

Apéndice D

Herramientas Analíticas y Experimentales

El diseño, síntesis y desarrollo de un sistema de seguridad nuevo no es un proceso sencillo, sino un proceso iterativo que requiere soluciones intermedias, a veces conflictivas, entre los requisitos de desempeño ante el impacto, consideraciones ambientales y costos. Este apéndice resume algunas herramientas y analíticas experimentales comunes que pueden ser usadas para fortalecer el desarrollo y evaluación de nuevos sistemas de seguridad. También se discuten las aplicaciones y limitaciones de estas técnicas.

D1 TÉCNICAS ÚTILES

D1.1 DISEÑO ESTRUCTURAL

La mayoría de los dispositivos de seguridad en el costado de la carretera requieren una importante capacidad estructural para lograr su desempeño deseado. Por ejemplo, las barreras longitudinales deben tener suficiente capacidad estructural para resistir las cargas de impacto lateral del vehículo que impacta. Otros dispositivos, como los soportes estructurales para señales y luminarias deben tener suficiente capacidad estructural para resistir las cargas ambientales, así como para acomodar impactos. Virtualmente, se requiere que todos los sistemas de seguridad mantengan una capacidad estructural mínima, y asegurar que un dispositivo pueda resistir la carga aplicada es una parte importante del proceso de desarrollo.

Las cargas estructurales y los procedimientos de diseño están contenidos en numerosos libros de texto de ingeniería civil, manuales de diseño de la AASHTO y publicaciones de investigación. Las referencias que contienen recomendaciones para las cargas de diseño y los procedimientos de análisis para cada tipo de sistema de seguridad están indicadas en la Tabla D-1. Los diseñadores/desarrolladores deben consultar estas referencias para estimar las cargas de diseño y proporcionar un nuevo diseño para las etapas de evaluación posteriores. Se deben implementar los ensayos estáticos y/o dinámicos, y la simulación por computadora cuando sea necesario para asegurar que los sistemas tengan suficiente capacidad estructural.

TABLA D-1. Fuentes de Información de Sistemas de Seguridad

Dispositivo		Referencia Principal
I.	Barreras Longitudinales	
	A. Barandas de Puentes	4, 5, 9, 13, 23, 27, 48, 49, 68, 82, 100
	B. Guardarrieles	4, 9, 20, 24, 26, 28, 37, 46, 47, 50, 63, 94, 100, 108, 139
	C. Barreras de Medianas	4, 9, 21, 27, 84, 100, 131
II.	Amortiguadores de Impacto y Terminales	4, 9, 21, 67, 80, 124, 126
III.	Soportes de Quiebre o de Ceder el paso	
	A. Soportes de Luminarias	3, 6, 8, 17, 34, 43, 105
	B. Soportes de Señales	3, 6, 16, 51, 57, 83, 91, 102, 106, 121, 122, 123, 138
	C. Postes de Servicio	12, 55, 72, 77
IV.	Amortiguadores montados en Camiones	30, 32, 33, 58, 135, 148
V.	Características Geométricas en el costado de la Carretera	4, 38, 40, 69, 101, 127, 130, 152, 160

D1.2 ENSAYOS ESTÁTICOS

Durante la etapa inicial de desarrollo, ciertos detalles críticos y conexiones de un sistema de seguridad pueden requerir una evaluación de capacidad estructural o características de fuerza de deflexión. Los dispositivos de seguridad usualmente son diseñados para funcionar en su máxima capacidad o cerca de ella, lo cual significa que los materiales frecuentemente son cargados más allá de los límites elásticos y, en muchos casos, está previsto que los materiales se quiebren en un proceso secuencial y de forma controlada. Como resultado, a menudo son necesarios ensayos estáticos especiales que no se ajustan a las pruebas estándar sugeridas por ASTM.

La mayoría de los ensayos estáticos tienen los siguientes objetivos:

Demostrar el desempeño de un sistema de seguridad bajo carga ambiental simulada.

