

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Escuela de Posgrado



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

**EXPRESIONES ANALÍTICAS PARA DETERMINAR EL LÍMITE  
DE VELOCIDAD DE VEHÍCULOS EN CURVAS Y SU  
APLICACIÓN EN CARRETERAS DEL PERÚ**

**Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Mecánica**

**Presentado por:**

**Luis Vicente Pérez Ballón**

**Asesor: Dipl. Ing. Jorge Rodríguez Hernández**

**Jurado**

**Franco Rodríguez, Rosendo**

**Rodríguez Hernández, Jorge Antonio**

**Alvarez Rojas, Miguel Angel**

**2016**

**Lima - Perú**

## RESUMEN

---

A partir del análisis mecánico teórico de la operación de un vehículo circulando en carreteras y/o curvas, este trabajo pretende definir las expresiones analíticas que relacionen las variables participantes y determinar los valores críticos de la velocidad de circulación para evitar el derrape (deslizamiento lateral) y/o evitar también el vuelco (volcadura).

Para esto se identificarán las cargas actuantes sobre el vehículo (analizado como un sólido rígido); se presentarán las hipótesis y los puntos de partida para obtener esas expresiones analíticas y calcular **la velocidad crítica de vuelco** y **la velocidad crítica de derrape** a partir de las magnitudes, recomendadas para las carreteras del Perú, como son el radio mínimo de curvatura de la carretera, el coeficiente de fricción máximo con la pista y el peralte máximo aceptable, relacionadas con la velocidad de ingreso a una curva; se compararán esos valores teóricos, con las magnitudes presentadas y obtenidas a partir de las pruebas y ensayos experimentales mostradas y se concluirán y recomendarán los valores permisibles en la velocidad, para una operación del vehículo en curvas que presente seguridad para sus ocupantes.

Los principales resultados obtenidos muestran una *velocidad crítica de derrape* que se encuentra en el intervalo de  $[20 ; 60](km/h)$  mientras que para la *velocidad crítica de vuelco* se ubica en el intervalo de valores entre  $[42 ; 80](km/h)$ . Por otro lado, de los ensayos experimentales presentados se muestra que la *velocidad de circulación máxima experimental* en curvas es de  $60 (km/h)$ .

Entre las conclusiones más importantes podemos afirmar que la *velocidad de derrape* y la *velocidad de vuelco* presentan expresiones análogas, pudiendo cambiar indistintamente la magnitud del coeficiente de fricción  $\mu$  por la relación entre las magnitudes del Centro de Gravedad del sólido  $(\ell/h)$  para obtener correspondientemente, la *velocidad de derrape* o la *velocidad de vuelco*. Además al comparar los intervalos obtenidos para la *velocidad crítica de derrape* y para la *velocidad crítica de vuelco* concluimos que el vehículo tenderá a derrapar antes que volcar y, en función de mantener la estabilidad del mismo y asegurar la integridad física de los pasajeros, concluimos que el valor máximo de ingreso a una curva sería de  $60 (km/h)$ .



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo: a mi esposa Totty, a mis hijos Ana Isabel y Luis Alfonso, a mi padre Luis (+), a mi madre Isabel y a mi suegra Carmela (+).

## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar y de manera especial para mi amada esposa TOTTY, por su paciencia y dedicación apoyando el desarrollo de este trabajo, en paralelo con nuestras labores académicas y con la satisfacción de saber que escogí bien a mi compañera para toda la vida;

También una mención especial para mis adorados hijos, por su empuje y apoyo en el camino hacia la obtención de esta maestría y con el orgullo de tener a ANA ISABEL ya recibida de arquitecta y a LUIS ALFONSO en camino a convertirse en ingeniero mecatrónico.

A mi madre ISABEL que tengo la suerte de tenerla todavía a mi lado y a mi padre LUIS que ya me observa al lado de nuestro Creador, por el sacrificio de brindarme una profesión, que día a día y con el apoyo de mi esposa y de mis hijos trato de retribuir siempre.

Al ingeniero Jorge Rodríguez Hernández, por la amistad y su apoyo profesional en todo el planteamiento y desarrollo de este trabajo de Maestría, así como también al Ingeniero Luis Chirinos, por su interés y recomendaciones en la aplicación de esta tesis.

Al profesor José Phan Lau de la Sección Física, por su perseverancia, apoyo e interés por la culminación de este trabajo.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES</b>	<b>15</b>
1.1 La Mecánica en la Ingeniería	15
1.2 Leyes de Newton para el movimiento	15
1.3 Operación de un vehículo en curva horizontal	16
1.3.1 Análisis de la sumatoria de Fuerzas Externas	17
1.3.2 Análisis de la Sumatoria de Torques de Fuerzas Externas	18
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE</b>	<b>20</b>
2.1 Análisis Estadístico Descriptivo del derrape y del vuelco en el Perú	20
2.2 Circulación de vehículos “sinistrados” y repotenciados	28
2.3 Otras Estadísticas sobre el derrape y el vuelco en el mundo	28
2.4 Alternativas de solución ante el derrape y el vuelco	32
2.4.1 Solución mediante la Investigación	33
2.4.2 Solución mediante la Reglamentación	34
<b>CAPÍTULO 3: EXPRESIONES DE LA VELOCIDAD DE DERRAPE Y DE LA VELOCIDAD DE VUELCO</b>	<b>36</b>
3.1 Equilibrio de Fuerzas Externas	36
3.1.1 Expresión de la velocidad de derrape	37
3.2 Equilibrio de Torques de Fuerzas Externas	38
3.2.1 Expresión de la velocidad de vuelco	38
3.3 Resumen	40
3.4 Tendencias de la velocidad de derrape	40
3.4.1 Influencia del radio de curvatura de la curva	42
3.4.2 Influencia del ángulo de peralte	43
3.4.3 Influencia del coeficiente de fricción	43
3.5 Velocidad crítica de derrape	43
3.6 Tendencias de la velocidad de vuelco	45
3.6.1 Influencia del radio de curvatura de la curva	45
3.6.2 Influencia del ángulo de peralte	45

3.6.3	Influencia de la distancia frontal entre las ruedas del vehículo	45
3.6.4	Influencia del Centro de Gravedad del vehículo	46
3.6.4.1	Cota transversal del centro de gravedad ( $\ell$ )	46
3.6.4.2	Altura del centro de gravedad ( $h$ )	48
3.6.4.3	Consideraciones previas para la relación ( $\ell/h$ )	49
3.7	Velocidad crítica de vuelco	51
 <b>CAPÍTULO 4: COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES TEÓRICOS Y LOS VALORES EXPERIMENTALES DE LAS VELOCIDADES DE VUELCO Y DE DERRAPE</b>		<b>53</b>
4.1	Magnitudes teóricas de la velocidad de circulación en curvas	53
4.1.1	Velocidad teórica crítica de derrape	53
4.1.2	Velocidad teórica crítica de vuelco	53
4.1.3	Velocidad teórica de circulación	53
4.2	Los valores experimentales para el derrape y para el vuelco	54
4.2.1	Ensayo de estabilidad lateral sobre plataforma	54
4.2.2	Ensayos en pistas	55
4.2.2.1	Consideraciones previas	55
4.2.2.2	Ensayos a radio de curvatura constante	58
4.2.2.3	Ensayos a velocidad constante	59
4.2.2.4	Relación entre el radio de curvatura y la velocidad	60
4.2.2.5	Resultados de los registros de los Transductores	61
4.2.2.6	Resumen	62
4.3	Magnitudes experimentales de la velocidad de circulación en curvas	63
4.4	Comparación final	63
 <b>CONCLUSIONES</b>		<b>64</b>
 <b>OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>67</b>
 <b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>70</b>

<b>ANEXOS</b>		<b>73</b>
Anexo 1	Importación de vehículos SUNAT	73
Anexo 2	Características técnicas del bus del ensayo experimental	77



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

- GRÁFICO 1:** Departamentos del Perú con mayor incidencia de accidentes de tránsito en año 2014
- GRÁFICO 2:** Accidentes de tránsito por clase, según departamentos en año 2014
- GRÁFICO 3A:** Accidentes de tránsito por clase en año 2014
- GRÁFICO 3B:** Distribución porcentual de accidentes de tránsito por clase en año 2014
- GRÁFICO 4:** Causas que originan los accidentes de tránsito según departamentos en año 2014
- GRÁFICO 5A:** Causas de accidentes de tránsito en año 2014
- GRÁFICO 5B:** Distribución porcentual de causas de accidentes de tránsito en año 2014
- GRÁFICO 6:** Vehículos participantes en accidentes de tránsito por tipo según departamentos en año 2014
- GRÁFICO 7A:** Vehículos involucrados en accidentes de tránsito por tipo en año 2014
- GRÁFICO 7B:** Distribución porcentual de tipos de vehículos involucrados en accidentes de tránsito en año 2014
- GRÁFICO 8A:** Requisitos mínimos de antigüedad para importación de vehículos
- GRÁFICO 8B:** Requisitos mínimos de antigüedad para importación de vehículos (continuación)
- GRÁFICO 9A:** Requisitos mínimos de kilometraje para importación de vehículos
- GRÁFICO 9B:** Requisitos mínimos de kilometraje para importación de vehículos (continuación)
- GRÁFICO 10:** Requisitos mínimos de siniestrabilidad para importación de vehículos
- GRÁFICO 11:** Accidentes año 2012 España. Accidentes con víctimas en función del tipo de accidente

- GRÁFICO 12:** Accidentes año 2012 España. Vehículos, según tipo, que han intervenido en los accidentes en función de su gravedad
- GRÁFICO 13:** Accidentes año 2012 España. Accidentes con víctimas según las características de la vía, en vía interurbana
- GRÁFICO 14:** Accidentes año 2012 España. Accidentes con víctimas según las características de la vía, en vía urbana



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS

$\vec{F}_R$	Fuerza Resultante de un sistema de $n$ Fuerzas (N)
$m, M$	Masa de una partícula o de un sólido (kg)
$mg, Mg$	Peso de una partícula o de un sólido (N)
$W$	Peso de una partícula o de un sólido (N)
$g$	Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
$\vec{a}_R$	Aceleración de una partícula o de un sistema de partículas o de un sólido, debida a una Fuerza Resultante ( $m/s^2$ )
$\partial f / \partial t$	Derivada parcial de una función $f$ respecto del tiempo
$\vec{v}_R$	Velocidad de una partícula o de un sistema de partículas o de un sólido (m/s)
$v$	Rapidez de una partícula o de un sistema de partículas o de un sólido (m/s)
$R$	Radio de curvatura en una curva (m)
$x_G$	Abscisa del Centro de Gravedad de un sólido (m)
$y_G$	Ordenada del Centro de Gravedad de un sólido (m)
$a$	Distancia entre ruedas (m)
$\mu$	Coefficiente de rozamiento (fricción) entre 2 superficies
$N_i$	Fuerza Normal de la pista sobre la $i$ -ésima rueda (N)
$F_i$	Fuerza de rozamiento entre la $i$ -ésima rueda y la pista (N)
$h, \ell$	Coordenadas del C.G. respecto al extremo exterior del vehículo, respecto del centro de curvatura (m)
$\theta$	Ángulo de inclinación de una superficie, en sentido horario respecto a la horizontal ( $^\circ$ )
$v_d$	Módulo de la velocidad de derrape (km/h)
$v_v$	Módulo de la velocidad de vuelco (km/h)
$e$	Peralte de una pista (%)
$e_{max}$	Peralte máximo (%)
$\mu_{max}$	Coefficiente de fricción máximo
$v_{cd}$	Módulo de la velocidad crítica de derrape (km/h)
$v_{cv}$	Módulo de la velocidad crítica de vuelco (km/h)
$F_b$	Peso aparente del vehículo dado por una balanza (N)

$b_G$	Distancia horizontal del Centro de Gravedad al plano longitudinal medio del vehículo (mm)
$E$	Distancia frontal entre las ruedas (mm)
$\ell$	Cota transversal del Centro de Gravedad (mm)
$r$	Distancia al suelo del eje longitudinal de la sección de la rueda alrededor de la cual se produce el balanceo (mm)
$\phi$	Ángulo de inclinación de la plataforma a la cual se produce el vuelco ( $^\circ$ )
$h$	Altura del Centro de Gravedad (mm)



## INTRODUCCIÓN

---

Un viaje por nuestras carreteras, ahora nos parece lo más natural del mundo dado que por un lado el paisaje presentado es multicolor y variado y por otro lado se van construyendo nuevas pistas y las ya existentes se han mejorado bastante. Esto último ha dado pie a que muchos conductores se presten a la temeridad y manejen a gran velocidad inclusive rebasando al vehículo de adelante (generalmente invadiendo el carril de sentido contrario), no sólo en el tramo recto sino también en las curvas, algunas de las cuales no te permiten detectar la proximidad del vehículo que viene, causando muchos accidentes. Dejando de lado los inconvenientes del tráfico en las pistas, y centrándonos en el movimiento del vehículo, y en especial cuando describimos la trayectoria curva, notamos la presencia de una fuerza que trata de “llevarnos hacia afuera” de ésta curva.

Las curvas son los elementos de una carretera que presentan una mayor problemática desde el punto de vista de operación de un vehículo, debido a la distribución de fuerzas que actúan sobre éste, propiciando un mejor análisis para también garantizar una correcta estabilidad de cualquier vehículo que transite por esas curvas.

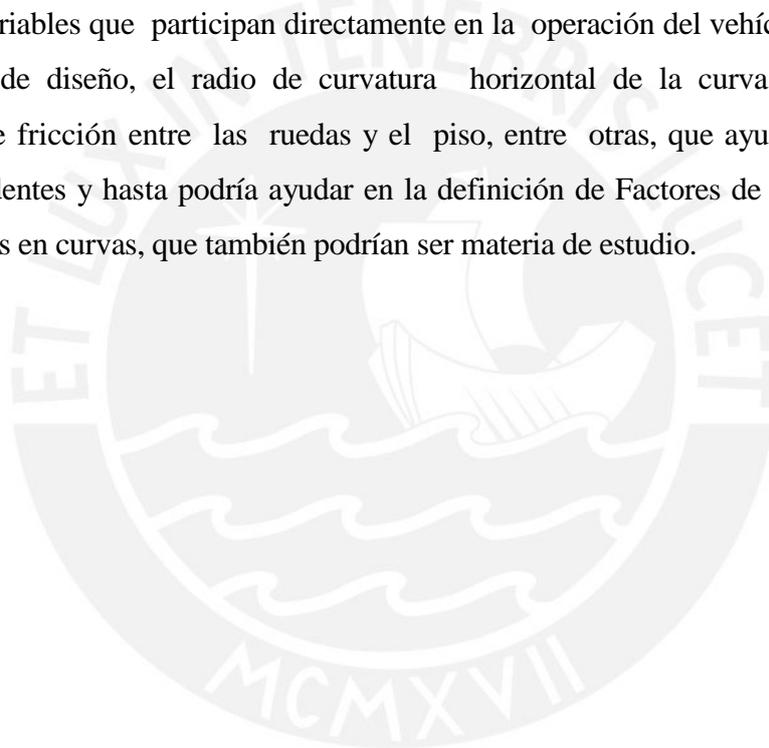
Entonces, el comportamiento de un vehículo al tomar una curva es, por la presencia del sistema de fuerzas actuantes sobre el mismo, más inestable que cuando se halla operando en línea recta. La principal diferencia es la Fuerza Centrífuga (como sabemos fuerza ficticia que se presenta al analizar el móvil desde el propio vehículo), ya que al tomar la curva el vehículo se halla constantemente cambiando su dirección. En esta situación, el vehículo puede derrapar (resbalar lateralmente hacia afuera de la curva) o volcar (voltearse), originando problemas en la estabilidad del vehículo, pudiendo causar la pérdida del control del mismo y poniendo en riesgo la integridad física y la salud de los ocupantes del vehículo. A la magnitud de la aceleración lateral a la cual se presenta la volcadura del vehículo se le denomina *límite de vuelco* o comúnmente *umbral de vuelco*. Para contrarrestar dicho efecto, generalmente se dota a la curva de un peralte o inclinación transversal. Según esto, en la situación crítica en la cual se presenta el derrape y/o el vuelco del vehículo, definiremos a dicha velocidad como *velocidad crítica de derrape* o *velocidad crítica de vuelco*, según sea el caso.

La preocupación sobre estas situaciones origina que las autoridades correspondientes en muchos países busquen en la investigación y en la reglamentación, posibilidades de solución al problema. En lo referido a la investigación, se propone el análisis teórico de la operación del vehículo a fin de establecer algunas expresiones matemáticas que relacionen las magnitudes de las variables que definan ese límite de vuelco; y en cuanto a la reglamentación, algunos países proponen, por un lado, la realización de ensayos en laboratorios (consistentes en ubicar al vehículo sobre una plataforma que puede inclinarse alrededor de uno de sus lados hasta provocar el inicio del vuelco bajo criterios ya definidos y que adicionalmente pueda recoger datos tanto acerca de los daños en la carrocería así como también sobre la salud de los pasajeros y definir si cumplen o no ciertas condiciones de supervivencia establecidas en esa reglamentación) y por otro lado, la realización de ensayos en carreteras (con pruebas en curvas, con peralte y radio de curvatura conocidos y en tramos rectos, con longitud y velocidad máxima también conocidos), para determinar el comportamiento dinámico del vehículo.

