

MODELADO DE LA INTERACCIÓN CARGA SÓLIDA - VEHÍCULO

José Antonio Romero Navarrete
Subash Rakheja
Alejandro Lozano Guzmán
Waiz Ahmed

Publicación Técnica No. 189
Sanfandila, Qro, 2002

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Modelado de la interacción
carga sólida-vehículo**

**Publicación Técnica No. 189
Sanfandila, Qro, 2002**



El presente documento fue elaborado por José Antonio Romero Navarrete, Subhash Rakheja, Alejandro Lozano Guzmán y Waiz Ahmed, como resultado de un trabajo internacional de colaboración entre la Coordinación de Equipamiento para el Transporte del IMT y el Centro de Investigación en Ingeniería Vehicular (CONCAVE) de la Universidad de Concordia, Montreal, Canadá. Este trabajo fue revisado por el Dr. Miguel Martínez Madrid.

Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
1 Introducción	1
2 Modelado de cargas sujetas sobre plataformas en vibración	5
2.1 Carga no asegurada	5
2.2 Carga asegurada con amarres directos	15
2.3 Carga asegurada con amarres indirectos	33
3 Interacción carga-vehículo durante cambios direccionales	57
3.1 Modelo matemático	57
3.2 Resultados y discusión	60
3.3 Observaciones finales	64
4 Interacción carga-vehículo durante un frenado ABS	67
4.1 Modelo matemático	67
4.2 Resultados y discusión	78
4.3 Observaciones finales	85
5 Conclusiones	89
5.1 Implicaciones prácticas de los modelos	89
5.2 Observaciones finales	91
Referencias	93

Se proponen diferentes modelos matemáticos de la interacción dinámica entre una carga sólida y la plataforma de un vehículo que la transporta, analizando los dos tipos existentes de aseguramiento de la carga mediante amarres, esto es, un aseguramiento directo y uno indirecto. El aseguramiento directo fija la carga a la estructura del vehículo, sin que sea incrementada, necesariamente, la fuerza de fricción entre la carga y la plataforma. Por el contrario, un aseguramiento indirecto mediante amarres, busca incrementar el peso aparente de la carga, aumentando con ello la resistencia de la carga a sufrir movimientos. En la práctica, sin embargo, y debido a los ángulos usados, un amarre indirecto provee algún aseguramiento indirecto, y viceversa. El peso aparente de la carga, y por lo tanto, su resistencia a moverse, es función de las condiciones de movimiento de la plataforma de soporte, al implicar tal movimiento variaciones en la fuerza de contacto carga/plataforma. Los modelos de respuesta de la carga bajo condiciones controladas de vibración de la plataforma, son presentados en este trabajo para las condiciones de carga no asegurada y carga asegurada directa e indirectamente. La interacción carga – vehículo, es estudiada por cuanto al efecto del desplazamiento de la carga sobre la estabilidad lateral del vehículo y eficiencia de frenado. Los resultados muestran una influencia importante de factores asociados al diseño de los amarres, sobre los desplazamientos resultantes de la carga y las fuerzas generadas en los amarres. Por otro lado, que la estabilidad lateral es afectada peligrosamente por el corrimiento de la carga y que la distancia de frenado puede ser incrementada hasta en un diez por ciento por efecto del corrimiento de la carga.

Mathematical models are proposed to study the dynamic interaction between a solid cargo and its transporting platform. Indirect and direct tiedown cargo restraint methods are considered. While the main purpose of an indirect tiedown assembly is to increase cargo/deck contact force and thus the cargo resistance to move, a direct tiedown assembly restrains the cargo directly to vehicle's structure. Due to angles involved, however, a direct tiedown assembly provides some indirect restraint, and vice-versa. Cargo apparent weight is further affected by the platform vibration situation. The cargo response to tangential and vertical accelerations is analyzed, as a function of the vibration situation and cargo restraint methodology. The unsecured cargo situation is presented for comparison purposes. Solid cargo-vehicle interaction is modeled in relation with the lateral vehicle response to cargo shifting, and the effect of cargo shifting on the braking performance of the vehicle. Results indicate an important effect of tiedowns design characteristics on the cargo shifting and forces developed within tiedowns. Also, that the lateral stability of the vehicle can be compromised due to cargo shifting, and that the braking distance can be increase up to 10 percent as a consequence of cargo shifting.

Resumen ejecutivo

De entre los muchos factores de que depende la seguridad carretera, la falla de los elementos que deben asegurar al vehículo las cargas sólidas transportadas, ha representado un elemento que ha contribuido a accidentes, involucrando pérdidas humanas y materiales. Los métodos para el aseguramiento de la carga incluyen a los elementos tipo amarres, a los elementos para el bloqueo de la carga y a componentes especiales que fijan de manera positiva la carga a la estructura del vehículo. En el caso de los elementos tipo amarres, estos pueden tener dos modalidades: directos e indirectos. Un amarre directo es aquel cuya finalidad es inmovilizar la carga, al sujetarla directamente a la estructura del vehículo. Esto es, no se busca en este caso el incrementar la fuerza resistente de fricción entre la carga y la plataforma del vehículo. Por el contrario, la finalidad de los amarres indirectos, consiste en incrementar la fuerza de contacto entre la carga y la plataforma, proporcionando con ello una mayor resistencia de la carga a moverse. De esta forma, un amarre horizontal proveerá estrictamente un aseguramiento directo, mientras que un amarre vertical proveerá esencialmente un aseguramiento indirecto. En general, sin embargo y como consecuencia de los ángulos usados, un amarre directo proveerá algún aseguramiento indirecto, y viceversa.

En el ámbito internacional, el desempeño de los dispositivos y técnicas para el aseguramiento de las cargas, ha sido estudiado recientemente como resultado de una evaluación (en 1993), que produjo inquietudes por cuanto a los sustentos técnicos y científicos de las normas actualmente en uso. Como consecuencia de esta preocupación, en diferentes instituciones de Canadá y Estados Unidos, fueron realizados experimentos cuyo objetivo fue el obtener información que permitiera sentar las bases técnicas para el desarrollo de las normativas domésticas de los diferentes países, e incluso de alcance internacional, bajo el esquema del Tratado de Libre Comercio de Norteamérica. Como resultado de esas investigaciones experimentales, se cuenta ahora con información respecto a las características de comportamiento de los diferentes componentes que integran un sistema de aseguramiento de carga. Sin embargo, la integración de las propiedades de los distintos componentes, todavía no se ha efectuado. Esto es, no se ha realizado un estudio de la interacción dinámica existente entre el sistema de aseguramiento de la carga y el vehículo. Esta interacción bilateral consiste en que la vibración del vehículo, asociada al pavimento y a las maniobras de conducción efectuadas, afecta la efectividad del sistema de aseguramiento, al tiempo que la falla del sistema de aseguramiento puede afectar la estabilidad y comportamiento general del vehículo.

El presente trabajo constituye una aplicación de los resultados experimentales reportados de los estudios llevados a cabo por investigadores de este IMT en Canadá, consistentes en las propiedades de los elementos de sujeción tipo amarres, al trabajar de manera directa e indirecta.

En este trabajo se presentan los fundamentos de dos modelos de interacción carga sólida – vehículo, involucrando los diferentes tipos de aseguramiento de la carga mediante amarres. Esto con el objeto de analizar la interacción de la carga con el vehículo bajo dos distintas circunstancias: maniobra direccional a velocidad constante, y maniobra de frenado empleando un sistema de frenos antibloqueo (ABS). Se presentan los modelos de respuesta de los dos tipos de aseguramiento, directo e indirecto, al ser sometido el sistema a aceleraciones sinusoidales verticales en la plataforma de soporte, y aceleraciones horizontales de magnitud constante. Estas aceleraciones sinusoidales significan que la plataforma que soporta la carga, se desplaza verticalmente como una función del seno del producto de la velocidad angular constante y el tiempo; las aceleraciones horizontales se asocian a maniobras de conducción efectuadas por el vehículo, al frenar, acelerar o cambiar de dirección. Estos modelos permiten evaluar el efecto que distintos factores (nivel de vibración, frecuencia, ángulo de los amarres, ángulo de fase, tensión inicial y coeficiente de fricción), tienen sobre el nivel de desplazamiento de la carga y magnitud de las fuerzas generadas en los amarres. Estos modelos son empleados para desarrollar el modelo de interacción carga sólida – vehículo, durante las maniobras señaladas.

La importancia de analizar el efecto del desplazamiento de la carga sobre la estabilidad lateral del vehículo, como una función del estado de rugosidad del pavimento, se deriva de la causalidad de accidentes en los que los vehículos, al tomar una curva sobre un pavimento irregular, provocan el desprendimiento de la carga, la cual en ocasiones se vuelca sobre el tráfico en sentido contrario.

Por otra parte, la inquietud por estudiar la interacción carga – vehículo durante un frenado con sistema de frenado ABS, se deriva de que tal sistema de frenos, por su naturaleza de frenar de manera pulsante, podría afectar el aseguramiento de la carga, como producto de estas aceleraciones variables en dirección longitudinal.

Los resultados muestran que la estabilidad lateral del vehículo se ve comprometida como resultado del desplazamiento de la carga, mientras que este desplazamiento afecta desfavorablemente, hasta en un diez por ciento, la eficiencia del frenado. Asimismo, se encuentra que las aceleraciones longitudinales resultantes del ABS, no representan una causalidad para afectar adicionalmente la eficiencia de frenado. Como conclusiones se incluye una lista de aplicaciones prácticas de los resultados obtenidos.

Para facilitar la comprensión de este texto, a continuación se definen en orden alfabético algunos términos empleados de manera reiterada, incluyendo entre paréntesis sus correspondencias lexicológicas en Inglés.

Amarres directos (*direct tie-downs*) – Son aquellos elementos flexibles de aseguramiento de la carga, cuya finalidad es fijar ésta a la estructura del vehículo de transporte. Estos amarres no incrementan necesariamente la fuerza de contacto carga/plataforma.

Amarres indirectos (*indirect tie-downs*) – Son aquellos elementos flexibles de aseguramiento de la carga que, al contrario de los amarres directos, tienen la finalidad de incrementar la fuerza de contacto carga/plataforma, y por ende, aumentar la resistencia de la carga a sufrir movimientos.

Aseguramiento de la carga (*Cargo securement*) – Conjunto de técnicas y principios de operación, cuya aplicación pretende garantizar que la carga transportada en los vehículos de transporte carretero, no sufra movimientos, se suelte o caiga de las plataformas de transporte. De esta forma, este término, implica mayor alcance que simplemente las técnicas de sujeción de la carga. Una analogía de este concepto, se tiene en los términos de “aseguramiento de la calidad” y “control de calidad”. El primero de estos términos es de mayor alcance, al implicar técnicas de prevención y corroboración.

Eficiencia de frenado (*Braking efficiency*) – Es una cualidad de los sistemas de frenado, medida por lo general por la distancia de frenado.

Frenos antibloqueo (*Antilock brake system*) (ABS) – Sistema de freno automotriz que evita el bloqueo o amarre de las llantas de los vehículos durante el frenado. Esto se logra mediante el control de la fuerza de frenado aplicada en los tambores o discos, de tal suerte que la fuerza aplicada es disminuida en caso de que exista un bloqueo de la llanta. Esta operatoria causa que este tipo de sistema de frenos sea pulsante. El bloqueo de las llantas se debe a que el par de frenado aplicado, sobrepasa al par de frenado disponible derivado de la fricción llanta – pavimento.

Índice Internacional de Rugosidad (*International Roughness Index*) - Medida de la falta de regularidad del pavimento, obtenida mediante la simulación del paso de

un vehículo en particular sobre el pavimento evaluado. La vibración relativa de las dos masas que componen a este vehículo, en términos de la distancia recorrida por el mismo, determina el valor de este índice. Se mide por lo general en mm de desplazamiento relativo de las masas entre metros de distancia recorrida (mm/m).

Rugosidad del pavimento (*Pavement roughness*) – Son las variaciones en el perfil del pavimento que provocan vibraciones en el vehículo dentro de un cierto rango de frecuencias (1 a 20 Hz). Las variaciones en el perfil del camino, asociadas a estas frecuencias, implican irregularidades del camino entre 20 cm y 60 m de longitud. Se mide a través del Índice Internacional de Rugosidad.

1 Introducción

El desempeño por cuanto a seguridad carretera de los vehículos para transporte de bienes, está parcialmente relacionado con la efectividad de los sistemas de aseguramiento de la carga. La falla de tales sistemas ha sido identificada como uno de los muchos factores causales de accidentes, que han involucrado tanto pérdidas de vidas humanas como daños materiales (Gillespie, 1987; Hildebrand y Wilson, 1997; Rakheja, 1988; Loeb, 1994). Al respecto, mientras que la interacción carga – vehículo ha sido el tema de numerosas investigaciones en el caso de carga líquida (Kang et al., 2000; Aquaro et al., 1999), los estudios de tales interacciones no han sido hechos o publicados en el caso de las cargas sólidas.

En el caso de las cargas sólidas, la preocupación por los riesgos de seguridad carretera, derivados de la potencial falla de los dispositivos de aseguramiento de la carga, ha inducido el desarrollo de numerosos diseños de sistemas efectivos para la sujeción de la carga, así como regulaciones y prácticas recomendadas (NRTC, 1999). Sin embargo, a principios de la década pasada fue reconocido que tanto las regulaciones como las recomendaciones existentes, carecían de la fortaleza técnica y científica necesaria (Billing, Mercer y Cann, 1993). Es como consecuencia de esta situación que fueron desarrollados, en años recientes, un conjunto de estudios experimentales cuya realización tuvo el objetivo de mejorar el conocimiento general acerca de la mecánica de los elementos de sujeción de la carga, al tiempo de dar mejores bases para el desarrollo de nuevas regulaciones (Billing y Couture, 1996). Estos estudios incluyeron lo siguiente: evaluación del desempeño de los puntos de anclaje; efectos de los amarres de sujeción sobre las fuerzas de fricción carga-plataforma; desempeño de las técnicas de bloqueo de las cargas; y la evaluación experimental de los coeficientes de fricción de la carga con el vehículo bajo condiciones estáticas y de vibración de la plataforma (Billing y Couture, 1996; Rakheja, et al., 1997).

Este conjunto de investigaciones ha producido información útil para caracterizar tanto las propiedades de los sistemas de aseguramiento de la carga, como la interacción de la carga con la plataforma del vehículo. Esto es, esta información pudiera ser empleada para el desarrollo de herramientas de simulación que tuvieran como objeto diseñar y analizar los sistemas de aseguramiento de la carga y las interacciones carga sólida-vehículo.

Los métodos de aseguramiento de la carga mediante amarres se clasifican en general en directos e indirectos. Como se ilustra en la Figura 1(a), el sistema de aseguramiento directo mediante amarres involucra la fijación “directa” de la carga a la estructura del vehículo, mientras que los amarres en un arreglo indirecto (Figura 1(b)), aplican fuerzas verticales adicionales al peso de la carga, con objeto de incrementar su resistencia a moverse cuando es sometida a fuerzas y

momentos asociados a la vibración del vehículo y maniobras direccionales y de frenado. En la práctica, sin embargo, los amarres directos proveen alguna restricción indirecta, al tiempo que los amarres indirectos proveen alguna restricción directa. De esta forma, un amarre horizontal directo ideal (Figura 1(a)) resiste el movimiento horizontal de la carga por efecto de la tensión en el amarre y por la fricción en la interfase de la carga con la plataforma del vehículo. En la Figura 1(b) se muestra un amarre indirecto típico, que al pasar por encima de la carga, crea una fuerza adicional normal a la superficie de la plataforma, la cual es función tanto de la tensión inicial en el amarre (P_0) como del ángulo de éste con respecto a la plataforma (θ). Esta fuerza vertical adicional proporciona una fuerza de fricción que se suma a la derivada del peso de la carga.

Sólo en unos pocos estudios reportados en la literatura se ha intentado analizar los ensambles de amarres directos e indirectos, existiendo un análisis ingenieril (Gillespie, 1987) y algunos estudios experimentales (Billing, 1998). Como consecuencia de estos estudios experimentales, se cuenta con una cantidad considerable de información, la cual ha promovido el desarrollo de recomendaciones y regulaciones para el aseguramiento de la carga (CCMTA, 1999; NRTC, 1999). Por su parte, Gillespie (1987) efectuó un análisis de la resistencia requerida de los amarres, asumiendo una nula contribución de parte de la fricción entre la carga y la plataforma del vehículo. Esto es, la fricción fue considerada como un agente muy poco confiable para el aseguramiento de la carga. Para el caso de los amarres que corren por encima de la carga, en el estudio de Gillespie (1987) se sugiere que la relación de la resistencia del amarre entre el peso de la carga, debería ser igual a la precarga más un factor de 1.5 veces el nivel de aceleración de diseño.

Billing (1998) llevó a cabo pruebas de laboratorio consistentes en medir las variaciones en las tensiones en amarres indirectos alineados longitudinalmente, al forzar la carga a movimientos laterales y longitudinales. Las mediciones efectuadas involucraron diferentes ángulos para los amarres (45° , 60° y 80°), así como dos distintos materiales para los amarres (bandas tejidas y cadenas metálicas). Este estudio reportó que en el caso del movimiento longitudinal, una cierta resistencia se desarrolla en tanto la carga se mueve, alcanzando el rango de 0.1 a 0.25 el peso de la carga, pero esto sólo después de tener movimientos considerables para la carga, en el rango de 0.1 a 0.46 metros. Parte de estos resultados serán empleados en la presente investigación.

El movimiento de una carga asegurada mediante amarres, como resultado de aceleraciones laterales o longitudinales derivadas de maniobras del vehículo, es una función compleja de muchos factores de diseño y de operación, tales como el número y ángulo de los amarres, la tensión inicial en los mismos, el peso de la carga, la fricción entre la carga y la plataforma del vehículo, el estado de vibración vehicular, y la elasticidad y resistencia última de los amarres.

Si bien las recomendaciones actuales y las prácticas propuestas especifican el número, la capacidad mínima y la separación de los amarres (NRTC, 1999), un análisis profundo del comportamiento dinámico de estos componentes, no ha sido reportado hasta la fecha.

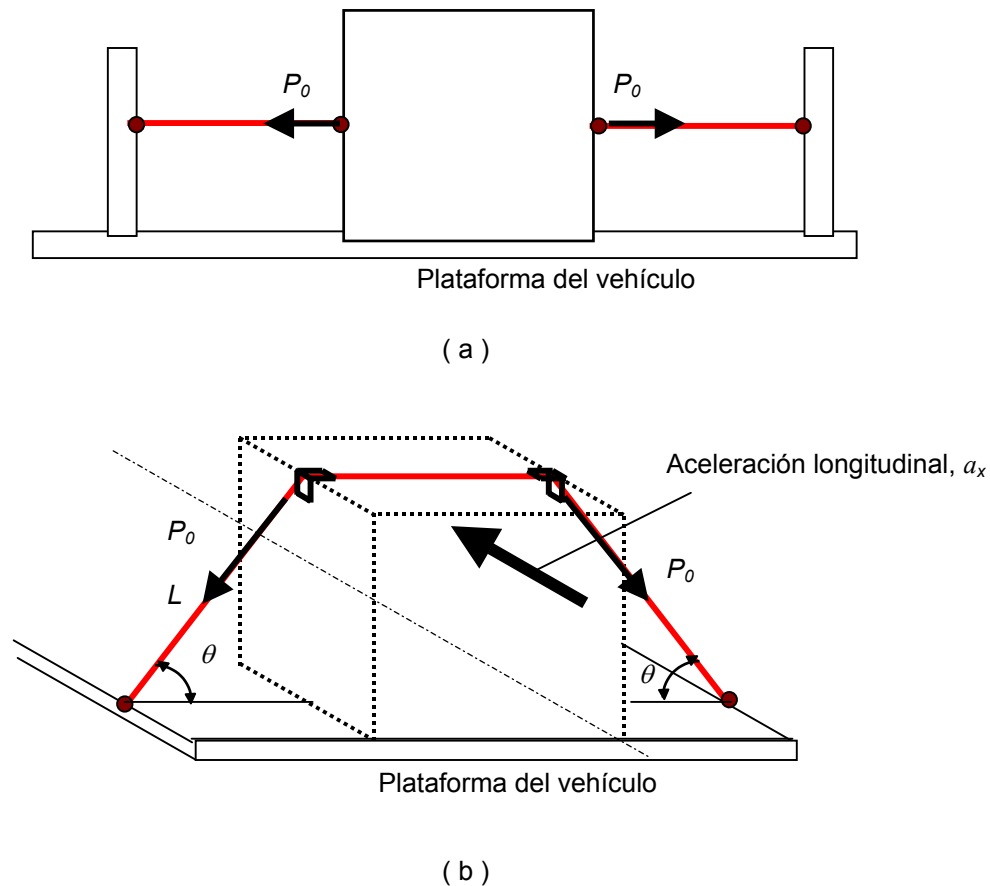


Figura 1: Representación esquemática de los ensamblajes de amarres. (a) amarre directo; (b) amarre indirecto por encima de la carga (*crossover*).

En este trabajo se presentan un conjunto de estudios que tienen la finalidad de proveer elementos para la discusión de propuestas de normas acerca del aseguramiento de la carga en el autotransporte. De esta manera, en la siguiente parte se presentan los estudios de la respuesta dinámica de una carga directa e indirectamente asegurada, al estar sometida a aceleraciones longitudinales,

incluyendo como modelo inicial y para objetivos de comparación, el comportamiento de una carga no asegurada. Se introducen modelos analíticos simples de la carga asegurada, incorporando rigideces equivalentes asociadas a la respuesta de los amarres al desplazamiento de la carga. Una vibración vertical armónica controlada es aplicada a la plataforma que sustenta a la carga, evaluando las respuestas dinámicas del sistema carga-amarres, en términos de las fuerzas desarrolladas en los amarres y de los correspondientes desplazamientos de la carga. Todo esto como una función de la elasticidad, tensión inicial y ángulo de los amarres; de la magnitud de la aceleración horizontal; de la fricción carga/plataforma y de las características de vibración de la plataforma.

En las secciones tres y cuatro se presentan dos modelos de la interacción carga sólida – vehículo. En la sección 3 se estudia el efecto del desplazamiento de la carga sobre la estabilidad lateral del vehículo, mientras que en la sección 4 se desarrolla un modelo que permite estudiar el efecto que el desplazamiento de la carga tiene sobre la efectividad de un frenado antibloqueo (ABS).

2 Modelado de cargas sujetas sobre plataformas en vibración

En esta sección se presentan los modelos de respuesta de la carga al ser sometida a aceleraciones tangenciales, estando la plataforma de soporte sometida a vibración vertical armónica controlada. Tres casos son considerados para análisis: una carga no asegurada, una carga asegurada directamente y una carga asegurada indirectamente.

2.1 Carga no asegurada

En esta sección se presenta una primera aproximación al estudio de la respuesta dinámica de las cargas sólidas transportadas sobre las plataformas de vehículos, consistente en el análisis del efecto que las fuerzas de fricción en la interfase carga/plataforma tienen sobre la respuesta de una carga cuyo único elemento de restricción de movimiento consiste precisamente de estas fuerzas. Es sabido que estas fuerzas de fricción son fuertemente afectadas por las condiciones de las superficies y su rugosidad; por el tipo y propiedades térmicas de los materiales; por la humedad y temperatura ambientes; por la carga normal entre las superficies de contacto; y por la estructura molecular y deformaciones plásticas de las capas de las superficies en contacto (Kragelskii y Mikhin, 1988). Adicionalmente, es posible suponer que las interacciones físicas y químicas ligadas a estas fuerzas de fricción, sean afectadas por las deformaciones elásticas de los materiales de los patines o de la plataforma. Asimismo, que la vibración vertical de la plataforma del vehículo pueda influenciar la magnitud de las fuerzas de fricción entre las superficies en contacto, al afectar la fuerza normal aparente.

En esta sección se propone un modelo para el análisis de la respuesta dinámica de una carga al ser sometida a aceleraciones horizontales, considerando situaciones de aseguramiento y no aseguramiento. Esto con el fin de estudiar la importancia que la fricción entre la carga y la plataforma, pudiera tener como elemento que afecte el aseguramiento de la misma.

2.1.1 Descripción del modelo

La Figura 2 ilustra una representación esquemática de una carga asegurada de manera directa mediante un solo amarre, donde la rigidez de este elemento representa la rigidez equivalente asociada al mecanismo de sujeción de la carga. De esta manera, un valor despreciable para la rigidez de este amarre, es equivalente a un nulo aseguramiento, lo cual permitiría evaluar la importancia de la fricción en la interfase carga/plataforma sobre las respuestas de una carga no asegurada. El modelo permite de esta manera la comparación de las respuestas de una carga asegurada y no asegurada, al ser sometida a una aceleración que simule una maniobra de frenado en línea recta (a_x). El desplazamiento de respuesta de la carga es una función del peso de la carga; del coeficiente de fricción carga/plataforma (μ_b); de la vibración vertical (a_z); de la duración de la maniobra de frenado aplicada; del desfase (retraso/adelanto) entre la deceleración longitudinal y la vibración vertical; y de la rigidez del amarre k . De esta manera puede identificarse un valor de umbral de deceleración, más allá del cual una carga de masa m puede desplazarse, como una función de μ_b y a_z :

$$a_x^* = \mu_b (1 - (a_z / g)) \quad (1)$$

en donde a_x^* es el umbral de aceleración longitudinal, expresado en términos de la aceleración de la gravedad (g), más allá del cual la carga experimentará un movimiento longitudinal. Esta expresión sugiere que la aceleración vertical podría causar valores considerablemente menores del umbral de aceleración. Por lo tanto, se tendría una incrementada probabilidad de movimiento de una carga asegurada al estar sometida a una vibración vertical elevada y tener un bajo coeficiente de fricción carga/plataforma.

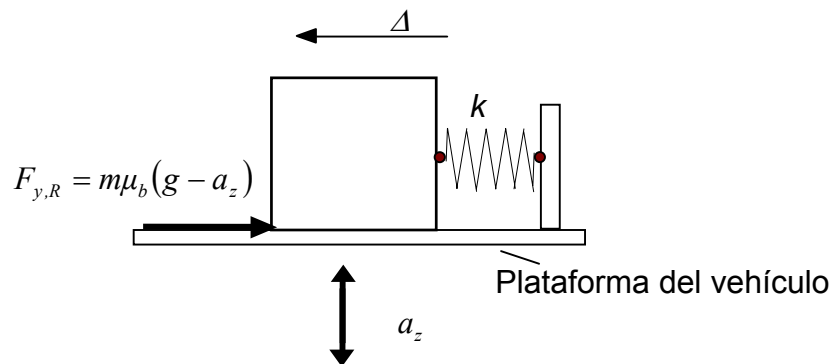


Figura 2: **Representación simplificada de una carga asegurada en una sola dirección**

El desplazamiento longitudinal de la carga al ser sometida a una deceleración ligada a una maniobra de frenado, puede evaluarse al considerar el equilibrio longitudinal de fuerzas. Las ecuaciones de movimiento para la masa m de la carga pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \\ \Delta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \\ \dot{\Delta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{m} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{x,R} \\ a_x \end{Bmatrix} \quad (2)$$

en donde k es la constante de resorte efectiva del amarre y $F_{x,R} = m\mu_b(g - a_z)$ es la fuerza de fricción oponiéndose al movimiento de la carga. Para simplificar el análisis, la aceleración vertical se considera como una función senoidal, de tal manera que $a_z = A_z \sin(2\pi ft + \phi)$, donde A_z es la amplitud de la vibración a la frecuencia f , y ϕ denota el ángulo de fase. El ángulo de fase se emplea para describir el tiempo de retraso/adelanto entre la vibración vertical y la aplicación de la aceleración de frenado. La ecuación anterior se resuelve usando el Método de las Matrices de Transición (Meirovitch, 1986), con objeto de determinar el papel de la fricción sobre el desplazamiento de respuesta de la carga (Δ).

2.1.2 Resultados y discusión

Las ecuaciones de movimiento de la carga son resueltas a fin de estudiar su comportamiento dinámico al estar sometida a una aceleración longitudinal, evaluando de esta manera la efectividad de la fricción como fuerza de oposición al movimiento de la carga. El valor de la constante de resorte del amarre se varía en el modelo con objeto de simular las respuestas de una carga no asegurada y otra asegurada que emplee distintos materiales. Una rigidez de tan sólo 0.05 kN/m es considerada para el caso de la carga no asegurada, mientras que se consideran dos distintos valores de rigidez del amarre para el caso de carga asegurada, que representan dos materiales de diferente longitud, hechos de banda tejida (225 kN/m y 506 kN/m). Los análisis se llevan a cabo tanto para la condición de no vibración como para la situación de vibración vertical, a manera de integrar el efecto de la vibración de la plataforma del vehículo sobre el desplazamiento de la carga.

Desplazamiento de la carga bajo una deceleración constante

En la Figura 3 se muestran los desplazamientos de respuesta de la carga, asegurada y no asegurada, como una función del coeficiente de fricción y de la rigidez efectiva del mecanismo de restricción de movimiento de la carga, para un ambiente libre de vibración. El aseguramiento de la carga en estos resultados es representado mediante dos diferentes magnitudes de rigidez efectiva del amarre, 225 kN/m y 506 kN/m, los cuales corresponden a dos distintas longitudes de amarres hechos de bandas tejidas, 2.24 m y 1.05 m, respectivamente (Billing, 1998). En estas simulaciones, la carga queda expuesta a una aceleración a_x en

forma de pulso rectangular de una corta duración ($\tau = 0.05$ s). Los resultados claramente indican un papel significativo de la fricción en la interfase carga/plataforma. Se observa que el desplazamiento de respuesta de la carga es influenciado de manera importante por el coeficiente de fricción, tanto en el caso de una carga asegurada como no asegurada. En el caso de una carga asegurada, se observa que el desplazamiento de la carga está relacionado de manera casi lineal con el coeficiente de fricción. El efecto de restricción del movimiento por parte de los amarres tiende a disminuir para coeficientes de fricción mayores de 0.25. Los resultados sugieren asimismo que la aplicación de una deceleración de corta duración produce magnitudes similares de desplazamiento, tanto para la carga asegurada como la no asegurada, cuando se cuenta con una fricción elevada ($\mu_b \geq 0.2$).

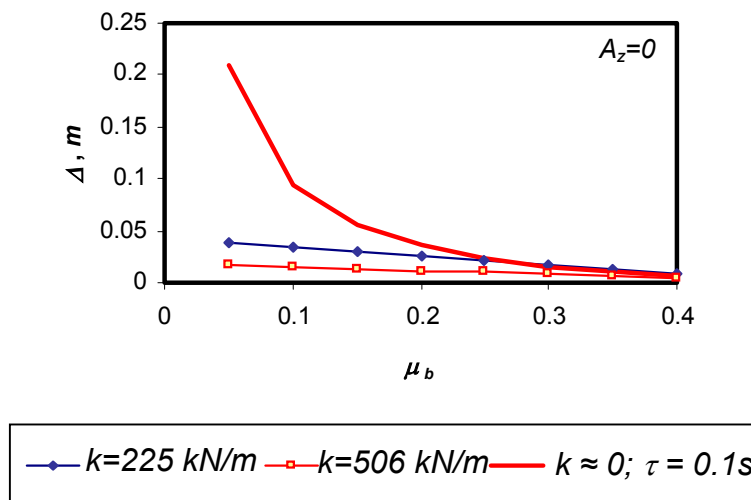


Figura 3: Efecto del coeficiente de fricción μ_b sobre el desplazamiento de respuesta de una carga asegurada y no asegurada.

