dynamic mechanical analysis (DMA), and changing the type of crack initiators, which are used to promote the collapse of the auto part with no injuries to the passenger. The armrest design is defined by 2.5 mm nominal wall thickness with a constraint of minimum 1.8 mm wall thickness for avoiding visible marks. Side impact crash test is made with a mass of 1368 Kg and at speed of 55 Km/h for reaching a side impact force of 4.180 KN. Simulation data show that ABS copolymer reached 15 mm displacement in the side wall and the reaction force was reduced from 675 KN to 549 KN showing good correlation with elastic modulus (G') determined by DMA. According to the American standard methodology FMVSS214, the X-axis displacement in the armrest side wall after side impact crashing must be less than 35 mm. Thus, obtained data in this study allow to conclude that type of plastic, the viscoelastic properties, and design setup of crack initiators in the armrest have influence in the way of an armrest collapses during a side impact crash.

Key words: Armrest, Side Impact, viscoelastic properties.

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 Hipótesis.....	4
CAPITULO 2. MARCO TEORICO	5
2.1 Aspectos de Seguridad en Automóviles	5
2.2 Definición de percentiles en maniqués de prueba (dummies)	5
2.3 La evolución en el Ocupante (maniquí)	6
2.4 Índice de trauma torácico (TTI).....	8
2.5 Análisis de datos en una prueba simulada de impacto lateral.....	10
2.6 Tecnologías para reducir el TTId.....	13
2.6.1 Escenario de Prueba del Choque Frontal.....	13
2.6.2 Escenario de Prueba del Choque con Barrera Lateral.....	14
2.6.3 Escenario de Prueba del Choque con Poste Lateral.....	15
2.7 Descripción del panel interior de puerta (door trim)	17
2.7.1 Consideraciones de diseño del reposabrazos	18
2.8 Propiedades viscoelásticas lineales	19
2.9 Análisis dinámico mecánico (DMA)	21
CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	25
3.1 Materiales	25
3.2 Parámetros de diseño del reposabrazos	26
3.3 Equipos y software utilizados	28
3.4 Prueba de choque con impacto lateral	29
3.5 Método de análisis por Análisis de Elemento Finito.....	30

3.6 Diseño de experimentos propuesto	34
CAPITULO 4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS.....	36
4.1 Resultados de análisis dinámico mecánico (DMA) para determinar las propiedades viscoelásticas lineales de los plásticos seleccionados	36
4.2 Resultados de la prueba de impacto lateral.....	41
4.3 Correlación de propiedades viscoelásticas y simulación de impacto lateral	44
CONCLUSIONES	48
APORTACIÓN DE LA TESIS	49
RECOMENDACIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ANEXOS

Anexo A Tabla de pruebas, Impacto lateral de trineo en cadáveres conducida por el colegio médico de Wisconsin.

Anexo B Tabla de pruebas en segunda ronda para impacto lateral de trineo conducida por el colegio médico de Wisconsin.

Anexo C Tabla de pruebas, impacto lateral de trineo publicado por Cavanagh et al (1993).

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Distribución percentil al 95(a) y 50(b) percentil.	6
Figura 2.2 Imagen del MCW prueba de trineo con la separación entre la pelvis y las placas.	10
Figura 2.3 Calculo de desviaciones de la mitad del tórax.	12
Figura 2.4 Ilustración del impacto frontal.	14
Figura 2.5 Ilustración del impacto lateral con barrera deformable.	15
Figura 2.6 Ilustración del impacto lateral con poste.	16
Figura 2.7 Descripción de componentes del panel interior de puerta (door trim)	17
Figura 2.8 Ejemplo de un reposabrazos automotriz.....	18
Figura 2.9 Cómo funciona un DMA.....	23
Figura 2.10 Curva tensión-deformación que relaciona la fuerza con la deformación	23
Figura 3.1 Reposabrazos modelado en software de diseño.....	26
Figura 3.2. Localización de los iniciadores de falla.....	27
Figura 3.3 Sección de Ingeniería primer diseño no satisfactorio	27
Figura 3.4. Diseño propuesto del iniciador de falla	28
Figura 3.5. Localización del impacto lateral en un vehículo.....	29
Figura 4.1 Termograma DMA para el ABS	36
Figura 4.2. Termograma DMA para el PP/20GF.....	37
Figura 4.3 Termograma DMA para el TPO/25GF	38
Figura 4.4 Termograma DMA para el TPO/20Talc	39
Figura 4.5 Grafica de resultados de las pruebas DMA para los 4 materiales.....	40
Figura 4.6 Grafica de resultados DMA en el rango de aplicación de -30 a 80°C	41
Figura 4.7 Ejemplo de representación de la deformación obtenida del análisis de elemento finito (F.E.A.) realizado al plástico ABS.....	42
Figura 4.8 Impacto del dummy en la superficie de estudio. (a) dummy al 50% y (b) Resultado después del impacto. Pieza colapsada	42
Figura 4.9 Correlación entre el desplazamiento y la temperatura de prueba	45
Figura 4.10 Correlación entre el desplazamiento y G'	46
Figura 4.11. Correlación entre el desplazamiento y la $Tan(\delta)$	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Estimaciones puntuales de las funciones medidas en cadáveres para el 25% y 50%	12
Tabla 3.1 Propiedades mecánicas de los plásticos utilizados a 23 °C.	25
Tabla 3.2 Designación de factores de simulación	34
Tabla 3.3 Variables y combinaciones del diseño de experimentos	35
Tabla 4.1 Resultados diseño de experimentos en análisis de elemento finito	43
Tabla 4.2 Comparativo del impacto lateral para el arreglo A2-B1 vs Normatividad FMVSS214.....	44

GLOSARIO

Análisis de Elemento Finito: Es una técnica de simulación por computador usada en ingeniería, para predecir el comportamiento de cierto sistema sometido a una carga o estrés durante un determinado periodo de tiempo.

Maniquí de Prueba: Representación de un ser humano (hombre o Mujer) para ensayos de choque o colisiones, que hace referencia al tipo de muñeco antropomórfico utilizado para las pruebas de seguridad de los automóviles.

Método estadístico ortogonal: Buscamos explorar más de un factor experimental simultáneamente y en combinación, cada nivel de un factor está presente en el experimento en combinación con cada nivel del otro factor (ortogonalidad), Debemos asegurar la ortogonalidad con el fin de investigar las interacciones entre factores.

Panel de Puerta: Componente Automotriz con el cual se cubren la puerta metálica del automóvil en el interior del mismo, su función principal es mejorar la experiencia de usuario mediante apagadores para las ventanas, manija de apertura y superficie de jalón para el cierre de la puerta automotriz, entre otros.

Plástico Amorfo: Es un plástico/polímero el que debido a la falta de regularidad en su estructura o por la falta de conformación helicoidal no puede formar cristales, que requieren de un orden en las cadenas del polímero, como consecuencia tienen baja sensibilidad térmica.

Plástico Semi-Cristalino: Es un plástico/polímero que contiene dos regiones claramente definidas en su estado sólido. Una de estas regiones es amorfa y la otra es cristalina, contienen una mayor sensibilidad térmica que los polímeros amorfos.

Reposabrazos: Componente del panel de puerta interior, generalmente construido con plástico, el cual su función principal es soportar el brazo de los ocupantes en un estado de reposo durante el viaje o trayecto.

AGRADECIMIENTOS

“Bueno es ir a la lucha con determinación,
abrazar la vida y vivir con pasión.
Perder con clase y vencer con osadía,
Porque el mundo pertenece a quien se atreve
y la vida es mucho, para ser insignificante.”

-Charles Chaplin-

- Agradezco a mi familia por su paciencia, apoyo y comprensión, siempre serán mi base y mi motivación para ser mejor Padre, mejor esposo, mejor hijo y mejor persona, agradezco especialmente a mi esposa Julieta y a mis hijos Regina y Nicolás.
- Agradezco a mi madre Eva por el impulso y la educación brindada, sin ella no sería la persona que soy ahora, a mi hermana Montserrat por el buen ejemplo y perseverancia académica que me ha mostrado.
- Gracias a mi familia política, Alejandro y Julia por todo el apoyo en el cuidado de mi familia durante mi ausencia dedicada a este posgrado.
- Gracias por el apoyo de los investigadores de CIATEQ en la realización experimental de este trabajo: Ing. C. Hernández-Navarrete, Ing. R. Villa-Moreno y al Ing. M.A. Estrada-Ramos, la ciencia sin la tecnología solo sería un sueño en la mente ilustre de los iluminados.
- A personal de General Motors de México por su contribución en el trabajo: Ing. A. Aldrete-Meza e Ing. D. Rojas, gracias por el apoyo y facilidades brindadas a un servidor.
- A mis amigos y todas aquellas personas que con su consejo, conocimiento o motivación hicieron posible la culminación de este trabajo.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Hace más de 150 años que se registró la primera fatalidad en la historia del automovilismo en ese momento la resolución en los problemas de seguridad era casi nulo pues la densidad poblacional que podía tener acceso a un automóvil era muy poca y, por lo tanto, el número de accidentes de seguridad era minimizado por los pocos hallazgos, la historia paralela de las pruebas de impacto para lograr predecir el comportamiento de los componentes y de los ocupantes ha sido por demás interesante: Se trata de una historia que ha salvado más de 20 millones de vidas con la implementación de sistemas de seguridad en el exterior como en el interior del vehículo(2).

En 1896 en Parsontown, Irlanda, Mary Ward, la primera víctima oficial del automovilismo, moría al salir proyectada de un vehículo en movimiento por un choque frontal. En aquella época la visión de la seguridad automotriz estaba enfundada en no tener cinturones de seguridad en los asientos ya no pensemos en la evolución de la sujeción de tres puntos o de cuatro puntos para los autos deportivos modernos, con cristales convencionales astillables en las ventanas y carrocerías rígidas puesto que en esa época la lógica era que todo vehículo debe ser muy fuerte o muy rígido para ser seguro; tan seguro como la columna de la dirección no colapsable, lista para lesionar a alguien; el conjunto de todo esto y los índices de mortalidad por accidentes automotrices subiendo, se encendieron las alarmas. Sin embargo, las bolsas de aire para mitigar el impacto aún no se consideraban ni por las mentes más creativas y revolucionarias de esa época.

Los choques laterales de seguridad o impactos laterales regulados por los gobiernos locales exigen que durante las pruebas todos los elementos de la puerta interior permanezcan sujetos al panel metálico y mitiguen el impacto al ocupante. Este tipo de choques pueden simularse con programas de análisis de elemento finito (CAE, por sus

siglas en inglés), los cuales pueden lograr un alto nivel de correlación contra los resultados en pruebas físicas.

Para cumplir con los requerimientos de seguridad, la selección de materiales para la manufactura de autopartes siempre ha sido un factor clave para su desempeño eficiente durante su vida útil, por lo cual es necesario que los materiales seleccionados tengan un balance positivo entre el costo de dicho material y sus propiedades ya sean mecánicas, ópticas, reológicas, etc.

Anteriormente, la industria automotriz buscaba que sus componentes fueran más rígidos para poder así mitigar el daño al ocupante. Sin embargo, hoy día, la industria busca componentes más colapsables que puedan absorber la mayor cantidad de energía durante el impacto, razón por la cual los automóviles reaccionan a los impactos frontales o laterales tratando de absorber la mayor cantidad de energía antes de que estos lleguen al ocupante.

Siendo el Panel interior de puerta un componente clave en la absorción de energía durante el impacto lateral, es natural tratar de mejorar el desempeño de la misma, tomando en cuenta que el panel interior es el primer componente plástico que impacta directamente a la zona pélvica y torácica del ocupante, creando posibles lesiones si no tiene un buen desempeño ante el impacto. Así, se considera interesante de estudiar las propiedades del plástico utilizado para la manufactura de autopartes y su correlación con la forma como se fractura y absorbe energía en caso de un evento de impacto.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los puntos de la regulación norteamericana FMVSS 214 está centrada en evitar la obstrucción y pinchadura de la bolsa de aire durante su despliegue. Sin embargo, la fuerza de reacción del reposabrazos contra tórax del ocupante es muy variable ya no que existe un estándar de diseño. Esta fuerza de reacción depende directamente de la rigidez del componente de estudio y del desplazamiento generado durante el impacto. Sin embargo, el diseño actual considera algunas propiedades críticas del material seleccionado, pero no se consideran las propiedades viscoelásticas y su correlación con

la forma como se comporta durante un impacto que produzca la ruptura de la autoparte en forma que impida u obstruya el desarrollo del inflado de la bolsa de aire.

Así, el propósito principal de este trabajo es el de estudiar cómo se desplaza la pared en un reposabrazos durante el colapso provocado por la aplicación de una fuerza generada por la barrera deformable y la reacción contra el ocupante o muñeco de prueba (dummy) en caso de una prueba de choque simulando un impacto lateral, variando el tipo de plástico y el espesor de la pared nominal de la autoparte.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Al diseñar un reposabrazos muy rígido, éste trasladará la fuerza del impacto lateral casi en su totalidad al ocupante generando una posible lesión en el tórax y generará fractura frágil generando astillas filosas que podrían lesionar al ocupante y pinchar la bolsa de aire durante su inflado, por el contrario si el reposabrazos es muy flexible, éste no cumplirá con el objetivo de tener la rigidez suficiente para que no se deforme con el peso que se pudiera aplicar en caso de sujetarse o descansar el brazo el ocupante. Así, al diseñar un reposabrazos tenga rigidez para cumplir su función en condiciones normales y se espera que sea colapsable y con capacidad de absorber suficiente energía para evitar un daño mayor al ocupante con ruptura tipo dúctil, lo cual en conjunto con iniciadores de falla podrán mitigar del impacto al ocupante incrementando la posibilidad de no sufrir lesiones graves.

Cada vehículo en la etapa de primeras piezas inyectadas gasta alrededor de \$35,000 USD en agregar iniciadores de falla después del análisis con las pruebas físicas. Esto lo podemos convertir en ahorro a una armadora (en este caso a GM) al desarrollar un reposabrazos que contenga los iniciadores de falla útiles determinados mediante la simulación CAE antes del corte del herramental de inyección, es decir, el presente trabajo propone considerar las propiedades del plástico seleccionado y la incorporación de iniciadores de falla que permitan evitar el retrabajo posterior a la elaboración del molde y producción del reposabrazos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Determinar el mejor diseño y ubicación de los iniciadores de falla en el reposabrazos de un vehículo para mitigar el impacto al ocupante a través de conocer el efecto del tipo de plásticos a utilizar y de realizar pruebas dinámicas de impacto lateral en simuladores sobre el desempeño mecánico del reposabrazos.

1.4.2 Objetivos específicos

1.4.2.1 Determinar la fuerza de impacto lateral de acuerdo con la normalización FMVSS214. Definir el diseño de iniciadores de falla a ocupar en el reposabrazos.

1.4.2.2 Realizar un análisis dinámico-mecánico (DMA) para conocer las propiedades viscoelásticas de los plásticos seleccionados.

1.4.2.3 Establecer un diseño de experimentos para determinar la mejor combinación entre el tipo de plástico y el espesor nominal del reposabrazos en combinación con los iniciadores de falla.

1.4.2.4 Realizar pruebas de validación estructural mediante análisis de elemento finito (CAE) considerando los iniciadores de falla.

1.4.2.5 Encontrar la correlación entre el desplazamiento y las propiedades viscoelásticas.

1.5 HIPÓTESIS

El mejor diseño y ubicación de los iniciadores de falla en un reposabrazos de un vehículo colocado en una puerta lateral puede realizarse a través de considerar un análisis de los tipos de plásticos y su comportamiento en el intervalo de temperatura de trabajo, de definir el diseño de iniciadores de falla y de generar una simulación en un programa de análisis de elemento finito, de tal forma que, el tipo de plástico y los iniciadores de falla colocados en el reposabrazos funcionan para colapsar en forma dúctil el reposabrazos en caso de un impacto lateral ayudando a mitigar el impacto al tórax que pudiera tener el ocupante del vehículo.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 ASPECTOS DE SEGURIDAD EN AUTOMÓVILES

La mayoría de los conductores, sin importar la manera precavida en que manejen, chocarán por lo menos una vez en el transcurso de sus vidas. Las posibilidades de ser lesionado o morir en un choque vehicular son mayores de lo que se podría pensar. Una de cada tres personas se lesiona o muere. Para aumentar las posibilidades de sobrevivir un choque, La configuración y tipo de materiales usados durante la construcción del vehículo son de gran importancia, esto hablando directamente de los choques o impactos al vehículo.

La seguridad en el interior del vehículo (habitáculo) comienza a volverse crucial para la protección del ocupante, el concepto inicial seguía la creencia de hacer lo más rígido posible la estructura del auto; para así, proteger el ocupante durante cualquier impacto al vehículo, las bolsas de aire son muy importantes en la mitigación del impacto a la cabeza, rodillas o parte superior del torso solar. Para la seguridad en la zona pélvica y torácica, la definición en la construcción y los materiales se vuelven trascendentales para la seguridad de los ocupantes.

Para efectos prácticos se realizan simulaciones con maniqués de pruebas dentro de vehículos productivos y así mejorar, de ser necesario todos los aspectos que mitiguen el daño a los ocupantes.

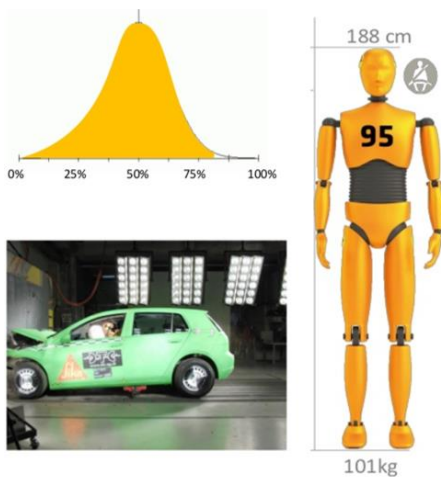
2.2 DEFINICIÓN DE LOS PERCENTILES EN LOS MANIQUÉS DE PRUEBA

Un percentil no se refiere a porcentaje; sino más bien se trata del valor en un conjunto de datos que marca un cierto porcentaje del camino a través de los datos, es decir, los percentiles son el resultado de estudios realizados a una determinada población. Esto ayuda a conocer donde se sitúa, por ejemplo, el peso y la talla de un sujeto, en comparación con otros sujetos de su misma condición.