Como objetivo general de este trabajo se pretende determinar las expresiones analíticas, a partir del movimiento con el apoyo de la cinemática y de la aplicación de las fuerzas con el apoyo de la cinética, que relacione a las variables participantes en la operación de un vehículo circulando en carreteras y/o curvas, para determinar luego los valores críticos para el derrape (deslizamiento lateral) y/o el vuelco (volcadura) y como objetivos específicos, a partir del análisis mecánico teórico de la operación del vehículo, considerado como un sistema plano, podremos: identificar las cargas actuantes sobre el sólido; presentar las consideraciones utilizadas para definir, en base a las expresiones de la dinámica, las hipótesis y los puntos de partida para obtener la velocidad crítica de vuelco y la velocidad crítica de derrape; comparar esos valores teóricos, con las magnitudes presentadas y obtenidas a partir de las pruebas y ensayos experimentales mostradas y concluir y recomendar valores permisibles en la velocidad, para una operación del vehículo en curvas que presenten seguridad para sus ocupantes.

En este documento las hipótesis presentan al vehículo como un sistema plano y como un sólido con suspensión rígida sin influencia apreciable en la variación del Centro de Gravedad, además de indicar que el análisis dinámico se realizará sobre vehículos de transporte de pasajeros de uno o dos pisos y mencionar que el planteamiento sólo mostrará un análisis desde el punto de vista del diseño mecánico.

Entonces el análisis teórico a partir del planteamiento de las definiciones de cinemática y cinética del vehículo, nos ayudarán a determinar las expresiones analíticas tanto de la velocidad de derrape como de la velocidad de vuelco y luego con las magnitudes propias de las carreteras (radio de curvatura, peralte y coeficiente de fricción de la pista) tomadas del “Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú [16] calcularemos los valores de la *velocidad crítica de derrape* o la *velocidad crítica de vuelco*, según sea el caso, que después es comparado frente al resultado combinado de la investigación y de la reglamentación a partir de los ensayos en plataforma de los vehículos y de la prueba dinámica en carreteras antes mencionados y con lo cual también obtendremos información sobre otras variables que participan directamente en la operación del vehículo, como son: la velocidad de diseño, el radio de curvatura horizontal de la curva, el peralte, el coeficiente de fricción entre las ruedas y el piso, entre otras, que ayudarán a reducir posibles accidentes y hasta podría ayudar en la definición de Factores de Seguridad para las trayectorias en curvas, que también podrían ser materia de estudio.



## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

### 1.1 La Mecánica en la Ingeniería

La **Mecánica** es una parte de las ciencias físicas que analiza el estado de reposo o el estado de movimiento de cuerpos bajo la acción de fuerzas. Según esto, la Ingeniería Mecánica se divide en dos grandes áreas de estudio: la Estática y la Dinámica.

La **Estática** estudia el equilibrio de un cuerpo en reposo o en movimiento con velocidad constante.

La **Dinámica** se ocupa del movimiento acelerado de un cuerpo [1].

Los antiguos filósofos griegos ya estudiaban la Estática en tiempos remotos, mientras que la primera contribución importante a la Dinámica la realizó Galileo que con sus experimentos en cuerpos uniformemente acelerados facilitaron a Newton la formulación de sus tres Leyes fundamentales de movimiento.

La Dinámica a su vez se subdivide en:

La **Cinemática**, que estudia la geometría del movimiento y que relaciona el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo sin tener en cuenta las causas del movimiento;

La **Cinética**, que estudia la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, su masa y el movimiento mismo. La Cinética puede definir el movimiento ocasionado por las fuerzas presentadas o puede determinar las fuerzas necesarias para establecer un movimiento específico [2].

### 1.2 Leyes de Newton para el movimiento

Se enunciarán las tres leyes correspondientes [3]:

**1° Ley:** *Si la Fuerza Resultante que actúa sobre una partícula es cero, ésta permanecerá en reposo (si originalmente estaba en reposo) o continuará viajando en línea recta con velocidad constante.*

**2° Ley:** Si la Sumatoria de las  $N$  Fuerzas (Fuerza Resultante) que actúan sobre una partícula no es cero, ésta obtendrá una aceleración en dirección a la Fuerza Resultante cuya magnitud será proporcional a esa fuerza.

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \vec{F}_R = m \vec{a}_R$$

$$\rightarrow \vec{a}_R = \frac{1}{m} \vec{F}_R$$

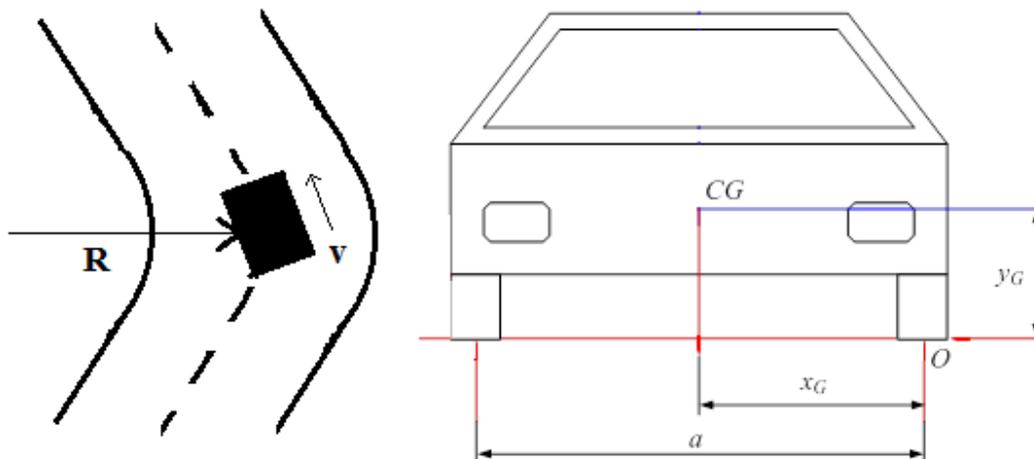
Otros autores mencionan esta Ley como: Si la Fuerza Resultante que actúa sobre una partícula no es cero, ella será proporcional al cambio de su cantidad de movimiento por unidad de tiempo.

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \vec{F}_R = \frac{d}{dt}(m \vec{v}_R)$$

**3° Ley:** Las Fuerzas de acción y reacción entre dos cuerpos en contacto tienen la misma magnitud, la misma dirección, pero los sentidos son opuestos.

### 1.3 Operación de un vehículo en curva horizontal

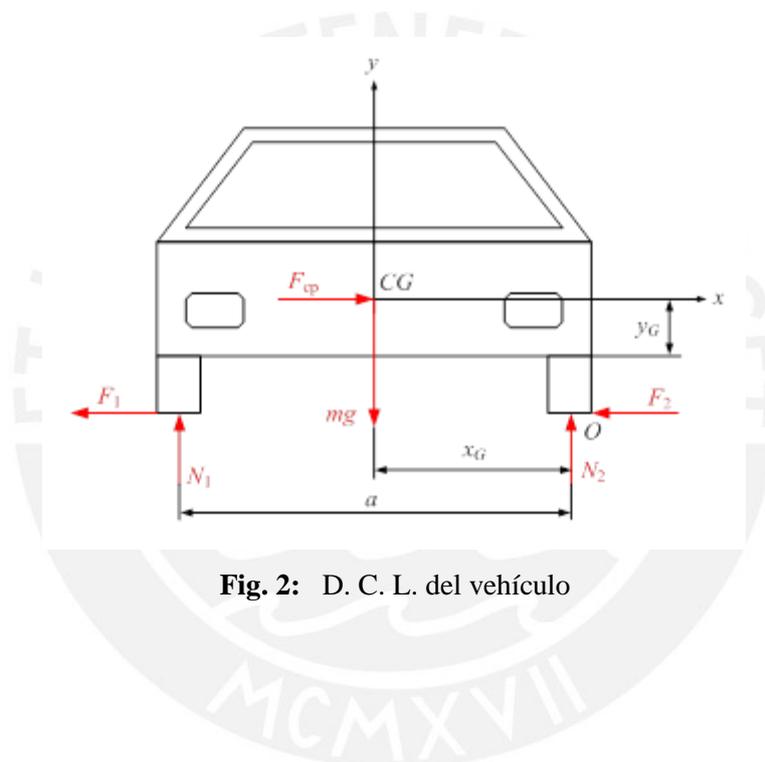
Consideremos el movimiento de un vehículo a velocidad constante  $v$ , para un análisis plano del sólido rígido [4], en una curva horizontal de radio  $R$ , con su Centro de Gravedad en la posición  $(x_G ; y_G)$  según la Fig. 1 y con un coeficiente de rozamiento entre las ruedas del vehículo y la pista  $\mu$ .



**Fig. 1:** Curva de radio  $R$  y posición del Centro de Gravedad del vehículo.

Para un **observador no inercial**, que viaja dentro del vehículo, realizamos el D.C.L., Fig. 2, donde:

- $mg$  peso total del vehículo, incluyendo pasajeros,
- $N_1, N_2$  fuerzas normales de la pista sobre las ruedas,
- $F_1, F_2$  fuerzas de rozamiento entre las ruedas y la pista,
- $F_{cp}$  fuerza de arrastre, que en este caso es la fuerza centrífuga,
- $a$  distancia entre las ruedas.



**Fig. 2:** D. C. L. del vehículo

### 1.3.1 Análisis de la sumatoria de Fuerzas Externas

En el eje  $y$ :  $\sum F_y = 0: \quad \rightarrow \quad N_1 + N_2 - mg = 0$

$$N_1 + N_2 = mg$$

En el eje  $x$ :  $\sum F_x = 0: \quad \rightarrow \quad -F_1 - F_2 + F_{cp} = 0$

$$F_1 + F_2 = F_{cp}$$

### 1.3.2 Análisis de la sumatoria de Torques de Fuerzas Externas

Considerando despreciable la distancia entre el extremo  $O$  y el centro de la rueda derecha 2, tendremos:

$$\sum M_o = 0: \quad \rightarrow \quad -a N_1 - y_G F_{cp} + x_G mg = 0$$

$$a N_1 + y_G F_{cp} = x_G mg$$

de donde: 
$$N_1 = \frac{x_G mg - y_G F_{cp}}{a}$$

Considerando las relaciones entre las diferentes variables:

a) Como: 
$$F_{cp} = m \frac{v^2}{R}$$

Al aumentar la velocidad  $v$  del vehículo, aumenta la fuerza centrífuga, con lo cual  $N_1$  tendería a cero y puede causar la volcadura del vehículo, con lo cual la condición para el vuelco es que:

$$N_1 = 0 \quad \text{ó} \quad \frac{v^2}{R} = g \frac{x_G}{y_G}$$

b) Como  $F_r \leq \mu N$ , debido al análisis plano del sólido rígido

$$\Rightarrow F_1 + F_2 \leq \mu (N_1 + N_2)$$

Y como para el equilibrio:  $F_{cp} \leq \mu mg$

Entonces la condición para el deslizamiento será: 
$$\frac{v^2}{R} = \mu g$$

Entonces, como conclusiones preliminares podríamos definir que:

- Si  $mg x_G > y_G F_{cp}$   $\rightarrow$  el vehículo no vuelca;
- Si  $F_{cp} < \mu mg$   $\rightarrow$  el vehículo no desliza;
- Si  $\mu < \frac{x_G}{y_G}$   $\rightarrow$  el vehículo comienza a deslizar cuando se cumple

que: 
$$\frac{v^2}{R} = \mu g$$

- Si  $\mu > \frac{x_G}{y_G}$  → el vehículo comienza a volcar cuando se cumple

que: 
$$\frac{v^2}{R} = g \frac{x_G}{y_G}$$



## CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

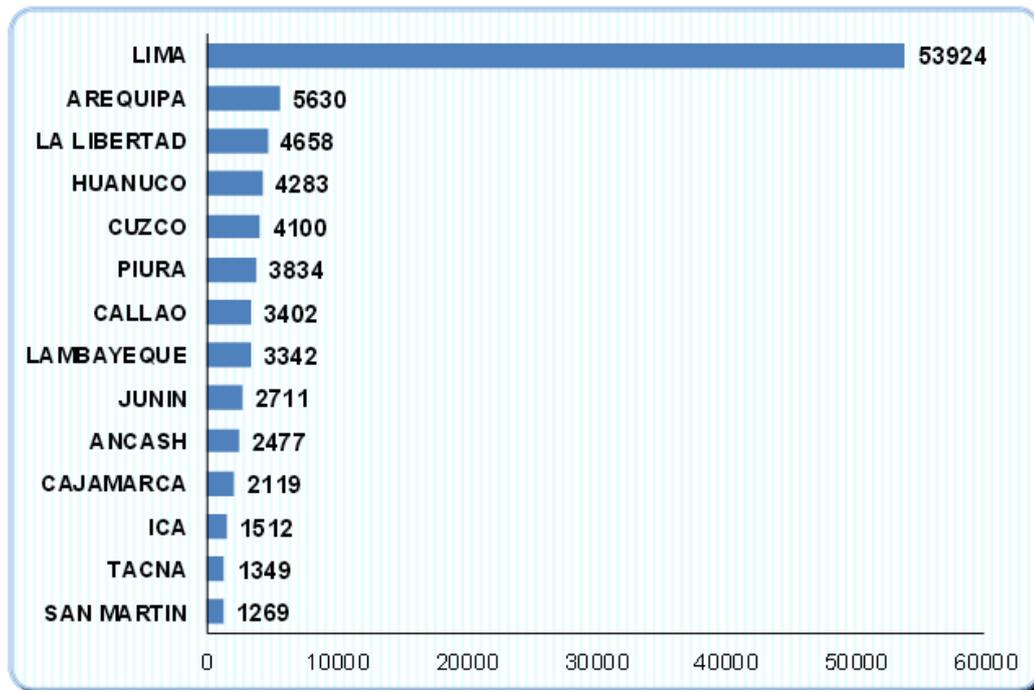
La operación de un vehículo cuando describimos una trayectoria curva, se presenta un poco más problemática que en un tramo recto, debido a la presencia de una fuerza que trata de “llevarnos hacia afuera” de esta curva.

Como punto de partida del análisis, si aumentamos la velocidad de ingreso a la curva y sabiendo que esa fuerza lateral se aplica en el Centro de Gravedad del vehículo, vemos que si su magnitud aumenta y se acerca al valor de la fuerza de fricción total de la pista sobre las ruedas, estaríamos ante la presencia o de un derrape (resbalamiento lateral hacia el centro) y/o de un vuelco (volcadura), que van a originar problemas en la estabilidad del vehículo, pudiendo causar la pérdida del control del mismo y poniendo en riesgo la integridad física y la salud de los ocupantes del vehículo. A la magnitud de la aceleración lateral a la cual se presenta la volcadura del vehículo se le denomina *límite de vuelco* o comúnmente *umbral de vuelco*. A partir de esto, en esa situación crítica en la cual se presenta el derrape y/o el vuelco del vehículo, definiremos a la velocidad, según corresponda, *velocidad crítica de derrape* o *velocidad crítica de vuelco*.

### 2.1 Análisis Estadístico Descriptivo del derrape y el vuelco en el Perú

En nuestro medio, las estadísticas de la **Policía Nacional del Perú** [5] nos muestran los tipos y cantidades de accidentes de tránsito que se producen, las causas que los originan, así como los vehículos participantes y los departamentos de nuestro país en los que ocurren. Los datos proporcionados corresponden al año 2014.

Es de indicar que las características básicas de las autopistas del Perú en cuanto a peralte (medido en porcentaje y no en ángulo), la velocidad de circulación y el radio de curvatura, están reglamentadas y supervisadas en el “**Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito**” del **Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú** [14].



FUENTE: REGIONES Y FRENTE POLICIALES PNP  
 ELABORACION: DIRNAGEIN - PNP/DIRETIC - DIREST.

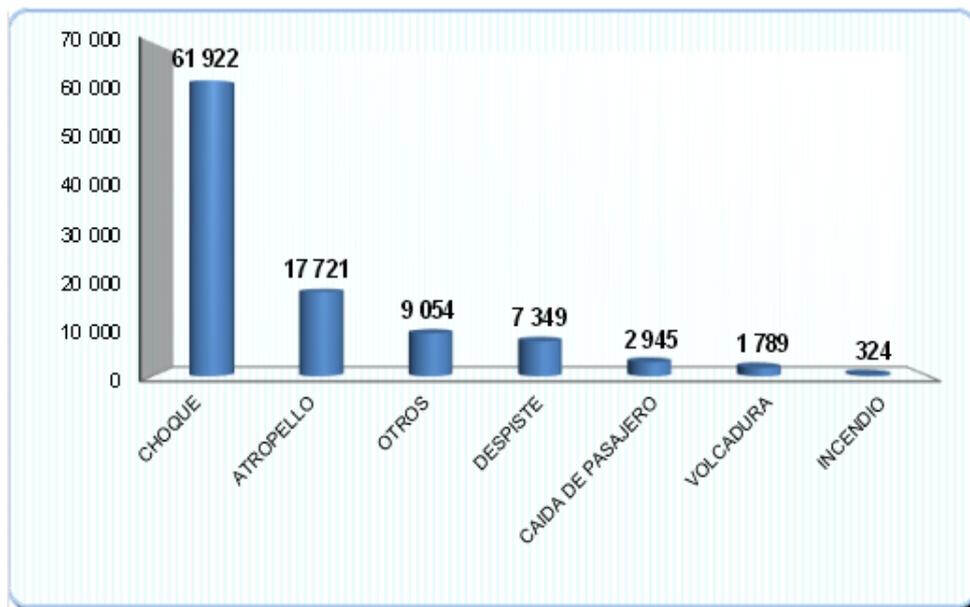
**GRÁFICO 1:** Departamentos del Perú con mayor incidencia de accidentes de tránsito en el año 2014.