Se observa que el desplazamiento de una carga no asegurada, en un ambiente libre de vibración, está directamente relacionado tanto con la fuerza de fricción disponible como con la magnitud y duración de la deceleración aplicada. La ausencia de un elemento activo de restricción del movimiento de la carga (un amarre), aunada a una fricción superficial pequeña produce, en general, desplazamientos considerables de la carga (Δ), tal como se muestra en la Figura 3. La magnitud del desplazamiento máximo de una carga no asegurada, se incrementa de manera considerable al aumentar la magnitud de la deceleración, como se muestra en la Figura 4. Asimismo, en la Figura 5 se muestra la influencia de la duración del pulso de frenado (τ) sobre los desplazamientos máximos de la

carga. Los resultados muestran que el desplazamiento de la carga es afectado de manera no lineal, tanto por el nivel de la deceleración como por el tiempo de su duración. La magnitud del desplazamiento tiende a incrementarse al aumentar a_x y τ , sin importar el valor de μ_b . Se puede apreciar, sin embargo, que la sensibilidad del desplazamiento máximo al valor de μ_b , disminuye en la medida que μ_b se incrementa, al tiempo que su sensibilidad a la duración del pulso de aceleración (τ) se incrementa considerablemente al aumentar esta duración, de manera especial para valores bajos de μ_b . Como era de esperarse, al igualar la aceleración aplicada el valor del coeficiente de fricción, no se observa movimiento alguno de la carga. No obstante esto, la carga despliega un desplazamiento excesivo al estar sometida a una aceleración de frenado severa, en especial para valores bajos de μ_b .

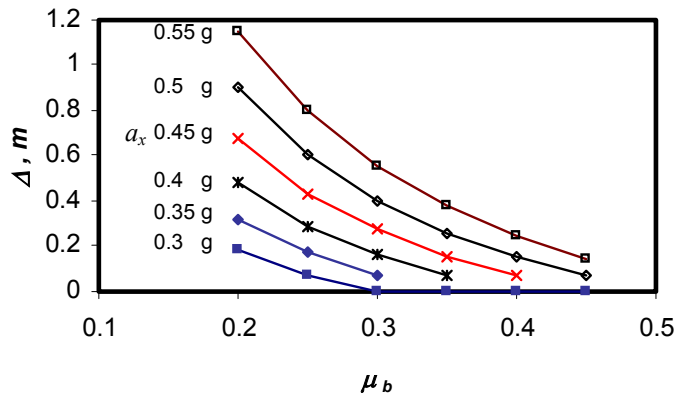
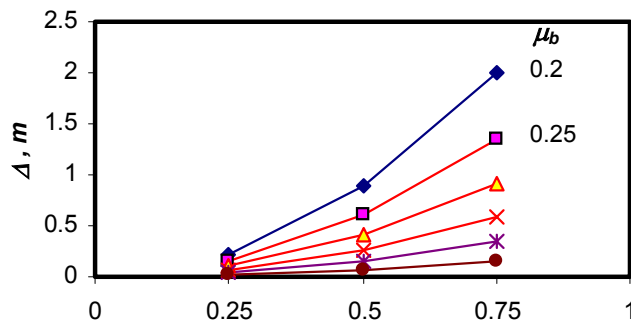


Figura 4: Influencia del nivel de aceleración (a_x) sobre el desplazamiento sufrido por una carga no asegurada como una función de μ_b . ($\tau=0.5\text{s}$; $A_z=0$).

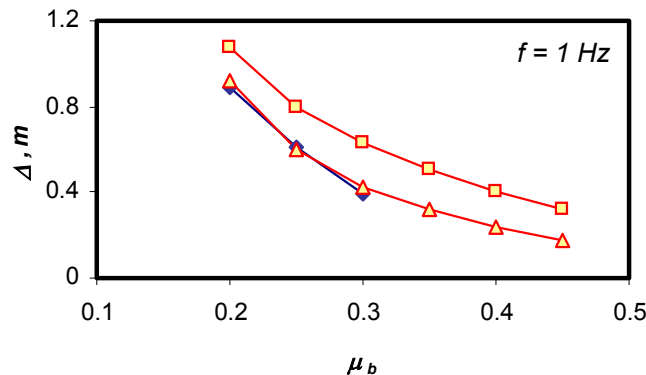


0.3
0.35
0.4
0.45

Duración del pulso de aceleración

Figura 5: Influencia de la duración del pulso de aceleración longitudinal sobre el desplazamiento sufrido por una carga no asegurada ($A_z=0$; $a_x=0.5$ g).

Las simulaciones se llevan a cabo para tres diferentes valores de ángulos de fase: $-\pi/2$, 0 , y $\pi/2$. La Figura 6 ilustra los desplazamientos de una carga sometida a una aceleración vertical ($A_z = 0.5g$) para diferentes frecuencias y ángulos de fase, como una función del coeficiente μ_b . Un ángulo de fase de $\phi = \pi/2$, implica que la fuerza de contacto entre la carga y la plataforma se aproxima a su valor mínimo al aplicar la aceleración a_x ; $\phi = -\pi/2$ implica que la fuerza de contacto carga-plataforma está al máximo en el momento de aplicar a_x . En el caso de $\phi = 0$, la deceleración es aplicada en el momento de que $a_z = 0$. Los resultados hacen ver que, tanto un valor positivo como un valor negativo de ϕ , producen desplazamientos de la carga casi idénticos, independientemente de la frecuencia de vibración. Un ángulo de fase igual a cero, sin embargo, produce un desplazamiento de la carga ligeramente mayor, en especial para el caso de una frecuencia de excitación baja (1 Hz). La magnitud del desplazamiento de la carga tiende a disminuir al incrementarse el coeficiente de fricción, independientemente de la frecuencia de vibración y ángulo de fase. El efecto despreciable de la frecuencia de vibración es puesto en evidencia a partir del promedio de la fuerza de resistencia al movimiento, mostrada en la Figura 7. La resistencia promedio debida a la fricción efectiva asume un valor constante para frecuencias de vibración mayores de 2 Hz, independientemente del ángulo de fase.



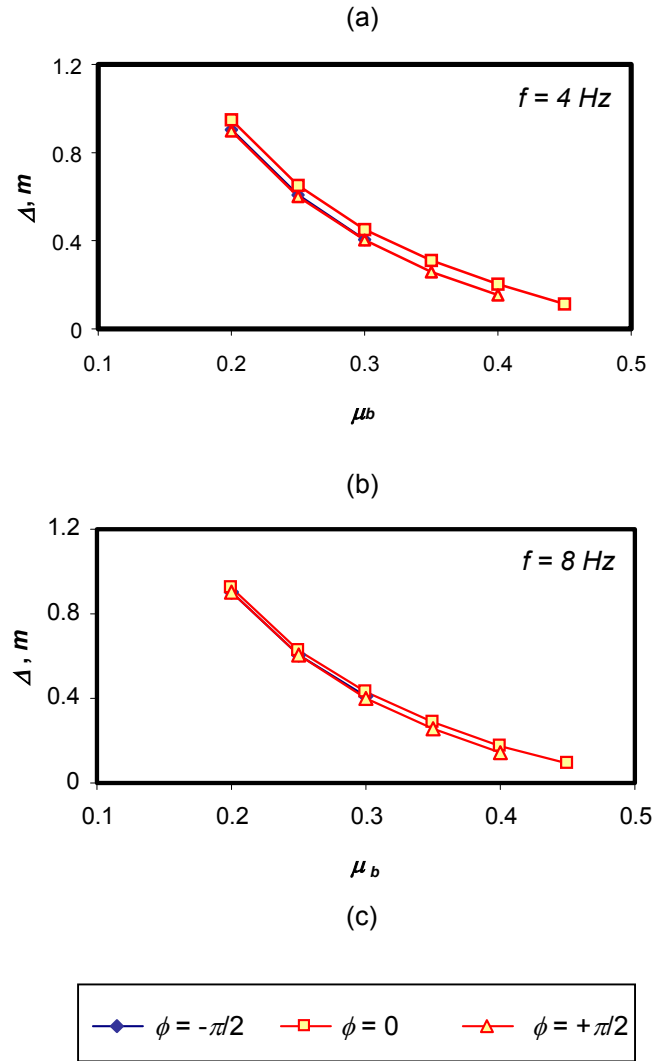


Figura 6: Influencia del ángulo de fase ϕ y de la frecuencia de vibración sobre el desplazamiento de una carga no asegurada.

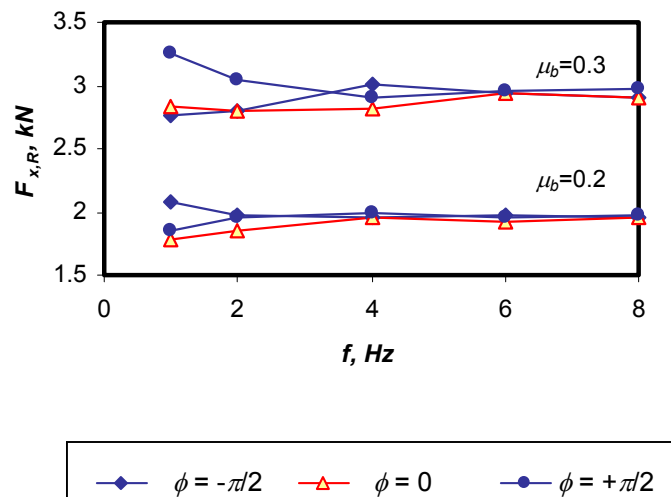


Figura 7: **Fuerzas de fricción promedio como una función de la frecuencia de la vibración impuesta.**

La Figura 8 ilustra el efecto que sobre el desplazamiento de la carga tiene la magnitud de la vibración vertical. Estos resultados revelan de manera clara los importantes efectos que tanto la frecuencia de vibración como el valor del coeficiente de fricción, tienen sobre el desplazamiento máximo de la carga. El desplazamiento de la carga tiende a incrementarse al aumentar la amplitud de vibración a una baja frecuencia, de manera casi lineal. A alta frecuencia, el efecto de la amplitud de vibración es relativamente insignificante. Esta insensibilidad a la magnitud de la vibración a altas frecuencias, se atribuye a que el valor de la fuerza de fricción promedio, tiende a aproximarse a un valor constante en la medida en que la frecuencia es incrementada. La Figura 9 muestra el desplazamiento resultante de una carga que ha sido asegurada, como una función de la magnitud y frecuencia de la vibración. Los resultados muestran tendencias similares para la carga asegurada, mientras que los desplazamientos resultantes son considerablemente menores. El efecto de las variaciones en la fricción entre la carga y la plataforma, es relativamente insignificante en el caso de la carga asegurada sujeta a vibración vertical.

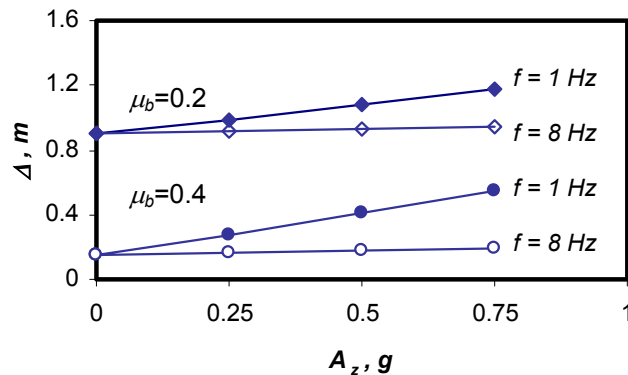


Figura 8: Influencia de la magnitud de la aceleración de la vibración sobre el desplazamiento de la carga. ($a_x = 0.5 \text{ g}$; $\tau = 0.5 \text{ s}$).

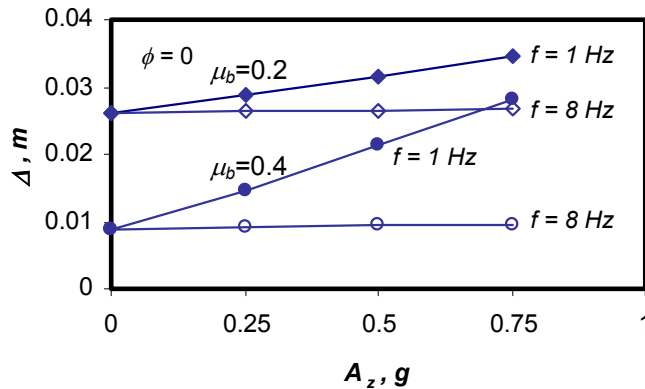


Figura 9: Influencia de la amplitud de la aceleración de la vibración sobre el desplazamiento de una carga asegurada. ($a_x = 0.5 \text{ g}$; $k=225 \text{ kN/m}$).

2.1.3 Observaciones finales al estudio de la carga no asegurada

El modelo simple propuesto permite estudiar la importancia que la fricción entre la carga y la plataforma tiene sobre el desplazamiento de la carga. Asimismo, permite caracterizar el desplazamiento de la carga al ser sometida a una aceleración longitudinal (atribuida a una maniobra de frenado en línea recta), y a vibraciones asociadas al vehículo. Los desplazamientos resultantes son evaluados como funciones de las resistencias al movimiento de la carga, provistas por la fricción entre la carga y la plataforma, y por efecto de un amarre. Los análisis se llevaron a cabo, tanto para la carga asegurada como para la no asegurada, con objeto de estudiar la influencia de la vibración vertical y de la fricción carga-plataforma, sobre el desplazamiento de la carga.

Los resultados muestran que el desplazamiento de la carga es afectado de manera importante por la rigidez de los amarres; por el valor del coeficiente de fricción; por la magnitud y duración de la aceleración de frenado; y por la frecuencia de la vibración vertical. La efectividad de la restricción al movimiento de la carga está directamente relacionada con el coeficiente de fricción. Se encuentra, asimismo, que el desplazamiento de la carga es poco sensible a las variaciones en la amplitud de la vibración en el caso de una alta frecuencia, al tiempo que el desplazamiento de la carga se incrementa al tener una excitación de la plataforma a baja frecuencia.

2.2 Carga asegurada con amarres directos

En esta sección se presenta un modelo simplificado que permite obtener las características de respuesta dinámica de una carga idealizada, sujeta de manera directa mediante amarres no horizontales. En este ensamble, las fuerzas desarrolladas dentro de los amarres están directamente relacionadas con la efectividad de la sujeción. Los resultados presentados por Billing (1996) sugieren que la rigidez longitudinal de los amarres, es afectada principalmente por el ángulo y la tensión inicial en los mismos, como se ilustra en la Figura 10 para el caso de un amarre hecho de cadena metálica. Una rigidez efectiva más alta provee una resistencia mayor al desplazamiento de la carga, lo cual puede lograrse mediante la consideración de mayores tensiones iniciales y menores ángulos para los amarres. Los resultados sugieren que el elevar diez veces la tensión inicial en los amarres, provee un incremento aproximado del 50 % en la efectividad del amarre para asegurar la carga.

La figura 11(a) ilustra una representación esquemática de una carga sujeta longitudinalmente mediante dos amarres no-horizontales. La magnitud del desplazamiento de la carga, y las fuerzas correspondientes desarrolladas en el amarre trasero (T) y delantero (D), al ser sometida la carga a una aceleración longitudinal (a_x), depende de la elasticidad de los elementos de restricción (k_T, k_D), de los ángulos de los amarres (θ_T, θ_D), de la tensión inicial en cada uno de los amarres (P_{0T}, P_{0D}), del coeficiente de fricción entre la carga y la plataforma (μ_s), y de la naturaleza de la vibración vertical de la plataforma de soporte de la carga (magnitud y frecuencia).

En la medida que la carga se desplaza hacia adelante, la fuerza desarrollada en el amarre trasero se incrementa, al tiempo que la fuerza en el amarre delantero tiende a disminuir. Si no existe tensión inicial alguna en los amarres, el ensamble de aseguramiento podría ser representado mediante un sistema masa – resorte equivalente (Fig. 11(b)). De esta manera, la fuerza debida a la tensión inicial en el amarre podría ser incorporada en el modelo como una fuerza externa que incorpore las variaciones en la inclinación de los amarres (Fig. 11(c)). El modelo desarrollado en este estudio consiste entonces de la respuesta dinámica de un sistema que incluye una masa y un resorte equivalente, al cual se incorporan las fuerzas iniciales en los amarres.

Se asume que los amarres directos son instalados a un cierto ángulo, anclados a puntos fijos de la estructura de la plataforma de soporte de la carga, la cual se representa mediante una masa idealizada. La altura de la carga se considera que es lo suficientemente pequeña como para hacer despreciables las contribuciones de la oscilación en volcadura de la carga. En las formulaciones analíticas, esta altura de la carga se asume como unitaria, de tal manera que las longitudes de los amarres podrían ser expresadas como una función de los ángulos de los mismos (θ_T y θ_D).

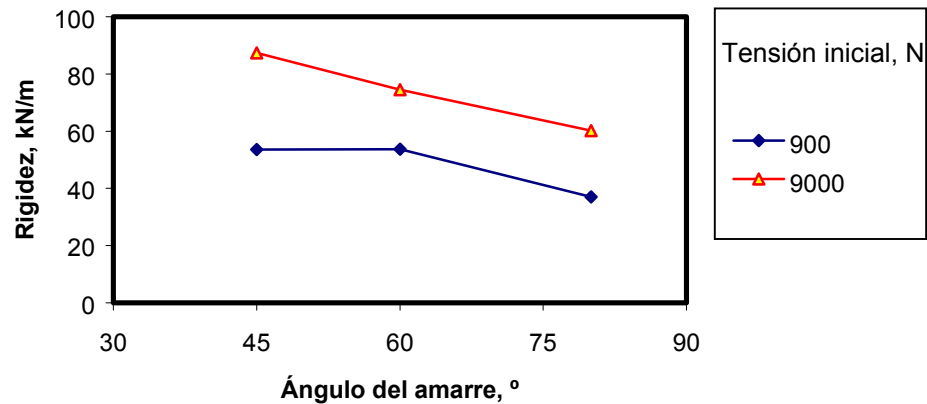
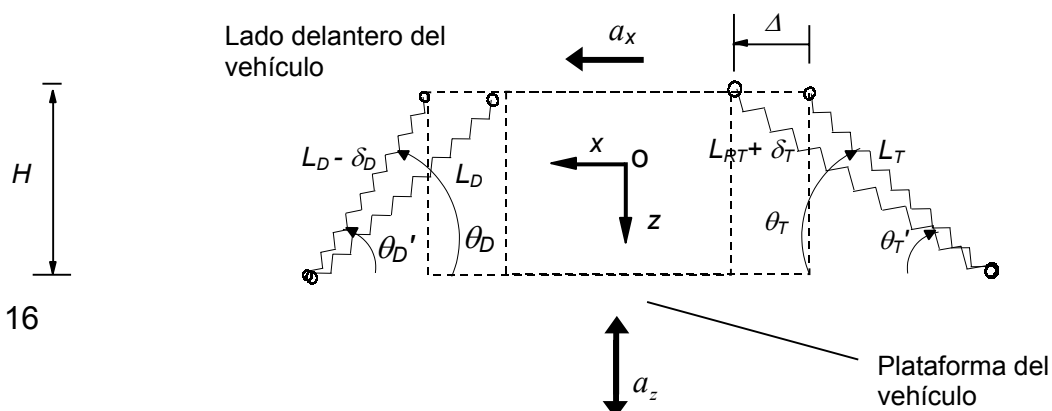


Figura 10: Rigidez lateral de un ensamble de amarres indirectos.

Las propiedades de rigidez de los amarres (k_T , k_D) son tomadas de los resultados de experimentos efectuados por Billing (1998). En ese estudio se reportan las propiedades de fuerza-elongación de dos materiales de amarre distintos: una cadena acero de 2.88 m de largo con un límite de carga de trabajo de 20 kN; y una banda tejida de 2.24 metros de largo con una carga límite de trabajo de 40 kN. Los datos reportados hacen evidente una relación casi lineal entre la carga aplicada y la elongación.



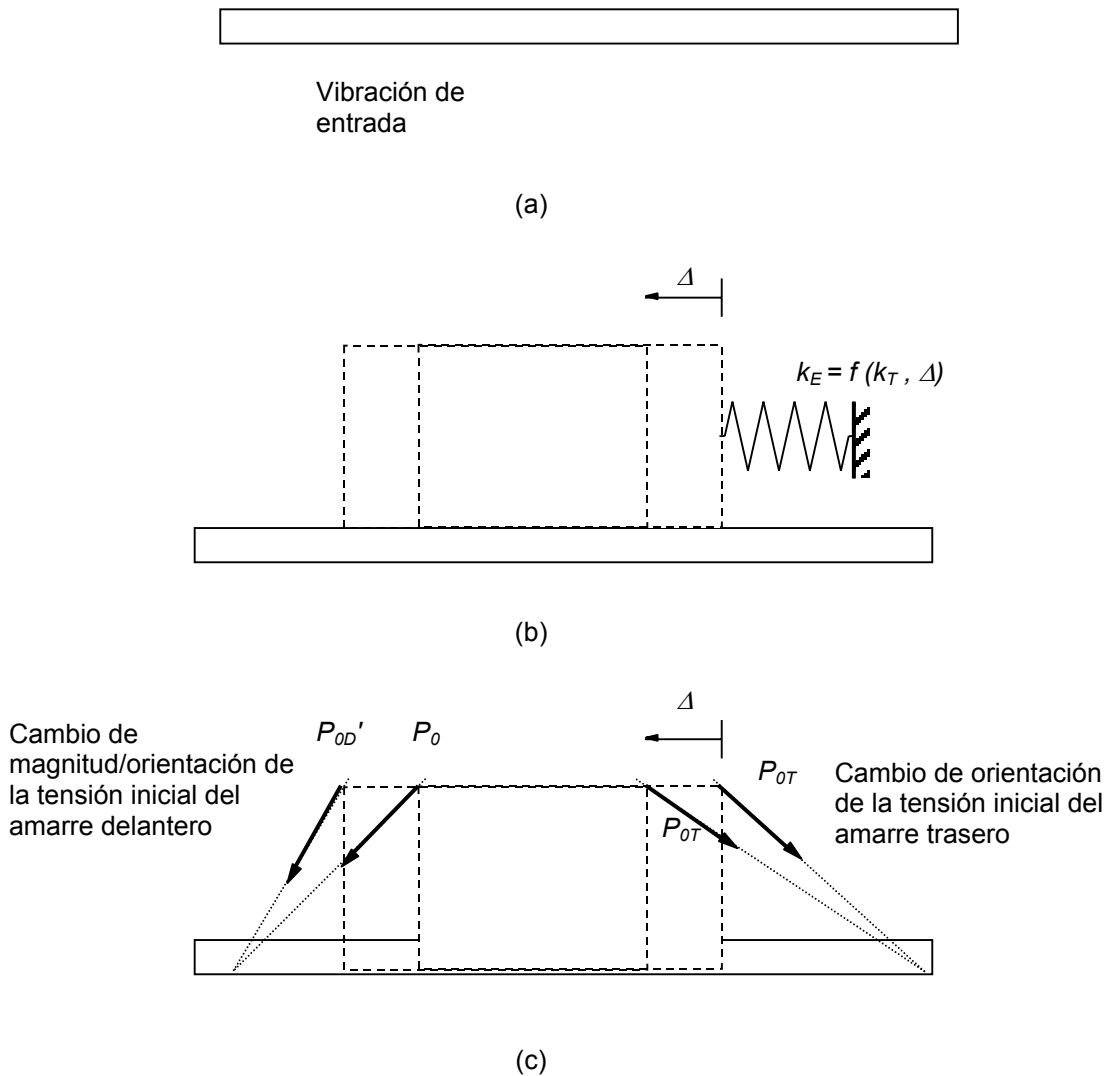


Figura 11: **Representación simplificada de una carga sujeta directamente sometida a una aceleración horizontal (a_x) y vertical (a_z): (a) Modelo con los amarres tensionados de manera inicial; (b) Representación de rigidez equivalente ante una nula tensión inicial en el amarre; y (c) tensiones iniciales de los amarres consideradas como fuerzas externas ejercidas sobre la carga.**

Adicionalmente, la rigidez de los amarres está relacionada con el ángulo del amarre. Considerando una altura unitaria para la carga puede establecerse una relación entre la longitud del amarre y su rigidez axial k_R (o constante de resorte), esto mediante el uso de la Ley de Hooke; $k_R = AE / L$, donde A es el área de la sección transversal y E es el módulo de elasticidad del amarre. Esta rigidez axial se incrementa entonces al aumentar el ángulo del amarre, como se muestra en la Figura 12, lo cual se debe al incremento en la longitud del amarre.

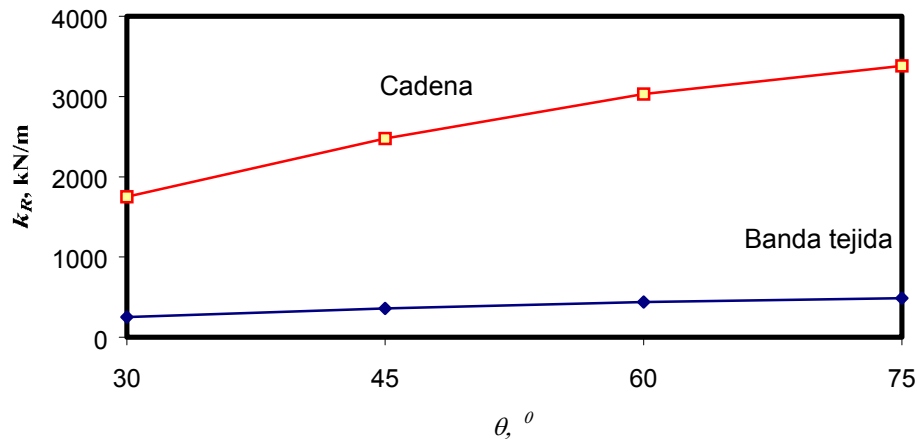


Figura 12: Variaciones en la constante de resorte del amarre para diferentes ángulos de los amarres.

2.2.1 Rigidez longitudinal equivalente

Para una nula tensión inicial, la rigidez axial del amarre trasero contribuye de manera única para establecer la rigidez efectiva del aseguramiento. Los efectos de las tensiones iniciales y las variaciones en sus orientaciones, son incorporadas en el modelo como fuerzas externas.

La componente longitudinal de la fuerza instantánea en el amarre, puede expresarse mediante la fuerza restauradora desarrollada en un resorte equivalente k_E , que representa la elasticidad del amarre trasero. Asumiendo desplazamientos pequeños y propiedades lineales para las propiedades elásticas de los amarres a lo largo de sus ejes, la componente longitudinal de la fuerza del amarre, P_x , puede derivarse mediante la siguiente ecuación:

$$P_x = k_T \delta_T \cos \theta_T \quad (3)$$

en donde el cambio en la longitud del amarre trasero δ_T y el ángulo instantáneo θ_T , son obtenidos a partir de las siguientes dos relaciones (Fig. 13):

$$(L_T + \delta_T)^2 = H^2 + (L_T \cos(\theta_T) + \Delta)^2 \quad (4)$$

$$(L_T + \delta_T) \cos(\theta_T) = \Delta + L_T \cos(\theta_T) \quad (5)$$

La solución simultánea de las ecuaciones (3) a la (5), da la rigidez equivalente de los amarres como:

$$k_E = \frac{\partial}{\partial \Delta}(P_x) \quad (6)$$

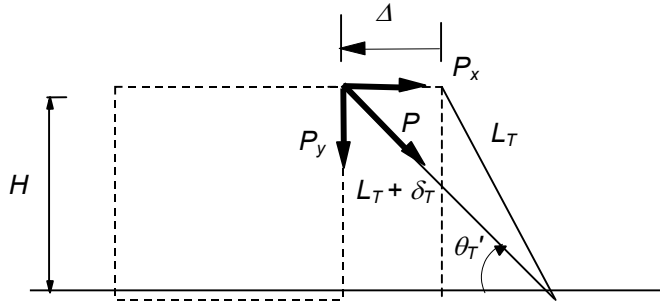


Figura 13: Representación de la carga desplazada en caso de que sea nula la tensión inicial en ambos amarres.

Las características de rigidez longitudinal equivalente (k_E) de los dos materiales considerados (banda tejida y cadena), son evaluadas mediante el uso de las formulaciones anteriores y usando los datos publicados por Billing (1998). Los resultados obtenidos son expresados como una función del desplazamiento Δ y del ángulo del amarre, θ_T , como se muestra en la Figura 14. Estos resultados hacen evidente una disminución de k_E en la medida en que los ángulos del amarre son incrementados, al tiempo que los valores para sendos materiales convergen al tener ángulos más grandes para el amarre. La rigidez equivalente se incrementa al incrementarse el desplazamiento de la carga, lo cual provoca un endurecimiento progresivo del aseguramiento. Esta tendencia también fue observada en el estudio

experimental conducido por Billing (1996). Asimismo, la rapidez de esta rigidización, se incrementa al aumentar el ángulo del amarre.

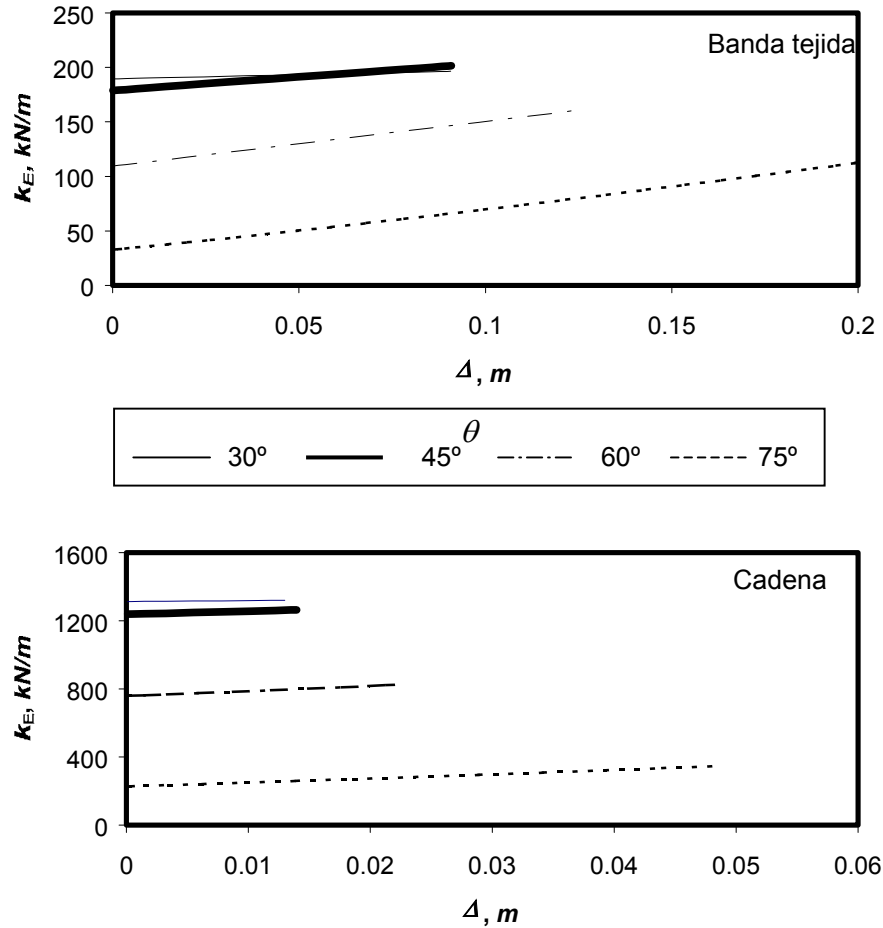


Figura 14: Variaciones en la rigidez equivalente del aseguramiento, como una función del ángulo del amarre y del desplazamiento de la carga.

2.2.2 Tensiones iniciales

Las tensiones iniciales, incorporadas como fuerzas externas, están asociadas a las elongaciones iniciales de los amarres (δ_{0D} , δ_{0T}). Las variaciones en estas fuerzas están relacionadas con los cambios en las longitudes y orientaciones de los amarres, como se muestra en la Figura 15. La magnitud de la tensión inicial en el amarre trasero ($P_{0T}=k_T \delta_{0T}$) no cambia, pero su orientación se modifica en tanto la carga se desplace. La tensión en el amarre delantero ($P_{0D}=k_D \delta_{0D}$), sin embargo, disminuye como una función del desplazamiento de la carga, Δ . La suma de las

componentes horizontal y vertical de las tensiones iniciales en los amarres (P_{0x} , P_{0y}), pueden expresarse de la siguiente manera:

$$P_{0x} = (P_{0D} - k_D \delta_D) \cos(\theta_D') - P_{0T} \cos(\theta_T') \quad (7)$$

$$P_{0y} = (P_{0D} - k_D \delta_D) \sin(\theta_D') + P_{0T} \sin(\theta_T') \quad (8)$$

La ecuación (7), sugiere que la carga podría desplazarse como resultado del desequilibrio en las tensiones iniciales, o debido a diferencias entre el ángulo θ_T y θ_D , aunque no existiera la aceleración horizontal (a_x).