Un 95 percentil, quiere decir que el 95 % de población mide menos de 1.88 m, luego sólo un 5% tienen más talla que él, como lo muestra la Figura 2.1, donde se ve la distribución gaussiana de los percentiles automotrices con los siguientes parámetros:

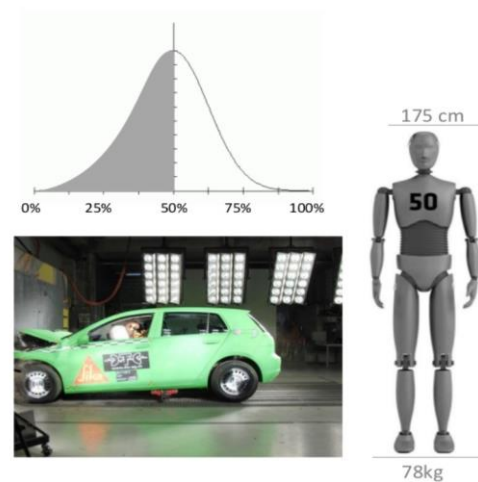
- a) 95 percentil hombre – 101 Kg. y 1.88m. Figura 1 (a)
- b) 50 percentil hombre - 78 Kg. y 1.75m. Figura 1 (b).
- c) 50 percentil mujer - 53 Kg. y 1.64m.
- d) 5 percentil mujer – 40kg. y 1.50m.

SAFE DRIVE AWAY TIME
RELATED TO FMVSS 212 STANDARD



(a)

SAFE DRIVE AWAY TIME
RELATED TO FMVSS 212 STANDARD



(b)

Figura 2.1. Distribución percentil al 95 (a) y 50 (b) percentil.

2.3 LA EVOLUCIÓN EN EL OCUPANTE (MANIQUÍ)

En 1971, General Motors Company hace el Hybrid I, un dummy (maniquí de prueba) masculino de 50 percentil, un humano masculino promedio en cuanto a su altura, masa y proporciones. El "Sierra Sam" original en cambio era un percentil 95, más pesado y más alto que el 95% de los hombres. Después llegó el Hybrid II, mejor documentado, con rodillas, hombros y columna vertebral flexibles tratando de simular el movimiento articular del ser humano.

En los 80, se desarrollaron una nueva serie de dummies conocidos como Hybrid III, los cuales requieren ser calibrados previo a ser sometidos al ensayo de choque y ubicándolos en una plataforma de pruebas donde son golpeados en el tronco por un gran péndulo para verificar que las costillas se doblan y flexionan con gran similitud a la del cuerpo humano.

En la actualidad, los sensores instalados en el automóvil y en el dummy envían información a una computadora para obtener resultados más precisos. Así, se han conseguido implementos de seguridad como el sistema de frenado ABS (Anti Blocker System), vidrios templados no astillables, cinturones de seguridad de tres y cuatro puntos, columna colapsable de dirección, bolsas de aire frontales, laterales y tipo cortina, Dummies y pruebas de impacto estudiados en un laboratorio bajo condiciones controladas y utilizando vehículos de producción regular, tratando de replicar los choques de la vida diaria y mitigando tanto como sea posible el daño a los ocupantes.

El enfoque de esta tesis se centra en la seguridad del ocupante, en el choque lateral con barrera y el impacto del reposabrazos en el área torácica del ocupante, ya que este es el primer punto de contacto durante un impacto lateral.

La Ley de Desempeño y Resultados del Gobierno de los Estados Unidos de América de 1993 y la Orden Ejecutiva 1866 exigen a las armadoras evaluar sus programas y regulaciones existentes. Los objetivos de esta evaluación son determinar los beneficios actuales sobre vidas salvadas, lesiones evitadas, daños evitados y costos de equipo de seguridad instalado en vehículos de producción en relación con una norma, en este particular caso la única norma que tomaremos como base es la FMVSS 214.

La Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) es el organismo regulador del gobierno americano quien implementó en los 90 la normatividad FMVSS 214 relacionada con la "protección de impacto lateral", con la finalidad de asegurar la protección durante una prueba dinámica que simula un impacto severo en un ángulo a 90 ° realizado por una barrera de aluminio deformable. Así, esta normatividad asegura el cumplimiento de las regulaciones requeridas de la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration).

Dado que los impactos laterales son los responsables del 33 % de los decesos de los ocupantes, la actual regulación FMVSS 214 es la culminación de muchos años de búsqueda para hacer los vehículos menos vulnerables en impactos laterales y especialmente a reducir el riesgo de fatalidad cuando otro vehículo impacta en el área alrededor de la puerta.

La prueba FMVSS 214 está diseñada para simular una colisión severa en una intersección típica entre dos vehículos en movimiento en el que un automóvil de 3000 libras (1580 Kg) golpea el vehículo de prueba en un ángulo de 90° en el área de la cabina de los ocupantes. La prueba simula un vehículo que viaja a 30 mph (48.3 km/h) y el vehículo de prueba a 15 mph (24.14 Km/h). Sin embargo, en la FMVSS 214, la simulación se logra al tener el vehículo de prueba en posición estática. El vehículo en movimiento es una "barrera deformable" (MDB -Mobile Deformable Barrier) que viaja a 33.5 mph (54 Km/h) en un ángulo de 63° con la línea central longitudinal del vehículo de prueba. Las ruedas de la MDB están giradas 27° hacia la parte trasera del vehículo de prueba para garantizar que la parte delantera del MDB está paralelo al costado del vehículo de prueba en el momento del impacto, como en una carretera a 90° de colisión. (Cuando estos parámetros se calcularon al 0.01 más cercano, la velocidad es 33.54 mph, el ángulo de rumbo es de 63.43°, y el ángulo de arrastre 26.57°. Hay Maniqués de impacto lateral (SID) restringidos e instrumentados en los asientos delanteros y traseros adyacentes al lado golpeado del vehículo de prueba. El TTI_d (Thoracic Trauma Index) con subíndice "d" está en función de la deflexión en las costillas y los puntos pélvicos se miden tanto en el asiento delantero como en el trasero.

2.4 ÍNDICE DE TRAUMA TORÁCICO (TTI_ THORACIC TRAUMA INDEX)

El índice de trauma torácico, TTI por sus siglas en Ingles, proporciona un índice de la gravedad de las lesiones recibidas por los ocupantes de los vehículos motorizados en entornos de colisión durante un impacto lateral. El índice se obtuvo de los resultados en dos conjuntos de pruebas con cadáveres. Utilizando una variedad de métodos estadísticos y numéricos, volviendo a analizar los datos de estas más de ochenta pruebas en cadáveres para construir una mejor medida de la lesión que la TTI (1). Los índices generados por estos análisis se compararon con TTI utilizando las siguientes medidas

cuantitativas: mono tonicidad, superposición, porcentaje correcto y sensibilidad. Los valores de estas medidas son muy similares para todos los índices y ninguno de los nuevos índices funciona mejor que TTI. Esto sugiere que TTI es un buen predictor de lesiones como cualquiera de los varios modelos alternativos creados.

Una serie de cuarenta y dos pruebas de impacto lateral con cadáveres humanos totalmente equipados con instrumentos de medición y 16 pruebas con el que se llevaron a cabo en el Colegio Médico de Wisconsin (MCW) Medical College of Wisconsin. MCW utilizó un trineo en desaceleración para el impacto lateral tipo Heidelberg configurado para impactos del lado izquierdo (Figura 2.2). El sujeto de prueba se colocó en un banco a una distancia específica de la pared de impacto. Debido al impacto del trineo, el sujeto se deslizó por el banco y golpeó la superficie en la pared del trineo, los resultados de las pruebas realizadas a los cadáveres bajo esta configuración se encuentran en el anexo A y B. A diferencia de las configuraciones anteriores del trineo para el impacto lateral de Heidelberg (1), la altura de la pared se ajustó de manera que el hombro no tocara la pared. Esta configuración se seleccionó para representar el contacto de la puerta en choques de impacto lateral donde el hombro está por encima del nivel superior de la puerta al inicio de la ventana para un hombre de tamaño mediano, los resultados de las pruebas realizadas a los cadáveres se encuentran en el anexo C.

La superficie de impacto consiste en cuatro placas configuradas de manera tal que la placa superior impacta el tórax, la placa central superior impacta el abdomen, la placa central inferior impacta la pelvis y la placa inferior sirve como superficie de contacto para las extremidades inferiores. Las cuatro placas son equipadas con celdas de carga para medir la fuerza de impacto. La superficie de impacto es una pared plana o compensada por 12 cm a nivel de la pelvis, el abdomen o el tórax. La superficie de impacto era rígida (sin relleno) o acolchada con 10 cm de Ethafoam, relleno LC 200. También se realizan cuatro pruebas con bolsas de aire laterales montadas en la puerta y en el asiento. Las pruebas de impacto lateral se realizan a dos velocidades (24 km/h y 32 km/h) (10).

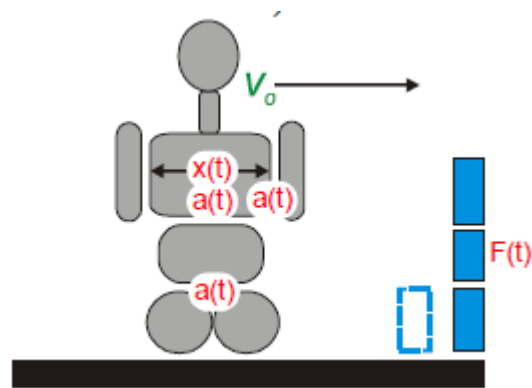


Figura 2.2. Imagen del MCW prueba de trineo con la separación entre la pelvis y las placas.

2.5 ANÁLISIS DE DATOS EN UNA PRUEBA SIMULADA DE IMPACTO LATERAL

El procesamiento de los datos del transductor y la normalización de las mediciones para los cadáveres se realizan de manera similar a la descrita por Kuppaa (7). Las aceleraciones de costilla y columna se filtran con el filtro SAE Channel Class 180. Las señales de fuerza torácica, abdominal y pélvica se filtran con el filtro SAE Channel Class 600. Los desplazamientos del pecho se procesan con el filtro SAE Channel Class 180. La aceleración y las fuerzas se normalizan utilizando el procedimiento de escala de esfuerzo de igual velocidad a igual velocidad descrito por Eppinger para representar las respuestas para un percentil 50 masculino (ecuaciones 1 y 2).

$$aceleración_{norm} = aceleración \times \left(\frac{masa(kg)}{75} \right)^{1/3} \quad [1]$$

$$fuerza_{norm} = fuerza \times \left(\frac{75}{masa(kg)} \right)^{2/3} \quad [2]$$

Donde la masa (Kg) es la masa total del sujeto.

La ITT para cadáveres se calcula según Eppinger que incluyen el efecto de la edad y la masa del sujeto. Para el cálculo de TTI, las aceleraciones en la cuarta costilla (rlu), la octava costilla (rll) y la aceleración de la columna inferior (spl) se procesan utilizando el filtro FIR100 (Ecuación 3). La aceleración media de la columna (ASA) se calcula y normaliza de acuerdo con ASA20, definida por Cavanaugh (1) (Ecuación 4). ASA20 se calcula como la pendiente de la línea que une los puntos 20% y 80% de la velocidad

máxima en la curva de velocidad de la columna vertebral inferior. Se usó ASA20 ya que el análisis preliminar de datos sugiere que ASA20 se correlaciona mejor con la lesión que ASA10 o ASA15 según lo definido por Cavanaugh (1).

$$TTI = 1.4 \times edad + \frac{1}{2} (costilla_{max} + spl) \times \frac{masa (kg)}{75} \quad [3]$$

Donde costilla máx es el máximo de $(1.3 \times rlu - 2.02)$ y rll

$$ASA = ASA20 \times \frac{edad}{45} \times \frac{masa (kg)}{75} \quad [4]$$

Las desviaciones completas y de la mitad del tórax se calculan utilizando datos de la banda torácica superior e inferior en cada milisegundo durante el evento de impacto, según lo descrito por Kuppa (7)

. La línea central de la columna vertebral se considera como el origen del contorno y se considera que el esternón era el punto a lo largo de la circunferencia de la banda a una distancia del 50% de la circunferencia. Comenzando en la columna vertebral y siguiendo el contorno en sentido horario, y considerando la distancia circunferencial completa como 100%, se marcaron tres ubicaciones en 20%, 70% y 80% de la circunferencia en el contorno, para cada contorno de deformación como lo muestra la Figura 2.3(b). Se obtuvieron desviaciones totales del tórax a partir de la distancia entre los límites del 20% - 80% y de manera similar entre 25% - 75% y 30% - 70% en la circunferencia. Las desviaciones de la mitad del tórax se obtuvieron a partir de la distancia perpendicular entre los límites del 20%, 25% y 30% y la línea sagital media que une la columna vertebral al esternón como lo muestra la Figura 2.3(a). Al calcular las desviaciones de la mitad del tórax, se supuso que las ubicaciones del esternón y la columna vertebral permanecían en un 50% y 0% a lo largo de la circunferencia del contorno durante todo el evento. Las desviaciones del tórax completo y medio del tórax se normalizaron con respecto al ancho inicial total del tórax antes del evento de impacto en el lugar del cálculo de la desviación(6).

La tasa de desviación (V) completa y media del tórax se obtiene al diferenciar las desviaciones procesadas por el filtro SAE Channel Class 180. El Criterio Viscoso (VC) se obtiene como el producto de la tasa de desviación (V) y la desviación torácica

normalizada. Se calcula las deflexiones normalizadas promedio total y medio del tórax, V y VC para cada banda como el promedio de las tres deflexiones normalizadas, V y VC, respectivamente, de cada banda(10).

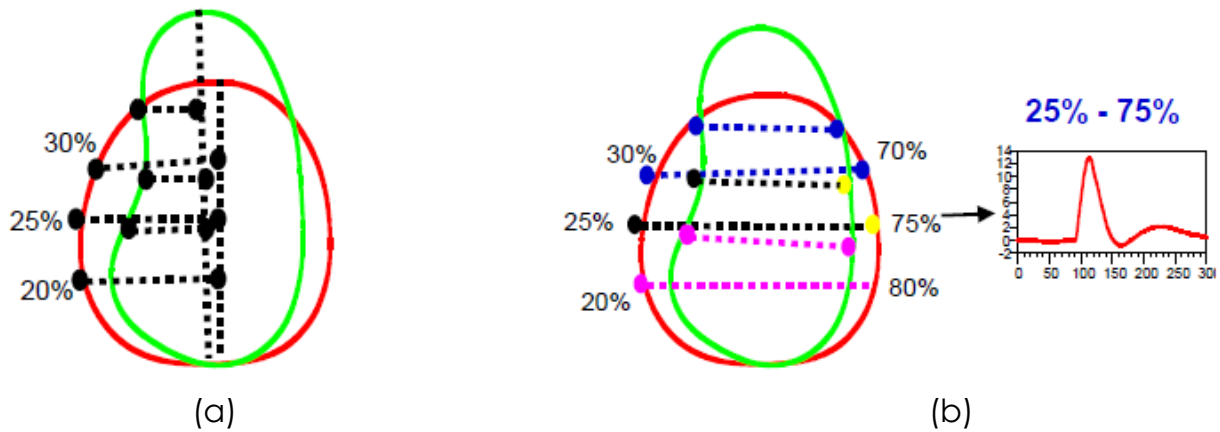


Figura 2.3. Cálculo de desviaciones de la mitad del tórax usando contornos desde el pecho.

El efecto de la edad del sujeto es más prominente para la respuesta de lesión nominal que distingue la lesión AIS 3+ que la respuesta que distingue la lesión AIS 4+. Los valores de los parámetros de lesión seleccionados en 25% y 50% de probabilidad de lesiones AIS 3+ y 4+ para un hombre del percentil 50 de 45 años se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Estimaciones puntuales de las funciones medidas en cadáveres para el 25 % y 50 %.

Predictor de Lesión	Probabilidad del 25%		Probabilidad del 50%	
	AIS 3+	AIS 4+	AIS 3+	AIS 4+
Promedio Máx. deflexión en la costilla	17%	22%	20%	25%
	56mm	72mm	65mm	82mm
TTI	126	155	150	180
TTI_{kernel}	66	92	82	114
Aceleración superior de la columna	48	70	66	90

2.6 TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR EL TTI_d

Dos tecnologías que solas o en combinación, significativamente reducen el TTI_d desde el nivel base en años modelo 1980 al 1988 para vehículos de producción:

1. Modificaciones estructurales, como pilares más fuertes, marcos, rieles de techo, asientos o travesaños para reducir el grado de intrusión de la puerta en el compartimento del pasajero o en el panel interior de puerta.
2. Formación geométrica capaz de absorber o comunicar energía significativa hacia un rango de fuerza-deflexión seguro para los ocupantes, generalmente se usa una espuma plástica (EPP) dimensionalmente grande más que un plástico extruido por soplado.

Una vez definido el TTI podemos analizar la norma de la NHTSA para los diferentes tamaños de maniqués de prueba, estas se realizan a diferentes velocidades y en diferentes ángulos para medir la posible afectación a los ocupantes de un vehículo estas son a 55 y 65 Km/h.

Las pruebas de impacto son las siguientes:

2.6.1 Escenario de Prueba del Choque Frontal

Usted se dirige hacia el sur en una carretera de dos carriles mientras que otro vehículo se dirige hacia el norte por esa carretera. El conductor del otro vehículo empieza a quedarse dormido mientras conduce y gira bruscamente en su carril. Repentinamente, choque de frente con el vehículo hacia el norte, tal y como se muestra en la Figura 2.4.

Detalles de la Prueba

- Un hombre adulto de tamaño promedio en el asiento del conductor.
- Una mujer adulta de tamaño pequeño en el asiento delantero del pasajero.
- Todos los maniqués están asegurados con cinturones de seguridad.
- Representa choques entre dos vehículos de frente similares con el mismo peso.
- Un vehículo se estrella contra una barrera fija a las 50 Km/h.