Evaluar la fuerza máxima de las conexiones críticas.

Desarrollar propiedades de carga/deflexión para posteriores modelos de simulación por computadora.

Evaluar modo/s de fallo.

Los ensayos estáticos usualmente son utilizados para comparar el desempeño de los detalles del diseño de la competencia. Cuando dichos ensayos son utilizados para evaluar los componentes de un sistema de seguridad bajo carga dinámica, los diseñadores deben tomar conciencia de los diferentes problemas que pueden surgir de la

sensibilidad del tipo de carga del material. Una preocupación principal en el diseño de varios dispositivos de seguridad es la energía absorbida cuando un componente falla. Los ensayos estáticos generalmente permiten que un componente falle en la carga más baja posible. Sin embargo, el fallo de carga más bajo puede no corresponder a un fallo del modo de energía más baja. Por ejemplo, los postes de madera empotrados en el suelo casi nunca se quiebran bajo carga estática y la disipación de energía usualmente es mayor que la de los postes rotados en el suelo. Bajo carga dinámica, los suelos pueden generar cargas mucho mayores y un poste de madera puede quebrarse antes de tiempo con poca disipación de energía

En general, se anticipa que hay variaciones significativas en las propiedades mecánicas de la mayoría de los materiales. Además, las características mecánicas de varios materiales están especificadas solamente en términos de valores mínimos y la resistencia de los materiales reales pueden ser casi el doble del valor mínimo. Si un dispositivo de seguridad depende de la flexión o el quiebre controlado de un material, la resistencia excesiva del material puede ser tan peligrosa como una resistencia por debajo del mínimo. Por ejemplo, las investigaciones han demostrado que la energía requerida para fragmentar la base frágil de un transformador puede variar más del 100 por ciento incluso con cambios menores en el tratamiento de calor de la aleación de aluminio. Además, las condiciones de suelo pueden exhibir variaciones muy amplias por temporadas, ya que en suelo puede pasar por las situaciones de saturación, sequía y congelamiento. Los diseñadores deben utilizar los ensayos estáticos y/o dinámicos para evaluar el desempeño del sistema de seguridad sobre el rango esperado de variación en las propiedades del material.

Incluso en esta etapa, el diseñador debe ser consciente de valorar la ingeniería evitando la sobre especificación de los materiales, especialmente en aquellos componentes que no son críticos para el desempeño del sistema. Cuando sea posible, el diseñador debe usar los elementos de equipamiento estándar para la economía inicial y minimizar los costos asociados con el mantenimiento del inventario (9)

D1.3 SIMULACIONES POR COMPUTADORA

Han sido desarrollados una serie de programas informáticos que simulan la dinámica del vehículo y la cinemática durante las interacciones con los dispositivos de seguridad vial. También se desarrollaron varios modelos para simular la dinámica del ocupante durante el impacto. Estos modelos varían en complejidad, procedimiento de análisis, tipo de sistema de seguridad y clases de vehículo que pueden ser investigados. El LS-DYNA (82) se convirtió en el programa de análisis de elección para el desarrollo de la mayoría de los dispositivos de seguridad, mientras que el MADMYO (151) se utiliza ampliamente para modelar los movimientos del ocupante. Aunque la comunidad de seguridad vial ha estado migrando hacia herramientas explícitas de análisis de elementos finitos, la mayoría de los programas más antiguos, especialmente HVOSM (136) y Barrier VII (111) proporcionan herramientas rentables para identificar las trayectorias del vehículo, los puntos de impacto críticos y las cargas de barrera o baranda esperadas.

La mayoría de los programas de simulación disponibles se han correlacionados en cierta medida con los ensayos de choque. Para los casos válidos, los resultados de la simulación pueden ser de mucha ayuda para el diseñador de dispositivos de seguridad, ya que proporciona una percepción única del evento de colisión. Cuando el programa ha sido validado para múltiples condiciones de impacto, a veces puede predecir el comportamiento para las condiciones de impacto que están incluidas en las condiciones validadas. Aunque las simulaciones de computadora han demostrado ser invaluable en el desarrollo de nuevos sistemas de seguridad, la precisión de estos programas aún no ha llegado al punto en que los ensayos de cumplimiento requeridos puedan ser

reemplazados por el modelo por computadora. La mayoría de los programas de simulación se dan en la Tabla D-2 y se describen a continuación.

