Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo estudiar las condiciones de carga reales de los camiones comerciales ligeros en el mercado, con la finalidad de mejorar la definición de los ensayos en pista de pruebas.

Se analiza la variabilidad del centro de gravedad en función de las características del vehículo y de las configuraciones de carrozado que puede incorporar, para posteriormente compararla con la posición prácticamente constante y poco elevada de los camiones que son sometidos a ensayos.

Con los valores obtenidos en las dos situaciones de carga, se analiza la influencia en la dinámica de frenado y la altura máxima del centro de masas del camión para evitar el vuelco.

Dado el diferente comportamiento del camión en función de la altura del centro de gravedad, se plantea diseñar y desarrollar un procedimiento de carga para realizar pruebas más acordes con la metodología con la que se cargan los vehículos.

De esta manera se podrán ensayar en condiciones semejantes a la situación de un camión en carretera y poder obtener resultados fiables de la estabilidad y de la dinámica de frenos.

Sumario

RESUMEN 1

SUMARIO 3

1. GLOSARIO 6

2. INTRODUCCIÓN 11

2.1. Objetivos del proyecto 11

2.2. Metodología 11

2.3. Alcance del proyecto 12

3. ESTADO DEL ARTE 13

3.1. Metodología de carga en pista de pruebas 13

4. GAMA DE VEHÍCULOS A ENSAYAR 17

4.1. Gama de camiones FA 17

4.2. Gama de camiones FB 18

5. DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DEL CDG DE LOS CAMIONES CUANDO SE REALIZAN ENSAYOS EN PISTA 20

5.1. Procedimiento de cálculo 20

5.2. Resultados 23

5.2.1. Gama de camiones FA 23

5.2.2. Gama de camiones FB 24

6. DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DEL CDG TEÓRICO CUANDO LA CARGA SE ENCUENTRA UNIFORMEMENTE REPARTIDA EN EL VOLUMEN DE LA CAJA DE CARGA 25

6.1. Vehículos destinados al transporte de mercancías 25

6.1.1. Caja de carga cerrada 25

6.1.2. Caja de carga frigorífica 29

6.1.3. Caja de carga abierta 32

6.1.4. Plataforma deslizante 36

6.2. Conclusiones 39

7. COMPARACIÓN DE LA ALTURA DEL CDG EN CONDICIONES DE PISTA Y EN CONDICIONES DE CARGA MÁXIMA OCUPANDO TODO EL VOLUMEN DE LA CAJA 41

7.1. Diferencias en los resultados obtenidos 41

7.1.1. Caja de carga cerrada 41
7.1.2. Caja de carga frigorífica 42
7.1.3. Caja de carga abierta 42
7.1.4. Plataforma deslizante 43
7.2. Conclusiones 44

8. INFLUENCIA DE LA ALTURA DEL CENTRO DE GRAVEDAD EN LA DINÁMICA DE FRENADO ____ 46

8.1. Cálculo preliminar 46
8.1.1. Situación en orden de marcha (OM) 46
8.1.2. Situación en carga máxima (CM) 47
8.2. Fuerzas y momentos que actúan en el frenado 49
8.3. Reparto óptimo de la fuerza de frenado 51
8.3.1. Curvas de equiadherencia 51
8.3.2. Rectas de isoadherencia 52
8.4. Distribución real de la fuerza de frenado 53
8.4.1. Dimensionado y diseño de los frenos 53
8.4.2. Fuerzas de frenado generadas 56
8.4.3. Recta de frenado 56
8.5. Incorporación de la válvula limitadora 57
8.5.1. Situación en orden de marcha (OM) 58
8.5.2. Situación en carga máxima (CM) 59

9. DETERMINACIÓN DE LA ALTURA MÁXIMA DEL CDG TEÓRICO PARA EVITAR EL VUELCO ____ 62

9.1. Altura máxima del CdG para evitar el vuelco 63
9.1.1. Ángulo de inclinación máximo de la calzada 64
9.2. Resultados obtenidos 64

10. DISEÑO DE SISTEMAS Y METODOLOGÍA DE CARGA PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO EN CONDICIONES REALES DE CARGA ____ 67

10.1. Propuesta para la gama de camiones FA 67
10.1.1. Procedimiento para cargar los contenedores 68
10.1.2. Metodología de carga de los contenedores con sacos de arena 70
10.2. Propuesta para la gama de camiones FB 73

11. DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA ESTRUCTURA EN DOS NIVELES ____ 75

12. CDG DEL VEHÍCULO CON ESTRUCTURA DE CARGA EN DOS NIVELES 80

12.1. Procedimiento de cálculo 80

12.2. Resultados 82

13. IMPACTO AMBIENTAL 84

14. PRESUPUESTO 85

CONCLUSIONES 87

AGRADECIMIENTOS 88

BIBLIOGRAFÍA 89

Referencias bibliográficas 89

Bibliografía complementaria 89

1. Glosario

CdG Centro de gravedad

h_{CdG} Altura del centro de gravedad [m]

L_{101} Distancia entre ejes [m]

Foh Voladizo anterior [m]

Roh Voladizo posterior [m]

L_1 Distancia del CdG al eje delantero [m]

L_2 Distancia del CdG al eje trasero [m]

LT Longitud total del conjunto chasis-cabina [m]

ch Altura de la caja de carga al suelo [m]

VD Ancho de vía delantero [m]

VT Ancho de vía trasero [m]

RW Ancho del vehículo sin espejos [m]

sf Altura del subchasis [m]

IC Longitud entre el eje delantero y la caja de carga [m]

LC Longitud de la caja de carga [m]

SC Cabina simple

DC Cabina doble

hc Altura de las partes laterales de la caja de carga abierta [m]

FR Reacción en el eje delantero del vehículo [N]

RR Reacción en el eje trasero del vehículo [N]

a Deceleración de frenado [m/s^2]

C_d Índice del freno delantero

C_t Índice del freno trasero

d_d Diámetro del pistón delantero [m]

d_t Diámetro del pistón trasero [m]

D_d Diámetro del disco de frenos delantero [m]

D_t Diámetro del disco de frenos trasero [m]

D_{ll} Diámetro de la llanta [m]

F_d Fuerza de frenado en el eje delantero [N]

F_t Fuerza de frenado en el eje trasero [N]

F_T Fuerza total de frenado [N]

I_r Momento de inercia de las ruedas, supuestas todas iguales [kg·m^2]

i_v Índice de la válvula limitadora

K Pendiente de la recta de frenado

K_d Constante de proporcionalidad de los frenos delanteros [m^2]

K_t Constante de proporcionalidad de los frenos traseros [m^2]

m Masa del vehículo [kg]

M_a Momento aerodinámico [N·m]

M_d Momento de rodadura en el eje delantero [N·m]

M_t Momento de rodadura en el eje trasero [N·m]

N_d Fuerza normal de la calzada sobre el eje delantero [N]

N_t Fuerza normal de la calzada sobre el eje trasero [N]

p_c Presión de corte de la válvula limitadora [Pa]

p_d Presión del circuito hidráulico en el eje delantero [Pa]

p_t Presión del circuito hidráulico en el eje trasero [Pa]

R_a Resultante de las acciones aerodinámicas aplicadas en el CdG [N]

r_r Radio dinámico del neumático [m]

r_s Radio estático del neumático [m]

r_{ed} Radio equivalente del disco de freno delantero [m]

r_{et} Radio equivalente del disco de freno trasero [m]

S_d Área del pistón delantero [m^2]

S_t Área del pistón trasero [m^2]

η_d Rendimiento de los frenos delanteros

η_t Rendimiento de los frenos traseros

k_d Coeficiente de adherencia utilizado en el eje delantero

k_t Coeficiente de adherencia utilizado en el eje trasero

μ_c Coeficiente de adherencia neumático-calzada

θ Ángulo de inclinación de la calzada [°]

Camión: Automóvil con cuatro ruedas o más, concebido y construido para el transporte de mercancías, cuya cabina no está integrada en el resto de la carrocería y con un máximo de 9 plazas incluido el conductor.

Tara: Masa del vehículo, con su equipo fijo autorizado, sin personal de servicio**,** pasajeros ni carga, y con su dotación completa de agua, combustible, lubricante, repuestos, herramientas y accesorios necesarios. Este dato figura en la tarjeta de inspección técnica ITV.

Masa en orden de marcha (OM): Es el resultado de sumar a la tara del vehículo con caja de carga, la masa de un conductor estándar de 75 kilogramos.

Masa en carga: La masa efectiva del vehículo y de su carga, incluida la masa del personal de servicio y de los pasajeros.

Masa máxima autorizada (MMA) o (CM): La masa máxima para la utilización de un vehículo con carga en circulación por las vías públicas. Este dato figura en la tarjeta de inspección técnica y en el permiso de circulación.

CMT: Vehículo con MMA y la carga se encuentra uniformemente repartida en el volumen de la caja de carga.

CMP: Vehículo con MMA cuando se realizan ensayos en pista.

Masa por eje: La masa que gravita sobre el suelo, transmitida por la totalidad de las ruedas acopladas a ese eje.

Masa máxima autorizada por eje: La masa máxima de un eje o grupo de ejes con carga para utilización en circulación por las vías públicas.

Categoría N1: Vehículos a motor destinados al transporte de mercancías que tengan por lo menos cuatro ruedas con una masa máxima autorizada no superior a las 3,5 toneladas.

Categoría N2: Vehículos a motor destinados al transporte de mercancías que tengan por lo menos cuatro ruedas con una masa máxima autorizada superior a 3,5 toneladas pero inferior o igual a 12 toneladas.

Carga útil: Diferencia entre MMA y Tara.

2. Introducción

Antes de comercializar un vehículo, se realizan tests y pruebas en pista para comprobar que cumple las exigencias requeridas para su utilización.

Actualmente se llevan a cabo ensayos de estabilidad y frenos con elementos de masa muy concentrada situados sobre el eje trasero del vehículo, lo que provoca una posición poco elevada del centro de gravedad comparada con las condiciones reales de un camión en carretera.

La *ISO 15037-2 - Road Vehicles - Vehicle dynamics test methods - Part 2: General Conditions for heavy vehicles and buses,* no especifica las condiciones de carga del camión, pero obliga a mencionarlas en los informes de las pruebas finales.

Se estudiará la causa de los problemas en la metodología de cargar y ensayar camiones de la categoría N1 y N2 con diferentes masas máximas autorizadas.

2.1. Objetivos del proyecto

Analizar la variabilidad de la posición del centro de gravedad de los camiones comerciales ligeros cuando la carga ocupa todo el volumen de la caja y cuando se realizan los ensayos en pista de pruebas.

Comparar ambos resultados contemplando diferentes MMA y tipos de carrozado.

Analizar la influencia de esta variabilidad en el comportamiento dinámico del vehículo.

Diseñar una metodología de carga para obtener posiciones del centro de gravedad más acordes con las condiciones de carga en carretera de este tipo de camiones.

2.2. Metodología

Se estudia el sistema actual de cargar y ensayar los camiones en pista, y se define un procedimiento de cálculo para obtener la posición del centro de gravedad. A continuación se obtienen las dimensiones y masas de diferentes carrozados analizando su forma real de carga, encontrando el centro de gravedad del conjunto del vehículo.

Posteriormente, se comprueba que la variabilidad en la altura del centro de masas influye en la estabilidad del vehículo, realizando un análisis de la distribución de las fuerzas de frenado y estudiando la altura máxima que puede adoptar el vehículo para evitar el vuelco.

Para validar la propuesta de diseño que permitirá obtener diferentes posiciones del centro de gravedad se utiliza el programa SolidWorks.

2.3. Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto es obtener resultados para una gama de vehículos rígidos, formados por dos ejes y con simetría de masa, sin tener en cuenta el sistema de suspensión ni la posibilidad de incorporar remolque.

Únicamente se analiza el vehículo cuando incorpora carga fija uniformemente repartida, sin considerar cargas móviles, como por ejemplo elementos en suspensión o el transporte de líquidos en camiones cisterna.

El ámbito de estudio abarca la familia de camiones de la categoría N1 y N2 desde las 2.8 toneladas hasta las 9.5 toneladas, contemplando diferentes distancias entre ejes y masas máximas autorizadas.

Queda fuera del alcance la fabricación de la propuesta de carga, y el análisis de la rigidez y de los momentos de inercia de las cajas en el comportamiento del vehículo.

3. Estado del arte

Los fabricantes de vehículos industriales producen camiones con configuraciones denominadas chasis-cabina. Posteriormente empresas externas incorporan el carrozado en función de la actividad comercial que van a desempeñar.

Fig. 3.1. Camión con configuración chasis-cabina

3.1. Metodología de carga en pista de pruebas

A las configuraciones chasis-cabina se les incorpora, bien una estructura de acero (Fig. 3.2) o bien una caja de carga abierta (Fig. 3.3).

Fig. 3.2. Diferentes estructuras de acero colocadas en el chasis-cabina

Fig. 3.3. Camión chasis-cabina con caja de carga abierta

A continuación se instalan una serie de elementos de carga. En la Tabla 3.1 se identifican sus dimensiones, masas y material del que están construidos.

Elemento de carga	Longitud [mm]	Anchura [mm]	Altura [mm]	Masa [kg]	Material
Bloque de carga	850	460	300	300	hormigón
	850	500	500	500	hormigón
	850	500	350	1000	fundición de hierro
Saco de arena	410	310	110	10	arena
	420	400	130	15	arena
	620	410	200	30	arena
	–	–	–	100	arena
Garrafa de arena	280	150	340	15	arena

Tabla 3.1. Dimensiones y masas de los diferentes elementos de carga

Fig. 3.4. Sacos de arena de 10 kg y 100 kg respectivamente y bloque de hormigón

En cuanto a la estructura de acero, está formada por alojamientos donde encajan los bloques. La Fig. 3.5 muestra la vista en planta de dos estructuras diferentes. La primera, tipo

A, se emplea en camiones de carga útil elevada, pudiendo cargar varios bloques y distribuirlos lateralmente para obtener mejor estabilidad y reparto de la masa.

La segunda, tipo B, solamente se puede cargar longitudinalmente y es adecuada para camiones con poca diferencia entre MMA y TARA.

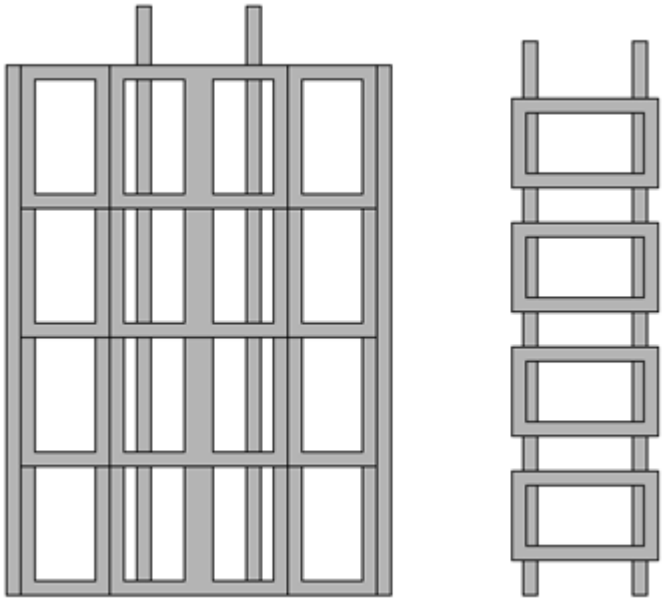


Fig. 3.5. Vista en planta de las estructuras tipo A (izquierda) y B (derecha)

La Tabla 3.2 muestra las dimensiones y masa de los dos tipos de estructura.

	Longitud [mm]	Anchura [mm]	Altura [mm]	Masa [kg]
A	3640	2160	340	879
B	3280	950	190	220

Tabla 3.2. Dimensiones y masa de las estructuras de acero

La estructura se fija al chasis del camión mediante sistemas de unión especiales, y los bloques de carga, mediante eslingas homologadas para garantizar la inmovilización de la carga durante la realización de las pruebas.

Si por el contrario se utiliza para ensayar una caja abierta, se emplea una estructura de madera, con cavidades de medidas similares a los bloques de carga. Ver Fig. 3.3.

Al analizar los camiones, se tiene en cuenta únicamente las estructuras de acero de tipo A, ya que son las más utilizadas por ser de mayor masa y así no tener que colocar demasiados

elementos de carga. También ofrecen una mejor distribución a lo largo y ancho de la zona de carga del camión.

Fig. 3.6. Configuración chasis-cabina con estructura de acero tipo A y bloques de hormigón

4. Gama de vehículos a ensayar

Los vehículos objeto de estudio pertenecen a la categoría N1 y N2. Son rígidos, formados por dos ejes y la cabina no está integrada en el resto de la carrocería.

Si la MMA del vehículo es igual o superior a 3.5 toneladas, en el eje trasero se montan ruedas gemelas.

4.1. Gama de camiones FA

Abarca desde las 2.8 toneladas hasta las 4.5 toneladas de MMA. Las configuraciones chasis-cabina pueden adoptar diferentes distancias entre ejes como se muestra en la Tabla 4.1.

Distancia entre ejes [L_{101}]	
Nomenclatura	Longitud [mm]
/1	2500
/2	2900
/3	3400

Tabla 4.1. Distancia entre ejes de la gama de camiones FA **[1]**

Tiene un máximo de 3 plazas, incluido el conductor, si incorpora cabina simple (SC), o de 6 plazas si incorpora cabina doble (DC).

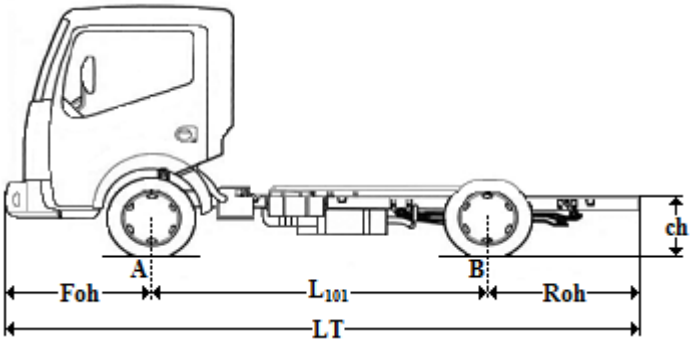


Fig. 4.1. Cotas del perfil chasis-cabina de los camiones FA con cabina simple

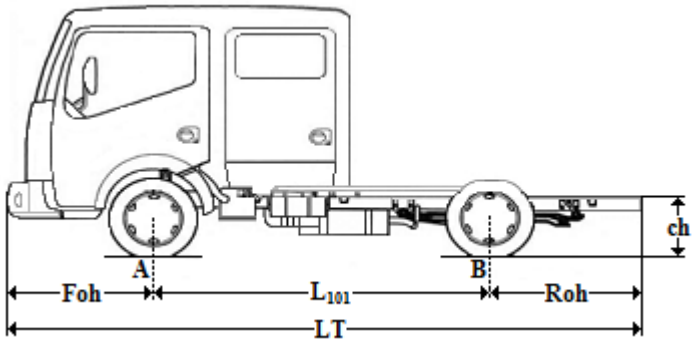


Fig. 4.2. Cotas del perfil chasis-cabina de los camiones FA con cabina doble

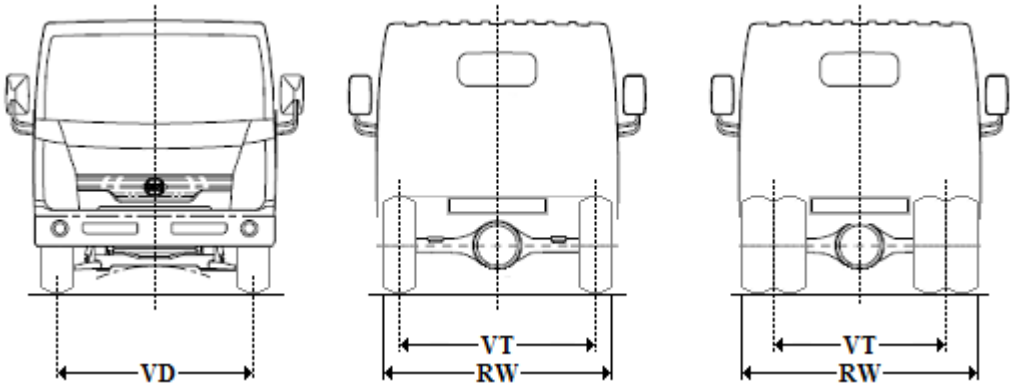


Fig. 4.3. Ancho de vía delantero y trasero de los camiones FA

En la Fig. 4.3, la cota VT varía dependiendo de si el camión incorpora o no ruedas gemelas en el eje posterior.

4.2. Gama de camiones FB

Abarca desde las 3.5 toneladas hasta las 15 toneladas de MMA. Dispone de dos tipos de cabina, la estándar, para las versiones de 3.5 a 8.0 toneladas, y la ancha, para las versiones de 9.5 t.

Las configuraciones chasis-cabina pueden adoptar diferentes distancias entre ejes como se muestra en la Tabla 4.2.