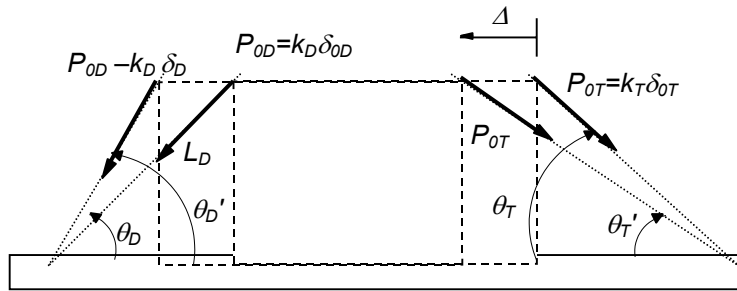


Figura 15: Tensiones iniciales aplicadas a la carga desplazada.

2.2.3 Fuerza de fricción

Asumiendo propiedades ideales de fricción entre la carga y la plataforma, la fricción desarrollada en la interfase carga/plataforma puede ser expresada como sigue:

$$F_x = \mu_s F_z \quad (9)$$

donde μ_s es el coeficiente deslizante de fricción y F_z es la fuerza vertical total, misma que considera a los componentes de la tensión inicial y fuerzas instantáneas en los amarres, y la fuerza de inercia. Con referencia a la Figura 12 y la ecuación (8), la fuerza vertical resultante puede ser expresada como:

$$F_z = P_{0y} + m(g - a_z) \quad (10)$$

donde a_z es la aceleración debida a la vibración vertical de la plataforma. En este análisis, la vibración vertical es considerada como un movimiento armónico, de tal

manera que $a_z = A_z \text{sen}(2\pi f t + \phi)$ donde A_z es la amplitud de la aceleración, f es la frecuencia y ϕ es el ángulo de fase.

2.2.4 Ecuaciones de movimiento

El movimiento longitudinal de la carga al ser sometida a una aceleración tangencial (de frenado, por ejemplo), puede ser evaluada al considerar el equilibrio longitudinal de fuerzas. La ecuación de movimiento de la masa de la carga puede ser expresada como:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \\ \ddot{x} \\ x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -k_E & 0 \\ m & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -I & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{xR} - P_{0x} \\ a_x \end{Bmatrix} \quad (11)$$

donde k_E y las fuerzas de fricción que se oponen al movimiento de la carga, son funciones no lineales de Δ y de los ángulos θ_T' y θ_D' . La ecuación anterior se resuelve usando el Método de las Matrices de Transición (Meirovitch, 1986), determinándose de esta manera el movimiento de la carga al aplicársele una aceleración horizontal tipo escalón.

2.2.5 Resultados y análisis

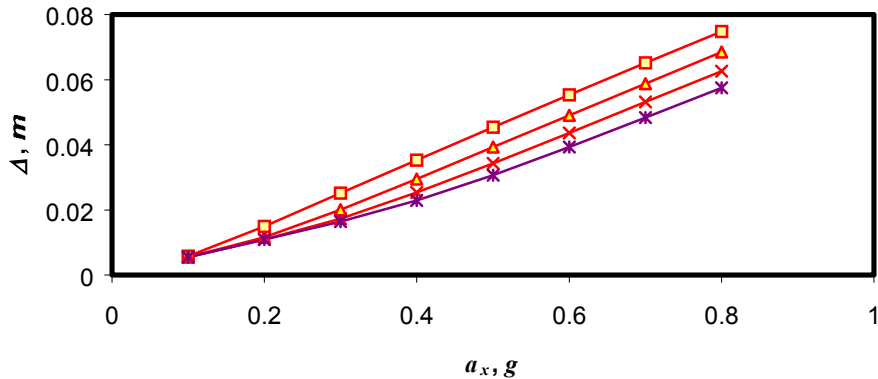
La ecuación de movimiento de la masa asegurada de manera directa, es resuelta con objeto de evaluar la efectividad de los amarres. Esta efectividad es medida en términos del desplazamiento de la carga y de la fuerza máxima generada en el amarre trasero. Los análisis se llevan a cabo para una carga de 1000 kgs, sometida a una deceleración constante. Los resultados son discutidos con objeto de proporcionar datos para mejorar el análisis de los efectos, que sobre la efectividad del aseguramiento de la carga, tienen la vibración del vehículo, la fricción carga/plataforma, la tensión inicial y el ángulo de los amarres.

2.2.5.1 Condiciones de no vibración y no fricción

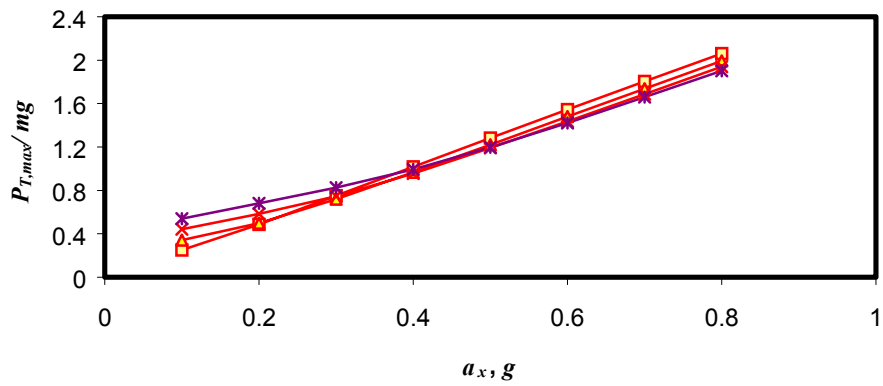
Asumiendo una fricción despreciable entre la carga y la plataforma ($\mu_s=0$), la Figura 16 ilustra, como una función de la tensión inicial y de la magnitud de la deceleración constante aplicada, el desplazamiento (Δ) que sufre una carga directamente asegurada, así como las fuerzas que se desarrollan en los amarres (P_{0T}, P_{0D}). La aceleración a_x es aplicada como una perturbación en escalón en el instante $t=0$. Se considera que las tensiones iniciales en los amarres y sus ángulos, son idénticos para ambos amarres ($P_{0R} = P_{0L}$ y $\theta_D = \theta_T$). La tensión inicial es representada como una fracción del peso de la carga.

Los resultados muestran que el desplazamiento de la carga se incrementa de manera casi lineal al incrementar la magnitud de la deceleración, específicamente cuando la tensión inicial es baja, en el orden de 0.1 mg (Figura 16(a)). La tensión final en el amarre delantero disminuye rápidamente en la medida que se desplaza la carga, como se muestra en la Figura 16(c), independientemente del nivel de aceleración. La tensión correspondiente en el amarre trasero, se incrementa de manera casi lineal con la deceleración, en la medida que la carga se desplaza. Esta tendencia también fue observada por Billing (1996). Resulta interesante notar que para las deceleraciones más altas, las tensiones iniciales más grandes provocan fuerzas relativamente bajas en el amarre trasero ($P_{T,max}$). Esto es atribuido a los mayores desplazamientos de la carga, producto de las más altas deceleraciones.

La Figura 17 ilustra el efecto que el ángulo de los amarres ($\theta_D = \theta_T$), tiene sobre la respuesta de la carga, para dos materiales diferentes (banda tejida y cadena). Los resultados muestran que para ambos materiales y de manera no lineal, el desplazamiento de la carga se incrementa al aumentar el ángulo del amarre. Esta tendencia también fue reportada por Billing (1996). El material de banda tejida, con su rigidez relativamente baja, produce desplazamientos de la carga mayores. Para ángulos mayores de los amarres, las cadenas producen un menor desplazamiento de la carga, pero considerablemente mayores fuerzas máximas en los amarres ($P_{T,max}$). El efecto del material del amarre sobre $P_{T,max}$, sin embargo, es despreciable para ángulos de los amarres menores de 45° .



(a)



(b)

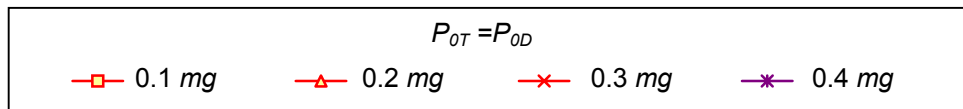
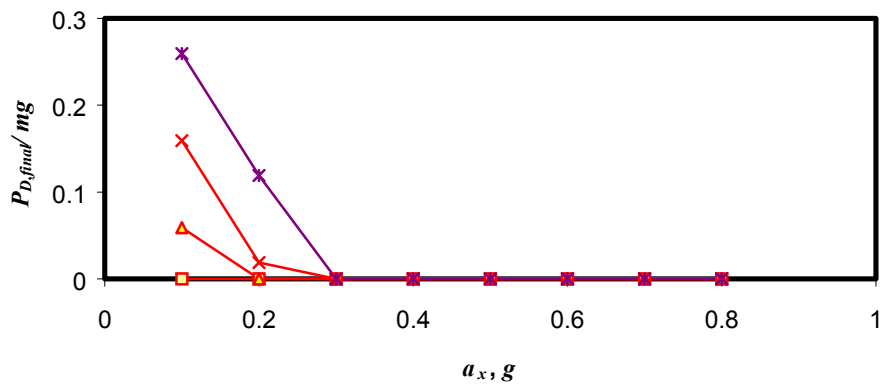
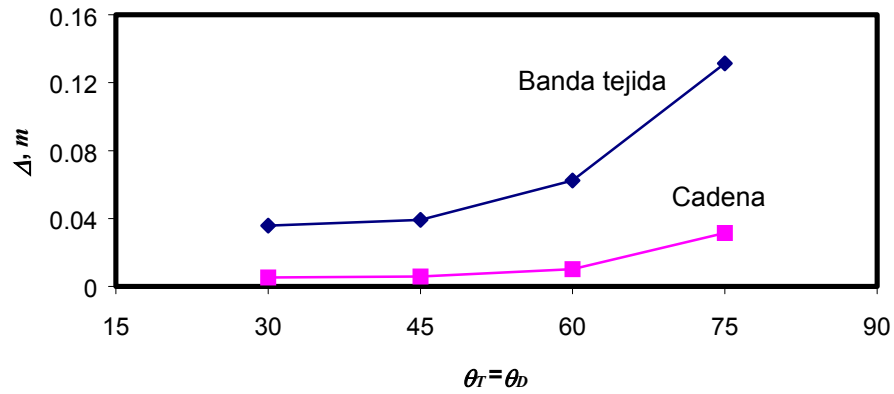
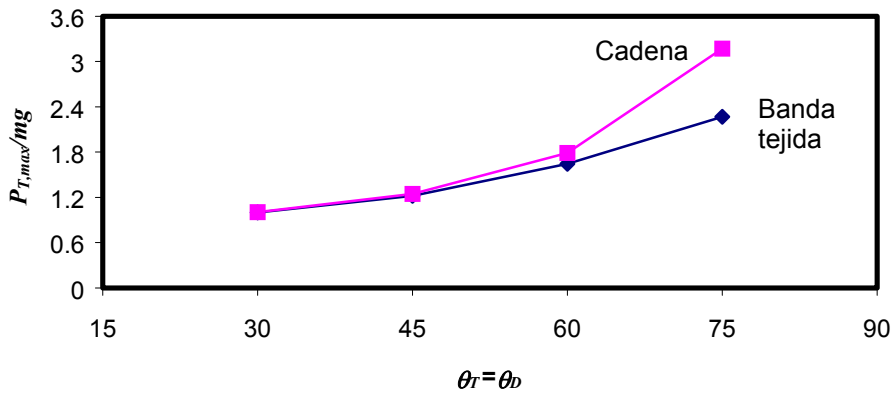


Figura 16: Influencia de a_x y la tensión inicial sobre la respuesta de una carga asegurada directamente ($\theta_D = \theta_T = 45^\circ$; Sin fricción; banda tejida).



(a)



(b)

Figura 17: Influencia del ángulo y material del amarre sobre las respuestas de una carga asegurada de manera directa bajo condiciones de no-fricción ni vibración de la plataforma. ($P_{OT} = P_{OD} = 0.2 \text{ mg}$; $a_x = 0.5 \text{ g}$)

2.2.5.2 Vibración de la plataforma del vehículo

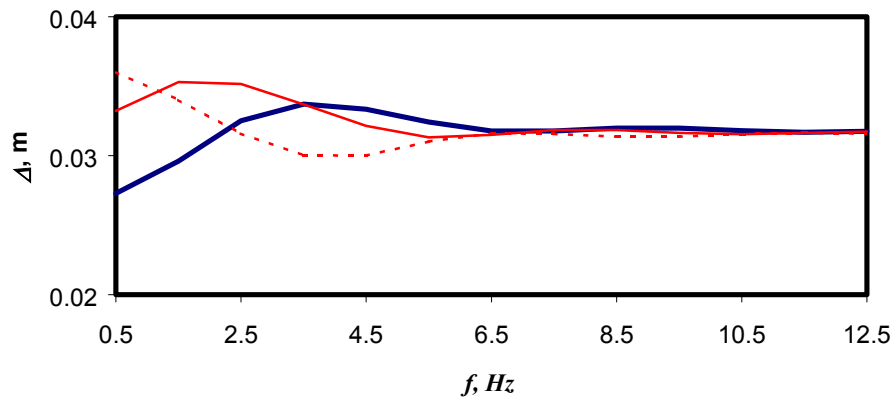
En esta sección se evalúa, como una función de la frecuencia de vibración de la plataforma y del material del amarre, el desplazamiento de la carga y las fuerzas desarrolladas en los amarres directos de una carga, al someterse el sistema a

una aceleración longitudinal de 0.5 g, y estar vibrando la plataforma armónicamente.

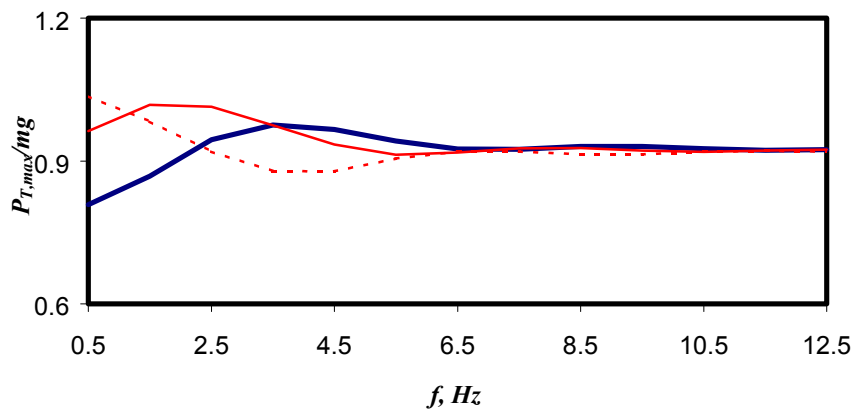
Los análisis se efectúan para una vibración de amplitud máxima de 0.5 g, para un rango de frecuencias de 0.5 a 12 Hz, considerando al ángulo de fase como $-\pi/2$, 0, y $\pi/2$ (para $t=0$). El coeficiente de fricción carga/plataforma se asume como 0.1. Como se puede apreciar en la Figura 18 para el caso de amarres hechos de banda tejida, tanto el desplazamiento de la carga como la fuerza en el amarre son afectados por la frecuencia de la vibración y el ángulo de fase.

Un ángulo de fase de $\phi = \pi/2$ implica que la fuerza de contacto de la carga con la plataforma se acerca a su mínimo al momento en que a_x es aplicada, mientras que $\phi = -\pi/2$ implica que la fuerza de contacto está al máximo al momento de aplicación de a_x . Para $\phi = 0$, la deceleración se aplica cuando $a_z = 0$. Estos resultados hacen evidente la existencia de variaciones importantes en la respuesta del sistema cuando se tiene una baja frecuencia de vibración ($f < 6.5$ Hz) lo cual es, muy probablemente, atribuible a la frecuencia natural de vibración del sistema (f_0), así como al promedio de la fuerza de fricción disponible durante el desplazamiento de la carga. La frecuencia natural del sistema $f_0 = \left(\frac{1}{2\pi}\right)\sqrt{k_E/m}$,

sin embargo, depende del ángulo de los amarres, como se muestra en la Figura 19, la cual proporciona los valores iniciales de f_0 (esto es, para $\Delta=0$). La frecuencia natural del sistema tiende a disminuir rápidamente en la medida que el ángulo de los amarres excede los 45°.



(a)



(b)

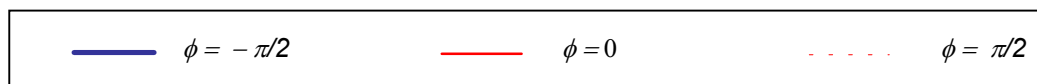


Figura 18: Influencia de la frecuencia y fase de la vibración vertical sobre el desplazamiento de la carga y fuerza máxima en el amarre trasero (banda tejida; $\mu=0.1$; $\theta_D=\theta_T=45^\circ$; $a_x=0.5$ g; $A_z=0.5$ g; $P_{OD}=P_{OT}= 0.1$ mg).

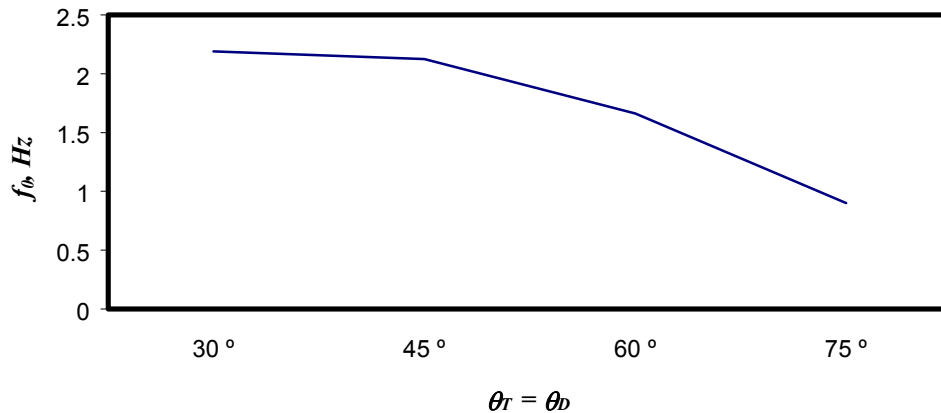
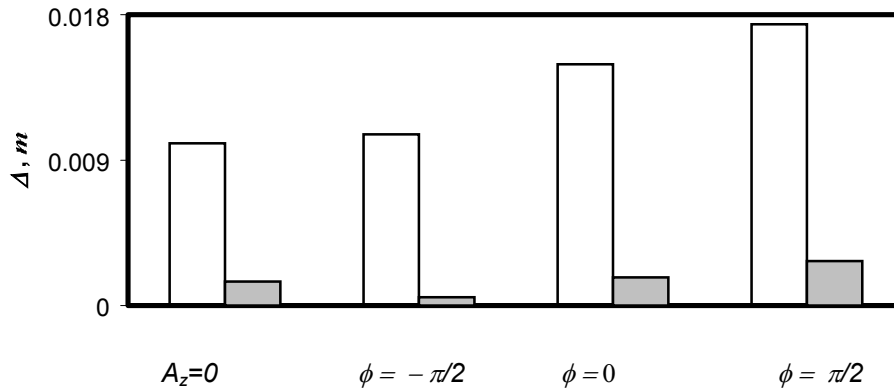
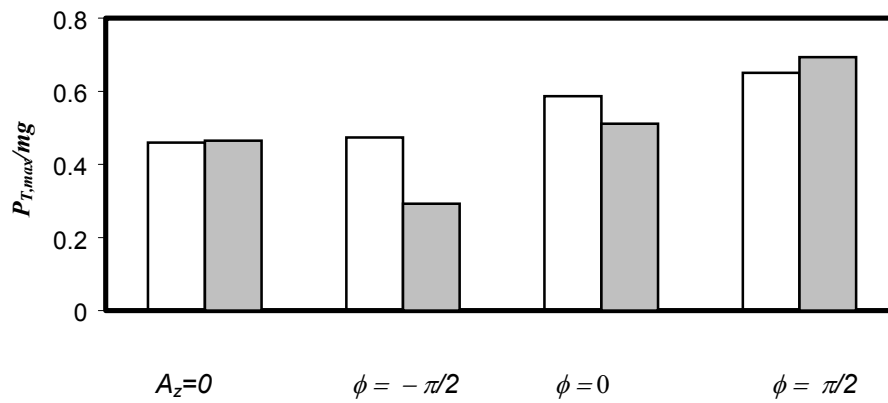


Figura 19: **Frecuencia natural inicial de la carga asegurada como una función del ángulo inicial de los amarres.**

La Figura 20 ilustra el efecto de la vibración vertical sobre la respuesta de la carga para dos diferentes materiales de amarre y diferentes ángulos de fase ϕ . De acuerdo con estos resultados, tanto para el amarre tejido como para el de cadena, la presencia de la vibración vertical a 1 Hz provoca los más grandes valores para el desplazamiento y fuerza en el amarre trasero. La fase $\phi = \pi/2$, provoca los más grandes desplazamientos de la carga, lo cual es atribuido a la mínima fricción disponible en el momento de aplicación de la deceleración (a_x). Estos resultados sugieren también que el uso del amarre hecho de banda tejida, podría producir desplazamientos considerablemente más grandes cuando se hace la comparación con los amarres hechos de cadena. Esto sucede al tiempo que las diferencias en las fuerzas en el amarre son relativamente pequeñas. Tales variaciones pueden ser atribuidas a la alta rigidez de las cadenas, así como a las diferencias en la frecuencia natural f_0 y al valor promedio de la fuerza de fricción disponible. La respuesta de la carga se aproxima a valores constantes en el rango de 0.054 s a 0.072 s en el caso de las cadenas, y 0.17 s a 0.516 s para el aseguramiento con banda tejida, bajo las diferentes condiciones de vibración mostradas en la Figura 20. El desplazamiento de la carga también se incrementa casi linealmente al aumentar la magnitud de la vibración vertical máxima, como se muestra en la Figura 21. La vibración vertical tiende a reducir el valor neto de la fuerza de fricción disponible y podría producir, en función del material del amarre, un desplazamiento incrementado de la carga del orden del 10 al 30 por ciento.



(a)



(b)

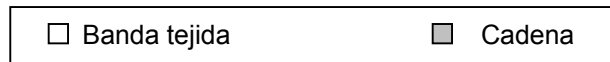


Figura 20: Influencia de la vibración vertical y su fase sobre el desplazamiento de la carga y la fuerza en el amarre trasero ($\mu=0.25$; $\alpha_x=0.5$ g; $A_z = 0.5$ g; $P_{0D}=P_{0T}=0.2$ mg; $f = 1$ Hz; $\theta_D = \theta_T = 45^\circ$).

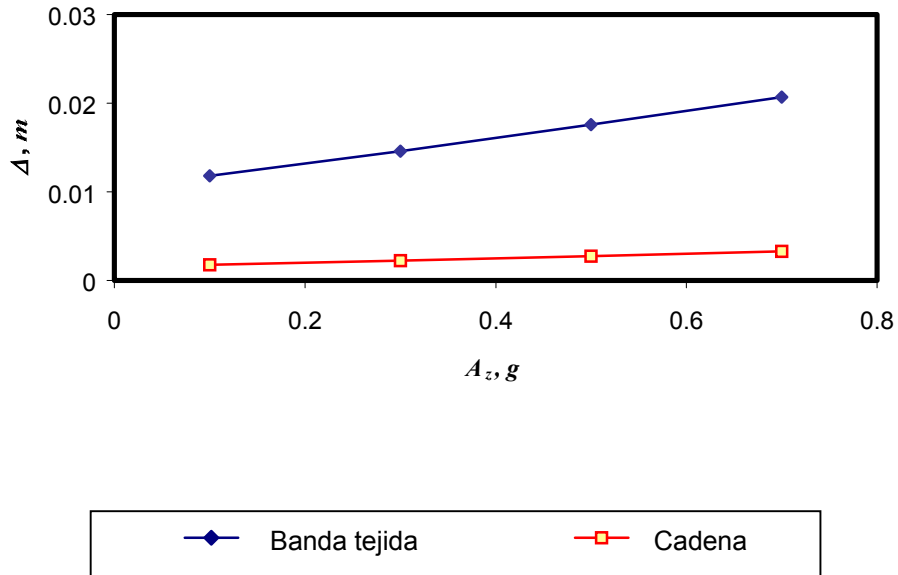


Figura 21: **Efecto de la magnitud de la vibración vertical sobre el desplazamiento de la carga.** ($\mu_s=0.25$; $\theta_D=\theta_T=30^\circ$; $P_{0D}=P_{0T}=0.2 \text{ mg}$; $f=1 \text{ Hz}$; $\phi = \pi/2$; $a_x=0.5 \text{ g}$).

La Figura 22 ilustra una comparación de los desplazamientos resultantes de una carga asegurada de manera directa al estar o no sometida a vibración vertical. Las respuestas se muestran para ambos materiales, como una función de los ángulos, tensiones iniciales, magnitudes de deceleración y coeficientes de fricción. Los resultados muestran de manera clara que los desplazamientos para ambos materiales son afectados tanto por el ángulo del amarre como por la vibración vertical. Así, mientras que una variación del ángulo de amarre de 30° a 75° provoca un incremento en el desplazamiento de la carga, en un orden del 80 al 100 %, la presencia de la vibración vertical incrementa adicionalmente el desplazamiento de la carga. La sensibilidad de la respuesta de la carga a la vibración de la plataforma y al ángulo del amarre, también se incrementa al aumentar el ángulo del amarre. Como puede observarse en la Figura 17 para $\mu_s=0.0$, el desplazamiento de la carga se incrementa para ángulos de amarre mayores o iguales a 60° .

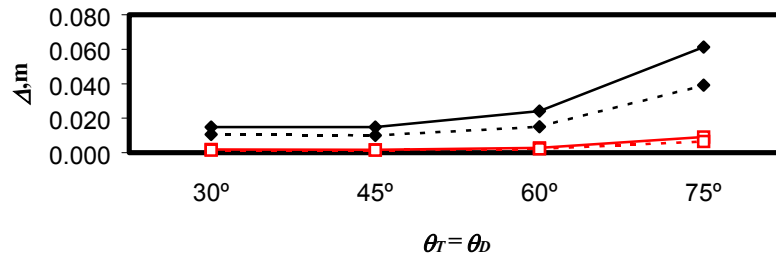
Un incremento en la tensión inicial de los amarres provoca un desplazamiento de la carga considerablemente menor, en el orden del 40 al 50% para el rango de vibraciones consideradas, lo cual se asocia al incremento en la fuerza de fricción disponible promedio. La presencia de vibración vertical ($A_z=0.5 \text{ g}$), sin embargo, amplifica el desplazamiento de la carga, en el orden del 40 al 50 %, como una función del material del amarre.

Las Figuras 22(c) y 22(d) muestran la influencia de la vibración sobre el desplazamiento de la carga, como una función de la magnitud de la deceleración y de los coeficientes de fricción, respectivamente. Estos resultados muestran un incremento aproximadamente lineal del desplazamiento de la carga al incrementar la aceleración a_x (en el orden del 50 al 100%), al tiempo que la vibración implica un incremento aproximadamente constante de la respuesta de la carga. El desplazamiento de la carga disminuye rápidamente al incrementar el coeficiente de fricción. La presencia de vibración no afecta de manera significativa la respuesta de la carga en el caso de los amarres hechos de cadenas, mientras que los hechos de banda tejida se incrementan considerablemente al tenerse la vibración. Esto es atribuible al mayor tiempo de duración del desplazamiento de la carga, al estar asegurada mediante amarres de bandas tejidas.

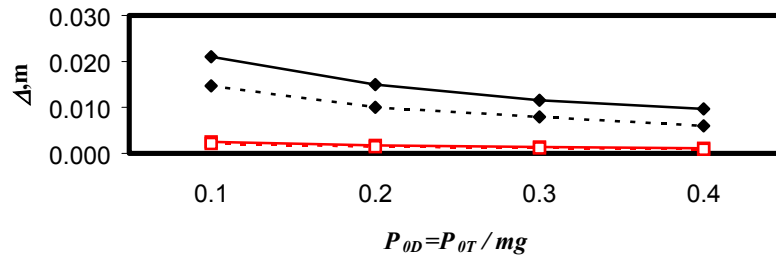
2.2.6 Observaciones finales

Para los materiales y rangos de tensión y ángulos considerados, los resultados mostrados en esta sección sugieren que el desplazamiento de la carga se incrementa de manera aproximadamente lineal al aumentar las magnitudes de las deceleraciones longitudinales y de vibración vertical. El desplazamiento de la carga tiende también a incrementarse al aumentar el ángulo del amarre, y a disminuir al tenerse una fricción elevada en la interfase carga/plataforma. Siendo esta disminución independiente de los niveles de deceleración longitudinal, material del amarre y vibración vertical (magnitud y frecuencia). Las propiedades de los materiales de los amarres afectan de manera importante la frecuencia natural del ensamble, influyendo por lo tanto la respuesta de la carga a la vibración vertical.

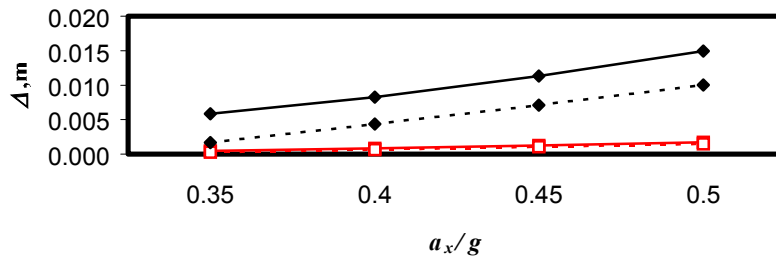
El considerar que en la interfase carga/plataforma no existe fricción representa un caso extremo el cual puede provocar el que se desarrollen, al aplicar deceleraciones similares a las de un frenado de emergencia, fuerzas en los amarres en el orden de 1.5 veces el peso de la carga. Los resultados también indicaron que al tenerse vibración en la plataforma, el desplazamiento de la carga puede incrementarse considerablemente (de un 10 a un 30%), como una función de la frecuencia de excitación y de la frecuencia de resonancia del sistema carga-amarres. El ángulo de fase entre la vibración vertical y la deceleración longitudinal afecta de manera importante la fuerza de resistencia neta de fricción disponible, y por lo tanto también al desplazamiento de la carga. Un incremento en la tensión inicial de los amares reduce de manera moderada el desplazamiento de la carga, y afecta sólo ligeramente a la fuerza desarrollada en el amarre que se tensa (trasero).



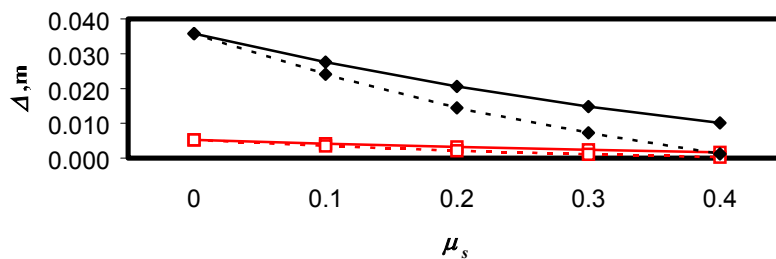
(a) $\mu_s=0.25$; $a_x=0.5g$; $A_z=0.5g$; $P_{0D}=P_{0T}=0.2 mg$; $\phi = 0$



(b) $\mu_s=0.25$; $a_x=0.5g$; $A_z=0.5g$; $\phi = 0$; $\theta_D=\theta_T=45^\circ$



(c) $\mu_s=0.25$; $\theta_D=\theta_T=45^\circ$; $P_{0D}=P_{0T}=0.2 mg$; $\phi = 0$



(d) $\theta_D=\theta_T=30^\circ$; $A_z=0.5g$; $P_{0D}=P_{0T}=0.2 mg$; $\phi = \pi/2$; $a_x=0.5$

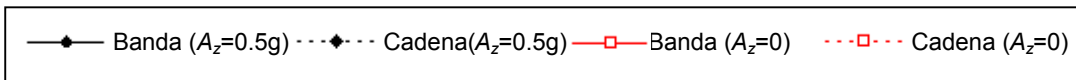


Figura 22: Efecto de los parámetros del aseguramiento sobre la respuesta de una carga asegurada sobre una plataforma vibratoria a 1 Hz.