Del Gráfico 1, de los 101104 casos de accidentes de tránsito presentados, es clara la posición de Lima como el departamento con la mayor incidencia (53924 casos), tal vez por un mayor parque automotriz presente en la capital, la mayor cantidad de personas transitando y moviéndose también, etc.

DEPARTAMENTO	TOTAL	CLASE									
		ATROPELLO	ATROPELLO Y FIGA	CICLISTE	CICLISTE Y FIGA	VOCAJERA	CAJADERO	LIBERDO	DEPILITE	OTRO	
TOTAL	161 104	14 911	2 810	49 102	12 820	1 789	2 945	324	7 349	9 054	
AMAZONAS	463	73	17	172	42	10	30	2	112	36	
AREQUIPA	2 477	344	108	993	307	64	46	11	73	536	
AYACUCHO	1 301	158	47	335	129	48	17	8	81	278	
CAJAMARCA	2 119	331	71	947	198	77	50	1	379	96	
CUZCO	4 300	948	102	1 669	421	122	121	67	220	433	
HUANCAVELICA	201	32	1	61	3	16	0	0	37	51	
HUANUCO	4 283	146	14	2 461	111	83	50	0	587	781	
ICA	1 512	212	76	878	151	27	2	13	34	119	
JUNIN	2 711	562	99	1 237	183	66	80	15	291	178	
LA LIBERTAD	4 688	722	118	2 295	589	99	150	20	511	194	
LAMBAYEQUE	3 342	456	130	1 836	419	42	52	2	313	92	
LIMA	53 024	8 036	1 333	26 600	7 923	688	1 869	89	2 825	4 472	
CALLAO	3 402	551	125	1 578	383	38	180	8	246	293	
LORETO	410	38	23	246	21	0	3	0	65	14	
MADRE DE DIOS	510	60	9	275	9	13	6	0	73	65	
MOQUEGUA	665	104	23	321	40	30	30	0	301	36	
PASCO	50	6	1	20	2	1	0	0	12	8	
PIURA	3 834	548	212	1 627	727	50	98	5	325	247	
PUNO	963	171	52	316	183	55	12	0	46	158	
SAN MARTIN	1 269	147	25	633	120	13	5	0	294	32	
TAONA	1 349	224	43	603	128	9	53	16	130	53	
TUMBES	438	48	17	241	46	3	6	1	62	14	
UCAYALI	1 060	106	21	491	170	11	7	3	283	68	

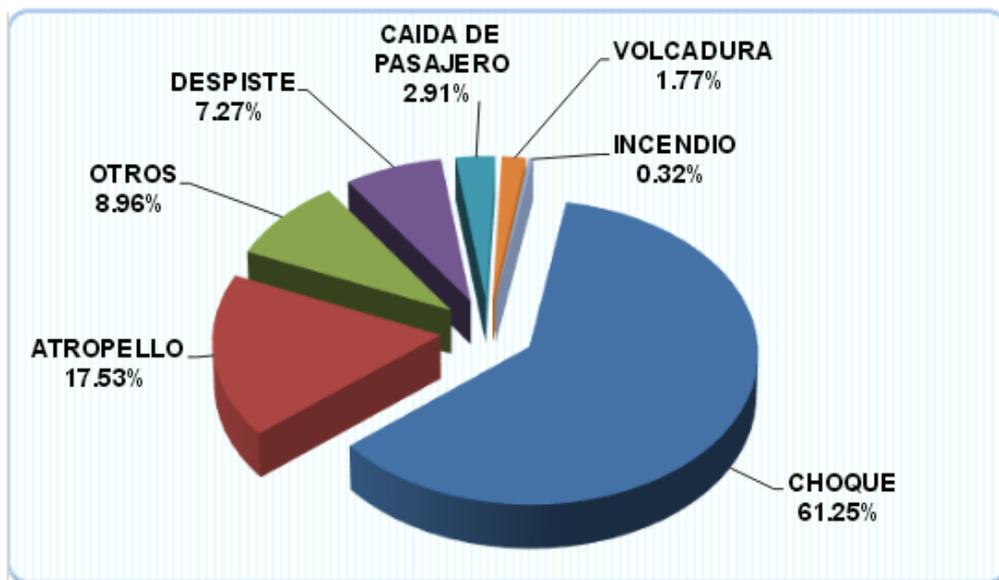
FUENTE: REGIONES Y FUENTES POLICIALES PNP  
ELABORACION: DIRAMGEN - PNP / DIRITIC - DIBEST

**GRÁFICO 2:** Accidentes de tránsito por clase, según departamentos en el año 2014.



FUENTE: REGIONES Y FRENTE POLICIALES PNP  
ELABORACION: DIRNAGEIN - PNP / DIRETIC - DIREST.

GRÁFICO 3A: Accidentes de tránsito por clase en el año 2014.



FUENTE: REGIONES Y FRENTE POLICIALES PNP  
ELABORACION: DIRNAGEIN - PNP / DIRETIC - DIREST.

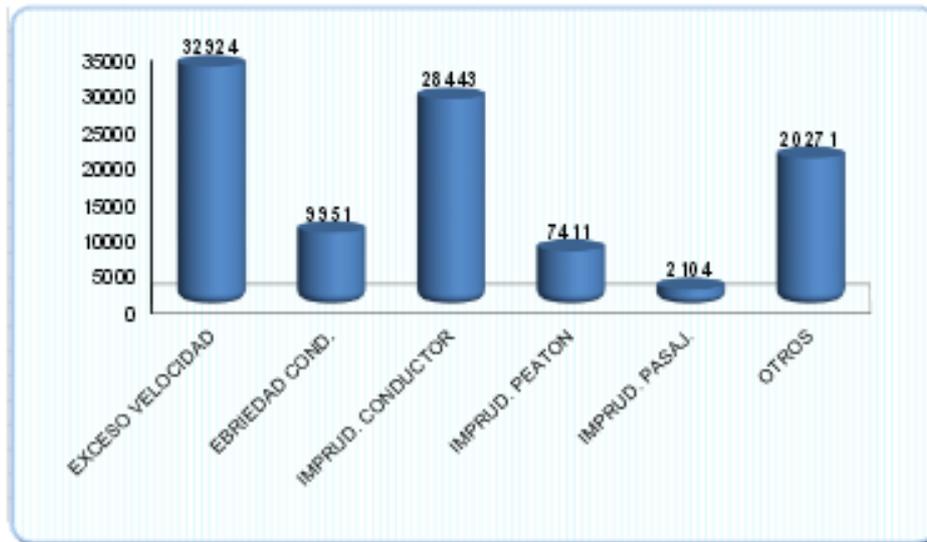
GRÁFICO 3B: Distribución porcentual de accidentes de tránsito por clase en el año 2014.

Como resultado del análisis de los Gráficos 2, 3A y 3B se observa que a nivel nacional y por tipo de accidente, siempre siendo Lima el de mayor incidencia, 61922 casos (61,25%) fueron choques y 17721 (17,53%) atropellos y por **despiste** sucedieron 7349 casos (7,27%) y por volcadura 1789 (1,77%)

DEPARTAMENTO	TOTAL	CAUSAS										OTROS	
		EXCIBO DE VERGADA	ERRADOR CONDUCTOR	IMPRUD CONDUCTOR	IMPRUD PEATON	IMPRUD PASAJERO	EXCIBO DE CARGA	DEBAGATO SEÑAL TRAMITO	FALLA MECANICA	FALTA DE LUCEB	PTA EN MAL ESTADO		SEÑALIZACION DEFECTUOSA
TOTAL	101104	37424	9951	28443	74311	2104	403	2498	2096	543	1791	738	12200
AMAZONAS	463	114	58	123	40	6	4	2	28	1	24	3	60
ANCASH	2477	515	322	721	133	51	16	28	63	174	167	44	243
APURIMAC	643	196	90	195	54	8	2	1	24	1	6	7	59
AREQUIPA	5630	1528	753	2269	301	63	11	33	89	4	84	14	481
AYAQUCHO	1101	178	245	370	102	22	25	22	25	1	17	7	87
CAJAMARCA	2119	413	597	600	122	23	3	105	29	7	116	35	69
CUSCO	4100	1250	490	1349	367	40	20	30	102	8	56	15	373
HUANCAVELICA	201	30	9	42	5	0	0	0	0	0	5	0	120
HUANUCO	4283	3074	888	230	28	7	2	0	8	0	9	7	30
ICA	1512	505	173	624	110	8	2	2	16	1	3	2	66
JUNIN	2711	868	213	826	236	49	3	46	45	7	52	8	358
LA LIBERTAD	4658	1559	446	1292	302	134	35	74	116	44	84	22	450
LAMBAYEQUE	3342	961	361	1181	237	97	6	26	55	8	68	38	304
LIMA	53924	17528	3757	14420	4392	1387	221	1841	1152	207	641	450	8128
CALLAO	3402	1085	113	1319	239	47	1	17	67	6	29	11	468
LORETO	410	81	129	167	9	0	0	5	1	1	8	0	9
MADRE DE DIOS	510	199	94	124	25	1	3	3	12	7	17	2	23
MOQUEGUA	665	183	78	199	54	2	1	2	19	0	8	0	119
PASCO	50	16	1	12	5	0	0	2	6	1	1	0	5
PIURA	3834	949	530	929	312	77	34	95	132	49	297	26	384
PUÑO	953	312	121	315	102	21	1	6	17	1	7	2	48
SAN MARTIN	1269	515	117	306	69	21	2	41	22	3	28	18	127
TACNA	1349	451	135	420	163	17	2	69	23	1	21	4	43
TUMBES	438	94	53	189	25	4	0	1	8	1	8	0	55
UCAYALI	1060	330	178	221	59	19	8	47	39	10	35	23	91

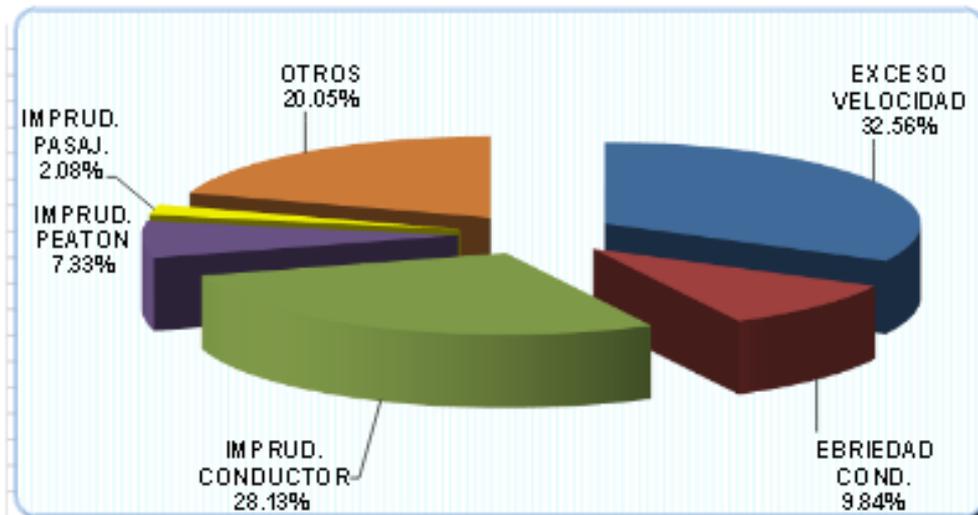
FUENTE: REGIONES Y FUENTES POLICIALES PNP  
ELABORACION: DIRECTO - PNP / DIRECTO - OMBUSPRO.

**GRÁFICO 4:** Causas que originan los accidentes de tránsito según departamentos en el año 2014.



FUENTE: REGIONES Y FRENTE POLICIALES PNP  
ELABORACION: DIRNAGEIN - PNP / DIRETIC - DIREST.

**GRÁFICO 5A:** Causas de accidentes de tránsito en el año 2014.



FUENTE: REGIONES Y FRENTE POLICIALES PNP  
ELABORACION: DIRNAGEIN - PNP / DIRETIC - DIREST.

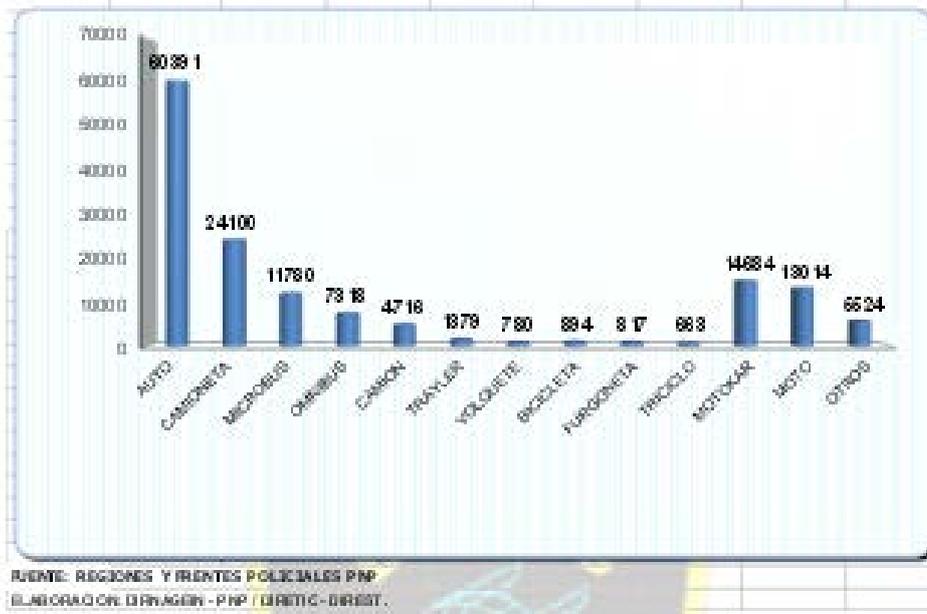
**GRÁFICO 5B:** Distribución porcentual de causas de accidentes de tránsito en el año 2014.

A partir de las cifras mostradas en los gráficos 4, 5A y 5B vemos que de los 101104 casos presentados, **32924 (32,56%) fueron por exceso de velocidad, 28443 (28,13%) por imprudencia del conductor, 9951 (9,84%) fueron por ebriedad del conductor y 7411 (7,33%) por imprudencia del peatón.**

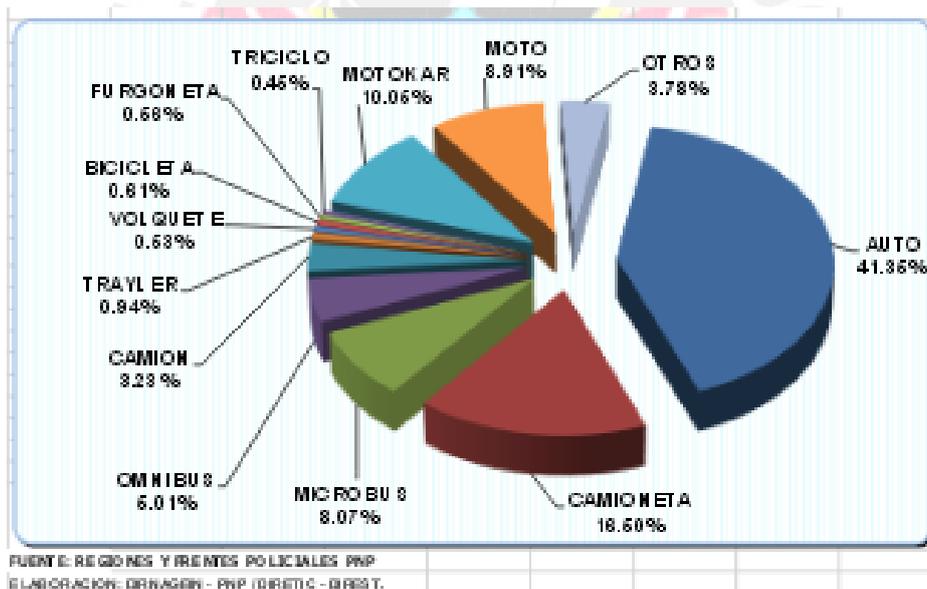
DEPARTAMENTO	TIPO DE VEHICULO													
	TOTAL	ALTO	CAMIONETA	MICROBUS	OMNIBUS	CAMION	TRACTOR	VOLQUETE	BICICLETA	FURGONETA	TRICICLO	MOTOCICLA	MOTO	OTROS
TOTAL	148 860	48 301	24 100	11 782	7 313	4 376	1 373	760	894	817	663	14 824	15 814	3 523
AMAZONAS	618	145	55	31	18	52	9	1	0	0	0	99	187	21
ANCASH	3 820	1 380	823	100	140	122	150	40	77	58	26	459	210	209
APURIMAC	814	167	165	40	33	78	12	11	3	8	76	73	108	110
AREQUIPA	8 112	4 214	1 611	340	523	370	122	91	52	13	18	119	300	180
AYACUCHO	1 290	374	377	27	53	84	30	10	6	2	0	151	102	54
CAJAMARCA	3 158	577	677	130	71	118	37	6	46	5	81	712	683	36
CUSCO	5 627	2 050	1 228	445	402	260	47	35	22	56	7	313	407	167
HUANUCAY	239	94	49	10	16	10	1	3	1	0	0	5	17	33
HUANUCAY	6 616	2 200	1 250	890	152	197	23	11	8	4	1	949	884	47
ICA	2 304	1 020	362	42	54	91	35	13	9	5	13	471	228	61
JUNON	3 507	1 244	538	276	80	171	19	28	46	8	7	417	562	113
LA LIBERTAD	6 278	1 908	1 125	307	208	286	51	56	62	8	121	470	507	279
LAMBAYEQUE	5 229	1 423	840	112	96	137	20	12	76	154	126	1 303	635	275
LIMA	77 379	38 115	12 041	7 561	4 428	1 963	404	205	318	81	104	5 439	3 443	3 487
CALLAO	4 612	1 932	734	300	333	216	235	43	46	3	10	205	268	177
LONTO	568	18	9	5	6	18	0	0	1	4	0	235	288	14
MADRE DE DIOS	673	43	35	24	3	13	1	1	2	2	0	103	408	6
MOQUEGUA	819	318	237	74	24	61	3	11	1	0	1	10	64	15
PASCO	503	20	14	1	3	5	0	1	15	28	56	118	226	16
PUNO	6 001	1 237	848	340	156	214	28	55	70	294	38	1 645	996	80
PUNO	1 199	287	367	114	63	58	20	14	11	0	30	54	142	43
SAN MARTIN	1 782	182	128	17	14	41	7	8	12	28	0	812	810	22
TACNA	2 188	1 055	381	187	207	60	7	5	3	23	2	26	199	31
TUMBES	692	178	97	30	9	23	7	2	3	5	4	105	118	12
UCAYALI	1 533	281	120	30	17	62	12	9	4	28	13	509	483	36

FUENTE: DIRECCIONES TERRITORIALES Y PROVINCIAS POLICIALES PNP  
ELABORACION: DURAN GEN - PNP / DURANTE - DURANTE

GRÁFICO 6: Vehículos participantes en accidentes de tránsito por tipo según departamentos en el año 2014.