Distancia entre ejes [L_{101}]	
Nomenclatura	Longitud [mm]
/1	3300
/2	3700
/3	4200
/4	4700
/5	5200
/6	5700

Tabla 4.2. Distancia entre ejes de la gama de camiones FB **[1]**

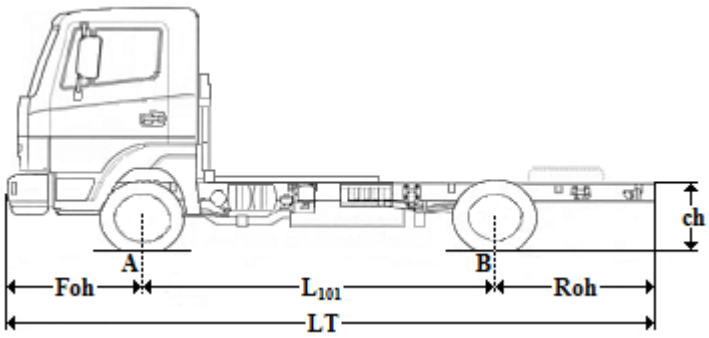


Fig. 4.4. Cotas del perfil chasis-cabina del camión FB

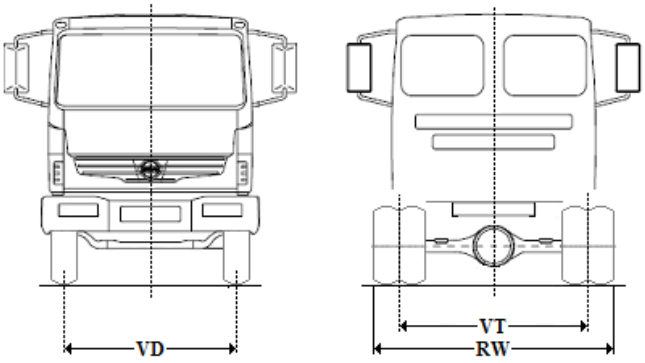


Fig. 4.5. Ancho de vía delantero y trasero del camión FB

En la Fig. 4.5, la cota VD varía dependiendo del tipo de cabina que incorpore el camión.

El ámbito de estudio comprende desde las 2.8 toneladas de la gama de camiones FA hasta las 9.5 toneladas de la gama de camiones FB.

En el Anexo A se encuentran las dimensiones y masas principales de las posibles variantes de ambos modelos.

5. Determinación de la altura del CdG de los camiones cuando se realizan ensayos en pista

El procedimiento de cálculo para obtener la altura del centro de gravedad en condiciones estáticas de los camiones FA y FB cuando se realizan ensayos en pista se lleva a cabo de la misma manera para todas las variantes.

Los cálculos se realizan con la estructura de acero y bloques de hormigón, ya que es el método más utilizado.

En el estudio se consideran dos situaciones:

- OM (Orden de marcha): Tara del vehículo con caja de carga más conductor. Para considerar el peso del conductor, se supone una carga de 75 kg en el eje delantero.

- CM (Carga máxima): Tara del vehículo y toda la masa que puede llegar a incorporar el vehículo.

Para el caso de carga máxima, se estudiarán las situaciones de:

- Vehículo con carga uniformemente repartida en el volumen de la caja (CMT).

- Vehículo cargado con la metodología actual de ensayos en pista (CMP).

5.1. Procedimiento de cálculo

Configuración chasis-cabina sin estructura de carga

De la configuración chasis-cabina de cada camión se identifica:

- La altura del CdG del vehículo respecto al suelo ($h_{CdG\ chasis}$),
- Voladizo delantero (Foh),
- Voladizo trasero (Roh),
- Distancia entre ejes (L_{101}),
- Altura del chasis respecto al suelo (ch),
- Altura del subchasis (sf),
- MMA y TARA.

Con los datos anteriores se calcula la carga útil:

$$carga\ \acute{u}til_{chasis} = MMA - TARA_{chasis} \qquad \text{(Ec. 5.1)}$$

Configuración chasis-cabina con estructura de carga

Para obtener el CdG del conjunto del vehículo se calcula:

- Las dimensiones y la masa de la estructura.
- La altura del CdG de la estructura y de los bloques de carga respecto al suelo.

$$h_{CdG\ estructura} = \left(\frac{altura\ \ estructura}{2}\right) + ch \qquad \text{(Ec. 5.2)}$$

$$h_{CdG\ bloques} = \left(\frac{altura\ \ estructura}{2}\right) + ch + \left(\frac{altura\ \ bloques}{2}\right) \qquad \text{(Ec. 5.3)}$$

- TARA y carga útil del vehículo con estructura.

$$TARA_{chasis+estructura} = TARA_{chasis} + masa_{estructura} \qquad \text{(Ec. 5.4)}$$

$$carga\ útil_{chasis+estructura} = MMA - TARA_{chasis+estructura} \qquad \text{(Ec. 5.5)}$$

Finalmente se obtiene la altura del CdG del conjunto del vehículo chasis-cabina con estructura de carga con y sin bloques respecto al suelo:

- sin bloques de carga:

$$h_{CdG\ vehículo} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2)}{m_1 + m_2} \qquad \text{(Ec. 5.6)}$$

- con bloques de carga:

$$h_{CdG\ vehículo} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2 + m_3 \cdot z_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \qquad \text{(Ec. 5.7)}$$

donde:

$m_1 = TARA_{chasis}$

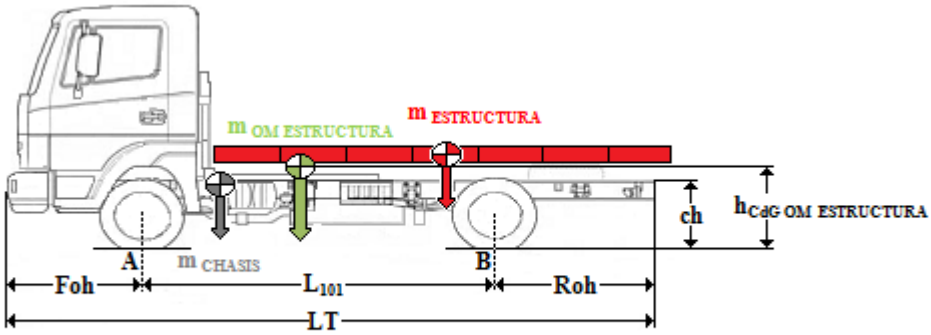
$z_1 = h_{CdG\ chasis}$

$m_2 = masa_{estructura}$

$z_2 = h_{CdG\ estructura}$

$m_3 = masa_{bloques}$

$z_3 = h_{CdG\ bloques}$



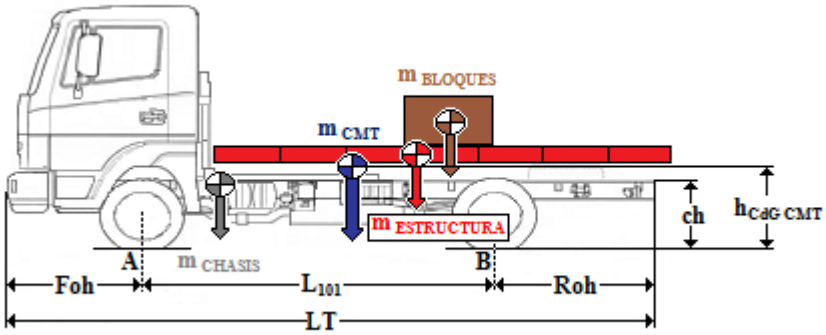
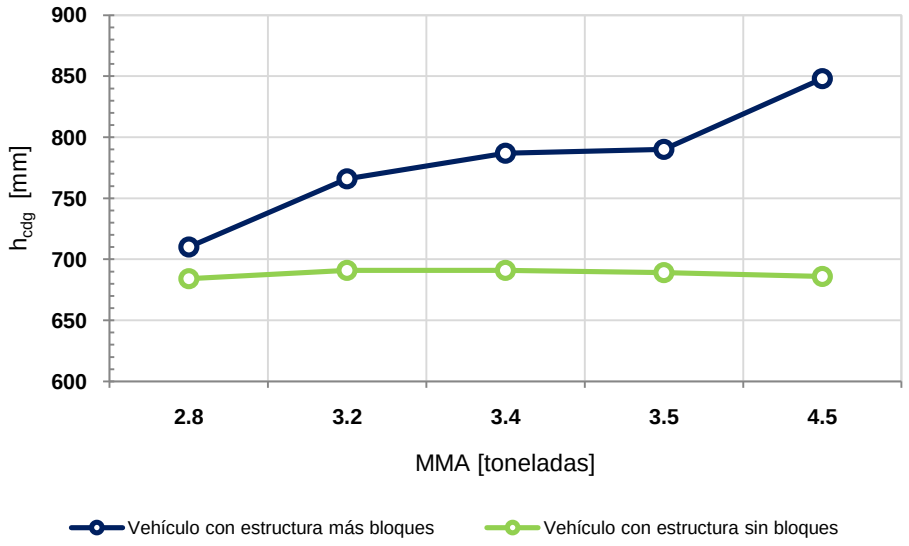


Fig. 5.1. Altura del CdG del vehículo con estructura de carga

5.2. Resultados

5.2.1. Gama de camiones FA



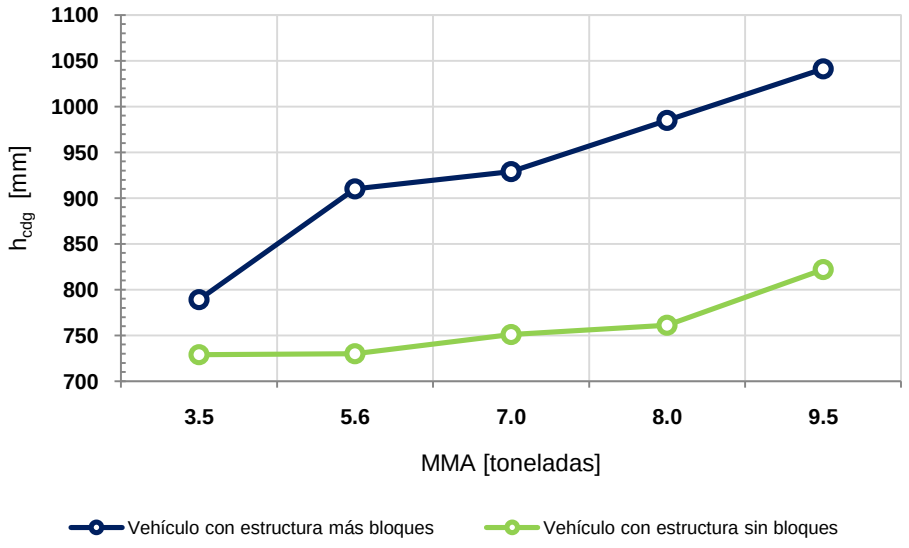
MMA [kg]	2.8	3.2	3.4	3.5	4.5
h_{CdG} [mm]	710	766	787	790	848
h_{CdG} [mm]	684	691	691	689	686

Gráfico 5.1. Altura del CdG de la gama de camiones FA en pista de ensayos

La línea verde del Gráfico 5.1 corresponde a la altura del centro de gravedad de la configuración chasis-cabina con estructura de carga sin bloques.

La línea azul del Gráfico 5.1 corresponde a la altura del centro de gravedad de la configuración chasis-cabina con estructura de carga más bloques.

5.2.2. Gama de camiones FB



MMA [kg]	**3.5**	**5.6**	**7.0**	**8.0**	**9.5**
h_{CdG} [mm]	789	910	929	985	1041
h_{CdG} [mm]	729	730	751	761	822

Gráfico 5.2. Altura del CdG de la gama de camiones FB en pista de ensayos

Esta metodología de carga tiene como ventajas:

- Facilidad y rapidez de carga de los camiones a ensayar.
- Facilidad de poder ensayar camiones de la competencia.

y como inconvenientes:

- Centro de gravedad poco elevado para las condiciones de mercado.
- Momentos de inercia inferiores.
- Rigidez del bastidor diferente a si montara caja de carga.
- Poca variabilidad en la distribución de la carga.

6. Determinación de la altura del CdG teórico cuando la carga se encuentra uniformemente repartida en el volumen de la caja de carga

A la configuración chasis-cabina se le incorpora el carrozado según la actividad comercial que realice. Las carrocerías más utilizadas son:

- Caja de carga cerrada,
- Caja de carga frigorífica,
- Caja de carga abierta,
- Plataforma deslizante.

Los resultados y gráficos siguientes pertenecen a la gama de camiones FB, a excepción del estudio de la caja de carga abierta que corresponde a la gama de camiones FA. Esto se debe a que tiene una carga útil muy pequeña, y al colocar carrocerías de masas elevadas no habría apenas margen de carga, o directamente se sobrepasaría la MMA.

Para cada caso se estudiará las configuraciones de MMA con la distancia entre ejes y las dimensiones de caja más comercializadas.

En el Anexo A se contemplan diferentes configuraciones de chasis-cabina con diferentes tipos de carrozado.

6.1. Vehículos destinados al transporte de mercancías

6.1.1. Caja de carga cerrada

Definición

Se entiende por configuración chasis-cabina con caja de carga cerrada al conjunto del vehículo destinado al transporte de mercancías, cuya carga está colocada en un receptáculo totalmente cerrado.

Fig. 6.1. Camión de la gama FB con caja cerrada **[4]**

Condiciones de carga para el cálculo del centro de gravedad

- Carga homogénea uniformemente repartida en toda la caja.
- Cuando se estudia el vehículo con carga se considera MMA.

Procedimiento de cálculo

Para obtener el CdG del vehículo, se calcula con los resultados de la configuración chasis-cabina sin estructura del apartado 5.1:

- Las dimensiones y la masa de las diferentes partes que forman la caja.
- La masa del conjunto de la caja y la altura del CdG con y sin carga respecto al suelo.

$$masa\ total_{caja\ \ cerrada} = m_1 + \cdots + m_n \qquad \text{(Ec. 6.1)}$$

$$h_{CdG\ caja\ \ cerrada} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + \cdots + m_n \cdot z_n)}{m_1 + \cdots + m_n} \qquad \text{(Ec. 6.2)}$$

donde:

$m_n = masa\ partes\ de\ la\ caja.$

$z_n = h_{CdG}\ partes\ de\ la\ caja.$

Al considerar carga homogénea y uniformemente repartida, se puede aproximar:

$$\frac{(m_1 \cdot z_1 + \cdots + m_n \cdot z_n)}{m_1 + \cdots + m_n} = \left(\frac{altura\ \ caja\ \ cerrada}{2}\right) \qquad \text{(Ec. 6.3)}$$

- TARA y carga útil del vehículo con caja cerrada.

$$TARA_{chasis+caja\ \ cerrada} = TARA_{chasis} + masa_{caja\ \ cerrada} \qquad \text{(Ec. 6.4)}$$

$$carga\ \text{útil}_{chasis+caja\ \ cerrada} = MMA - TARA_{chasis+caja\ \ cerrada} \qquad \text{(Ec. 6.5)}$$

A partir de estos valores, se calcula la altura del CdG del conjunto respecto al suelo:

- vehículo sin carga:

$$h_{CdG\ vehículo} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2)}{m_1 + m_2} \qquad \text{(Ec. 6.6)}$$

- vehículo con carga:

$$h_{CdG\ vehículo} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2 + m_3 \cdot z_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \qquad \text{(Ec. 6.7)}$$

donde:

$m_1 = TARA_{chasis}$

$z_1 = h_{CdG\ chasis}$

$m_2 = masa_{caja\ \ cerrada\ \ sin\ carga}$

$z_2 = h_{CdG\ caja\ \ cerrada\ \ sin\ carga}$

$m_3 = masa_{carga\ \ \text{útil}}$

$z_3 = h_{CdG\ carga\ \ \text{útil}} = h_{CdG\ caja\ \ cerrada\ \ sin\ carga}$

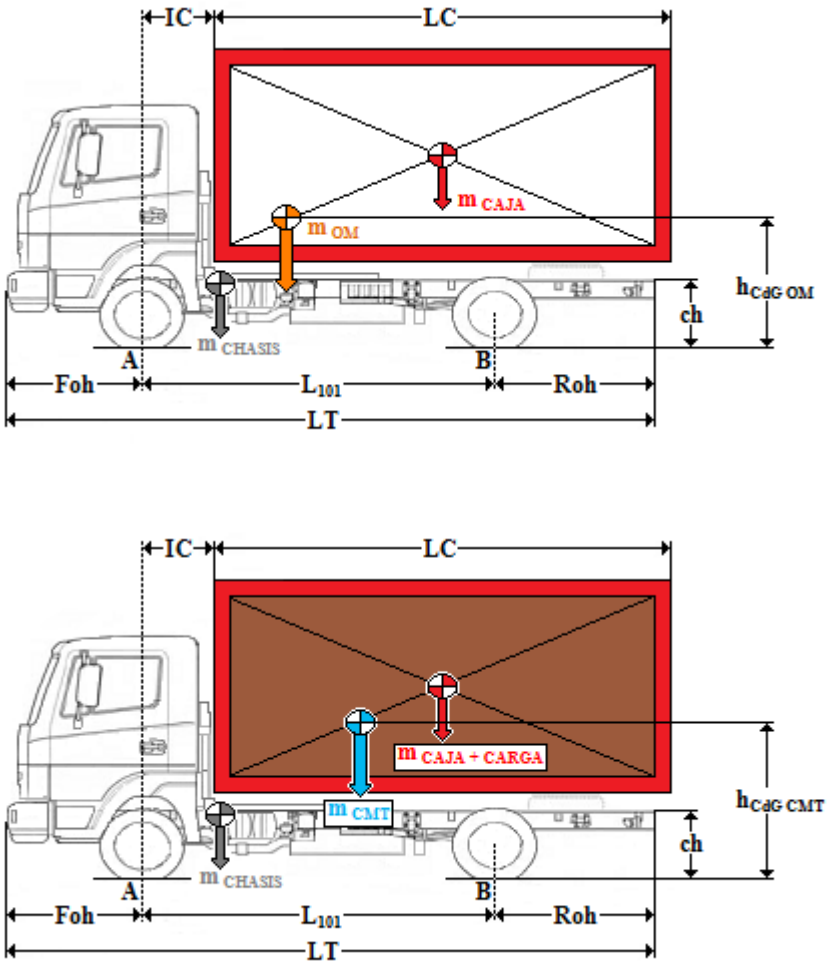
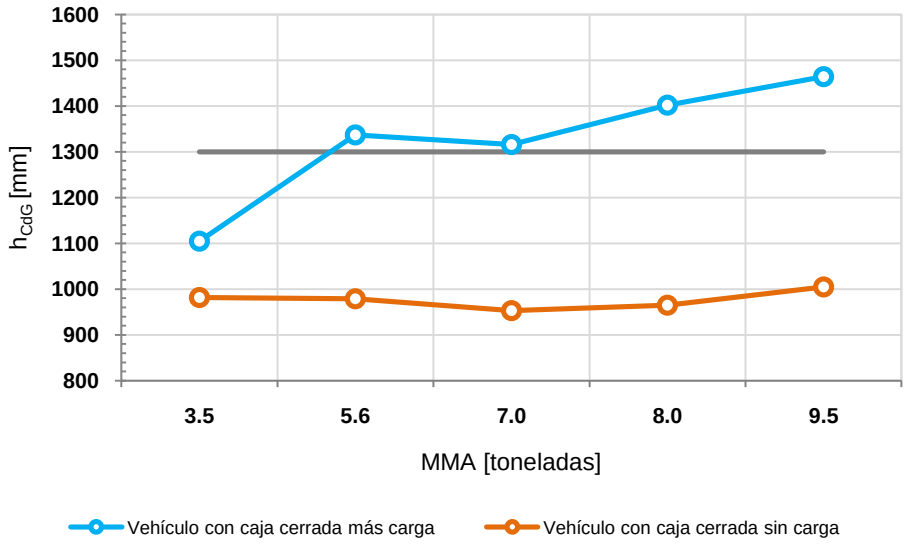


Fig. 6.2. Altura del CdG del vehículo con caja cerrada para OM y CMT

Resultados caja cerrada



MMA [kg]	3.5	5.6	7.0	8.0	9.5
h_{CdG} [mm]	1105	1337	1316	1402	1464
h_{CdG} [mm]	982	979	953	965	1005

Gráfico 6.1. Altura del CdG de la gama FB con caja cerrada, LC = 4300 mm

La línea naranja del Gráfico 6.1 corresponde a la altura del centro de gravedad del vehículo con caja cerrada sin carga.

La línea azul del Gráfico 6.1 corresponde a la altura del centro de gravedad del vehículo con caja cerrada más carga.

La línea gris adopta el valor de 1300 mm, que es el valor de referencia de la altura del CdG para realizar cálculos. Corresponde aproximadamente a 1/3 de los 4 metros de altura máxima que puede tener una caja de carga **[1]**.

6.1.2. Caja de carga frigorífica

Definición

Se entiende por configuración chasis-cabina con caja de carga frigorífica al conjunto del vehículo destinado al transporte de mercancías, cuya carga está colocada en un receptáculo totalmente cerrado, construido con paredes aislantes, con inclusión de puertas, piso y techo, que permiten limitar los intercambios de calor entre el interior y el exterior de la caja.

Fig. 6.3. Camión de la gama FB con caja frigorífica **[8]**

Condiciones de carga para el cálculo del centro de gravedad

- Carga homogénea uniformemente repartida en toda la caja.
- Cuando se estudia el vehículo con carga se considera MMA.
- Se ha considerado una masa media para el evaporador de 15 kg, situando su CdG a una distancia de 200 mm por debajo del extremo superior de la caja frigorífica.

Procedimiento de cálculo

El procedimiento se realiza de manera similar al caso de caja cerrada (apartado 6.1.1), teniendo en cuenta que las partes de la caja frigorífica son de dimensiones y masa diferentes para conseguir aislamiento térmico. Se tendrá también en cuenta las dimensiones y masa del evaporador.