Al medir la efectividad del aseguramiento mediante el desplazamiento de la carga, se tiene que tal efectividad es afectada de manera significativa por la disposición de los ángulos de los amarres. Los ángulos de amarre que exceden los 60° producen desplazamientos considerablemente más grandes de las cargas. Esto sin importar la naturaleza de la vibración vertical ni los niveles de deceleración. Al mismo tiempo, no se detectan diferencias importantes en la respuesta de la carga para ángulos entre 30° y 45° . Las propiedades de rigidez de los amarres afecta también de manera importante la respuesta de la carga. Una rigidez axial elevada de los amarres, combinada con ángulos de amarre relativamente pequeños proporciona una rigidez efectiva considerablemente más grande, así como una alta frecuencia natural. Los amarres de cadena producen entonces desplazamientos de la carga considerablemente menores, en particular en el caso de tenerse alguna vibración vertical.

2.3 Carga asegurada con amarres indirectos

En esta sección se presenta un modelo simplificado de una carga asegurada mediante amarres indirectos. Esto es, aquellos amarres cuya función de aseguramiento primordial es la de incrementar la fuerza de contacto carga/plataforma, con objeto de incrementar la resistencia de la carga a desplazarse sobre el vehículo (Romero et al., 2002).

2.3.1 Modelo

La Figura 23(a) muestra una representación esquemática de una carga desplazada, mientras que la Figura 23(b) presenta el diagrama de cuerpo libre correspondiente, que incluye las fuerzas efectivas que actúan sobre la carga. La magnitud del desplazamiento de la carga al ser sometida a una aceleración longitudinal inducida por una maniobra de frenado (a_x), depende de la elasticidad y ángulos de los amarres, de su tensión inicial (P_0), del coeficiente de fricción carga-plataforma (μ_s), y de las características de la vibración vertical de la misma. Asumiendo una contribución despreciable por parte de la elasticidad de los amarres y en la ausencia de cualquier vibración vertical, una aceleración longitudinal, que puede provocar el desplazamiento de la carga m , puede ser calculada como una función de P_0 , μ_s , m y θ .

$$a_x^* = \mu_s \left(1 + \frac{2P_0}{mg} \sin \theta \right) \quad (12)$$

donde a_x^* es el umbral de aceleración longitudinal en unidades de la aceleración de la gravedad (g).

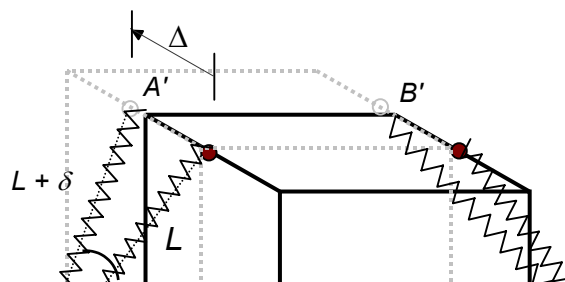
Al tenerse una vibración vertical de la plataforma del vehículo, el peso aparente de la carga puede disminuir y de la misma manera la resistencia de la carga al movimiento. El límite inferior del umbral de aceleración se reduce por lo tanto a:

$$a_x^* = \mu_s \left(1 + \frac{2P_0}{mg} \sin \theta - a_z \right) \quad (13)$$

en donde a_z es la aceleración debida a la vibración vertical, en unidades g .

Para valores de $a_z = 0$ y $0.5 g$, la Figura 24 ilustra el umbral de aceleración como una función de la tensión y ángulo inicial de los amarres, del peso de la carga y del valor del coeficiente de fricción. Como estos resultados muestran, el umbral de aceleración longitudinal para ambos casos, se incrementa considerablemente al aumentar μ_s , θ y P_0 .

Estos resultados (Figura 24(b)), sugieren adicionalmente que los valores del umbral de aceleración, pueden reducirse considerablemente debido a la existencia de la vibración vertical. Durante una maniobra de frenado de emergencia, la probabilidad de que la carga se mueva, se incrementa al aumentar la vibración vertical, y también al disminuir el coeficiente de fricción entre la carga y la plataforma. En la medida en que las fuerzas de inercia asociadas con el movimiento del vehículo, exceden la resistencia provista por la fricción y las tensiones iniciales en los amarres, el movimiento relativo de la carga con respecto a la plataforma inducirá fuerzas en los amarres. El estudio de estas fuerzas restrictoras, y los potenciales movimientos de las cargas, no ha sido abordado en los estudios reportados en la literatura.



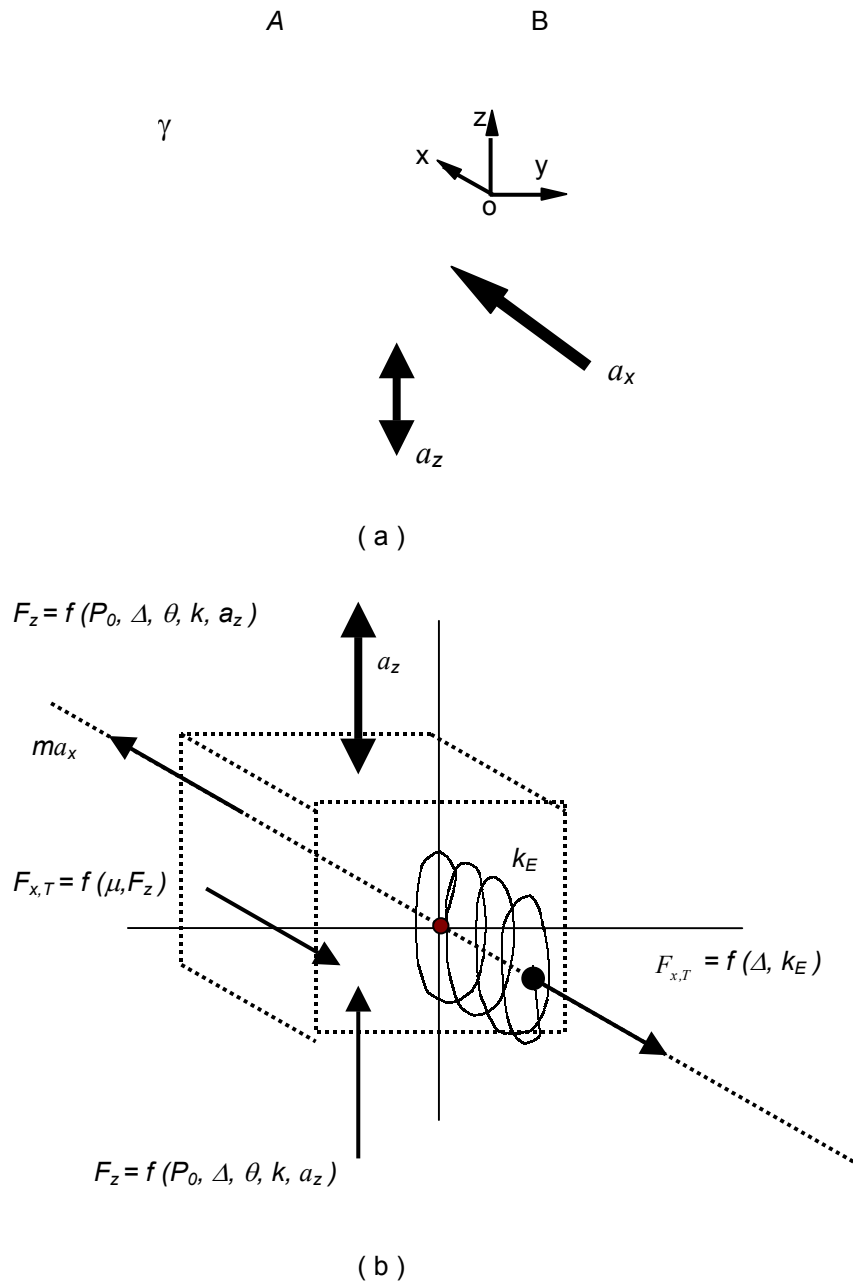
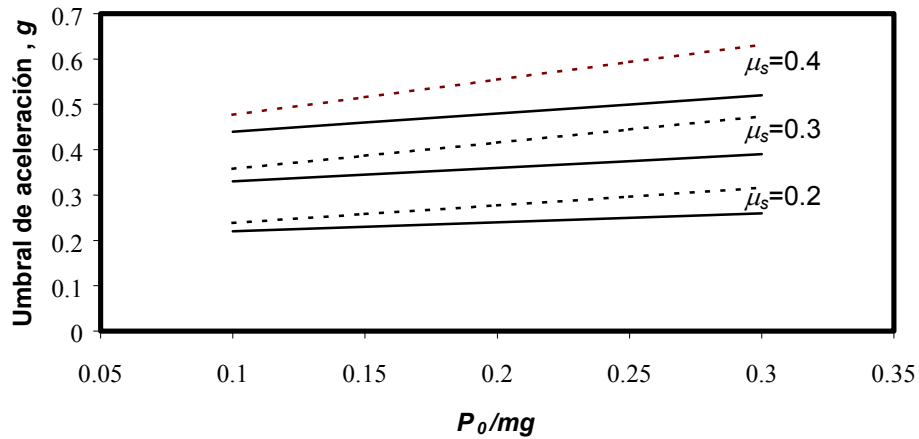
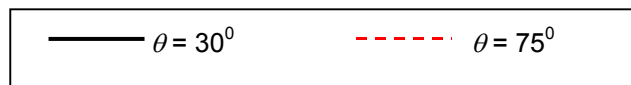
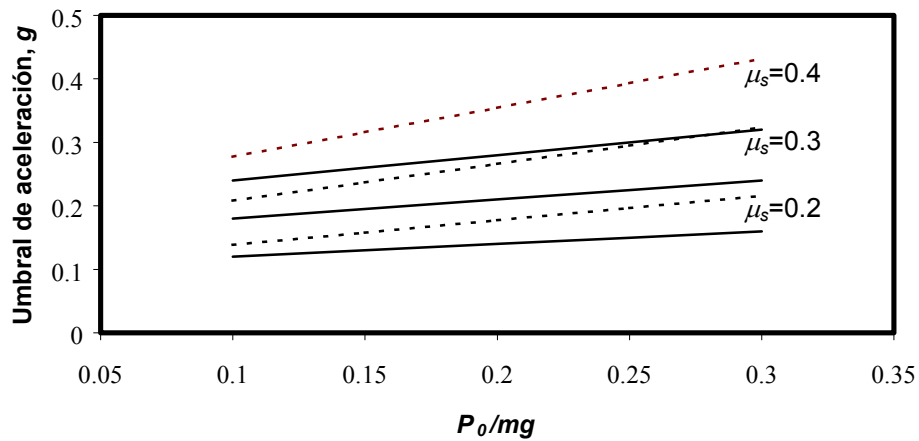


Figura 23: Representación esquemática de una carga asegurada lateralmente: (a) diagrama de desplazamiento; (b) diagrama de fuerzas.



(a)



(b)

Figura 24: Umbrales de aceleración longitudinal como funciones de μ_s , P_0 y θ : (a) $a_z = 0$.; (b) $a_z = 0.5$ g.

La respuesta dinámica de un sistema compuesto por una carga asegurada y una plataforma de soporte, podría ser evaluada a través del desarrollo y análisis de un modelo simple como el mostrado en la Figura 23(a). El modelo considera un amarre indirecto pasado sobre la carga, anclado en un punto sobre la plataforma

del vehículo. La altura de la carga se considera lo suficientemente pequeña como para tener la volcadura de la misma sobre la plataforma. En las formulaciones analíticas, la altura de la carga se asume como unitaria, de tal manera que las longitudes de los amarres se expresan como una función del ángulo del amarre θ . Adicionalmente, el movimiento de oscilación en el plano horizontal (*yaw*) de la plataforma del vehículo, se asume como despreciable, de tal manera que el desplazamiento de la carga sometida a la aceleración longitudinal ocurre a lo largo del eje x , como se muestra en la Figura 23(a).

La tensión inicial se considera que es lo suficientemente grande, de tal manera que las coordenadas de los puntos de anclaje ($A A'$) permanecen sin cambio en el sistema coordenado de la carga ($oxyz$). La elasticidad de los amarres se representa por una rigidez longitudinal equivalente (k_E), como se muestra en la Figura 23(b). Esta rigidez se deriva con base a las deformaciones instantáneas de la carga y los amarres. Las componentes verticales de la tensión del amarre y de la fuerza de inercia, son representadas por una fuerza vertical resultante F_z , como una función del desplazamiento de la carga Δ , del ángulo de amarre θ , de la rigidez axial de los amarres, k , de la tensión inicial P_0 , y de la aceleración vertical a_z . Las fuerzas longitudinales que actúan sobre la carga, incluyen a la fuerza debida a la elasticidad de los amarres ($F_{x,T}$), y a una fuerza debida a la fricción ($F_{x,R}$). Esta fuerza depende del coeficiente de fricción de deslizamiento μ_s , de la fuerza de contacto vertical entre la carga y la plataforma, y de la fuerza de inercia vertical. Las fuerzas que actúan sobre la carga son desarrolladas en las siguientes secciones.

2.3.1.1 Rigidez longitudinal equivalente de los amarres

El movimiento angular (γ) y el cambio en la longitud del amarre (δ), pueden ser relacionados con el desplazamiento longitudinal de la carga, Δ , de la manera como se muestra en la Figura 25. Un análisis cinemático establece las siguientes relaciones:

$$\gamma = \text{Arc tan}(\Delta/L); \quad \text{y} \quad \delta = L \left[\frac{1}{\cos(\gamma)} - 1 \right] \quad (14)$$

en donde L ($H / \sin\theta$) es la longitud inicial del amarre ($C A$), $(L + \delta)$ es la longitud instantánea y δ es la elongación del amarre, asociada a un desplazamiento de la carga Δ .

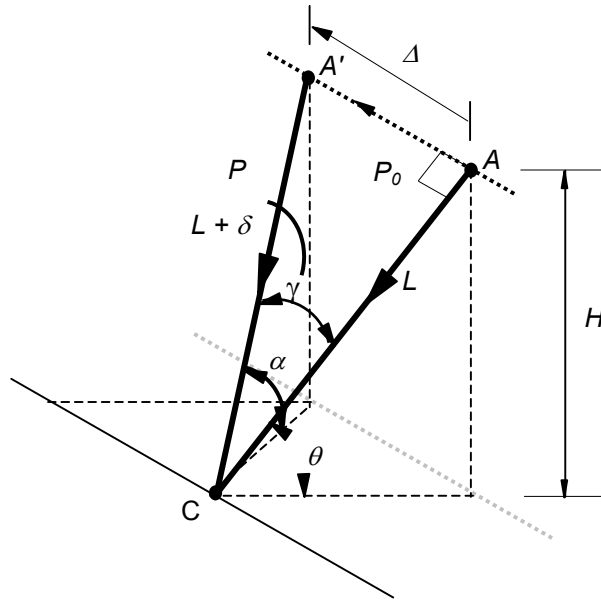


Figura 25: Representación cinemática del amarre.

La componente longitudinal de la fuerza instantánea en los amarres, puede expresarse por la fuerza de recuperación desarrollada en un resorte equivalente k_E , como se muestra en la Figura 23(b). Asumiendo movimientos pequeños y propiedades elásticas lineales de los amarres a lo largo de sus ejes, la componente longitudinal de la fuerza de amarre, $F_{x,T}$, puede expresarse como:

$$F_{x,T} = 2 \sin \gamma (k \delta + P_0) \quad (15)$$

en donde k es la rigidez del amarre. Sustituyendo los valores de γ y δ de la ecuación (14) en la ecuación (15), resulta en:

$$F_{x,T} = 2 \sin [\tan^{-1}(\Delta/L)] \left[kL \left(\frac{1}{\cos(\tan^{-1}(\Delta/L))} - 1 \right) + P_0 \right] \quad (16)$$

La fuerza longitudinal desarrollada debida a los amarres, se asocia al movimiento angular del amarre y por ende al movimiento de la carga Δ . La rigidez longitudinal equivalente de los amarres, correspondiente a su posición inicial, puede expresarse como:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \Delta} (F_{x,T}) \right|_{\Delta=0} = \frac{2P_0}{L} \quad (17)$$

Las propiedades de rigidez de los amarres son tomadas de los datos experimentales reportados por Billing (1998), cuyo estudio reportó propiedades fuerza-elongación de dos distintos materiales para amarres: una cadena de 2.88 m de longitud con un límite de carga de trabajo de 20 kN; y una banda tejida de 2.24 m con un límite de carga de trabajo de 40 kN. Los datos medidos hicieron aparente una relación aproximadamente lineal entre la fuerza aplicada y su elongación, teniendo valores de rigidez de 506 kN/m y 3250 kN/m, respectivamente para el caso de la banda tejida y la cadena.

La aplicación de la Ley de Hooke sugiere que la rigidez axial del amarre está inversamente relacionada con su longitud, $k = AE / L$, en donde A es el área de la sección transversal y E es el módulo de elasticidad del amarre. Considerando una altura unitaria para la carga, la longitud del amarre disminuye al incrementar el ángulo del amarre, de tal manera que la rigidez axial del amarre se incrementa al aumentar el ángulo del amarre, como se muestra en la Figura 26.

Las características de rigidez longitudinal equivalente (k_E), para los dos materiales considerados, se evalúan mediante el uso de las formulaciones indicadas anteriormente. Los valores resultantes se expresan como funciones de θ y del desplazamiento de la carga Δ . Considerando una tensión inicial en los amarres $P_0 = 0.2 mg$, la Figura 27 ilustra los valores de k_E de los dos materiales, en términos del valor de θ y del desplazamiento de la carga, Δ . Los resultados muestran un endurecimiento progresivo en las propiedades de los amarres al incrementar tanto Δ como θ .

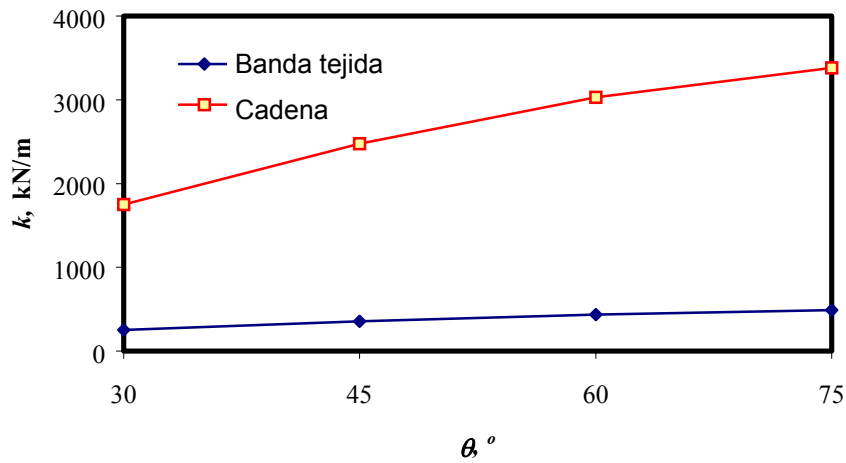


Figura 26: Variación de la constante de resorte de los amarres en función del ángulo del amarre.

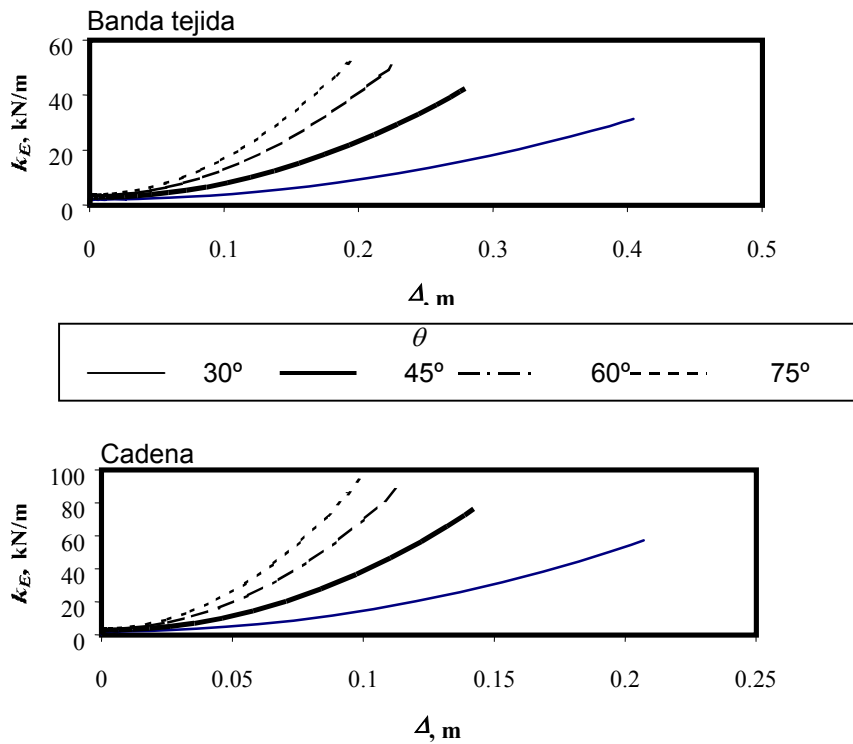


Figura 27: Constante de resorte equivalente vs. desplazamiento de la carga, como una función de θ , para dos materiales para amarre ($P_0 = 0.2 \text{ mg}$).

2.3.1.2 Fuerza de fricción

Asumiendo propiedades de fricción ideales y uniformes, la fuerza de fricción desarrollada en la interfase carga-plataforma puede ser expresada por:

$$F_{x,R} = \mu_s F_z \quad (18)$$

donde μ_s es el coeficiente fricción de deslizamiento y F_z es la fuerza vertical total, la cual comprende a los componentes instantáneos de la fuerzas de amarre (P), el peso de la carga y la inercia debida a las vibraciones verticales. A partir de las Figuras 23(b) y 25, la fuerza vertical resultante puede ser expresada como:

$$F_z = 2 P \sin \alpha + m (g - a_z) \quad (19)$$

donde $P = k\delta + P_0$ es la fuerza desarrollada en cada uno de los amarres y a_z es la aceleración debida a la vibración vertical de la plataforma. En este análisis la vibración vertical es considerada como un movimiento senoidal, de tal manera que $a_z = A_z \sin(2\pi ft + \phi)$, donde A_z es la amplitud de la aceleración y ϕ es el ángulo de fase. A partir de la Figura 25, el ángulo α está relacionado con el ángulo θ , de la siguiente manera:

$$\alpha = \sin^{-1} \left[\frac{1}{(1 + \delta)} \sin \theta \right] \quad (20)$$

2.3.1.3 Ecuaciones de movimiento

El desplazamiento longitudinal de la carga al someterse a una deceleración de frenado, puede ser evaluado considerando el equilibrio longitudinal de fuerzas. La ecuación de movimiento para la masa de la carga m puede ser expresada como:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \\ \Delta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_E}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \\ \dot{\Delta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{m} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{xR} \\ a_x \end{Bmatrix} \quad (21)$$

En la ecuación anterior, la rigidez equivalente y la fuerza de fricción oponiéndose al movimiento, son funciones no lineales de Δ , a_z y θ . La ecuación anterior se resuelve usando el Método de las Matrices de Transición (Meirovitch, 1986), a manera de determinar el desplazamiento de respuesta de la carga al someterse a un escalón de aceleración de frenado.

2.3.2 Resultados y discusión

La ecuación de movimiento de la carga asegurada mediante amarres indirectos, es resuelta con objeto de estudiar el comportamiento dinámico del ensamble carga-amarres, determinando con ello la efectividad de este tipo de método de aseguramiento de la carga. Los análisis se llevan a cabo para las situaciones de no vibración y vibración, con objeto de estudiar los potenciales efectos de la vibración del vehículo sobre el aseguramiento de la carga. La respuesta de la carga al carecer de cualesquiera amarres, se evalúa también con objeto de estudiar las contribuciones derivadas de las fuerzas de fricción únicamente.

2.3.2.1 Carga no asegurada sin vibraciones verticales

La respuesta de desplazamiento de una carga no asegurada en un ambiente no vibratorio, está relacionada directamente con la fuerza de fricción disponible, y con la magnitud y duración de la deceleración de frenado aplicada. El no contar con amarres que ofrezcan resistencia al desplazamiento de la carga, en general, provoca el tener desplazamientos considerables de la carga (Δ). Bajo estas circunstancias, la Figura 28 ilustra el desplazamiento máximo de la carga, como una función del coeficiente de fricción μ_s y para diferentes magnitudes de a_x (0.45, 0.50 and 0.55 g). La aceleración de perturbación se toma como un pulso rectangular que ocurre en un periodo de 0.5 s. La Figura 29 ilustra el efecto de la duración del pulso de la aceleración (τ) sobre los valores máximos de Δ . Ambos conjuntos de resultados muestran relaciones no lineales: un valor de Δ que disminuye al incrementar μ_s y un valor creciente de Δ al incrementar la magnitud de la aceleración y la duración del pulso. La sensibilidad del desplazamiento máximo a las variaciones del valor de μ_s , disminuye en la medida que se incrementa μ_s ; la sensibilidad a la duración del pulso de aceleración (τ), se incrementa considerablemente al aumentar esta duración, especialmente para valores bajos de μ_s . Como era de esperarse, para este caso, en el que no se tiene vibración de la plataforma ni amarres, el someter a la carga a una aceleración de 0.45 g para un valor de $\mu_s = 0.45$, no produce desplazamiento alguno.

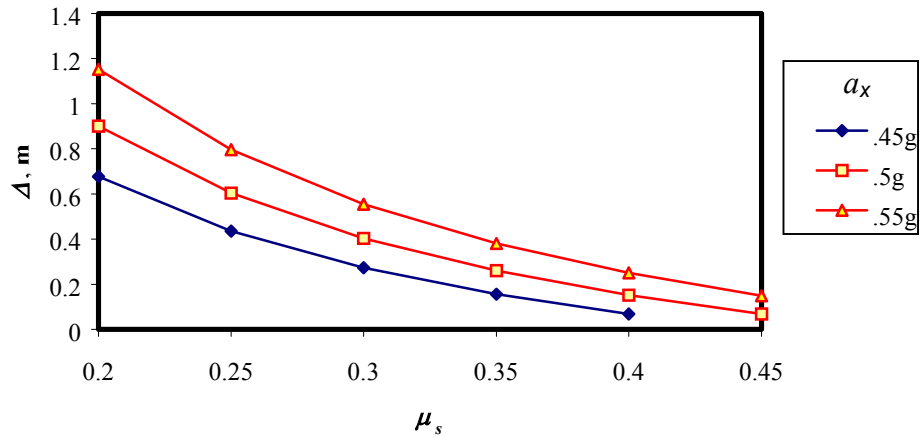


Figura 28: Efecto del valor de μ_s sobre el desplazamiento de una carga no asegurada sometida a diferentes niveles de aceleraciones longitudinales de 0.5 s de duración ($A_z=0$).

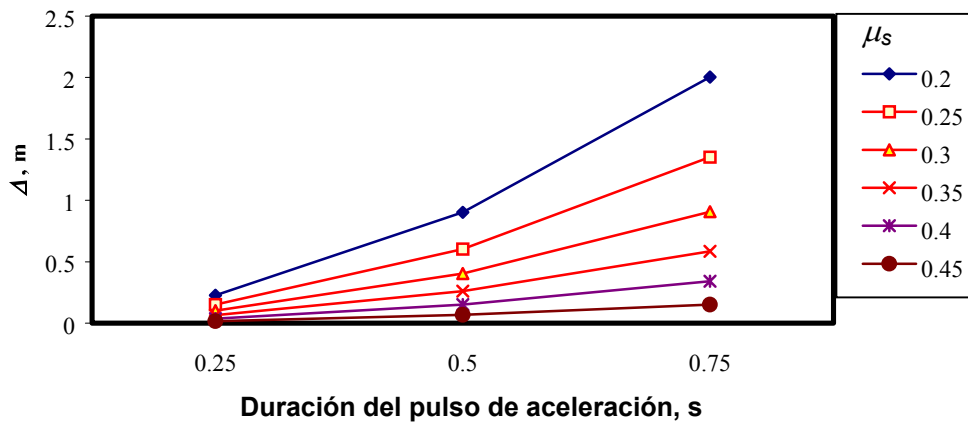


Figura 29: Influencia de la duración del pulso de aceleración longitudinal sobre el desplazamiento máximo de la carga ($A_z=0$; $a_x=0.5$ g).

2.3.2.2 Efecto de la vibración vertical

Los desplazamientos de respuesta de una carga no asegurada, sometida a una aceleración $a_x = 0.5 g$ y una vibración senoidal vertical, son evaluados como una función de μ_s . Los análisis son llevados a cabo para diferentes valores de frecuencia (1.25 y 2.5 Hz) y fase ($-\pi/2$, 0 y $\pi/2$) de la vibración vertical. La Figura 30 (a) ilustra el desplazamiento de la carga al someterla a una vibración de amplitud $A_z = 0.5 g$, a una frecuencia de 1.25 Hz, para $a_x = 0.5 g$. Un valor de fase $\phi = \pi/2$, implica que las fuerzas de contacto carga-plataforma se acercan a su mínimo al momento de aplicar a_x , mientras que una fase $\phi = -\pi/2$ implica una fuerza de contacto carga-plataforma máxima en el momento de aplicar a_x . En el caso de $\phi = 0$, la aceleración es aplicada cuando $a_z = 0$.

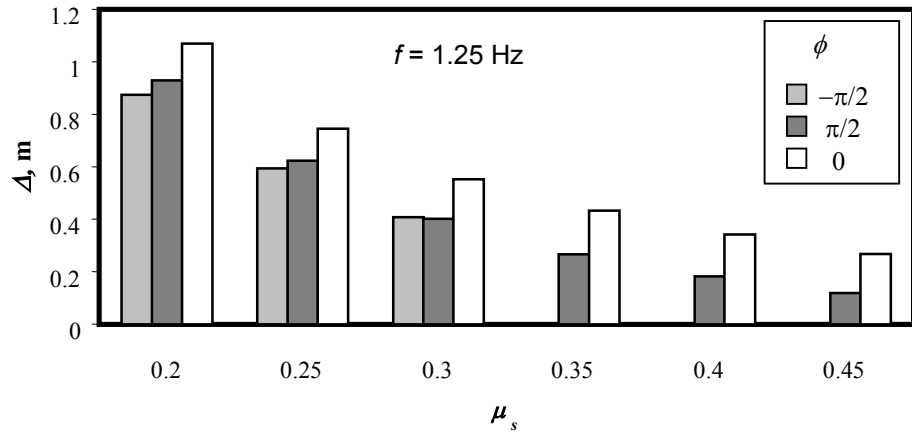
Con referencia a la ecuación (19), es evidente que $\phi = 0$ implicaría el tener inicialmente una fuerza normal igual a la suma de mg y la tensión inicial en los amarres. La magnitud de la fuerza normal tiende a disminuir en la medida que la aceleración vertical se incrementa, con lo que se tiene una resistencia por fricción reducida. La magnitud del desplazamiento máximo de la carga tiende entonces a ser relativamente más grande, sin importar los valores de μ_s , como se muestra en la Figura 30(a). En el caso de caso de $\phi = \pi/2$, la magnitud de la fuerza normal al tiempo de aplicar la aceleración a_x es más baja, y se incrementa en la medida que se disminuye a_z . Para $\phi = -\pi/2$, por otro lado, se obtiene el valor más grande inicial para F_z , el cual tiende a disminuir inmediatamente después de que la aceleración a_x es aplicada. Este caso produce el desplazamiento más pequeño para la carga, el cual disminuye para $\mu_s \geq 0.35$. A partir de estos resultados, es evidente que la efectividad de la resistencia al movimiento asociada a la fricción, depende de la relación de fase entre la vibración vertical (a_z) y la deceleración de frenado.