**GRÁFICO 7A:** Vehículos involucrados en accidentes de tránsito por tipo en el año 2014.



**GRÁFICO 7B:** Distribución porcentual de tipos de vehículos involucrados en accidentes de tránsito en el año 2014.

Y finalmente en base a los gráficos 6, 7A y 7B, tenemos que de los 146060 autos siniestrados con 143514 conductores involucrados, **60391 (41,36%) son automóviles, 24100 (16,5%) son camionetas, 11780 (8,07%) son microbuses, 7318 (5,01%) son ómnibus** y sólo 4716 (3,23%) camiones. En resumen podemos observar que la pérdida de estabilidad y control en el vehículo, más si los viajes son con pasajeros, involucran cifras apreciables en los accidentes de tránsito.

## 2.2 Circulación de vehículos extranjeros “siniestrados” y repotenciados

Otra consideración a tomar en cuenta es la participación en el mercado nacional de vehículos procedentes del extranjero, que mediante una homologación o nacionalización por parte de **SUNAT [6]**, pueden circular en el país. Para esto se requieren ciertos documentos presentados en el Anexo 1, para cumplir normas mínimas de calidad para la importación de esos vehículos, los cuales son: requisitos mínimos de antigüedad (**GRÁFICOS 8A y 8B**), requisitos mínimos de kilometraje (**GRÁFICO 9**) y requisitos mínimos de siniestrabilidad (**GRÁFICO 10**). En relación al cumplimiento de estos requisitos mínimos de calidad para la importación al país de cualquier tipo de vehículo automotor, de transporte terrestre usados, de carga o de pasajeros y su autorización para la posterior operación en las carreteras de nuestro país, se observa que no se presenta una buena verificación ni una aprobación rigurosa de los mismos, tanto así que se nota en gran número la circulación de los llamados “vehículos siniestrados” de otros países que son traídos y fácilmente repotenciados para que se comercialicen y operen en nuestro país.

## 2.3 Otras Estadísticas sobre el derrape y el vuelco en el mundo

En muchos países ya se estudia de manera importante la continua racha de accidentes con vehículos. En España, por ejemplo, presentamos los siguientes gráficos publicados en el **Anuario Estadístico de Accidentes 2012 [7]**:

TIPO DE ACCIDENTE	TOTAL GENERAL				
	Accidentes con víctimas		Víctimas		
	Total	Mortales	Muertos	Heridos graves	Heridos leves
<b>COLISIÓN DE VEHÍCULOS EN MARCHA</b>					
Frontal	2.938	198	250	925	4.488
Fronto-lateral	16.874	178	241	1.951	22.357
Lateral	6.298	35	41	440	7.758
Por alcance	15.077	89	88	781	21.948
Múltiple o en caravana	4.581	51	77	334	9.050
<b>COLISIÓN VEHÍCULO-OBSTÁCULO EN CALZADA</b>					
Vehículo estacionado o averiado	598	13	14	90	634
Valla de defensa	123	6	6	44	112
Barrera de piso a nivel	29	0	1	1	32
Otro objeto o material	1.830	10	15	132	2.148
<b>ATROPELLO DE PERSONAS</b>					
Peatón sosteniendo bicicleta	149	3	3	19	148
Peatón reparando vehículo	27	2	2	9	34
Peatón aislado o grupo	9.842	279	350	1.810	9.011
Conductor de animales	10	0	0	2	8
<b>ATROPELLO DE ANIMALES</b>					
Conducido o en rebano	14	0	0	1	15
Animales sueltos	484	3	4	51	588
<b>VUELCO EN LA CALZADA</b>					
	2.951	39	47	481	2.882
<b>SALIDA DE CALZADA (CDA.)</b>					
Choque con árbol o poste	463	36	43	122	478
Choque con muro o edificio	749	27	30	132	869
Choque con cuneta o bordillo	795	27	32	135	821
Otro tipo de choque	1.465	59	73	223	1.749
Con despeñamiento	218	15	16	56	249
Con vuelco	1.157	57	69	223	1.400
En llano	387	21	24	109	373
Otra salida	174	3	3	21	200
<b>SALIDA DE CALZADA (DCHA.)</b>					
Choque con árbol o poste	781	50	55	183	848
Choque con muro o edificio	844	22	36	145	981
Choque con cuneta o bordillo	1.155	42	48	250	1.258
Otro tipo de choque	2.098	68	77	349	2.418
Con despeñamiento	332	33	36	111	351
Con vuelco	2.013	71	82	375	2.429
En llano	654	20	31	155	690
Otra salida	3.283	3	8	48	4.088
<b>OTRO TIPO DE ACCIDENTE</b>					
	4.918	83	101	758	5.073
<b>T O T A L</b>	<b>83.115</b>	<b>1.523</b>	<b>1.903</b>	<b>10.444</b>	<b>103.446</b>

Fuente: Anuario estadístico de accidentes 2012. Dirección General de Tráfico. Ministerio del Interior. ESPAÑA

**GRÁFICO 11:** Accidentes año 2012 España. Accidentes con víctimas en función del tipo de accidente.

Del cuadro del gráfico 11 se aprecia que de los 83115 accidentes registrados con 117790 víctimas (entre heridos leves, heridos graves y fallecidos) 2251 (2,71%) accidentes fueron **vuelco en la calzada** con 560 (0,48%) víctimas y 650 (0,78%) accidentes fueron **salida de la calzada con despistamiento** con 816 (0,69%) víctimas.

TIPO DE VEHÍCULO	NÚMERO DE VEHÍCULOS					
	TOTAL GENERAL		VÍAS INTERURBANAS		VÍAS URBANAS	
	En el total de accidentes con víctimas	En accidentes mortales	En el total de accidentes con víctimas	En accidentes mortales	En el total de accidentes con víctimas	En accidentes mortales
Vehículos de dos o tres ruedas:						
Bicicleta o triciclo sin motor	5.506	77	1.622	57	3.884	20
Ciclomotor	7.598	53	1.301	32	6.297	21
Coche de minusválido	16	1	2	0	14	1
Moto	18.927	288	5.021	193	13.906	95
Vehículos ligeros:						
Turismos S.P. hasta 9 plazas	1.371	9	78	7	1.293	2
Turismos otros	93.990	1.334	42.182	1.095	51.808	239
Ambulancia	85	3	28	2	57	1
Máquina obras y agrícola	90	10	56	6	34	4
Tractor agrícola	239	28	203	20	36	8
Furgoneta	7.590	160	3.772	134	3.818	26
Camiones de -3.500 Kg	1.910	59	1.017	45	893	14
Vehículos pesados:						
Camiones de +3.500 Kg	1.851	121	1.591	107	260	14
Vehículos articulados	932	97	869	93	63	4
Bus escolar	42	3	25	2	17	1
Otro bus	1.703	27	277	19	1.426	8
Otros vehículos:						
Tren	38	2	9	2	29	0
Carro	13	0	7	0	6	0
Otros	1.315	55	825	48	490	7
No especificados	440	23	264	18	176	5
<b>TOTAL VEHÍCULOS</b>	<b>143.656</b>	<b>2.348</b>	<b>59.149</b>	<b>1.880</b>	<b>84.507</b>	<b>468</b>

Fuente: Anuario estadístico de accidentes 2012. Dirección General de Tráfico. Ministerio del Interior. ESPAÑA

**GRÁFICO 12:** Accidentes año 2012 España. Vehículos, según tipo, que han intervenido en los accidentes en función de su gravedad.

Del cuadro del gráfico 12 observamos que se registraron **105291 accidentes con víctimas en vehículos con pasajeros**, de los cuales 47767 sucedieron en vías interurbanas y 57524 en vías urbanas; se aprecia que **102951 accidentes fueron en vehículos ligeros** (46032 en vías interurbanas y 56919 en vías urbanas), 974 en vehículos pesados (894 en interurbanas y 80 en vías urbanas) y 1366 entre carro, tren y otros vehículos (841 en vías interurbanas y 525 en vías urbanas).

Características de la vía	Número de accidentes			Número de víctimas		
	Mortales	Con heridos	Total	Muertos	Heridos	Total
<b>INTERSECCIÓN</b>						
En T o Y	78	2.889	2.947	101	4.676	4.777
En X o +	38	1.182	1.220	49	2.072	2.121
Enlace de entrada	10	996	1.006	13	1.552	1.565
Enlace de salida	23	607	630	28	968	996
Giratoria	16	2.339	2.355	24	3.359	3.383
Otras	5	314	319	9	512	521
<b>TOTAL</b>	<b>170</b>	<b>8.307</b>	<b>8.477</b>	<b>224</b>	<b>13.139</b>	<b>13.363</b>
<b>FUERA DE INTERSECCIÓN</b>						
Recta	499	16.286	16.785	607	25.675	26.282
Curva suave	311	5.237	5.548	363	8.265	8.628
Curva fuerte sin señalizar	41	967	1.008	49	1.483	1.532
Curva fuerte con señal y sin velocidad señalizada	62	1.275	1.337	88	1.974	2.062
Curva fuerte con señal y velocidad señalizada	94	2.176	2.270	111	3.444	3.555
<b>TOTAL</b>	<b>1.007</b>	<b>25.941</b>	<b>26.948</b>	<b>1.218</b>	<b>40.841</b>	<b>42.059</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>1.177</b>	<b>34.248</b>	<b>35.425</b>	<b>1.442</b>	<b>53.980</b>	<b>55.422</b>

Fuente: Anuario estadístico de accidentes 2012. Dirección General de Tráfico. Ministerio del Interior. ESPAÑA

**GRÁFICO 13:** Accidentes año 2012 España. Accidentes con víctimas según las características de la vía, en vía interurbana.

Del cuadro del gráfico 13 vemos que en vías interurbanas, 5548 accidentes con 8628 víctimas se registraron **en curvas suaves**, 1008 accidentes con 1532 víctimas ocurrieron en **curva fuerte sin señalizar**, 1337 accidentes con 2062 víctimas sucedieron en **curva fuerte señalizada sin velocidad indicada** y 2270 accidentes con 3552 víctimas acaecieron en **curva fuerte señalizada pero con velocidad indicada**.

Características de la vía	Número de accidentes			Número de víctimas		
	Mortales	Con heridos	Total	Muertos	Heridos	Total
<b>INTERSECCIÓN</b>						
En T o Y	34	5.796	5.830	54	7.399	7.453
En X o +	51	11.789	11.840	78	15.810	15.888
Enlace de entrada	1	225	226	1	320	321
Enlace de salida	0	97	97	0	127	127
Giratoria	15	3.786	3.801	18	5.050	5.068
Otras	4	927	931	6	1.209	1.215
<b>TOTAL</b>	<b>105</b>	<b>22.620</b>	<b>22.725</b>	<b>157</b>	<b>29.915</b>	<b>30.072</b>
<b>FUERA DE INTERSECCIÓN</b>						
Recta	196	22.439	22.635	246	28.903	29.149
Curva suave	40	2.018	2.058	50	2.718	2.768
Curva fuerte sin señalizar	2	147	149	4	203	207
Curva fuerte con señal y sin velocidad señalizada	0	46	46	0	61	61
Curva fuerte con señal y velocidad señalizada	3	74	77	4	110	114
<b>TOTAL</b>	<b>241</b>	<b>24.724</b>	<b>24.965</b>	<b>304</b>	<b>31.995</b>	<b>32.299</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>346</b>	<b>47.344</b>	<b>47.690</b>	<b>461</b>	<b>61.910</b>	<b>62.371</b>

Fuente: Anuario estadístico de accidentes 2012. Dirección General de Tráfico. Ministerio del Interior. ESPAÑA

**GRÁFICO 14:** Accidentes año 2012 España. Accidentes con víctimas según las características de la vía, en vía urbana.

Del cuadro del gráfico 14 vemos que en vías urbanas, 2058 accidentes con 2768 víctimas se registraron en **curvas suaves**, 149 accidentes con 207 víctimas ocurrieron en **curva fuerte sin señalizar**, 46 accidentes con 61 víctimas sucedieron en **curva fuerte señalizada sin velocidad indicada** y 77 accidentes con 114 víctimas acaecieron en **curva fuerte señalizada pero con velocidad indicada**.

Estos datos junto a las conclusiones de los estudios de accidentes [8] y unidos al análisis para el establecimiento de sistemas de seguridad automotriz [9] realizados también en España, muestran que los tipos de accidentes con apreciable número de víctimas son los vuelcos, los choques frontales con otros vehículos en mayor cantidad con camiones, y los despistes.

## 2.4 Alternativas de solución ante el derrape y el vuelco

Las estadísticas presentadas con los detalles mostrados, han originado que las autoridades de los sectores correspondientes de muchos países, busquen en la investigación y en la reglamentación, posibilidades de solución al problema del derrape y el vuelco.

### 2.4.1 Solución mediante la Investigación

En lo referido a la investigación, las alternativas apuntan al análisis teórico de la actividad del vehículo, a fin de establecer algunas relaciones matemáticas que definan un mapa de variables con las correspondientes magnitudes que definan ese *umbral de vuelco*, mediante la *velocidad crítica de derrape* y/o la *velocidad crítica de vuelco* [10]; para el análisis, hay diversas consideraciones en los estudios presentados:

- El más simple de estos modelos matemáticos supone un vehículo totalmente rígido (es decir, no consideran la suspensión del mismo) como una primera aproximación al valor de ese *umbral de vuelco* y por lo tanto, a las magnitudes críticas de las velocidades de derrape y de vuelco [11];
- En cambio otros autores [12], en su modelo matemático si consideran la influencia de la suspensión y establecen, en relación al plano longitudinal medio del vehículo, un centro de balanceo de suspensión (punto de aplicación de las reacciones entre la suspensión-masa suspendida) y un centro de balanceo de las ruedas (punto de aplicación de las reacciones rueda-piso). Para este análisis el punto de partida es un sistema plano y no un vehículo en tres dimensiones, y dentro de las consideraciones asumen que todas las ruedas tienen el mismo ángulo de despegue de la superficie o ángulo de deriva y también consideran que por la gran rigidez de la estructura, todos los ejes despegan a la vez del piso;
- Para los autores que si plantean un análisis tridimensional [13], no consideran la rigidez de torsión de la estructura y desprecian la rigidez lateral de las ruedas, y en su análisis y cálculos desprecian los términos en senos de ángulos entre  $70^\circ$  y  $90^\circ$  y/o los términos en cosenos de ángulos menores de  $20^\circ$ . Por otro lado, no toman en cuenta la posibilidad de que el centro de balanceo o el centro de gravedad estén alejados del plano longitudinal medio del vehículo.