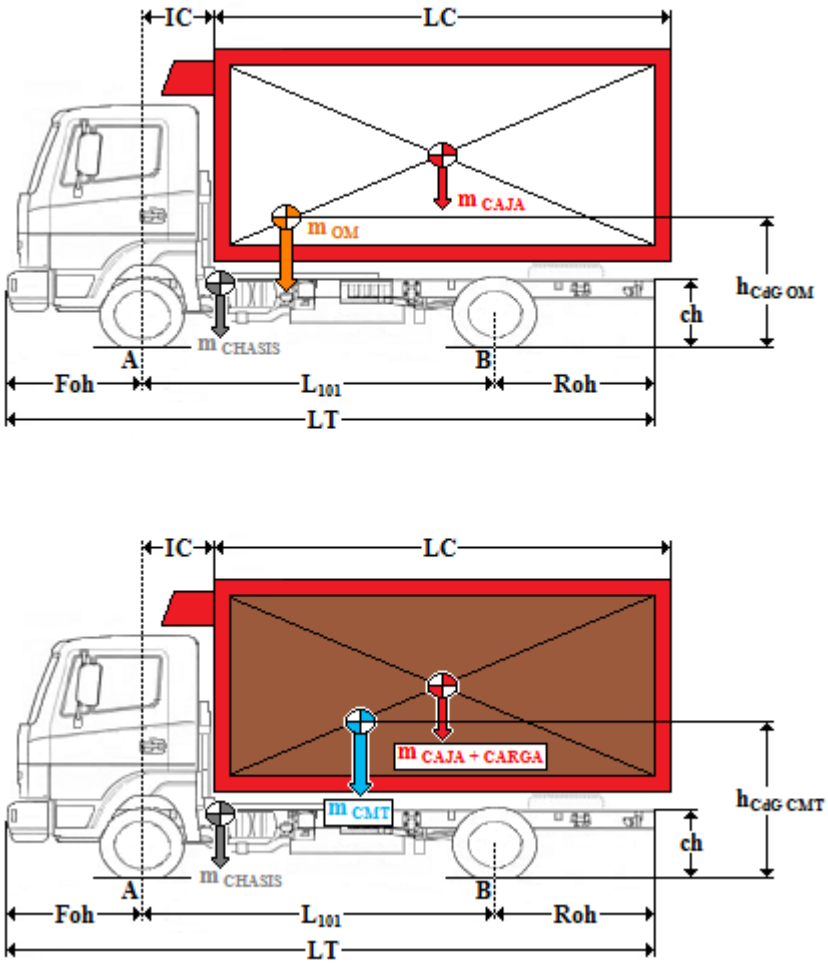
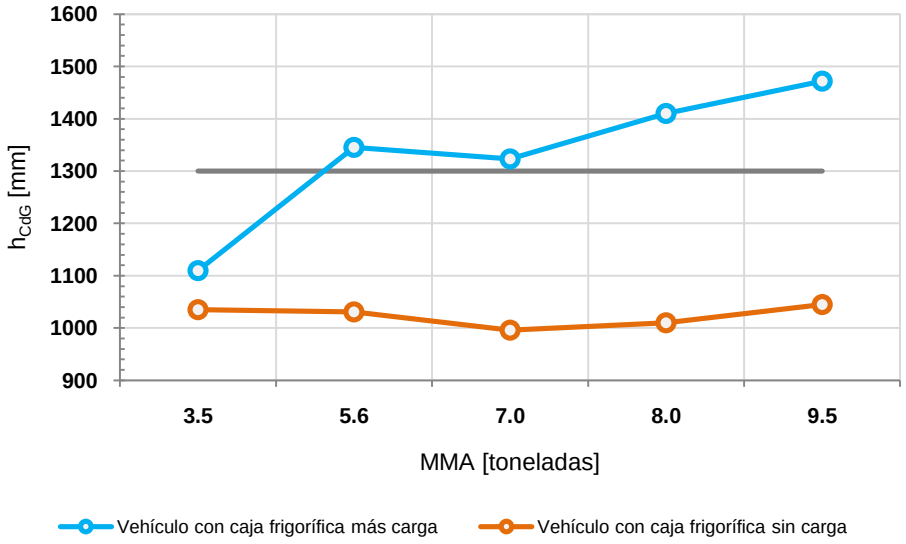


Fig. 6.4. Altura del CdG del vehículo con caja frigorífica para OM y CMT

Resultados caja frigorífica



MMA [kg]	**3.5**	**5.6**	**7.0**	**8.0**	**9.5**
h_{CdG} [mm]	1105	1337	1316	1402	1464
h_{CdG} [mm]	982	979	953	965	1005

Gráfico 6.2. Altura del CdG de la gama FB con caja frigorífica, LC = 4300 mm

6.1.3. Caja de carga abierta

Definición

Se entiende por configuración chasis-cabina con caja de carga abierta al conjunto del vehículo destinado al transporte de mercancías, cuya carga está colocada en un receptáculo abierto por la parte superior. Los laterales podrán ser abatibles o fijos.

Fig. 6.5. Camión de la gama FA con caja abierta **[4]**

Condiciones de carga para el cálculo del centro de gravedad

- Para realizar los cálculos se utilizan contenedores de carga que queden ajustados dentro de la caja abierta.
- Carga homogénea uniformemente repartida en todos los contenedores.
- Cuando se estudia el vehículo con carga se considera MMA.

Procedimiento de cálculo

Para obtener el CdG del conjunto del vehículo se calcula:

- Las dimensiones y la masa de las diferentes partes que forman la caja.
- La masa del conjunto y la altura del CdG de la caja sin carga respecto al suelo.

$$masa\ total_{caja\ \ abierta} = m_1 + \cdots + m_n \qquad \text{(Ec. 6.8)}$$

$$h_{CdG\ caja\ \ abierta} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + \cdots + m_n \cdot z_n)}{m_1 + \cdots + m_n} \qquad \text{(Ec. 6.9)}$$

- TARA y carga útil del vehículo sin contenedores.

$$TARA_{chasis+caja\ \ abierta\ \ vacía} = TARA_{chasis} + masa_{caja\ \ abierta} \qquad \text{(Ec. 6.10)}$$

$$carga\ \text{útil}_{chasis+caja\ \ abierta\ \ vacía} = MMA - TARA_{chasis+caja\ \ abierta\ \ vacía} \qquad \text{(Ec. 6.11)}$$

- Masa de los contenedores vacíos que se colocan dentro de la caja y la altura del CdG respecto al suelo.

$$masa\ total_{contenedores\ \ vacios} = c_1 + \cdots + c_n \qquad \text{(Ec. 6.12)}$$

$$h_{CdG\ contenedores} = \frac{(c_1 \cdot z_1 + \cdots + c_n \cdot z_n)}{c_1 + \cdots + c_n} \qquad \text{(Ec. 6.13)}$$

donde:

$c_n = masa\ contenedores\ vacíos$

$z_n = h_{CdG}\ contenedores$

$n = número\ de\ contenedores$

- Masa que se tiene que cargar en los contenedores:

$$masa_{carga\ \ útil\ en\ contenedores} = MMA - TARA_{chasis + caja\ + contenedores\ \ vacios} \qquad \text{(Ec. 6.14)}$$

Con los datos anteriores se calcula la altura del CdG del conjunto respecto al suelo:

- vehículo sin carga:

$$h_{CdG\ vehículo} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2)}{m_1 + m_2} \qquad \text{(Ec. 6.15)}$$

- vehículo con carga:

$$h_{CdG\ vehículo} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2 + m_3 \cdot z_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \qquad \text{(Ec. 6.16)}$$

donde:

$m_1 = TARA_{chasis}$

$z_1 = h_{CdG\ chasis}$

$m_2 = masa_{caja\ \ abierta\ \ sin\ carga}$

$z_2 = h_{CdG\ caja\ \ abierta\ \ sin\ carga}$

$m_3 = masa_{carga\ \ útil}$

$z_3 = h_{CdG\ carga\ \ útil} = h_{CdG\ conjunto\ \ contenedores}$

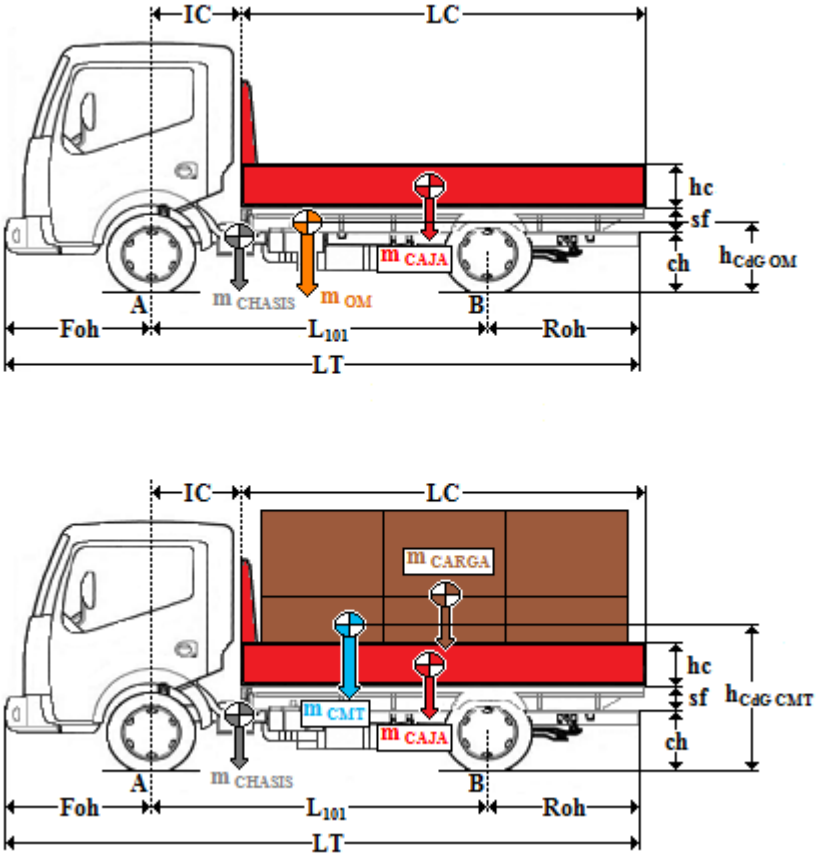
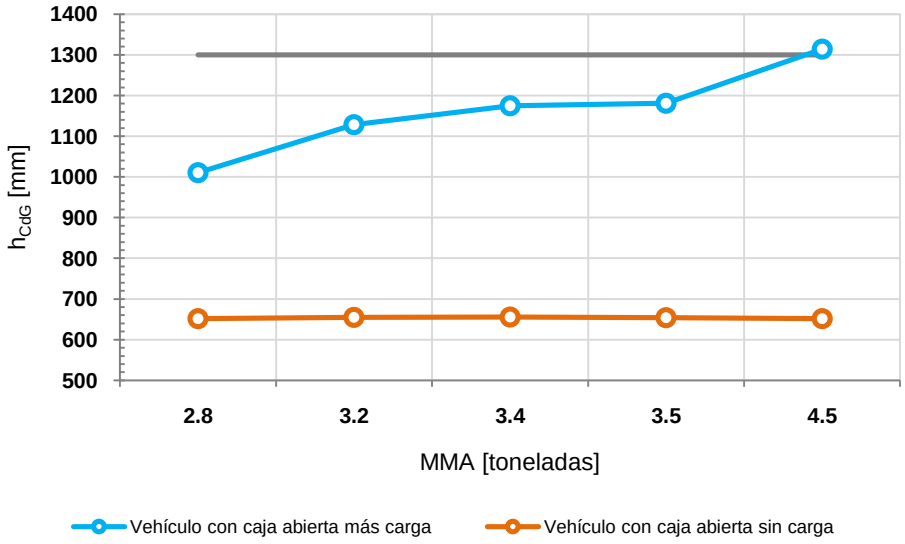


Fig. 6.6. Altura del CdG del vehículo con caja abierta para OM y CMT

Resultados caja abierta



MMA [kg]	**2.8**	**3.2**	**3.4**	**3.5**	**4.5**
h_{CdG} [mm]	1010	1128	1175	1181	1314
h_{CdG} [mm]	652	655	656	654	652

Gráfico 6.3. Altura del CdG de la gama FA con caja abierta, LC = 2950 mm

6.1.4. Plataforma deslizante

Definición

Se entiende por configuración chasis-cabina con plataforma deslizante, al conjunto del vehículo destinado al transporte de mercancías, cuya carga está colocada sobre una superficie plana sin protecciones laterales, llamado también vehículo de rescate o vehículo grúa.

Fig. 6.7. Camión de la gama FB con plataforma deslizante **[7]**

Condiciones de carga para el cálculo del centro de gravedad

- Para hallar el CdG de todo el vehículo se ha considerado como carga un vehículo de grandes dimensiones y CdG elevado, que es el caso más desfavorable para el estudio.

- El vehículo elegido es un Ford F250 de 2360 kg de masa y 776 mm de altura del centro de gravedad.

- Para el Camión FB 56.15 y para el Camión FA 35.13 / 45.15 se ha utilizado un vehículo de masa inferior al Ford F250, debido a que se supera la MMA del camión.

Procedimiento de cálculo

El cálculo se realiza con un procedimiento similar al caso de caja cerrada (apartado 6.1.1), teniendo en cuenta que la caja cerrada es una plataforma deslizante, la carga útil es el vehículo transportado y que $h_{CdG\ carga\ \acute{u}til} = altura\ plataforma + h_{CdG\ vehículo\ transportado}$.

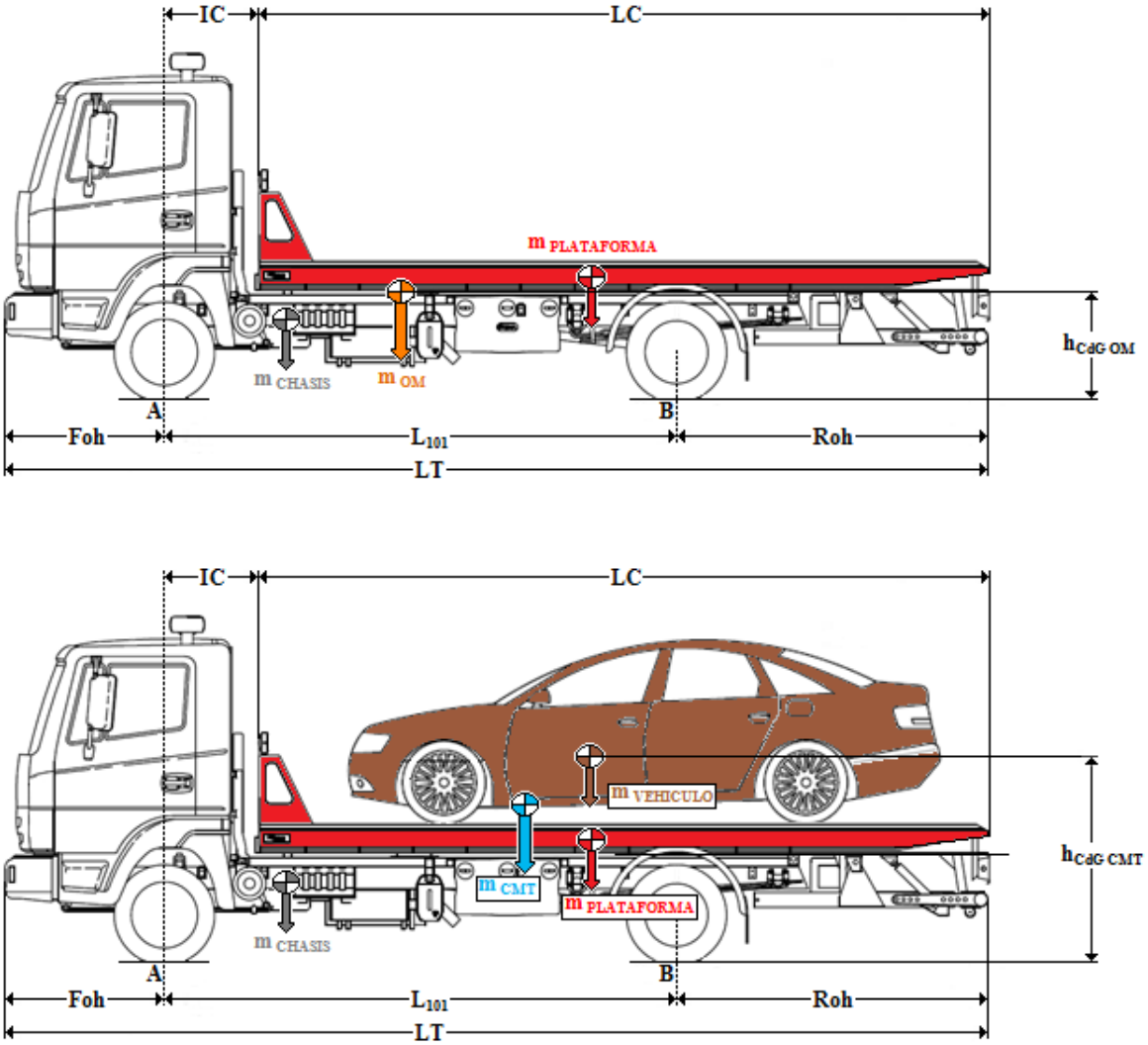
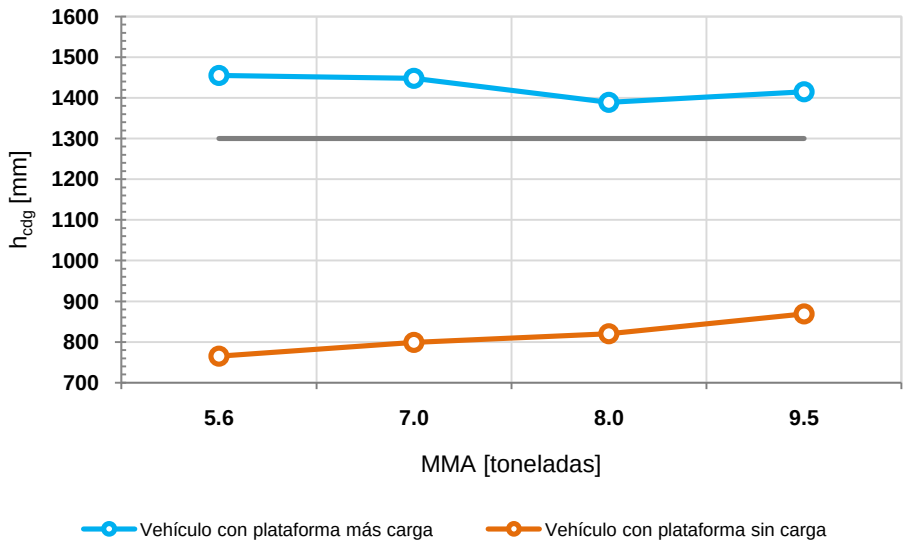


Fig. 6.8. Altura del CdG del vehículo con plataforma para OM y CMT

Resultados plataforma deslizante



MMA [kg]	**5.6**	**7.0**	**8.0**	**9.5**
h_{CdG} [mm]	1455	1448	1389	1415
h_{CdG} [mm]	765	799	820	869

Gráfico 6.4. Altura del CdG de la gama FB con plataforma deslizante

El motivo de que en el Gráfico 6.4 la altura del centro de gravedad en función de la masa del vehículo no sea creciente es que cada camión incorpora una plataforma de dimensiones y masa diferentes en función de la MMA y de la distancia entre ejes.

6.2. Conclusiones

En los Gráficos 6.1, 6.2 y 6.4 se observa que para el caso de caja cerrada, caja frigorífica y plataforma deslizante, que corresponden a la gama de camiones FB, la línea gris de referencia no se ajusta a la altura del CdG obtenida en OM y en CMT.

En el Gráfico 6.3 que corresponde a la gama de camiones FA con caja abierta, el valor de referencia queda muy por encima de los resultados obtenidos, por lo tanto, no tiene sentido aproximar la altura del CdG a 1300 mm respecto al suelo.

La altura del vehículo carrozado, tanto en TARA como en MMA, deberá respetar los valores máximos establecidos en la Tabla 6.1 para garantizar un buen comportamiento del vehículo. **[5]**

Gama	h_{CdG} [mm]
FA	1200
FB, cabina estándar	1500

Tabla 6.1. Altura máxima del CdG para los camiones de la gama FA y FB

Los valores de la Tabla 6.1 se refieren únicamente a cargas uniformes y fijas. Cuando la carga útil pueda desplazarse lateralmente, como por ejemplo en el transporte de líquidos o cargas suspendidas, se tendrá en cuenta que dichas cargas pueden producir transferencia de masas más elevadas y por tanto tendrán mayor repercusión en la estabilidad transversal del vehículo.

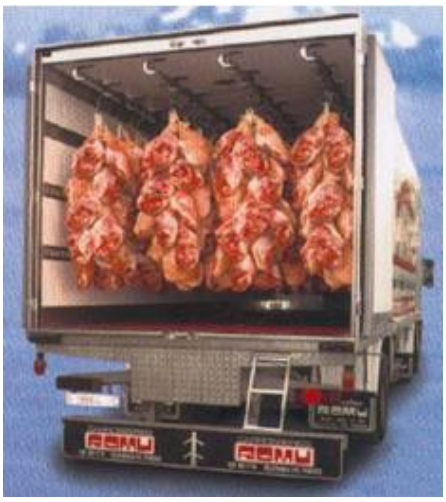


Fig. 6.9. Camiones con cargas móviles **[8]**

7. Comparación de la altura del CdG en condiciones de pista y en condiciones de carga máxima ocupando todo el volumen de la caja

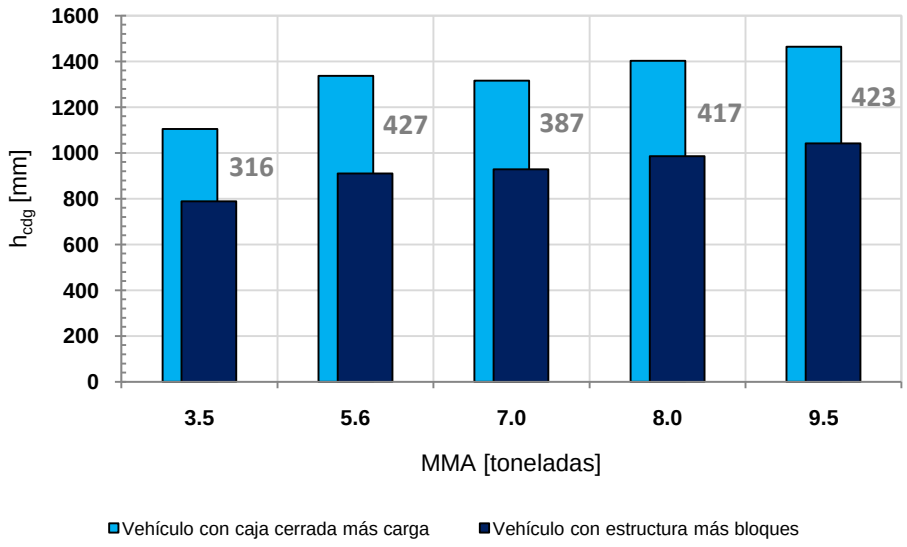
Las diferencias entre las alturas del CdG de los camiones en situación real de carga y las alturas de los camiones en pista de pruebas se deben a que se ensayan con elementos de masa muy concentrada y a una altura poco elevada respecto al chasis del camión.

7.1. Diferencias en los resultados obtenidos

Para los cuatro tipos de carrozado, se compara en situación de carga máxima, la altura del CdG actual en pista ($h_{CdG\ CMP}$) con la altura teórica del camión considerando que la carga ocupa uniformemente la totalidad de la caja de carga ($h_{CdG\ CMT}$).

7.1.1. Caja de carga cerrada

Para la gama de camiones FB con caja cerrada de 4300 mm de longitud:



MMA [kg]	3.5	5.6	7.0	8.0	9.5
h_{CdG} [mm]	1105	1337	1316	1402	1464
h_{CdG} [mm]	789	910	929	985	1041
Diferencia	316	427	387	417	423

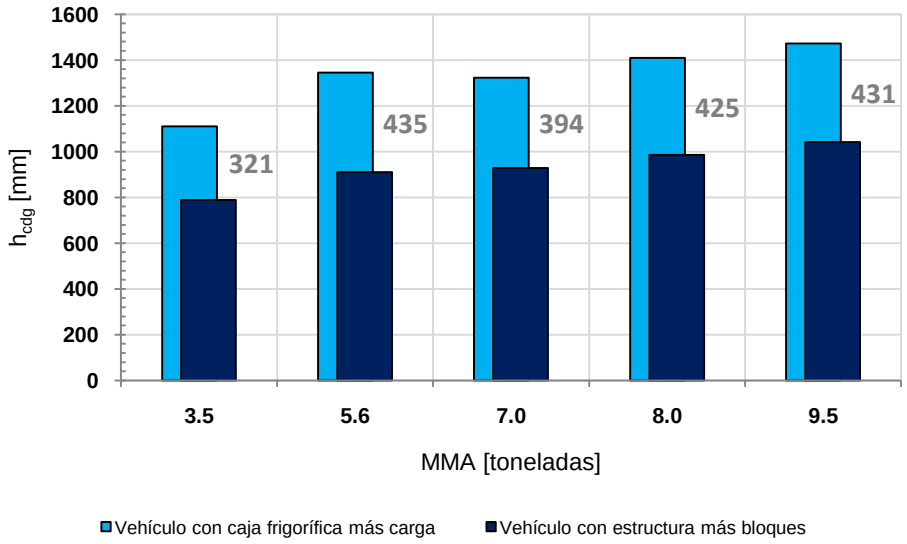
Gráfico 7.1. Diferencia de la altura del CdG según el método de carga utilizado

La línea azul clara del Gráfico 7.1 corresponde a la altura del centro de gravedad del vehículo, chasis-cabina con caja cerrada más carga ($h_{CdG\ CMT}$).

La línea azul oscura del Gráfico 7.1 corresponde a la altura del centro de gravedad del vehículo, chasis-cabina con estructura más bloques de carga ($h_{CdG\ CMP}$).

7.1.2. Caja de carga frigorífica

Para la gama de camiones FB con caja frigorífica de 4300 mm de longitud:

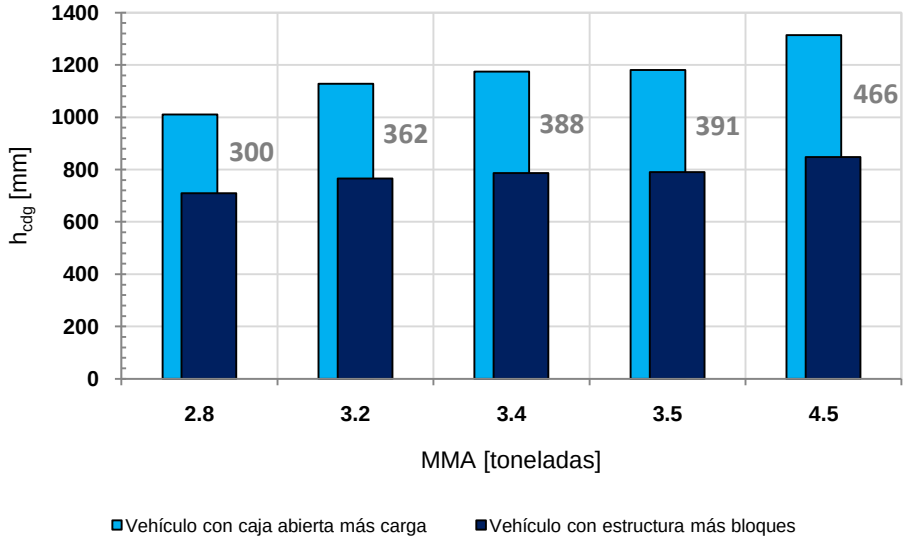


MMA [kg]	3.5	5.6	7.0	8.0	9.5
h_{CdG} [mm]	1110	1345	1323	1410	1472
h_{CdG} [mm]	789	910	929	985	1041
Diferencia	321	435	394	425	431

Gráfico 7.2. Diferencia de la altura del CdG según el método de carga utilizado

7.1.3. Caja de carga abierta

Para la gama de camiones FA con caja abierta de 3720 mm de longitud:

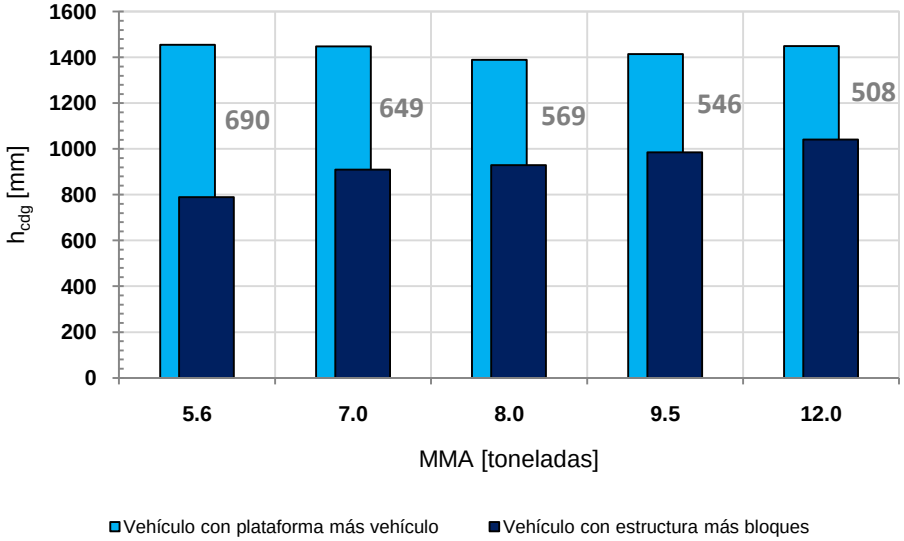


MMA [kg]	2.8	3.2	3.4	3.5	4.5
h_{CdG} [mm]	1010	1128	1175	1181	1314
h_{CdG} [mm]	710	766	787	790	848
Diferencia	300	362	388	391	466

Gráfico 7.3. Diferencia de la altura del CdG según el método de carga utilizado

7.1.4. Plataforma deslizante

Para cada MMA de la gama de camiones FB se ha utilizado una plataforma de dimensiones y masa diferentes:



MMA [kg]	3.5	5.6	7.0	8.0	9.5
h_{CdG} [mm]	1455	1448	1389	1415	1449
h_{CdG} [mm]	765	799	820	869	941
Diferencia	690	649	569	546	508

Gráfico 7.4. Diferencia de la altura del CdG según el método de carga utilizado

7.2. Conclusiones

A partir de las diferencias obtenidas entre las alturas de ambos centros de gravedad, se plantea buscar soluciones para evaluar el comportamiento del vehículo en pista en condiciones reales de la posición de carga y poder realizar ensayos que se asemejen a una situación real.

En la Tabla 7.1 se puede comparar, para los camiones de las gamas FA y FB, la altura del centro de gravedad según el método y la situación de carga.

		h_{CdG} respecto al suelo [mm]					
	MMA [toneladas]	Chasis	Con estructura sin bloques	Con estructura y bloques	Con caja sin carga	Con caja y carga	Teórico cálculos
Gama FA	2.8	610	684	710	656	972	1300
	3.2	610	691	766	659	1094	1300
	3.4	610	691	787	659	1144	1300
	3.5	610	689	790	658	1154	1300
	4.5	610	686	848	657	1295	1300
Gama FB	3.5	670	729	789	982	1105	1300
	5.6	673	730	910	979	1337	1300
	7.0	724	751	929	953	1316	1300
	8.0	725	761	985	965	1402	1300
	9.5	796	822	1041	1005	1464	1300

Tabla 7.1. Altura del CdG para diferentes situaciones de carga

Para la gama de camiones FA se utiliza una caja abierta de LC = 3720 mm, y para la gama de camiones FB una caja cerrada de LC = 4300 mm.

8. Influencia de la altura del centro de gravedad en la dinámica de frenado

Se pretende obtener y analizar las curvas y rectas de frenado en orden de marcha y en carga máxima.

8.1. Cálculo preliminar

Se calcula para las dos situaciones de carga:

- Las reacciones en el eje delantero y en el eje trasero en situación estática.
- Las distancias del eje delantero y del eje posterior al CdG.

8.1.1. Situación en orden de marcha (OM)

A las reacciones que tiene la configuración chasis-cabina FR_{chasis} y RR_{chasis} hay que sumar la masa que descarga la caja de carga sobre cada eje.

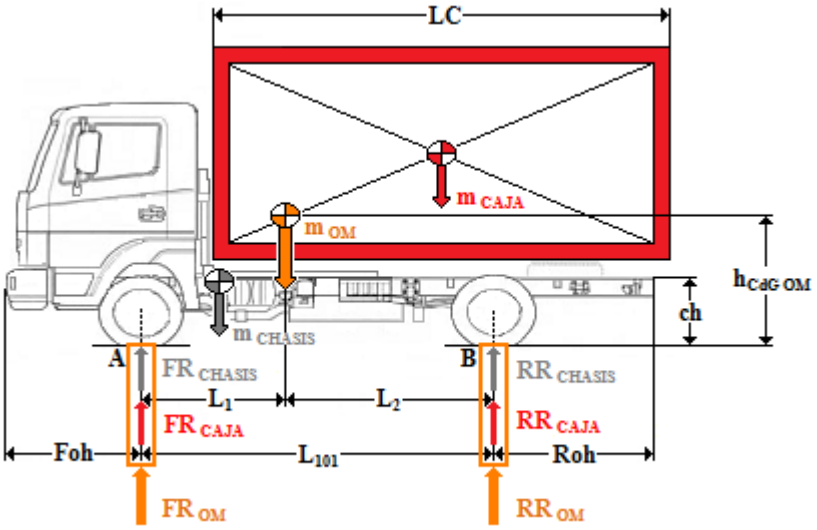


Fig. 8.1. Reacciones en situación de orden de marcha (OM)

Con el sumatorio de momentos en el punto A de la Fig. 8.1 se obtiene RR_{caja} .

$$RR_{caja} \cdot L_{101} = masa_{caja} \cdot g\left(LT - Foh - \left(\frac{LC}{2}\right)\right) \qquad \text{(Ec. 8.1)}$$

$$RR_{OM} = RR_{chasis} + RR_{caja} \quad \text{(Ec. 8.2)}$$

$$FR_{caja} = masa_{caja} \cdot g - RR_{caja} \quad \text{(Ec. 8.3)}$$

$$FR_{OM} = FR_{chasis} + FR_{caja} \quad \text{(Ec. 8.4)}$$

A partir de la masa, la distancia entre ejes y las reacciones en el eje delantero y trasero en orden de marcha, se obtiene L_1 y L_2 .

$$RR_{OM} \cdot L_{101} = masa \cdot g \cdot L_1 \quad \text{(Ec. 8.5)}$$

$$L_2 = L_{101} - L_1 \quad \text{(Ec. 8.6)}$$

8.1.2. Situación en carga máxima (CM)

Con sumatorio de momentos en el punto A de la Fig. 8.2 se obtiene $RR_{caja\ +carga}$.

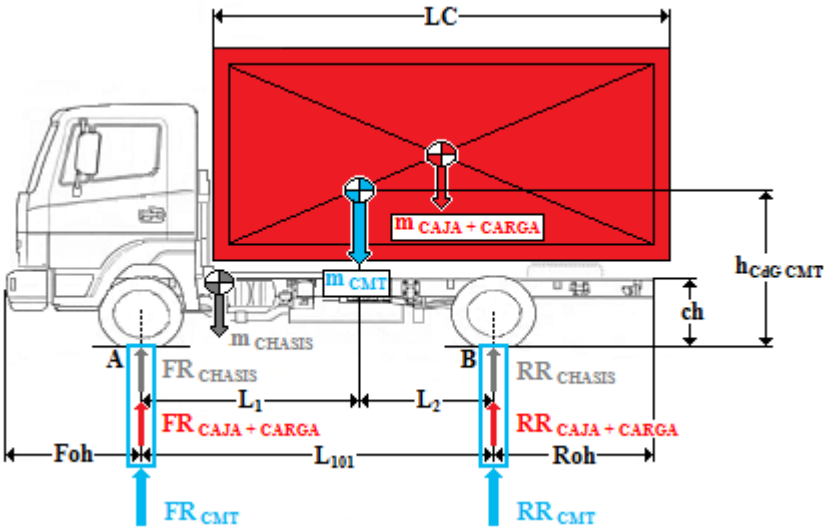


Fig. 8.2. Reacciones en situación de carga máxima teórica (CMT)

$$RR_{caja\ +carga} \cdot L_{101} = masa_{caja\ +carga} \cdot g\left(LT - Foh - \left(\frac{LC}{2}\right)\right) \quad \text{(Ec. 8.7)}$$

$$RR_{CM} = RR_{chasis} + RR_{caja\ +carga} \quad \text{(Ec. 8.8)}$$

$$FR_{caja\ +carga} = masa_{caja\ +carga} \cdot g - RR_{caja\ +carga} \quad \text{(Ec. 8.9)}$$

$$FR_{CM} = FR_{chasis} + FR_{caja\ +carga} \quad \text{(Ec. 8.10)}$$

A partir de la masa, la distancia entre ejes y las reacciones en el eje delantero y trasero en carga máxima se obtiene L_1 y L_2.

$$RR_{CM} \cdot L_{101} = masa \cdot g \cdot L_1 \qquad \text{(Ec. 8.11)}$$

$$L_2 = L_{101} - L_1 \qquad \text{(Ec. 8.12)}$$

Las reacciones en los ejes y las distancias de los ejes al CdG son iguales para los dos casos de CM diferenciados (CMT y CMP), ya que el punto horizontal de aplicación de la carga varia mínimamente, considerando como hipótesis el mismo, tanto si el camión va con caja de carga como si monta bloques de carga.

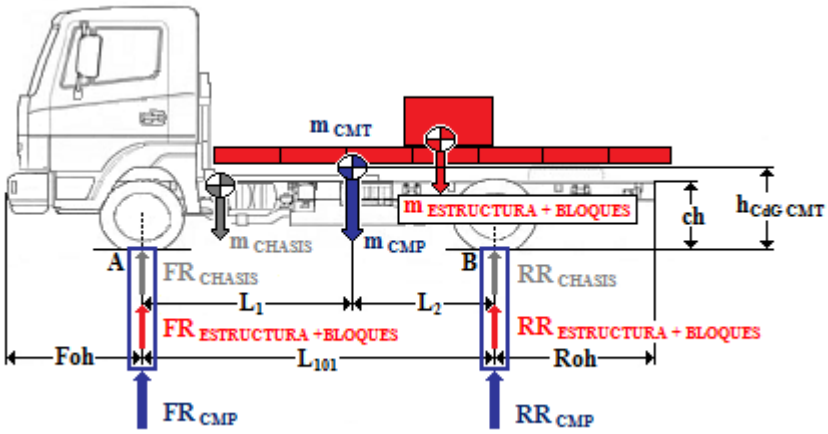


Fig. 8.3. Reacciones en situación de carga máxima en pista (CMP)

	MMA [toneladas]	Posición horizontal del CdG [mm]											
		Chasis				OM				CM			
		L_1	L_2	FR	RR	L_1	L_2	FR	RR	L_1	L_2	FR	RR
Gama FA LC = 3720mm	2.8	761	2139	1280	455	1046	1854	1324	747	1429	1471	1421	1379
	3.2	761	2139	1280	455	1046	1854	1324	747	1565	1335	1473	1727
	3.4	764	2136	1273	455	1049	1851	1317	747	1626	1274	1494	1906
	3.5	779	2121	1280	470	1060	1840	1325	763	1648	1252	1511	1989
	4.5	881	2019	1278	558	1131	1769	1321	845	1853	1047	1624	2876
Gama FB LC = 4300mm	3.5	865	2335	1525	565	1404	1796	1650	1290	1616	1584	1732	1768
	5.6	910	2290	1535	610	1427	1773	1660	1335	2033	1167	2042	3558
	7.0	1000	2200	2035	925	1335	1865	2221	1589	1866	1334	2919	4081
	8.0	1000	2200	2035	925	1335	1865	2221	1589	1945	1255	3138	4863
	9.5	1026	2204	2300	1070	1366	1864	2436	1784	2116	1114	3277	6223

Tabla 8.1. Posición horizontal del CdG para situaciones de carga y carrozados diferentes

8.2. Fuerzas y momentos que actúan en el frenado

Se considerará el vehículo como un sólido rígido, no dotado de sistema de suspensión y con simetría de masas. Se supondrá también que el movimiento se produce en un tramo de calzada recto, con pendiente constante y sin acciones laterales.

Para el análisis de los esfuerzos asociados al frenado, se tomará como base el diagrama que se representa en la Fig. 8.4, donde se considerarán los ejes de referencia 1 y 2 como sentido positivo de las fuerzas y momentos, y el ángulo θ creciente en sentido horario.

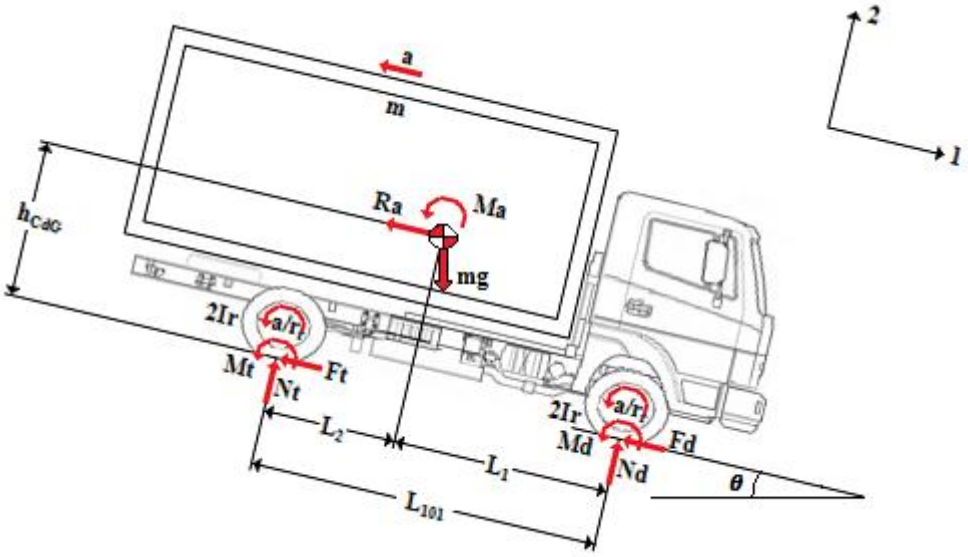


Fig. 8.4. Fuerzas y momentos que actúan en el frenado

Aplicando los teoremas vectoriales:

$$\sum F_2 = 0$$

$$N_d + N_t - mg\ cos\theta = 0 \qquad \text{(Ec. 8.13)}$$

$$\sum F_1 = m \cdot a$$

$$mg\ sin\theta - (F_d + F_t) - R_a = -m \cdot a \qquad \text{(Ec. 8.14)}$$

$$\sum M_G = L_G$$

$$N_d \cdot L_1 - N_t \cdot L_2 - (F_d + F_t) \cdot h_{CdG} + M_a + M_d + M_t = 4\frac{I_r}{r_d}a \qquad \text{(Ec. 8.15)}$$

Se considerará, a efectos prácticos, que la influencia de ciertas fuerzas y momentos es pequeña y, por tanto, omisible frente al esfuerzo que el sistema de frenos tiene que transmitir a las ruedas.

- Se considera que el vehículo circula sobre una superficie horizontal, ($\theta = 0°$).
- Se desprecia la resistencia aerodinámica al avance y el momento aerodinámico.
- Se desprecia la resistencia a la rodadura y las inercias de rotación de las ruedas.

Con estas hipótesis y las ecuaciones Ec. 8.13, Ec. 8.14 y Ec. 8.15 se obtiene:

$$N_d = \frac{mg}{L_{101}}\left(L_2 + h_{CdG}\frac{a}{g}\right) \quad \text{(Ec. 8.16)}$$

$$N_t = \frac{mg}{L_{101}}\left(L_1 - h_{CdG}\frac{a}{g}\right) \quad \text{(Ec. 8.17)}$$

$$N_d + N_t = mg \quad \text{(Ec. 8.18)}$$

$$F_d + F_t = ma \quad \text{(Ec. 8.19)}$$

Si μ_c es la adherencia entre el neumático y la calzada, y es la misma para los dos ejes, la máxima fuerza de frenado F_T que se puede obtener:

$$F_T = \mu_c N \quad \text{(Ec. 8.20)}$$

Con las ecuaciones Ec. 8.18 y Ec. 8.19, se obtiene:

$$a = \mu_c g \quad \text{(Ec. 8.21)}$$

Se define, para cada eje, un coeficiente k que relaciona la fuerza normal de enlace del neumático y la fuerza tangencial de frenado.

Para el eje delantero:

$$k_d = \frac{F_d}{N_d} \quad \text{(Ec. 8.22)}$$

Y para el eje trasero:

$$k_t = \frac{F_t}{N_t} \quad \text{(Ec. 8.23)}$$

Considerando las expresiones de N_d y N_t de las ecuaciones Ec. 8.16 y Ec. 8.17:

$$F_d = k_d \cdot N_d \quad \text{(Ec. 8.24)}$$

$$F_d = k_d \cdot \frac{mg}{L_{101}} \left(L_2 + h_{CdG} \frac{a}{g} \right) \quad \text{(Ec. 8.25)}$$

$$F_t = k_t \cdot N_t \quad \text{(Ec. 8.26)}$$

$$F_t = k_t \cdot \frac{mg}{L_{101}} \left(L_1 - h_{CdG} \frac{a}{g} \right) \quad \text{(Ec. 8.27)}$$

8.3. Reparto óptimo de la fuerza de frenado

8.3.1. Curvas de equiadherencia

Imponiendo la misma adherencia en los dos ejes y que ésta sea máxima, se obtienen las siguientes expresiones:

$$F_d = \mu_c \frac{mg}{L_{101}} (L_2 + h_{CdG} \cdot \mu_c) \quad \text{(Ec. 8.28)}$$

$$F_t = \mu_c \frac{mg}{L_{101}} (L_1 - h_{CdG} \cdot \mu_c) \quad \text{(Ec. 8.29)}$$

Variando el valor μ_c entre 0,1 y 1,1 en intervalos de una décima, se construyen las curvas de equiadherencia para los tres estados de carga.

Las curvas de equiadherencia, o curvas de frenado ideal, muestran las máximas fuerzas de frenado en los dos ejes en función de los valores de μ_c.

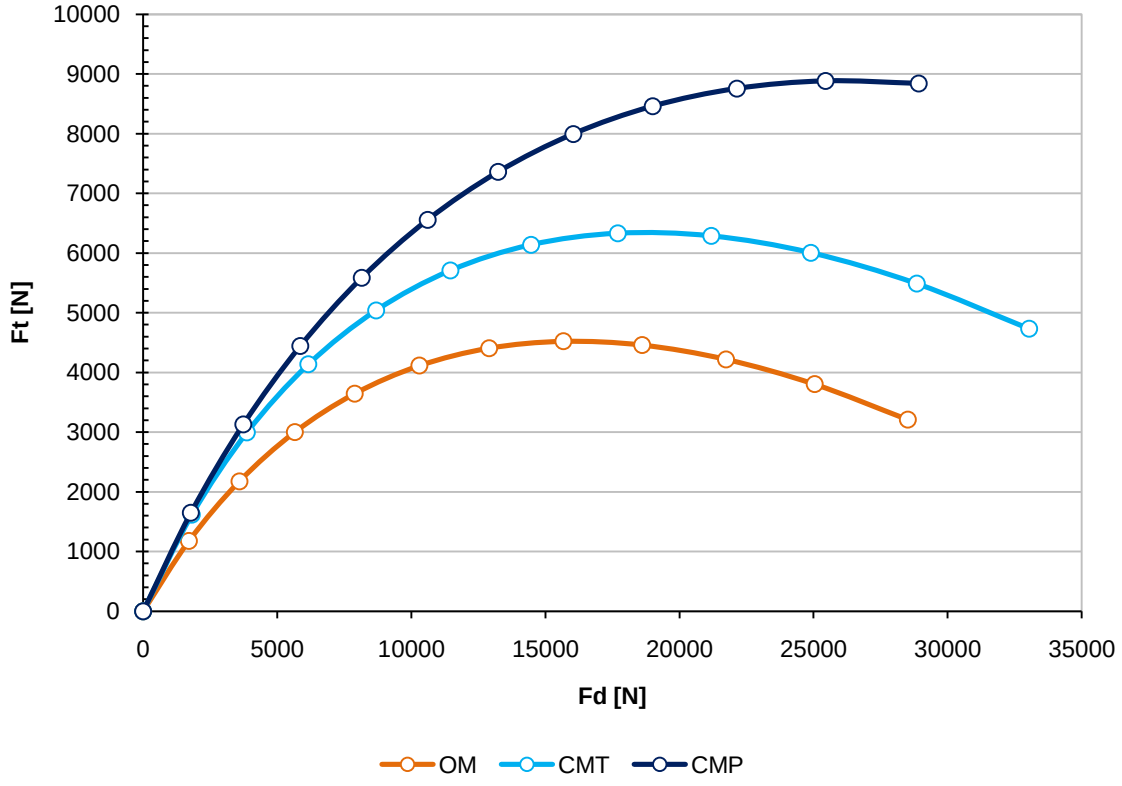


Gráfico 8.1. Curvas de equiadherencia del modelo 3.5 t. de la gama FB

Lo ideal, es frenar sobre las curvas para aprovechar la máxima adherencia sin deslizar; de lo contrario, podría producirse inestabilidad en el vehículo.

Considerando como hipótesis que el punto de aplicación horizontal de la carga máxima es el mismo para los dos casos diferenciados, la curva de equiadherencia cuando la carga está uniformemente repartida en la totalidad de la caja es inferior a la curva de equiadherencia cuando la carga se coloca según la metodología actual en pista. De lo que se deduce que, para una posición del centro de gravedad acorde con las condiciones de carga reales, se necesita un sistema de frenos de menores dimensiones, siendo su rango de actuación las situaciones entre las curvas de OM y CMT. Con los valores en pista sería necesario unos frenos de mayor capacidad y un diseño que produciría inestabilidad en el vehículo.

8.3.2. Rectas de isoadherencia

Las rectas de isoadherencia del eje trasero y del eje delantero indican el valor máximo de adherencia para cada uno de los ejes. Se utilizan unos parámetros k_t y k_d que representan la fuerza utilizada en la frenada, cuyos valores varían entre 0 y 1.

$$F_t = F_d\left(\frac{L_{101}}{k_d \cdot h_{CdG}} - 1\right) - \frac{mg\,L_2}{h_{CdG}} \qquad \text{(Ec. 8.30)}$$

$$F_d = -F_t\left(\frac{L_{101}}{k_t \cdot h_{CdG}} + 1\right) + \frac{mg\,L_1}{h_{CdG}} \qquad \text{(Ec. 8.31)}$$

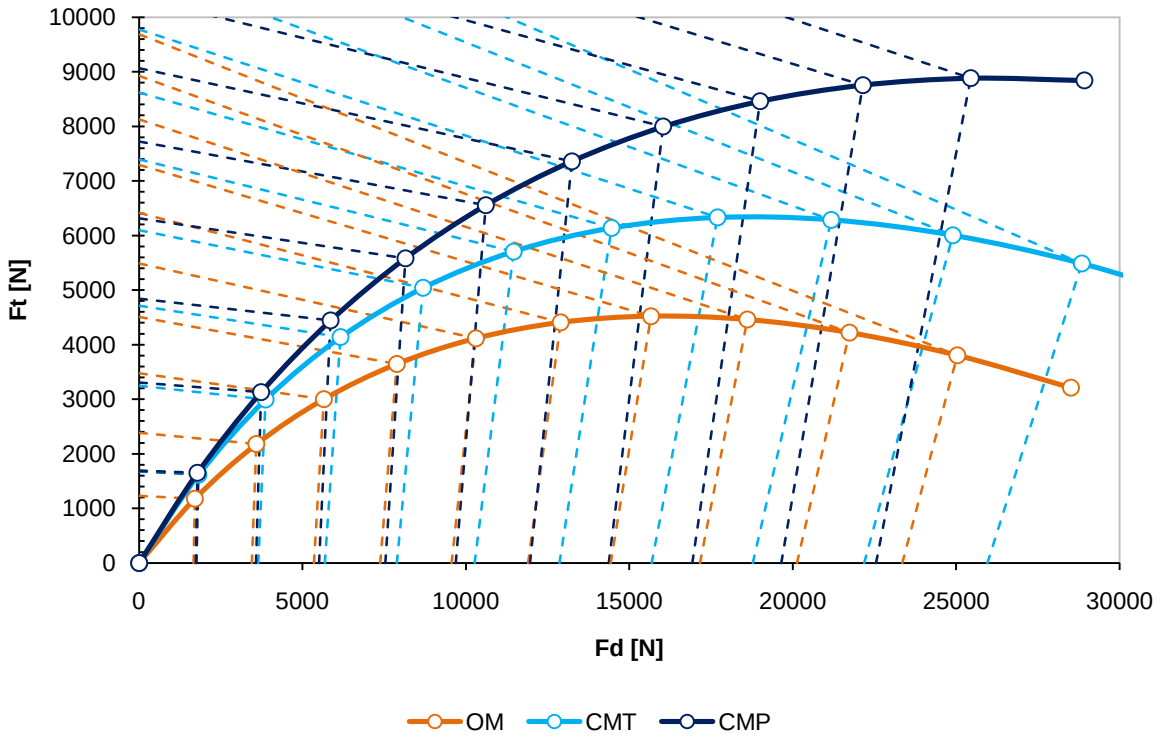


Gráfico 8.2. Rectas de isoadherencia del modelo 3.5 t. de la gama FB

En los puntos de intersección de las rectas de isoadherencia con las curvas de equiadherencia se cumple que:

$$k_d = k_t = \mu_c = \frac{a}{g} \qquad \text{(Ec. 8.32)}$$

8.4. Distribución real de la fuerza de frenado

8.4.1. Dimensionado y diseño de los frenos

Los dos modelos que se estudian constan de dos ejes y, aunque algunas versiones puedan montar ruedas gemelas en el eje trasero, el número de ruedas que frenan son dos en el eje delantero y dos en el eje posterior.

Los dos modelos incorporan freno de disco, tanto delante como detrás.

Características de los neumáticos

De los neumáticos se conoce **[1]**:

- El ancho del neumático,
- La relación de aspecto,
- El diámetro de la llanta,
- El índice de carga,
- El índice de velocidad.

A partir de la siguiente expresión se encuentra la altura del perfil:

$$\frac{altuta\ \ perfil}{anc\,ho\ neum\ ático} \cdot 100 = relación\ aspecto \qquad \text{(Ec. 8.33)}$$

Se calcula también el radio estático y dinámico del neumático:

$$r_s = altuta\ perfil + \left(\frac{D_{ll}}{2}\right) \cdot 25.4 \qquad \text{(Ec. 8.34)}$$

$$r_r = 3 \cdot \left(\frac{r_s}{\pi}\right) \qquad \text{(Ec. 8.35)}$$

Eje delantero

- Se elige el diámetro del disco delantero de forma coherente con la llanta.

- En las ruedas delanteras de los dos modelos van actuar dos pistones.

$$altura\ pastilla\ = \% \cdot r_{disco} \qquad \text{(Ec. 8.36)}$$

$$d_d = altura\ pastilla - 3 \cdot 2 \qquad \text{(Ec. 8.37)}$$

$$S_d = n^{\underline{o}} pistones \cdot \pi \cdot \frac{(d_d)^2}{4} \qquad \text{(Ec. 8.38)}$$

- Calcular el radio equivalente:

$$r_{ed} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{{r_{ext}}^3 - {r_{int}}^3}{{r_{ext}}^2 - {r_{int}}^2}\right) \qquad \text{(Ec. 8.39)}$$

$$r_{ext} = r_{disco}$$

$$r_{int} = r_{ext} - altura\ pastilla$$

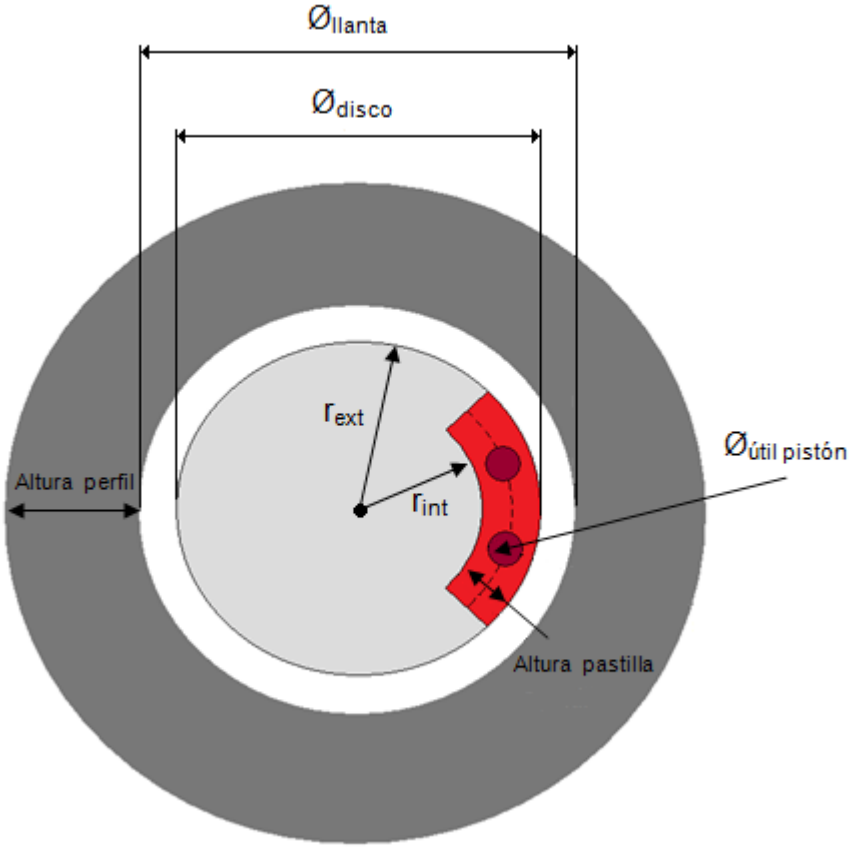


Fig. 8.5. Partes principales que forman un neumático

Eje trasero

- Debido a que la mayor capacidad de frenado se hace en el eje delantero, para el eje trasero se elige un diámetro de disco menor.

- En las ruedas traseras de la gama FB van a actuar dos pistones, mientras que para la gama FA, al necesitar menor capacidad de frenado, va a actuar un solo pistón.

- Para compensar el eje trasero de la gama FA se pondrán pastillas más grandes.

		Eje delantero [mm]			Eje trasero [mm]		
Gama	MMA [t]	D_d	Altura pastilla	r_{ed}	D_t	Altura pastilla	r_{et}
FB	3.5	13	66	135	12	53	128

Tabla 8.2. Dimensiones del sistema de frenos del modelo 3.5 t. de la gama FB

8.4.2. Fuerzas de frenado generadas

$$F_t = K_t \cdot p_t \qquad \text{(Ec. 8.40)}$$

$$F_d = K_d \cdot p_d \qquad \text{(Ec. 8.41)}$$

p es la presión del circuito hidráulico y K_t y K_d son constantes que dependen de los parámetros dimensionales y del rendimiento de los elementos que forman el conjunto disco, pastilla y pistón.

$$K_t = S_t \cdot \eta_t \cdot {C_t}^* \cdot \frac{r_{et}}{r_r} \qquad \text{(Ec. 8.42)}$$

$$K_d = S_d \cdot \eta_d \cdot {C_d}^* \cdot \frac{r_{ed}}{r_\mathrm{r}} \qquad \text{(Ec. 8.43)}$$

Fuerza de frenado generada en el eje trasero y en el eje delantero:

$$F_t = n^o{}_{ruedas} \cdot p_t \cdot S_t \cdot \eta_t \cdot {C_t}^* \cdot \frac{r_{et}}{r_r} \qquad \text{(Ec. 8.44)}$$

$$F_d = n^o{}_{ruedas} \cdot p_d \cdot S_d \cdot \eta_d \cdot {C_d}^* \cdot \frac{r_{ed}}{r_\mathrm{r}} \qquad \text{(Ec. 8.45)}$$

8.4.3. Recta de frenado

A partir de las fuerzas de frenado generadas, se obtiene la pendiente de la recta de frenado.

$$K_{frenada} = \frac{F_t}{F_d} \qquad \text{(Ec. 8.46)}$$

Con las curvas de equiadherencia y la recta de frenado, se obtiene el punto de deceleración μ_c en OM, en CMT y en CMP.

$$K_{frenada} = \frac{F_t}{F_d} = \frac{L_1 - h_{CdG} \cdot \mu_c}{L_2 + h_{CdG} \cdot \mu_c} \qquad \text{(Ec. 8.47)}$$

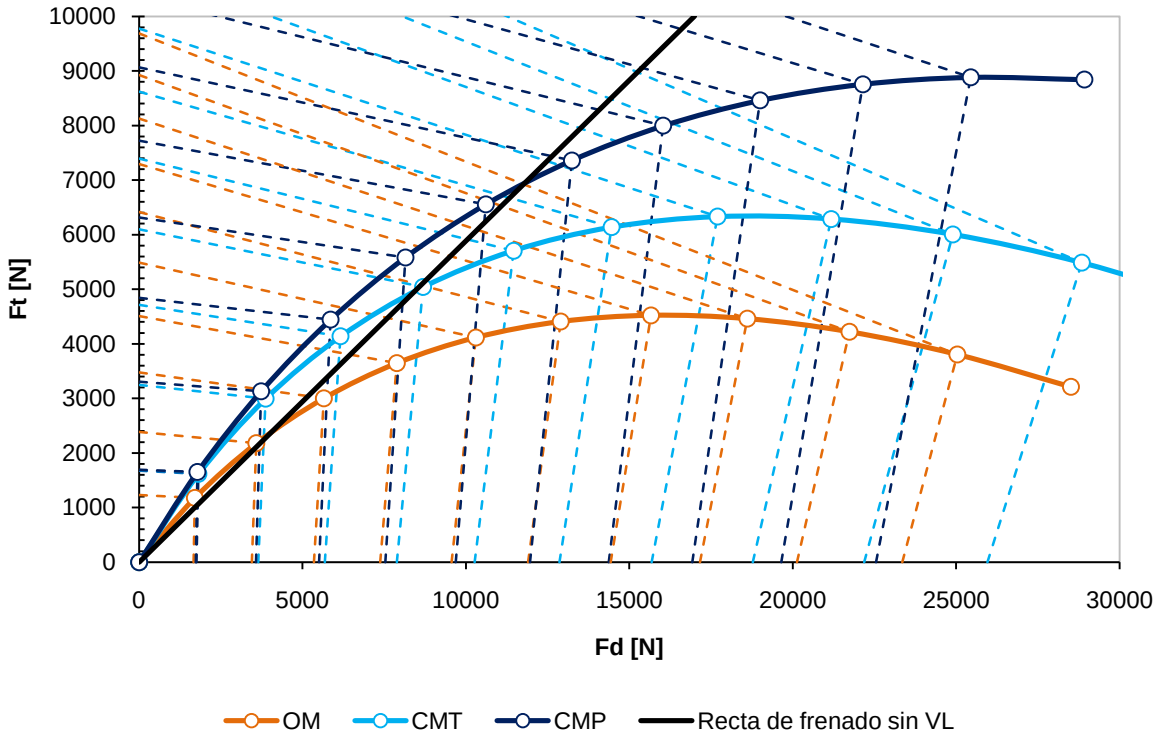


Gráfico 8.3. Recta de frenado del modelo 3.5 t. de la gama FB

8.5. Incorporación de la válvula limitadora

La recta de frenado se aleja mucho de la curva ideal de equiadherencia. Por este motivo, para mejorar el comportamiento del sistema, se incorpora una válvula limitadora en los frenos traseros. De esta forma, se aprovecha parte del área comprendida entre la curva de equiadherencia y la recta de frenado.

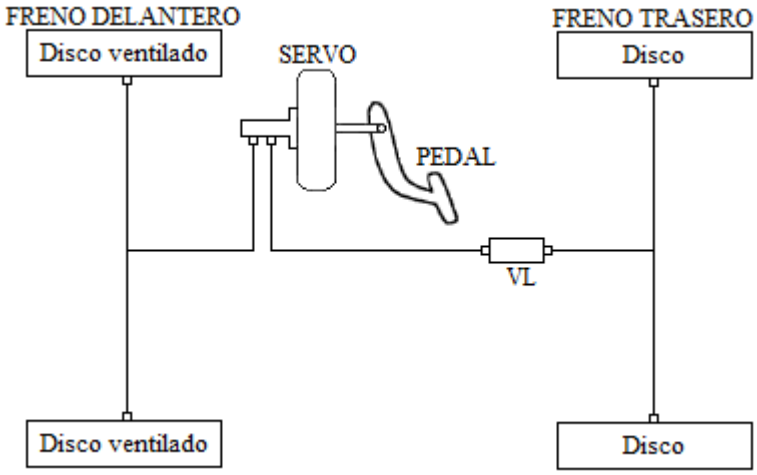


Fig. 8.6. Sistema de frenos con incorporación de la válvula limitadora

Se tendrá que decidir dónde se hace el cambio de pendiente de esta válvula para aprovechar al máximo la capacidad de frenado.

La *directiva 98/12/CE del 7/4/1998 relativa al frenado de vehículos de dos ejes,* prohíbe acodar por encima de la curva de equiadherencia, por posible bloqueo del eje trasero y el riesgo de producirse sobreviraje.

8.5.1. Situación en orden de marcha (OM)

A partir de una presión de corte p_c y de las ecuaciones obtenidas anteriormente se obtiene $F_{t\,VL,OM}$ y $F_{d\,VL,OM}$, que es el punto de acodamiento de la válvula limitadora.

$$F_{t\,VL,OM} = 2 \cdot p_c \cdot S_t \cdot \eta_t \cdot C_t{}^* \cdot \frac{r_{et}}{r_r} \qquad \text{(Ec. 8.48)}$$

$$F_{d\,VL,OM} = 2 \cdot p_c \cdot S_d \cdot \eta_d \cdot C_d{}^* \cdot \frac{r_{ed}}{r_r} \qquad \text{(Ec. 8.49)}$$

$$F_{t\,VL,OM} + F_{d\,VL,OM} = masa \cdot a \qquad \text{(Ec. 8.50)}$$

El límite de la válvula limitadora $F_{d\,OM}$ y $F_{t\,OM}$ es la intersección de la recta de frenado cuando actúa la válvula limitadora con la curva de equiadherencia.

$$F_{d\,OM} = \mu_c \frac{masa \cdot g}{L_{101}} (L_2 + h_{CdG\,OM} \cdot \mu_c) \qquad \text{(Ec. 8.51)}$$

$$F_{t\,OM} = \mu_c \frac{masa \cdot g}{L_{101}} (L_1 - h_{CdG\,OM} \cdot \mu_c) \qquad \text{(Ec. 8.52)}$$

Las alturas del CdG son las calculadas en el apartado 6.

Y de las ecuaciones siguientes se obtiene $p_{d\ OM}$ y $p_{t\ OM}$.

$$F_{d\ OM} = 2 \cdot p_{d\ OM} \cdot S_d \cdot \eta_d \cdot C_d{}^* \cdot \frac{r_{ed}}{r_r} \quad \text{(Ec. 8.53)}$$

$$F_{t\ OM} = 2 \cdot p_{t\ OM} \cdot S_t \cdot \eta_t \cdot C_t{}^* \cdot \frac{r_{et}}{r_r} \quad \text{(Ec. 8.54)}$$

8.5.2. Situación en carga máxima (CM)

Para el caso de CMT, se parte de una deceleración, que se impone a partir de la deceleración obtenida entre la recta de frenado y la curva de equiadherncia μ_{CMT}.

Por seguridad, el valor de μ_c que se elige para hacer el corte es ligeramente inferior a μ_{CMT}.

Del sistema de ecuaciones se obtiene $F_{t\ VL,CMT}$ y $F_{d\ VL,CMT}$ que es el punto de acodamiento.

$$F_{t\ VL,CMT} = K_{frenada} \cdot F_{d\ VL,CMT} \quad \text{(Ec. 8.55)}$$

$$F_{t\ VL,CMT} + F_{d\ VL,CMT} = masa \cdot a \quad \text{(Ec. 8.56)}$$

$$a = \mu_{CMT} \cdot g \quad \text{(Ec. 8.57)}$$

Se calcula la presión de corte, que en este caso es la misma para los dos ejes.

$$p_c = \frac{F_{d\ VL,CMT}}{2 \cdot S_d \cdot \eta_d \cdot C_d{}^* \cdot \frac{r_{ed}}{r_r}} = \frac{F_{t\ VL,CMT}}{2 \cdot S_t \cdot \eta_t \cdot C_t{}^* \cdot \frac{r_{et}}{r_r}} \quad \text{(Ec. 8.58)}$$

El límite de la válvula limitadora $F_{t\ CMT}$ y $F_{d\ CMT}$, es la intersección de la recta de frenado cuando actúa la válvula limitadora con la curva de equiadherencia.

Recta de regulación actuando la válvula limitadora:

$$F_{t\ CMT} = i_v \cdot K_{frenada} \cdot F_{d\ CMT} + (1 - i_v) \cdot F_{t\ VL,CMT} \quad \text{(Ec. 8.59)}$$

$$i_v = \frac{p_{t\ OM} - p_c}{p_{d\ OM} - p_c} \quad \text{(Ec. 8.60)}$$

$$F_{t\ CMT} = \mu_c \frac{masa \cdot g}{L_{101}} (L_1 - h_{CdG\ CMT} \cdot \mu_c) \quad \text{(Ec. 8.61)}$$

$$F_{d\ CMT} = \mu_c \frac{masa \cdot g}{L_{101}} (L_2 + h_{CdG\ CMT} \cdot \mu_c) \quad \text{(Ec. 8.62)}$$

Para el caso de CMP, el procedimiento es exactamente igual a CMT, pero modificando la deceleración de partida, y la altura del centro de gravedad.

$$F_{t\ CM} = \mu_c \frac{masa \cdot g}{L_{101}} (L_1 - h_{CdG\ CMP} \cdot \mu_c) \qquad \text{(Ec. 8.63)}$$

$$F_{d\ CM} = \mu_c \frac{masa \cdot g}{L_{101}} (L_2 + h_{CdG\ CMP} \cdot \mu_c) \qquad \text{(Ec. 8.64)}$$

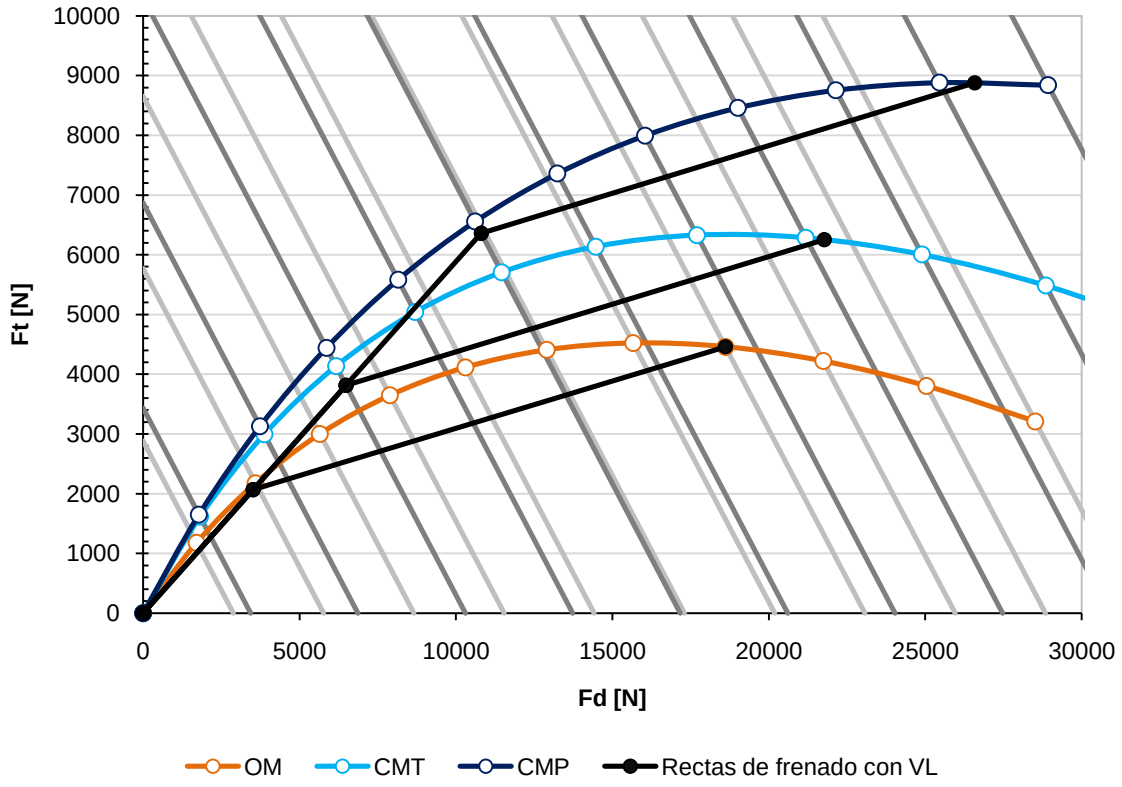


Gráfico 8.4. Rectas de frenado con actuación de la V.L del modelo 3.5 t. de la gama FB

En el Grafico 8.4 se observa que la incorporación de la válvula permite variar la recta de frenado, obteniendo deceleraciones mayores. Se diseña de forma que, si falla, se pueda obtener la deceleración mínima de 0,15g que exige la *directiva 98/12/CE del 7/4/1998 relativa al frenado de vehículos de dos ejes.*

En el Anexo B se adjuntan los gráficos obtenidos de las curvas y rectas de frenado de los camiones de las gamas FA y FB con las diferentes MMA que pueden adoptar.

La Tabla 8.3 muestra los puntos de corte de la válvula limitadora y la deceleración máxima que se obtiene.

			OM			CMT			CMP		
	MMA [toneladas]	$K_{frenada}$	$\mu_{c\ OM}$	p_c [bar]	μ_{VL}	$\mu_{c\ CMT}$	μ_c	μ_{VL}	$\mu_{c\ CMP}$	μ_c	μ_{VL}
Gama FA LC = 3720mm	2.8	0,45	0,22	10	0,9	0,54	0,4	0,85	0,75	0,7	0,96
	3.2	0,45	0,22	10	0,9	0,61	0,5	0,80	0,87	0,8	1,03
	3.4	0,45	0,23	10	0,9	0,64	0,5	0,83	0,92	0,9	0,98
	3.5	0,45	0,24	10	0,9	0,65	0,5	0,84	0,95	0,9	1,04
	4.5	0,48	0,28	9	0,9	0,70	0,6	0,81	1,07	1	1,16
Gama FB LC = 4300mm	3.5	0,59	0,22	10	0,8	0,39	0,3	0,82	0,55	0,5	1,03
	5.6	0,59	0,25	10	0,8	0,63	0,5	0,85	0,93	0,9	1,02
	7.0	0,61	0,24	10	0,8	0,58	0,4	0,88	0,82	0,8	0,92
	8.0	0,61	0,24	10	0,8	0,60	0,6	0,58	0,85	0,8	0,96
	9.5	0,53	0,25	10	0,8	0,68	0,6	0,81	0,96	0,9	1,07

Tabla 8.3. Acodamiento de la válvula limitadora

Estimando que la posición horizontal del CdG para los dos casos de carga máxima diferenciados CMT y CMP es la misma, la única diferencia entre las curvas de equiadherencia es la altura del CdG del vehículo.

Ensayando con el método actual, la recta de frenado se acoda a una deceleración superior, obteniendo una deceleración máxima de aproximadamente 1g frente a 0,8g que, según la *directiva 98/12/CE,* es la deceleración mínima que el vehículo carrozado tiene que garantizar para cualquier situación de carga.

Considerando que el bloqueo del eje trasero produce inestabilidad direccional (sobreviraje), mientras que el bloqueo del eje delantero solo origina una cierta pérdida direccional (subviraje), siendo una situación menos peligrosa y más fácil de controlar, la actuación del sistema de frenos deberá proporcionar valores de distribución situados por debajo de la curva de equiadherencia.

9. Determinación de la altura máxima del CdG teórico para evitar el vuelco

Hipótesis para realizar los cálculos:

- Se considera una situación límite donde las ruedas interiores a la curva tienen una reacción nula.
- La norma *ISO 16333 y reglamento 111 de la Unión Europea* indica que el vehículo carrozado tiene que mantenerse sin volcar en una superficie inclinada de 23º, que equivale a coger una curva con aceleración transversal de 0,4g.
- Se considera el sistema de suspensión rígido.
- El ancho de vía utilizado es la media de los dos ejes. En caso de ruedas gemelas, el ancho de vía del eje posterior es la distancia hasta la mitad del conjunto de ambas ruedas.
- El camión es simétrico respecto a un plano de simetría vertical, por lo tanto, el centro de gravedad está situado en (AVM)/2 y a una altura determinada.

$$AVM = \left(\frac{VD+VT}{2}\right) \qquad \text{(Ec. 9.1)}$$

donde:

$AVM = ancho\ de\ vía\ medio,$

$VD = ancho\ de\ vía\ delantero,$

$VT = ancho\ de\ vía\ trasero.$

9.1. Altura máxima del CdG para evitar el vuelco

Fig. 9.1. Prueba de estabilidad al vuelco. Ángulo mínimo de 23º (INSIA)

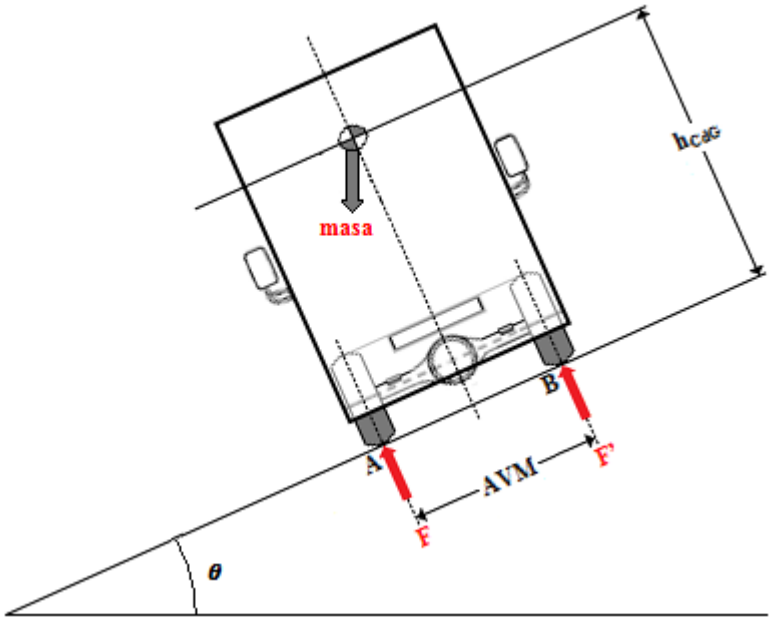


Fig. 9.2. Diagrama del sólido rígido del camión

$$\sum M_A = 0$$

$$\left(\frac{AVM}{2}\right) \cdot masa \cdot g \cdot cos\theta - h_{CdG,max} \cdot masa \cdot g \cdot sin\theta - (AVM) \cdot F' = 0 \qquad \text{(Ec. 9.2)}$$

Se sustituye $\theta = 23°$ y $F' = 0$ en la ecuación Ec .9.2 y se obtiene $h_{CdG\ max}$.

$$\left(\frac{AVM}{2}\right) \cdot cos\theta = h_{CdG\ max} \cdot sin\theta \qquad \text{(Ec. 9.3)}$$

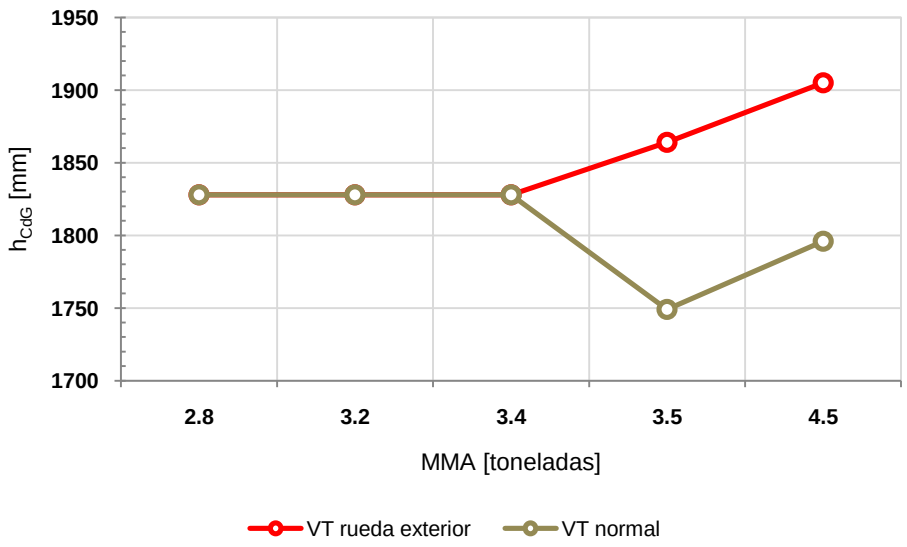
9.1.1. Ángulo de inclinación máximo de la calzada

A partir de las h_{cdg} en OM, CMT y CMP calculadas en los apartados 5 y 6, y con $F' = 0$, despejando la ecuación Ec. 9.2, se obtiene el ángulo θ de inclinación de la plataforma para cada situación de carga.

$$tg\theta = \left(\frac{AVM}{2 \cdot h_{CdG}}\right) \qquad \text{(Ec. 9.4)}$$

9.2. Resultados obtenidos

El Gráfico 9.1 muestra las alturas del CdG máximas para evitar el vuelco de los camiones de la gama FA para cualquier tipo de carrocería.



MMA [kg]	2.8	3.2	3.4	3.5	4.5
h_{CdG} [mm]	1828	1828	1828	1864	1905
h_{CdG} [mm]	1828	1828	1828	1749	1796

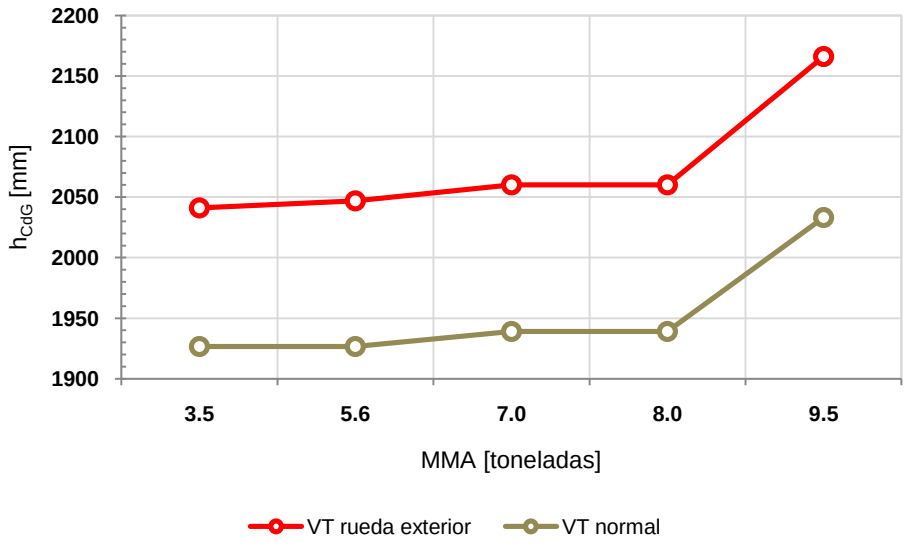
Gráfico 9.1. Altura máxima del CdG para evitar el vuelco de la gama FA

Los anchos de vía se pueden ver en la Fig. 4.3 de la página 18.

La línea marrón corresponde a la máxima altura del CdG del camión carrozado en función de las diferentes MMA. Se ha cogido como ancho de vía trasero la distancia al centro del conjunto de las ruedas gemelas.

En el caso de la línea roja se ha cogido como ancho de vía trasero la distancia al centro del neumático exterior.

El Gráfico 9.2 muestra las alturas del CdG máximas para evitar el vuelco de los camiones de la gama FB para cualquier tipo de carrocería.



MMA [kg]	3.5	5.6	7.0	8.0	9.5
h_{CdG} [mm]	2041	2047	2060	2060	2166
h_{CdG} [mm]	1927	1927	1939	1939	2033

Gráfico 9.2. Altura máxima del CdG para evitar el vuelco de la gama FB

Los anchos de vía se pueden ver en la Fig. 4.5 de la página 19.

En los cálculos, por cuestiones geométricas, se obtiene que, un camión con ruedas gemelas es más propenso al vuelco que el mismo camión con rueda simple. Esto es debido a que se coge el ancho de vía trasero como la distancia entre centros de neumáticos o conjunto de neumáticos. Por lo tanto, cuanto mayor sea el ancho del neumático o del conjunto de los neumáticos, menor será el ancho de vía trasero, con la influencia en los cálculos en caso de vuelco.

Para tener que realizar menos cálculos para las condiciones extremas de carga se debería ensayar en pista, teniendo en cuenta la superficie de contacto entre suelo y neumático y la adherencia del mismo.

		h_{CdG} máx [mm]	Ángulo máximo de inclinación		
	MMA [toneladas]	θ=23°, a=0,4g	θ OM	θ CMT	θ CMP
Gama FA LC = 3720mm	2.8	1828	50	39	48
	3.2	1828	50	35	45
	3.4	1828	50	34	45
	3.5	1749	48	33	43
	4.5	1796	49	30	42
Gama FB LC = 4300mm	3.5	1927	40	37	46
	5.6	1927	40	31	42
	7.0	1939	41	32	42
	8.0	1939	40	30	40
	9.5	2033	41	31	40

Tabla 9.1. h_{CdG} máxima y ángulo máximo de inclinación

10. Diseño de sistemas y metodología de carga para evaluar el comportamiento del vehículo en condiciones reales de carga

En los apartados anteriores se ha demostrado que se ensaya de una forma diferente a las condiciones de carga reales de un camión, obteniendo resultados que no se ajustan a la realidad.

A continuación se detallan posibles formas y metodologías de cargar los camiones para elevar el CdG y obtener resultados más precisos en las diferentes pruebas de estabilidad y de la dinámica de frenos.

10.1. Propuesta para la gama de camiones FA

Para la gama de camiones FA, se propone un sistema de carga en contenedores normalizados, que se colocarán dentro de una caja abierta.

Partiendo de la anchura de la caja que pueden incorporar estos modelos, se seleccionará el tipo de contenedor.

	CAJA	
	A	B
Longitud exterior [mm]	2950	3720
Longitud interior [mm]	2890	3660
Anchura exterior [mm]	2100	2100
Anchura interior [mm]	2040	2040
Superficie [m^2]	5,9	7,5
Masa [kg]	274	337

Tabla 10.1. Características de las cajas abiertas

Contenedor Magnum		
Medidas exteriores [mm]	Longitud	1200
	Anchura	1000
	Altura	975
Medidas interiores [mm]	Longitud	1120
	Anchura	920
	Altura	792
	Masa [kg]	62
	Volumen [l]	816
	Carga máxima [kg]	500

Tabla 10.2. Características del contenedor

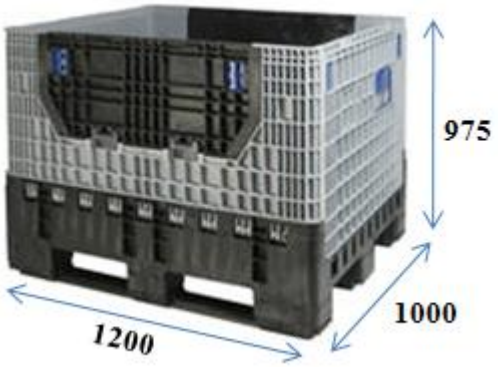


Fig. 10.1. Contenedor plegable de plástico

10.1.1. Procedimiento para cargar los contenedores

Sabiendo que la anchura interior de las dos cajas es 2040 mm y la anchura exterior del contenedor es 1000 mm, éstos se colocarán en grupos de dos, de forma que, la holgura entre los contenedores y la caja por cada lado sea de 20 mm. Este espacio se emplea para poder realizar las maniobras de carga y descarga, y abrir y cerrar de forma correcta las puertas abatibles laterales de la caja abierta.

$$masa\ total_{contenedores} = masa_{contenedor} \cdot n^{\underline{o}}\ contenedores$$

$$n^{\underline{o}}{}_{contenedores\ \ longitudinales} = \frac{longitud\ interior_{caja}}{longitud\ exterior_{contendor}}$$

De esta forma, el número de contenedores dentro de la caja será de 8 y 12 para la caja A y B, respectivamente.

$$masa_{a\ cargar\ \ en\ cont.} = masa_{carga\ \ útil\ camión} - masa_{caja} - masa_{cont.\ vacíos}$$

$$masa_{a\ cargar\ \ en\ cada\ cont.} = \frac{masa_{a\ cargar\ \ en\ cont.}}{nº\ contenedores\ totales}$$

	CAJA A					CAJA B				
	2.8	3.2	3.4	3.5	4.5	2.8	3.2	3.4	3.5	4.5
Carga útil del camión [kg]	1095	1495	1702	1770	2684	1065	1465	1672	1750	2664
Masa caja [kg]	274					337				
Número contenedores	8					12				
Disposición contenedores	4 en la base x 2 pisos					6 en la base x 2 pisos				
Masa contenedores vacíos [kg]	496					744				
Masa a cargar en contenedores [kg]	325	725	932	1000	1914	-16	384	591	669	1583
Masa por contenedor [kg]	41	91	117	125	239	-1	32	49	56	132

Tabla 10.3. Masa por contenedor en las cajas tipo A y tipo B

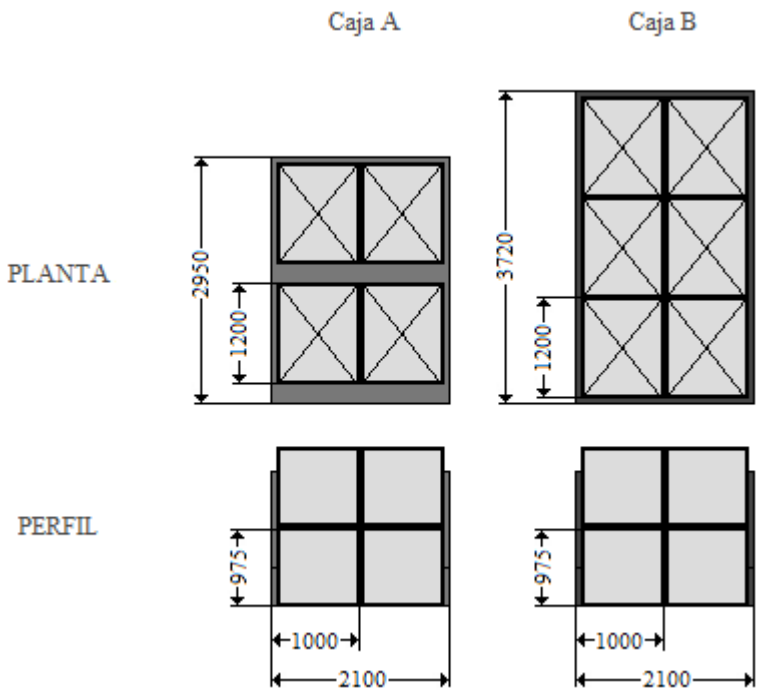


Fig. 10.2. Vista en planta y perfil de las cajas A y B con contenedores

Sabiendo la masa que le corresponde a cada contenedor, se rellenan con elementos de carga, que pueden ser muy diferentes en cuanto a material, masa, rigidez o volumen.

10.1.2. Metodología de carga de los contenedores con sacos de arena

Para la gama de camiones FA, se propone cargar los contenedores con sacos de arena.

Se elige esta opción, por ser un elemento de carga económico y fácil de colocar, con masas diferentes, muy útiles para combinarlos y conseguir la masa por contenedor que se desee.

Se construye una estructura de madera para ubicar en el interior del contenedor, que estará formada de compartimentos para poder colocar los sacos de arena de la Tabla 3.1, quedando bien sujetos y evitando que se produzcan desplazamientos al realizar pruebas dinámicas.

Los cálculos siguientes se aplican a una estructura de madera diseñada para ser rellenada con sacos de arena de 10 kg. El motivo de esta elección es debido a que los camiones FA con caja y contenedores tiene una carga útil muy pequeña, siendo los sacos de menor masa los más apropiados.

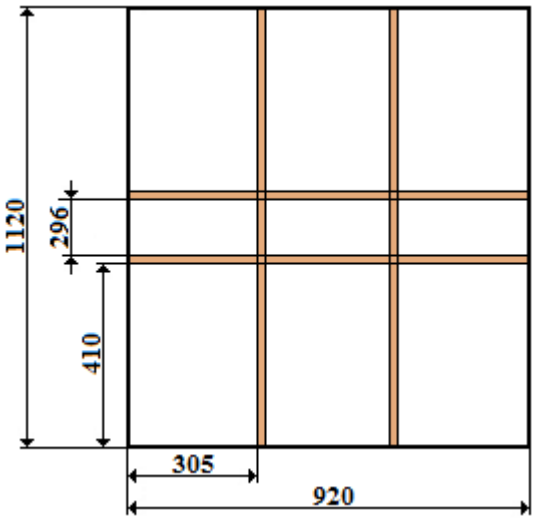


Fig. 10.3. Vista en planta de la estructura interna del contenedor

$$anchura\ compartimentos = \frac{anchura\ interior_{contenedor} - 2 \cdot 2}{3} = 305\ \mathrm{mm}$$

$$nº\ columnas\ de\ sacos = \frac{altura\ interior_{contenedor}}{110} = 7\ \mathrm{columnas}$$

El número total de sacos que se puede cargar en un contenedor:

$$máximo\ nº\ sacos = nº\ sacos\ base \cdot nº\ columnas\ de\ sacos = 6 \cdot 7 = 42\ sacos$$

La masa máxima que se puede cargar en un contenedor tiene que ser inferior a la carga máxima del contenedor.

$$\frac{masa\ máxima}{contenedor} = 42\ \frac{sacos}{contenedor} \cdot 10\ \frac{kg}{saco} = \frac{420\ kg}{contenedor}$$

$$\boldsymbol{\frac{420\ kg}{contenedor} + masa_{estructura\ interna} < \frac{500\ kg}{contenedor}}$$

donde,

$$masa_{estructura\ \ interna} = 45\ kg$$

Por lo tanto, la carga útil máxima que se puede llenar con este método es de:

$$carga\ útil_{máxima} = \left(\frac{masa\ máxima}{contenedor} + masa_{estructura\ \ interna}\right) \cdot\ nº\ contenedores$$

	CAJA	
	A	B
Carga útil máxima [kg]	3720	5580

Tabla 10.4. Carga útil máxima con sacos de arena

El número de sacos de 10 kg que se tienen que colocar en cada contenedor será:

$$masa_{a\ cargar\ \ en\ cada\ \ cont.}{}' = masa_{a\ cargar\ \ en\ cada\ \ cont.} - masa_{estructura\ \ interna}$$

$$\frac{nº\ sacos}{contenedor} = \frac{masa_{a\ cargar\ \ en\ cada\ \ cont.}{}'}{masa_{saco\ \ de\ arena}}$$

Se deberán repartir los sacos de manera que la masa quede uniformemente repartida.

En la Tabla 10.5 se muestra la metodología de cargar los contenedores con sacos de arena de 10 kg, para un camión concreto de la gama FA, con caja abierta tipo A de longitud exterior 2950 mm.

	CAJA A				
	2.8	**3.2**	**3.4**	**3.5**	**4.5**
Carga útil del camión [kg]	1095	1495	1702	1770	2684
Masa caja [kg]	274				
Número contenedores	8				
Disposición contenedores	4 en la base x 2 pisos				
Masa contenedores vacíos [kg]	496				
Masa a cargar en contenedores [kg]	325	725	932	1000	1914
Masa por contenedor [kg]	41	91	117	125	239
Masa estructura interna [kg]	45				
Masa por contenedor' [kg]	-4	46	72	80	194
Masa saco de arena [kg]	10				
Nº de sacos por contendor	**-0,4**	**4,6**	**7,2**	**8**	**19,4**

Tabla 10.5. Número de sacos en cada contenedor

Camión de la gama FA 2.8 t.

El número de sacos por contenedor es negativo, esto significa que con esta metodología se está rebasando la MMA del camión. Por consiguiente, se eliminarán algunas estructuras de los contenedores, de forma que no se supere la MMA y que requiera añadir el mínimo número de sacos posibles.

Si la masa de la estructura es de 45 kg y la masa total a cargar en los contenedores es 325 kg, se tendrán que poner 7 estructuras y dejar un contenedor vacío. Para llegar a la carga útil del camión, solamente se necesitaría un saco de 10 kg, que se pondría, por ejemplo, en el centro de uno de los contenedores con estructura. De esta forma, se consigue que la carga sea homogénea y uniformemente repartida y el CdG se aproxime al calculado en el apartado 6 del proyecto.

Camión de la gama FA 3.5 t.

Para este caso, el número de sacos por contenedor es positivo e igual a 8. Significa que, manteniendo la estructura interna de los 8 contenedores, se pueden añadir 8 sacos por contenedor, uno en cada hueco habilitado, quedando únicamente libre el hueco central.

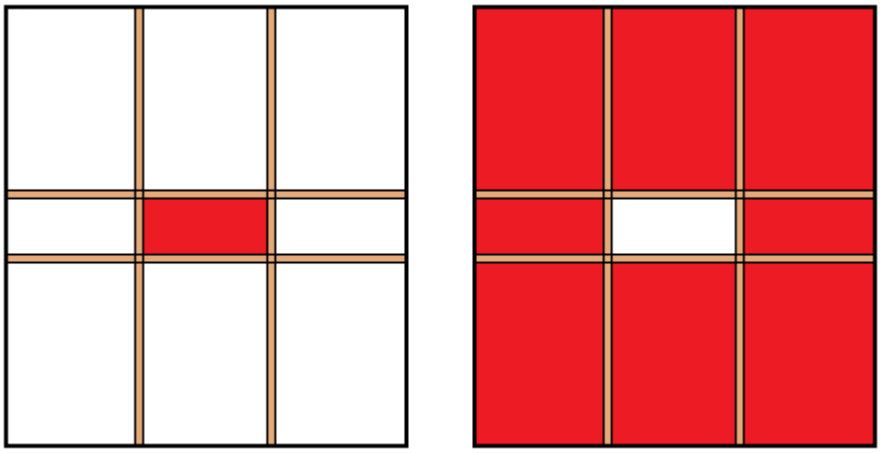


Fig. 10.5. Vista en planta del contenedor cargado

Fig. 10.4. Aspecto final de un camión de la gama FA para realizar ensayos

10.2. Propuesta para la gama de camiones FB

La gama de camiones FB tienen una capacidad de carga mayor que la gama FA, por lo que el sistema propuesto anteriormente, requiere una gran cantidad de sacos para llegar a la MMA. Aunque es viable para la mayoría de las variantes del camión FB porque la carga útil del camión es menor o igual a la que admite el sistema de sacos de arena dentro de contenedores, no es el método más adecuado.

Para los camiones FB, se propone:

- Para cargas útiles no muy elevadas, el método empleado en los camiones FA.

- Para carga útiles elevadas, un nuevo tipo de estructura de acero de dos niveles que permita utilizar los bloques de carga de la Tabla 3.1.

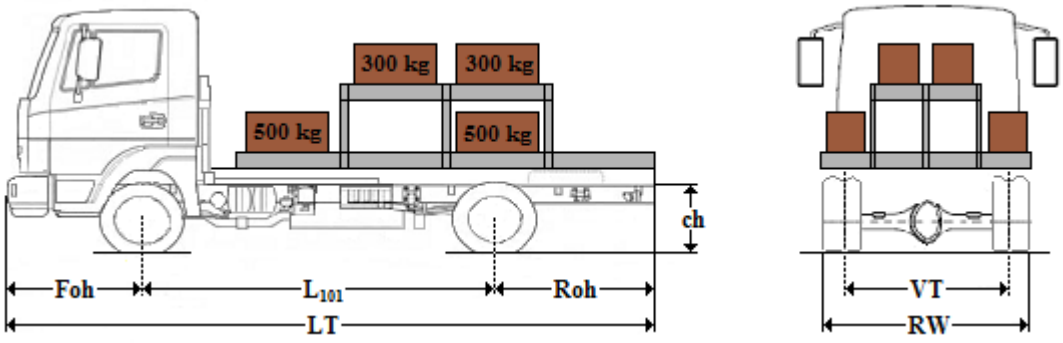


Fig. 10.6. Camión de la gama FB con estructura de carga en 3D

11. Diseño y análisis estructural de una estructura en dos niveles

Partiendo de las estructuras de acero disponibles actualmente, se modifica el diseño de forma que permita colocar elementos de carga a una altura superior. Con los resultados aproximados que se desea obtener de la altura del CdG del conjunto del vehículo, calculados en el apartado 6, se obtiene que la altura entre niveles debe ser de 1 m.

Para comprobar que la estructura propuesta soporta las cargas útiles de los camiones de la gama FB, se hace un estudio del diseño y del análisis estructural con la ayuda del programa SolidWorks.

Si la estructura 3D se diseña con 16 alojamientos habilitados y en cada uno se coloca un bloque de 1000 kg, se podrían colocar un máximo de 16000 kg. Sin embargo se limita a la carga útil máxima que pueden soportar los camiones de la gama FB.

El material seleccionado es un acero AISI 1020 de densidad 7900 kg/m^3, un límite elástico de 352 N/mm^2 y con la composición química de la Tabla 11.1. *(Facultad de Ciencias Físicas, Universidad de Chile).*

Acero	C	Mn	P	S
AISI 1020	0,18-0,23 %	0,30-0,60 %	0,04 % máx	0,05 % máx

Tabla 11.1. Composición del acero AISI 1020

Se realiza un diseño del modelo con perfiles normalizados ISO.

Perfil	**Dimensiones [mm]**
Viga SC	100 x 100
Canal C	160 x 18
Canal C	100 x 10
Ángulos iguales	80 x 80 x 10
Tubo cuadrado	100 x 100
Tubo cuadrado	60 x 60

Tabla 11.2. Perfiles ISO utilizados en el diseño de la estructura

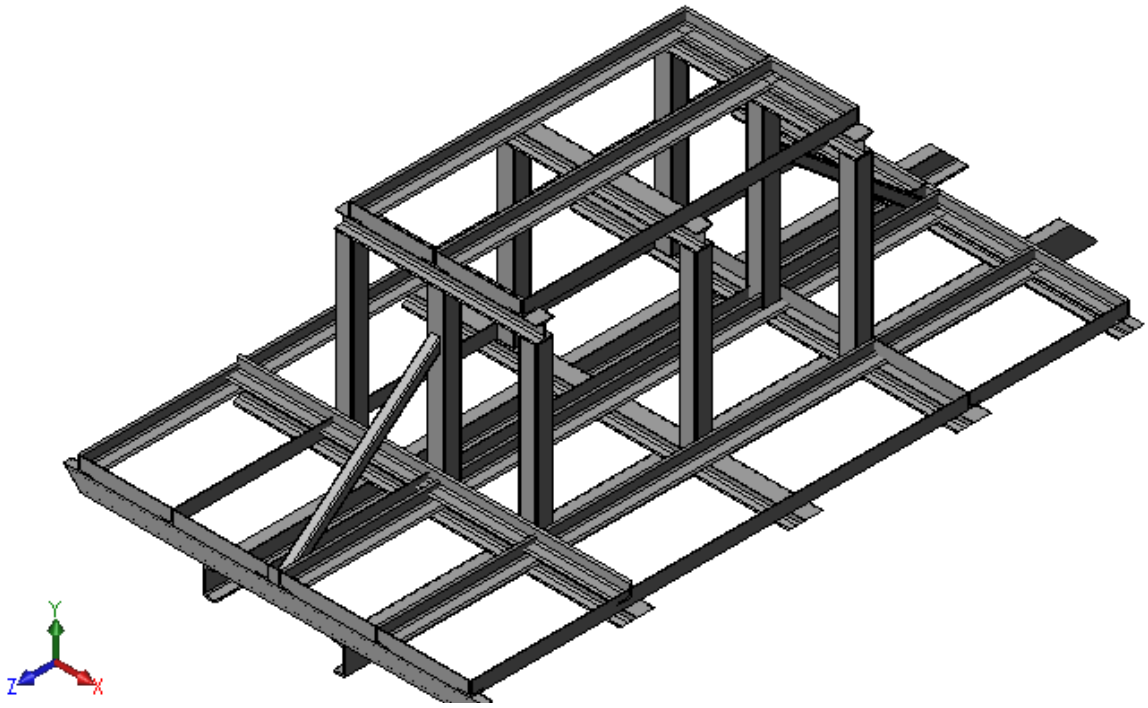


Fig. 11.1. Modelización de la estructura

Se restringe el movimiento de los dos largueros, que van fijados al chasis-cabina del camión y posteriormente se aplica una carga en las diferentes posiciones donde irán colocados los bloques.

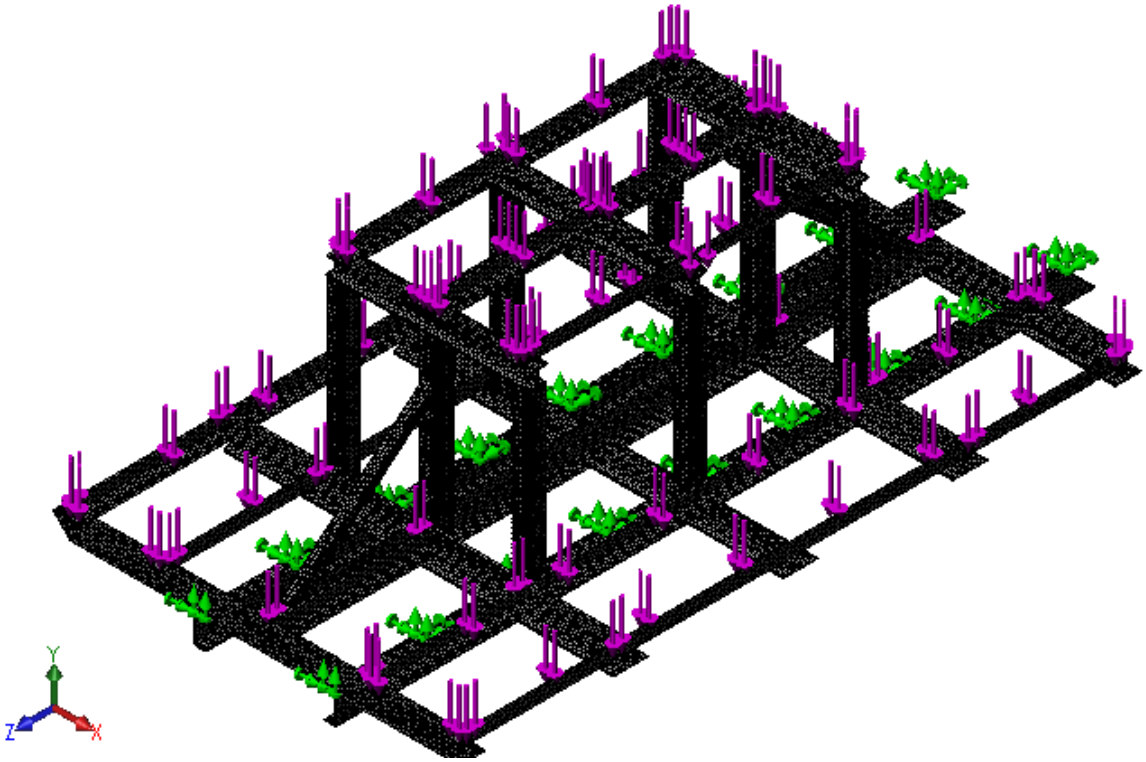


Fig. 11.2. Restricciones, cargas aplicadas y mallado

Se analizan las tensiones de Von Mises y los desplazamientos originados como consecuencia de aplicar una carga de 6000 kg, que corresponde a la carga útil máxima que permiten los camiones FB.

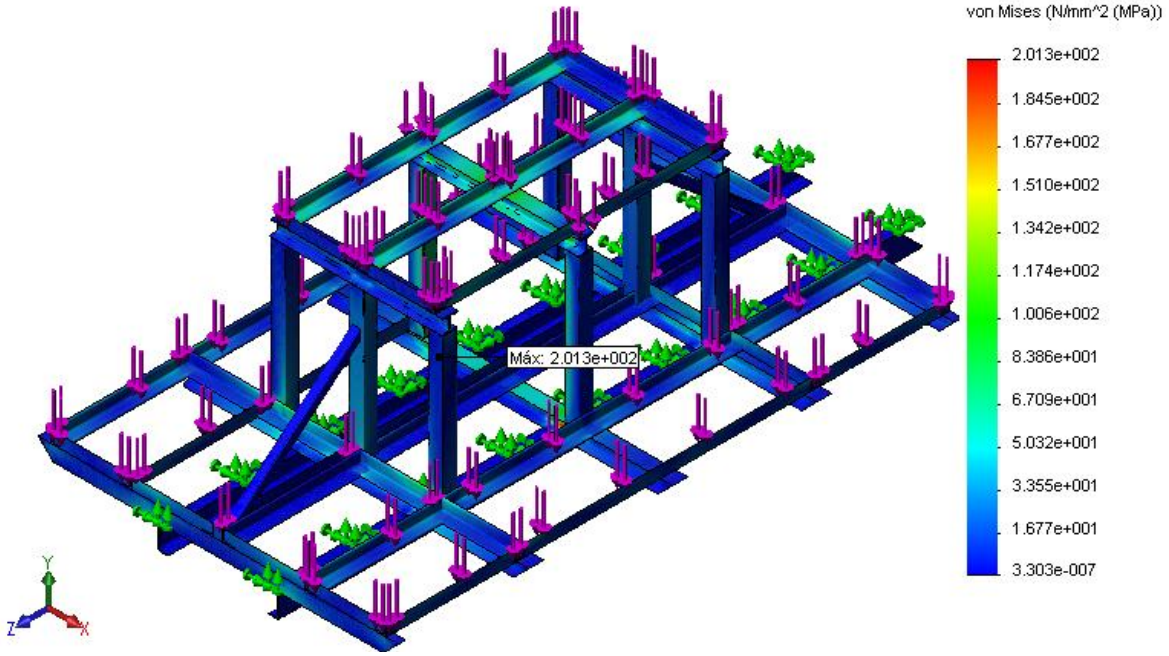


Fig. 11.3. Representación de las tensiones de Von Mises

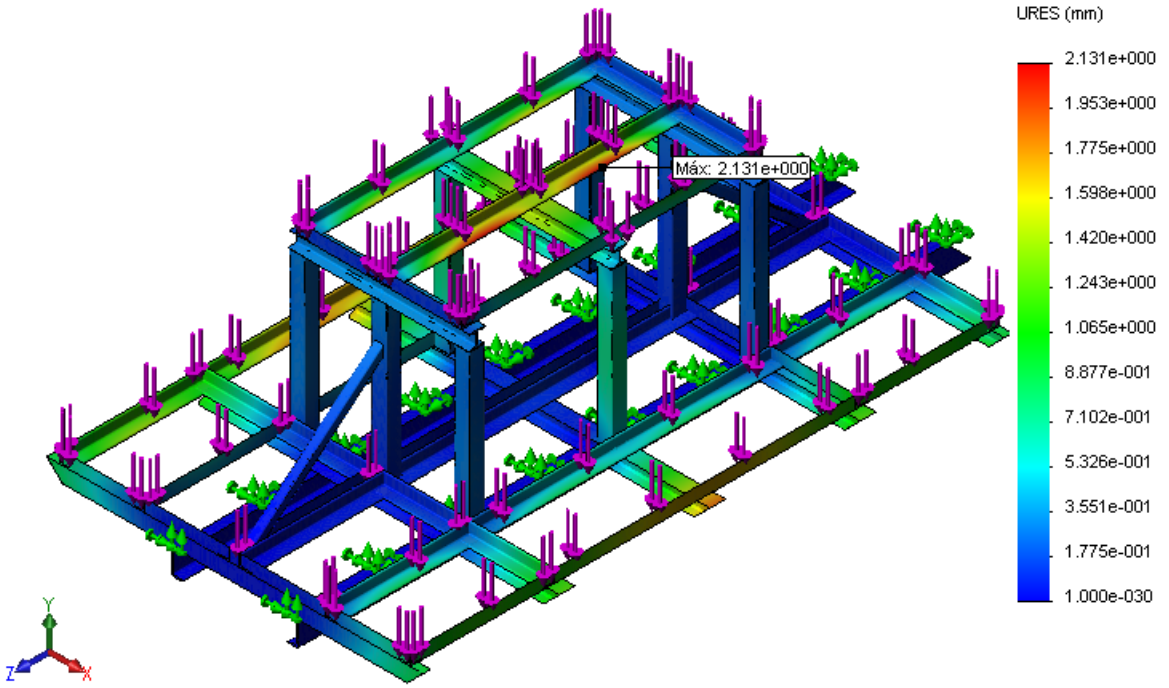


Fig. 11.4. Representación de los desplazamientos

En los análisis anteriores se comprueba que la estructura soporta una tensión máxima de 201 N/mm^2, inferior a los 352 N/mm^2 correspondientes a la tensión de límite elástico y que el desplazamiento máximo de 2,1 mm es poco significativo para las dimensiones y la finalidad de la estructura, por lo que se considera que el diseño es válido.

La Fig. 11.5 muestra una posible situación de carga de la estructura 3D con bloques de diferentes masas y dimensiones

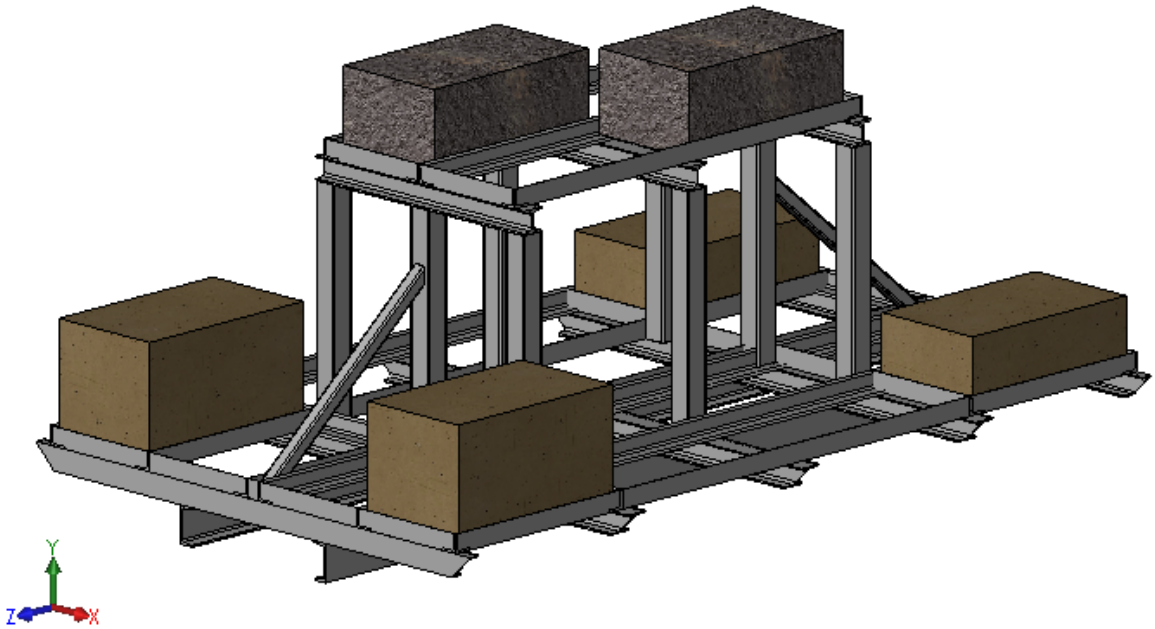


Fig. 11.5. Posible situación de carga para la estructura en dos niveles

12. CdG del vehículo con estructura de carga en dos niveles

Con la simulación del apartado 11 se obtiene la masa y la posición del CdG de la estructura 3D.

$masa_{estructura\ \ 3D} = 984\ \mathrm{kg}$

$h_{CdG\ estructura\ \ 3D} = 480\ \mathrm{mm}$

Con estos datos, se calcula la altura del CdG de los camiones FB y se compara con la altura actual que tienen estos camiones en las pistas de ensayos.

12.1. Procedimiento de cálculo

El objetivo es cargar la estructura con bloques, de forma que, la masa total sea lo más parecida a la carga útil del vehículo, y la altura del CdG lo más aproximada a la altura teórica obtenida en el apartado 6 del proyecto ($h_{CdG\ CMT}$).

Los bloques que se utilizan para cargar la estructura 3D son los de la Tabla 3.1.

$$carga\ útil_{camión\ con\ estructura\ \ 3D} = carga\ útil_{\ chasis} - masa_{\ estructura\ \ 3D\ sin\ bloques}$$

$$\sum masa_{\ bloques\ \ 1º\ nivel} + \sum masa_{\ bloques\ \ 2º\ nivel} \simeq carga\ útil_{camión\ con\ estructura\ \ 3D}$$

De los planos realizados de la estructura 3D (Anexo C) se sabe la altura de los dos niveles respecto al suelo. De esta forma, se encuentra la altura del CdG de los tres tipos de elementos de carga en las dos posiciones de altura posibles de colocación.

		h_{CdG} bloques respecto al suelo [mm]					
		1º nivel			2º nivel		
		300 kg	500 kg	1000 kg	300 kg	500 kg	1000 kg
Gama FB LC = 4300mm	3.5	1120	1220	1145	2220	2320	2245
	5.6	1120	1220	1145	2220	2320	2245
	7.0	1120	1220	1145	2220	2320	2245
	8.0	1170	1270	1195	2270	2370	2295
	9.5	1202	1302	1227	2302	2402	2327

Tabla 12.1. Altura del CdG de los bloques de carga

Se numeran los alojamientos habilitados para colocar elementos de carga. Las posiciones comprendidas entre 1 y 12 corresponden al primer nivel, mientras que las posiciones comprendidas entre 13 y 16 corresponden al segundo nivel.

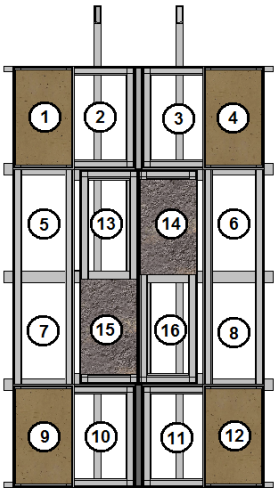


Fig. 12.1. Identificación de las posiciones de la estructura 3D

Combinando la masa de los bloques y la posición donde se colocan se obtiene la altura del CdG del conjunto de los bloques:

$$h_{CdG\ \ bloques} = \frac{(m_{b1} \cdot z_{b1} + \cdots + m_{b16} \cdot z_{b16})}{m_{b1} + \cdots + m_{b16}} \qquad \text{(Ec. 12.1)}$$

$m_{\ b1} = masa_{bloque\ \ posici\acute{o}n\ 1}$

$z_{\ b1} = h_{CdG\ bloque\ \ posici\acute{o}n\ 1}$

$m_{\ b16} = masa_{bloque\ \ posici\acute{o}n\ 16}$

$z_{\ b16} = h_{CdG\ bloque\ \ posici\acute{o}n\ 16}$

Finalmente se calcula la altura del CdG del vehículo con la estructura de acero en dos niveles respecto al suelo.

- Vehículo sin bloques:

$$h_{CdG\ vehículo} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2)}{m_1 + m_2} \qquad \text{(Ec. 12.2)}$$

- Vehículo con bloques:

$$h_{CdG\ vehículo} = \frac{(m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2 + m_3 \cdot z_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \qquad \text{(Ec. 12.3)}$$

donde:

$m_1 = TARA_{chasis}$

$z_1 = h_{CdG\ chasis}$

$m_2 = masa_{estructura\ \ 3D\ sin\ bloques}$

$z_2 = h_{CdG\ \ estructura\ \ 3D\ sin\ bloques}$

$m_3 = masa_{conjunto\ \ bloques}$

$z_3 = h_{CdG\ conjunto\ \ bloques}$

12.2. Resultados

Para la situación de carga del vehículo con estructura 3D planteada en la Tabla 12.2 se obtienen los resultados de la Tabla 12.3.

		Nº bloques 1º nivel			Nº bloques 2º nivel			Carga útil [kg]	∑ m bloques [kg]
		300 kg	500 kg	1000 kg	300 kg	500 kg	1000 kg		
Gama FB LC = 4300mm	3.5	0	0	0	0	1	0	426	500
	5.6	2	0	0	1	3	0	2471	2400
	7.0	0	2	0	0	4	0	3056	3000
	8.0	2	2	0	0	3	1	4056	4100
	9.5	0	4	0	0	2	2	5146	5000

Tabla 12.2. Distribución de los bloques en los dos niveles

		h_{CdG} del vehículo respecto al suelo [mm]		
		Actual en pista (CMP)	Teórico real (CMT)	Con estructura 3D
Gama FB LC = 4300mm	3.5	789	1105	1041
	5.6	910	1337	1343
	7.0	929	1316	1320
	8.0	985	1402	1390
	9.5	1041	1464	1452

Tabla 12.3. Altura del CdG según las condiciones de carga para la gama FB

Los valores de la altura del CdG obtenidos para la gama de camiones FB con la estructura 3D, no son iguales que los teóricos suponiendo que la carga está uniformemente repartida en todo el volumen de la caja (calculados en el apartado 6 del proyecto), pero sí muy similares, y muy alejados de los valores que se obtienen actualmente en pista de pruebas.

13. Impacto ambiental

Este proyecto, tal y como se expone en la página 11 de esta memoria, tiene como objetivos:

- Analizar la variabilidad de la posición del centro de gravedad de camiones comerciales ligeros.
- Comparar ambos resultados contemplando diferentes MMA y tipos de carrozado.
- Analizar la influencia de esta variabilidad en el comportamiento dinámico del vehículo.
- Y por último diseñar una metodología de carga para obtener posiciones del centro de gravedad más acordes con las condiciones de carga reales.

Como en ningún caso es objeto de este proyecto la materialización de elementos estructurales de soporte ni las operaciones mecánicas necesarias para su construcción, el impacto ambiental de este proyecto es el que se deriva de una Actividad de Oficina de Ingeniería.

Esta actividad genera residuos que son reciclables y reutilizables y de los cuales se encargaran los agentes autorizados legalmente para estos materiales.

14. Presupuesto

Según el precio por hora establecido por el colegio de Ingenieros Industriales y aplicando un 15% de beneficio industrial:

Personal de diseño y análisis			
Descripción	Horas	€/hora	Coste (€)
Estudio y diseño (Ingeniero Industrial)	850	40	34.000
Simulación (Ingeniero Industrial)	20	60	1.200
TOTAL			35.200

Gastos generales	
Descripción	Coste (€)
Ordenador portatil	800
Licencia SolidWorks	1.000
Visitas sector automoción	100
Desplazamientos	225
Ropa de seguridad	65
Material de oficina	350
Otros gastos	200
TOTAL	2.740

Concepto a facturar	
Personal	35.200
Gastos generales	2.740
Beneficio industrial (15%)	5.691
Subtotal (€)	**43.631**
16 % I.V.A	6.981
TOTAL PRESUPUESTO (€)	**50.612**

Teniendo en cuenta que la empresa adquiere en su activo elementos y estructuras de carga para dejar de utilizar los de una empresa externa. El presupuesto final es:

Material para ensayar			
Descripción	Unidades	€/unidad	Coste (€)
Chasis-cabina Gama FA	1	19.000	19.000
Chasis-cabina Gama FB	1	24.000	24.000
Neumáticos	8	75	600
Sacos de arena 10 kg	100	26	2.600
Sacos de arena 15 kg	50	29	1.450
Sacos de arena 30 kg	25	34	850
Sacos de arena 100 kg	25	63	1.575
Garrafas de arena 15kg	25	25	625
Bloques de carga 300 kg	10	185	1.850
Bloques de carga 500 kg	10	390	3.900
Bloques de carga 1000 kg	5	575	2.875
Eslingas	4	17	68
Contenedor	12	178	2.136
Caja cerrada	1	2.400	2.400
Caja abierta A	1	1.200	1.200
Caja abierta B	1	1.450	1.450
Parrilla 3D	1	5.000	5.000
Parrilla estándar A	1	2.320	2.320
Parrilla estándar B	1	2.620	2.620
Estructura de madera	12	85	1.020
TOTAL			77.539

Concepto a facturar	
Personal	35.200
Gastos generales	2.740
Material	77.539
Beneficio industrial (15%)	17.322
Subtotal (€)	**132.801**
16 % I.V.A	21.248
TOTAL PRESUPUESTO (€)	**154.049**

Conclusiones

Los valores del centro de gravedad con los que se realizan ensayos en pista están a una altura poco elevada comparada con las condiciones reales de circulación. Aunque actualmente se consideran otras condiciones de carga en pista, con la metodología propuesta sería necesario realizar menos simulaciones.

Analizando el vehículo con una metodología de carga más ajustada a la realidad, se disminuye la altura de la curva de equiadherencia en situación de carga máxima, por lo que no es necesario realizar un dimensionado de los frenos para unas curvas de equiadherencia con unas condiciones de carga que no se van a presentar. Esto implicaría una disminución de peso y un ahorro en costes.

Con la altura del centro de gravedad del vehículo y el ángulo de inclinación de la plataforma que es capaz de soportar el camión, se define una altura máxima recomendable del centro de gravedad para evitar el vuelco en función de la MMA y el carrozado.

Teniendo en cuenta que la estructura de acero diseñada tiene una vida útil elevada y se puede utilizar para realizar ensayos en toda una gama de vehículos, el coste de implementación del proyecto es relativamente bajo, comparado con las mejoras introducidas, y con el precio y la cantidad de vehículos que se venden.

Agradecimientos

A la empresa NISSAN MOTOR IBERICA que me ha facilitado gran cantidad de datos y documentos para poder llevar a cabo este proyecto, en particular a la ingeniería LCV-EBU (*Light Comercial Vehicles- Europe Business Unit*).

Al instituto de investigación aplicada del automóvil (IDIADA) por permitirme el acceso a sus instalaciones. Sobre todo al personal técnico del box interno de NISSAN, quienes me han ayudado y facilitado la puesta a punto de los camiones.

Agradecer especialmente el interés y la dedicación prestada por el Sr. Lluís Roger, miembro de NISSAN EUROPE y Section Manager del departamento *Vehicle dynamics, ride and handling test*, quien me ha asesorado durante mi estancia en NISSAN, del que he aprendido conocimientos profesionales y personales, y quien me ha ayudado a realizar este proyecto.

A la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona y en concreto a mi tutor Sr. Francisco Liesa y al profesor Sr. David Gallegos, por su trato, consejos académicos y su disponibilidad en todo momento.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

[1] NISSAN EUROPE LCV BUSINESS UNIT. *Technical data sheet, weight & dimensions.* F91A y F91B. 2009.

[2] AGULLÓ, J. *Mecánica de la partícula y del sólido rígido.* Barcelona, Publicaciones OK PUNT, 1996.

[3] LIESA, F. *Vehicles II,* Barcelona: ETSEIB-CPDA. 2004.

[4] VEHÍCULOS COMERCIALES NISSAN: *Especificaciones técnicas.* 2010.

[5] NISSAN CABSTAR: *Normas de carrocero para el montaje de carrocerías, equipamientos y transformaciones*. 2007.

[http://www.nissancabstar.com.mx/Manual_del_Carrocero_CABSTAR.pdf]

[6] NISSAN ATLEON: *Especificaciones técnicas.* 2008, p. 5-15

[*http://prensa.nissan.es/wprensa/noticies/Atleon_precios&especs_jun08.pdf*]

[7] FOIMA S.A. *Catálogo de productos.* Barcelona: 2007.

[8] INDUSTRIAL ROMU: *Taller de carrocerías y reparaciones.* Barcelona.

[9] ISO 15037-2, Road vehicles-Vehicle dynamics test methods-Part 2: General Conditions for heavy vehicles and buses.

[10] ISO 8855, Road vehicles-Vehicle dynamics and road-holding ability-Vocabulary.

[11] Directiva 98/12/CE del 7/4/1998 relativo al frenado de vehículos de dos ejes.

Bibliografía complementaria

[12] MILLIKEN AND MILLIKEN. *Race Car Vehicle dynamics*. SAE R-146.

[13] LIMPERT R. *Brake Design and Safety*. SAE. ISBN 1-56091-261-B.

[14] MARTÍ PARERA A. *Frenos SBS*. Marcombo. Boixareu Editores. ISBN 84-267-0915-X.