El efecto de la frecuencia de vibración sobre el desplazamiento de la carga es una función μ_s , como se muestra en la Figura 30(b). Esta figura compara los desplazamientos de la carga al someterse a una vibración vertical de 1.25 y 2.5 Hz, con aquella que se obtuvo bajo la condición de no vibración, manteniendo el ángulo de fase $\phi = 0$. Los resultados muestran una relativa pequeña influencia de la frecuencia de vibración sobre el desplazamiento máximo de la carga, lo cual es atribuido a la consideración de una interfase carga-plataforma rígida. Sin embargo, el introducir una elasticidad en la interfase carga/plataforma, la cual represente plataformas con patines flexibles, puede llegar a causar el que la frecuencia de la vibración afecte considerablemente el desplazamiento de la carga (Rakheja et al., 1997). Los resultados muestran también que una vibración de baja frecuencia (1.25 Hz), causa un desplazamiento de la carga marginalmente mayor, al compararse con el desplazamiento alcanzado bajo una situación no vibratoria. La presencia de la vibración vertical, sin embargo, provoca desplazamientos ligeramente más grandes, específicamente para valores más altos de μ_s .

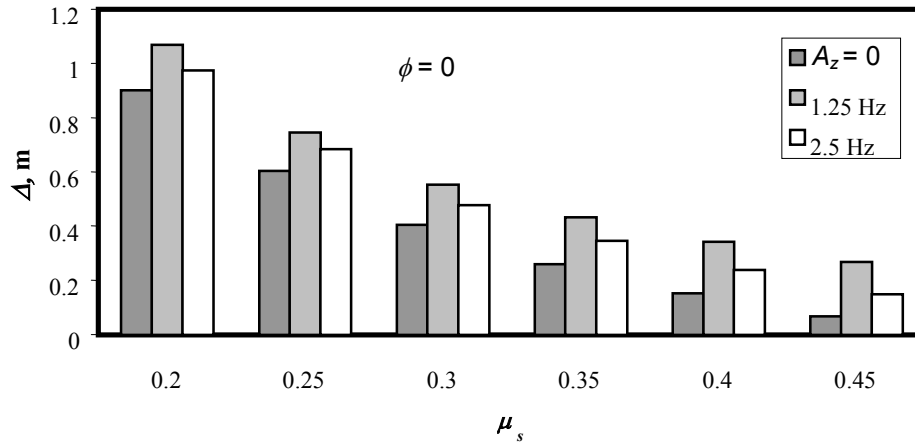
La magnitud de la vibración vertical también afecta al desplazamiento máximo de la carga, como se muestra en la Figura 30(c). Los resultados indican que el incremento en la amplitud A_z implica un aumento considerable en el desplazamiento máximo de la carga, independientemente del valor de μ_s . Para valores altos de la fricción en la interfase, un incremento en la amplitud de la aceleración vertical de 0 a 0.75 g, da como resultado un desplazamiento de la carga casi un 50 % mayor. Los resultados también sugieren una relación aproximadamente lineal entre el desplazamiento máximo y la amplitud de la aceleración vertical.

2.3.2.3 Efecto de los parámetros de los amarres

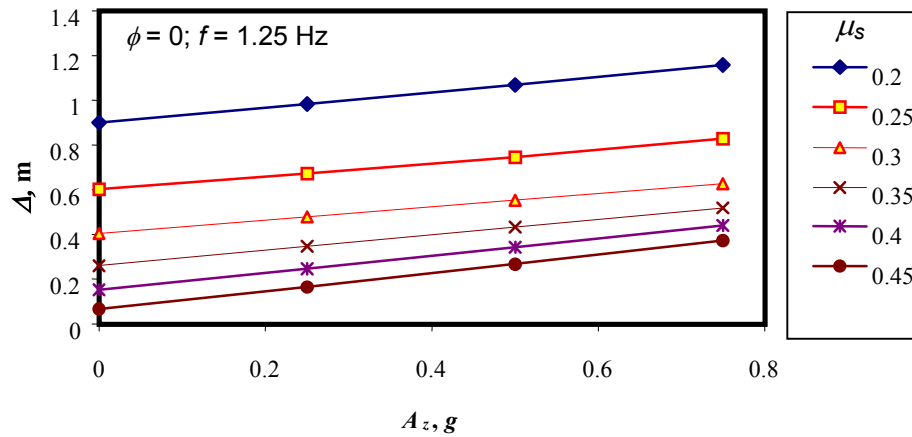
El desplazamiento de la carga y por consiguiente la efectividad del aseguramiento de la carga, es influenciado de manera importante por muchos factores, tales como las propiedades de los materiales, el ángulo de amarre (θ) y la tensión inicial (P_θ). La efectividad del amarre se investiga inicialmente considerando nulas a la fricción en la interfase carga-plataforma y a la vibración vertical ($\mu_s = 0$; $a_z = 0$), al tiempo que la tensión inicial se toma como 0.2 mg. Para una aceleración longitudinal $a_x = 0.5$ g, la Figura 31 ilustra los desplazamientos resultantes de la carga, como una función del ángulo de amarre. Los análisis se llevan a cabo para ambos materiales de amarre considerados en esta investigación, esto es, banda tejida y cadenas. Los resultados muestran que el desplazamiento de la carga disminuye al incrementar θ de 30 ° a 45 °, lo cual es atribuido a un aseguramiento más rígido al considerar un valor más alto para θ , como se muestra en la Figura 26. Un incremento adicional en θ , sin embargo, produce una disminución ligera en Δ , debido a las variaciones no lineales en las características de rigidez del aseguramiento. El efecto de θ sobre la máxima fuerza desarrollada en el amarre se observó como insignificante. Tal nulo efecto se atribuye al hecho de que un incremento en θ provoca un incremento en la rigidez de los amarres, al disminuirse la longitud efectiva de éstos.



(a)



(b)



(c)

Figura 30: Influencia del ángulo de fase y la vibración y amplitud de la vibración, sobre el desplazamiento de una carga indirectamente asegurada. ($a_x = 0.5 \text{ g}$; $\tau = 0.5 \text{ s}$).

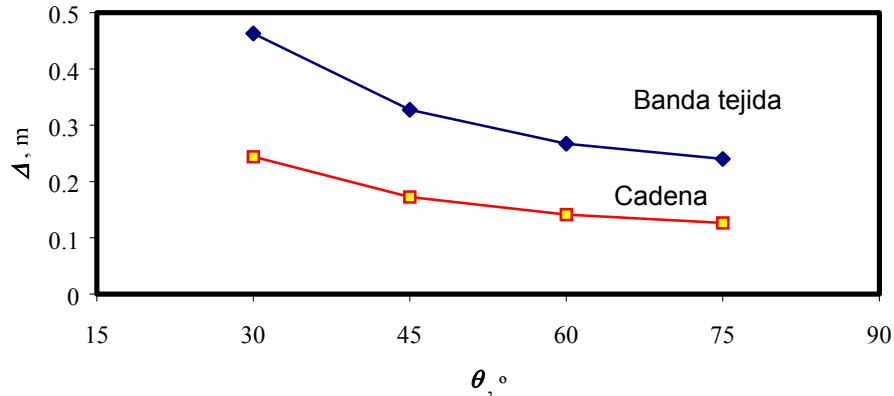


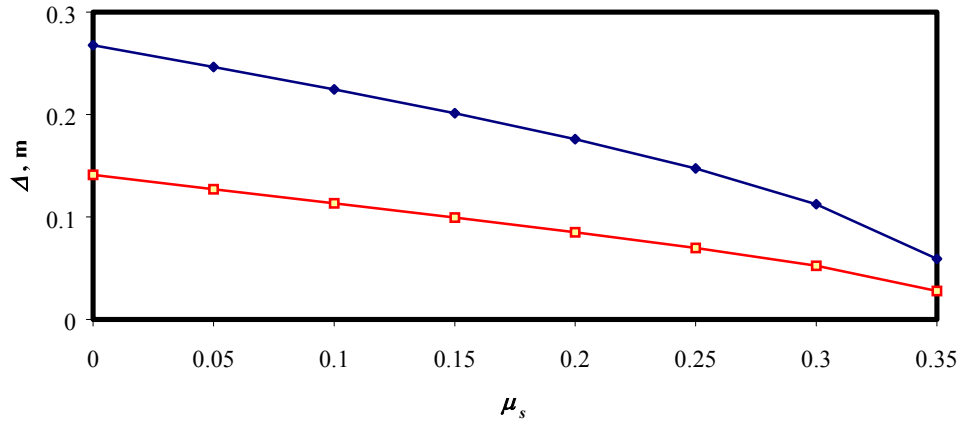
Figura 31: Efecto del ángulo θ sobre la respuesta de desplazamiento de la carga ($P_0 = 0.2 \text{ mg}$; $a_x = 0.5g$)

2.3.2.4 Efectos combinados

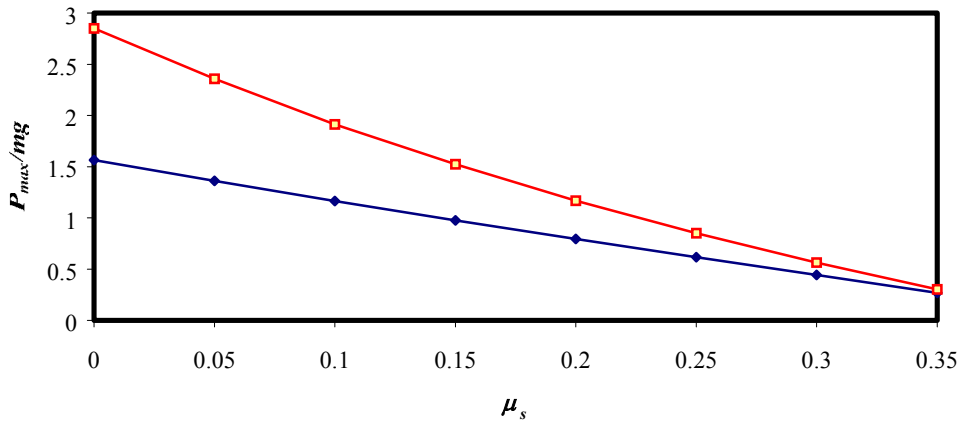
Los efectos de la fricción y los amarres sobre el desplazamiento resultante y las fuerzas pico, son mostrados en la Figura 32. Tanto para el amarre hecho de banda tejida como para el de cadena, un incremento en el coeficiente de fricción produce un menor desplazamiento de la carga, y por ende una P_{max} menor. La comparación de las Figura 31 y 32 claramente ilustra la efectividad de la fricción para asegurar la carga. Los resultados muestran, además, que tanto el desplazamiento de la carga como la fuerza en los amarres, tienden hacia valores similares al tomarse valores elevados de μ_s . La fuerza en los amarres tiende hacia el valor de la tensión inicial considerada, esto es, 0.2 mg .

La Figura 33 ilustra las respuestas características de una carga asegurada, al someterla a una aceleración longitudinal $a_x = 0.5 \text{ g}$ y una vibración vertical senoidal en un rango de frecuencia de 1 a 8Hz. Los análisis se llevan a cabo para una amplitud de vibración vertical de 0.5 g , y para $\phi = -\pi/2$, $\phi = \pi/2$ y $\phi = 0$. Los resultados muestran el efecto de la frecuencia y fase de la vibración vertical, sobre el desplazamiento de la carga y las fuerzas en los amarres para ambos materiales. Se observa en estos resultados que mientras que el efecto de la frecuencia de la vibración sobre la respuesta de la carga y amarres es despreciable en el caso de frecuencias mayores de 4Hz, las respuestas en el caso de frecuencias bajas son fuertemente afectadas por la fase. Una comparación de las Figuras 30(a) y 33, sugiere una influencia significativa de los amarres. Para una carga no asegurada, una frecuencia de vibración de 1.25 Hz y $\phi = -\pi/2$ representó el mínimo desplazamiento de la carga, como se muestra en la Figura 30(a). Para la carga

asegurada, $\phi = \pi/2$ representó el desplazamiento mínimo, lo cual es probablemente atribuible a la naturaleza no lineal de la rigidez k_E .



(a)



(b)

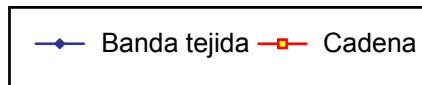
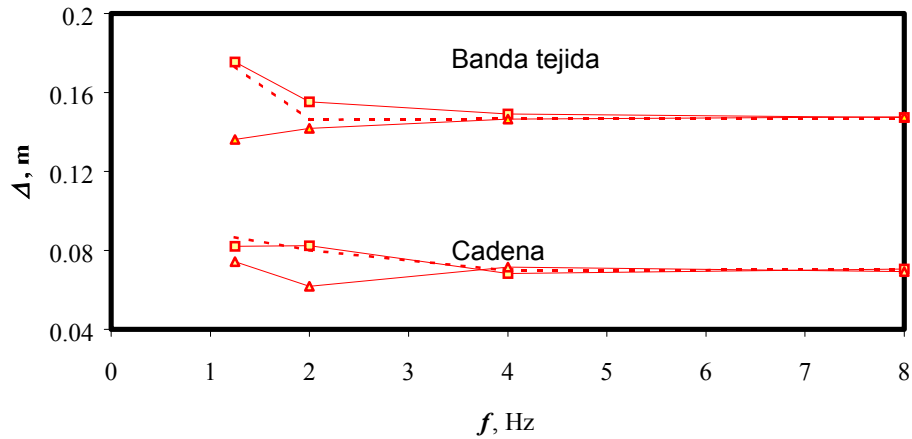
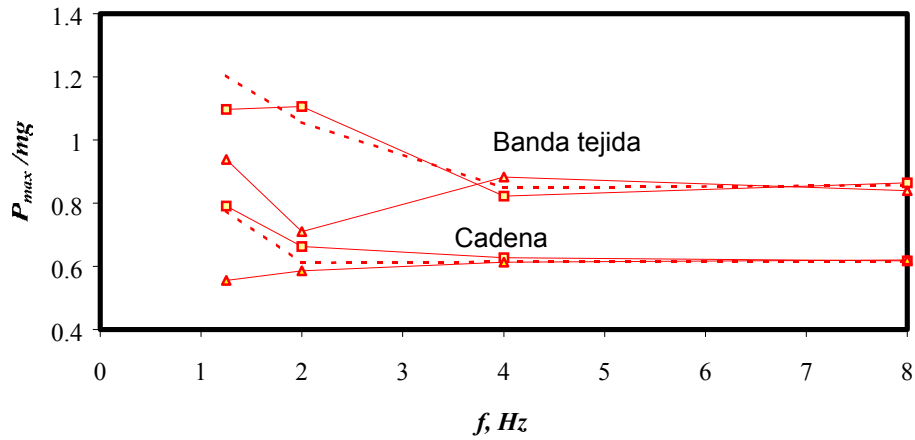


Figura 32: Efecto del coeficiente μ_s sobre el desplazamiento de la carga y fuerza normalizada en el amarre ($P_0 = 0.2 \text{ mg}$; $a_x = 0.5 \text{ g}$; $\theta = 60^\circ$; $A_z=0$). (a) desplazamiento de la carga; (b) fuerza en el amarre.



(a)



(b)

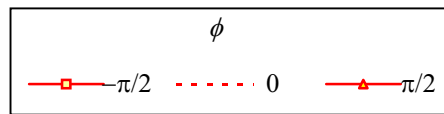


Figura 33: Efecto de la frecuencia de la vibración y el ángulo ϕ sobre el desplazamiento de la carga y las fuerzas normalizadas desarrolladas en los amarres ($P_0 = 0.2 \text{ mg}$; $a_x = 0.5 \text{ g}$; $\theta = 60^\circ$; $A_z = 0.5$; $\mu_s = 0.25$).

La tensión inicial en el amarre también afecta la efectividad del aseguramiento de la carga, como se muestra en la Figura 34. Estos resultados muestran la influencia de la tensión inicial, $0.1 \text{ mg} \leq P_0 \leq 0.4 \text{ mg}$, sobre el desplazamiento de la carga y las fuerza máxima en los amarres, en circunstancias de no vibración y vibración vertical ($\phi = 0$, $\mu_s = 0.25$ y $\theta = 60^\circ$).

Un incremento en la tensión inicial de 0.1 *mg* a 0.4 *mg*, produce reducciones considerables en el desplazamiento y fuerzas máximas en los amarres. Esto es atribuido a la contribución de P_0 sobre la rigidez equivalente, como es evidente en la ecuación (17).

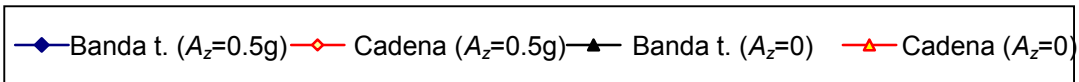
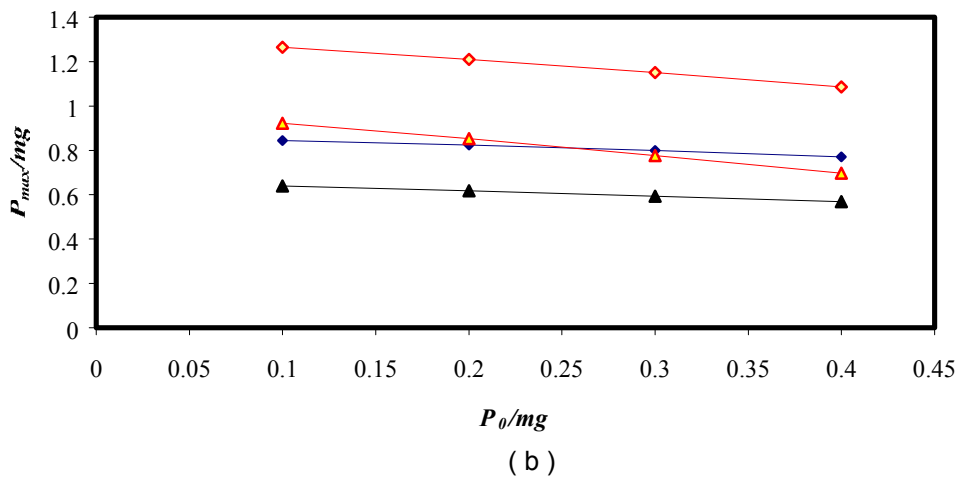
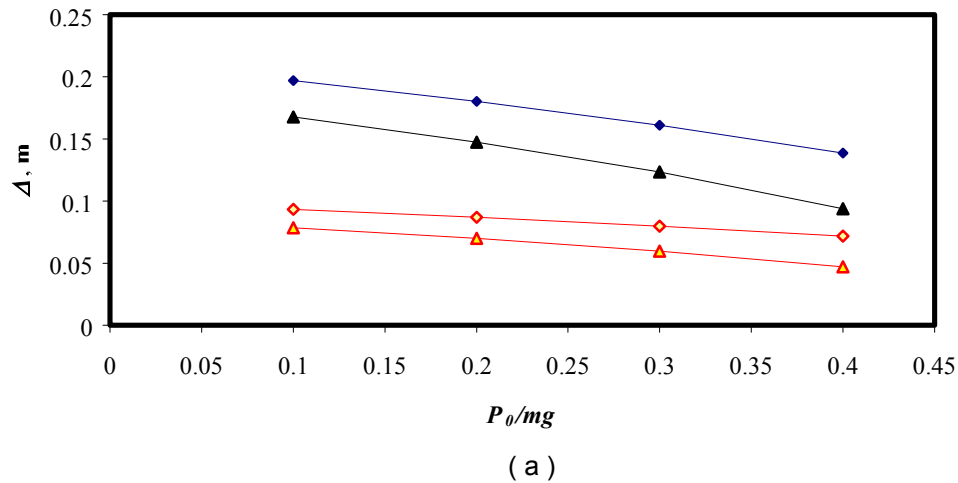
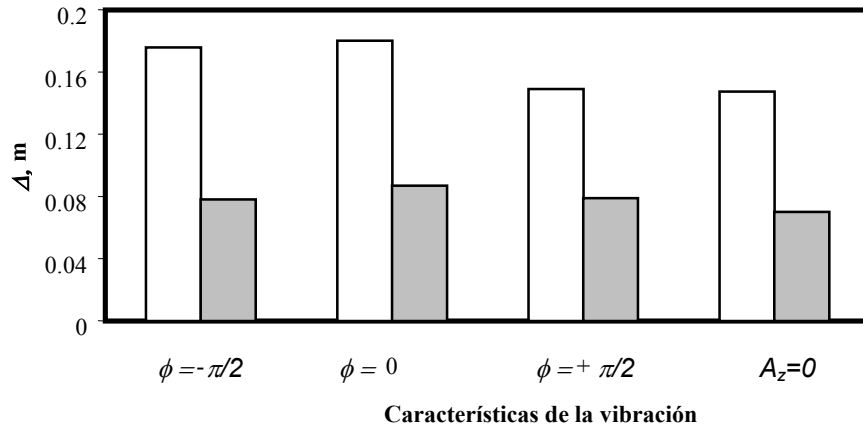


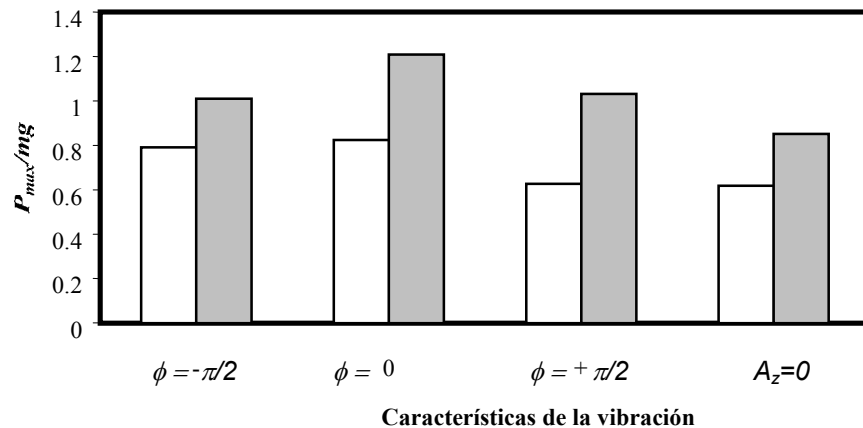
Figura 34: Efecto de P_0 sobre el desplazamiento de la carga y la fuerza en los amarres ($P_0 = 0.2 \text{ mg}$; $a_x = 0.5 \text{ g}$; $f = 1 \text{ Hz}$).

La efectividad del mecanismo de aseguramiento de la carga es fuertemente influenciado por la elasticidad y resistencia de los amarres. De la Figura 26, es evidente que las cadenas proveen una considerablemente mayor rigidez que las

bandas tejidas. Consiguientemente, los amarres hechos de cadenas producen un considerablemente menor desplazamiento de la carga, y mayores fuerzas en los amarres, como se muestra en la Figura 35. Esta figura representa las respuestas máximas ante la presencia o no de la vibración vertical, para $\mu_s = 0.25$. A partir de estos resultados, es evidente que el uso de las relativamente rígidas cadenas puede reducir el desplazamiento de la carga hasta un 60%, mientras que el correspondiente incremento en las fuerzas en los amarres se encuentra en el orden del 40%.



(a)



(b)

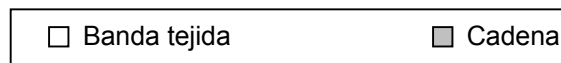


Figura 35: Efecto del ángulo de fase y situación de vibración sobre la respuesta de una carga asegurada indirectamente. ($a_x = 0.5 g$; $A_z = 0.5g$; $f = 1\text{Hz}$; $P_0 = 0.2 mg$; $\theta = 60^\circ$; $\mu_s = 0.25$).

El efecto de las variaciones en el nivel de aceleración a_x , sobre la respuesta de una carga asegurada, es ilustrado en la Figura 36 para las situaciones de vibración y no vibración. La magnitud del desplazamiento máximo de la carga y las fuerzas

en los amarres se incrementan considerablemente al aumentar a_x , para ambas situaciones de vibración y no vibración. Los resultados hacen aparente, no obstante, que la influencia de la vibración vertical sobre el desplazamiento de la carga, disminuye en el caso de niveles elevados de deceleración.

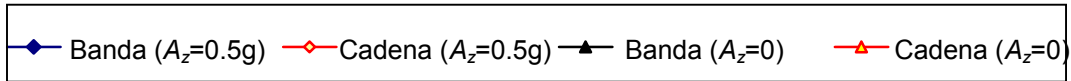
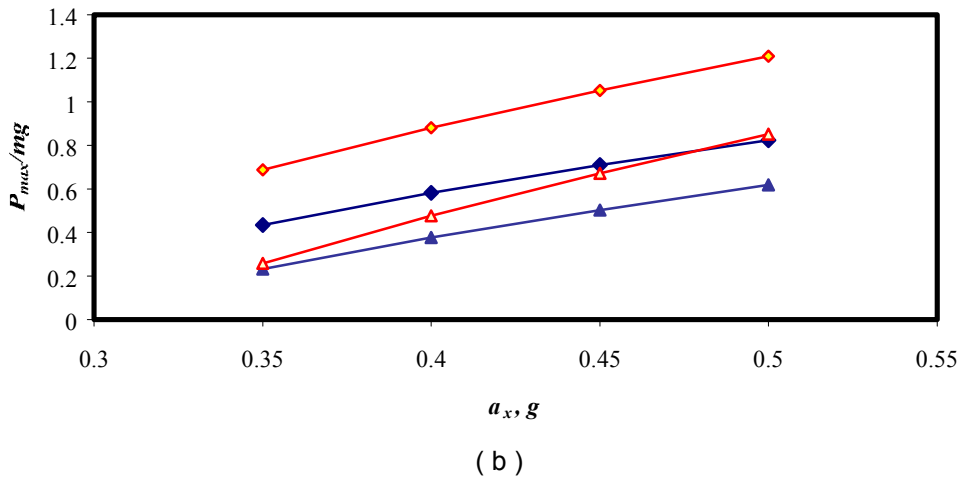
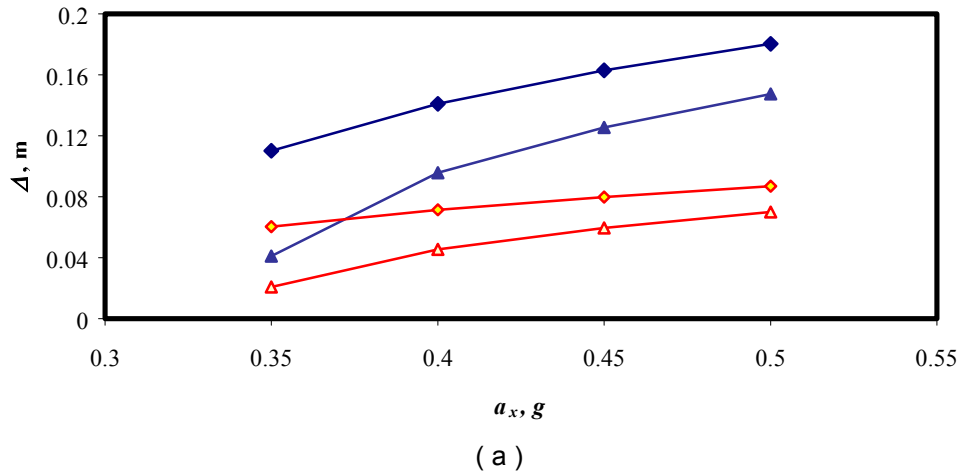


Figura 36: Efecto de la magnitud de a_x sobre la respuesta de una carga asegurada. ($A_z = 0.5 g$; $\phi = 0$; $f = 1\text{Hz}$; $P_0 = 0.2 mg$; $\theta = 60^\circ$; $\mu_s = 0.25$). (a) Desplazamiento de la carga; (b) Fuerza en los amarres.

En la Figura 37 se ilustra el efecto que sobre la respuesta de la carga tienen las variaciones en el valor del coeficiente μ_s . Tanto el desplazamiento de la carga como la fuerza en los amarres, disminuyen rápidamente al incrementar el coeficiente de fricción, esto sin importar el ambiente que se considere de vibración vertical.

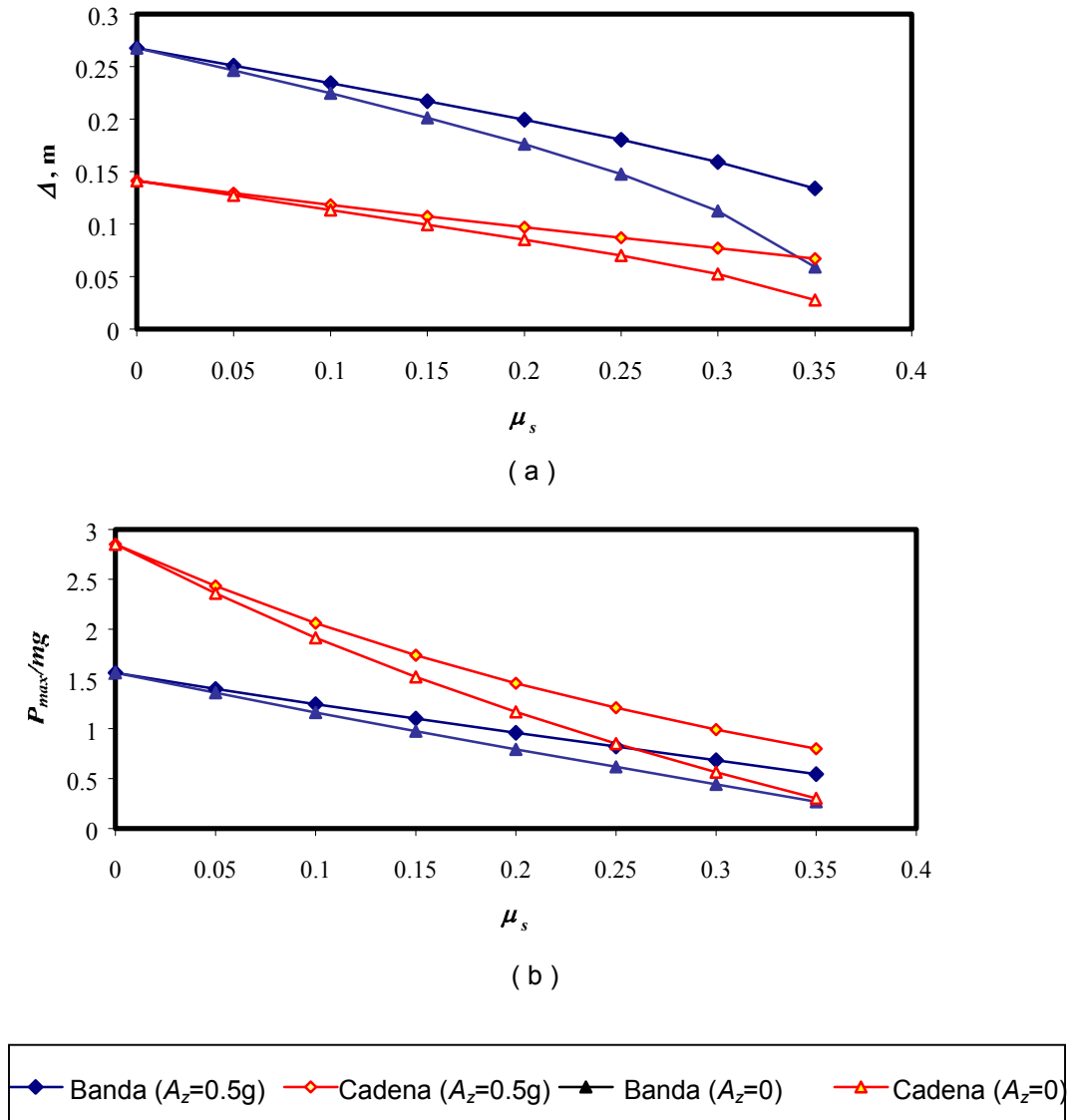


Figura 37: Efecto del valor de μ_s sobre la respuesta de una carga asegurada. ($A_z = 0.5 \text{ g}$; $\phi = 0$; $f = 1 \text{ Hz}$; $P_0 = 0.2 \text{ mg}$; $\theta = 60^\circ$; $a_x = .5 \text{ g}$). (a) Desplazamiento de la carga; (b) Fuerza en los amarres.