TABLA D-2. Resumen de los Programas de Computadora de Dispositivos de Seguridad

Nombre	Desarrollador/ Fecha del Último Modelo	Aplicación Principal	Modelo	Validación	Documentos disponibles	Comentarios
HVOSM	CALSPAN/1989	Manejo y estabilidad del Vehículo	3D Lump Mass Vehicle	Extensivo	FHWA (R&D)	Excelente sistema rueda/ suspensión; Simulación analógica de la deformación de la carrocería
Barrier VII	Universidad de Cal./1973	Automóvil Simple/barrera redirectiva flexible	2D Finite Element Model (FEM)	Extensivo	FHWA (R&D)	Para casos donde el balanceo y el cabeceo son despreciables.
LS-DYNA	Livermore Software Technology Corp./2006	Programa de elementos finitos explícitos no lineales	Modelos de Elementos Finos Detallados	Extensivo	LSTC	Modelos detallados pueden proveer predicciones muy precisas del desempeño del dispositivo de seguridad

HVOSM – El Programa de Simulación de Objetos de Vehículos en Rutas (HVOSM) es un modelo de manejo de vehículo muy sofisticado y ampliamente utilizado. HVOSM incorpora un modelo de vehículo con 11 grados de libertad (DOF) con una suspensión y modelos de neumáticos relativamente sofisticados. Este programa ha sido extensamente validado para una variedad amplia de ensayos de choque que involucran varias configuraciones de terreno diferentes. El programa ha demostrado validez para el modelado de recorridos de vehículos en cunetas, calzadas y una variedad de pendientes en el costado de la carretera (127). El HVOSM es adecuado especialmente para la evaluación de las características geométricas del camino y sus costados. Aunque este programa también ha sido utilizado para simular impactos contra barreras rígidas (104), ahora ha sido sustituido por el LS-DYNA.

Barrier VII – El programa Barrier VII (111) es un modelo ampliamente utilizado para simular impactos con barrera flexibles. Este programa incorpora un modelo de elementos finitos de vigas y columnas de la defensa y un modelo de vehículo de dos dimensiones. El código FEM incorpora tanto la geometría y los materiales no lineales, como también un número de elementos de barrera especializados incluyendo resortes no lineales y puntos de rotación. Aunque el modelo de vehículo incorpora elementos de resorte bilineales simples y está limitado a tres DOF, este programa ha sido validado exitosamente para una amplia variedad de barreras flexibles y una serie de vehículos diferentes. La limitación primaria de este programa es que no puede ser utilizado para predecir la estabilidad de un vehículo. Sin embargo, es especialmente adecuado para usarse como una herramienta para el diseño de defensas en la predicción de cargas máximas, al igual que las tensiones sobre los componentes de las barreras. Además, el programa ha demostrado ser útil para la identificación de las ubicaciones críticas de impactos, así como también predecir el enganche y embolsamiento de vehículos.

LS-DYNA – Este es un programa de computadora de elementos finitos no lineales altamente sofisticado (82). El programa es comúnmente utilizado para modelar impactos vehiculares con, virtualmente, cualquier sistema de seguridad en el costado de la carretera. Aunque este programa demostró ser capaz de predecir de manera precisa el comportamiento de los vehículos y los sistemas de seguridad durante los impactos a alta velocidad, aún quedan algunas limitaciones importantes. Las limitaciones primarias del LS-DYNA están relacionadas con el fallo de la barrera y de los componentes del vehículo. El modelado de elementos finitos de la rotura del metal no ha progresado hasta el punto de que pueda predecirse confiablemente. La rotura dinámica de los componentes de metal ha demostrado ser dependiente de muchos aspectos. Un desarrollador puede, a veces, ajustar un modelo particular para que falle en el momento apropiado en un ensayo dinámico, pero incluso los cambios menores en la orientación de la carga o la configuración de la red pueden destruir la precisión del programa. Como resultado, la habilidad del LS-DYNA para predecir de forma precisa el fallo de la suspensión del vehículo o la rotura de un componente de la defensa es muy limitada.