- Evaluación de las lesiones a la cabeza, el cuello, el pecho y el fémur (la pierna).
- Clasificaciones de los choques frontales sólo se debe compararse entre los vehículos de la misma clase de peso (± 120 Kg).

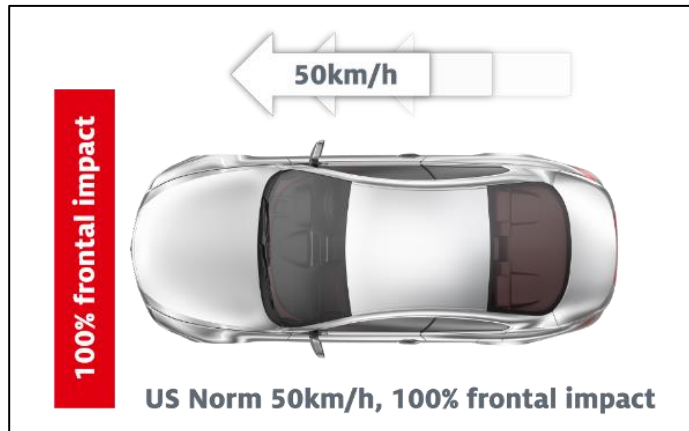


Figura 2.4. Ilustración del impacto frontal.

2.6.2 Escenario de Prueba del Choque con Barrera Lateral

El conductor del vehículo llega a una intersección de cuatro vías y se detiene por completo, mira a su izquierda y derecha y comienza a acelerar en la intersección. Otro vehículo se acerca a la misma intersección, pero no cede el paso en la señal de stop y golpea su vehículo en el lado del conductor, tal como se muestra en la Figura 2.5.

Los detalles de la prueba se enlistan como sigue:

- Un hombre adulto de tamaño promedio en el asiento del conductor.
- Una mujer adulta de tamaño pequeño en el asiento del pasajero trasero (lado del conductor).
- Todos los maniqués están asegurados con cinturones de seguridad.
- Representa una colisión de tipo intersección.
- Una barrera móvil de 1365 Kg se estrella a 55 Km/h con un vehículo parado.
- Evaluación de las lesiones a la cabeza, el pecho, el abdomen y la pelvis.
- Para las clasificaciones de barrera lateral, es posible comparar todos los vehículos el uno al otro.

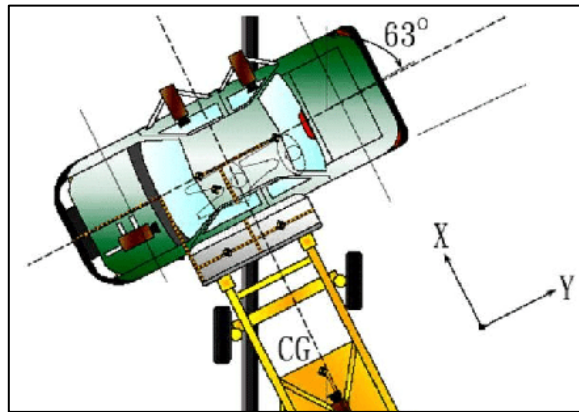


Figura 2.5. Ilustración del impacto lateral con barrera deformable.

2.6.3 Escenario de Prueba del Choque con Poste Lateral

Una tarde lluviosa, se está conduciendo en un vecindario por una calle curvada. De repente, se pierde el control del vehículo. Comienza a deslizarse lateralmente en la carretera y se estrella el lado del conductor con un poste de teléfono, tal como lo muestra la Figura 2.6.

Detalles de la Prueba

- Una mujer adulta en el asiento del conductor.
- El maniquí está asegurado con un cinturón de seguridad.
- El vehículo, en ángulo de 75 °, se tira lateralmente a las 20 mph hacia un poste de diámetro de 25 cm en la ubicación del asiento del conductor.
- Evaluación de las lesiones a la cabeza, el pecho, la parte inferior de la columna vertebral, el abdomen y la pelvis.
- Para las clasificaciones de poste lateral, es posible comparar todos los vehículos el uno al otro.

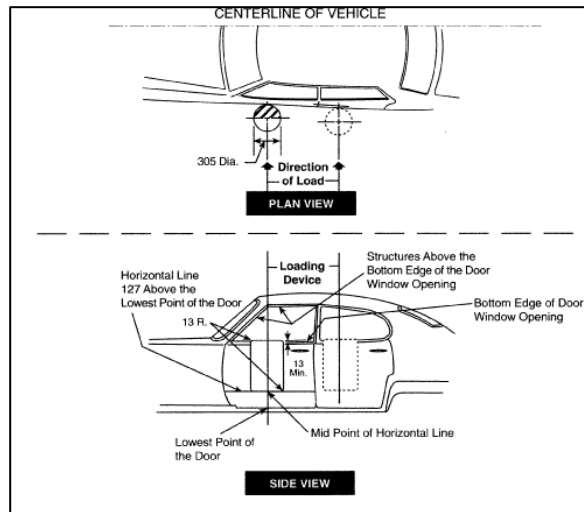


Figura 2.6. Ilustración del impacto lateral con poste.

En este caso la NHTSA indica:

- La configuración de una prueba usando una barrera deformable MDB (Moving Deformable Barrier) simulando una severa intersección por colisión entre dos vehículos de pasajeros.
- Criterio de Lesión, arriba de todo índice de traumatismo torácico TTI de 150, como lo señala la Tabla 2.1, que prediga la severidad de las lesiones torácicas como graves, cuando el torso del ocupante contacte alguna superficie interior del vehículo se deberán tomar las medidas necesarias para mitigar el daño al ocupante(8).

Un Impacto lateral al Maniquí o SID (Side Impact Dummy) en donde el TTI puede ser cuidadosamente medido en una prueba de impacto. La puntuación de lesión medida en el maniquí se llama TTI (d) ya que estará en función del desplazamiento de la pared donde contenga el primer punto de contacto interior o MIP (Most Inboard Point).

1. Velocidad de la barrera: 55 km/h.
2. Masa de la barrera: 1368 Kg.
3. Tipo de Barrera: De aluminio deformable.
4. Angulo de impacto: 90 °.

Durante el impacto lateral existen zonas en las cuales el estrés y el esfuerzo son mayores, tal es el caso de los paneles interiores de puerta, lo cuales realizan una importante labor al intentar absorber la mayor cantidad de energía posible para así conservar la integridad del ocupante.

2.7 DESCRIPCIÓN DEL PANEL INTERIOR DE PUERTA (DOOR TRIM)

El componente plástico que cubre la puerta lateral metálica se presenta en la Figura 2.7, el cual está conformado, de manera general, de los siguientes subcomponentes:

1. Componente Superior (upper).
2. Componente intermedio (bolster).
3. Reposabrazos (Armrest).
4. Manija de apertura (inside release handle).
5. Copa de jalón (pull cup).
6. Mapera (Map Pocket).
7. Parilla de altavoz (Speaker grille).
8. Refuerzo de cinturón (Belt Bracket).



Figura 2.7. Descripción de componentes del panel interior de puerta (door trim).

Uno de los componentes más importantes es el reposabrazos (número 3 indicado en la Figura 2.7) ya que es el componente contra el cual el ocupante impacta primero durante un choque lateral. En caso de un evento donde el reposabrazos tuviera una fractura no deseada, éste puede provocar daños y generar graves lesiones en el área torácica del ocupante, o bien podría impedir el correcto despliegue de la bolsa de aire llegando también a tener consecuencias fatales.

2.7.1 Consideraciones de diseño del reposabrazos

Componente de la puerta, el cual su función principal es sostener el brazo en estado de reposo, así como albergar la copa de jalón para el cierre de la puerta. Existen tantos tipos de reposabrazos como paneles internos ya que, estos dependen enteramente de la creatividad de diseñador un ejemplo se muestra en la Figura 2.8. El reposabrazos también es responsable de absorber tanta energía del impacto lateral como sea posible, para esto se puede agregar iniciadores de falla y así tratar de hacer mucho más colapsable el componente rígido (sustrato), mitigando lesiones al ocupante del vehículo.



Figura 2.8. Ejemplo de un reposabrazos automotriz

Algunos aspectos a considerar en el diseño del reposabrazos son:

Tipos de Reposabrazos. Existen varios tipos de reposabrazos siendo los más comunes: (1) tipo esnórquel, (2) tipo plano a lo largo de la puerta y (3) compacto de media puerta.

Primer punto de impacto interior. Se nombra al primer punto de impacto, aquel plano que tiene contacto con el ocupante durante un impacto. Para el caso de los vehículos

automotrices, por lo general, es el reposabrazos colocado en el panel de puerta, el cual debe cumplir con una rigidez suficiente para que cumpla su función, pero debe tener también cierta flexibilidad para permitir un mecanismo de fractura dúctil en caso de un impacto lateral.

Iniciador de Falla Se le llama iniciador de falla a todo cambio geométrico fuera de la geometría típica que debilite la pared nominal para provocar de manera controlada la ruptura o el colapso del plástico cuando es sometido a un esfuerzo por encima del esfuerzo de fluencia.

2.8 PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS LINEALES

La viscoelasticidad de polímeros es el estudio de las propiedades de los polímeros que presentan tanto propiedades viscosas como elásticas.

La deformación o elongación en estos materiales depende, no sólo de la tensión, sino que depende del tiempo que ésta es aplicada. Mientras se aplica una tensión constante, la elongación incrementa lentamente, alcanzando un valor máximo de forma exponencial. La base de la explicación de este fenómeno obedece a fricciones internas en el material.

Las propiedades viscoelásticas son dependientes del esfuerzo y temperatura y son un efecto de las propiedades de estructura molecular del polímero, tales como su peso molecular, la distribución del mismo y que tan ramificadas están las moléculas. Este tipo de información viscoelástica ayuda a entender cómo se comportan los materiales durante el procesamiento y las funciones del producto final, ya que la viscosidad del polímero depende directamente de su estructura molecular.

En la actualidad existen diferentes modelos matemáticos que describen el comportamiento viscoelástico de un polímero, como el modelo de Maxwell, quien consideró un modelo en que el comportamiento viscoelástico es una combinación en

serie de un amortiguador y un resorte. La viscoelasticidad, se le puede considerar entonces, el comportamiento comprendido entre un sólido ideal y un fluido newtoniano.

Para un material ideal 100% viscoso, se sigue la ley de Newton donde el esfuerzo cortante está directamente relacionado con la rapidez de deformación teniendo como factor de proporcionalidad a la viscosidad.

Viscosidad (μ): La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia del material a la deformación. Dicho concepto se introdujo anteriormente en la Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la rapidez de deformación (gradiente de velocidad).

Un material ideal 100% elástico sigue la ley de Hooke. Así, si un objeto sólido se encuentra en equilibrio, pero sujeto a una fuerza que tiende a alargarlo, deformarlo o comprimirlo, la forma del objeto varía. Si el objeto recupera su forma original después de suprimir la fuerza, se dice que el objeto es elástico ($e > 0$); la mayoría de los cuerpos tienen un comportamiento elástico al verse sometidos a la acción de fuerzas, con tal de que éstas no superen un cierto valor llamado límite elástico.

En física el término elasticidad designa a los materiales capaces de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan. En el rango elástico, en el cual es válida la ley de Hooke, la relación entre un esfuerzo de tensión y la deformación es una constante llamada módulo de elasticidad E , también conocido como módulo de Young.

Cuando un cable (o una barra) es sometido a un proceso de tracción o tensión, su incremento en longitud está conectado con un decremento en su sección transversal. El cociente de este cambio de diámetro e incremento de longitud es llamado el coeficiente de Poisson ν . Este es constante (con algunas excepciones) para cada material con intervalo entre 0.5 (no hay cambio de volumen) y 0 (la sección transversal no cambia).

La característica elástica predomina en materiales sólidos (por debajo de su T_g) y obedece la ley de Hooke. Cuando el polímero está fundido predomina el componente viscoso del material, que obedece la ley de Newton como indica la ecuación 5.

$$\sigma = \sigma_{zx} = \eta \frac{\partial v_z}{\partial x} = \eta \dot{\gamma} \quad [5]$$

Donde: σ , es el esfuerzo cortante; η , es la viscosidad cortante; y $\dot{\gamma}$, es la rapidez o velocidad cortante.

2.9 ANÁLISIS DINÁMICO MECÁNICO (DMA).

DMA puede describirse simplemente como la aplicación de una fuerza oscilante a una muestra y analizando la respuesta del material a esa fuerza (Figura 2.9). De esto, se calculan las propiedades como la viscosidad desde la fase de retraso y la rigidez en la recuperación de la muestra. Estas propiedades a menudo se describen como la capacidad de perder energía y calor (amortiguación) y la capacidad de recuperarse de la deformación (elasticidad). Una forma de describir lo que se está estudiando es la relajación de las cadenas de polímeros. Otra forma sería discutir los cambios en el volumen libre del polímero que se produce. Ambas descripciones permiten visualizar los cambios en la muestra.

El esfuerzo es la fuerza aplicada en una unidad de área y se denota con la letra griega σ . Cuando un material se somete a un esfuerzo, éste presentará una deformación γ . El comportamiento mecánico de los materiales se puede revisar en una curva esfuerzo-deformación, tal como se ve en la Figura 2.10. La obtención de la curva σ en función de la γ se puede obtener por diversas pruebas mecánicas, entre ellas las de tensión o tracción uniaxial a una temperatura fija. La pendiente de la zona lineal de la curva esfuerzo-deformación es una medida de la rigidez del material y se conoce como módulo elástico o módulo de Young, el cual depende de la temperatura. El valor del módulo indica que tan bien funcionará un material en una aplicación específica en el mundo real. Por ejemplo, si un polímero se calienta para que pase a través de su transición vítrea y cambie de vítreo (rígido) a dúctil (suave), el módulo caerá varias

décadas (una década es un orden de magnitud en el valor de módulo). Esta caída en la rigidez del material conduce a problemas severos si ocurre a una temperatura diferente a la esperada. Una ventaja del análisis dinámico-mecánico (DMA) es que se puede obtener un módulo cada vez que se aplica un esfuerzo senoidal (onda senoidal), permitiendo hacer un barrido a través de un intervalo de temperatura o frecuencia. Así, en un experimento a 1 Hz o 1 ciclo por segundo, es posible registrar un valor de deformación y al final un valor de módulos cada segundo, lo cual ocurre mientras se varía la temperatura a cierta tasa de cambio, por ejemplo 10 °C/min. Con este tipo de experimentación, el cambio de temperatura por ciclo no es significativo y es factible entonces registrar el módulo en función de la temperatura en un intervalo de más de 200 °C en 20 minutos.

Es conveniente aclarar que, el módulo medido por DMA no es exactamente igual al módulo de Young del experimento clásico, el cual genera una curva esfuerzo-deformación (Figura 2.10) donde el módulo de Young es la pendiente en la región lineal inicial. Por el contrario, en DMA al aplicar un esfuerzo senoidal, se genera una respuesta en forma de onda de deformación generando así que se determine un módulo complejo (G^*), el cual puede descomponerse en un módulo elástico (G'), y un módulo imaginario (viscoso o de pérdida) (G'')¹⁵. Estos diferentes módulos permiten visualizar mejor las características del material, porque se puede examinar la capacidad del material para almacenar energía (G') o su capacidad de disiparla (G''): La relación de estos efectos es la $\tan\delta (=G''/G')$, la cual es denominada como tangente de pérdida o factor de amortiguación(5).

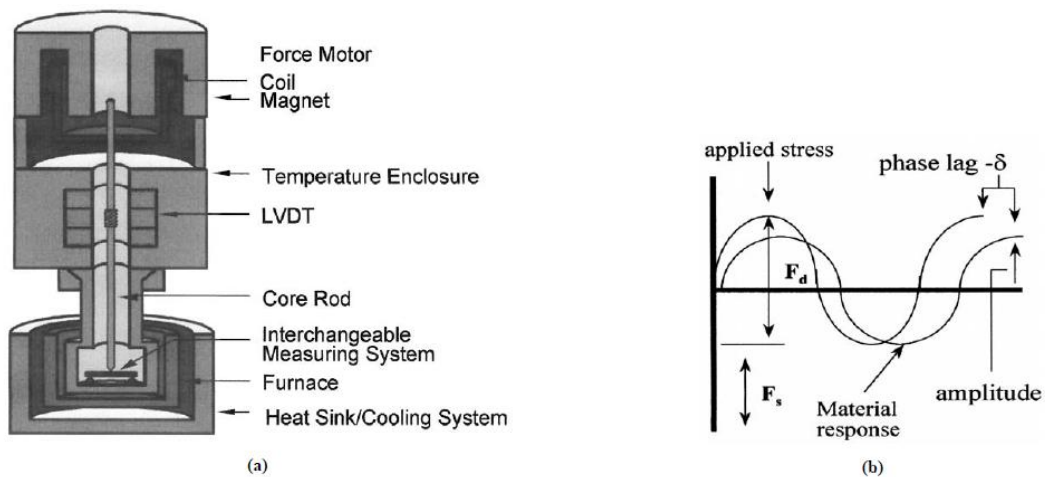


Figura 2.9 Cómo funciona un DMA.

De manera similar, podemos observar un amplio rango de frecuencia o velocidad de corte de 0.01 a 100 Hz en menos de 2 horas. En el enfoque tradicional, tendríamos que ejecutar el experimento a cada temperatura o tasa de deformación para obtener los mismos datos. Para el módulo de mapeo o viscosidad en función de la temperatura, esto requeriría calentar la muestra a una temperatura, equilibrio, realización del experimento, carga de una nueva muestra y repitiendo a una nueva temperatura. Así, para analizar el mismo intervalo de 200 °C de esta manera se requiere de varios días de trabajo (5).