2.3.3 Análisis de sensibilidad

Un análisis de sensibilidad es llevado a cabo con objeto de evaluar la importancia relativa de los distintos parámetros considerados en este estudio. Se define una función de sensibilidad S_{ij} al considerar el i -ésimo parámetro de respuesta, y el j -

ésimo factor de operación o de diseño. Los análisis se llevan a cabo usando dos índices de respuesta. $i = 1$ para el desplazamiento de la carga e $i = 2$ para la fuerza máxima desarrollada en los amarres. El factor de diseño j incluye a los materiales de los amarres, μ_s , θ , P_0 , A_z , f y ϕ . La función de sensibilidad se define como:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} / m_{ij} ; \quad i=1,2 \text{ y } j = 1,\dots,7. \quad (22)$$

en donde σ_{ij} y m_{ij} son respectivamente la desviación estándar y el valor medio del i -ésimo parámetro de respuesta, considerando el rango de variaciones para el factor j .

Inicialmente fueron obtenidos los resultados relativos al tipo de material, llevando a cabo un promedio de los valores alcanzados para ambos materiales. La Figura 38 ilustra los valores de la función de sensibilidad para los distintos factores considerados en este análisis. Estos resultados dejan ver que la importancia relativa de los distintos factores, es una función de las características de respuesta dinámica consideradas. Mientras que el factor de fricción es el factor más importante para influenciar la fuerza máxima en los amarres, el tipo de material es el factor más significativo para reducir el desplazamiento de la carga. De entre los factores considerados, la frecuencia de vibración y la fase aparecen como los menos significativos, mientras que la amplitud de la vibración vertical, el coeficiente de fricción, el ángulo del amarre y el material de los amarres aparecen como los más significativos.

2.3.4 Observaciones finales

El análisis de la respuesta de una carga asegurada de manera indirecta, muestra que al no tener vibración vertical, el umbral de aceleración longitudinal se incrementa al aumentar ya sea la tensión inicial, el coeficiente de fricción o el ángulo de los amarres. La presencia de vibración vertical tiende a reducir la efectividad del sistema de aseguramiento de la carga, como una función de la amplitud de esta vibración. Al mismo tiempo, el valor de la frecuencia resulta marginal en el caso de las plataformas infinitamente rígidas consideradas en este estudio. Consiguientemente, es de esperarse que la consideración de patines de soporte o plataformas flexibles, involucrarían un efecto más fuerte en lo que se refiere a la frecuencia de vibración de la plataforma.

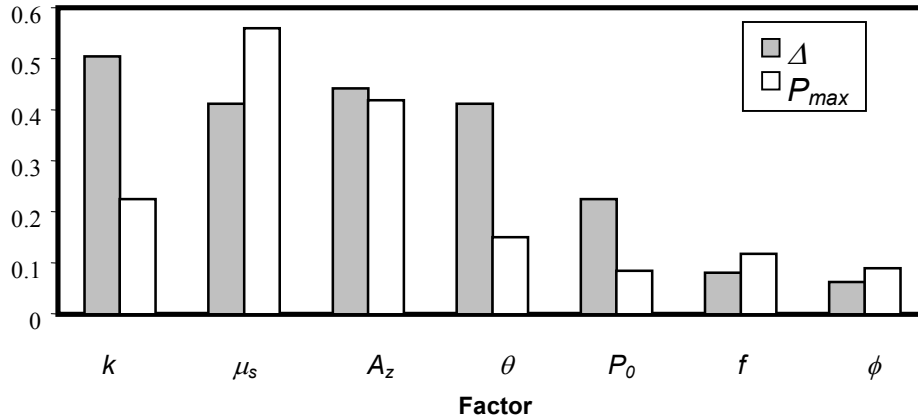


Figura 38: **Análisis de sensibilidad a los parámetros.**

Un incremento en el ángulo de los amarres de 30° a 75° , provoca una disminución no lineal tanto del desplazamiento de la carga como de las fuerzas desarrolladas en los amarres, en el orden del 50%, y de manera independiente al tipo de material de amarre empleado. La efectividad del amarre es afectada de manera más significativa por el nivel de fricción en la interfase carga/plataforma, siendo su efecto altamente no lineal. Para una deceleración longitudinal de $0.5g$, un coeficiente de fricción de 0.35 provoca un desplazamiento de la carga considerablemente menor (del orden del 80%), al comparar este desplazamiento con aquel producido al despreciar esta fricción. El desplazamiento y fuerzas en los amarres se incrementan de manera casi lineal con la magnitud de la deceleración longitudinal aplicada. El uso de elementos de amarre más rígidos, tales como cadenas, mejora la efectividad del aseguramiento de la carga. Una comparación de los materiales empleados como amarres en este estudio (banda tejida y cadena) sugiere que el uso de cadenas podría reducir el potencial desplazamiento de la carga hasta en un 50 %.

De los resultados se detecta también que la tensión inicial en los amarres afecta adicionalmente la respuesta de la carga. De esta manera, un incremento en la tensión inicial de 0.1 mg a 0.4 mg , podría resultar en valores para el desplazamiento de la carga hasta un 50% menores. Esto para las situaciones consideradas de aceleración longitudinal y vibración vertical.

El análisis de sensibilidad presentado en este estudio muestra que la efectividad de un sistema de aseguramiento de carga, podría ser mejorado de manera más importante a través del uso de superficies de alta fricción en la interfase

plataforma/carga, así como por la consideración de una elevada tensión inicial y mayor ángulo de amarre. Se observa que una amplitud elevada en la vibración vertical de la plataforma de soporte de la carga (vehículo), podría deteriorar de manera considerable la efectividad del sistema de aseguramiento de carga.

3 Interacción carga-vehículo durante cambios direccionales

En el capítulo anterior se han presentado modelos de la respuesta dinámica de una carga asegurada, al estar sometida a aceleraciones longitudinales y estar apoyada sobre una plataforma en vibración. Se han analizado las dos situaciones de aseguramiento de la carga mediante amarres directos e indirectos. En este capítulo se presenta un modelo simplificado para el análisis de la interacción dinámica carga sólida – vehículo, durante la ejecución de maniobras de cambio de dirección, al estar el vehículo circulando por caminos rugosos.

Al fallar la efectividad del sistema de restricción de movimiento de una carga que se encuentre asegurada a la plataforma de un vehículo, el deslizamiento de la carga provocará que la fuerza de fricción represente una excitación para el vehículo. Adicionalmente, las fuerzas en los amarres, al tenerse el desplazamiento del vehículo, representan fuerzas aplicadas al bastidor del mismo.

De esta forma, el moverse la carga sobre el vehículo al ejecutar éste una maniobra direccional, la carga tratará de “arrastrar” al vehículo junto con ella. Durante el movimiento de la carga, las desiguales fuerzas en los amarres se adicionarán a estas fuerzas de fricción, con lo que la estabilidad del vehículo podrá ser afectada. El efecto de estas fuerzas en los amarres, es nulo siempre y cuando la carga no esté en movimiento.

3.1 Modelo matemático

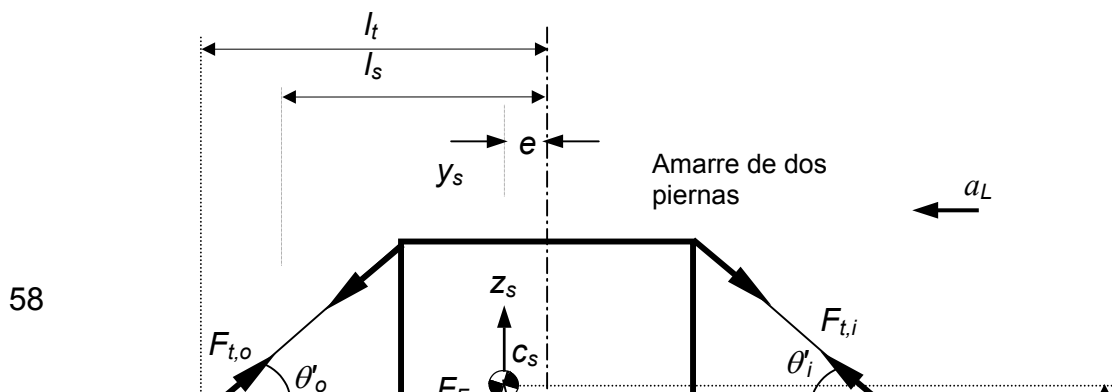
La falla del sistema de inmovilización de la carga, como resultado tanto de las aceleraciones a que se somete el vehículo al realizar maniobras, como a la vibración vertical del vehículo asociada a las irregularidades del camino, provoca que el vehículo se vea sometido a perturbaciones que potencialmente afectan su estabilidad direccional. Estas perturbaciones aplicadas al vehículo por la carga que se desplaza, afectan la vibración lateral, la oscilación longitudinal y la vibración vertical del vehículo. Estas perturbaciones consisten en la fuerza de fricción entre la carga y la plataforma (F_F), y las fuerzas desarrolladas en los anclajes de los amarres, tanto interiores como exteriores ($F_{t,i}$, $F_{t,o}$, respectivamente), de la manera como se ilustra en la Figura 39. Esta figura representa una carga asegurada transportada sobre un modelo de “medio-carro”, caracterizado por sus masas suspendida y no suspendida, y por contar con resortes y amortiguadores lineales. Asumiendo a la rigidez lateral de las llantas como la única fuente de flexibilidad lateral del vehículo, la interacción de la carga con el vehículo queda caracterizada por seis grados de libertad, los cuales comprenden la posición de la carga sobre la plataforma del vehículo (y_s), las posiciones de oscilación longitudinal y vertical de las masas suspendida (z_s , ϕ_s) y no suspendida (z_u , ϕ_u), y la posición lateral de

ambas masas (z_L). De esta forma, las ecuaciones de movimiento para el vehículo durante la condición de desplazamiento de la carga, son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{z}_s &= F_{s,k,o} + F_{s,c,o} + F_{s,k,i} + F_{s,c,i} + F_{t,o} \text{ sen } \theta_o + F_{t,i} \text{ sen } \theta_i - m_s g \\
 I_s \ddot{\phi}_s &= (F_{s,k,o} - F_{s,k,i}) l_s + (F_{s,c,o} - F_{s,c,i}) l_s + (F_{t,i} \text{ sen } \theta_o - F_{t,o} \text{ sen } \theta_i) l_t + (F_{t,i} \text{ cos } \theta_o \\
 &\quad \dots \dots \dots \\
 &\quad \dots \dots \dots F_{t,o} \text{ cos } \theta_i + F_F) (h_{ps} - h_{rs}) + m_s (g - z_s)[e + \phi_s(h_{cs} - h_{rs})] + m_s (a_L - z_L) (h_{cs} - \\
 &\quad h_{rs}) \\
 m_u \ddot{z}_u &= F_{t,k,o} + F_{t,c,o} + F_{t,k,i} + F_{t,c,i} - (F_{s,k,o} + F_{s,c,o} + F_{s,k,i} + F_{s,c,i}) - m_u g \\
 I_u \ddot{\phi}_u &= (F_{t,k,o} - F_{t,k,i}) l_w + (F_{t,c,o} - F_{t,c,i}) l_w - (F_{s,k,o} - F_{s,k,i}) l_s - (F_{s,c,o} - F_{s,c,i}) l_s \\
 &\quad + m_u (g - z_u)[\phi_u(h_{ca} - h_{ra})] + m_u (a_L - z_L) (h_{cu} - h_{ru}) \\
 (m_s + m_u) z_L &= - (m_s + m_u) a_L - (F_{t,o} \text{ cos } \theta'_o - F_{t,i} \text{ cos } \theta'_i - F_F) + F_{t,k,l} + F_{t,c,l}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

La excentricidad e esta ecuación, se deriva de una condición general, en la cual la carga se encuentra ya desplazada del centro del vehículo.

El movimiento de la carga es modelado asumiendo un sistema masa - resorte no lineal ($k_E = f(y_s)$), al cual se introducen como perturbaciones las fuerzas en los amarres ($F_{t,o}$, $F_{t,i}$). k_E se deriva de las relaciones geométricas asociadas al ángulo de los amarres y al movimiento de la carga. La variación resultante de k_E con respecto a y_s , se muestra en la Figura 40 para el caso de una carga de altura unitaria, asegurada mediante amarres de banda tejida colocados a 45° . En la sección 2.2 de este trabajo, se presentan los detalles de este modelo de aseguramiento de la carga.



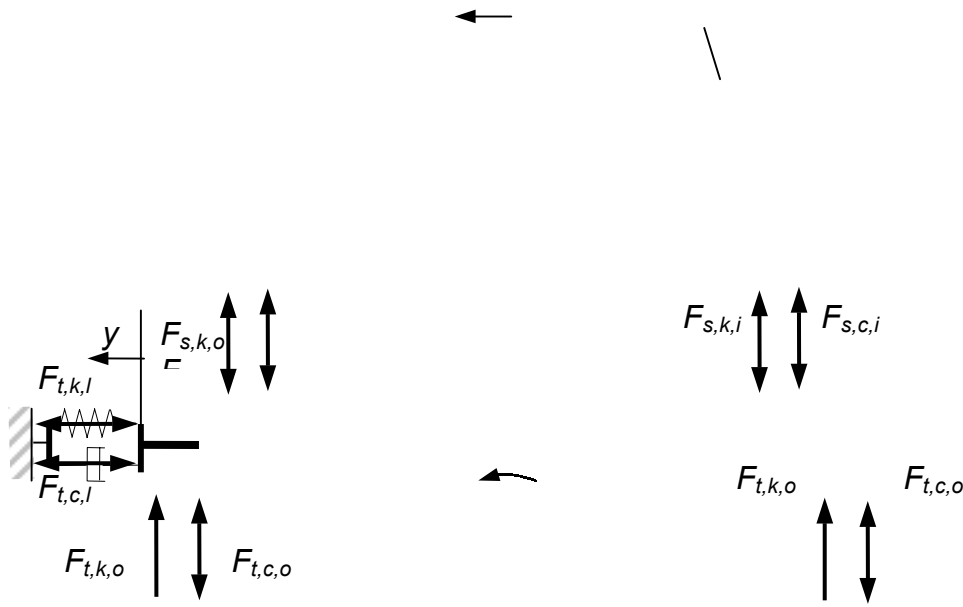


Figura 39: **Modelo de vibración longitudinal y vertical de un vehículo que transporta una carga que se desliza durante un cambio de dirección.**

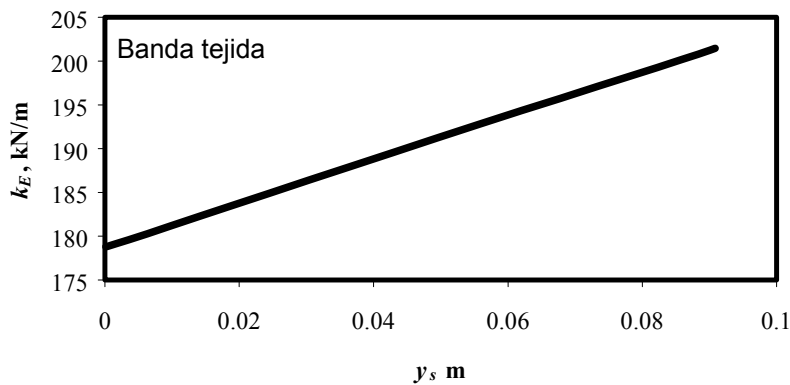


Figura 40: **Variaciones en la rigidez equivalente con el desplazamiento de la carga.**

La ecuación de movimiento para la carga sobre la plataforma, es la siguiente:

$$m_c \ddot{y}_s = -k_E (y_s) + m_c a_t + (F_{t,o} \cos \theta'_o - F_{t,i} \cos \theta'_i) - F_F \quad (24)$$

en donde a_t es la aceleración tangencial de perturbación y F_F está dada como una función de la fuerza de contacto entre la carga y la plataforma, F_n , esto es:

$$F_F = \mu F_n \quad (25)$$

en donde μ es el coeficiente de fricción carga/plataforma, y

$$F_n = m(g \cos \phi_s - a_n) - F_{t,o} \sin \theta'_o - F_{t,i} \sin \theta'_i \quad (26)$$

en donde g es la aceleración de la gravedad y la aceleración normal a_n está dada por:

$$a_n = \ddot{z}_s \cos(\phi_s) + \phi_s^2 (h_{cs} - h_{rs}) + (a_L - \dot{z}_L) \phi_s \quad (27)$$

La aceleración tangencial a_t en (24) está dada por:

$$a_t = -\ddot{z}_T \phi + \ddot{\phi}_s (h_{cs} - h_{rs}) + a_L \cos(\phi_s) + g \phi_s \quad (28)$$

La condición umbral para el movimiento de la carga sobre la plataforma del vehículo, queda dada por el momento en que la fuerza de fricción opuesta al movimiento de la carga, es menor que la suma algebraica de las fuerzas tangenciales de inercia y de los amarres.

3.2 Resultados y discusión

El efecto del desplazamiento de la carga sobre la estabilidad lateral del vehículo, es evaluada en términos del cociente de transferencia de carga, CTC , definido de la siguiente manera (Goldman et al., 2001):

$$CTC = \frac{|F_{z,o} - F_{z,i}|}{F_z} \quad (29)$$

en donde $F_{z,o}$ es la fuerza en la llanta exterior, $F_{z,i}$ es la fuerza en la rueda interior y F_z es la suma de las fuerzas en ambas ruedas. El valor de CTC se aproxima a la unidad cuando todas las llantas de un lado del vehículo pierden contacto con el pavimento, indicando con ello una posible volcadura. En este estudio se consideran las repuestas en el dominio del tiempo de la interacción carga-vehículo, para las condiciones y propiedades nominales listadas en la Tabla 1.

Tabla 1: **Propiedades/condiciones nominales.**

Característica	Valor nominal
Masa suspendida, m_s	5000 kg
Masa no suspendida, m_u	1000 kg
Masa de la carga, m_c	1000 kg
Rigidez suspensión, k_s	1000 kN/m
Amortiguamiento Suspensión, c_s	15 kNs/m
Rigidez llantas duales, k_t	1400 kN/m
Amortiguamiento llantas duales, c_t	2.5 kNs/m
Rigidez lateral vehículo, k_L	2000 kN/m
Amortiguamiento lateral vehículo, k_L	35 kNs/m
Mitad de ancho de pista, l_w	1.0 m
Mitad de separación de suspensión, l_u	0.7 m
Altura del c.g. de la masa suspendida, h_{cs}	1.5 m
Altura del c.g. del eje, h_{ca}	0.6 m
Altura de la plataforma, h_{ps}	1.4 m
Altura del centro de oscilación de la masa suspendida, h_{rs}	1. m
Altura del centro de oscilación del eje, h_{ra}	0.4 m
Velocidad del vehículo, v	80 km/h
Coefficiente de fricción carga-plat. μ	.35
Ángulo de amarre inicial, θ_0	45°
Tensión inicial de los amarres, $P_{i,0}$	0.25 m_{cg}
Material de los amarres	Banda tejida
Radio de maniobra, R	250 m

Transitorio para pavimento de cero rugosidad y vehículo acelerando

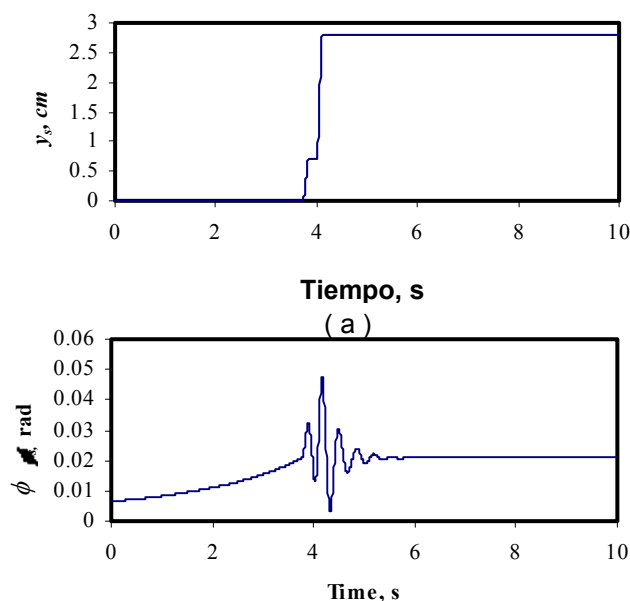
Los resultados en la Figura 41 muestran el corrimiento de la carga, asociado a la creciente aceleración lateral del vehículo, producto del incremento de velocidad. La velocidad se mantiene constante una vez que se da la situación de desplazamiento de la carga. En estos resultados es posible observar una clara relación causa-efecto entre el corrimiento de la carga y_s y las variables de respuesta del vehículo: ϕ_s and CTC . Se puede observar en estos resultados que durante el segundo ciclo de oscilación de la plataforma, se presenta una segunda serie de corrimientos de la carga. El desplazamiento de la carga cesa como una consecuencia de la creciente fuerza entre la carga y la plataforma, como se ilustra en la parte (d) de esta figura 41. El valor inicial de tal fuerza corresponde a las tensiones iniciales en los amarres y al peso de la carga.

Efecto del perfil del pavimento

Con objeto de incorporar el efecto de la rugosidad del pavimento al estudio de la interacción carga-vehículo, tres diferentes niveles de rugosidad del pavimento son considerados (rugosidad baja, media y alta). La Figura 42 muestra un segmento representativo de perfil de pavimento, correspondiente a la pista interior de un pavimento con rugosidad elevada.

La Figura 43 muestra los resultados en el tiempo, para el desplazamiento de la carga y sus efectos sobre los valores del *CTC*, como una función de la condición de rugosidad del pavimento. En estas gráficas se incluyen las variaciones del *CTC* para la condición de no desplazamiento de la carga, con objeto de efectuar comparaciones. Estos resultados muestran el significativo efecto del desplazamiento de la carga sobre la variación del *CTC*, y por consiguiente sobre la estabilidad lateral del vehículo. El efecto más fuerte del desplazamiento de la carga se observa en el caso del pavimento de rugosidad baja (parte (a)), para el cual el corrimiento de la carga causa un incremento del 70% en el *CTC* máximo, al compararlo con la situación en la que no hay desplazamiento de la carga. Las cifras correspondientes para estos incrementos, en el caso de pavimentos de rugosidad media y alta, son 40 y 10 %, respectivamente. Este efecto relativamente pequeño en el caso del pavimento de rugosidad alta, se atribuye a una situación en la que altos valores para *CTC* existen de por sí en el caso de este tipo de pavimento, no dando margen para incrementar aún más estos valores.

La fuerza máxima desarrollada en los amarres representa otra de las medidas de desempeño para el estudio de la interacción carga-vehículo. En términos del peso de la carga, w_c , las máximas fuerzas obtenidas para las simulaciones mostradas en la Figura 43, son $.946 w_c$, $1.335 w_c$ y $.593 w_c$ para pavimento de rugosidad baja, media y alta, respectivamente. Estas variaciones representan incrementos en términos de la tensión inicial de los amarres (de $0.25 w_c$) de 3.7, 5.34 y 2.37, para el pavimento de rugosidad baja, media y alta, respectivamente. Estas fuerzas resultantes proveen un criterio para la selección del número apropiado de amarres requerido para asegurar una cierta carga.



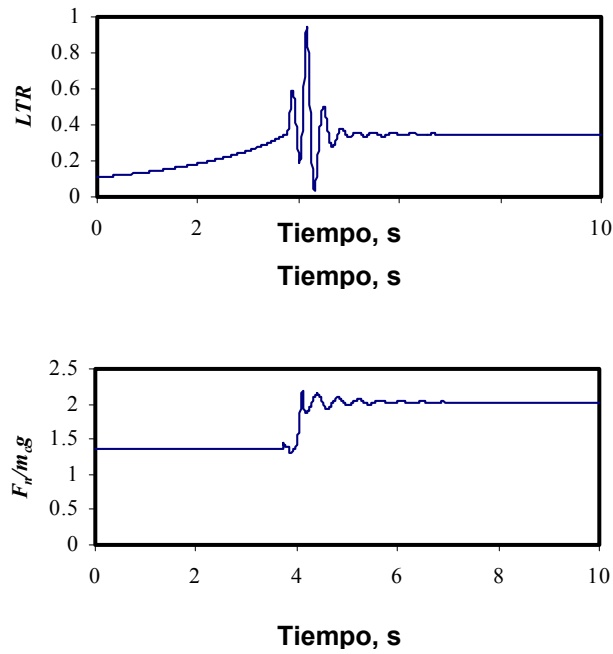


Figura 41: Desplazamiento de la carga sobre un vehículo que aumenta su velocidad al dar vuelta. Nivel de aceleración: 2 m/s^2 .

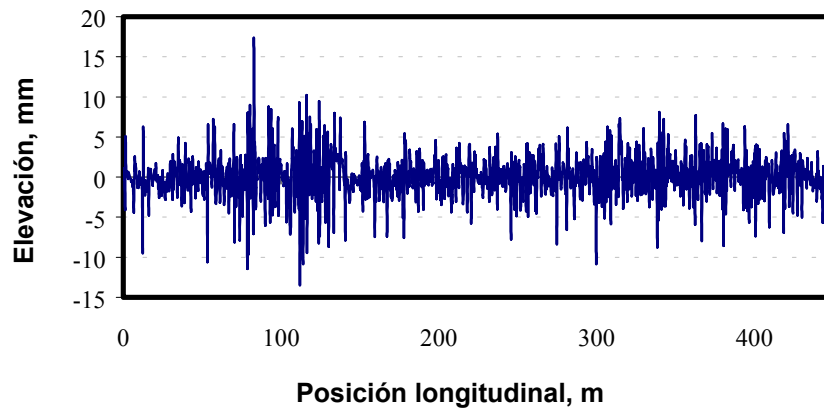
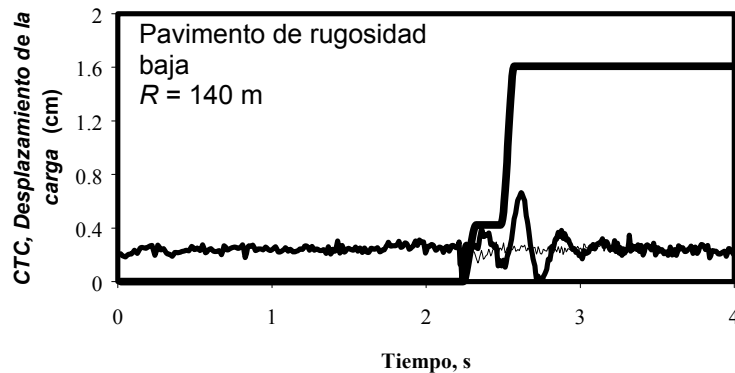


Figura 42: Perfil de pavimento en mal estado (alta rugosidad), pista interior (IIR = 4.23 mm/m).

3.3 Observaciones finales

Se ha presentado un modelo del efecto que el desplazamiento de una carga tiene sobre la estabilidad lateral de un vehículo simplificado, como una función del estado de rugosidad del pavimento. Los resultados, evaluados en términos de la transferencia lateral de carga del vehículo, muestran que el corrimiento de la carga puede ser un factor que contribuya a la ocurrencia de accidentes carreteros.

Se encontró una relación directa causa-efecto entre el corrimiento de la carga y el cociente de transferencia de carga, representando incrementos en este cociente en el orden del 70% con respecto a los resultados obtenidos en una situación en la que no se presentó el corrimiento de la carga. El efecto más importante del corrimiento de la carga se observa en el caso de pavimentos de rugosidad baja, ya que los pavimentos de rugosidad mayor implican de por sí altos valores para el cociente de transferencia de carga, sin dar espacio para mayores valores de *CTC*. Con objeto de cuantificar el efecto de cada uno de los muchos factores que afectan la interacción carga – vehículo, se considera necesario efectuar un estudio paramétrico exhaustivo, tomando en cuenta factores asociados a la carga, al vehículo, y a la infraestructura.



(a)

(b)

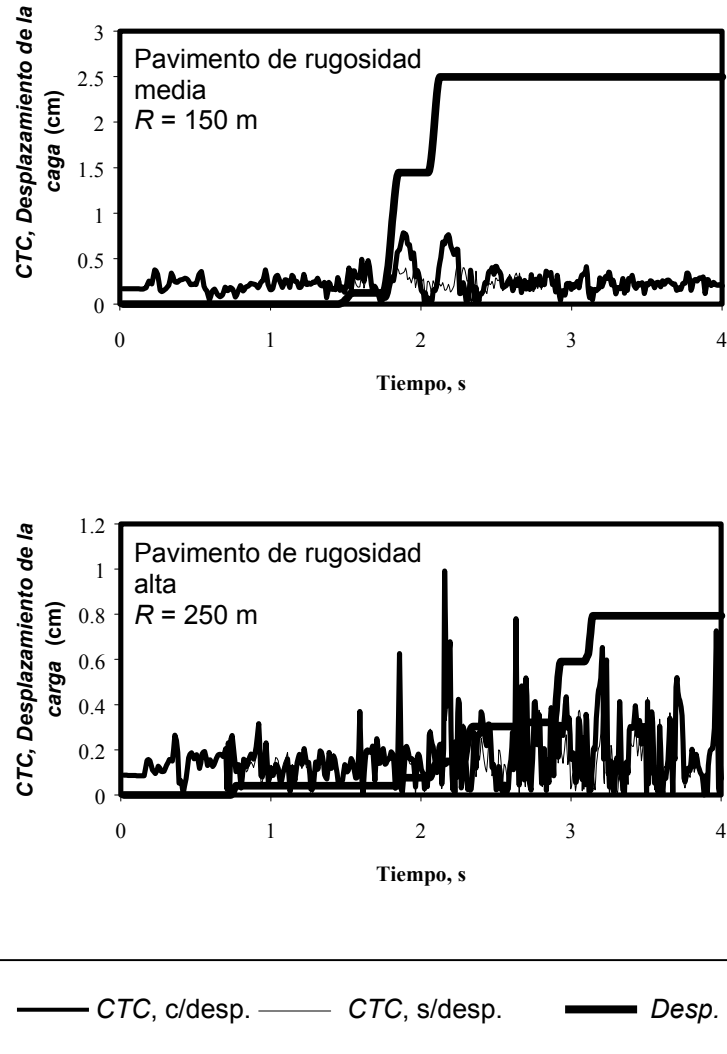


Figura 43: Desplazamiento de la carga en un vehículo que acelera y da vuelta. Variación de la velocidad: 2 m/s^2 .

4 Interacción carga-vehículo durante un frenado ABS

En esta sección se presenta un modelo de la interacción que se establece entre un vehículo de dos ejes y la carga sólida que transporta, al efectuarse un frenado de emergencia en línea recta en el que la carga sufre un corrimiento sobre el vehículo. Las características distintivas de los frenos antibloqueo (ABS, *Antilock Brake System*), son incorporadas en el sistema de frenos de ambos ejes del vehículo.

El interés del estudio de la interacción carga-vehículo durante un frenado que involucre un sistema de frenos antibloqueo, se deriva de las esperadas aceleraciones longitudinales del vehículo durante el frenado, debidas a su vez a la operación del sistema ABS, las cuales pudieran causar corrimientos adicionales de la carga. La operación de un sistema ABS involucra la variación en la presión aplicada al sistema de frenado, a manera de evitar el bloqueo de las ruedas.

En la actualidad, diversas normas de seguridad carretera están siendo revisadas o desarrolladas, incluyendo la normatividad para la determinación de la eficiencia de frenado empleando ABS (FMCSA, 2000; NHTSA/VRTC, 2001). Por otro lado, el aseguramiento de la carga ha sido el tema de algunos estudios experimentales y analíticos, los cuales han buscado el establecer las bases para el desarrollo de normas fundamentadas en el área de aseguramiento de la carga, y por lo tanto disminuir la probabilidad de accidentes relacionados con la falta de efectividad de los sistemas de aseguramiento de carga (FMCSA, 2000; Billing, 1998; Rakheja et al., 1997). Por cuanto a los sistemas de frenado ABS, se estudia actualmente el mínimo desempeño requerido de manera estándar para estos sistemas, estableciendo las maniobras específicas por aplicar e involucrando tanto la respuesta dinámica como el desempeño y potenciales fallas del sistema ABS (NHTSA/VRTC, 2001).