D1. ENSAYOS DINÁMICOS EN LABORATORIOS

Además de los procedimientos de ensayo en escala real presentes en otra parte de este informa, hay cuatro tipos de métodos de ensayo dinámicos para evaluar y estudiar dispositivos de seguridad: péndulos gravitacionales, dispositivos de ensayo dinámicos/descenso de masa, modelos en escala y vehículos bogie.

D1.5 PÉNDULO GRAVITACIONAL

Un péndulo de laboratorio es caracterizado por una masa impactante que se balancea en un arco circular suspendido de una estructura principal por un cable o un brazo rígido. Este elemento generalmente está montado en posición vertical. La velocidad de la masa en el impacto se rige por la siguiente fórmula:

$$V_i = \sqrt{2gh}$$

Donde:

V_i = velocidad al momento de impacto

g = aceleración de la gravedad

h = altura de caída de la masa

La formula de arriba ignora las pérdidas de velocidad debido a la fricción y el arrastre aerodinámico y, por lo tanto, debe ser corregida para una evaluación más exacta de las velocidades de impacto del péndulo real. Como ejemplo, para una velocidad de impacto de 32 mph (9,7 m/s), se requiere un descenso de altura de 15,7 pies (4,8m). El radio de oscilación suele ser considerablemente mayor que la altura de caída. Los péndulos gravitacionales se utilizan comúnmente para evaluar el desempeño a velocidades de impacto de aproximadamente

25 mph (40 km/h) o menor. Un péndulo capaz de altas velocidades de impacto requeriría alturas de caída grandes y resultaría impracticable.

Un problema importante asociado con este tipo de ensayos es el tipo de superficie de impacto o nariz aplastable utilizada en el péndulo. Una nariz rígida incrementa en gran medida las fuerzas de impacto aplicadas al péndulo mientras reduce la disipación de energía durante el ensayo. Una nariz excesivamente flexible minimizará las fuerzas de impacto y maximiza la disipación de energía asociada al sistema que se está ensayando. Aunque las narices flexibles simuladas han sido desarrolladas para los automóviles compactos y en miniatura (19, 85), estos dispositivos pueden ser obsoletos.

El ensayo de péndulo es utilizado frecuentemente para evaluar el desempeño de las estructuras de quiebre, como soporte de luminarias y de señales. Dichos sistemas usualmente absorben más energía de impacto durante los choques a baja velocidad, que en aquellos a alta velocidad. Como resultado, los péndulos son un método económico para evaluar el desempeño a baja velocidad de las alternativas de diseño del prototipo. Algunos sistemas de quiebre han sido puestos en servicio con base solamente en el ensayo de péndulo. La aceptación de los sistemas de seguridad basados en dichos ensayos queda bajo la responsabilidad de la agencia vial.

Los péndulos también pueden ser utilizados para el ensayo dinámico de diversos componentes de los sistemas de seguridad. Por ejemplo, los péndulos usualmente son utilizados para el ensayo dinámico de postes de barrera empotrados en el suelo y elementos de los amortiguadores de impacto. Este tipo de ensayo no es sensible al diseño de la nariz aplastable del péndulo y puede brindar información valiosa mediante un impacto contra la superficie rígida.

D1.6 DESCENSO DE MASA/ DISPOSITIVO DE ENSAYO DINÁMICO

Estos laboratorios generalmente involucran una masa rígida o placa que impacta contra un elemento de ensayo a las velocidades indicada. Los dispositivos de descenso de masa pueden ser utilizados para ensayos de componentes grandes y ensambles bajo condiciones dinámicas de velocidad baja. Los dispositivos de ensayo dinámicos no están limitados a ensayos de velocidades bajas, sino que los tamaños de los elementos generalmente son muy limitados. Como resultado, estos dispositivos están limitados a ensayos de modelos en escala o componentes de un sistema de seguridad relativamente pequeños. Aunque estos métodos de ensayo han demostrado ser bastante valiosos, los diseñadores deben estar conscientes de los problemas asociados con ambos métodos. Los ensayos a velocidades bajas asociados con los laboratorios de ensayo de descenso de masa pueden conducir las mismas sensibilidades en la deformación por velocidad que las del ensayo estático. Además, debido a que los dispositivos de ensayo dinámicos aceleran y desaceleran la placa de impacto a distancias relativamente cortas, la velocidad de la placa de choque puede variar significativamente durante el evento del ensayo. En este caso, la sensibilidad en la deformación por velocidad puede hacer que los resultados del ensayo sean virtualmente inútiles ya que la velocidad del ensayo no es constante.

D1.7 MODELOS EN ESCALA

El ensayo de modelo en escala implica la construcción de modelos de dispositivos de seguridad y vehículos de ensayo en una escala reducida. La complejidad de modelar la deformación de la chapa de metal del automóvil, la interacción neumático-pavimento y el comportamiento de la suspensión ha limitado la aplicación de estos

procedimientos para el desarrollo de la mayoría de los dispositivos de seguridad. Sin embargo, el modelado en escala puede ser útil durante las fases de desarrollo de los dispositivos, donde la mayoría de las propiedades de los vehículos son de importancia secundaria, como los dispositivos de amortiguación de impacto (31). Esta técnica puede proporcionar información útil sobre el movimiento bruto de un vehículo durante el impacto con los dispositivos de seguridad seleccionados. Las incertidumbres asociadas con el modelado de los diseños de conexión y las propiedades de los materiales continúan limitando la utilidad de estos procedimientos.

D1.8 ENSAYO CON BOGIE

Un vehículo bogie es una estructura montada en cuatro ruedas y con una masa equivalente a la de un automóvil seleccionado. El vehículo bogie avanza sobre rieles, conducido por cables guías, control remoto u otros métodos para impactar contra el elemento de ensayo. El vehículo bogie puede ser acelerado hasta la velocidad de impacto por un empuje o remolque, por energía propia o por un malacate fijo. En la parte delantera del bogie se puede montar una nariz aplastable o deformable. Los vehículos bogie pueden ser utilizados para simular impactos con estructuras de quiebre, dispositivos de control de tránsito en zona de obra, barreras longitudinales o componentes de dichos sistemas. Como se discutió en la Sección 4.2.1, los vehículos bogie pueden ser periódicamente revalidados para asegurarse de que sean representativos de los vehículos modernos.

D2 COMPARACIÓN DE TÉCNICAS

En la Tabla D-3 se presentan las aplicaciones y limitaciones de las técnicas desarrolladas.

TABLA D-3. Técnicas Desarrolladas para Dispositivos de Seguridad

Técnica Desarrollada		Áreas de Aplicación Principales	Limitaciones Posibles
1	Métodos de Diseño Estructural	<p>Diseño preliminar y final del sistema para el desempeño ambiental y de no colisión.</p> <p>Diseño preliminar de sistema para el desempeño ante la colisión de vehículo.</p> <p>Análisis de las conexiones, requisitos de las propiedades del material y diseño de fundaciones</p>	<p>No se tratan las dinámicas y cinemáticas del sistema y colisión del vehículo.</p> <p>No se trata la severidad de la colisión en términos de heridas o fallecimiento del ocupante.</p>
2	Ensayos Estáticos (cuasi-estáticos)	<p>Propiedades mecánicas de formas únicas, conexiones y nuevos materiales</p> <p>Validación del diseño estructural de los dispositivos</p> <p>Control de calidad de las propiedades críticas del material</p> <p>Desarrollo de valores de entrada para los programas de computadora</p>	<p>No se examinan las propiedades dinámicas</p> <p>Es generalmente aplicable a las muestras, conexiones y pequeños sub ensambles; no considera al sistema entero</p>
3	Simulaciones por Computadora	<p>Estudia las interrelaciones del sistema y las dinámicas y cinemáticas del vehículo</p> <p>Estudia las interrelaciones de las dinámicas del vehículo y las dinámicas del ocupante.</p> <p>Estudia la sensibilidad del sistema, vehículo y condiciones del sitio durante las interacciones del vehículo/sistema</p>	<p>El programa debe ser validado mediante ensayos a escala real para condiciones específicas que se ajusten a las condiciones estudiadas</p> <p>Los parámetros de entrada a veces no están disponibles y deben ser estimados.</p> <p>Por razones económicas y prácticas, los programas solo modelan las principales propiedades de vehículo/sistema</p> <p>A veces las características menores deciden el desempeño</p>
			(Continúa en la página siguiente)

TABLA D-3. Técnicas Desarrolladas para Dispositivos de Seguridad (Continuación)

Técnica Desarrollada		Áreas de Aplicación Principales	Limitaciones Posibles
4	Ensayos Dinámicos		
	A. Péndulo Gravitacional	<p>Ensayo de cumplimiento para soportes frangibles de señales y luminarias de un solo poste</p> <p>Evaluación de los mecanismos de quiebre</p> <p>Propiedades fuerza/deformación de las interacciones poste/suelo de una defensa</p> <p>Fuerza dinámica de los sistemas de anclaje</p> <p>Propiedades dinámicas de los subcomponentes de barreras</p>	<p>Velocidad de impacto de 25 mph (40 km/h) o menor</p> <p>Para los soportes de doble poste, no se examinan los mecanismos de la bisagra superior</p> <p>No simula impactos fuera del centro</p> <p>No se reproduce la trayectoria del artículo</p> <p>No es aplicable a los soportes con bases flexibles</p> <p>La nariz aplastable debe ser ajustada para el tipo y ancho del elemento y recalibrada periódicamente</p> <p>No puede evaluar el Criterio D, Tabla 5-1B propiamente</p>
	B. Descenso de Masa	<p>Ensayo de control de calidad para soportes de quiebre de uno solo o múltiples postes.</p> <p>El ensayo puede ser llevado a cabo en un espacio confinado, en un recinto.</p>	<p>Mismas limitaciones que el péndulo.</p> <p>Para la base de quiebre, la vara de conexión introduce el momento del artefacto en la base debido a la gravedad.</p>
	C. Modelo en Escala	Ensayo de desarrollo del sistema	Dificultades e incertidumbres en el modelado de los componentes del sistema de seguridad del vehículo
	D. Ensayo de vehículo Bogie	<p>Ensayo de conformidad para los soportes de quiebre de uno solo o múltiples postes</p> <p>Ensayo repetible de la suspensión del vehículo, choque de nariz y otras propiedades dinámicas</p> <p>Experimentos de alta velocidad 0-60 mph (0-96,6 km/h) y bajo costo</p>	<p>Debe ser diseñado y calibrado cuidadosamente para representar las características del vehículo de interés, lo cual, usualmente, es un proceso largo y extenso</p> <p>Los diseños han sido apropiados para ensayar solamente limitadas variaciones de los dispositivos</p> <p>Deben ser actualizados y recalibrados periódicamente</p>
	E. Ensayo de Choque de Vehículo	<p>Ensayo de conformidad para todos los sistemas</p> <p>Investigación de condiciones inusuales</p> <p>Vínculo más directo hacia las colisiones de rutas reales</p> <p>Ensayo de prueba final</p>	<p>Relativamente caro de llevar a cabo</p> <p>Requiere laboratorios con importante capital</p> <p>Minucioso y lento para llevar a cabo. Los resultados pertenecen al modelo de vehículo especificado y pueden no ser aplicables a otros vehículos</p>