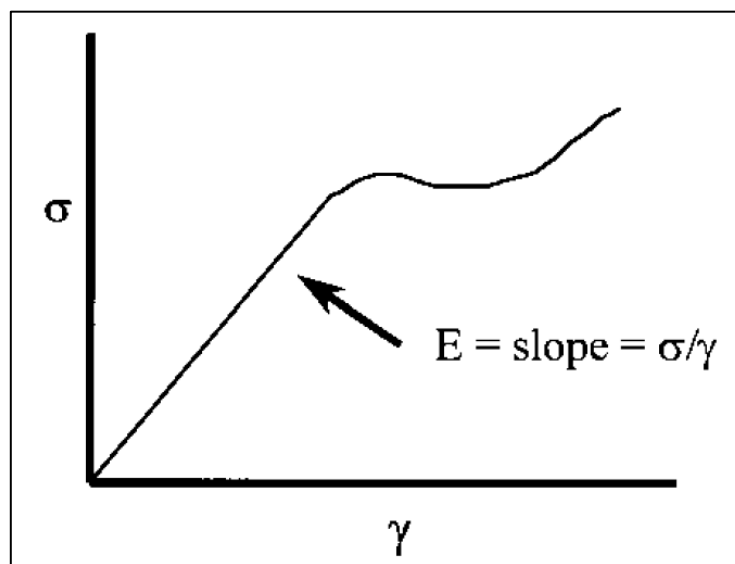


Figura 2.10. Curva esfuerzo-deformación de materiales.

En resumen, el análisis dinámico mecánico (DMA) determina el módulo elástico (o módulo de almacenamiento, G'), el módulo viscoso (o el módulo de pérdida, G'') y el coeficiente de amortiguamiento ($\tan\delta$) en función de la temperatura, la frecuencia o el tiempo mediante la aplicación de un esfuerzo senoidal en una muestra. Así, el DMA identifica las regiones de transición en los plásticos, tales como la transición vítrea, y se puede usar para el control de calidad o el desarrollo del producto. Este análisis también puede reconocer pequeñas regiones de transición que están más allá de la resolución de un análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC).

El espécimen de prueba de un material se sujeta entre los accesorios móviles y estacionarios, y luego se encierra en la cámara térmica. Se establece un análisis a una frecuencia y amplitud determinados y seleccionando el intervalo de temperatura en función del tipo de material a analizar. El analizador aplica un esfuerzo oscilatorio a la muestra de prueba mientras se aplica una rampa lineal ascendente dentro del intervalo de temperatura especificado, por ejemplo, es común utilizar entre 1 y 5 °C/minuto para analizar la mayoría de los plásticos.

Relaciones entre G' , G'' y $\tan\delta$. En DMA, se obtiene el módulo complejo G^* , el cual es la respuesta compleja del material a un esfuerzo oscilatorio aplicado y es, en términos simplistas, la suma vectorial de los componentes de almacenamiento (elástico) G' y componente de pérdida (viscoso) G'' (5).

La tangente de pérdida o $\tan\delta$ se considera que es un factor de amortiguamiento siendo la relación entre la componente viscosa o de pérdida (G'') y la componente elástica o de almacenamiento (G'). Se considera que este factor es un indicador de la eficiencia con la que un material pierde energía en los reordenamientos moleculares y la fricción interna. La observación de picos de $\tan\delta$ por debajo de la temperatura de transición vítrea (T_g) de un material en un termograma DMA, a menudo se pueden utilizar para determinar la resistencia de un material al impacto.

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

3.1 MATERIALES

En este estudio se han seleccionado cuatro tipos de plásticos que se han usado para fabricar la autoparte (reposabrazos). Un copolímero de Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS), una olefina termoplástica (TPO+25GF) reforzada con fibra de vidrio al 25%, otra olefina termoplástica (TPO+20Talc) reforzada con talco al 20%, y un polipropileno (PP+20GF) reforzado con fibra de vidrio al 20%. Sus principales características se presentan en la Tabla 3.1. Se presenta el módulo de Young o elástico en una prueba de tensión uniaxial, el esfuerzo a la cedencia y a la ruptura también de una prueba de tensión uniaxial. Finalmente, también se reporta la resistencia al impacto tipo Charpy.

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas de los plásticos utilizados a 23 °C.

Material	Módulo de Young [MPa]	σ de tensión a la cedencia [MPa]	σ de tensión a la ruptura [MPa]	Impacto Charpy [KJ/m²]
ABS	2100	43.6	39.0	12.0
PP/20GF	4400	49.0	76.0	20.0
TPO/25GF	2750	42.0	10.2	18.0
TPO/20Talc	1770	18	13.5	52.0

Se consideraron estos 4 tipos de plástico dado que son de los más usados en la industria automotriz, estos comparten una buena relación costo-beneficio, para así, ser utilizados sin tener que pasar por toda la batería de validación del material necesaria para su uso en vehículos automotores para la región de Norte América y Centro América.

3.2 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL REPOSABRAZOS

El reposabrazos es producido por un proceso de moldeo por inyección, usando el plástico seleccionado para tal propósito tal como se presenta en la Figura 3.1. Entre los parámetros de diseño críticos se encuentra el espesor nominal de la pared definida en 2.5 mm(4).

El diseño del reposabrazos presenta reducciones graduales para la generación de iniciadores de falla hasta un mínimo de 1.8 mm de espesor en la pared nominal para evitar marcas apreciables en la superficie visible para el usuario.

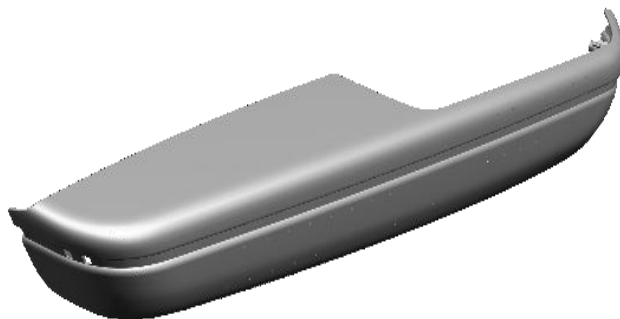


Figura 3.1. Reposabrazos modelado en software de diseño.

Las dimensiones para el reposabrazos son: X: 717.05 mm, Y: 197.5 mm y Z: 100 mm, donde X es la longitud, Y es la altura y Z es el ancho, respectivamente.

Localización de los iniciadores de falla. Los iniciadores de falla se localizaron en la pared lateral para así controlar el colapso del plástico, de tal forma que, al impacto contra el ocupante éste primero se doble con un comportamiento de mecánica de fractura dúctil, evitando la fractura frágil del plástico ya que astillas o pedacería punzocortante generada podría pinchar la bolsa de aire tipo cortina y no permitiría su despliegue correcto, lo cual genera mayor riesgo de dañar al ocupante tanto por fractura no deseada del plástico como por impedir el desarrollo correcto de la bolsa de aire. Al doblarse el reposabrazos reducirá la fuerza reacción en el ocupante, tal como se muestra en la Figura 3.2.

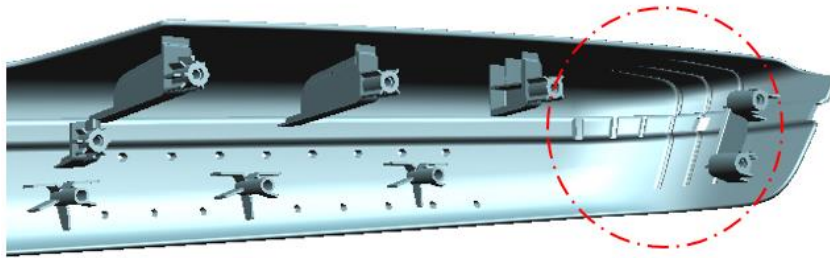


Figura 3.2. Localización de los iniciadores de falla.

Diseño del iniciador de falla. En la Figura 3.3 se muestra el primer diseño del iniciador de falla consiste colocarlo en la zona de impacto del ocupante o maniquí de prueba, este diseño consiste mantener la pared nominal de 2.5 mm y reduciendo la pared nominal en la zona del iniciador de falla hasta 1.8 mm, la transición está conformada de dos radios cóncavos, el primero de 0.5 mm y el segundo de 1.0 mm generando bordes filosos y concentración de esfuerzos durante la inyección del componente. para ayudar con el flujo del plástico, manteniendo el criterio mínimo de 1.8 mm para la reducción de espesor, para así, evitar marcas visibles.

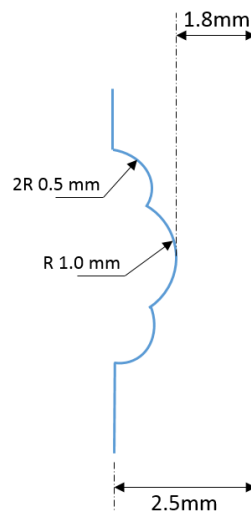


Figura 3.3. Sección de Ingeniería primer diseño no satisfactorio.

Problemática: El diseño anterior en la Figura 3.3, no fue satisfactorio ya que no cumplió con el desplazamiento mínimo fijado en 30 mm de acuerdo con la normativa FVSS214.

Propuesta a validar: La propuesta es establecer iniciadores de falla para mejorar desempeño de la autoparte usando diferentes tipos de plástico, tal como se observa en la Figura 3.4 donde se mantiene espesor máximo en 2.5 mm y como mínimo espesor en los iniciadores de falla tienen un espesor mínimo de 1.8 mm por efectos de manufactura; Estos iniciadores contienen una zona de transición para mejorar el flujo del plástico durante el proceso de inyección, los radios mínimos son 0.5 mm convexos para evitar bordes afilados y a su vez generan concentración de esfuerzos.

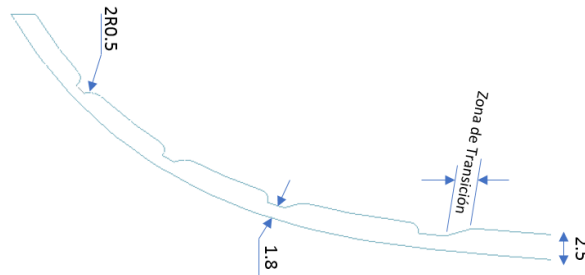


Figura 3.4. Diseño propuesto del iniciador de falla

3.3 EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADOS.

Inyectora hidráulica. Se utilizó una inyectora hidráulica UBE de 1800 ton de cierre para moldear el reposabrazos del auto y una inyectora hidráulica Sumitomo-Demag de 100 ton de cierre para moldear los especímenes de prueba para el análisis dinámico mecánico (DMA).

Determinación de propiedades dinámico-mecánicas por DMA. Para la realización del DMA se utilizó un equipo TA-Instruments modelo Q800 bajo la configuración de una mordaza de voladizo simple. Las Condiciones de prueba utilizadas son: amplitud de onda de 3 μm y una frecuencia fija de 10 Hz. El intervalo de temperatura utilizado para todos los plásticos analizados es de -90 °C a 180 °C a una rampa lineal de temperatura de 3 °C/min. El espécimen de prueba moldeado tiene las dimensiones de 17.5 mm, 10.4 mm y 4.0 mm, de largo, ancho y espesor, respectivamente.

Software para plano de ingeniería y definición de geometría del reposabrazos. Se utilizó el Solid Works™ 2016 para realizar la digitalización del diseño del reposabrazos y para establecer la geometría del mismo colocando los iniciadores de falla propuestos.

Software para análisis de elemento finito. Para este estudio se utilizó el software ANSYS 18® en su módulo Workbench® a través del submódulo de Análisis Estructural con la finalidad de realizar el análisis de elemento finito del reposabrazos.

3.4 PRUEBA DE CHOQUE CON IMPACTO LATERAL

La prueba de impacto lateral se realizó bajo las especificaciones de la norma FMVSS214 donde la masa de la barrera es de 1,368 Kg, la cual tiene una velocidad de 55.0 Km/h para lograr una fuerza de choque de 4.180 KN y logra un desplazamiento mínimo de 30 mm.

En la Figura 3.5, se muestra la localización de impacto lateral de acuerdo a la normatividad antes mencionada.

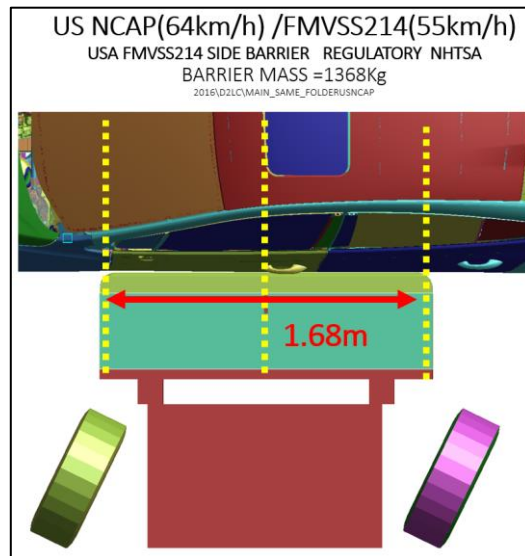


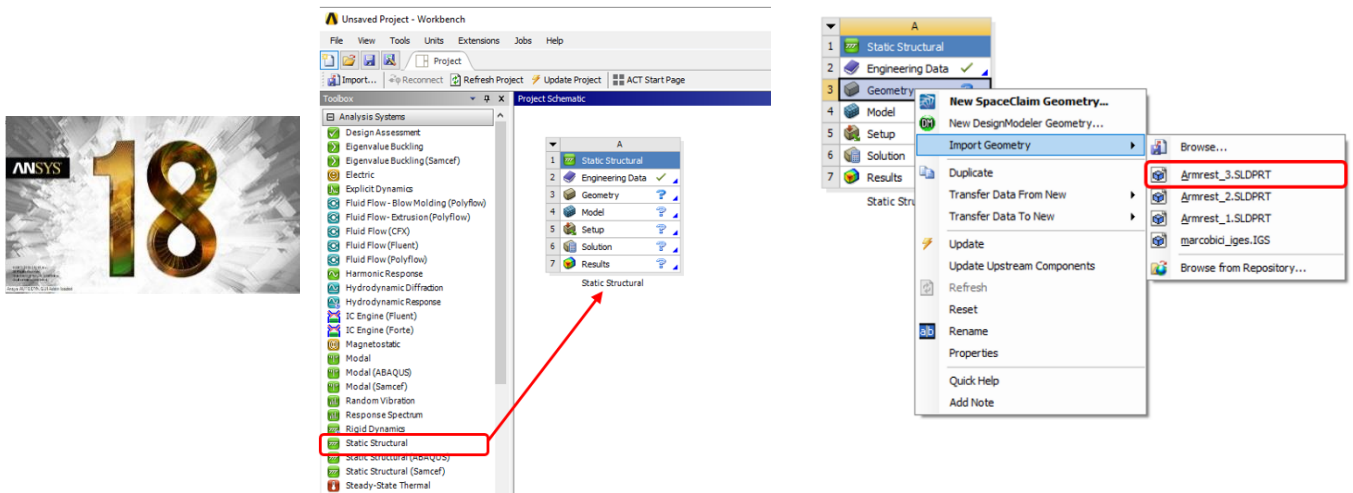
Figura 3.5. Localización del impacto lateral en un vehículo.

3.5 MÉTODO DE ANÁLISIS POR ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO

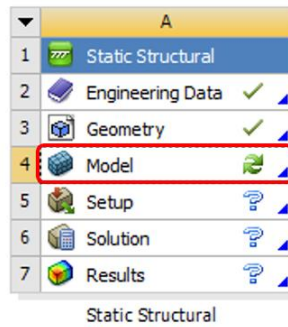
Se usó el software ANSYS 18™ para realizar el análisis de elemento finito dado que no consume grandes recursos computacionales y contiene submódulos funcionales con los cuales es posible utilizar distintos tipos de archivos de datos matemáticos. A continuación, se describe el método de simulación y análisis para el impacto lateral.

Paso 1: Se define la geometría del reposabrazos. La autoparte denominada como reposabrazos se estableció en un plano de ingeniería utilizando el software Solid Works™ 2016 como punto de partida para tener la geometría del reposabrazos en forma digital y poder utilizar posteriormente un modelo matemático de simulación. En la geometría se establecieron las medidas y forma de la autoparte, así como se indicaron los iniciadores de falla propuestos.

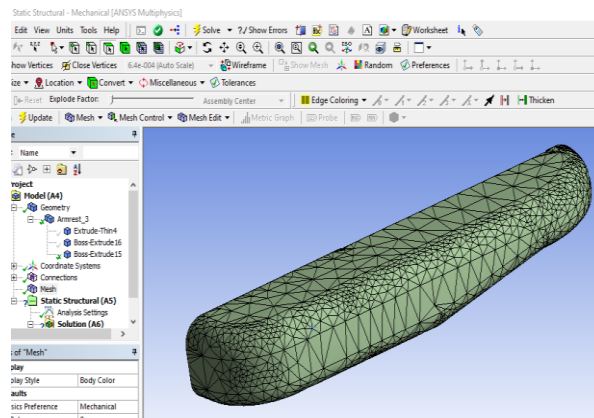
Paso 2: Se usa el software ANSYS Workbench 18™. Este software fue utilizado para realizar la simulación de análisis de elemento finito en el diseño del reposabrazos seleccionado. Se selecciona el submódulo de análisis estructural y se carga el archivo de datos matemáticos establecido en el paso 1 mediante Solid Works™ 2016 (9).



Paso 3: Se indica la subrutina a utilizar. En este caso seleccionar modelo para realizar la simulación en ANSYS.



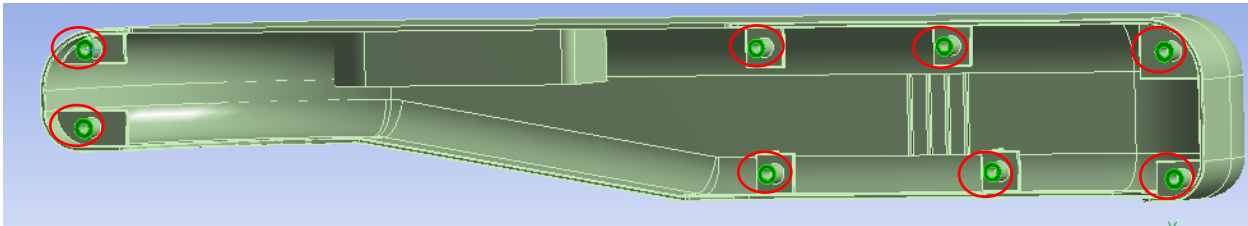
Paso 4: Se define el tipo de malla en el reposabrazos. Seleccionar malla fina adaptativa para mejorar la precisión en formas complejas.



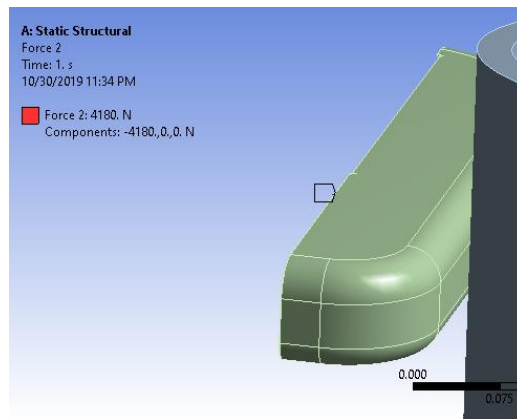
Paso 5: Se ingresan los datos de propiedades de los plásticos. Se indican las propiedades mecánicas y viscoelásticas de los plásticos seleccionados.

Properties of Outline Row 4: PP/20GF					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density		kg m ⁻³		
4	Orthotropic Instantaneous Coefficient of Thermal Expansion				
8	Isotropic Elasticity				
9	Derive from	Young's...			
10	Young's Modulus		Pa		
11	Poisson's Ratio				
12	Bulk Modulus		Pa		
13	Shear Modulus		Pa		
14	Prony Shear Relaxation	Tabular			

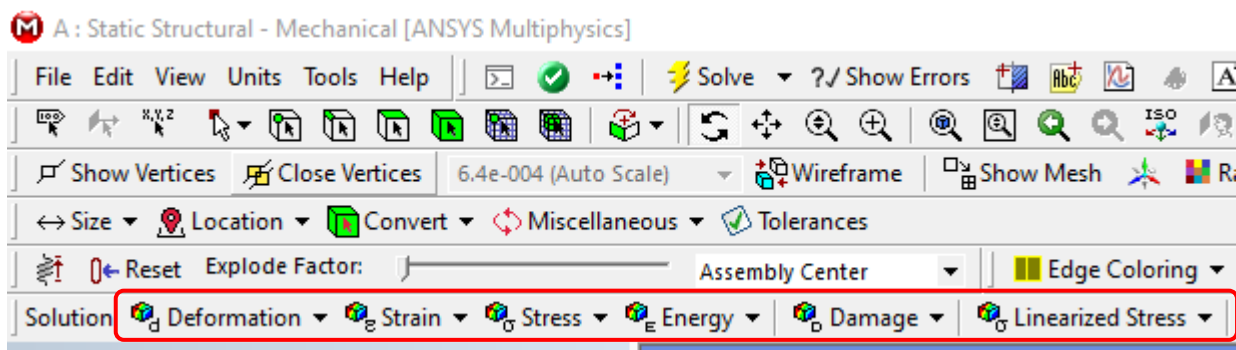
Paso 6: Se definen los puntos de fijación o de apoyos. Como se ve a continuación se establece en el reposabrazos puntos de apoyos requeridos para sujetar el reposabrazos contra el resto del panel plástico.



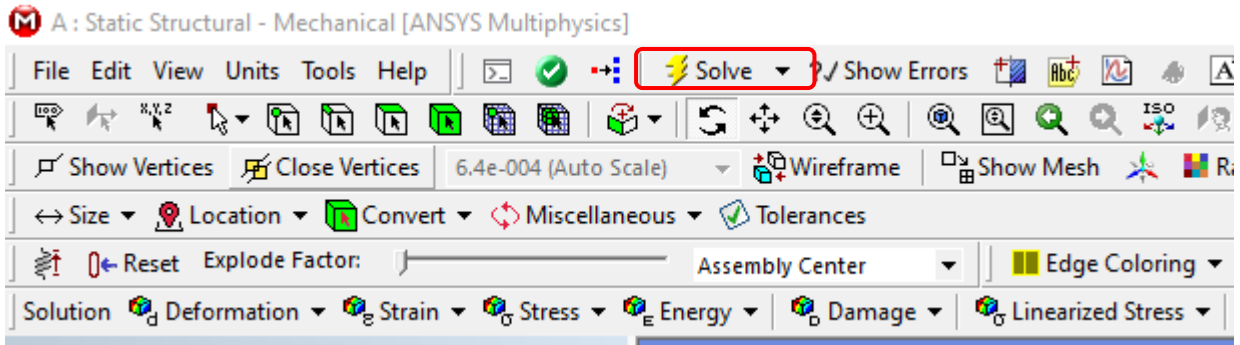
Paso 7: Se indica la fuerza a aplicar, la cual se calculó previamente.



Paso 8: Se seleccionan los resultados deseados, tales como: el desplazamiento total y el esfuerzo total.



Paso 9: Se inicia las iteraciones de solución para tener la respuesta de impacto lateral.



Determinación de la fuerza del impacto lateral a una velocidad y masa constantes.

Tomando en cuenta las ecuaciones 6 y 7 de velocidad y aceleración definidas por la mecánica donde la primer derivada de la velocidad es la aceleración(3), se tiene:

$$V' = dV/dt \quad [6]$$

$$a = (V_f - V_i) / (t_f - t_i) \quad [7]$$

Se conoce que la velocidad inicial es 0 Km/h al tiempo 0.0 s y la velocidad final es 55 km/h al tiempo final de 5.0 s. Por lo tanto, la aceleración es:

$$a = (15.28 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}) / (5\text{s} - 0\text{s})$$

$$a = 3.056 \text{ m/s}^2$$

Conociendo la aceleración correspondiente, es posible calcular la fuerza de impacto lateral:

$$F = (1368 \text{ Kg}) * (3.056 \text{ m/s}^2)$$

$$F = 4,180.61 \text{ Kg} * \text{m/s}^2$$

3.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS PROPUESTO

Se utilizó un diseño de experimentos con arreglo ortogonal para considerar todas las situaciones de carga. El planteamiento de este diseño se presenta en la Tabla 3.2, donde se consideran tres niveles de ruido (Ni), cuatro tipos de plásticos y tres niveles de espesor del reposabrazos.

Este método considera todas las posibles combinaciones y las temperaturas (ruidos) ya que en una situación normal la temperatura exterior no es algo controlable por el usuario dada la ubicación geográfica o la hora del día, el componente automotriz estará sometido a diferentes temperaturas a lo largo del día, semana o año.

Tabla 3.2. Designación de factores de simulación

RUIDOS		A		B	
		Tipo de Plástico		Espesor	
N1	-30.0 °C	1	ABS	1	1.8
N2	+ 23.0 °C	2	PP/20GF	2	2.0
N3	+ 80.0°C	3	TPO/25GF	3	2.3
		4	TPO/20Talc		

A continuación, se presenta en un modelo con 2 variables de control y 1 de ruido, el modelo está estructurado de acuerdo con las características especificadas en la metodología de Taguchi y fue propuesto para realizar esta experimentación.

Los pasos para el planteamiento de este ejemplo se describen a continuación:

- Paso 1. Se seleccionó un modelo que contenía 3 variables, 2 de control (A, B) y 1 de ruido (N1, N2 Y N3).
- Paso 2. Se determinaron las interacciones de control determinada por el total de combinaciones posibles entre los diferentes tipos de materiales (A) y los espesores del plástico (B). tal como lo muestra la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Variables y combinaciones del diseño de experimentos.

	A	B	<u>N1</u>	<u>N2</u>	<u>N3</u>	S/N	Beta
1	1	1	-	-	-		
2	1	2					
3	1	3					
4	2	1					
5	2	2					
6	2	3					
7	3	1					
8	3	2					
9	3	3					
10	4	1					
11	4	2					
12	4	3					

- Paso 3. Se simularon todos los escenarios sin declarar escenarios significativos ya que no existen características de calidad o apariencia que determinen esta distinción.
- Paso 4. Se procede al análisis y esta vez analizamos sí se detectaron diferencias significativas entre los resultados proporcionados por la simulación en ANSYS.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

4.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS DINÁMICO MECÁNICO (DMA)

Para determinar las propiedades viscoelásticas lineales de los plásticos seleccionados. Se realizó el análisis en el intervalo de temperaturas de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bajo condiciones controladas de amplitud y frecuencia dadas. Los resultados para cada plástico utilizado se resumen a continuación y en forma gráfica se presentan en las Figuras 4.1 a 4.5.

4.1.1 Copolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) (Figura 4.1). Se determinó que este plástico de naturaleza amorfa tiene un módulo elástico vítreo (G_g) de 1905 MPa , la temperatura de transición vítrea (T_g) de la parte butadiénica se localizó a $-85.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ tomada en el pico de $\tan\delta$ cuyo valor es de 0.0947 . A $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, el módulo elástico G' es de 1393 MPa y la $\tan\delta$ es de 0.0161 . Las T_g de la parte acrilonitrilo-estireno se traslapan por estar cercanas y se observa solo un pico a $122.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ medida por el pico de $\tan\delta$ cuyo valor es de 1.769 .

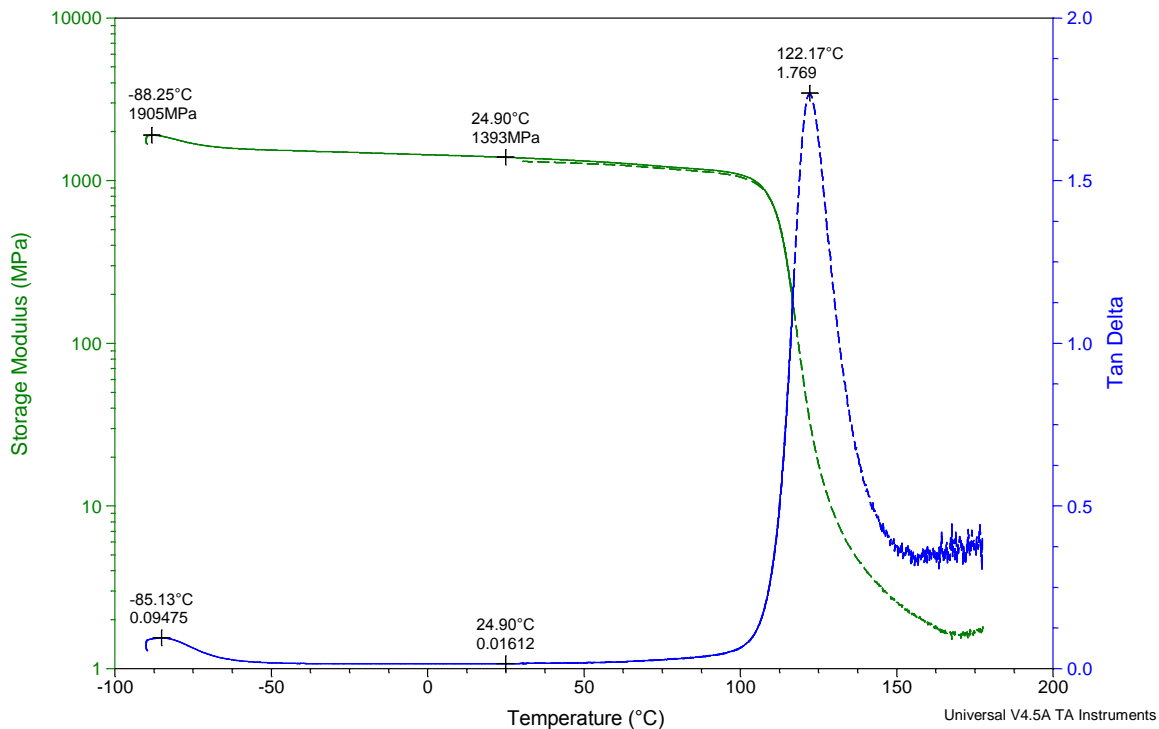


Figura 4.1 Termograma DMA para el ABS.

4.1.2 Propiedades viscoelásticas del PP/20GF (Figura 4.2).

Este plástico de naturaleza semicristalina presenta un G_g de 3738 MPa. Se encontró una T_g a -40.3°C tomada en el pico de $\tan\delta$ cuyo valor es de 0.022, una segunda Transición a 19.8°C que pudiera ser efecto de la interacción con la fibra de vidrio medida también en un máximo de $\tan\delta$. A 25°C , el G' es de 2695 MPa y la $\tan\delta$ es de 0.0369. La T_m de este material se localiza a 181.2°C con un G' a esa temperatura de 5.088 MPa.

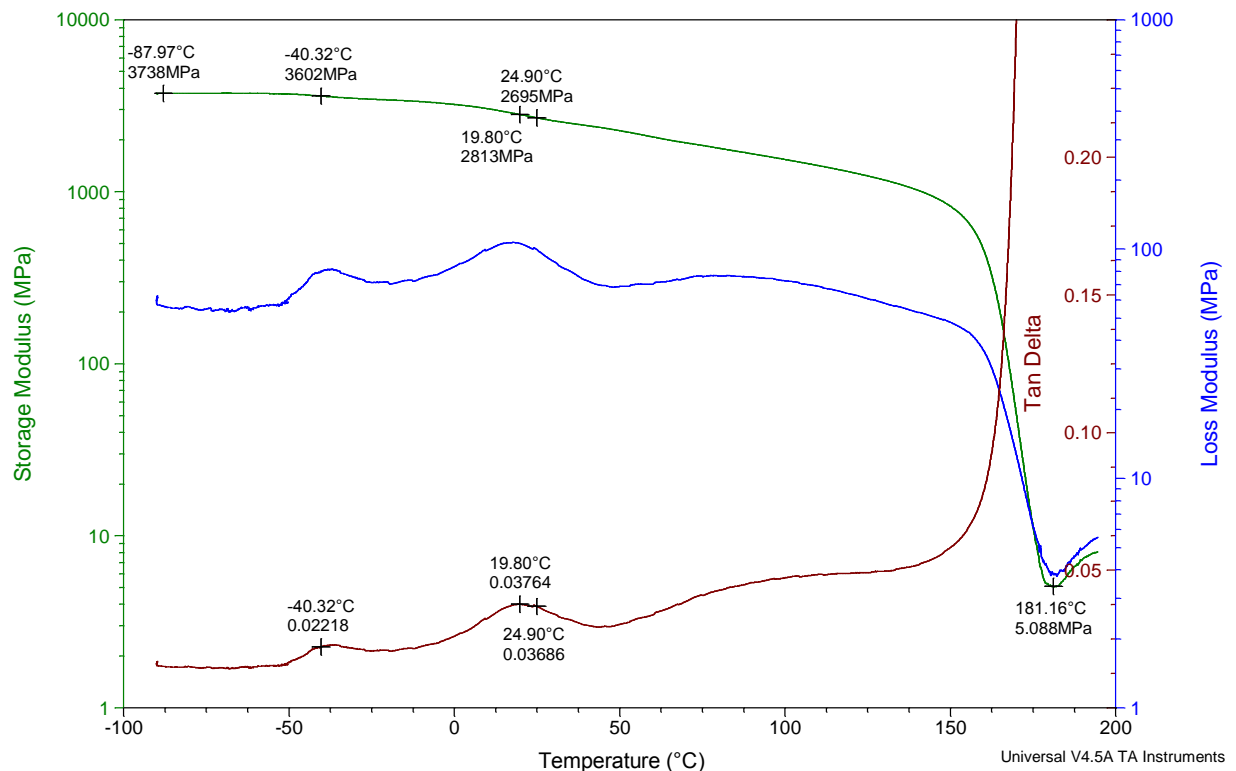


Figura 4.2. Termograma DMA para el PP/20GF.

4.1.3 Propiedades viscoelásticas del TPO (TPO/25GF) (Figura 4.3).

Este plástico de naturaleza semicristalina presenta un G_g es de 3706 MPa. Se encontró solo una T_g a 4.77°C tomada en el pico de $\tan\delta$ cuyo valor es de 0.060 y con un G' a esa temperatura de 2209 MPa. A 25°C , el G' es de 1674 MPa y la $\tan\delta$ es de 0.047. La T_m se localiza a 163.3°C con G' a esa temperatura de 3.769 MPa.

Sample: TPO 2
Size: 17.5000 x 10.1993 x 4.1930 mm
Method: Temperature Ramp

DMA

File: C:\...\Jorge I Barrera_2019\DMAs\TPO
Operator: CHN/LRM
Run Date: 10-Sep-2019 10:31
Instrument: DMA Q800 V20.26 Build 45

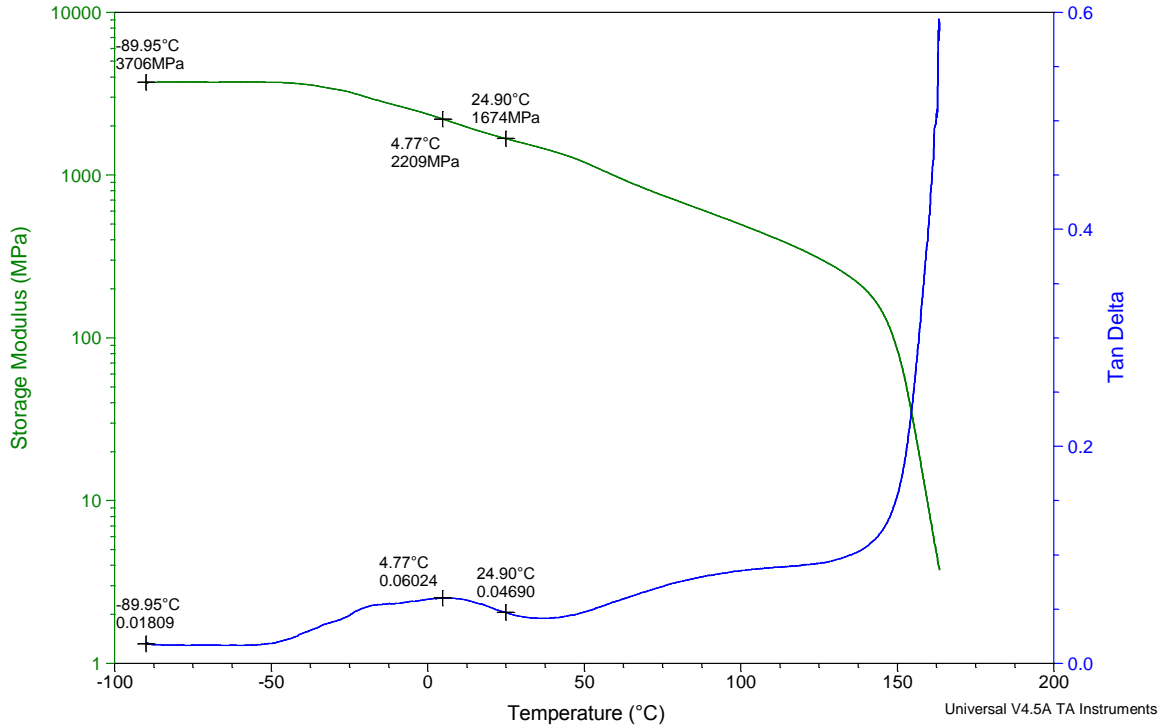


Figura 4.3 Termograma DMA para el TPO/25GF

4.1.4 Propiedades viscoelásticas del TPO/20 Talc. (Figura 4.4)

Este plástico de naturaleza semicristalina presenta un G_g de 2736 MPa. Se encontró una T_g a $-38\text{ }^\circ\text{C}$ tomada en el pico de $\tan\delta$ cuyo valor es de 0.053 y con un G' a esa temperatura de 2322 MPa. Se localizó una segunda transición a $20.6\text{ }^\circ\text{C}$ que pudiera ser efecto de la interacción con el talco medida también en un máximo de $\tan\delta$. A $25\text{ }^\circ\text{C}$, el G' es de 1498 MPa y la $\tan\delta$ es de 0.050. La T_m del plástico se localiza a $173.5\text{ }^\circ\text{C}$ con G' a esa temperatura de 0.688 MPa.

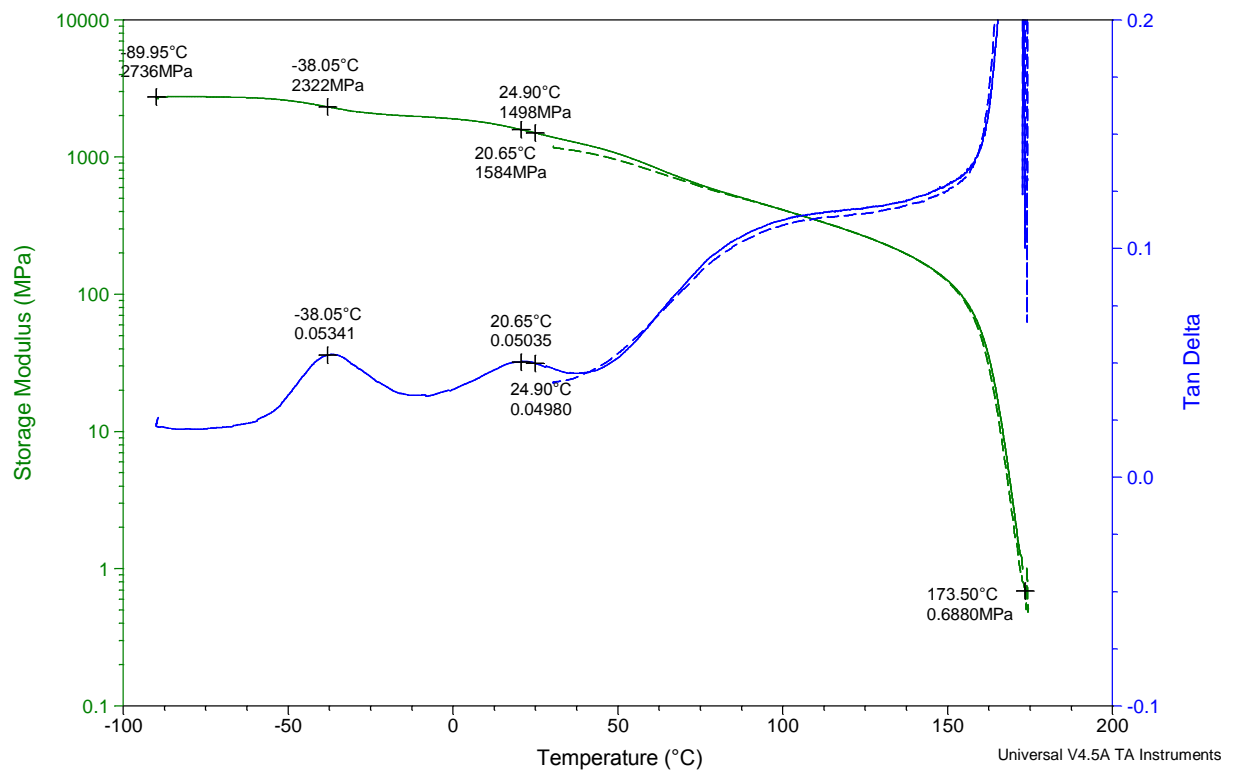


Figura 4.4 Termograma DMA para el TPO/20Talc.

En la Figura 4.5 se presenta en forma comparativa en el intervalo de temperatura analizado todos los plásticos caracterizados por DMA. Así, se ve que el **ABS** tiene menor intervalo de aplicación que los demás materiales (<100 °C), pero presenta menor sensibilidad a cambios de temperatura en el intervalo de -30 °C a 80 °C. **PP/20GF** es el material más rígido dado que sus valores de módulo son más altos en el intervalo de temperatura de aplicación.

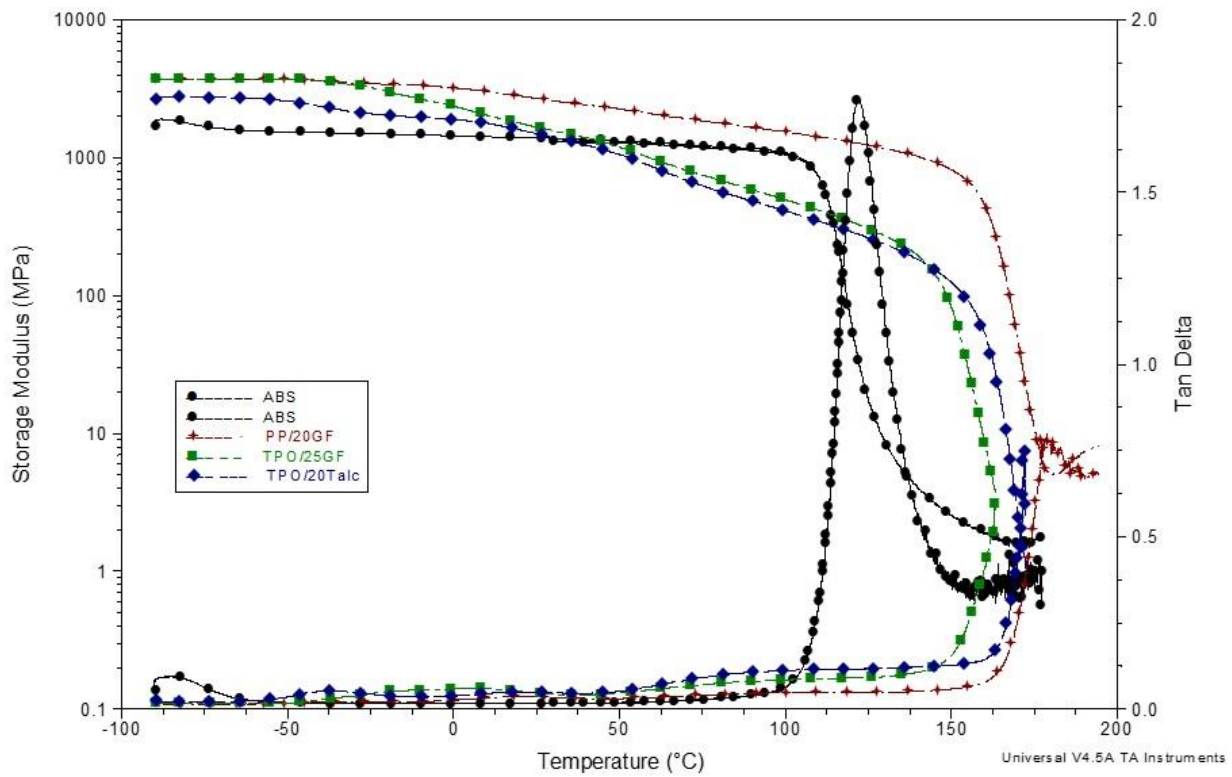


Figura 4.5. Gráfica de resultados de las pruebas DMA para los 4 materiales.

La Figura 4.6 muestra el comportamiento viscoelástico de los plásticos analizados en el intervalo de temperatura de aplicación de la autoparte. Se ve que el **ABS** no es sensible a la temperatura en este intervalo, pero tiene el menor G' de -30 °C a $+30\text{ °C}$. Así también, el PP/20GF tiene el mayor G' en todo el intervalo de aplicación. Por otra parte, la $\tan\delta$ del PP y de los TPO sugiere que pudieran tener mayor sensibilidad a la temperatura en el intervalo de aplicación. Sin embargo, la influencia de la componente elástica domina sobre la componente viscosa dado que la $\tan\delta$ oscila entre 0.02 y 0.06.

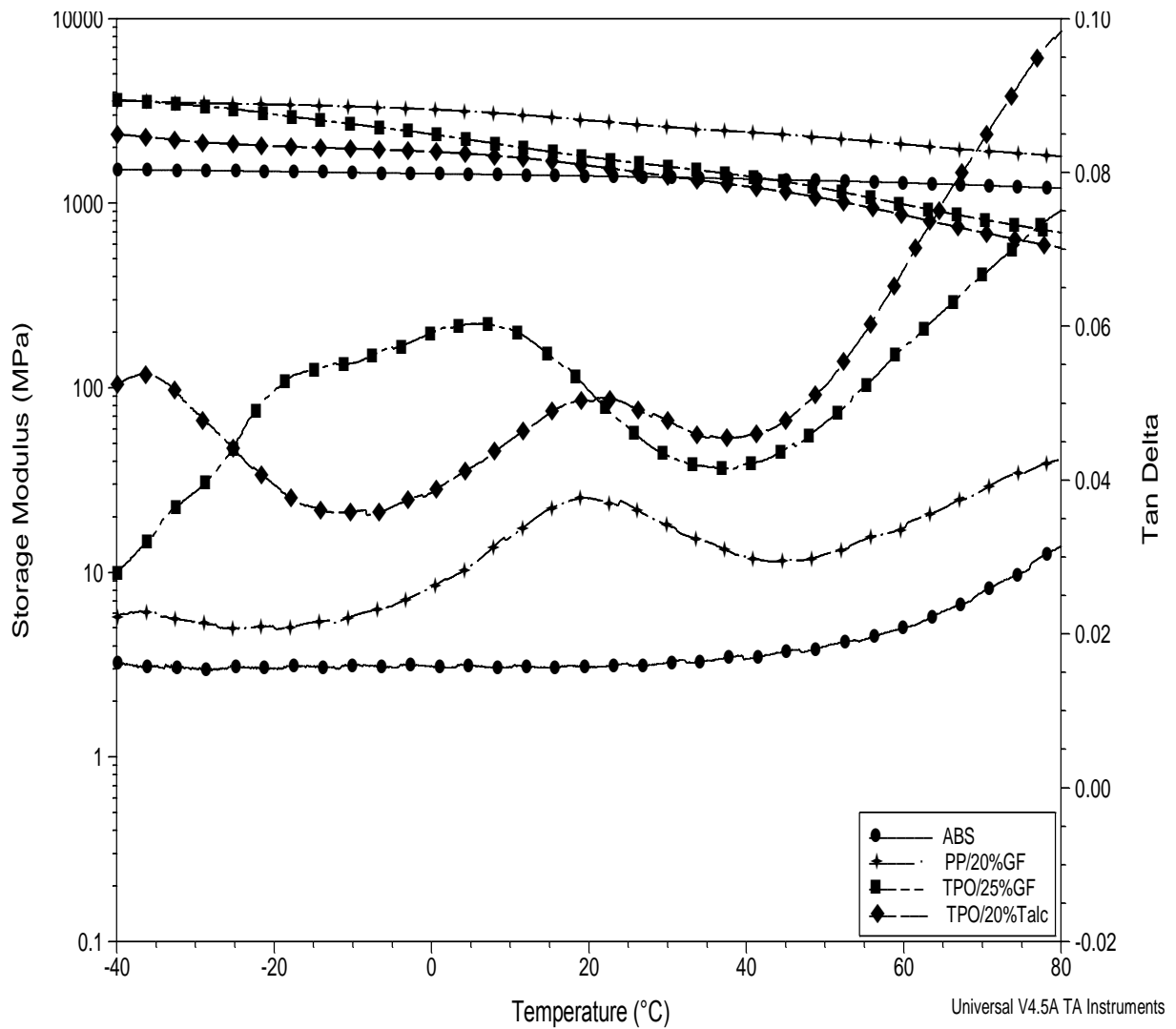


Figura 4.6. Grafica de resultados DMA en el rango de aplicación de -30 a 80°C.

4.2 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE IMPACTO LATERAL

La Simulación de análisis de elemento finito del diseño del reposabrazos considerando los iniciadores de falla y usando software ANSYS dio como resultado que el plástico se colapsa sin observar fracturas tipo frágil. Este resultado es el esperado y adecuado para la protección del ocupante ya que una fractura frágil es perjudicial al proceso de inflado de la bolsa de aire, la cual debe completar su proceso de inflado hasta máximo 35 milisegundos.

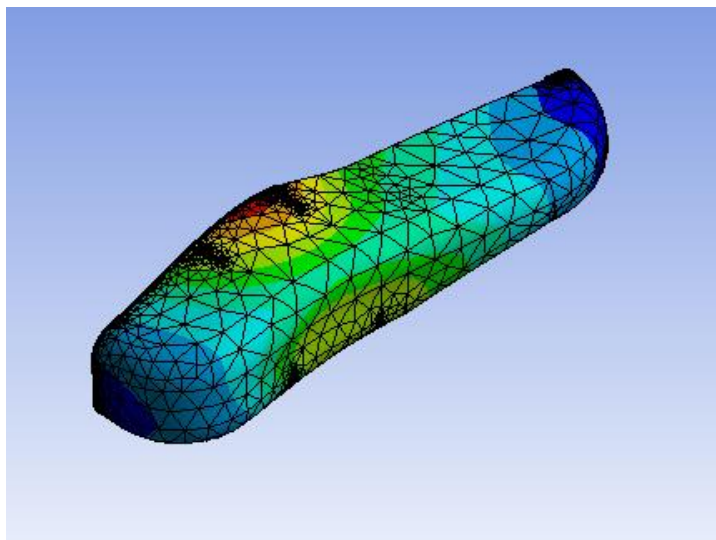
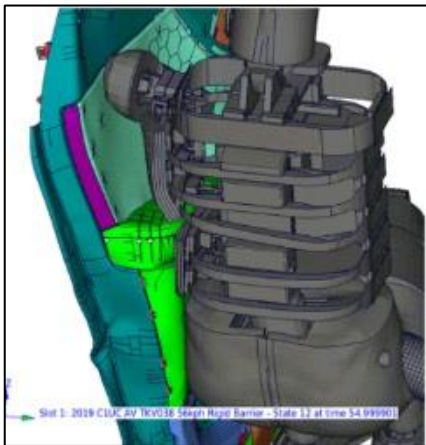
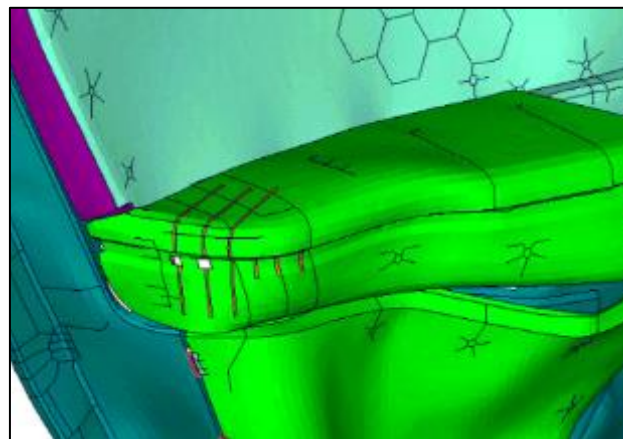


Figura 4.7. Ejemplo de representación de la deformación obtenida del análisis de elemento finito (F.E.A.) realizado al plástico ABS.

La Figura 4.8 presenta el resultado del reposabrazos después de aplicar el impacto lateral. Se ve en la Figura 4.8a la forma simulada en la que un ocupante podría impactar en el reposabrazos y el desplazamiento resultante de dicho impacto (Figura 4.8b).



(a)



(b)

Figura 4.8. Impacto del dummy en la superficie de estudio. (a) dummy al 50% y (b) Resultado después del impacto. Pieza colapsada.

En la Tabla 4.1 se presenta los resultados de la simulación de análisis de elemento finito considerando el diseño experimental en arreglo ortogonal propuesto en la Tabla 3.2, donde A es el tipo de plástico, B es el espesor de los iniciadores de falla, N es la temperatura analizada como ruido y S/N es (signal to noise) o la robustez del experimento.

Tabla 4.1. Resultados diseño de experimentos en análisis de elemento finito.

	A	B	N1	N2	N3	S/N	Mean
1	1	1	30.8	32.1	33.9	-30.2	32.3
2	1	2	31.0	33.0	33.5	-30.2	32.5
3	1	3	29.5	30.0	31.0	-29.6	30.2
4	2	1	33.5	36.0	37.5	-31.1	35.7
5	2	2	32.0	35.4	36.3	-30.8	34.6
6	2	3	33.5	34.7	36.0	-30.8	34.7
8	3	1	32.5	33.4	35.4	-30.6	33.8
9	3	2	31.2	32.6	34.9	-30.4	32.9
10	3	3	30.7	33.1	33.6	-30.2	32.5
12	4	1	33.0	34.0	35.0	-30.6	34.0
13	4	2	31.0	33.4	34.9	-30.4	33.1
14	4	3	32.4	33.1	34.0	-30.4	33.2

El resultado del diseño de experimentos para el impacto lateral de acuerdo con la normatividad FMVSS214 se muestra en la Tabla 4.2. El mejor resultado del diseño de experimentos se logra en el experimento 4 en todas las temperaturas analizadas para la combinación A2 = PP/20GF y B1 = 1.8 mm de espesor nominal ya que presentó el mejor resultado de robustez (S/N) y el mayor desplazamiento durante el impacto lateral.

Tabla 4.2 Comparativo del impacto lateral para el arreglo A2-B1 vs Normatividad FMVSS214.

Prueba de barrera con Descansabrazos Modificado 1				
Ocupante Frontal	Unidades	Lim Inferior	Lim Superior	F.E.A.
Deflexión promedio de costilla.	[mm]	30	40	35.7
Máxima Deflexión de costilla.	[mm]		40	38.1
Máximo rango Deflexión de la costilla.	[m/s]		8.2	3.6
Máxima Deflexión del hombro.	[mm]		60	27.5

En la Tabla 4.2 se muestra la comparativa contra la norma FMVSS214, haciendo referencia al límite inferior y límite superior (30 y 40 mm) respectivamente, así mismo los resultados del F.E.A. (Finite Element Analysis) por sus siglas en inglés, el parámetro principal a considerar en este trabajo es la deflexión promedio de la costilla ya que la deflexión de hombro no es afectada por el componente de estudio (reposabrazos).

4.3 CORRELACIÓN DE PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS Y SIMULACIÓN DE IMPACTO LATERAL

El resultado del desplazamiento del reposabrazos en función de la temperatura de prueba tiene un comportamiento lineal para todos los plásticos utilizados, tal como se ve en la Figura 4.9. Se observa que el desplazamiento se incrementa con el aumento en la Temperatura.

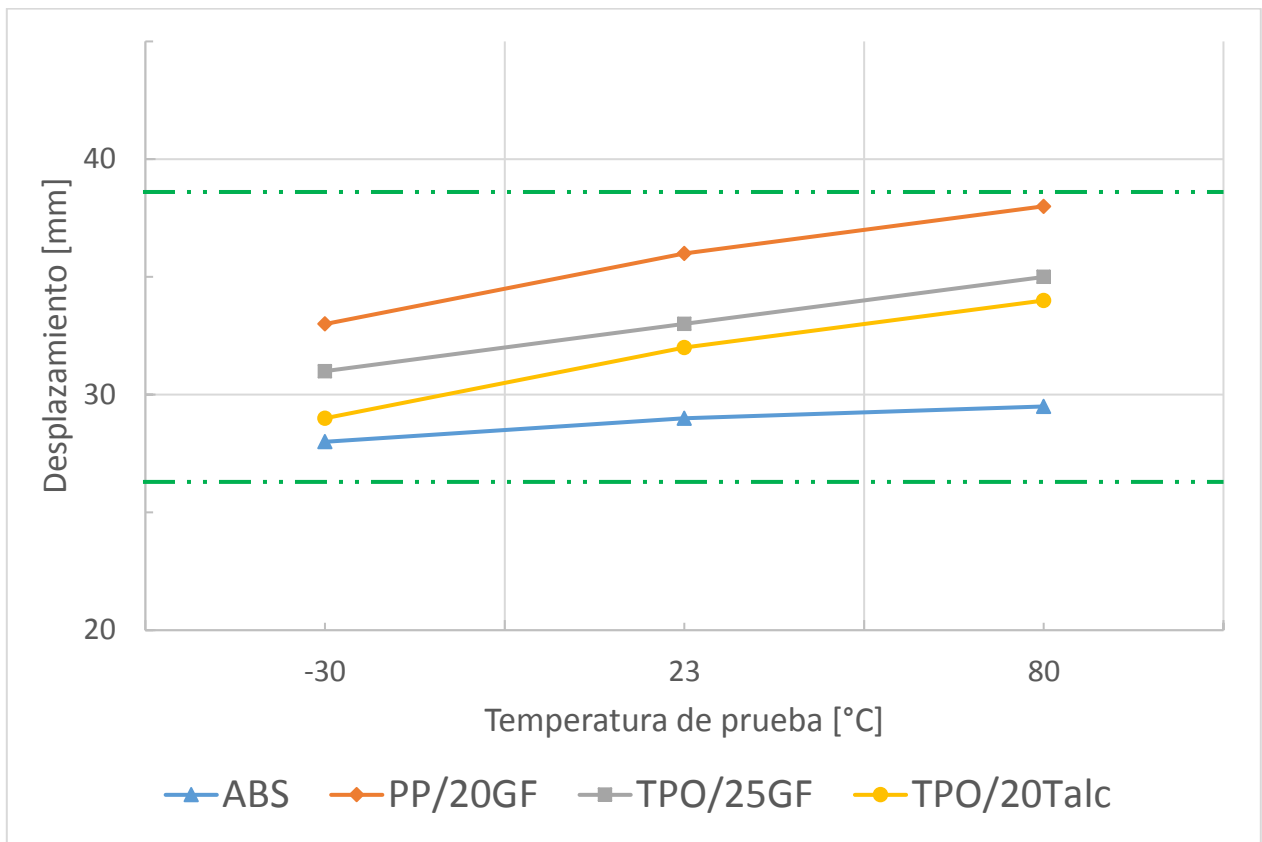


Figura 4.9. Correlación entre el desplazamiento y la temperatura de prueba.

Se encontró como correlación que el desplazamiento en función del G' de manera general es lineal y se denota en la Figura 4.10 como agrupaciones (óvalos) donde el desplazamiento disminuye con el incremento de G' , es decir, un material con componente elástica mayor podría disminuir dicho desplazamiento en el intervalo de prueba investigado. Se observa también que, para el plástico amorfo (ABS) el intervalo de G' es pequeño dado que este módulo es prácticamente independiente de la temperatura y el agrupamiento de resultados es compacto como se observa en la Figura 4.10 como el óvalo o agrupamiento más pequeño, a diferencia de los plásticos semicristalinos donde el intervalo de G' se amplía por la propia naturaleza de los plásticos seleccionados, dando agrupaciones menos compactas.

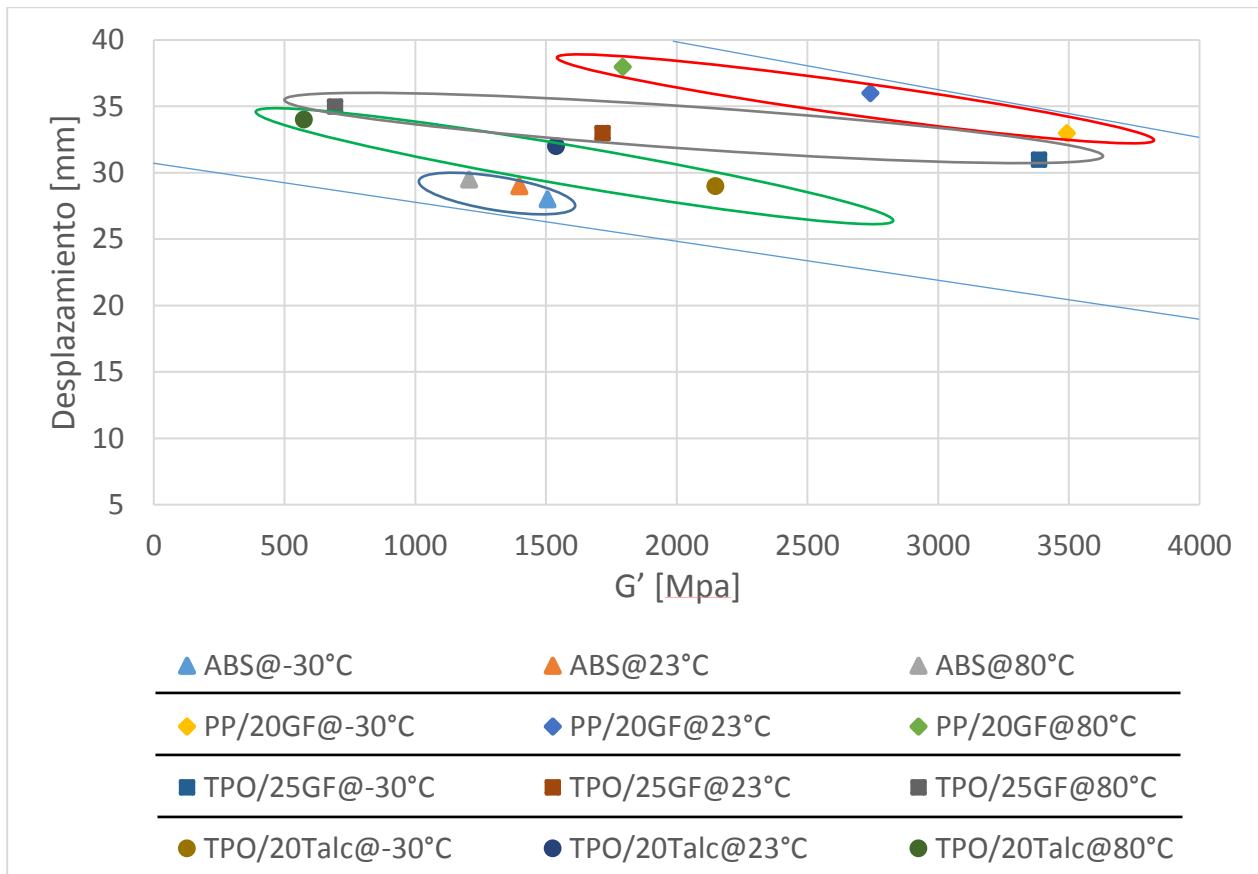


Figura 4.10. Correlación entre el desplazamiento y G'

De acuerdo con los resultados de impacto lateral y de DMA, en la Figura 4.11 se presenta la correlación encontrada del desplazamiento del reposabrazos después del impacto en función de la $\tan\delta$. Se observa entonces que dicho desplazamiento aumenta con el incremento en la $\tan\delta$ dado que, como se sabe, la tangente de pérdida está asociada directamente al módulo viscoso (G'') o de disipación de calor. Por lo tanto, al aumentar la $\tan\delta$ el material tiende a ser más dúctil y menos rígido permitiendo, así, una mayor deformación del material propiciado entonces un mayor desplazamiento al aplicar la fuerza de impacto lateral. Similar al análisis de G' , la naturaleza del plástico juega un papel importante dado que el plástico amorfo (ABS) es el que presenta menos dependencia de la $\tan\delta$ (grupo de rombos) a diferencia de los plásticos semicristalinos reforzados con fibra de vidrio o talco, generando también una agrupación de puntos experimentales compacta en comparación con el resto de los plásticos probados.

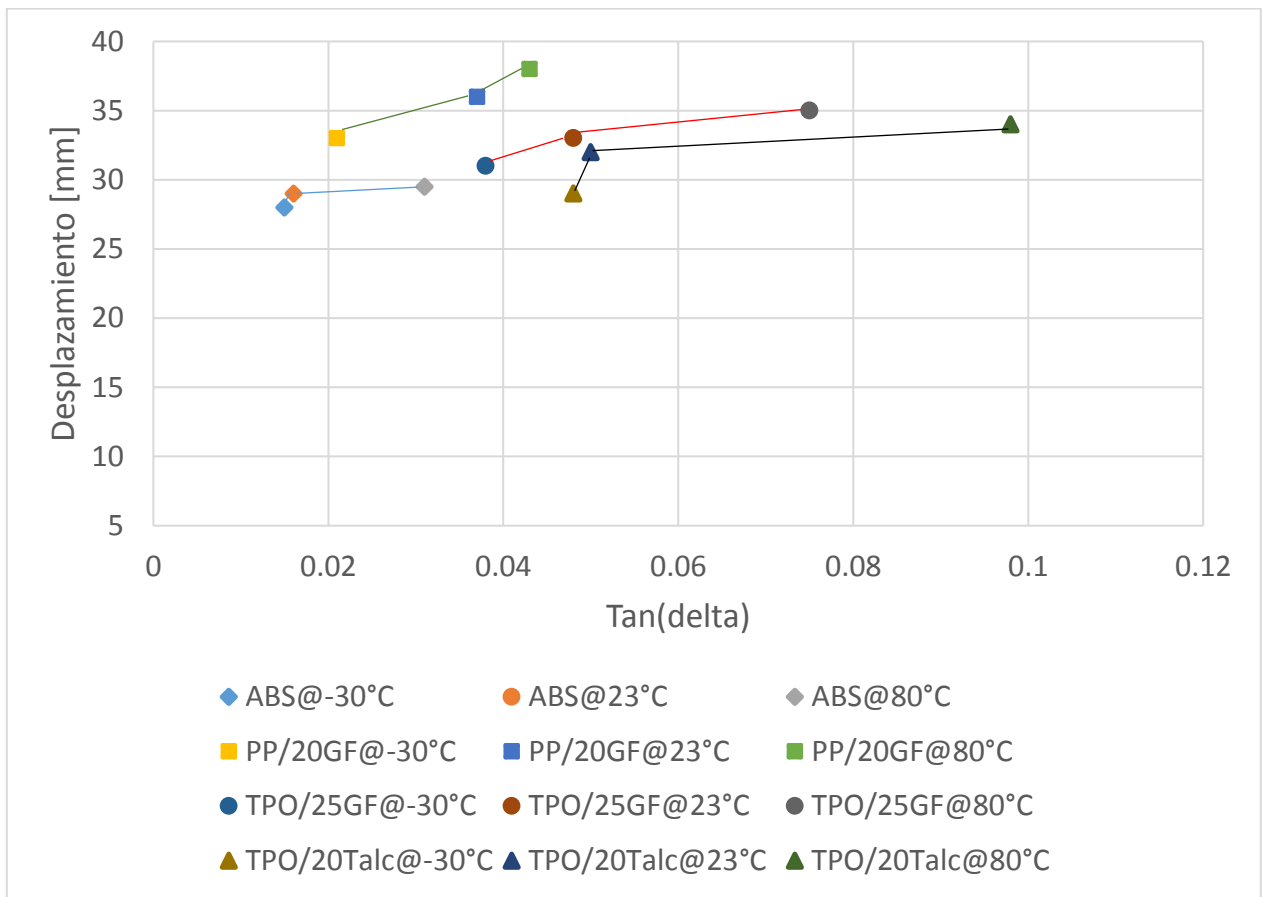


Figura 4.11. Correlación entre el desplazamiento y la $\tan\delta$.

CONCLUSIONES

En el intervalo de temperatura investigado se encontró que, para todos los plásticos utilizados, se presenta una correlación lineal del desplazamiento en función de la temperatura y del módulo elástico (G').

Para el plástico amorfo ABS, que presenta baja sensibilidad a la temperatura en el intervalo de aplicación se obtuvo una agrupación pequeña tanto del desplazamiento en función de G' como del mismo desplazamiento en función de $\tan\delta$.

Para el plástico semicristalino con carga (PP/20GF) y para los materiales compuestos con carga (TPO/carga: GF o talco) las agrupaciones de desplazamientos encontradas son más sensibles a cambios en el G' (correlación lineal con la temperatura de aplicación) y de $\tan\delta$ aun cuando el comportamiento dominante es mayormente elástico.

De acuerdo con la simulación la mejor combinación encontrada es con el plástico PP/20GF con un espesor nominal del iniciador de falla de 1.8 mm.

Definido el tipo de iniciador de falla por simulación en combinación con el tipo de plástico fue posible lograr que el reposabrazos mantenga la forma necesaria para su uso pero que en caso de impacto, éste colapse de forma transversal sin fractura frágil, mitigando así, el daño al ocupante del vehículo.

APORTACIÓN DE LA TESIS

Con esta tesis se mejoró el árbol de decisión en el procedimiento para tener mejores criterios en la selección de plásticos que pueden ser útiles para la construcción de autopartes. Se aportó una metodología donde se correlaciona el tipo de plástico seleccionado, sus propiedades viscoelásticas y la colocación de iniciadores de falla en un reposabrazos con el desempeño posible para mejor diseño de la autoparte como estrategia para mejorar la predicción del desempeño mecánico en una prueba de impacto lateral mitigando el daño al ocupante. Las pruebas de validación realizadas en el equipo de impacto lateral corroboran los datos de simulación CAE obtenidos, por lo que para la empresa GM este trabajo representa en el futuro un ahorro en el diseño de autopartes ya que al tener mejor procedimiento de analizar la información de simulación CAE y revisar propiedades viscoelásticas de los plásticos han permitido tener criterios de desempeño mecánico de la autoparte.

RECOMENDACIONES

Una vez realizado el estudio para los plásticos aquí presentados, recomiendo repetir el estudio para otros componentes de la puerta que tengan interacción directa con el ocupante durante el impacto del vehículo, así como el desarrollo de nuevos plásticos de ingeniería que durante el impacto se comporten de mejor forma, evitando fracturas frágiles y minimizando el daño al ocupante. Asimismo, el agregar otras variables que influyen en el comportamiento del colapso del reposabrazos, tal como el tipo de forrado en versiones semi de lujo y lujo dado que la piel o el vinil en contacto con el plástico mediante un adhesivo podrían modificar el desplazamiento, reduciéndolo y generando un mayor daño a las costillas del ocupante.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1. Cavanaugh JM, Waliko T, Walbridge A. 1994.** *An evaluation of TTI and ASA in SID side impact sled test. Proceedings of the 38th Stapp Car Crash.* New York : s.n., 1994. pp. 293-308. SAE 942225.
- 2. E., Arroyo, et al. 2013.** *Diseño y Construcción del bastidor y sistema de suspensión de un car-cross monoplaça para servicio turístico.* Santiago de Chile : s.n., 2013. pp. 1-50. 1390-7395.
- 3. F., Beer, R., Johnson and Cornwell, P. 2010.** *Mecánica Vectorial para Ingenieros.* México : Mc Graw Hill, 2010. pp. 825-831.
- 4. Garfias, J. 2018.** *INTDRTR-75, Door Trim Structural Integrity to Side Impact Design Guide Lines.* México, Noviembre 2018. Best Practice.
- 5.K, Menard. 2008.** *Dynamic Mechanical Analysis, A Practical Introduction.* Florida : CRC Press, 2008. pp. 20-68.
- 6. Kallieris, D. Mattern, R. Schmidt, G. Eppinger. 1981.** *Qualification of side impact responses and injuries.* San Francisco : R.H., 1981. pp. 1-104.
- 7. Kuppa, S., Eppinger, R., McKoy, F., Nguyen, T., Pintar, F., Yoganandan, N. 2003.** *Development of Side Impact Thoracic Injury Criteria and their Application to the Modified ES-2 Dummy with Rib Extensions (ES-2re).* New York : Stapp Car Crash Journal, 2003. pp. 189-210.
- 8. NHTSA. 1999.** *Norma FMVSS214. Side Impact Protection Dynamic Performance Requirement.* Ginebra, 1999. Norma Internacional.
- 9. Rubio, C. and Romero, V. 2011.** *Método del Elemento Finito, fundamento y aplicaciones con ANSY.* Mexico : Limusa, 2011. pp. 1-362.
- 10. S., Kuppa. 2004.** *Injury Criteria for Impact Dummies.* US : National Transportation Biomechanics Research Center, 2004. pp. 13-58.

ANEXOS.

Anexo A Tabla de pruebas, Impacto lateral de trineo en cadáveres conducida por el colegio médico de Wisconsin

runid	vestid	sex	age	mass	width	MAIS	rib1	rib2	dec_f	abd_f	pel_f	Hmax	Havg	HTmax	HTVC	Fmax	Favg	FTmax	FTVC	HTVeng	FTVeng	TTI	ASA	spu	rspu	rspl	th	pal				
SC101	PLF	M	73	89	330	4	7	15	5554	1925	3464	0.357	0.339	17.3	5.3	0.477	0.435	35.1	8.9	4.48	0.48	6.66	0.41	187	51	49	48	50	101	113		
SC102	PLF	M	27	72	318	0	0	0	6939	2795	8839	0.235	0.208	7.9	1.3	0.364	0.302	12.2	2.1	6.43	0.88	10.3	1.4	85	12	6	50	58	62	38	43	
SC103	PLF	M	55	76	356	3	7	11	4075	5314	3372	0.243	0.212	6	1.4	0.364	0.350	7.3	1.9	5.51	1.01	6.74	1.52	160	26	40	51	50	57	183	112	
SC105	PLF	M	70	71	324	0	0	0	3488	1970	5818	0.114	0.104	3.9	0.3	0.176	0.163	5.2	0.5	2.87	0.24	4.78	0.46	154	72	23	68	24	70	62	32	
SC106	PLF	M	56	64	388	2	2	2	1678	4049	0.178	0.183	3.3	0.4	0.3	0.283	0.283	4.4	0.9	3.11	0.33	4.11	0.79	125	54	23	76	23	57	35		
SC107	PLF	M	50	93	359	2	3	3	13033	3139	6893	0.176	0.173	8.6	1.1	0.299	0.267	18.8	3.1	6.13	0.81	14.78	0.95	154	45	51	54	54	54	90	88	
SC108	PLF	M	44	83	356	2	3	3	16338	3888	9905	0.239	0.219	7.1	1.9	0.385	0.364	10.9	2.2	6.68	1.44	10.16	1.83	158	51	94	62	94	80	140	76	
SC109	PLF	F	48	62	317	4	5	5	7255	3686	19104	0.292	0.235	10.9	2.3	0.41	0.346	9.7	2.1	8.57	1.46	9.2	1.83	172	34	111	74	117	87	139	125	
SC110	PLF	M	84	76	308	4	8	13	3944	643	14413	0.246	0.215	5.1	1.1	0.335	0.301	6.9	1.4	4.35	0.82	5.89	1.06	70	71	70	71	71	84	114	65	
SC111	PLF	M	78	88	340	4	5	5	3675	559	10838	0.279	0.245	5.5	0.9	0.359	0.334	8.3	1.4	4.77	0.72	7.15	1.1	189	33	79	35	80	38	139	44	54
SC112	PLF	M	78	93	313	3	10	12	4485	2393	31071	0.27	0.270	6.8	1.5	0.432	0.376	11.8	2.6	6.44	1.29	10.93	2.2	231	125	103	103	112	109	142	164	
SC113	PLF	M	74	77	320	5	15	22	4447	2250	19356	0.291	0.255	6.8	1.5	0.409	0.356	6.7	1.5	4.56	0.96	6.21	1.33	142	34	46	29	49	34	63	111	
SC114	PLF	M	63	100	345	4	12	17	7946	3757	8312	0.239	0.218	4.1	0.9	0.417	0.384	9.3	2.6	4.03	0.7	8.21	2.14	209	78	65	87	75	92	201	63	
SC115	PLF	M	72	66	335	4	8	10	4160	2301	5190	0.32	0.264	5.3	1.2	0.409	0.356	6.7	1.5	4.56	0.96	6.21	1.33	142	34	46	29	49	34	63	111	
SC116	PLF	M	67	76	339	3	7	11	7487	3525	8663	0.271	0.226	5.3	1.1	0.412	0.332	8.8	2.1	4.49	0.74	7.39	1.72	170	63	73	93	74	112	60	130	
SC118	PLF	M	74	51	395	2	3	3	3482	738	9067	0.107	0.075	2.5	0.1	0.191	0.148	4.1	0.4	2.48	0.14	3.4	0.3	139	38	26	31	33	36	33	46	
SC117	PLF	M	59	73	324	2	2	2	3049	653	7429	0.167	0.110	2.3	0.3	0.217	0.195	4.6	0.9	1.81	0.15	3.96	0.59	116	37	35	33	36	33	46		
SC119	PLF	F	75	42	384	3	8	11	3691	2187	7869	0.214	0.185	4.7	0.8	0.318	0.259	6.6	1.3	3.77	0.64	4.89	0.87	153	30	42	51	48	53	81	106	
SC120	PLF	F	67	74	300	0	0	0	4897	3095	5945	0.215	0.189	5.5	0.8	0.374	0.317	9.2	2.2	4.07	0.64	8.33	1.8	164	46	52	63	54	66	102	95	
SC121	PLF	M	86	67	395	3	6	9	5744	3414	8972	0.235	0.215	5.2	0.8	0.364	0.335	6.7	1.7	4.58	0.6	6.47	1.25	195	35	47	41	47	50	183	67	
SC122	PLF	M	79	53	266	1	1	1	4133	2018	7893	0.203	0.148	4	0.6	0.305	0.253	6.2	1.2	3.16	0.36	5.05	0.87	155	23	33	38	34	39	92	111	
SC123	PLF	M	68	81	335	3	7	10	4256	8083	4744	0.074	0.066	3.4	0.2	0.117	0.103	4.4	0.4	2.8	0.14	3.79	0.3	150	41	39	41	44	47	121	115	
SC124	PLF	M	63	63	396	3	6	7	3891	7236	3413	0.254	0.195	4.4	0.7	0.352	0.284	5.8	1.6	3.37	0.47	4.82	1.21	143	43	44	61	52	64	115		
SC125	PLF	M	52	218	3	6	8	1704	6905	2847	0.22	0.190	7.9	0.8	0.33	0.300	9.8	1.9	4.92	0.58	7.4	1.41	119	23	57	50	61	52	70	99		
SC126	PLF	M	54	90	340	2	3	3	3891	7236	3413	0.254	0.195	4.4	0.7	0.352	0.284	5.8	1.6	3.37	0.47	4.82	1.21	143	43	44	61	52	64	115		
SC127	PLF	F	58	71	347	4	9	11	4161	6905	2847	0.22	0.190	7.9	0.8	0.33	0.300	9.8	1.9	4.92	0.58	7.4	1.41	119	23	57	50	61	52	70		
SC128	PLF	M	39	66	302	4	7	9	1045	734	10035	0.3	0.300	3	1	0.377	0.330	3.7	1.5	4.89	0.54	3.81	0.59	153	16	48	56	50	57	59		
SC128	PLF	F	46	69	313	2	2	2	9329	532	7787	0.184	0.138	9	1	0.25	0.220	12.2	1.9	7.93	0.87	10.56	1.57	124	11	56	41	63	49	90		
SC129	PLF	F	45	63	339	0	0	0	4723	2725	9350	0.217	0.152	6.7	1	0.339	0.221	6.4	1.8	4.96	0.6	5.22	0.97	121	17	82	45	82	53	156		
SC131	PLF	M	48	75	332	4	7	8	2992	2725	5456	0.269	0.256	17.6	3.9	0.431	0.391	2.6	11.8	13.94	3	22.91	9.5	167	22	77	66	77	89	156		
SC132	PLF	M	65	73	333	4	7	12	8682	3759	7745	0.281	0.262	6.1	1.1	0.406	0.366	6.7	2.7	5.64	0.96	6.47	2.04	178	54	56	91	61	95			
SC133	PLF	M	73	74	339	4	11	20	9025	3384	8356	0.214	0.224	4.6	0.9	0.421	0.345	6.2	2.8	4.26	0.75	5.6	2.08	180	56	71	62	77	64			
SC134	PLF	F	58	62	391	3	6	6	6504	4303	9153	0.268	0.213	11.5	2	0.411	0.365	16.1	6.9	9.75	1.65	13.3	4.97	153	51	58	57	77	64			
SC135	PLF	F	54	64	298	4	7	11	3769	1890	7339	0.266	0.239	6	1.2	0.407	0.332	6.4	1.7	5.21	0.88	5.57	1.32	142	57	48	59	49	60			
SC136	PLF	F	54	61	306	2	3	3	3046	2648	10891	0.275	0.235	4.2	0.8	0.364	0.320	4.8	1.5	3.61	0.57	3.99	1.06	133	16	22	37	22	38			
SC137	PLF	F	73	50	380	2	3	3	3886	2648	10891	0.207	0.177	11.9	2	0.332	0.278	13.5	3.3	10.45	1.55	14.07	2.7	181	81	66	80	72	84			
SC138	PLF	F	58	48	388	3	6	6	3404	2328	6254	0.195	0.180	3.8	0.5	0.26	0.242	4.5	0.9	3.47	0.39	4.14	0.75	125	43	31	62	36	64			
SC101	ABG	M	61	65	312	0	0	0	5112	1880	9239	0.154	0.130	3	0.2	0.219	0.200	3.6	0.5	2.52	0.14	2.75	0.38	111	16	22	18	27	46			
SC102	ABG	M	51	61	318	3	6	7	8343	10666	0.208	0.170	5.4	0.6	0.337	0.280	5.6	1.5	5.08	0.52	5.3	1.22	166	50	52	65	54	70				
SC103	ABG	M	60	102	339	0	0	0	7690	3758	0.232	0.160	8.3	1.5	0.293	0.220	9	2	5.33	0.77	6.56	1.17	137	58	27	46	43	47				
SC104	ABG	M	61	69	312	2	3	3	4280	1950	9998	0.284	0.230	6.5	1.2	0.384	0.330	9.5	2	6.06	0.95	8.5	1.62	116	23	22	26	26	37			
SC105	ABG	M	70	101	330	2	2	2	2078	2358	7236	0.16	0.150	8	0.9	0.272	0.230	12.2	3	7.06	0.8	10.44	2.06	146	37	28	47	33	50			

Anexo B Tabla de pruebas en segunda ronda para impacto lateral de trineo conducida por el colegio médico de Wisconsin.

tstno	tstcm	thx_f N	abd_f N	pel_fN	ABDF N	PELF N	TTI	.ASA g's	spu g's	spl g's	rspu g's	rspl g's	pel g's	rpel g's	rth g's	rll g's	dmax (mm)	Vmax (m/s)	Vcmx (m/s)	Upper rib			Middle Rib			Lower Rib		
																				dmax (mm)	Vmax (m/s)	Vcmx (m/s)	dmax (mm)	Vmax (m/s)	Vcmx (m/s)	dmax (mm)	Vmax (m/s)	Vcmx (m/s)
SD254	PHE	9107	3458	11915	1847	3075	52	44	39	49	39	49	59	59	46	69	49.2	2.45	0.63	53.8	2.49	0.71	48.9	2.50	0.48			
SD261	PHE	8197	3542	10900	2005	2403	53	44	34	48	35	49	60	62	36	49	43.5	2.04	0.48	49.3	2.19	0.59	47.8	2.43	0.48			
Avg	PHE	8652	3500	11407	1926	2739	53	44	36	49	37	49	59	61	41	59	46.3	2.25	0.56	51.6	2.34	0.65	48.3	2.47	0.48			
SD260	PLF	4628	2064	6806	1307	1596	31	27	22	31	22	31	37	38	24	25	26.9	1.24	0.12	33.5	1.60	0.20	33.8	1.67	0.23			
SD255	PIOP	2818	1042	9566	601	2499	38	16	25	28	26	28	36	37	29	43	28.7	1.35	0.19	22.7	1.10	0.12	15.7	1.24	0.06			
SD256	PIOP	2782	1150	9367	605	2586	34	16	24	27	25	27	36	37	31	36	26.6	1.35	0.17	22.0	0.98	0.11	17.6	1.24	0.07			
Avg	PIOP	2800	1096	9466	603	2543	36	16	25	28	26	28	36	37	30	40	27.6	1.35	0.18	22.4	1.04	0.12	16.6	1.24	0.07			
SD262	RHF	13928	5773	17871	4177	5226	153	79	57	105	59	105	137	137	110	193	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	53.8	7.76	2.02		
SD263	RHF	13084	6176	18396	4157	5274	153	76	48	106	50	106	131	131	95	193	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	54.3	7.81	2.06		
Avg	RHF	13506	5975	18134	4167	5250	153	78	52	105	54	106	134	134	102	193	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	54.1	7.79	2.04		
SD259	RHOP	8550	919	28321	732	6923	140	39	55	100	57	102	142	142	104	177	46.4	4.91	1.02	34.4	5.16	0.79	24.1	4.31	0.46			
SD252	RLF	9090	2638	13583	1804	3586	81	46	30	61	31	61	78	78	64	105	41.1	3.44	0.62	47.2	5.49	1.21	43.8	5.14	1.12			
SD253	RLF	9076	2615	13688	1889	3633	82	47	30	64	31	64	84	85	66	107	39.8	3.49	0.62	45.7	5.58	1.22	43.8	5.25	1.13			
Avg	RLF	9083	2627	13636	1847	3610	81	47	30	62	31	63	81	81	65	106	40.4	3.47	0.62	46.4	5.54	1.22	43.8	5.20	1.13			
SD250	RLOA	969	16952	6756	9439	1571	102	18	46	96	46	96	67	67	108	152	14.6	2.48	0.11	4.9	1.28	0.03	12.3	2.19	0.09			
SD251	RLOA	1196	16783	6472	9205	2042	108	17	43	93	44	93	75	75	127	146	15.8	2.77	0.13	4.6	1.17	0.03	9.5	1.68	0.06			
Avg	RLOA	1082	16867	6614	9322	1807	105	18	45	94	45	95	71	71	117	149	15.2	2.63	0.12	4.7	1.23	0.03	10.9	1.94	0.08			
SD257	RLOP	3896	465	16133	582	3812	60	34	31	42	31	42	76	76	59	71	30.2	2.87	0.40	22.1	2.43	0.24	12.8	2.02	0.10			
SD258	RLOP	4028	462	16335	681	NA	61	26	32	43	32	44	79	79	54	73	30.8	2.84	0.40	22.0	2.42	0.24	13.3	2.19	0.12			
Avg	RLOP	3962	464	16244	632	3812	61	30	31	43	32	43	77	78	56	72	30.5	2.86	0.40	22.1	2.43	0.24	13.0	2.11	0.11			
SD248	RLOT	24323	490	6962	923	1757	201	65	91	99	92	99	65	66	426	332	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	54.8	8.10	1.41		
SD249	RLOT	25349	493	7586	695	1725	199	70	93	103	93	103	58	58	393	343	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	55.2	8.09	1.40		
Avg	RLOT	24836	491	7274	809	1741	200	67	92	101	93	101	61	62	410	338	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	55.0	8.10	1.41		

Tstcm: test configuration--R=rigid, P=padding, H=32km/h impact, L=24 km/h impact, F=flat wall, OP=pelvic offset, OT=thoracic offset, OA=abdominal offset, thx_f: maximum thoracic force, abd_f: max abdominal force, pel_f: max pelvic force, ABDF: total ES-2re abdominal force, PELF: ES-2re public symphysis force, dmax: max upper, middle, and lower rib deflection, Vmax: Max velocity derived from dmax, Vcmx: Max VC derived from dmax, rth, rll: left upper and left lower rib acceleration (g's), spu, spl, pel: lateral upper spine, lower spine, and pelvic accelerations, rspu, rspl, rpel: resultant upper and lower spine and pelvic accelerations, TTI: computed as in Eppinger, 1984 without the age term, ASA: ASA20 computed as in Cavanaugh (1993), NA: not available

Anexo C Tabla de pruebas, impacto lateral de trineo publicado por Cavanagh et al (1993).

tstno	MAIS	Age	TTI	Dmax	chswd	VCmax	ASA10	cmax	T1y	T12y
1	5	60		181	438	4.8		0.41	131	
2	5	64	196	122	414	3.3	65.5	0.29	48	102
3	5	37	209	137	570	4.5	57	0.24	145	126
4	4	69	221	100	390	1.7	52.7	0.26	40	70
6	4	60	217	88	380	1.1	43.6	0.23	130	88
5	4	67	156	80	390	1	23.6	0.21	63	84
7	4	66	172	98	468	1.3	28.8	0.21	64	42
8	5	64		125	408	2.6	29.5	0.31	54	51
10	2	60	175	81	426	1	21.1	0.19	46	95
11	2	54	138	69	370	0.7	23.3	0.19	58	51
13	4	62		81	442	0.9		0.18	54	
15	0	43	126	103	404	1.3	27.6	0.25	46	52
17	2	65	220	95	430	1	19.5	0.22	58	67
9	5	61	167	111	400	1.6	41.1	0.28	73	75
12	5	68	161	109	378	2	46.3	0.29	74	66
14	4	60	176	95	416	1.1	36.8	0.23	57	88
16	4	58	198	99	338	2.1	35.2	0.29	48	74

Tstno: test number (Cavanaugh, 1993), **MAIS:** maximum AIS level injury, **Age:** age of subject at time of death, **TTI:** TTI computed according to (Eppinger, 1984), **Dmax:** maximum half thorax deflection in mm by film analysis, **chswd:** full thorax width of subject in mm, **VCmax:** Maximum VC in m/s, **ASA10:** average spine acceleration, **cmax:** normalized chest deflection, **T1y:** normalized lateral T1 acceleration, **T12y:** normalized lateral T12 acceleration.