4.1 Modelo matemático

La Figura 44(a) muestra una carga asegurada de manera directa, transportada sobre la plataforma de un camión no articulado, el cual es sometido a una aceleración de frenado en línea recta, a_B . La Figura 44(b) muestra los cinco grados de libertad que caracterizan la respuesta del sistema conformado por la carga y el vehículo durante la maniobra de frenado, al circular por un camino irregular: dos corresponden a las respuestas del cabeceo y verticales de la masa suspendida (ϕ , z_S); uno a cada eje (z_D , z_T); y otro a la posición longitudinal de la carga sobre la plataforma del vehículo (y_s). Como pavimento ha sido considerado una superficie irregular y se ha asumido que sobre el sistema vehículo/carga/frenos, no existe el efecto de arrastre del tren motriz, ni la resistencia del viento. Se han

considerado dos sistemas independientes de frenos ABS, uno por cada eje del vehículo. Se ha considerado asimismo que las dimensiones de la carga son tales que ésta no es capaz de volcarse sobre la plataforma del vehículo. Dos tipos de aseguramiento mediante amarres han sido considerados, aseguramiento directo e indirecto.

4.1.1 Momentos y fuerzas asociadas a la maniobra de frenado

Las fuerzas desarrolladas en la interfase de la llanta con el pavimento, causan las aceleraciones longitudinales de las masas del vehículo. La masa suspendida (m_S) consiste de la masa propia del vehículo (m_E), más la masa de la carga útil transportada (m_C) (con pesos respectivos de w_E y w_C). La Figura 44(a) muestra los centros de gravedad de estas masas, incluyendo la posición del centro de gravedad resultante para la masa suspendida. La aceleración de frenado de la masa suspendida representa fuerzas de inercia ejercidas a lo largo de los grados de libertad del cabeceo (ϕ) y de vibración vertical (z_S). La Figura 44(c) ilustra las reacciones de las suspensiones a las fuerzas de inercia derivadas de la aceleración de frenado. El momento de frenado resultante (M_B) y la fuerza vertical (F_B) ejercida sobre la masa suspendida, son expresadas mediante la siguiente ecuación:

$$M_B = R_{DB} C_F + R_{TB} C_R \quad (30)$$

donde:

$$R_{DB} = (m_S a_B ((h_S + z_S) - (h_A + z_R))) / WB$$

$$R_{TB} = (m_S a_B ((h_S + z_S) - (h_A + z_F))) / WB$$

y $F_B = R_{TB} - R_{DB}$

Cuando la carga es forzada a desplazarse sobre la plataforma del vehículo como resultado de la aceleración de frenado y la vibración del vehículo, un conjunto de fuerzas, ligadas a los amarres y a la interfase carga/plataforma, son aplicadas de manera transitoria sobre el vehículo. Estas fuerzas consisten de la fuerza de fricción entre la carga y la plataforma, y las fuerzas en los puntos de anclaje de los ensambles de los amarres. La Figura 45 muestra las fuerzas que son aplicadas sobre el vehículo cuando una carga asegurada de manera indirecta, se mueve hacia delante sobre la plataforma. Estas fuerzas representan perturbaciones al cabeceo (M_{BS}) y vibración vertical del vehículo (F_{BS}), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_{BS} = R_{DS} C_F + R_{TS} C_R \quad (31)$$

donde:

$$R_{DS} = (F_C ((h_p + z_S) - (h_A + z_R)) - F_{tn} (WB - c_C)) / WB$$

$$R_{TS} = (F_C ((h_p + z_S) - (h_A + z_F)) + F_{tn} c_C) / WB$$

donde F_C es la suma de la fuerza de fricción F_R y la componente longitudinal de la fuerza en los puntos de anclaje de los amarres, F_{tt} :

$$F_C = F_R + F_{tt} \quad (32)$$

donde $F_R = \mu_s F_n$, donde F_n es la fuerza de contacto normal entre la carga y la plataforma y μ_s es el respectivo coeficiente de fricción disponible entre las superficies de la carga y la plataforma. Consiguientemente:

$$F_{BS} = R_{TS} - R_{DS} \quad (33)$$

Las fuerzas de frenado en la interfase llanta/pavimento están dadas por $F_D = N_D \mu_D$ y $F_T = N_T \mu_T$, donde μ_D y μ_T son los coeficientes de frenado en las interfases llanta/pavimento delantera (D) y trasera (T), y N_D y N_T son las fuerzas normales respectivas. La aceleración de frenado del vehículo a_B está dada entonces por:

$$a_B = (F_C \cos(\phi) - (F_D + F_T)) / m_T \quad (34)$$

donde m_T es la masa total del vehículo:

$$m_T = m_E + m_C + m_{AD} + m_{AT},$$

donde m_{AD} y m_{AT} representan las masas de los ejes delantero y trasero, respectivamente, y:

$$F_C = 0 \text{ if } \dot{y}_s = 0.$$

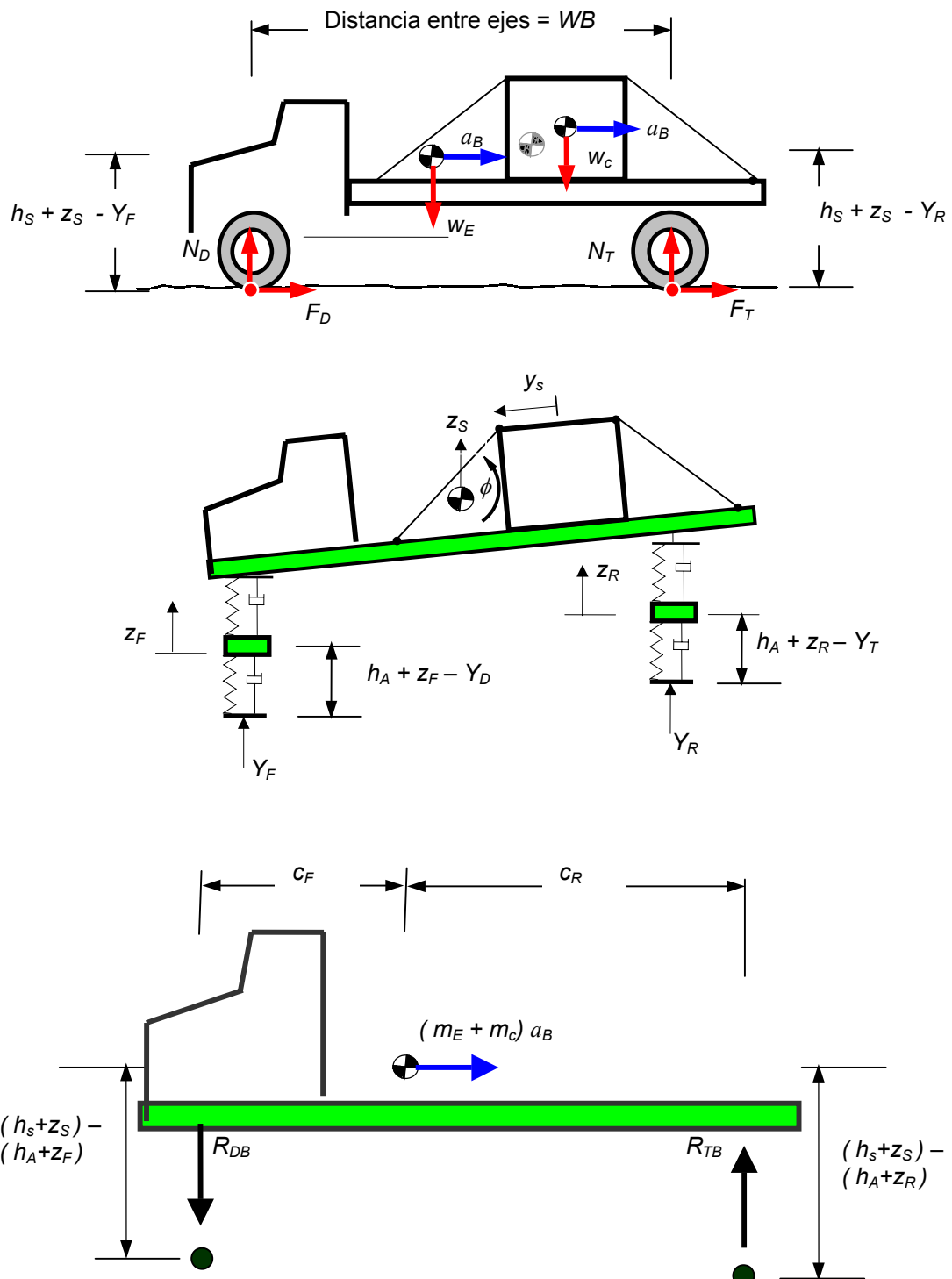


Figura 44: Un vehículo cargado durante un frenado: (a) Esquema de un vehículo tipo plataforma cargado; (b) Representación en multi-cuerpos; y (c) Fuerza inercial de frenado.

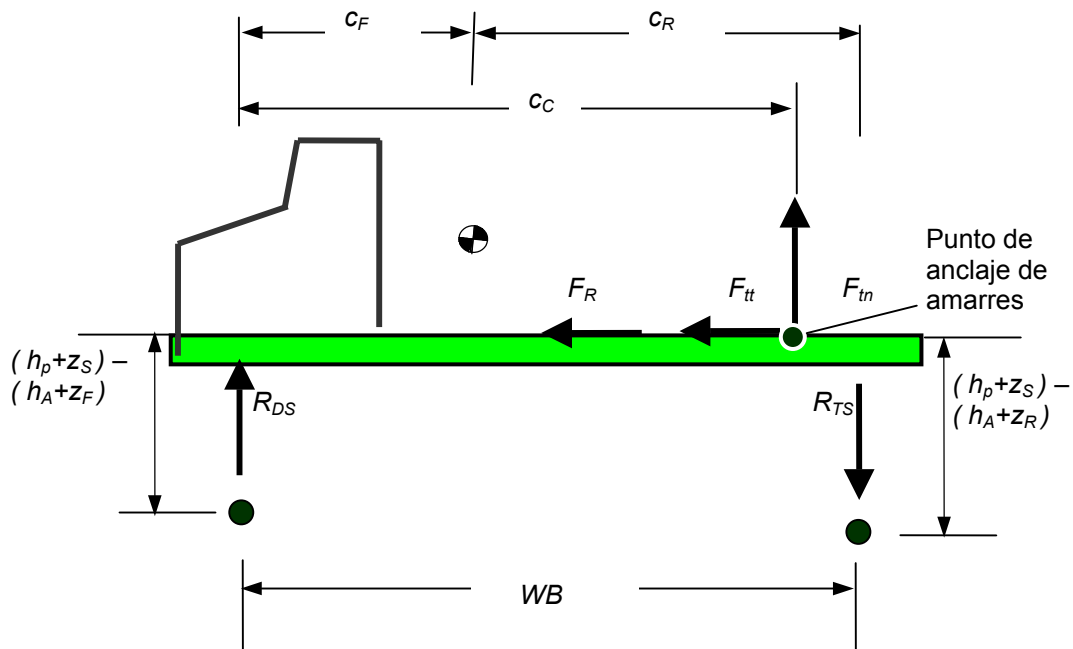


Figura 45: Fuerzas de fricción y en los amarres, aplicadas sobre el vehículo durante el desplazamiento de la carga.

4.1.2 Fuerzas en la interfase carga/plataforma

Las fuerzas que actúan en la interfase de la carga con la plataforma, a lo largo de planos normales y tangenciales, consisten de una componente normal (F_{tn}) y tangencial (F_{tt}) de los amarres, y las correspondientes fuerzas inerciales de la masa de la carga. Estas fuerzas de inercia están ligadas con la gravedad, al frenado y a las aceleraciones de cabeceo y vibración vertical de la plataforma. La Figura 46 muestra un diagrama del movimiento de la carga-plataforma, ilustrando las fuerzas asociadas con la interfase de la carga y plataforma, incluyendo la fuerza de resistencia al movimiento de la carga, F_R .

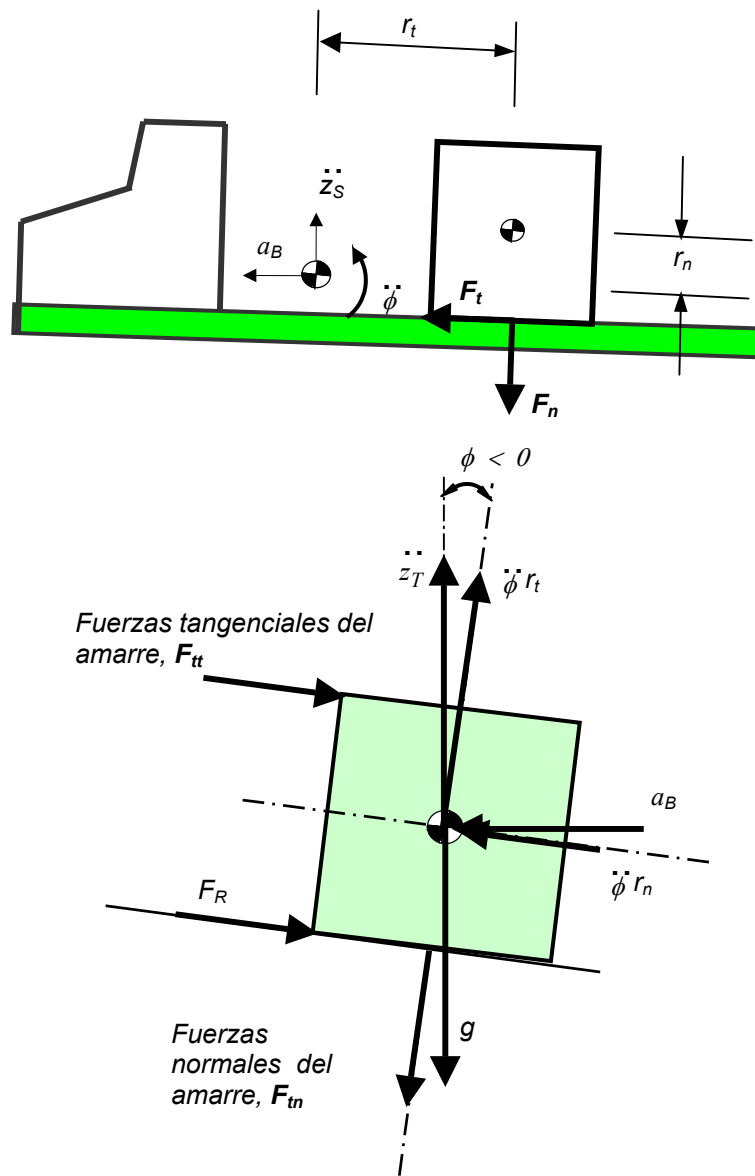


Figura 46: Representación esquemática de las fuerzas de los amarres e inerciales entre la carga y la plataforma.

La fuerza normal resultante entre la carga y la plataforma está dada entonces mediante la siguiente ecuación:

$$F_n = m(-g \cos \phi - a_n) - F_{tn} \quad (35)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, F_{tn} es la fuerza resultante normal en los amarres, y la aceleración normal a_n está dada por:

$$a_n = \ddot{z}_T \cos(\phi) + \ddot{\phi} r_t - a_B \phi \quad (36)$$

La fuerza tangencial correspondiente en la interfase carga-plataforma está dada por la siguiente expresión:

$$F_t = m a_t - F_{tt} - F_R \quad (37)$$

donde F_R es la fuerza de fricción entre la carga y la plataforma, F_{tt} es la fuerza tangencial resultante en los amarres, y a_t es la aceleración tangencial resultante:

$$a_t = - \ddot{z}_T \phi + \ddot{\phi} r_n + a_B \cos(\phi) + g \phi \quad (38)$$

La condición de inicio de desplazamiento de la carga sobre la plataforma del vehículo, está representada por una situación en la que la fuerza de resistencia al movimiento, es menor que la suma algebraica de las fuerzas tangenciales en los amarres y las fuerzas de inercia. Como fue discutido anteriormente, durante esta situación de desplazamiento de la carga, las fuerzas de fricción y en los amarres representan perturbaciones a la respuesta de vibración vertical y de cabeceo del vehículo.

4.1.3 Modelo de fricción entre la llanta y el camino

La relación entre la fuerza de fricción y la fuerza normal en la llanta ($\mu_D = F_D / N_D$; $\mu_T = F_T / N_T$), es una función del deslizamiento de la rueda. El deslizamiento S de la rueda está definido de la siguiente manera (Gillespie, 1992):

$$S = V - \omega r / V \quad (39)$$

donde V es la velocidad de avance del vehículo, ω es la velocidad rotacional de la rueda (rad/s) y r es el radio de la llanta. La relación considerada en este estudio entre el coeficiente de frenado y el deslizamiento S , está ilustrado en la Figura 47,

y está caracterizado en términos del valor máximo (pico) del coeficiente de fricción (0.75 para pavimento seco).

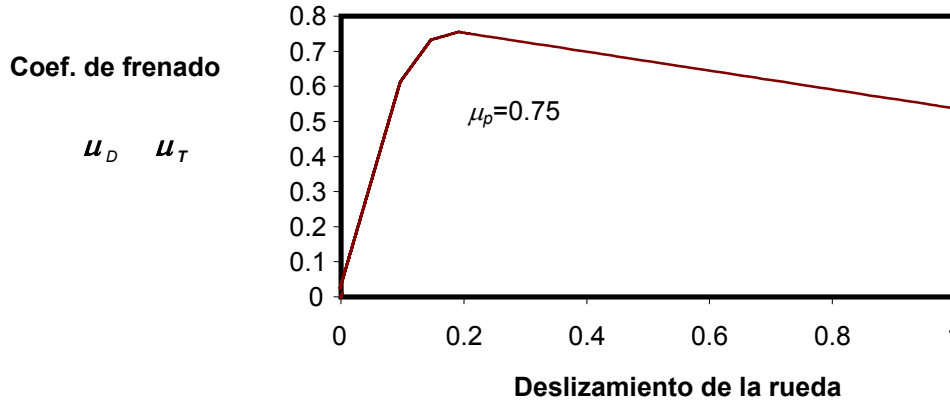


Figura 47: Modelo para la fuerza de fricción.

4.1.4 Modelo del sistema de frenado antibloqueo, ABS

En la Figura 48 se muestra el modelo del sistema de frenado antibloqueo considerado en esta investigación. El modelo consiste de un sistema ABS, equipado con un controlador basado en el deslizamiento de la rueda, del tipo *bang-bang*. Este algoritmo simple para el control del sistema ABS, está basado en una aplicación del programa SIMULINK (Simulink, 2001). El controlador tipo *bang-bang* define la dirección de variación de la presión en el sistema de frenado, como una función de la diferencia entre el punto de referencia para un deslizamiento deseado y el deslizamiento real en la rueda. La dinámica para la variación de la presión en el interior del sistema de frenado (dp/dt), es modelado como la variación exponencial siguiente:

$$dp/dt = (1 - \exp(-t / TC)) (dp/dt)_{nom} \quad (40)$$

donde $(dp/dt)_{nom}$ es el valor de la variación nominal de la presión en el sistema de frenado y TC es la constante de tiempo.

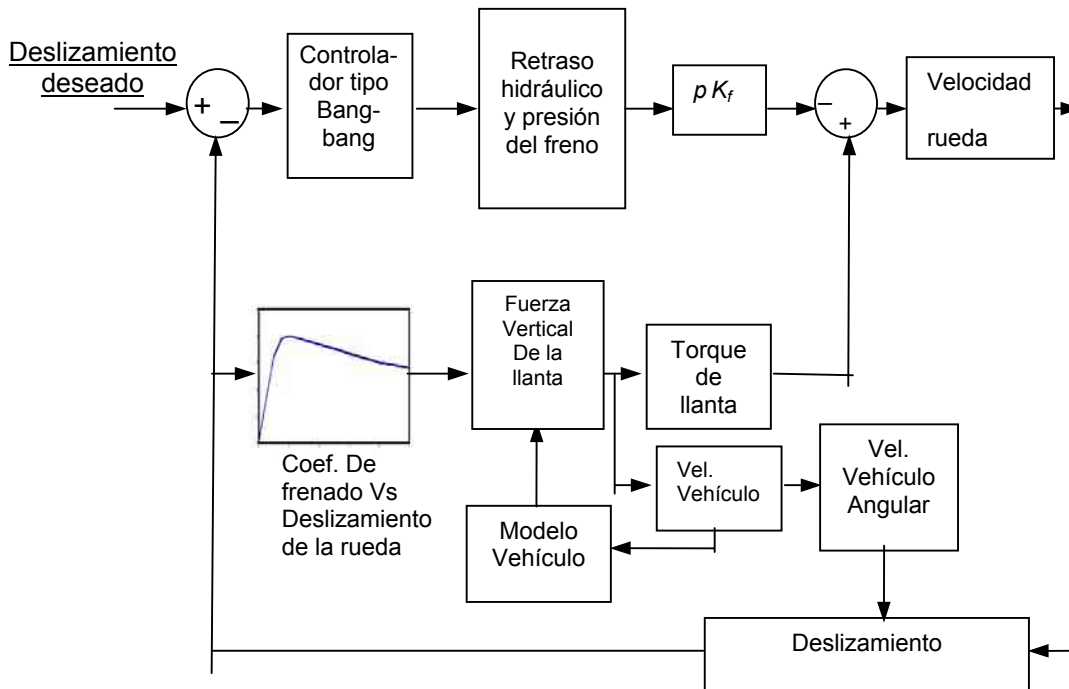


Figura 48: **Modelo del sistema de frenado antibloqueo, ABS.**

dp/dt en la ecuación (40) es integrada mediante la regla trapezoidal, y la presión resultante se multiplica por la relación Momento de Frenado/Presión, K_f . Este momento de frenado resultante, se resta al momento de la fuerza de fricción llanta/pavimento disponible, con objeto de obtener la aceleración angular actual de la rueda y posteriormente su velocidad, obteniendo finalmente el deslizamiento de la rueda. Las fuerzas normales en las llantas en el modelo de frenado (N_D , N_T), se obtienen a partir del modelo de respuesta del vehículo en cabeceo y vibración vertical. En este estudio, el valor considerado para la variación en la presión del sistema de frenado, $(dp/dt)_{nom}$, fue de $5.5E6$ Pa/s, al tiempo que la constante de tiempo TC fue de 0.01 s. La Figura 49 muestra la variación de presión resultante con respecto al tiempo.

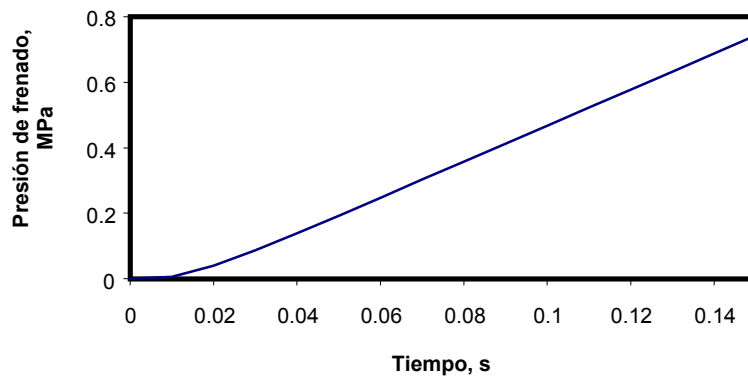
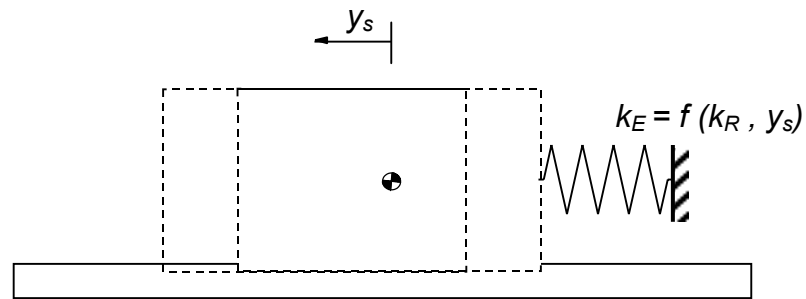


Figura 49: Variación de la presión de frenado en el sistema.

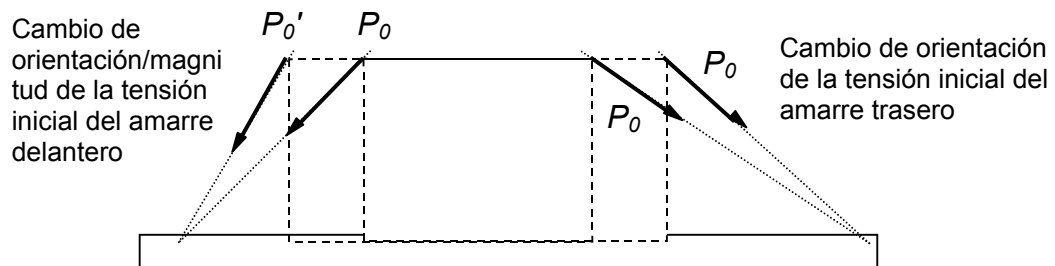
4.1.5 Modelos de respuesta de la carga

Las fuerzas F_{tn} y F_{tt} en las ecuaciones (35) y (37), son funciones de la respuesta de la carga a las perturbaciones de vibración vertical y aceleración longitudinal, y dependen del tipo de ensamble de aseguramiento empleado (directo o indirecto). Los modelos de estos dos tipos de aseguramiento han sido presentados en el capítulo 2 de esta publicación. En ambos modelos ha sido desarrollado un esquema de resorte no lineal equivalente, dando como resultado el que el sistema de la masa y sus elementos de aseguramiento, constituyan modelos masa-resorte de un grado libertad. Las propiedades de rigidez de los amarres (k_R , k_F), son tomadas de los resultados experimentales reportados por Billing (1998). La respuesta dinámica de la carga a la aceleración de frenado a_B se caracteriza entonces por el desplazamiento de la carga y por la magnitud de las fuerzas desarrolladas en los amarres. La respuesta de la carga es por lo tanto, una función de la elasticidad de los amarres, de los ángulos de amarre, de la tensión inicial en cada uno de los amarres, del valor del coeficiente de fricción entre la carga y la plataforma, y de la naturaleza de la vibración vertical de la plataforma (magnitud, frecuencia y ángulo de fase).

La Figura 50 ilustra el sistema mecánico equivalente para una carga directamente asegurada, para la cual la tensión inicial en los amarres se consideran como perturbaciones al modelo (Figura 50(b)), como se mostró en la sección 2 de este trabajo. Debido a la orientación de los amarres (Transversal o longitudinal con respecto al desplazamiento de la carga), el resorte equivalente asociado a un aseguramiento indirecto, es más débil que un aseguramiento directo, para el mismo desplazamiento de la carga.



(a)



(b)

Figura 50: **Modelo de aseguramiento directo de una carga.**

Simulación

Los diferentes modelos (vehículo, carga, frenos), son integrados en un solo programa de cómputo, siendo resueltas las ecuaciones de movimiento aplicando el Método de las Matrices de Transición (Meirovitch, 1986).

4.2 Resultados y discusión

En esta sección se presenta el uso del modelo matemático desarrollado, para el análisis de la interacción entre la carga y el vehículo durante una maniobra de frenado de emergencia en línea recta. Tal interacción está caracterizada por la

distancia de frenado del vehículo y por las fuerzas desarrolladas en los amarres que aseguran a la carga. Se analizan las respuestas en el tiempo de algunas variables relevantes, ligadas a la maniobra de frenado con frenos antibloqueo, como una función de la condición de rugosidad del pavimento.

4.2.1 Condiciones del pavimento

Se consideran tres perfiles diferentes como entradas de pavimento, caracterizando su condición de rugosidad en términos del Índice Internacional de Rugosidad (IIR). Los números de IIR para cada uno de los pavimentos fueron de 0.57, 3.05 y 4.23 mm/m, respectivamente para pavimentos de baja, media y alta rugosidad. La Figura 51 ilustra un perfil de alta rugosidad.

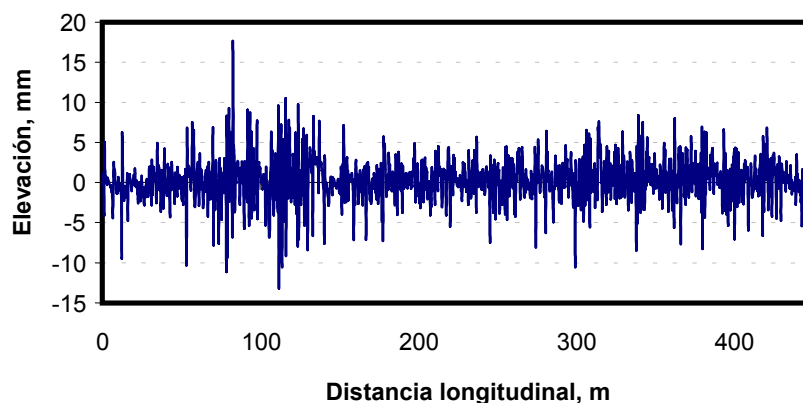


Figura 51: **Perfil de pavimento de alta rugosidad (IIR = 4.23 mm/m).**

4.2.2 Condiciones nominales de la simulación

La tabla 1 refiere los valores nominales seleccionados para las propiedades del vehículo, del ensamble de amarres y del sistema de frenos antibloqueo. De acuerdo con estos valores, el peso de la carga representa 12.5 % del peso bruto vehicular del vehículo, mientras que la posición de la carga implica que las fuerzas de las llantas en el eje delantero es la mitad de las fuerzas de las llantas en el eje motriz. El coeficiente de fricción corresponde a un pavimento seco (Figura 47), al

tiempo que el valor del coeficiente de fricción entre la carga y la plataforma corresponde aproximadamente a una carga de plástico sobre una plataforma de aluminio (Rakheja et al., 2000).

4.2.3 Respuestas en el tiempo

Las Figuras 52 a la 54 agrupan los resultados de la simulación de una maniobra de frenado de emergencia, ilustrando las respuestas en el tiempo de ciertas variables seleccionadas. Estas variables describen la interacción carga-vehículo, al efectuar dicha maniobra de frenado sobre un pavimento de rugosidad alta, para las condiciones listadas en la Tabla 1. Estos resultados se presentan como una función del tipo de restricción de carga empleado (directo o indirecto) y de la existencia o no de desplazamiento de la carga. La respuesta de una situación en la que no hay desplazamiento de la carga se compara entonces, en pares, con los resultados de las situaciones de aseguramiento indirecto y directo. Los resultados de las distancias de frenado en estas simulaciones fueron de 59.5, 61.5 y 63.7 m, respectivamente para las situaciones de no-desplazamiento, aseguramiento directo y aseguramiento indirecto. La carga asegurada de manera indirecta representa entonces un 7% de incremento en la distancia de frenado con respecto a la situación de no-desplazamiento, al tiempo que la carga asegurada directamente provoca una distancia de frenado 3.3% mayor con respecto a la situación de no-desplazamiento.

Las tres hileras de gráficas mostradas en la Figura 52, muestran de manera comparativa las velocidades rotacionales de ambos ejes durante el frenado, de manera respectiva para los siguientes pares:

No desplazamiento – aseguramiento directo

No desplazamiento – aseguramiento indirecto

Aseguramiento indirecto – aseguramiento directo

La Figura 54 muestra el desplazamiento de la carga y las fuerzas de excitación aplicadas al vehículo, como resultado del desplazamiento de la carga, para ambas condiciones de aseguramiento.