### 2.4.2 Solución mediante la Reglamentación

Y en cuanto a la reglamentación, algunos países han establecido ensayos en laboratorios y en carretera:

**PRIMER ENSAYO:** que consiste en ubicar el vehículo sobre una plataforma que puede inclinarse alrededor de uno de sus lados hasta provocar el inicio del vuelco, bajo criterios ya establecidos y que también puede recoger datos acerca de daños de la carrocería, respecto a su posición final frente a los pasajeros y que deben cumplir ciertas condiciones de supervivencia establecidas en su reglamentación. Ejemplos de este ensayo y su evolución se presentan en las figuras siguientes:



**Fig. 3:** Prueba de inclinación al famoso autobús de Londres.

La fotografía de la Fig. 3 (tomada de “Memories of a London and UK Runner” [14] del jueves 15 de Diciembre de 20011, referida a “The History of the London bus” (II) ) representa una de las pruebas de vuelco que se realizaban en 1933, a los autobuses de dos pisos de la Compañía London General Ómnibus. Para declararlos aptos para el servicio, el vehículo debía superar una inclinación lateral de 28 grados sexagesimales como mínimo.



**Fig. 4:** En la actualidad el ensayo de inclinación lateral.

Y la fotografía de la Fig. 4 (tomada del “Ensayo de estabilidad para micros doble piso” publicada en Saber Cómo N° 77/ Junio de 2009) [15], fue realizado por el INTI al haber sido designado por la Secretaría de Transporte de la Nación en Argentina para mejorar la estabilidad en estos diseños.

El ensayo se realiza con carga completa (con barriles con agua que simulan el peso de los pasajeros) y en condición de marcha, inclinando lentamente la plataforma hasta que alcanza los 28 grados sexagesimales. Durante el desarrollo de la prueba sólo los neumáticos están en contacto con la plataforma. Es de precisar que los micros doble piso datan de los años 80 y para el 2009 conformaban el 90 % de la flota de más de 4000 colectivos de larga distancia que circulaban por Argentina.

**SEGUNDO ENSAYO:** que consiste en realizar pruebas en curvas (peralte y radio de curvatura conocidos) y tramos rectos (longitud y velocidad máxima también conocidos), para estudiar el comportamiento dinámico del vehículo.

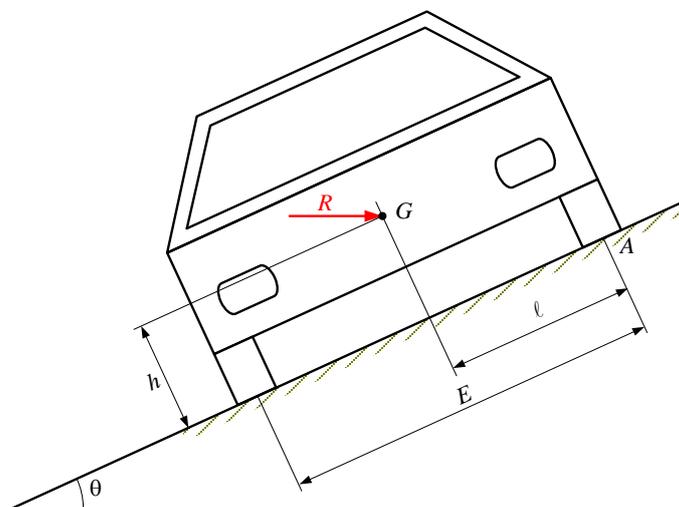
## CAPÍTULO 3: EXPRESIONES DE LA VELOCIDAD DE DERRAPE Y DE LA VELOCIDAD DE VUELCO

El análisis del movimiento del vehículo se realiza con las siguientes premisas:

- 1) Consideramos al vehículo como un sistema plano, con lo cual sólo utilizaremos la altura ( $h$ ) y la componente transversal ( $\ell$ ) del Centro de Gravedad y no la componente longitudinal del mismo.
- 2) No se considerará para éste análisis ni la suspensión de la carrocería ni la suspensión de los neumáticos, al considerar al vehículo como un sólido con suspensión rígida, en otras palabras, no hay influencia apreciable en la variación del Centro de Gravedad debido a la flexibilidad del sistema.
- 3) Para este estudio teórico, analizando la sección transversal del vehículo, se considerará las situaciones críticas de derrape y de vuelco en el mismo instante.

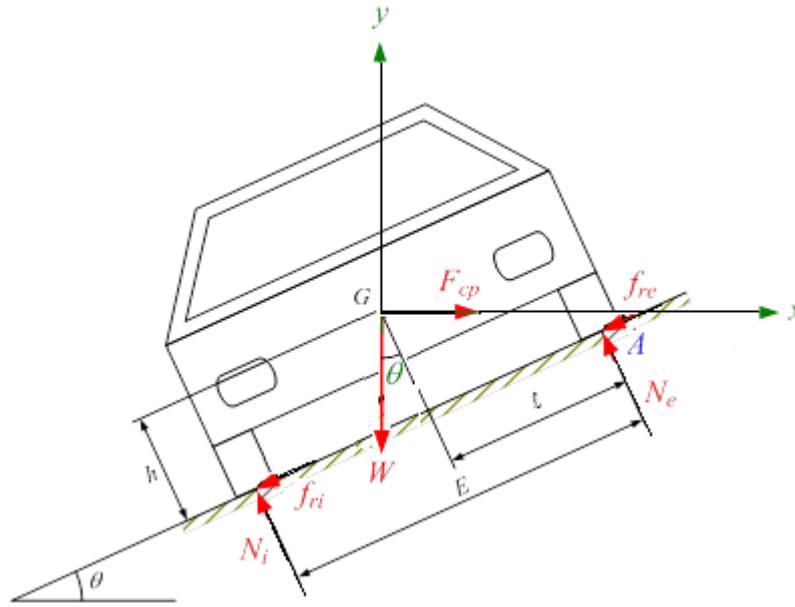
### 3.1 Equilibrio de Fuerzas Externas

En el análisis se considera el movimiento de un vehículo a velocidad constante  $v$ , en una curva de radio  $R$  con peralte definido por su ángulo de inclinación respecto a la horizontal  $\theta$  y ubicando su Centro de Gravedad  $G$  a una altura  $h$  de la superficie de rodadura y a una longitud de la rueda exterior  $\ell$  según la Fig. 5, siendo el coeficiente de rozamiento entre las ruedas del vehículo y la pista  $\mu$ , tomando  $E$  como la distancia entre las ruedas, tendremos:



**Fig. 5:** Movimiento de un vehículo en curva con peralte.

Por la cinética del movimiento analizaremos las cargas sobre el vehículo desde un sistema no Inercial, con lo cual la suma de Fuerzas deberá ser igual a cero, por la presencia de la Fuerza de arrastre  $F_{cp}$ . En la Fig. 6 mostramos el D.C.L. del sólido rígido, visto desde el propio vehículo:



**Fig. 6** D. C. L. del vehículo en curva con peralte.

Definimos para el D.C.L. las siguientes variables:

$W$  peso total del vehículo, incluidos pasajeros

$N_i, N_e$  fuerzas normales de la pista sobre las ruedas

$f_{ri}, f_{re}$  fuerzas de rozamiento entre las ruedas y la pista

$F_{cp}$  fuerza centrípeta, como la fuerza de arrastre.

### 3.1.1 Expresión de la velocidad de derrape

Sabemos:  $f_{ri} = \mu N_i$  y  $f_{re} = \mu N_e$  (I)

de la Fig. 6, según segunda ley de Newton para el eje y:

$$\sum F_y = 0: \quad (N_i + N_e) \cos \theta - (f_{ri} + f_{re}) \operatorname{sen} \theta - W = 0$$

de (I):  $(N_i + N_e) \cos \theta - \mu (N_i + N_e) \operatorname{sen} \theta = W$

$$\rightarrow N_i + N_e = \frac{W}{\cos \theta - \mu \operatorname{sen} \theta} \quad (\text{II})$$

Ahora para el eje x:

$$\sum F_x = 0: \quad -(N_i + N_e) \operatorname{sen} \theta - (f_{ri} + f_{re}) \cos \theta + F_{cp} = 0$$

también de (I):  $(N_i + N_e) \operatorname{sen} \theta + \mu (N_i + N_e) \cos \theta = F_{cp}$

$$\rightarrow (N_i + N_e) (\operatorname{sen} \theta + \mu \cos \theta) = F_{cp}$$

de (II):  $\frac{W}{\cos \theta - \mu \operatorname{sen} \theta} (\operatorname{sen} \theta + \mu \cos \theta) = F_{cp} \quad (\text{III})$

Sabemos también que:  $F_{cp} = \frac{W v^2}{g R}$

en (III):  $W \frac{\mu \cos \theta + \operatorname{sen} \theta}{\cos \theta - \mu \operatorname{sen} \theta} = \frac{W v^2}{g R}$

finalmente:  $v = \sqrt{g R \left( \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \right)}$

Podemos observar que la variación del radio de curvatura  $R$ , la variación del coeficiente de fricción cinético entre las ruedas y la pista  $\mu$  y la variación del peralte definido por su ángulo de inclinación respecto a la horizontal  $\theta$ , harán variar la velocidad de movimiento del vehículo en la curva, y a la cual llamaremos ahora velocidad de derrape  $v_d$ :

$$v_d = \sqrt{g R \left( \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \right)} \quad (\text{IV})$$

### 3.2 Equilibrio de Torques de Fuerzas Externas

Nuevamente a partir del D.C.L. del vehículo en curva con peralte, establecemos ahora el Sistema equivalente de Torques de Fuerzas externas igual a cero.

#### 3.2.1 Expresión de la velocidad de vuelco

Para este caso, también de la Fig. 6, tenemos:  $\sum M_A = 0$

donde:

- $N_i$  normal del piso a la rueda interior del vehículo
- $E$  distancia frontal entre las ruedas del vehículo
- $W$  peso del vehículo
- $h, \ell$  coordenadas del C.G. respecto a la rueda exterior del vehículo
- $\theta$  ángulo de inclinación de la superficie, respecto a la horizontal

$$-N_i E + W(\ell \cos \theta + h \operatorname{sen} \theta) + F_{cp}(\ell \operatorname{sen} \theta - h \cos \theta) = 0$$

$$N_i E = W(\ell \cos \theta + h \operatorname{sen} \theta) + \frac{W v^2}{g R}(\ell \operatorname{sen} \theta - h \cos \theta)$$

$$N_i = W\left(\frac{\ell}{E} \cos \theta + \frac{h}{E} \operatorname{sen} \theta\right) + \frac{W v^2}{g R}\left(\frac{\ell}{E} \operatorname{sen} \theta - \frac{h}{E} \cos \theta\right)$$

$$\frac{W v^2}{g R}\left(\frac{h}{E} \cos \theta - \frac{\ell}{E} \operatorname{sen} \theta\right) = W\left(\frac{\ell}{E} \cos \theta + \frac{h}{E} \operatorname{sen} \theta\right) - N_i$$

$$v^2 = gR \left[ \left[ \frac{\tan \theta + \frac{\ell}{h}}{1 - \frac{\ell}{h} \tan \theta} \right] - \frac{N_i}{W} \left[ \frac{E}{h \cos \theta - \ell \operatorname{sen} \theta} \right] \right]$$

Finalmente: 
$$v = \sqrt{gR \left[ \left[ \frac{\tan \theta + \frac{\ell}{h}}{1 - \frac{\ell}{h} \tan \theta} \right] - \frac{N_i}{W} \left[ \frac{E}{h \cos \theta - \ell \operatorname{sen} \theta} \right] \right]} \quad (\text{V})$$

De forma similar al análisis de Fuerzas, podemos observar ahora que la variación del radio de curvatura de la curva  $R$ , la variación de la posición del Centro de Gravedad del vehículo, la variación de la separación entre las ruedas  $E$  y la variación del peralte definido por su ángulo de inclinación respecto a la horizontal  $\theta$ , harán variar la velocidad de movimiento del vehículo en la curva, y a la cual denominaremos *velocidad de vuelco*. Para esta expresión de la velocidad de vuelco (Fórmula V), obtenemos que la condición crítica de vuelco se presentara cuando  $N_i$  sea cero, siempre y cuando:

$$h \cos \theta \neq \ell \operatorname{sen} \theta$$

$$\rightarrow \tan \theta \neq \frac{h}{\ell}$$

con lo cual la expresión para la velocidad de vuelco  $v_v$  sería ahora:

$$v_v = \sqrt{g R \left( \frac{\frac{\ell}{h} + \tan \theta}{1 - \frac{\ell}{h} \tan \theta} \right)} \quad (\text{VI})$$

### 3.3 Resumen

Comparando la expresión de la fórmula (IV), de la velocidad de derrape:

$$v_d = \sqrt{g R \left( \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \right)}$$

con la expresión de la fórmula (VI), para la velocidad de vuelco:

$$v_v = \sqrt{g R \left( \frac{\frac{\ell}{h} + \tan \theta}{1 - \frac{\ell}{h} \tan \theta} \right)}$$

Observamos que ambas tienen expresiones análogas, pudiendo cambiar indistintamente la magnitud del coeficiente de fricción  $\mu$  por la relación entre las magnitudes del Centro de Gravedad del sólido ( $\ell/h$ ) para obtener correspondientemente, la **velocidad de derrape** o la **velocidad de vuelco**.

Según lo anterior, podemos distinguir 3 situaciones posibles:

a) Si  $\mu = \frac{\ell}{h} \Rightarrow v_d = v_v$

Simultáneamente existe vuelco con derrape;

b) Si  $\mu > \frac{\ell}{h} \Rightarrow v_d > v_v$

Tiende a volcar sin llegar a derrapar;

c) Si  $\mu < \frac{\ell}{h} \Rightarrow v_v > v_d$

Se presenta el derrape antes del vuelco.

### 3.4 Tendencias de la velocidad de derrape

Para la expresión de la velocidad de derrape (Fórmula IV) y bajo criterios de seguridad para evitar el deslizamiento transversal del vehículo, se establecen las velocidades de ingreso a las curvas relacionados con un radio mínimo de curvatura de la carretera, un

coeficiente de fricción máximo con la pista y un peralte máximo aceptable y con la combinación de esos datos podremos definir la *velocidad crítica de derrape*.

Las magnitudes de estos valores propios de las carreteras las tomaremos del “**Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito**” del **Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú [16]**. Este Manual presentado a partir de toma de datos en carreteras y con aplicación del diseño geométrico y los cálculos para la operación de los vehículos, nos indica primero que los valores mostrados son los mínimos normales que representan el límite inferior de tolerancia en el diseño y segundo que las especificaciones del manual constituyen una norma de carácter mandatorio.

En principio, comenzaremos con anotar que de acuerdo a la clasificación funcional de cada carretera, se define un ancho mínimo de la misma, según la tabla siguiente:

**TABLA 1:** Ancho mínimo de carretera según su funcionabilidad.

Descripción	Ancho mínimo absoluto *
Carreteras de la Red Vial Nacional	15 m
Carreteras de la Red Vial Departamentales o Regional	15 m
Carreteras de la Red Vial Vecinal o Rural	15 m

\* 7.50 m a cada lado del eje

*Fuente: Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Ministerio de Transportes y Comunicaciones- Perú*

En las curvas, en el tránsito mismo, se hace necesario aumentar el ancho de la carretera por el efecto de operación del vehículo, comparable a la de las tangentes, y porque a la mayoría de conductores se le hace difícil mantener el vehículo en el centro del carril. En la siguiente tabla se presentan las medidas del sobre-ancho de la carretera recomendadas en función del radio de curvatura y la velocidad de ingreso a la misma:

**TABLA 2:** Sobre-ancho de la carretera en curvas (pistas de 2 carriles de circulación).

<i>Velocidad</i> (km/h)	<i>Radio de curvatura (m)</i>								
	10	15	20	30	40	50	60	80	100
20	6,52	6,52	4,73	3,13	2,37	1,92	1,62	1,24	1,01
30			4,95	3,31	2,53	2,06	1,74	1,35	1,11
40					2,68	2,20	1,87	1,46	1,21
50								1,57	1,31
60									1,41

*Fuente: Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Ministerio de Transportes y Comunicaciones- Perú*

Según la Tabla 2 observamos que para curvas de radios mayores a 100 metros, no es necesario el sobre-ancho debido a que no es apreciable por el del ancho del vehículo. A manera de información, el Manual indica que para velocidades menores de 50 (km/h) no se necesita sobre-ancho si el radio de curvatura es mayor de 500 m y por otro lado tampoco se requerirá algún sobre-ancho cuando las velocidades estén comprendidas entre 50 y 60 (km/h) y el radio de curvatura sea mayor a 800m.

### 3.4.1 Influencia del radio de curvatura de la curva

Para las curvas de alineamiento horizontal (curvas horizontales) se recomienda en el Manual no considerar los radios mínimos y así evitar los cambios bruscos de curvas de grandes radios a otras de radios muchos menores. Es preferible graduar en forma decreciente esa variación antes de alcanzar el radio mínimo.

A continuación se detallan velocidades de ingreso a las curvas en (km/h), a partir del valor del radio de curvatura de la curva en (m):

**TABLA 3:** Velocidad de derrape en la curva, en función del radio de curvatura

<i>Radio</i> (m)	<i>Velocidad</i> (km/h)
24	20
55	30
95	40
150	50
210	60

*Fuente: Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Ministerio de Transportes y Comunicaciones- Perú*

### 3.4.2 Influencia del ángulo de peralte

Siempre bajo el criterio del “Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito” se define al peralte de una carretera en curva ( $e$ ), como la variación de elevación de la parte exterior respecto de la parte interior de la misma, para compensar a la imaginaria fuerza centrífuga. Esta definición la consideran en porcentaje, Las curvas horizontales deben ser peraltadas, considerando un valor máximo ( $e_{\max}$ ) de 8 % y excepcionalmente un valor de ( $e_{\max}$ ) hasta de 10 %. Se acepta para carreteras afirmadas y bien drenadas un peralte máximo ( $e_{\max}$ ) de 12 %.

### 3.4.3 Influencia del coeficiente de fricción

Según los términos presentados en el “Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito” el coeficiente de fricción ( $\mu_{\max}$ ) se considera como una fricción transversal y la velocidad en (km/h) tomará los siguientes valores, de acuerdo a las magnitudes máximas dadas en la Tabla siguiente:

**TABLA 4:** Velocidad de derrape en la curva, en función del coeficiente de fricción máximo de la pista.

<b>Coeficiente de fricción máx.</b> $\mu_{\max}$	<b>Velocidad</b> (km/h)
0,18	20
0,17	30
0,17	40
0,16	50
0,15	60

*Fuente: Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Ministerio de Transportes y Comunicaciones- Perú*

### 3.5 Velocidad crítica de derrape

Como consecuencia de los cuadros anteriores, el “Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito” establece un valor crítico de la velocidad de ingreso a una curva, a partir de la siguiente relación:

$$v_{cd}^2 = 127 R_{\min} (0,01 e_{\max} + \mu_{\max})$$

donde:

- $v_{cd}$  velocidad crítica de derrape en (km/h)
- $R_{\min}$  radio mínimo de curvatura en (m)
- $e_{\max}$  peralte máximo (%)
- $\mu_{\max}$  coeficiente de fricción máximo (adimensional)

**TABLA 5:** Velocidad crítica de derrape  $v_{cd}$  según valores críticos del radio de curvatura, el peralte y el coeficiente de fricción.

<i>Radio mínimo de curvatura</i> $R_{\min}$ (m)	<i>Peralte máximo</i> $e_{\max}$ (%)	<i>Coficiente de fricción máximo</i> $\mu_{\max}$	<i>Velocidad</i> (km/h)
15	4,0	0,18	20
35	4,0	0,17	30
60	4,0	0,17	40
100	4,0	0,16	50
150	4,0	0,15	60
15	6,0	0,18	20
30	6,0	0,17	30
55	6,0	0,17	40
90	6,0	0,16	50
135	6,0	0,15	60
10	8,0	0,18	20
30	8,0	0,17	30
50	8,0	0,17	40
80	8,0	0,16	50
125	8,0	0,15	60
10	10,0	0,18	20
25	10,0	0,17	30
45	10,0	0,17	40
75	10,0	0,16	50
115	10,0	0,15	60
10	12,0	0,18	20
25	12,0	0,17	30
45	12,0	0,17	40
70	12,0	0,16	50
105	12,0	0,15	60

Fuente: Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Ministerio de Transportes y Comunicaciones- Perú

### 3.6 Tendencias de la velocidad de vuelco

Ahora ante la variación del radio de curvatura de la curva  $R$ , con la variación de la posición del Centro de Gravedad del vehículo, y participando la variación del peralte, con la observación que no hay influencia de la distancia frontal entre las ruedas según la expresión obtenida, observamos que habrá variación de la velocidad de movimiento del vehículo en la curva, con lo cual se podrá establecer la velocidad crítica de vuelco.

#### 3.6.1 Influencia del radio de curvatura de la curva

Aprovechando las observaciones establecidas para las fórmulas análogas entre la velocidad de derrape y la velocidad de vuelco, también podemos establecer la dependencia de la velocidad de vuelco en (km/h) según el radio de curvatura de la curva en (m), usando también la Tabla 3 de la pag. 39.

#### 3.6.2 Influencia del ángulo de peralte

Usando también la analogía entre las expresiones para la velocidad de derrape y para la velocidad de vuelco, consideraremos que las curvas horizontales debieran tener peralte máximo  $e_{max}$  entre 8 % y ocasionalmente un valor de 10 %. Tomaremos asimismo la indicación de que para carreteras afirmadas y bien drenadas el peralte máximo se podría tomar hasta un 12 %.

#### 3.6.3 Influencia de la distancia frontal entre las ruedas del vehículo

A partir de establecer la magnitud crítica para la velocidad de vuelco, tomando la condición de que  $N_i$  sea cero, siempre y cuando:

$$h \cos \theta \neq \ell \operatorname{sen} \theta \quad \rightarrow \quad \tan \theta \neq \frac{h}{\ell}$$

Donde, como se ha definido antes:

$h, \ell$  coordenadas del C.G. respecto a la rueda exterior del vehículo

$\theta$  ángulo de inclinación de la superficie, respecto a la horizontal

Con lo cual podemos afirmar que la distancia frontal entre las ruedas del vehículo, para nuestro análisis particular, no influye en el valor de la velocidad de vuelco.

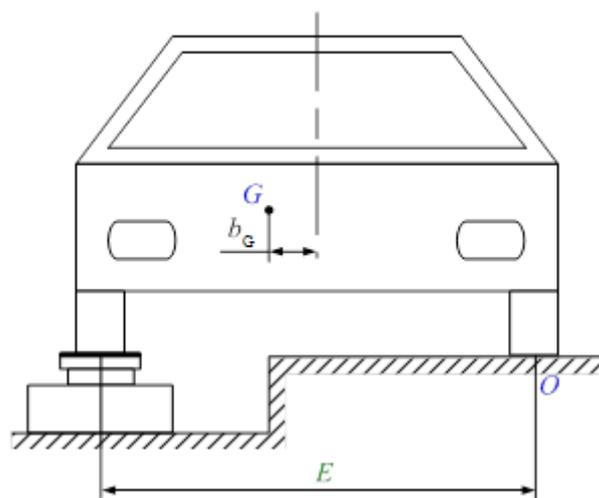
### 3.6.4 Influencia del Centro de Gravedad del vehículo

Como se ha indicado, las magnitudes del Centro de Gravedad que vamos a considerar son la cota transversal ( $\ell$ ) y la altura del mismo ( $h$ ). Para esto, debemos tener presente y experimentalmente como se pueden obtener dichas magnitudes.

#### 3.6.4.1 Cota Transversal del Centro de Gravedad ( $\ell$ )

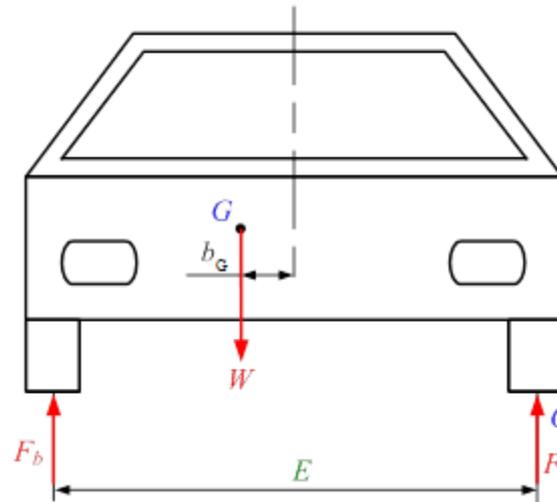
Teóricamente, los autobuses deberían ser simétricos respecto al Eje Longitudinal, pero debido a la presencia de los elementos motores, energéticos, eléctricos y demás del vehículo, no lo son. Como se ha definido como premisa no considerar análisis de tales sistemas y en base a la asimetría que se presenta, es importante conocer la posición transversal del Centro de Gravedad ( $\ell$ ).

Para determinar la cota transversal, se ubica el vehículo con una de sus ruedas (izquierda o derecha) sobre la plataforma de una balanza, como se muestra en la Fig. 7:



**Fig. 7** Montaje para la determinación de la posición transversal del Centro de Gravedad con una balanza.

Mediante la balanza conocemos el valor de  $F_b$ , y planteamos la ecuación de equilibrio de Torques respecto a  $O$ , de la Fig. 8:



**Fig. 8** Determinación de la posición transversal del Centro de Gravedad con una balanza.

$$\sum M_O = 0: \quad W(0,5E + b_G) - F_b E = 0$$

$$b_G = \frac{E}{W}(F_b - 0,5W)$$

donde:

$W$  peso total del vehículo

$E$  distancia frontal entre las ruedas del vehículo

$F_b$  peso total aparente del vehículo dado por la balanza

$b_G$  distancia horizontal del Centro de Gravedad al plano longitudinal medio del vehículo.

Si el valor de  $b_G$  sale positivo, el CG se desplaza en dirección a la plataforma de la balanza respecto a ese plano longitudinal medio, como se muestra en la Fig. 8. De resultar negativo el valor de  $b_G$ , el CG se ubica hacia el lado opuesto. Para ambos casos, en nuestra definición:

$$\ell = 0,5E \pm b_G$$

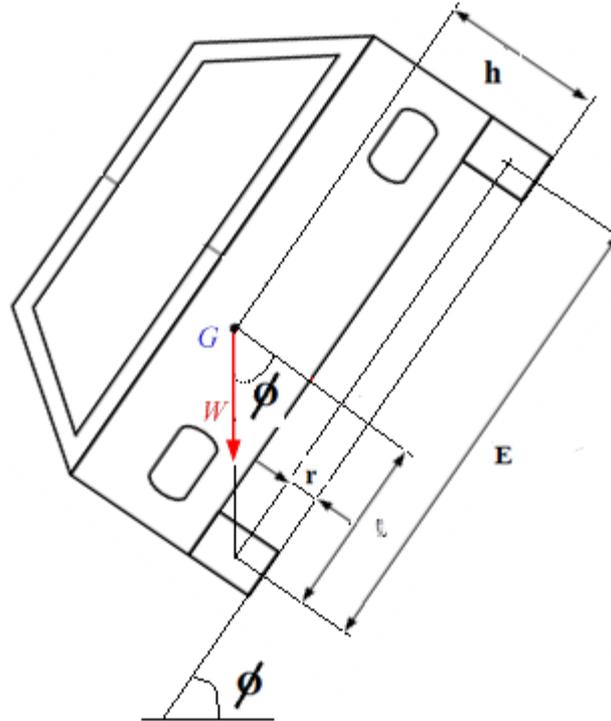
### 3.6.4.2 Altura del Centro de Gravedad ( $h$ )

Se determina la altura del Centro de Gravedad ( $h$ ) con un ensayo de Estabilidad Lateral definido en los Reglamentos Europeos específicamente el número 66 [17] que busca garantizar la resistencia estructural al vuelco del vehículo. Consiste en ubicar al vehículo sobre una plataforma que puede girar alrededor de un eje longitudinal hasta el punto de inicio del vuelco, de  $28^\circ$  para vehículos de dos pisos y de  $35^\circ$  para los de uno. Se colocan unos topes laterales que sólo tienen contacto con las ruedas para evitar que el vehículo deslice transversalmente. Es importante además que el vehículo se ensaye en las condiciones de carga más desfavorables, para el caso de vehículos de dos pisos descargado en el inferior y cargado en el superior, como se indica en las condiciones del ensayo.

Se va aumentando lentamente el ángulo de inclinación hasta lograr la inestabilidad del vehículo (vuelco) que se evita con unos dispositivos de amarre en la parte inferior de la plataforma y se mide el ángulo girado considerando al vehículo como un sólido rígido.

Conociendo:

- $W$  peso del vehículo
- $E$  distancia frontal entre las ruedas
- $\ell$  cota transversal del Centro de Gravedad
- $r$  distancia al suelo del eje longitudinal de la sección de la rueda alrededor de la cual se produce el balanceo
- $\phi$  ángulo de inclinación de la plataforma a la cual se produce el vuelco



**Fig. 9:** Determinación de la altura del Centro de Gravedad.

de la Fig. 9, tenemos:

$$\tan \phi = \frac{\ell}{h - r}$$

$$h = r + \frac{\ell}{\tan \phi}$$

Este ensayo presenta inconvenientes pues se debe bloquear totalmente la suspensión del vehículo, se supone la rueda de sección transversal redonda, esto es, un solo punto de contacto con el suelo y obviamente el combustible, aceites y otros líquidos deben ser retirados del vehículo.

### 3.6.4.3 Consideraciones previas para la relación $(\ell/h)$

Vistas la dependencia de la relación  $(\ell/h)$  en la fórmula para la velocidad de vuelco, y con las expresiones de:

$$\ell = 0,5E \pm b_G$$

$$h = r + \frac{\ell}{\text{tg}\phi}$$

Vamos a considerar la magnitud de  $b_G$  con su valor negativo, para hallar el valor crítico para la velocidad de vuelco, puesto que ahora el valor de:

$$\ell = 0,5 E - b_G$$

sería el menor, con lo cual el valor de:

$$h = r + \frac{\ell}{\operatorname{tg}\phi}$$

también sería menor y en la fórmula (VI), la velocidad de vuelco tendería a ser mayor.

En la siguiente Tabla, mostramos características de algunos buses:

**TABLA 6:** Fabricantes y Modelos de algunos buses interprovinciales.

<i>Fabricante (Marca)</i>	<i>Modelo</i>
Neoplan Bus GmbH	Neoplan StarlinerL [18]
Marcopolo New Flyer	Mercobus Paradiso 1800 G7 [19]
Modasa	Bus Zeus II [20]
Carrocerías Tarma	Bus Turístico Tarma [21]
Coach Service	DD45 Double Decker [22]
Neoplan Bus GmbH	Neoplan Skyliner [23]

Con lo cual en la siguiente Tabla tenemos:

**TABLA 7:** Dimensiones de algunos buses interprovinciales.

<i>MODELO</i>	<i>Altura bus: H(mm)</i>	<i>Longitud bus: L(mm)</i>	<i>Distancia frontal Entre ruedas: E(mm)</i>
NEOPLAN STARLINER L	3880	13990	2100
MERCOBUS PARADISO1800 G7	4100	14000	2600
BUS ZEUS II	4170	15000	2600
BUS TURÍSTICO TARMA	3800	11000	2100
DD45 DOUBLE DECKER	4000	13900	2200
NEOPLAN SKYLINER	4000	13790	2200

A partir de estos datos y considerando los valores de:

$$b_G = 300 \text{ mm}$$

$$r = 550 \text{ mm}$$

$$\phi = 28^\circ,$$

hallamos las magnitudes correspondientes para  $\ell$  y  $h$ :

**TABLA 8:** Dimensiones de  $\ell$  y  $h$ , para algunos buses interprovinciales.

<b>MODELO</b>	$H/2$ (mm)	$E/2$ (mm)	$b_G$ (mm)	$\ell$ (mm)	$r$ (mm)	$h$ (mm)
NEOPLAN STARLINER L	1940	1050	300	750	550	1961
MERCOBUS PARADISO1800 G7	2050	1300	300	1000	550	2431
BUS ZEUS II	2085	1300	300	1000	550	2431
BUS TURÍSTICO TARMA	1900	1050	300	750	550	1961
DD45 DOUBLE DECKER	2000	1100	300	800	550	2055
NEOPLAN SKYLINER	2000	1100	300	800	550	2055

con lo cual, para cada relación  $(\ell/h)$  tendremos:

**TABLA 9:** Velocidad de vuelco en la curva, en función de la relación  $(\ell/h)$  del bus.

<i>Relación</i> $(\ell/h)$	<i>Velocidad</i> (km/h)
0,38	45
0,39	50
0,41	55

### 3.7 Velocidad crítica de vuelco

Nuevamente, aprovechando la analogía entre las velocidades de derrape y de vuelco, vamos a utilizar también para la velocidad crítica de vuelco, la relación según:

$$v_{cv}^2 = 127 R_{\min} \left( 0,01 e_{\max} + \frac{\ell}{h} \right)$$

donde:

$v_{cv}$  velocidad crítica de vuelco en (km/h)

$R_{\min}$  radio mínimo de curvatura en (m)

$e_{\max}$  peralte máximo (%)

$(\ell/h)$  relación cota transversal del C.G. entre altura del C.G. (adimensional)

**TABLA 10:** Velocidad crítica de vuelco  $v_{cv}$ , según valores críticos del radio de curvatura, el peralte y la relación  $(\ell/h)$  del bus.

Radio mínimo de curvatura $R_{\min}$ (m)	Peralte máximo $e_{\max}$ (%)	Relación $\left(\frac{\ell}{h}\right)$	Velocidad (km/h)
30	8,0	0,38	42
50	8,0	0,39	55
100	8,0	0,41	79
30	10,0	0,41	44
30	12,0	0,41	45
30	10,0	0,38	43
50	10,0	0,39	56
100	10,0	0,41	80
50	10,0	0,41	57
50	12,0	0,41	58
30	12,0	0,38	44
50	12,0	0,39	57
100	12,0	0,41	82
100	10,0	0,39	79
100	12,0	0,39	80



## CAPÍTULO 4: COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES TEÓRICOS Y LOS VALORES EXPERIMENTALES DE LAS VELOCIDADES DE VUELCO Y DE DERRAPE

Del análisis teórico realizado, hemos hallados las expresiones para los valores teóricos críticos tanto de la velocidad de derrape como de la velocidad de vuelco, a partir de las consideraciones presentadas y las magnitudes de las características de las pistas y los valores propios del vehículo.

### 4.1 Magnitudes teóricas de la velocidad de circulación en curvas

#### 4.1.1 Velocidad teórica crítica de derrape

A partir de la relación presentada entre el radio de curvatura  $R$ , el ángulo de peralte máximo  $e_{\max}$  y el coeficiente de fricción máximo  $\mu_{\max}$ , hallamos que los valores de la *velocidad de derrape* se encuentran en el intervalo de  $[20 ; 60](km/h)$ .

#### 4.1.2 Velocidad teórica crítica de vuelco

Ahora sabiendo que la velocidad de vuelco se relaciona con el radio de curvatura  $R$ , con el ángulo de peralte máximo  $e_{\max}$  y las magnitudes de la altura ( $h$ ) y la cota transversal ( $\ell$ ) hemos obtenido que tal *velocidad de vuelco* se ubica en el intervalo de valores entre  $[42 ; 80](km/h)$ .

#### 4.1.3 Velocidad teórica de circulación

Por lo tanto se puede considerar, para el caso de la velocidad, un intervalo de circulación prudente entre  $[40 ; 60](km/h)$  con una *velocidad de circulación máxima teórica en curvas* de  $60 (km/h)$ , para evitar tanto el derrape como el vuelco.

## 4.2 Valores experimentales para el derrape y para el vuelco

Regresando a Europa, citamos y explicamos un poco más sobre la reglamentación nacida técnicamente en Ginebra (UNECE), que busca la seguridad en los buses mediante la aplicación de pruebas y ensayos para disminuir las volcaduras en carreteras. Este documento denominado Reglamento 66 [17] es enviado a todo país de la Unión Europea y muestra, por un lado, los ensayos de verificación de estabilidad lateral para establecer la supervivencia de los pasajeros, mediante la óptima resistencia estructural del vehículo al vuelco y por otro lado, presenta los ensayos en pistas con sus respectivas hipótesis iniciales.

### 4.2.1 Ensayo de estabilidad lateral sobre plataforma

Como parte de la directiva marcada como 2001/85/CE, existe el requisito importante en cuanto a que los vehículos puedan inclinarse lateralmente sobre una plataforma hasta 28°, sin que se produzca el vuelco del mismo, con la opción en marcha y algunas masas repartidas convenientemente en los asientos, que representarían a los pasajeros. Para simular también a los pasajeros de pie, la masa indicada se distribuye en un espacio libre y a una altura de 875 mm del suelo. Adicionalmente para el caso de simular sillas de ruedas, se coloca una masa de 250 kg a una altura de 500 mm del suelo.

En uno de sus Anexos, la directiva 2001/85/CE nos muestra que:

Primero, para los vehículos con capacidad superior a 22 pasajeros, se distinguen tres clases:

Clase I: aquellos provistos de zonas para viajeros de pie que permiten la circulación frecuente de los pasajeros;

Clase II: son los destinados principalmente al transporte de viajeros sentados y diseñados para permitir el transporte de viajeros de pie, pero solamente en el pasillo o en una zona que no sobrepase el espacio previsto para dos asientos dobles;

Clase III: son previstos exclusivamente para transportar viajeros sentados.

Indica también que un mismo vehículo puede considerarse perteneciente a más de una clase. En ese caso puede homologarse para cada una de las clases a las que corresponda.

Segundo, para el caso de los vehículos con una capacidad no superior a 22 pasajeros además del conductor se distinguen dos clases:

Clase A: aquellos diseñados para el transporte de viajeros de pie, es decir, con asientos y preparados para viajeros de pie;

Clase B: los vehículos no diseñados para el transporte de viajeros de pie, es decir, no preparados para viajeros de pie.

En base a esto, se presenta la siguiente Tabla:

**TABLA 11:** Masa de cada pasajero y espacio destinado en el vehículo para ensayo de estabilidad lateral

<i>Clase de vehículo</i>	<i>Q (kg) masa de un pasajero</i>	<i>Ssp (m<sup>2</sup> /pasajero) Espacio convencional para un pasajero de pie</i>
<i>Clases I y A</i>	<i>68</i>	<i>0,125</i>
<i>Clase II</i>	<i>71 (*)</i>	<i>0,15</i>
<i>Clases III y B</i>	<i>71 (*)</i>	<i>Ningún pasajero de pie</i>

FUENTE: "DIRECTIVA 2001/85/CE DE LA REGLAMENTACIÓN EUROPEA: PUNTO 7.4"

#### 4.2.2 Ensayos en pistas

Los resultados experimentales mostrados a continuación se han tomado de las pruebas y ensayos considerados en "Predicción del límite de vuelco de autobuses y autocares" [24].

##### 4.2.2.1 Consideraciones previas

La variación en el análisis del vehículo, para estos ensayos, se toma en cuenta debido a su movimiento a velocidad constante en una curva de radio constante y como se ha indicado en el análisis teórico, la Fuerza de arrastre aplicada en el Centro de Gravedad se trata de equilibrar con las Fuerzas de fricción entre las ruedas y la pista.

No se considera la deformación en las suspensiones, ni la de los propios componentes de la dirección.

Las curvas mostradas se han obtenido a partir de las condiciones de operación del bus mostrado en la Fig. 10, cuyas características técnicas son presentadas en el **Anexo 1**, pero considerando las masas suspendidas y las no suspendidas, el propio balanceo de la suspensión y la condición de la carretera. Además la prueba se verifica con el vehículo descargado.

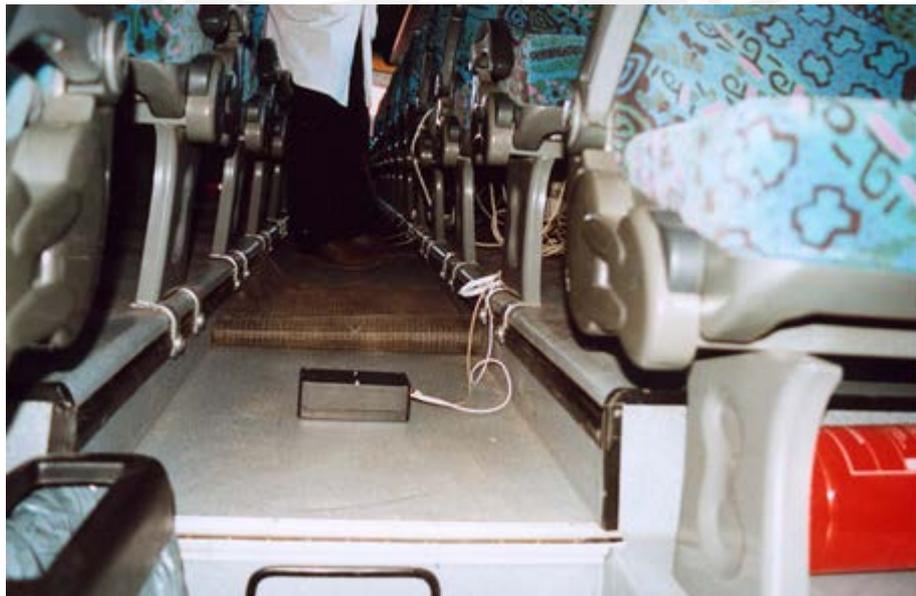


FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

**Fig. 10** Bus para las pruebas de Ensayos en pistas.

Los ensayos presentados se realizaron:

- (a) En un circuito cerrado, en curvas con radios de curvatura entre 25 y 40 metros y de alineamiento horizontal, aumentando la velocidad en función de la experiencia del conductor, cuando se podía llegar a una volcadura inminente;
- (b) En una carretera, maniobrando con giros tanto a la izquierda como a la derecha;
- (c) Considerando las aceleraciones proporcionales al valor de la aceleración de la gravedad ( $g$ ), y tomando como hipótesis la cota superior de  $0,6g$ ;
- (d) Considerando la igualdad en la operación de vehículos en ciudad o en carretera, se instalan parejas de transductores en la caja del vehículo, una a la altura del eje delantero y otra a la altura del eje posterior. Cada una de ellas está formada por un acelerómetro y un inclinómetro. La intención es ir registrando la aceleración y la inclinación de la masa suspendida en cada eje. En la Fig. 11, se muestra la ubicación de cada pareja de transductores en el interior del vehículo:



FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

**Fig. 11** Ubicación de la pareja de transductores en el vehículo.

Las características técnicas de la pareja de transductores (acelerómetro e inclinómetro) son presentadas en la Tabla siguiente:

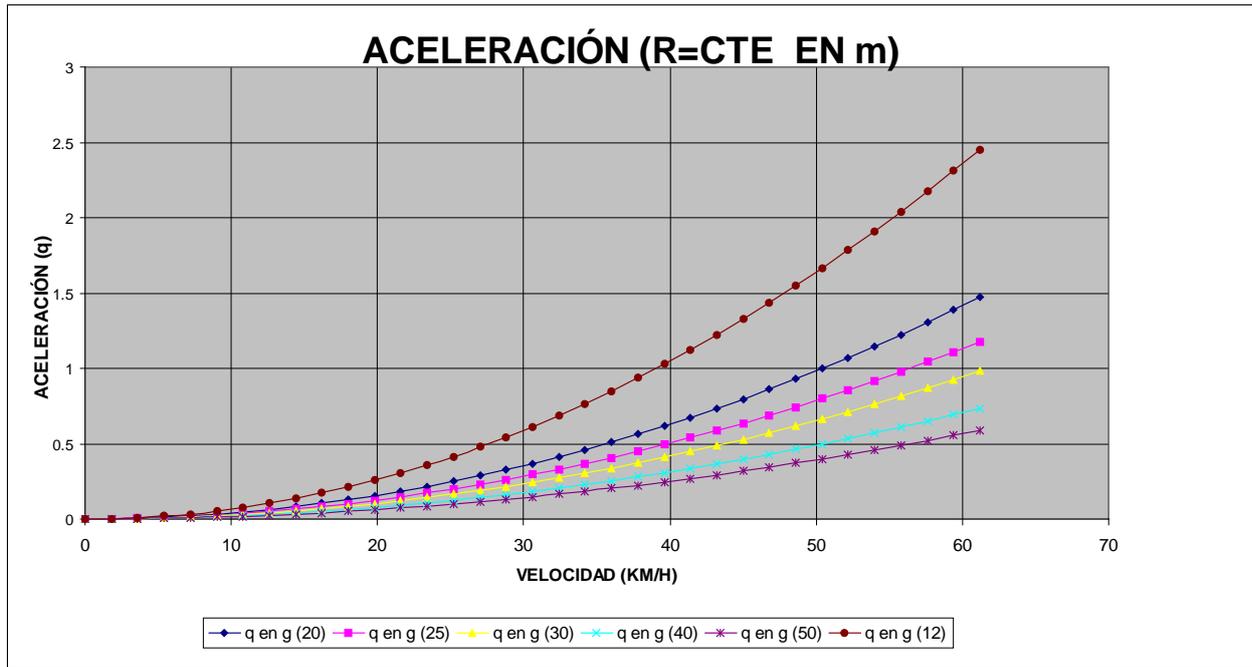
**TABLA 12:** Características técnicas de los instrumentos usados para los ensayos en pistas.

	<i>Acelerómetro</i>	<i>Inclinómetro</i>
<i>Tipo</i>	<i>Piezo-resistivo</i>	<i>Capacitivo</i>
<i>Marca</i>	<i>SENSOTEC</i>	<i>SEIKA</i>
<i>Modelo</i>	<i>JTF/3630-01</i>	<i>NG4</i>
<i>Rango</i>	$\pm 5g$	$\pm 80^\circ$
<i>Sensibilidad</i>	$16,405 \text{ mV/g}$	$4,2 \text{ mV}^\circ$
<i>Resolución</i>	$\infty$	$0,01^\circ$
<i>Alimentación</i>	$5V (DC)$	$5V (DC)$

FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

#### 4.2.2.2 Ensayos a radio de curvatura constante

Según las directivas presentadas para el ensayo, el vehículo en operación presenta un radio de curvatura  $R$  constante, y se va variando la velocidad pero controlando el ángulo de giro de la volante. Considerando los diferentes ensayos entre radios de curvatura de 12 a 50 m, el vehículo se muestra sometido a diferentes aceleraciones, obteniendo como resultado las curvas mostradas en la Fig. 12:



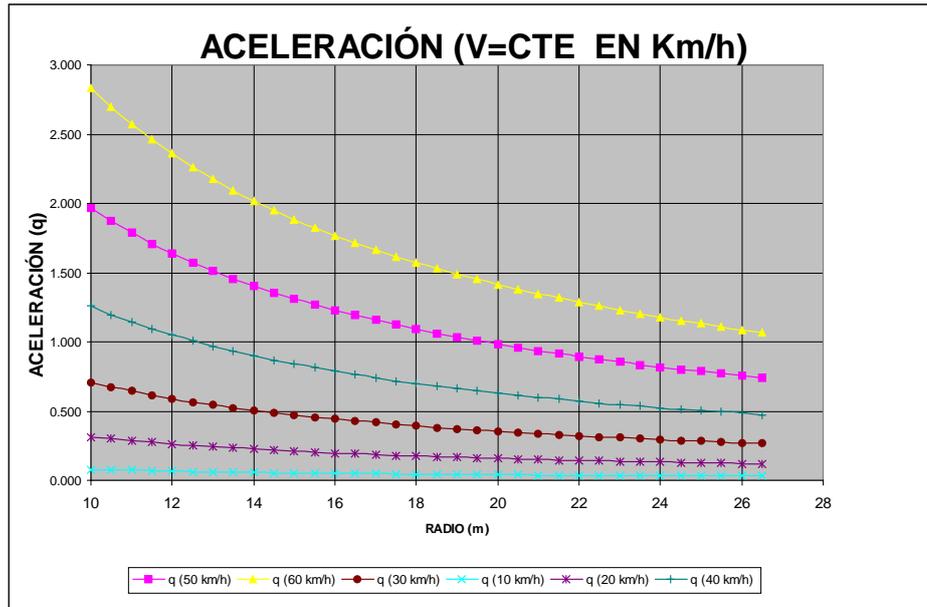
FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

**Fig. 12:** Curvas de operación del vehículo a radio de curvatura constante.

Analizando la Fig. 12 observamos que a un radio de 12m., se dan las condiciones máximas de operación a radio de curvatura constante.

#### 4.2.2.3 Ensayos a velocidad constante

Ahora las directivas presentadas para el ensayo, indican mantener ahora una velocidad constante y se van variando el ángulo de la dirección y utilizando unas trayectorias de diferentes radios de curvatura, como consecuencia de esto el vehículo se encontrará sometido a diferentes aceleraciones. Estas pruebas representan mejor la operación de un vehículo, puesto que en las curvas la mayoría de conductores tratan de mantener la velocidad con la que ingresan a ella. Obteniendo ahora los resultados de los ensayos que se muestran en la Fig. 13:



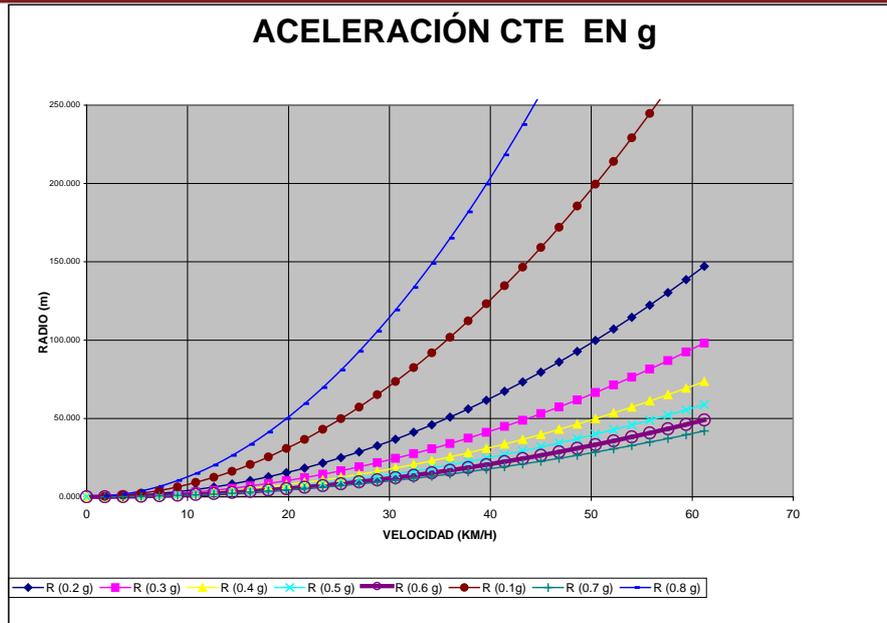
FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
 FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

**Fig. 13:** Curvas de operación del vehículo a velocidad constante.

Analizando ahora la Fig. 13, vemos que las condiciones máximas de operación se encuentran a velocidad de 60 (km/h), en la maniobra a velocidad constante.

#### 4.2.2.4 Relación entre el radio de curvatura y la velocidad

En la Fig. 14 y a partir de la combinación de los ensayos anteriores, se presentan las curvas que relacionan directamente la velocidad de operación del vehículo con los diferentes radios de curvatura:



FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

**Fig. 14:** Curvas de operación del vehículo, mostrando la relación entre la velocidad y el radio de curvatura.

#### 4.2.2.5 Resultados de los Registros de los transductores:

A continuación se presentan algunos resultados obtenidos para la aceleración y el ángulo de inclinación de la masa suspendida, proporcionada por la pareja de transductores:

**TABLA 13:** Magnitudes de aceleración y ángulo de inclinación para curvas de radios de curvatura de 25 y 35 m.

SENSOR	CIRCULO DE RADIO 25 m		CIRCULO DE RADIO 35 m	
	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo
Acel-trasera	0.49 g	0.40 g	0.52 g	0.34 g
Acel-delantera	0.57 g	0.48 g	0.60 g	0.394 g
Ángulo delante	23.95°	19.54°	23.95°	17.63°
Ángulo trasero	24.74°	20.35°	24.74°	18.09°

FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

**TABLA 14:** Magnitudes de aceleración y ángulo de inclinación para curvas de radios de curvatura de 14 y 19 m.

SENSOR	CIRCULO DE RADIO 19 m	CIRCULO DE RADIO 14 m
	Valor máximo	Valor mínimo
Acel-trasera	0.08 g	-0.66 g
Acel- delantera	0.12 g	-0.65 g
Ángulo delante	9.47°	-4.00°
Ángulo detrás	6.00°	-12.00°

FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

**TABLA 15 :** Magnitudes de aceleración y ángulo de inclinación para las pruebas en Carreteras.

SENSOR	PRUEBA DE CARRETERA	
	Valor máximo	Valor mínimo
Acelerómetro trasero	0.60 g	-0.54 g
Acelerómetro delantero	0.52 g	-0.48 g
Ángulo delante	8.16°	-4°
Ángulo detrás	7.10°	-6.97°

FUENTE: "PREDICCIÓN DEL LÍMITE DE VUELCO DE AUTOBUSES Y AUTOCARES"  
FERNÁNDEZ R., GUADALUPE

#### 4.2.2.6 Resumen:

- En un circuito cerrado, en curvas con radio de curvatura entre 25 y 40 metros y de alineamiento horizontal, se alcanza una velocidad máxima de 45 (km/h);
- En una carretera, con giros a la derecha y a la izquierda, se alcanza una velocidad máxima de 90 (km/h);

- (c) De los cuadros elaborados, se puede considerar un radio de curvatura mínimo de 13 metros y es posible considerar una velocidad máxima de 60 (km/h);
- (d) Para los valores de las aceleraciones transversales mostradas, es posible considerar un valor máximo que varía entre 0,48g y 0,66g. Igualmente se observa las mayores magnitudes de éstas aceleraciones se encuentran en la operación del vehículo en curva de radio de curvatura de 19 m.

### 4.3 Magnitudes experimentales de la velocidad de circulación en curvas

De acuerdo a los resultados tomados de las pruebas experimentales presentadas para el derrape y el vuelco, observamos que:

Para los ensayos a circuito cerrado se ha encontrado una *velocidad máxima de 45 (km/h)* para evitar el vuelco;

Para los ensayos en carretera, a radio constante, variando cada ensayo con radios entre los 12 m y los 50 m, se muestra la velocidad de circulación entre  $[10 ; 60] (km/h)$ .

Para el caso de los ensayos en carretera, a aceleración constante, la velocidad de circulación también mostró valores en el intervalo  $[10 ; 60] km/h$ .

Con lo cual podemos decir que la *velocidad de circulación máxima experimental en curvas es de (60 km/h)*.

### 4.4 Comparación final

Finalmente, comparando ambos resultados (teórico y experimental) podemos concluir que la **VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN MÁXIMA** para evitar el derrape y el vuelco es de **60 (km/h)**.

## CONCLUSIONES

### PRIMERA CONCLUSIÓN: Analogías entre la velocidad de derrape y la velocidad de vuelco

Comparando la expresión de la fórmula (IV) para la velocidad de derrape:

$$v_d = \sqrt{gR \left( \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \right)}$$

Con la expresión de la fórmula (VI) para la velocidad de vuelco:

$$v_v = \sqrt{gR \left( \frac{\frac{\ell}{h} + \operatorname{tg} \theta}{1 - \frac{\ell}{h} \operatorname{tg} \theta} \right)}$$

Concluimos que ambas tienen expresiones análogas, pudiendo cambiar indistintamente la magnitud del coeficiente de fricción  $\mu$  por la relación entre las magnitudes del Centro de Gravedad del sólido ( $\ell/h$ ) para obtener correspondientemente, la **velocidad de derrape** o la **velocidad de vuelco**.

### SEGUNDA CONCLUSIÓN: Velocidad crítica de derrape $v_{cd}$

Los valores considerados para el radio de curvatura  $R$ , el peralte  $e$  y el coeficiente de fricción  $\mu$ , si bien son tomados como referenciales y experimentales del “Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, muestran por un lado la realidad de las carreteras en el Perú y por otro lado, la combinación de las magnitudes citadas en la expresión de la velocidad de derrape, presentan un rango de valores, entre 20 y 60 ( $km/h$ ), acorde con las velocidades recomendadas en el mismo Manual.

### TERCERA CONCLUSIÓN: Velocidad crítica de vuelco $v_{cv}$

A partir de las expresiones para calcular

$$\ell = 0,5 E \pm b_G$$

$$h = r + \frac{\ell}{\operatorname{tg} \phi}$$

Los valores considerados para la distancia frontal entre las ruedas  $E$ , la distancia horizontal del Centro de Gravedad al plano longitudinal medio del vehículo  $b_G$ , la distancia al suelo del eje longitudinal de la sección de la rueda alrededor de la cual se produce el balanceo  $r$ , el ángulo de inclinación de la plataforma a la cual se produce el vuelco  $\phi$ , si bien son tomados como referenciales y experimentales de las diferentes marcas y modelos de buses (de preferencia de 2 pisos), muestran también las características de operación de estos buses en las carreteras del Perú. Según esto, la combinación de las magnitudes citadas en la expresión de la velocidad de vuelco presentan un rango de valores, entre 42 y 80 (km/h), acorde con las velocidades recomendadas en las pruebas dinámicas en circuito cerrado y en carreteras.

#### **CUARTA CONCLUSIÓN: Velocidad máxima de ingreso a una curva**

Con las expresiones halladas, obtenemos valores teóricos de la velocidad de derrape y de la velocidad de vuelco, a partir de las magnitudes correspondientes para el radio de curvatura  $R$ , el peralte  $e$ , el coeficiente de fricción  $\mu$ , y la relación entre la cota transversal del C.G. y la altura del C.G. ( $\ell/h$ ), con lo cual concluimos que:

- La velocidad crítica de derrape  $v_{cd}$ , muestra valores en un intervalo  $[20 ; 60]$  km/h;
- La velocidad crítica de vuelco  $v_{cv}$ , presenta valores en un intervalo  $[42 ; 80]$  km/h;
- Además al comparar ambos intervalos, concluimos que el vehículo tenderá a derrapar antes que volcar y, en función de mantener la estabilidad del mismo y asegurar la integridad física de los pasajeros, concluimos que el valor máximo de ingreso a una curva sería de 60 (km/h).

#### **QUINTA CONCLUSIÓN: Comparación entre los valores de $\mu$ y ( $\ell/h$ )**

De la Tabla 4 (Velocidad de derrape en la curva, en función del coeficiente de fricción máximo de la pista) donde consideramos para  $\mu$  un rango de valores  $[0,15 ; 0,18]$  y de

la Tabla 9 (Velocidad de vuelco en la curva, en función de la relación  $(\ell/h)$  del bus) donde ahora consideramos un rango de valores  $[0,38 ; 0,40]$  , concluimos que:

$$\mu < \frac{\ell}{h}$$

Con lo cual el vehículo tendería a derrapar antes que a volcar, lo que está acorde con la Cuarta Conclusión inciso (c).

#### **SEXTA CONCLUSIÓN: Ensayo en pista más simple y menos costoso**

Al comparar la metodología presentada para los ensayos en pistas, a radio constante, a velocidad constante y un tercero a dirección constante, en relación a establecer la aceleración transversal, observamos que el ensayo a velocidad constante es el más simple y el menos costoso, puesto que por experiencia o por instinto de conservación, se nota que los conductores tratan de mantener una misma velocidad al operar en curvas. Lo anterior en relación a que para un ensayo a radio constante, se indica la medición continua del ángulo de giro de la volante o que para un ensayo a dirección constante, se obliga a mantener un mismo ángulo de giro u otro ensayo que involucre el estudio de la carretera, se necesita de mayor instrumentación y de otros equipos para la toma de datos.

## OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

### PRIMERA:

La directiva signada como 2001/85/CE del Reglamento 66 de la Unión Europea, para los ensayos de estabilidad lateral, obliga al uso de cinturones de seguridad en todos los asientos, situación apreciada también en nuestro medio en el transporte interprovincial, las movilidades escolares:

**OBSERVACIÓN:** Se aumenta el peso de los asientos y del vehículo, debido a la instalación y acondicionamiento de los cinturones para su funcionamiento, y la altura del Centro de Gravedad posiblemente aumente.

**RECOMENDACIÓN:** El uso de cinturones más livianos, más resistente y de fácil instalación para sujetar al pasajero y una posible redistribución de las ubicaciones de los asientos.

### SEGUNDA:

Las comodidades y la funcionabilidad de los vehículos en nuestros tiempos:

**OBSERVACIÓN:** Los equipos de televisión, de música, los baños, los asientos más cómodos, los vidrios dobles, entre otras cosas, también aumentan el peso del vehículo.

**RECOMENDACIÓN:** En la mayoría de las empresas de buses de pasajeros, y en particular los interprovinciales, ya se nota la presencia de algunos vehículos con estas características de comodidad pero, debe ser requisito de operación, aprobar los controles hacia la reglamentación y que estos presenten criterios más rigurosos y precisos, respecto al común de otros vehículos.

### TERCERA:

**OBSERVACIÓN:** Las observaciones y recomendaciones anteriores apuntan al procedimiento mismo del ensayo de estabilidad lateral. Al aumentar y/o cambiar el material de los cinturones de seguridad; al modificar la distribución inicial de los pasajeros; el responsable de los ensayos debe estar preparado para cambiar la

plataforma de las pruebas, de repente haciéndola más rígida, colocando accesorios adicionales para evitar el movimiento de las masas durante el ensayo mismo.

RECOMENDACIÓN: El Operador de los ensayos debiera tener a mano toda la información referida a la suspensión, a las masas suspendidas y a las no suspendidas, a la dimensión y a la posición del Centro de Gravedad, para estar siempre al tanto de los parámetros propios de la estabilidad lateral de un vehículo.

#### CUARTA:

En base a los resultados obtenidos, es posible establecer pautas para generar mejores condiciones de seguridad en la circulación de vehículos.

A partir de la “Seguridad sostenible” [25], y apoyados en sus principios básicos, debemos:

*“...Tener siempre presente la homogeneidad en masa, velocidad y dirección, es decir, que dos vehículos con grandes diferencias en masa, velocidad y sentido de circulación se deben separar físicamente uno de otro...”*. Como generalmente en la mayoría de nuestras carreteras no es posible separar vías exclusivas para autos y otras para camiones o buses interprovinciales, la velocidad debe ser reducida, a valores que se puedan obtener del cálculo anterior, quizás la fricción se pueda variar, pero se debería verificar el estado de las carreteras;

*“...Practicar siempre el autoconocimiento, mediante el cual todo conductor debe saber que habilidades posee y si son suficientes para conducir con seguridad...”*. Sabemos que la mayoría de conductores no reconocen su incapacidad temporal para conducir cuando han bebido o están cansados, originando que sobrepasen los límites de circulación y puedan ocasionar percances;

*“...Considerar que todo usuario de una vía debiera saber que comportamiento de manejo se espera de él y que puede esperar él de los demás...”*. Por lo tanto debiéramos reconocer el tipo de vía que estamos usando y regular nuestro manejo (nivel de atención, velocidad, etc.) a estas condiciones. Se está haciendo común la expresión “debo pensar en lo que piensa el otro conductor sobre lo que yo pienso” sobre todo en la ciudad y en referencia a la mala operación del transporte público en particular.

Por otro lado si bien existe una homologación o nacionalización de vehículos extranjeros, en lo concerniente a la actividad en las carreteras de nuestro país no se presenta una

verificación ni aprobación de los mismos, tanto así que se nota la participación de los llamados “vehículos siniestrados” de otros países que son traídos y fácilmente repotenciados para que se comercialicen y circulen en el país. Pero lo que sí están reglamentadas y supervisadas, como se ha presentado, son las características básicas de las autopistas en cuanto a peralte (medido en porcentaje y no en ángulo), radio de curvatura y por ende la velocidad de circulación.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Russell C., Hibbeler:** Ingeniería Mecánica-Dinámica. Décimo-segunda Edición PEARSON EDUCACIÓN, México 2010
- [2] **Beer, Ferdinand; Johnston, Rusell; Cornwell, Phillip:** Mecánica Vectorial para Ingenieros- Dinámica. Novena Edición. Mc Graw Hill Educación, México 2010
- [3] **Rodríguez Hernández, Jorge (2015)** Introducción a la Mecánica, PUCP
- [4] **La estabilidad de un vehículo**  
[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/circular/din\\_circular.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/circular/din_circular.htm)
- [5] **Anuario Estadístico 2014, Policía Nacional del Perú.** (2014) Primera edición. [www.pnp.gob.pe/documentos/ANUARIO%202014%20DIREST-PNP%20OK.pdf](http://www.pnp.gob.pe/documentos/ANUARIO%202014%20DIREST-PNP%20OK.pdf)
- [6] **Importación de vehículos SUNAT**  
[http://www.sunat.gob.pe/orientacionaduanera/importacionvehiculos/requisitos\\_antiguedad.html](http://www.sunat.gob.pe/orientacionaduanera/importacionvehiculos/requisitos_antiguedad.html)
- [7] **Anuario estadístico de accidentes 2012. Dirección General de Tráfico. Ministerio del Interior. ESPAÑA**  
[http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-de-accidentes/anuario\\_estadistico018.pdf](http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-de-accidentes/anuario_estadistico018.pdf)
- [8] **Aparicio, F.; Lozano, J.A.** (1992) Estudio de accidentes de tráfico en carretera con implicación de autocares. Memoria de investigación GIVET, E.T.S.I. Industriales. Madrid

[9] **Aparicio Izquierdo, Francisco** (2012) La investigación científica de Accidentes y las políticas de Seguridad. Seminario Internacional de Investigación de Accidentes. Universidad de los Andes. Bogotá 19 y 20 de Nov. 2012

<https://ingenieria.uniandes.edu.co/grupos/sur/images/Presentaciones/SeminarioSeguridadVial/f.aparicio.pdf>

[10] **García, A; Alcalá, E; Sánchez, M; Carretero, A;** Diseño estructural de autobuses y autocares. INSIA (Instituto Universitario de Investigación del Automóvil)

[www.revistadyna.com/Recursos/Controles/descarga.aspx?..](http://www.revistadyna.com/Recursos/Controles/descarga.aspx?..)

[11] **Aparicio F., Vera C. y Díaz V. (1995)** Teoría de los vehículos automóviles. Sección de Publicaciones, ETSII, Universidad Politécnica de Madrid.

[12] **Aparicio F.** Exigencias de seguridad pasiva de Autobuses y Autocares. Grupo de Ingeniería de vehículos y transportes (GIVET). E.T.S.I. Industriales de la U.P.M. de Madrid

[13] **Chudakov, D.A.** Fundamentos de la Teoría y el cálculo de tractores y automóviles. Mir. 1977

[14] **Memories of a London and UK Runner**

<http://london-runner.blogspot.pe/2011/12/history-of-london-bus-ii.html>

[15] **Saber Cómo N° 77/ Junio de 2009**

<http://www.inti.gov.ar/sabercomo/sc77/inti8.php>

[16] **Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito** Ministerio de Transportes y Comunicaciones Perú

[17] **María Teresa Vicente Corral, Ángel Martín López, Rocio Grimaldi Pastoril, Francisco Aparicio Izquierdo:** Nuevos requisitos y avances en seguridad pasiva en autobuses y autocares: Situación actual y necesidades. Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, Universidad Politécnica de Madrid (INSIA-UPM)

[http://oa.upm.es/3213/1/INVE\\_MEM\\_2008\\_53550.pdf](http://oa.upm.es/3213/1/INVE_MEM_2008_53550.pdf)

[18] **Datos de Bus Neoplan StarlinerL.**

<http://etsmods.net/neoplan-starliner-l/>

[19] **Datos de Bus Mercobus Paradiso 1800 G7**

<http://72.29.76.78/~user287/main.php?K=4419>

[20] **Datos de Bus Zeus II**

<http://www.mtbingenieros.com.pe/indexdfab.html?id=zeusii>

[21] **Datos de Bus Turístico Tarma**

[http://www.carroceriastarma.pe/bus\\_turistico.html](http://www.carroceriastarma.pe/bus_turistico.html)

[22] **Datos de Bus DD45 Double Decker**

<http://www.coachservice.com/en/nightliner/dd45-double-decker.html>

[23] **Datos de Bus Neoplan Skyliner**

<http://www.the-blueprints.com/blueprints/buses/neoplan/>

[24] **Fernández Rico Guadalupe, (2001)** Tesis Doctoral: Predicción del límite de vuelco en autobuses y autocares. Universidad Carlos III de Madrid

[25] **Dextre J.C., Pirota M.D., Tabasso C., Bermúdez J., García A. (2008)** Vías humanas: Un enfoque multidisciplinario y humano de la seguridad vial. Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.