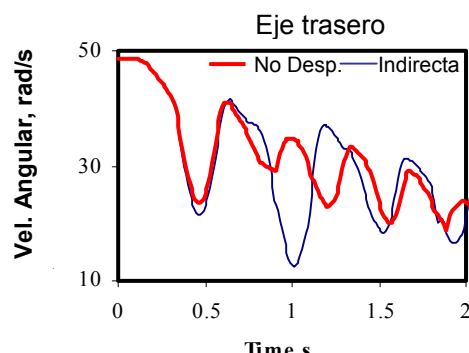
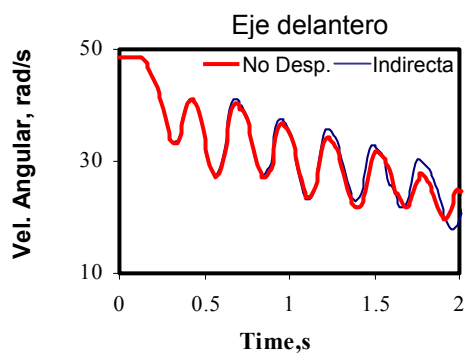
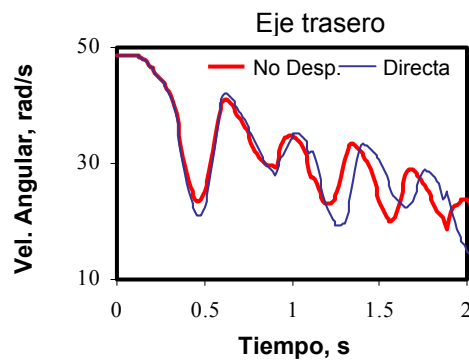
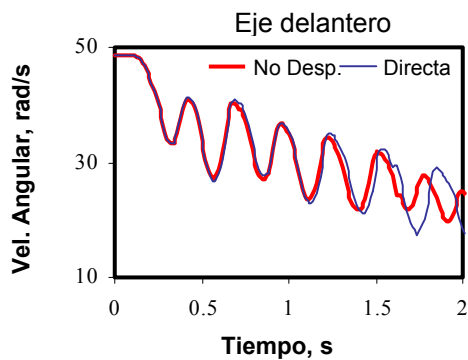
Los resultados de la Figura 52 muestran que la respuesta rotacional del eje es afectada de manera importante por la situación de desplazamiento de la carga, y por el tipo de sistema de aseguramiento de la carga seleccionado. El eje trasero muestra la más alta sensibilidad a tal situación y condiciones, lo cual es atribuido a la mayor rigidez de este eje y a la distribución estática de las cargas. Los resultados de la Figura 53 muestran una clara relación entre los picos de las aceleraciones de frenado y los valles de las fuerzas de frenado. El aseguramiento indirecto causa las más grandes variaciones en la aceleración de frenado y fuerzas, lo cual se atribuye a la más larga duración del desplazamiento de la carga

asegurada indirectamente, en comparación con la duración correspondiente a la carga asegurada directamente. Los picos observados en los resultados para la situación de no-desplazamiento de la carga, son atribuidos al perfil de alta rugosidad del pavimento. La más larga duración del desplazamiento de la carga asegurada indirectamente, se ilustra en la Figura 54. Esta figura muestra que el desplazamiento de la carga ocurre en diferentes etapas, de las cuales la primera es la más importante, ya que los desplazamientos restantes son tan pequeños que pasan inadvertidos por cuanto a los resultados de desplazamiento de la carga. El desplazamiento para la carga asegurada indirectamente resulta varias veces más grande que en el caso de la carga asegurada directamente, mientras que el tiempo de duración del desplazamiento de la carga indirectamente asegurada, es aproximadamente el doble de aquél del aseguramiento directo.

Tabla 1: Valores nominales para las propiedades del vehículo

Característica	Valor
Masa del vehículo vacío, m_E	5000 kg
Masa del eje delantero, m_{AF}	1000 kg
Masa del eje trasero, m_{AR}	2000 kg
Masa de la carga, m_C	1000 kg
Rigidez de la Susp. delantera, k_{sf}	1500 kN/m
Rigidez de la Susp. trasera, k_{sr}	3000 kN-m
Amort. Susp. Delantera, c_{sf}	15 kNs/m
Amort. Susp. Trasera, c_{sr}	30 kNs/m
Rigidez llantas delanteras, k_{tf}	1700 kN/m

Rigidez llantas traseras, k_{tr}	3400 kN/m
Separación de ejes, WB	4.5 m
Distancia c_F	2.6 m
Distancia c_R	4.5 m
Altura c.g. vehículo vacío, H_E	1.2 m
Altura c.g. ejes, H_a	0.5 m
Altura c.g. carga, H_c	1.7 m
Altura plataforma, H_p	1.4m
Velocidad inicial vehículo, v_0	96 km/h
Coef. Fricción Carga-Plat., μ_s	.3
Ángulo inic. Amarres, θ_0	45°
Tensión inic. Amarres, $P_{l,0}$	0.2 $m_c g$
Coef. de frenado Máximo	0.75
Deslizamiento deseado	0.2
Material Amarres	Banda tejida
K_f	0.0025 Nm/Pa
$(dp/dt)_{nom}$	5500000 Pa/s
Constante de tiempo	0.01 s
Inercia rotacional eje delantero	56 kgm^2
Inercia rotacional eje trasero	90 kgm^2



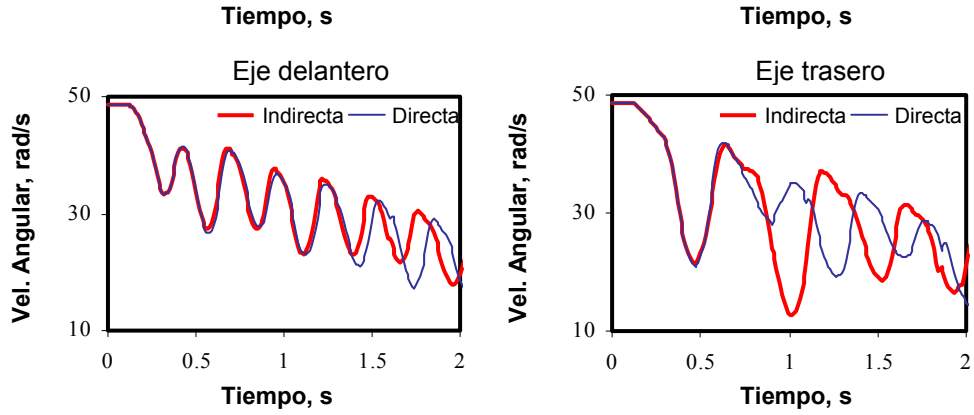
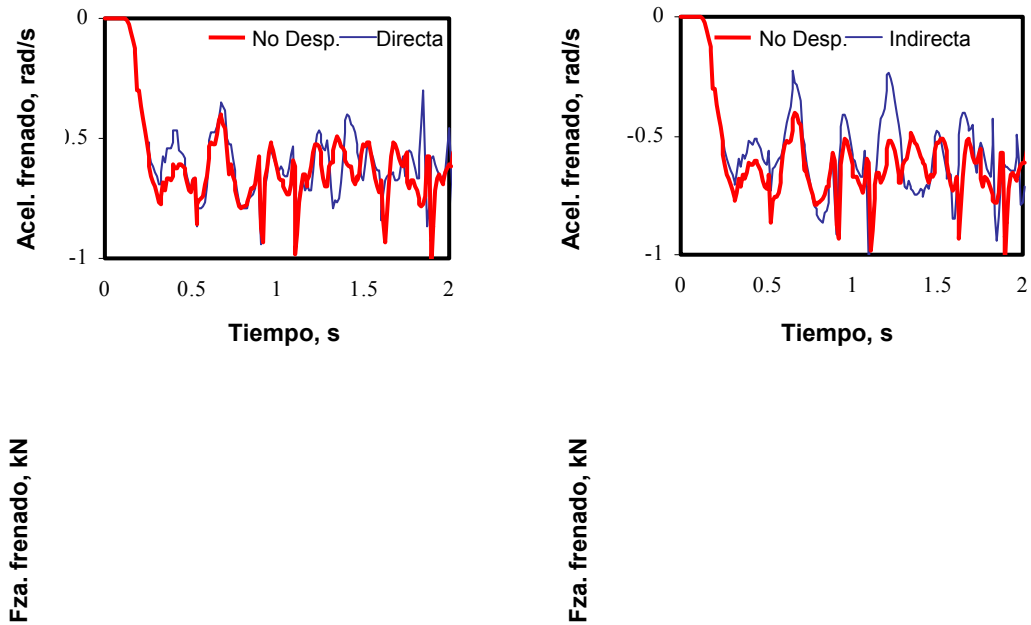


Figura 52: Comparación de las respuestas en el tiempo de las velocidades angulares de los ejes, como una función del sistema de aseguramiento de la carga.



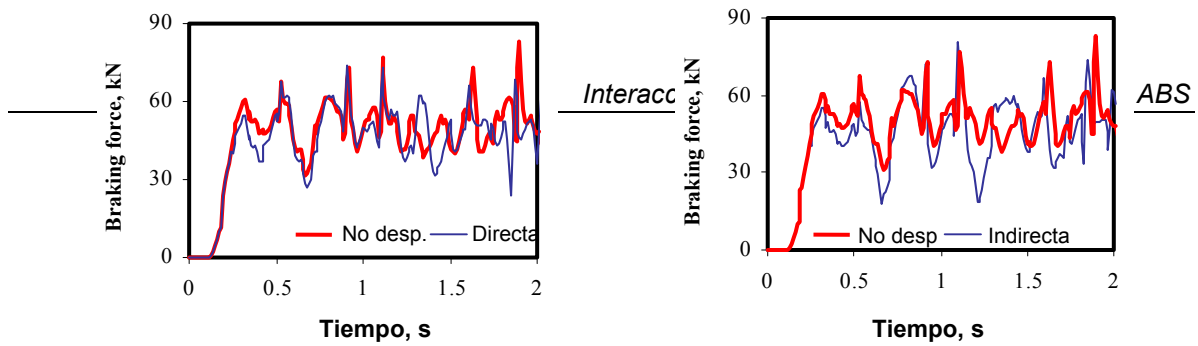


Figura 53: Comparación de las respuestas en el tiempo de la deceleración del vehículo y la fuerza de frenado, como una función del sistema de aseguramiento de la carga.

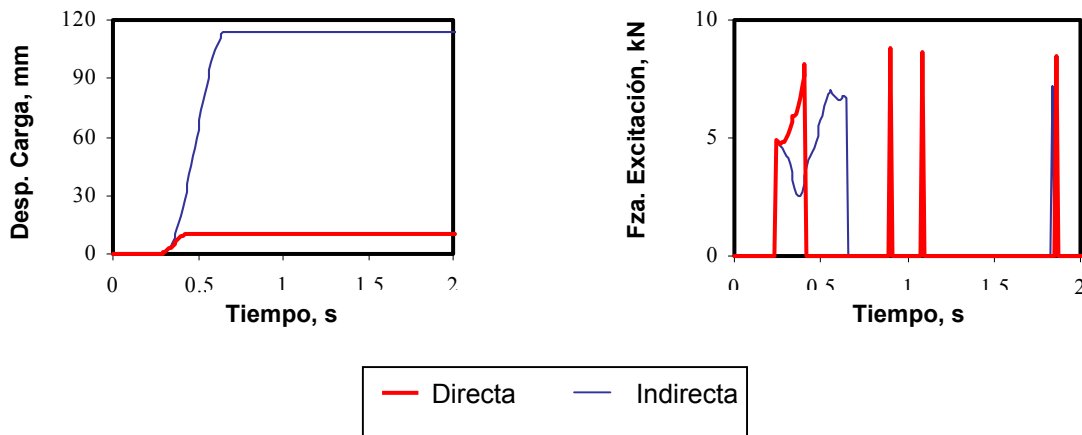


Figura 54: Respuestas de desplazamiento de la carga y las fuerzas de excitación, como una función del sistema de aseguramiento de la carga.

4.2.4 Evaluación del desempeño

Debido a que la distancia de frenado depende de las condiciones del perfil de pavimento y vibración del vehículo en el momento justo de iniciar la maniobra de frenado, fue necesario considerar distintas muestras de perfiles de pavimento, con objeto de obtener resultados que fuesen representativos para cada uno de las condiciones de pavimento consideradas. Estos distintos perfiles de pavimento fueron definidos al tomar de manera aleatoria las posiciones de inicio del frenado, en un rango de longitud de pavimento entre 75 y 145 metros.

La figura 55 muestra los resultados de los valores máximos y mínimos obtenidos para las distancias de frenado, desplazamiento de la carga y fuerzas en los amarres, como una función de la condición del pavimento y del tipo de restricción de la carga empleada. La parte (a) de esta figura muestra que los resultados máximos y mínimos para las distancias de frenado, se incrementan al aumentar la rugosidad del pavimento, y que el aseguramiento indirecto muestra los más altos valores para las distancias de frenado. El rango de variación de las distancias de frenado para los distintos tipos de aseguramiento de la carga y rugosidad del pavimento, va desde 58 m en el caso de un pavimento de rugosidad baja, hasta

66 metros en el caso de una carga asegurada de manera indirecta, transportada sobre un pavimento de rugosidad alta. Esto representa una variación mayor del diez por ciento en las distancias de frenado, lo cual estaría ligado con la rugosidad del pavimento y el corrimiento de la carga. Adicionalmente, es posible observar un claro determinismo por cuanto al perfil se refiere, el cual está asociado a las condiciones aleatorias para el inicio de la maniobra de frenado. Este determinismo representa, con relación a los valores mínimos, variaciones de 3.2, 4.3 y 7 % para las distancias de frenado en el caso de la carga asegurada de manera directa, y 2.7, 6.21 y 10 % en el caso de la carga asegurada de manera indirecta.

La Figura 55(b) presenta las fuerzas desarrolladas en los amarres, mostrando que la carga asegurada indirectamente tiene una menor sensibilidad hacia la condición del pavimento, al comparar sus resultados con los de la carga asegurada directamente. Esto es atribuido a la duración mayor del desplazamiento de la carga asegurada indirectamente, que la hace menos dependiente de los detalles del perfil de pavimento particulares. Este desplazamiento mayor de la carga asegurada indirectamente, se asocia también a la relativamente pequeña rigidez longitudinal equivalente de este tipo de aseguramiento, por lo cual se desarrollan mayores fuerzas en los amarres en el caso de pavimentos de rugosidad baja y media. Puede notarse también en estos resultados que las fuerzas mínimas en los amarres, disminuyen con la rugosidad del pavimento, lo cual se atribuye a un incremento en la vibración de cabeceo del vehículo al aumentar las irregularidades en el camino. Esto es, de acuerdo con la ecuación (38), el movimiento de cabeceo puede representar un promotor o inhibidor del desplazamiento de la carga, dependiendo de su dirección. Los desplazamientos de la carga en la parte (c), correlacionan bien con las fuerzas en los amarres de la parte (b) de esta figura.

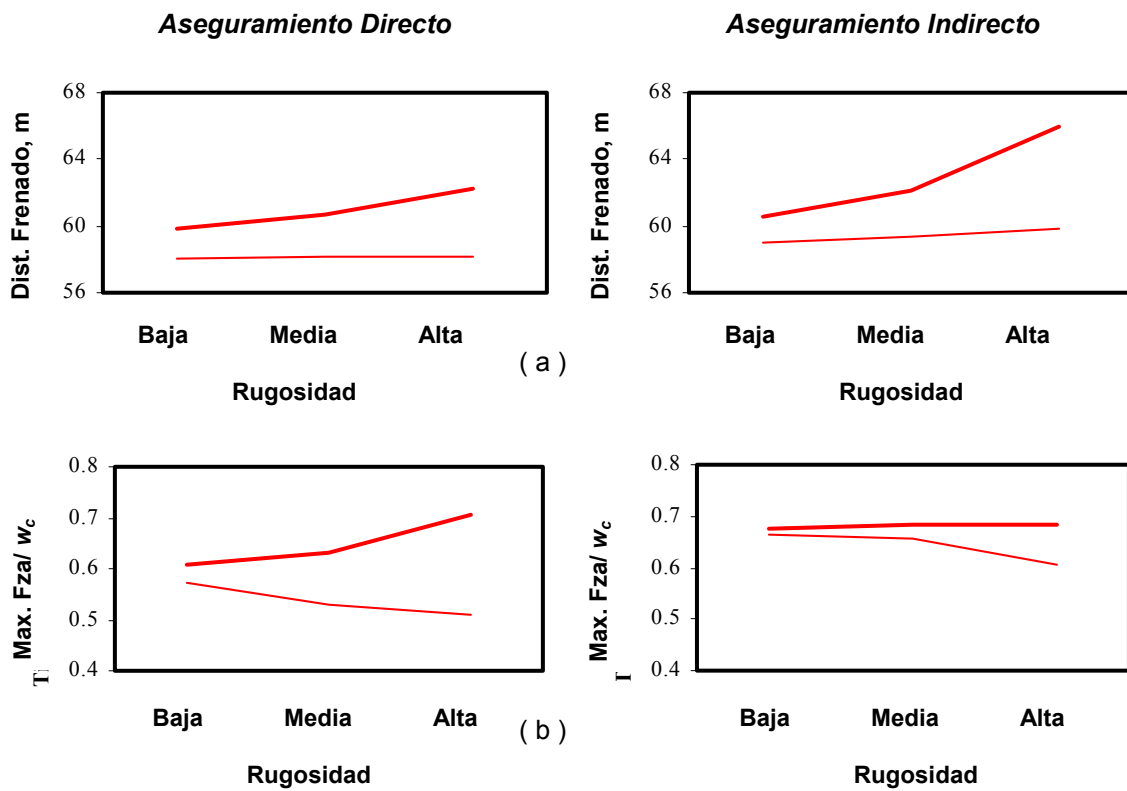
En la Figura 55(d) se muestra el efecto del desplazamiento de la carga sobre la distancia de frenado, expresado como un porcentaje de la situación de nulo desplazamiento. Los pequeños valores negativos en el caso de la carga asegurada directamente, pueden ser atribuidos al ángulo de fase en el cual se inicia la acción de frenado. Tales variaciones pequeñas negativas se presentaron en diez de las sesenta simulaciones efectuadas para este tipo de aseguramiento de la carga. En el caso de la carga asegurada indirectamente, solamente fueron obtenidas variaciones positivas del desplazamiento de la carga, mostrando un máximo del 7.2 % en el caso del pavimento de rugosidad elevada. Asimismo, puede observarse en estos resultados que el efecto del desplazamiento de la carga exhibe variaciones importantes, que van desde los pequeños valores negativos en el caso del aseguramiento directo, hasta un máximo de 7.2 % en el caso de un aseguramiento indirecto. Se hace notar que este máximo incremento en la distancia de frenado, sería equivalente a tener un valor de velocidad inicial de 99 km/h, en vez de los 96 km/h, para las mismas condiciones de pavimento.

4.3 Observaciones finales

Se ha propuesto un modelo para estudiar la interacción dinámica entre la carga sólida y el vehículo que la transporta. El modelo muestra que las distancias de frenado pueden incrementarse como resultado del corrimiento de la carga, mientras que las variaciones en la aceleración de frenado, intrínsecas a la operación de un sistema de frenos antibloqueo, no causan una distancia adicional de frenado que sea significativa. El incremento en la distancia de frenado del vehículo resulta una función de la rugosidad del pavimento y del tipo de técnica seleccionada para el aseguramiento de la carga, obteniéndose un máximo de 7% para el caso de la combinación aseguramiento indirecto / pavimento de alta rugosidad. Las mayores distancias de frenado ligadas a la carga asegurada indirectamente, son atribuidas a la más larga duración de los desplazamientos para este tipo de aseguramiento. Tales duraciones se atribuyen a su vez a la rigidez equivalente longitudinal baja de este tipo de aseguramiento.

Los resultados muestran asimismo, un determinismo de la interacción carga/vehículo con respecto al perfil de perturbación durante la duración de la maniobra de frenado, lo cual causa variaciones de hasta el 10 por ciento en las distancias de frenado, para un cierto nivel de rugosidad del camino. Este determinismo y la duración del desplazamiento de la carga, afectan adicionalmente la magnitud de las fuerzas desarrolladas en los amarres. Aunque en general, los valores mayores para tales fuerzas se obtienen en el caso del desplazamiento de una carga asegurada indirectamente, se observa un valor aislado más alto en el caso de la combinación aseguramiento directo/pavimento de alta rugosidad.

Como aplicaciones del modelo propuesto se podría considerar un análisis paramétrico que permita identificar los factores más importantes que afectan la interacción dinámica carga sólida / vehículo. Este análisis proveería elementos para discutir el desempeño de los sistemas de aseguramiento de carga, en su interacción con los sistemas de frenado.



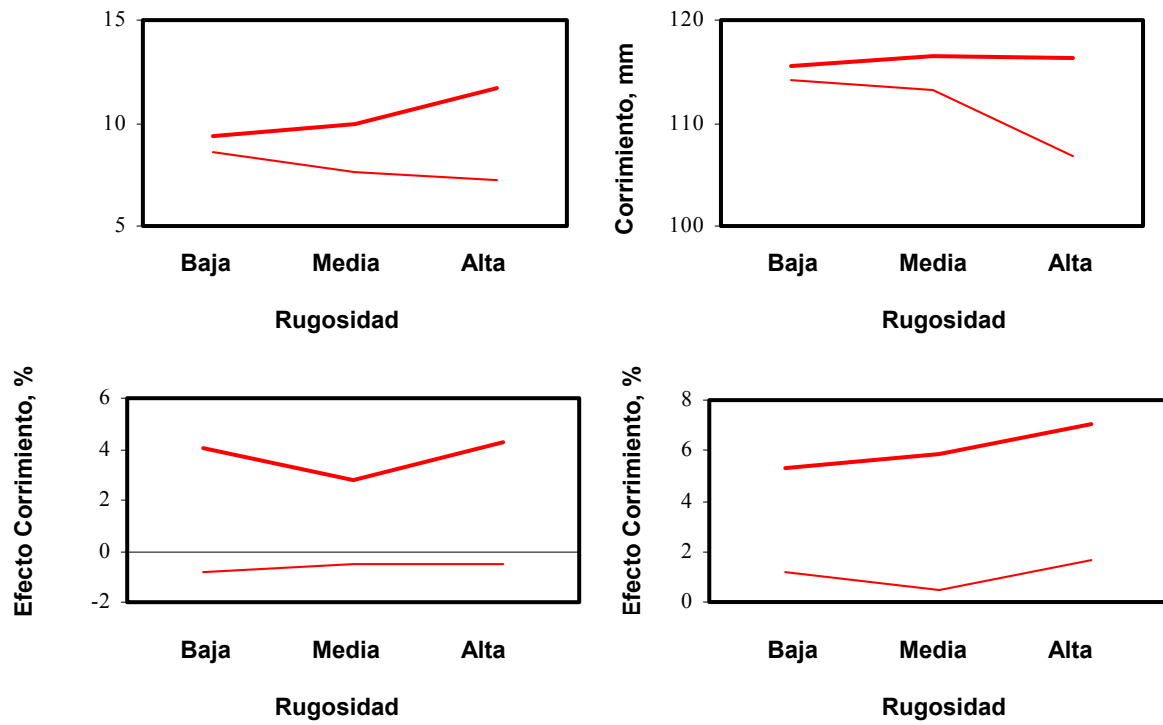


Figura 55: Efecto del desplazamiento de la carga sobre el desempeño de frenado y fuerzas en los amarres.

5 Conclusiones

Los estudios presentados en este trabajo constituyen un esfuerzo por atender aspectos poco estudiados en el contexto de la seguridad carretera, los cuales están relacionados con el efecto que sobre la estabilidad y eficiencia de frenado del vehículo, tiene el corrimiento de una carga sólida montada sobre la plataforma del mismo.

La organización de la presente publicación provee los distintos elementos, que de manera secuencial, conforman una aproximación integral al problema del efecto que el corrimiento de la carga encima de las plataformas de los vehículos tiene sobre el comportamiento dinámico de estos bajo condiciones específicas. De esta manera, lo expuesto en la segunda parte de este trabajo, proporciona los elementos para trabajar los conceptos manejados en las partes tercera y cuarta.

Los resultados de los modelos desarrollados permiten identificar varios frentes por cuanto a las aplicaciones potenciales de los modelos presentados. Asimismo, se identifican varios otros aspectos para ser desarrollados. Como trabajo inmediato, desde luego, se tiene el obtener elementos para la validación de los modelos desarrollados.

5.1 Implicaciones prácticas de los modelos

Como conjunto de conclusiones que pudieran tener algún impacto práctico sobre las técnicas empleadas en la actualidad para el aseguramiento de las cargas a los vehículos, se tienen a las siguientes:

- El dejar una carga suelta sobre un vehículo, sin ningún tipo de aseguramiento, provocará que esta sufra grandes desplazamientos, excepto bajo las siguientes circunstancias:

Cuando se usen elementos que incrementen la fricción entre la carga y la plataforma, obteniendo coeficientes de fricción mayores de 0.8.

Cuando las perturbaciones sean de muy corta duración (fracciones de segundo)

- Cuando se seleccione un aseguramiento indirecto para fijar la carga a los vehículos, se requiere tomar en cuenta lo siguiente, por cuanto al desplazamiento de la carga y fuerzas generadas en los amarres:

Que en orden de importancia, los factores que influyen el desplazamiento de la carga, son: Rigidez del material del amarre,

magnitud de la aceleración vertical aplicada, coeficiente de fricción carga/plataforma, ángulo de los amarres, tensión inicial de los amarres, frecuencia de la vibración.

Que en orden de importancia, los factores que afectan la magnitud de las fuerzas desarrolladas en los amarres al desplazarse la carga, son: Coeficiente de fricción, amplitud de la aceleración vertical aplicada, rigidez del material del amarre, ángulo del amarre, frecuencia de la vibración aplicada y tensión inicial en el amarre.

- Que cuando se seleccione un aseguramiento de la carga tipo directo, debe tomarse en cuenta lo siguiente:

Que no hace diferencia significativa el seleccionar ángulos entre 30° y 60° por cuanto al desplazamiento total de la carga, independientemente del tipo de material seleccionado para el amarre.

Que el incrementar la tensión inicial de los amarres implica una reducción aproximadamente lineal para el desplazamiento de la carga, aunque pudieran incrementarse las fuerzas en los amarres.

Que el nivel de aceleración aplicada guarda una relación aproximadamente proporcional con el desplazamiento de la carga.

Que el incremento de la magnitud del coeficiente de fricción implica una disminución aproximadamente proporcional del desplazamiento de la carga.

Que el nivel de fuerza en los amarres, puede alcanzar hasta varias veces el peso de la carga transportada, como una función del nivel de aceleración aplicada.

Que el desplazamiento de la carga puede ser de hasta 10 centímetros, como una función de la aceleración aplicada y tensión inicial en los amarres, esto para coeficientes de fricción moderados.

Que el emplear elementos más rígidos (e.g. cadenas) implica el obtener menores desplazamientos de la carga, pero mayores fuerzas en los amarres.

- Por cuanto al efecto que sobre la estabilidad lateral de un vehículo pudiera tener el desplazamiento de la carga, se tiene lo siguiente:

Que al presentarse un corrimiento de la carga, la estabilidad de un vehículo que esté circulando a velocidad moderada sobre una curva carretera de radio amplio (140 m), puede ser puesta en riesgo de manera importante. Estos corrimientos de la carga sobre el vehículo implican oscilaciones fuertes del mismo, las cuales pueden ser promotoras de volcaduras.

- Por cuanto al efecto que el desplazamiento de la carga tiene sobre la eficiencia de frenado al utilizar frenos ABS, se tiene lo siguiente:

El corrimiento de la carga sobre la plataforma del vehículo puede afectar la eficiencia de frenado (distancia de frenado), hasta en un diez por ciento, al comparar los resultados con una situación de nulo desplazamiento.

El potencial desplazamiento de la carga sobre el vehículo se presenta en los primeros instantes de la maniobra. Esto es, las vibraciones longitudinales aplicadas al vehículo, producto de la operación del sistema ABS, difícilmente provocará una distancia de frenado mayor.

5.2 Observaciones finales

Es importante señalar que el presente trabajo constituye un avance dentro de un contexto más amplio de investigación. De esta manera, se identifican trabajos futuros sobre los mismos aspectos tratados en la presente publicación, así como el atender otras situaciones en las que se presente una interacción entre la carga y el vehículo.

El resultado más importante, todavía por validar, es que existe una interacción notable entre una carga sólida transportada y el vehículo que la transporta. Este resultado, en términos cualitativos y cuantitativos, representa un avance en el estudio de la seguridad carretera.

Referencias

- Aquaro, M.J., Mucino, V.H., Gautam, M, y Salem, M. (1999) "A Finite Element Modeling Approach for Stability Analysis of Partially Filled Tanker Trucks", SAE paper 1999-01-3708.
- Billing, J.R., Mercer, W.R.J., y Cann, W. (1993) "A proposal for research to provide a technical basis for a revised national standard on load security for heavy trucks", Transportation Technology and Energy Branch, Ontario Ministry of Transportation, Report CV-93-02, November 1993.
- Billing, J.R. y Couture, J. (1996) "North American load security research project", Proceedings of the Congress Truck Safety: Perceptions and Reality. Institute of Risk Research, Toronto, pp. 289-300.
- Billing, J.R. (1998) "Effect of cargo movement on tension in tiedowns", Canadian Council of Motor Transport Administrators, Report # 9.
- CCMTA (1999) "North American Cargo Securement Standard, Draft Model Regulation", Draft 4, May 1999, Canadian Council of Motor Transport Administrators, Commercial Vehicle Safety Alliance.
- FMCSA (2000) "Development of a North American Standard for Protection Against Shifting and Falling Cargo," Proposed rulemaking, Federal Register, Dec. 18, 2000, pp 79050-79068.
- Gillespie, T.D. (1987) "Engineering analysis of cargo restraint on commercial highway trucks", University of Michigan Transportation Research Institute, Report UMTRI-87-28.
- Gillespie, T.D., Fundamentals of vehicle dynamics, SAE, 1992.
- Goldman, R.W., El-Gindy, M, y Kulakowski, B.T. (2001) "Rollover dynamics of road vehicles: Literature survey", Heavy Vehicle Systems, A Series of the Int. J. of Vehicle Design, Vol. 8, No. 2, pp 103-141.
- Hildebran, E.D., y Wilson, F.R. (1997) "Development and intermediate findings of a level III heavy-truck collision study", Transportation Research Record 1595. National Research Council, pp. 39-45.
- Kang, X., Rakheja, S., y Stiharu, I. (2000) "Optimal tank geometry to enhance static roll stability of partially filled tank vehicles", SAE paper 1999-01-3730.

Kragelskii, I.V. y Mikhin, N.M., "*Handbook of friction units of machines*", ASME Press, New York, 1988.

Loeb, P.D., Talley, W.K., y Zlatoper, T.J. (1994) " Causes and Deterrents of Transportation Accidents. An Analysis by Mode", Quorum Books, Conn. 1994. 240 pp.

Meirovitch, L. (1986) Elements of vibration analysis. Mc Graw Hill Int., 2nd ed.

NRTC (1999) "Load restraint guide", National Road Transport Commission (Australia), Road and Traffic Authority, NSW.

NHTSA/VRTC, "Development of ABS Performance Measures for Straight Trucks and Trailers", Research areas, Heavy truck research, <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/vrtc/ca/HeavyTruck.htm>, 2001.

Rakheja, S., Ranganathan, R. y Sankar, S. (1988) "Load spill analysis of an articulated vehicle transporting wooden logs", *Proceedings of the Ninth Symposium on Engineering Applications of Mechanics*, London, Ontario, May 1988, pp 380-388.

Rakheja, S.; Sauve, P.; y Juras, D. (1997) "Experimental evaluation of friction coefficients of typical loads and trailer decks under vertical vibration" Load Security Research Project Report No. 2. Canadian Council of Motor Transport and Administrators.

Rakheja, S., Ahmed, A.K.W., Romero, J. A., y Lozano, A., (2000) "Experimental Evaluation of Friction Coefficients of Typical Loads and Trailer Decks under Vertical Vibration", SAE Paper 2000-01-3510, 2000.

Romero, J. A., Rakheja, S. , Ahmed, A. K. W., y Lozano, A. (2002), "Restrained cargo dynamics in road transportation: indirect tiedowns", *Heavy Vehicle Systems*, A Series of the Int. J. of Vehicle Design, Vol. 9, No.2, pp 93-114.

Simulink, Mathworks Inc, 2001.



CIUDAD DE MEXICO

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx