



ISSN 0188-7297



---

# **ALGUNAS CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD PARA EL PROYECTO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS**

Alberto Mendoza Díaz  
Francisco Luis Quintero Pereda  
Emilio Francisco Mayoral Grajeda

**Publicación Técnica No. 217  
Sanfandila, Qro. 2002**



---

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

**Algunas Consideraciones  
de Seguridad para el  
Proyecto Geométrico  
de Carreteras**

**Publicación Técnica No. 217  
Sanfandila, Qro. 2002**

---



---

Este documento fue elaborado por el Coordinador de Seguridad y Operación del Transporte, Alberto Mendoza Díaz, y por los investigadores Francisco Luis Quintero Pereda y Emilio F Mayoral Grajeda.



Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
1 Introducción	1
2 Estándar de proyecto	3
3 Autopistas	7
3.1 Antecedentes	7
3.2 Curvatura y velocidad	7
3.3 Análisis estadístico sobre la ocurrencia de accidentes en curvas de diferente radio	13
3.4 Comentarios	22
3.4.1 Proyecto geométrico	22
3.4.2 Barreras y taludes de terraplenes	23
3.4.3 Estabilidad de taludes en cortes	23
3.4.4 Drenaje	24
4 Todo tipo de carreteras	25
4.1 Control de acceso	25
4.2 Medianas	27
4.3 Elementos de la sección transversal	30
4.3.1 Ancho de carril	31
4.3.2 Ancho de acotamiento	32
4.3.3 Ancho de carril y acotamiento	34
4.3.4 Pendiente transversal	36
4.3.5 Síntesis	36
4.4 Distancia de visibilidad	37
4.4.1 Distancia de visibilidad general	37
4.4.2 Distancia de visibilidad en curvas verticales en cresta	37
4.4.3 Distancia de visibilidad en curvas horizontales	38
4.5 Alineamiento	39

4.5.1 Alineamiento horizontal	39
4.5.2 Alineamiento vertical	42
4.5.3 Combinaciones de alineamiento vertical y horizontal	42
4.5.4 Curvas de transición	44
4.6 Puentes, estructuras y alcantarillas	46
4.7 Rebase	48
4.8 Rampas de escape para camiones de carga	52
5 Conclusiones	55
Referencias bibliográficas	57

## Resumen

---

Este trabajo tiene como finalidad considerar la seguridad vial, en el proyecto geométrico de nuevas carreteras o la modernización de carreteras existentes.

Inicialmente se presentan algunas recomendaciones en relación con la toma de decisiones estratégicas para ofrecer un proyecto geométrico de calidad en cuanto a seguridad.

Se presentan conceptos generales sobre la curvatura y las velocidades de diseño y operación en autopistas, relacionados con la seguridad. También un análisis estadístico sobre accidentes en curvas de diferente radio en autopistas mexicanas, y se mencionan algunos comentarios. Se hace referencia fundamentalmente al alineamiento horizontal de las autopistas, aunque esto da lugar a sugerencias relacionadas con los demás elementos de su proyecto geométrico.

Posteriormente se presenta un conjunto de recomendaciones aplicables a todos los tipos de caminos.

Finalmente, se muestran algunas conclusiones.



## Abstract

---

This work is aimed at helping consider safety in the geometric design of new roads or the modernization of existing ones.

First, some recommendations are provided regarding the selection of design standard to which the roads are to be built.

Some general concepts are then provided on curvature and on design and operating speed on freeways, as related to safety issues. A statistical analysis is also shown on the occurrence of accidents in curves with different radius at Mexican freeways. Some concluding comments are derived. Reference is made in this part to the horizontal alignment of highways, although the analysis of this aspect gives rise to suggestions related to the rest of the elements involved in the geometric design of freeways.

A set of safety recommendations for the geometric design of all types of roads, are then shown.

Some conclusions are finally presented.



## Resumen Ejecutivo

---

A medida que el tráfico vehicular aumenta se vuelve frecuentemente necesario o económico diseñar y construir carreteras con estándares geométricos más elevados. En general en la medida en que este estándar sea mayor, la carretera será más segura. De hecho, uno de los factores económicos que deben tomarse en cuenta al seleccionar el nivel geométrico de calidad son los beneficios en seguridad vial, derivados de mejores estándares geométricos; por ejemplo, en la Referencia 1, al investigarse los beneficios en materia de seguridad de mejora carretera en la Gran Bretaña, se examinó 85% de los proyectos constructivos distintos a autopistas entre 1982 y 1984, encontrándose reducciones porcentuales de accidentes (a un nivel de significancia de 10% o mayor) para diferentes tipos de proyecto:

TIPO DE PROYECTO	REDUCCIÓN DE ACCIDENTES, EN %
Libramientos de pueblos rurales	32
Construcción de un cuerpo carretero adicional	29
Separación de niveles en intersecciones urbanas	57
“Otros” proyectos en áreas rurales	28

No se encontraron reducciones significativas de accidentes en libramientos urbanos, ni en separaciones de niveles en intersecciones en áreas rurales, así como en “otros” proyectos urbanos.

La Referencia 2 presenta los índices de mortalidad (accidentes con muertes por cada 100 millones de vehículos-kilómetro) para carreteras australianas:

<b>TIPO DE CARRETERA</b>	<b>ÍNDICE DE MORTALIDAD POR CADA 100 MILLONES DE VEH-KM</b>
Carreteras de un carril	800 – 1,200
Carreteras angostas de dos carriles	100 – 200
Carreteras anchas de dos carriles	20 – 100
Arterias <sup>1</sup> no divididas	20 – 100
Arterias divididas	10 – 100
Todas las autopistas	10
Autopistas nuevas	5
Todas las carreteras	200 – 800

En síntesis, la seguridad vial se incrementa significativamente al aumentar el estándar de proyecto geométrico, y las autopistas son mucho más seguras por kilómetro viajado que otras carreteras. La ventaja precisa de seguridad no puede establecerse, porque existe una amplia variación dentro de los tipos de carretera; no obstante, las autopistas son cuando menos cuatro veces más seguras que otras, llegando a ser hasta 20 veces más seguras en comparación con otras arterias. Las nuevas autopistas, construidas con estándares contemporáneos, son las formas más seguras de carretera, pudiendo ser hasta el doble de seguras que algunas autopistas más antiguas, construidas con estándares más bajos.

En este trabajo se tratan aspectos como:

*El control de acceso.* Las Referencias 3 y 4 incluyen estudios de los 60's y los 70's que demuestran que la frecuencia de accidentes aumenta rápidamente con la densidad de accesos.

---

<sup>1</sup> Una arteria es una vía principal utilizada para el tránsito de frente, a lo largo de una ruta continua.

*Los tipos de medianas.* La Referencia 1 manifiesta que carreteras divididas con mediana central, tuvieron una tasa de accidentes por vehículo-kilómetro de dos terceras partes de la de carreteras no divididas.

*Los anchos de carril y de acotamiento.* La Referencia 5 contiene experiencias estadounidenses en donde ampliaciones de carril de 2.7 a 3.4 m y de 3 a 3.7 m en carreteras, generaron reducciones en la frecuencia de accidentes con heridos graves de 22%.

*La distancia de visibilidad general.* La Referencia 6 encontró que en la mayoría de los casos, las frecuencias de accidentes se reducen al aumentar la distancia de visibilidad promedio, especialmente para los accidentes de noche con un sólo vehículo involucrado.

*La distancia de visibilidad en curvas verticales en cresta.* Por una parte, la Referencia 5 reporta frecuencias de accidentes 52% mayores en sitios con restricciones a la visibilidad en razón de la curvatura vertical, en relación con sitios de control.

*La distancia de visibilidad en curvas horizontales.* La Referencia 7 señala que la mejora de la distancia de visibilidad en curvas horizontales, es altamente rentable.

*Combinación de alineamientos horizontal y vertical.* Los alineamientos no deben ser considerados independientemente entre sí, o independientemente de los estándares de proyecto aplicables al resto de la carretera.

*Puentes, estructuras y alcantarillas.* La Referencia 8 recomienda que el puente debe ser 1.8 m más ancho que la sección de circulación (p. ej, llevando dos acotamientos de 0.9 m a lo largo del puente).

*Las condiciones de rebase.* La Referencia 9 señala que alrededor de 10% de los accidentes carreteros con heridos, se generaron en operaciones de rebase.

*Las rampas de escape.* Finalmente, la Referencia 3 indica que factores como: la pendiente, error en la conducción, tal como no hacer el cambio de velocidad adecuado, falla del equipo de los frenos, la inexperiencia en la conducción del vehículo, etc, están asociados con los accidentes).

Por último, se mencionan las conclusiones relevantes del estudio.

## **Referencias bibliográficas**

1. Walker, C. D. y C. J. Lines. *Accident Reductions from Trunk Road Improvements*. Research Report CR 321, 15 p. Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1991.
2. *Accidents and Road Type*. Australian Road Research Board, Melbourne, Australia, 1988.
3. *Guide for Monitoring and Enhancing Safety on the National Truck Network*. Federal Highway Administration, Washington, DC, 1986.
4. Cirillo, J. A. *Safety Effectiveness of Highway Design Features, Volume 1, Access Control*. 9 p, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1992.
5. *Relationship Between Safety and Key Highway Design Features*. State of the Art Report 6, Transportation Research Board, Washington, DC, 1987.
6. Hedman, K. O. *Road Design and Safety*. VTI Rapport 351A, pp 225-238, Swedish Road and Traffic Research Institute, Linkoping, Sweden, 1990.
7. Glennon, J. C. *Effect of Key Highway Features on Highway Safety*. Transportation Research Board, Washington, DC, 1987.
8. Mak, K. K. *Effect of Bridge Width on Highway Safety*. State of the Art Report 6, Transportation Research Board, Washington, DC, 1987.
9. Hoban, C. J. *Selecting Appropriate Geometric Design Standards for Rural Road Improvements*. Compendium of Technical Papers, 58<sup>th</sup> Annual Meeting, Institute of Transportation Engineers, Washington, DC, 1988.

# 1 Introducción

---

En el diseño de nuevas carreteras, debe darse particular atención a la seguridad vial como un criterio principal de proyecto. Por su parte, la reconstrucción de carreteras actuales debe poseer un componente de seguridad; de hecho, tal reconstrucción es a menudo una forma importante de ir actualizando progresivamente la seguridad de la red carretera.

En este trabajo se revisarán algunos aspectos de seguridad vial del proyecto carretero, tomándose el caso de las autopistas, y después todos los tipos de carreteras. Finalmente, se presentan ciertas conclusiones.



## 2 Estándar de Proyecto

---

El término “estándar de proyecto” se refiere a aquellas decisiones estratégicas relacionadas con el nivel geométrico de calidad al cual, se construye una carretera. Dichas decisiones se realizan frecuentemente en la fase de planeación, y se ven afectadas primordialmente por consideraciones sobre capacidad vial y eficiencia económica, pero la seguridad vial debe también tomarse en cuenta.

A medida que el tráfico vehicular aumenta, resulta necesario o económico diseñar y construir carreteras con estándares geométricos más elevados. En general, a medida en que el estándar geométrico sea mayor, la carretera será más segura. De hecho, uno de los factores económicos que deben tomarse en cuenta al seleccionar el nivel geométrico de calidad, son los beneficios en seguridad vial derivados de mejores estándares geométricos. Por ejemplo, en la Referencia 1, al investigarse los beneficios en seguridad de mejoras carreteras en la Gran Bretaña, se examinó 85% de los proyectos constructivos distintos a autopistas entre 1982 y 1984, encontrándose las reducciones porcentuales de accidentes (a un nivel de significancia de 10% o mayor) para diferentes tipos de proyecto:

- |   |     |
|---|-----|
| • Libramientos de pueblos rurales                 | 32% |
| • Construcción de un cuerpo carretero adicional   | 29% |
| • Separación de niveles en intersecciones urbanas | 57% |
| • “Otros” proyectos en áreas rurales              | 28% |

No se encontraron reducciones significativas de accidentes en libramientos urbanos, en separaciones de niveles en intersecciones en áreas rurales, ni en “otros” proyectos urbanos.

El mayor estándar geométrico para una carretera corresponde a una velocidad de proyecto elevada, control total de acceso de las propiedades aledañas, zonas laterales benignas, rampas de entrada y salida en intersecciones a desnivel, y sentidos opuestos de tránsito separados por mediana. Este tipo de carretera es

referido generalmente como autopista. Es la forma más segura de carretera porque muchas de las posibilidades de colisión han sido eliminadas. En la fotografía 1 se muestra un ejemplo.

La Referencia 2 presenta los índices de mortalidad (accidentes con muertes por cada 100 millones de vehículos-kilómetro) para carreteras australianas:



En síntesis, la seguridad vial se incrementa significativamente al aumentar el estándar de proyecto geométrico, y las autopistas son mucho más seguras por kilómetro viajado que otras carreteras. La ventaja precisa de seguridad no puede establecerse, porque hay una amplia variación dentro de los tipos de carretera, sin embargo, las autopistas son cuando menos cuatro veces más seguras que otras carreteras, pudiendo ser hasta 20 veces más confiables que otras arterias. Las nuevas autopistas, construidas con estándares contemporáneos, son las formas más seguras de carretera, pudiendo tener hasta el doble de seguridad que autopistas más antiguas, construidas con estándares más bajos.

---

<sup>2</sup> Una arteria es una vía principal utilizada para el tránsito de frente, a lo largo de una ruta continua.



**Fotografía 1. Vista panorámica de una autopista con elementos de seguridad carretera**



### 3.1 Antecedentes

Algunos trabajos correspondientes a la bibliografía han tenido éxito al identificar las diferencias entre las velocidades operativas de los conductores y las velocidades de proyecto de las carreteras; no obstante, no han llegado a establecer claramente el vínculo entre esas diferencias y la ocurrencia de accidentes, a partir del cual se generen las recomendaciones de proyecto geométrico pertinentes. Lo presentado en este capítulo es un primer intento para autopistas, a reserva de generar una mayor cantidad de información estadística en el futuro, que dé mayor sustento y complemento a lo aquí mostrado.

Se presentan inicialmente algunos conceptos generales sobre la curvatura, y las velocidades de diseño y operación en autopistas, relacionados con la seguridad; se incluye un análisis estadístico sobre accidentes en curvas de diferente radio en autopistas mexicanas, así como algunos comentarios concluyentes.

Se hace referencia fundamentalmente al alineamiento horizontal de las carreteras, aunque esto da lugar a sugerencias relacionadas con los demás elementos del proyecto geométrico. Este trabajo se refiere básicamente a autopistas rurales.

### 3.2 Curvatura y velocidad

La decisión para circular por una carretera o por alguna alterna (cuando la hay) resulta de la valoración del conductor en términos del tiempo, conveniencia y dinero, además de la percepción de la seguridad que se tenga de las opciones. Por ende, la velocidad es uno de los factores más importantes para el conductor al momento de seleccionar rutas o modos de transporte. La velocidad de proyecto debe cumplir con las expectativas de casi todos los usuarios en cuanto al deseo de transitar a cierta velocidad, sujetándose a consideraciones de seguridad y economía.

En este sentido, considerando que sólo un pequeño porcentaje de los usuarios circula a velocidades extremadamente altas, no resulta económicamente factible diseñar únicamente para ellos, como tampoco conviene hacerlo para los conductores en las condiciones de circulación más desfavorables, que también son un pequeño porcentaje, pues se obtendría un camino inseguro, de ahí que frecuentemente se recomiende diseñar para la velocidad más alta razonable (p. ej, percentil 85 de las velocidades esperadas) que cubra los niveles deseados de seguridad, de movilidad y de eficiencia considerando las restricciones ambientales, económicas, estéticas y los impactos sociales y políticos. Asimismo, la velocidad de proyecto debe ser coherente con respecto a la topografía, el uso del suelo adyacente y el tipo de camino.

Un aspecto muy importante en torno a la velocidad y a la seguridad en carreteras es la estabilidad de los vehículos en las curvas. Se dice que un vehículo es inestable cuando experimenta tendencias muy acentuadas a salirse de la trayectoria impuesta por el conductor, generalmente como resultado de las fuerzas transversales que actúan en él, ya sea por carga mal distribuida, llantas desinfladas, suspensión defectuosa, etc, o por la fuerza centrífuga que experimenta cuando transita por una curva, pudiendo suscitarse que el vehículo se deslice o vuelque.

Tomando en cuenta las fuerzas y los elementos que ayudan a contrarrestar los efectos de la fuerza centrífuga, los accidentes en una curva determinada, en condiciones normales de operación, pueden resultar de una velocidad excesiva (para las condiciones prevalecientes), de una inadecuada sobreelevación, de un pavimento derrapante o de la combinación de varios de estos elementos. El primer factor mencionado, la velocidad, es uno de los que más influye en la magnitud de la fuerza centrífuga de un vehículo cuando transita por una curva, dado que la fuerza centrífuga,  $F$ , es función del peso,  $W$ , de la velocidad,  $V$ , del vehículo, así como de la aceleración de la gravedad,  $g$ , y del radio de la curva,  $R$ , conforme la ec 1:

$$F = \frac{WV^2}{gR} \quad (1)$$

Por tanto, para un vehículo y una curva dados, la variable fundamental es la velocidad y si ésta se incrementa, la fuerza centrífuga también lo hará, pudiendo resultar eventualmente en la pérdida de control del vehículo; por ejemplo, si la velocidad se duplica, con los demás elementos constantes la fuerza centrífuga resultante se cuadruplicará; si la velocidad se triplica, la fuerza centrífuga resultará nueve veces mayor.

Por otra parte, si se considerara la velocidad como un factor constante y el radio de curvatura,  $R$ , se modificara, al ser éste inversamente proporcional a la fuerza centrífuga, entre mayor sea el radio, menor será la fuerza centrífuga resultante y viceversa; es decir, para un vehículo circulando a una misma velocidad por curvas de distinto radio, entre menor es el radio de éstas, más difícil será controlar el vehículo. Es por eso que los conductores “cortan la curva”, o sea, conducen describiendo una curva con mayor radio a la que ha sido construida para disminuir la fuerza centrífuga, al invadir uno o varios carriles. Se tiene en este caso, al mismo tiempo, un aumento en la seguridad al circular por una curva con radio mayor, pero también un incremento en el riesgo por la invasión de carriles.

Cabe señalar que las tendencias naturales anteriores (a mayor velocidad y menor radio mayor probabilidad de pérdida de control del vehículo) se han visto disminuidas al paso de los años por las innovaciones tecnológicas en los nuevos vehículos: suspensión, frenos, dirección, potencia, etc., que han hecho que los conductores tengan mayores velocidades de circulación y tomen las curvas a mayor velocidad, incluso aquélla para las que fueron proyectadas, sin que se presente la inestabilidad.

Para dar una idea de lo anterior, se mencionan un par de ejemplos sobre una muestra de velocidades de punto tomadas a vehículos en curvas con alta incidencia de accidentes, en algunas autopistas; una de ellas, construida a principios de los 50, con ampliaciones y modernizaciones recientes, la velocidad de proyecto en terreno plano es de 90 km/h, y en lomerío de 70 km/h. Sin embargo, una curva específica de ella (con radio igual a 150 m), en lomerío, se diseñó para 70 km/h, siendo la máxima velocidad permitida para esa curva de 50 km/h.

La velocidad promedio registrada a la entrada de esta curva fue de 67 km/h, con una máxima registrada de 105 km/h, una mínima de 24 km/h y un percentil 85 de 79 km/h en la muestra de todos los vehículos explorados. La velocidad promedio registrada dentro de esta curva fue de 71 km/h, con una máxima registrada de 85 km/h, una mínima de 45 km/h y un percentil 85 de 81 km/h. En esta curva, en los últimos cinco años, se han registrado en promedio 40 accidentes por año.

En otra autopista, construida a finales de los 50, también con ampliaciones y modernizaciones recientes, la velocidad de proyecto en terreno plano es de 110 km/h, en lomerío es de 90 km/h y en montaña es de 70 km/h. En dicha autopista, hay una curva (con radio igual a 350 m), también en lomerío, que se diseñó para 100 km/h; la máxima velocidad permitida en ella es de 70 km/h. La velocidad promedio registrada dentro de esta curva fue de 89 km/h, con una máxima registrada de 142 km/h, una mínima de 42 km/h y un percentil 85 de 113 km/h. En esta curva se han registrado en promedio 10 accidentes por año, aunque en 2000 ocurrieron 19 accidentes.

De ambos ejemplos resulta evidente que el deseo de la mayoría de los conductores es circular a altas velocidades, inclusive mayores que la velocidad de diseño y que la máxima permitida. En el primer ejemplo, la diferencia entre el percentil 85 y la velocidad de proyecto es de alrededor de 10 km/h. En el segundo ejemplo, la diferencia es prácticamente nula.

Aparentemente, las menores velocidades de proyecto en el primer caso se reflejan en una mayor incidencia de accidentes que en el segundo. Un elemento que contribuye a este comportamiento, lo proporciona una serie de mediciones de velocidad de punto en diferentes sitios de la Red Carretera Federal. A partir de éstas se comparó el percentil 85 de las velocidades medidas contra la velocidad de proyecto, estimada en esos sitios a partir de sus radios de curvatura, sobreelevaciones y ampliaciones de sección transversal.

Los resultados de la comparación se ilustran en la figura 1, en la cual se presenta en línea continua, la relación de igualdad entre percentiles 85 y velocidades de proyecto; y con línea discontinua, la línea de mejor correlación entre esos parámetros para los sitios explorados. En la figura es evidente que en promedio, para velocidades de proyecto de menos de 95 km/h, el percentil 85 queda por encima de la velocidad de proyecto, y viceversa para velocidades de proyecto de más de 95 km/h. Esto indica que entre más bajas son las velocidades de proyecto utilizadas, se verán excedidas más significativamente en frecuencia y magnitud por parte de los conductores; hasta un cierto límite, definido básicamente por la tecnología de los vehículos circulantes, a partir del cual ya no se dan excedencias a las velocidades de proyecto. Un comportamiento similar ha sido detectado en otros lugares (ref 3).

Otros problemas importantes a considerar, aunque no se abordan en este trabajo, se refieren a:

- I. Escaso cumplimiento de los límites máximos permitidos, pues sólo el 10% de los conductores explorados los cumplieron
- II. Elevado diferencial de velocidad entre automóviles y vehículos pesados, el cual llegó a ser hasta de 80 km/h.

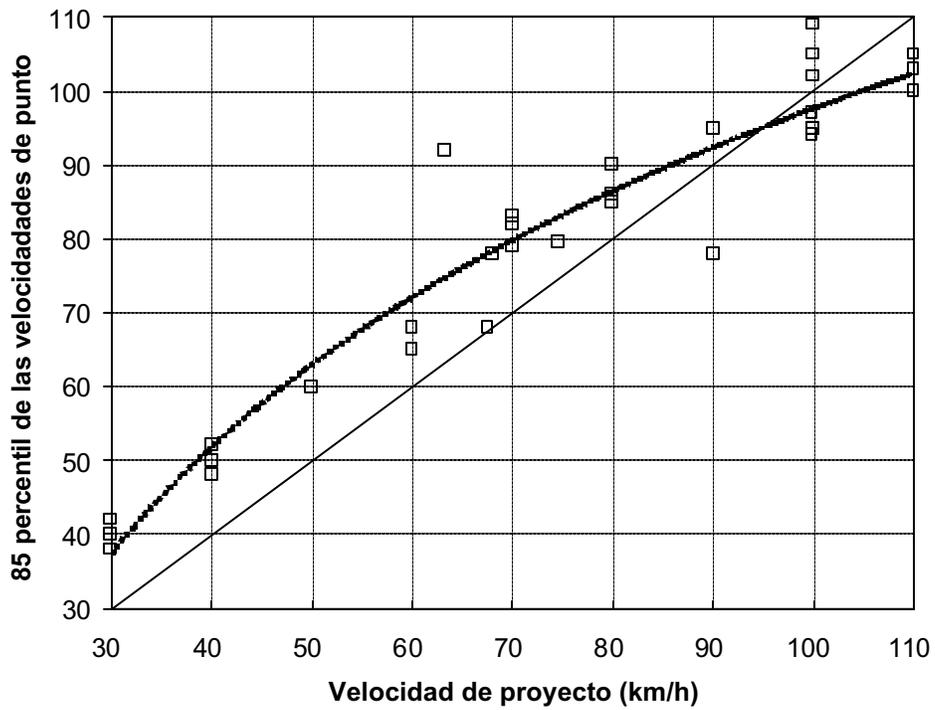


Figura 1. Velocidades de proyecto vs. percentil 85 de las velocidades medidas

En síntesis, parece evidenciarse la tendencia de que a menores velocidades de proyecto, mayores excedencias en las velocidades de los conductores en relación con ellas y, por lo mismo, más accidentes. Asimismo, si se desea un comportamiento de los flujos vehiculares más congruente con las propiedades físicas y geométricas de las autopistas (es decir, una autopista más congruente con los deseos de los usuarios), éstas deberán diseñarse para velocidades de proyecto relativamente elevadas (p ej, 110 km/h). Con ello, se tendrá un camino de mejores características y, por lo mismo, más seguro (con menores índices de accidentalidad).

A su vez conviene hacer referencia a que ha sido una práctica frecuente entender por modernización de un camino, su incremento de capacidad mediante la adición de carriles e incluso cuerpos adicionales, sin actualizar sus condiciones geométricas para las velocidades reales de circulación (deseo de movilidad). Esto también ha sido, frecuentemente, fuente de problemas de accidentalidad.

A continuación se tratará de dar mayor respaldo a los argumentos anteriores, relacionando la curvatura y las especificaciones de proyecto geométrico con la ocurrencia de accidentes.

### **3.3 Análisis estadístico sobre la ocurrencia de accidentes en curvas de diferente radio**

Los respectivos análisis se circunscriben a una red mexicana de autopistas de alrededor de 1,300 km. En ella, en el año 2000 se registraron alrededor de 4,540 accidentes, con saldos de 320 muertos, 3,260 lesionados, daños materiales por 9 millones de dólares y costo total de accidentes estimado en 94.8 millones de dólares, considerando costos promedio de 215 mil dólares por muerto, y 5,200 dólares por herido (ref 4).

Sin salirse del ejemplo anterior, en la tabla 1 se muestra, en primer lugar, información sobre la distribución de frecuencias de accidentes en el año 2000, en todos los segmentos de 100 m de cada sentido de la red considerada, clasificados en diferentes rangos según su radio de curvatura,  $R$ .

La información de la tabla mencionada proviene de la combinación de dos fuentes de datos: (a) un levantamiento georreferenciado del eje de cada sentido de la red considerada, realizado con una unidad GPS MAGELLAN, modelo PROMARK X, corregido diferencialmente, y manejado con ArcView (ref 5) y ArcInfo (ref 6), que son dos paquetes de cómputo diseñados para el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés); y b) una base de datos de los accidentes registrados en 2000 en dicha red. En esta base de datos, cada registro corresponde a un accidente.

El levantamiento georreferenciado se segmentó en elementos de 100 m,  $LC$ , mediante comandos de ArcInfo, obteniéndose además la distancia euclidiana entre los puntos inicial y final de cada segmento,  $C$ . Como resultado, se generó una vista (mapa) de ArcView con un tema (capa o *layer*) que tiene asociada una base de datos para todos los segmentos; en ella se registró para cada segmento, su radio de curvatura estimado mediante la solución de forma abierta [ec 2], derivada de tres ecuaciones del trazo geométrico de curvas simples horizontales en carreteras (cuerda,  $C$ , en función de radio,  $R$ , y deflexión,  $\Delta$  [ec 3], longitud de curva,  $LC$ , en función de  $\Delta$ , y grado de curvatura,  $G$  [ec 4], y  $R$  en función de  $G$ ) [ec 5]:

$$R = \frac{C}{2\text{sen}\left(28.648 \times \frac{LC}{R}\right)} \quad (2)$$

$$C = 2R\text{sen} \frac{\Delta}{2} \quad (3)$$

Tabla 1. Número de accidentes y de segmentos para rangos de curvas de radio, R

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Radio (m)	Frecuencia de segmentos	Porcentaje de segmentos	Porcentaje de segmentos acumulado	Frecuencia de accidentes	Porcentaje de accidentes	Porcentaje de accidentes acumulado	% Accidentes (6) % Secciones (3)
0 - 100	100	0.39	0.39	206	4.53	4.53	11.05
101 - 200	848	3.28	3.67	415	9.15	13.68	2.80
201 - 300	1522	5.89	9.56	609	13.41	27.09	2.27
301 - 400	1357	5.25	14.81	349	7.69	34.78	1.47
401 - 500	1070	4.14	18.95	128	2.82	37.60	0.68
501 - 600	1137	4.40	23.36	169	3.72	41.32	0.85
601 - 700	1463	5.66	29.02	182	4.01	45.33	0.71
701 - 800	1468	5.68	34.69	136	3.00	48.33	0.53
801 - 900	1458	5.64	40.34	211	4.64	52.97	0.83
901 - 1000	1303	5.04	45.38	161	3.54	56.51	0.70
1001 - 1100	1401	5.42	50.79	201	4.42	60.93	0.81
1101 - 1200	1088	4.21	55.00	192	4.24	65.17	1.01
1201 - 1300	1101	4.26	59.26	168	3.70	68.87	0.87
1301 - 1400	1230	4.76	64.02	153	3.38	72.25	0.71
1401 - 1500	887	3.43	67.44	105	2.32	74.57	0.67
1501 - 1600	775	3.00	70.45	102	2.25	76.82	0.76
1601 - 1700	682	2.64	73.09	128	2.82	79.64	1.07
1701 - 1800	434	1.68	74.77	38	0.83	80.47	0.49
1801 - 1900	615	2.38	77.15	102	2.25	82.72	0.95
1901 - 2000	494	1.91	79.06	75	1.65	84.37	0.87
>2000	5413	20.94	100.00	710	15.63	100.00	0.75

$$LC = \frac{20\Delta}{G} \quad (4)$$

$$R = \frac{1145.92}{G} \quad (5)$$

En la ecuación 2, **C** y **LC** se ingresan en metros, *Sen* se refiere a la función seno, y su argumento se encuentra en grados. **C** y **LC** son conocidos para todos los segmentos, pudiéndose valorar **R** por iteraciones, ingresando un valor inicial de **R** del lado derecho de la ecuación, para posteriormente recalcular con la misma un nuevo valor de **R**, que después se reingresa en el lado derecho de la ecuación y así sucesivamente.

En la base de datos de segmentos, también se registró para cada segmento, la secuencia kilométrica de sus puntos inicial y final, según los hitos kilométricos de cada sentido de las autopistas consideradas, también levantados con GPS y sus coordenadas corregidas diferencialmente.

Como en la base de datos de accidentes, la ubicación de los mismos se registra según los hitos kilométricos, fue posible realizar la “geocodificación” de todos los accidentes en esa base de datos para el año 2000, sobre la vista de ArcView de segmentos. “Geocodificación” es el proceso mediante el cual se añaden puntos (accidentes en este caso) de determinada ubicación en un mapa (vista de segmentos), de acuerdo con cierto sistema de domicilios contenido en dicho mapa (nombre de la autopista y secuencia kilométrica según los hitos). Al realizarse la geocodificación, ArcView coloca cada accidente de manera precisa, en la vista de segmentos, con base en su cadenamamiento a lo largo de la autopista correspondiente.

Como salida de la geocodificación, se genera un nuevo tema en la vista de segmentos, el cual al ser activado, muestra la representación geográfica de los

accidentes en dicha vista. Este nuevo tema es el mismo archivo de accidentes geocodificado, adicionado a una serie de datos entre los que se encuentra la identificación del segmento de ocurrencia de cada accidente. La figura 2 ejemplifica la representación que se genera al activar este tema en la vista de segmentos, a la vez que muestra la ubicación de los accidentes dentro de la red considerada. Una ventaja que se obtiene con la geocodificación es que permite integrar a la vista de segmentos, todos los datos contenidos en el archivo de accidentes, pudiéndose generar con ello los elementos de información en la tabla 1, así como otros muchos más, mediante las herramientas convencionales de consulta de ArcView.

La primera columna de la tabla 1 presenta los rangos de **R** en los que se clasifican los alrededor de 26,000 segmentos de 100 m en los que se dividieron ambos sentidos de la red de autopistas considerada. La tercera columna muestra el porcentaje de segmentos dentro de cada uno de esos rangos (distribución de frecuencias relativas de los segmentos por rangos de **R**). La cuarta columna, la acumulada de los porcentajes en la tercera columna (acumulada de frecuencias relativas de los segmentos por rangos de **R**). La sexta columna, el porcentaje de los 4,540 accidentes que ocurrieron en los segmentos dentro de cada rango (distribución de frecuencias relativas de los accidentes por rangos de **R**). La séptima columna, la acumulada de los porcentajes de la columna anterior. La última columna presenta los cocientes de los porcentajes en la columna seis entre los porcentajes en la columna tres. Este cociente, para cada rango, es indicativo de la tendencia de los accidentes a concentrarse en ese rango más de lo normal (sobre-representarse en ese rango). La figura 3 ilustra, en un diagrama de barras, el cociente de sobre-representación obtenido para los distintos rangos de **R**.

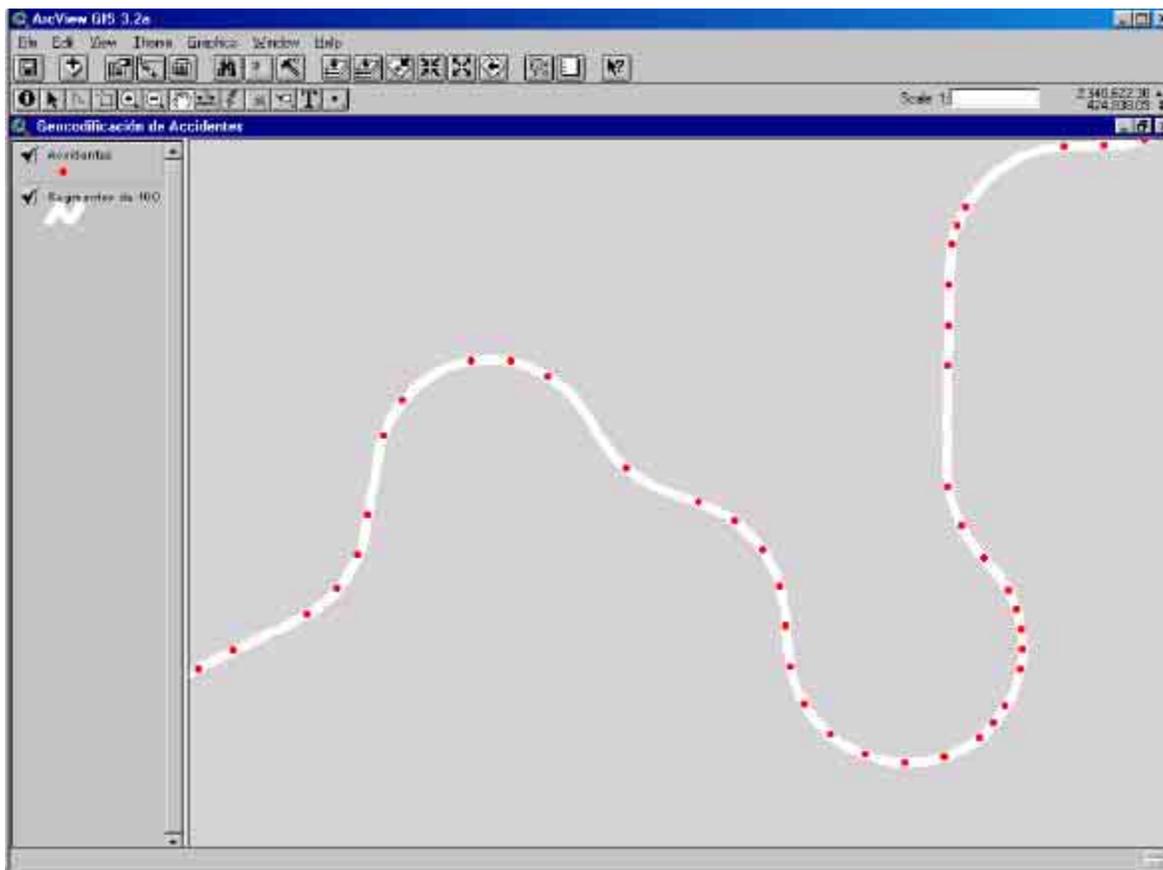


Figura 2. Representación geográfica que muestra los segmentos de 100 m, y la geocodificación de accidentes

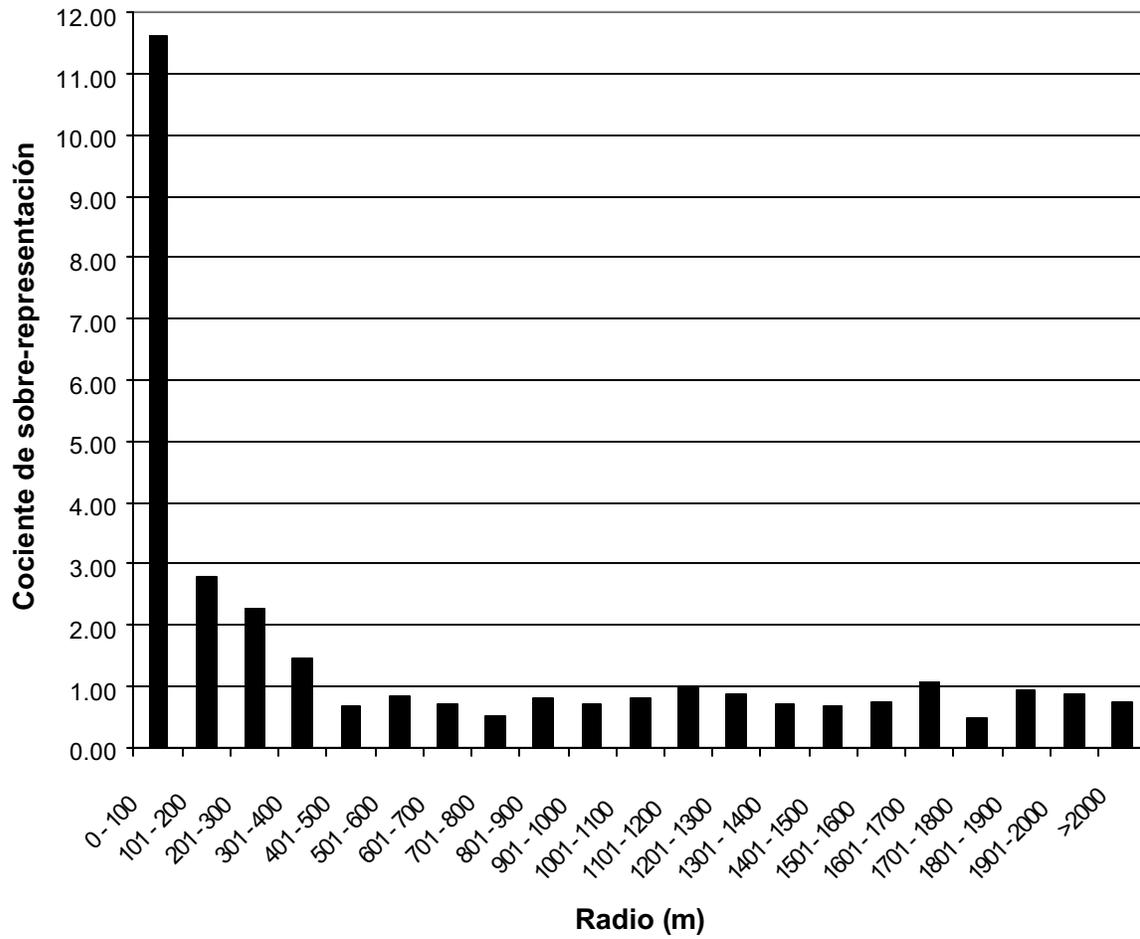


Figura 3. Cociente de sobre-representación para los distintos rangos de radio

Tanto en la tabla 1 como en la figura 3, es evidente que la sobre-representación de los accidentes se dispara exponencialmente en dirección inversa a **R**, para valores de **R** menores a 400 m. En este rango, al disminuir **R**, el número de accidentes por sección aumenta y el porcentaje de secciones con esos valores de **R** disminuye, con lo cual estos dos efectos generan conjuntamente el comportamiento exponencial observado.

A partir de la tabla 1 y la figura 3 puede concluirse que en el 14.81% de los segmentos con **R** menor o igual a 400 m, ocurre 34.78% de los accidentes totales registrados. Por tanto, la ocurrencia relativa de accidentes en estos segmentos  $(34.78/14.81)$  es tres veces mayor que en los segmentos con **R** mayor a 400 m  $((100-34.78)/(100-14.81))$ .

Una conclusión que surge del resultado anterior es que los radios mínimos ( $R_{\min}$ ) especificados para prácticamente todas las velocidades de proyecto ( $V_{\text{proy}}$ ) consideradas por la normativa de Proyecto Geométrico de Carreteras (ref 7) vigente en caminos Tipo "A" (las menores de 110 km/h), son generadores importantes de accidentes, y, con ello, lo es también una gran cantidad de las curvas que existen en las autopistas de cuota del país (14.81% de sus segmentos de 100 m según la tabla 1).

Dichos radios mínimos y sus correspondientes valores de grado máximo de curvatura ( $G_{\max}$ ) para las distintas velocidades de proyecto en la normativa, se reproducen en la tabla 2. Otra interpretación del resultado anterior es que la única  $V_{\text{proy}}$  que conduce a la construcción de autopistas seguras, para las velocidades actuales de circulación en lo referente a sus curvas es 110 km/h, ya que para ella se especifican curvas con **R** siempre mayor a 417 m, según la tabla 2.

Tabla 2. Velocidad de proyecto ( $V_{\text{proy}}$ ), grado máximo de curvatura ( $G_{\text{máx}}$ ) y radio mínimo ( $R_{\text{mín}}$ )

<b>VELOCIDAD DE PROYECTO</b> $V_{\text{proy}}$ (km/h)	<b>GRADO MÁXIMO DE CURVATURA</b> $G_{\text{máx}}$ (grados)	<b>RADIO MÍNIMO</b> $R_{\text{mín}}$ (metros)
110	2.75	417
100	3.25	353
90	4.25	270
80	5.50	208
70	7.50	153
60	11.00	104

## **3.4 Comentarios**

Las evidencias mostradas apuntan hacia la conveniencia, desde el punto de vista de la seguridad operativa, de buscar una meta de velocidades de proyecto relativamente elevadas (p ej, 110 km/h) al diseñar y construir futuras autopistas.

Otras recomendaciones pertinentes en aras de la seguridad para diferentes rubros, derivadas de experiencias problemáticas pasadas, públicamente comentadas, son:

### **3.4.1 Proyecto geométrico**

- Evitar una geometría irregular en un sólo trayecto, con curvas horizontales aisladas que restrinjan repentinamente la velocidad de operación.
- Construir terceros carriles de ascenso, para permitir el rebase de vehículos pesados.
- Diseño adecuado o emplazamiento de intersecciones a desnivel.
- Evitar la presencia de curvas verticales sucesivas con largas restricciones de rebase (esto sólo en el caso de los “caminos directos”).
- Proporcionar rampas de emergencia para detener vehículos fuera de control, en carreteras con fuertes y prolongadas pendientes.
- Haber correspondencia entre la geometría del camino, y la estructura de pavimento y superficie de rodamiento proporcionadas.
- Proporcionar una “Zona Despejada”, definida como el área adyacente a los caminos, la cual se mantenga libre de peligros laterales, como postes, árboles y arbustos con troncos mayores a 1 m, muros de obras de arte, pendientes fuertes (mayor a 4:1) y otros objetos fijos, o condiciones que representen un peligro. El ancho de esta zona debe ser consistente con el diseño geométrico, velocidad de operación, composición vehicular y nivel de tránsito.

### **3.4.2 Barreras y taludes de terraplenes**

- La recomendación de instalar una barrera se basa en la premisa de que sólo debe instalarse si reduce la severidad de accidentes potenciales, ya que el propósito fundamental de las barreras es impedir que un vehículo abandone el camino de manera imprevista y golpee un objeto que lo detenga violentamente, caiga por el borde del terraplén, o que las consecuencias previstas del accidente sean mayores que las provocadas por el impacto con la propia barrera; por eso mismo deben utilizarse barreras de tecnología probada y certificada.
- Para proveer un nivel de seguridad aceptable, los taludes de los terraplenes deben ser lo más tendidos posible. Taludes superiores a 3:1 no son traspasables por un vehículo; en otras palabras, el vehículo que comienza a bajar por estos taludes volcará. Taludes entre 3:1 y 4:1 son traspasables si son uniformes, es decir, si no cuentan con irregularidades importantes, aun cuando el vehículo seguirá bajando hasta donde termine el talud. Taludes de 4:1 o menores son traspasables y recuperables, o sea que, un vehículo que comienza a descender por éstos, podrá en muchos casos recuperar el control y detenerse o subir de nuevo a la calzada.

### **3.4.3 Estabilidad de taludes en cortes**

- Un buen proyecto de estabilidad de taludes y una aplicación adecuada de las medidas derivadas del mismo, deben minimizar el problema de la ocurrencia de “caídos”.

### **3.4.4 Drenaje**

- La disposición de cunetas no montables junto a la calzada, compromete seriamente la seguridad de un conductor frente al más leve despiste.
- Debe darse una adecuada disposición a los muros de brocal en obras de arte.



## 4 Todo Tipo de Carreteras

---

### 4.1 Control de acceso

La expresión “acceso”, en este contexto, se refiere a ingresar a una carretera de tráfico proveniente de otras vías, incluyendo intersecciones, caminos locales públicos y privados así como cruces a nivel de la mediana. El término “control de acceso”, por tanto, reduce o elimina la variedad y espaciamiento de eventos a los cuales el conductor debe responder. Ha sido señalado como el “factor de proyecto más importante por sí mismo, desarrollado para la reducción de accidentes” (ref 8).

Parte de la ventaja de seguridad de las autopistas se deriva del control de acceso desde las propiedades aledañas, a través de la eliminación de eventos inesperados y la separación de puntos de decisión. Sin embargo, puede lograrse un cierto nivel de control de acceso sin los otros elementos de proyecto de las autopistas (p ej, intersecciones a desnivel).

Controlar el acceso en carreteras existentes a través del uso de calles o vías laterales, puede ser una herramienta efectiva de seguridad (fotografías 2 y 3). Las Referencias 8 y 9 mencionan algunos estudios de los 60 y los 70 que demuestran que la frecuencia de accidentes aumenta rápidamente con la densidad de accesos. Por ejemplo, en uno de esos estudios, la diferencia entre un bajo nivel de desarrollo (menos de 20 accesos por kilómetro), y un alto nivel de desarrollo representó más que duplicar el número de accidentes de acceso. Otro de esos estudios también indicó que es un problema tanto en áreas rurales como urbanas (en los Estados Unidos de Norteamérica); y otro más señaló que los accidentes aumentan con la densidad de otras formas de acceso, incluyendo intersecciones y cruce de mediana.



**Fotografías 2 y 3. Detalles de una vía rápida con calles laterales**

En la mayoría de las carreteras, por supuesto, no es posible o significativo eliminar el acceso, aunque los efectos negativos del acceso pueden ser moderados al reducir el conflicto en los puntos de acceso. Los tratamientos que suelen darse en este sentido incluyen:

- La reducción del número de accesos (p ej, eliminando aberturas en la mediana, proporcionando calles laterales, etc.).
- La separación de los flujos vehiculares de frente, de aquellos que utilizan el acceso (p ej, a través de carriles específicos para dar vuelta, carriles de aceleración y deceleración, etc.).

La Referencia 9 recomienda “controlar el acceso, siempre que sea posible, en aquellas vías que transportan la mayor cantidad de tráfico, o que conectan centros de actividad principales, y/o que son arterias regionales principales”.

En síntesis, el control de acceso (p ej, a través de la reducción de la frecuencia de intersecciones y aberturas en la mediana, así como el impedimento del acceso directo desde las propiedades aledañas a las carreteras expresas de largo recorrido), el uso de calles laterales, carriles específicos para dar vuelta, y carriles de aceleración y deceleración, así como las restricciones al acceso desde las propiedades aledañas, todos estos elementos tienen beneficios en el rubro de la seguridad.

## 4.2 Medianas

Las medianas, o reservaciones centrales de espacio entre sentidos de circulación de una carretera, se utilizan para separar el tráfico de direcciones opuestas. Hay varios tipos que incluyen:

- Medianas anchas sin barrera física que proporcionan espacio para que el conductor de un vehículo descontrolado retome nuevamente el control del mismo, así como para suministrar carriles para dar vuelta (fotografía 1).

- Medianas angostas con barrera física (metálica o de concreto), diseñada para hacer volver a su propio flujo vehicular a un vehículo descontrolado que choque con ella. Estas medianas también tienen el efecto de desalentar el cruce inadecuado de la carretera por peatones (fotografía 4).
- Medianas angostas sin barrera física, que pueden hacer muy poco por los vehículos descontrolados, pero que claramente separan los flujos vehiculares de direcciones opuestas, y proporcionan una oportunidad a los peatones para cruzar la carretera en dos etapas (fotografía 5).

Debido a la separación del tránsito en direcciones opuestas, las medianas tienen un efecto positivo en la seguridad vial, proporcionando algunos beneficios adicionales a los peatones. La Referencia 1 señala que las carreteras divididas de la Gran Bretaña (con mediana central) tuvieron una tasa de accidentes por vehículo-kilómetro de dos terceras partes de la de las carreteras no divididas. Asimismo, la Referencia 2 comparó las frecuencias de accidentes para carreteras australianas de cuatro carriles con medianas anchas, angostas, y angostas pintadas, con carreteras de cuatro carriles sin medianas. En comparación con las carreteras no divididas, las primeras redujeron la frecuencia de accidentes como sigue:

- |   |     |
|---|-----|
| • Mediana angosta pintada                         | 30% |
| • Mediana angosta con vialetas, o banda vibradora | 48% |
| • Mediana ancha                                   | 54% |

En áreas urbanas, las medianas deben ser, donde sea posible, suficientemente amplias para proteger un vehículo que dé vuelta, o que cruce la vía. De hecho, en la Referencia 2 éste es el criterio para definir medianas anchas.

En áreas rurales deben proporcionarse medianas anchas para permitir al conductor de un vehículo descontrolado, retomar el control. La Referencia 8 indica que con un ancho de mediana de 9 m, entre 70 y 90% de los vehículos que se refugian en ella, no alcanzan los carriles de circulación del otro sentido.



**Fotografía 4. Ejemplos de medianas angostas con barrera de concreto**



**Fotografía 5. Ejemplos de medianas sin ningún tipo de barreras**

Las medianas angostas con una barrera física, tienen típicamente una mayor frecuencia global de accidentes, pero una menor severidad dado que los accidentes frontales son reducidos o eliminados. Por ejemplo, la Referencia 1 se habla que instalar una barrera metálica en la mediana de carreteras divididas condujo a una reducción de 15% en el número de muertes, pero llevo a un incremento en los accidentes sin lesionados, de 14%.

El talud de la mediana, cuando ésta es ancha, también puede influir en los accidentes. La Referencia 8 sugiere que un talud máximo de 6:1 es deseable en medianas anchas, y que taludes de 4:1 o más pronunciados están asociados con la ocurrencia de volcaduras.

Para máxima efectividad en seguridad, el número de aberturas en la mediana debe ser minimizado, aunque esto es, por supuesto, a expensas de un acceso adecuado. La Referencia 10 establece que en tanto que el suministro de mediana mejora la seguridad vial de carreteras principales, tal mejora es inversamente proporcional al número de aberturas en la mediana.

En resumen, la separación de flujos vehiculares de sentido opuesto a través de una mediana conduce a beneficios significativos en seguridad. En áreas urbanas, las medianas deben ser suficientemente amplias para proteger los vehículos que dan vuelta o que cruzan la vía, en tanto que un ancho mínimo de 9 m con un talud no mayor de 6:1 son adecuados para áreas rurales. Las medianas pueden proporcionar beneficios a los peatones, permitiéndoles cruzar la carretera en etapas.

### **4.3 Elementos de la sección transversal**

La sección transversal de la carretera incluye los carriles de circulación, los acotamientos, bordillos, elementos del drenaje, así como los cortes y los terraplenes. A través de los años se han realizado estudios dirigidos a investigar los efectos en la seguridad vial, del ancho de carriles y acotamientos, tipo de

acotamiento, pendiente transversal del pavimento, etc. Sin embargo, pocos de ellos han sido capaces de establecer el efecto de otros factores, tales como el alineamiento, la zona lateral libre de obstáculos, o de determinar las relaciones lógicas entre los tipos de accidentes y los elementos de la sección transversal, aunque parece haber consenso general sobre los aspectos que se indican enseguida.

### 4.3.1 Ancho de carril

Los anchos de carril de 3.4 a 3.7 m a la vez que generan las menores frecuencias de accidentes en carreteras, y también representan el balance más apropiado entre seguridad y eficiencia del flujo vehicular.

Se ha demostrado que anchos de carril menores de 3 metros contribuyen a generar accidentes multi-vehiculares.

Varios estudios han demostrado las ventajas en seguridad derivadas de la ampliación de carriles. Por ejemplo, la Referencia 11 contiene experiencias estadounidenses en donde ampliaciones de carril de 2.7 a 3.4 m y de 3 a 3.7 m en carreteras, generaron reducciones en la incidencia de accidentes con heridos graves de 22%. La misma referencia reporta resultados acerca de la cantidad de ampliación, a diferencia del ancho final de carril, fue el factor primordial que afectó la disminución de la frecuencia de los accidentes relacionados con el ancho de carril (tales como los choques frontales o las salidas del camino). Las reducciones porcentuales obtenidas fueron:

- Para una ampliación de carril de 0.3 m : 12% de reducción
- Para una ampliación de carril de 0.6 m : 23% de reducción
- Para una ampliación de carril de 0.9 m : 32% de reducción
- Para una ampliación de carril de 1.2 m : 40% de reducción

Así como se ha demostrado que los anchos de carril de menos de 3 m, contribuyen a la ocurrencia de accidentes multi-vehiculares, también se ha comprobado el poco beneficio, si no es que ninguno, si se incrementa el ancho de carril más allá de 3.7 m, excepto en el caso de que por elevados volúmenes de camiones de carga, carriles de 4 m pudiesen ser apropiados. De hecho, anchos de carril mayores que los anteriores pueden ser contraproducentes, dado que estimulan la realización de maniobras inseguras, tales como rebasar a lo largo de la línea central ante tráfico vehicular frontal.

No se recomienda proporcionar un ancho de circulación tan amplio que permita tres carriles, pero que sólo se dibujen dos. Esto invita a los conductores de vehículos de ambas direcciones a rebasar de cara el tránsito vehicular frontal (fotografía 6). Esto sería una seria negligencia por parte de la autoridad carretera al no proporcionar al conductor una guía clara sobre cómo debe utilizar la carretera, así como un incumplimiento de su responsabilidad de disuadir maniobras inesperadas e inseguras. Sería mucho mejor, desde el punto de vista de la seguridad y del servicio al usuario, dibujar una carretera con tres carriles, y un carril de rebase claramente definido en una dirección. Sería también mucho más barato, dado que los carriles de rebase no necesitan ser colocados en toda la longitud del camino, sino quizá sólo en 10% de la misma.

### **4.3.2 Ancho de acotamiento**

La información relacionada con el efecto del ancho de acotamiento en los accidentes es menos concluyente. El aspecto más importante de los acotamientos parece ser si se encuentran revestidos o no. Sin embargo, hay alguna evidencia de que la incidencia de accidentes se reducen en la medida en que el ancho de acotamiento aumenta hasta alrededor de 3 m. Por ejemplo, la Referencia 11 da algunos resultados que muestran un 21% de disminución en accidentes totales cuando una carretera sin acotamientos es provista de ellos, con ancho entre 0.9 y 2.7 m. Asimismo, recomienda que para carreteras sin acotamiento, el ancho óptimo de acotamiento a proporcionar es 1.5 m.



**Fotografía 6. Detalles de maniobras de rebase inseguras en la zona central de separación de flujos de circulación, debido a anchos de circulación muy amplios**

La Referencia 12, por su parte, encontró una reducción en los accidentes al incrementarse el ancho de acotamientos de 0 a 2 m, y que poco beneficio adicional es con anchos de acotamiento por encima de 2.5 m.

### **4.3.3 Ancho de carril y acotamiento**

Los anchos de carril y acotamiento no son independientes, por lo cual, los resultados presentados no deben tomarse como concluyentes.

La Referencia 11 generó relaciones que muestran la frecuencia esperada de accidentes (choques frontales o en las salidas del camino) en función del ancho conjunto de carril y acotamiento. Estas relaciones mostraron claramente que el incrementar el ancho de carril (hasta 3.7 m) y el ancho de acotamiento (hasta 3 m) tienen efectos benéficos, pero que estos dos efectos no son independientes.

Dicha referencia concluye que la ampliación de carriles de 2.7 a 3.7 m, sin mejoramiento de acotamientos, puede reducir los accidentes en 32%. La ampliación de acotamientos es menos efectiva que la de carriles. Por ejemplo, añadir acotamientos revestidos de 0.9 m a una carretera sin ellos, redujo los accidentes en 19%. Si esa adición de 0.9 m fuese pavimentada, la baja esperada sería de 22%.

Las mayores ganancias provienen de una combinación de mejoras. Por ejemplo, ampliar una carretera con carriles de 2.7 m y sin acotamientos, a carriles de 3.7 m y acotamientos de 1.8 m, redujo los accidentes en 60%. Sin embargo, la tendencia a la baja de accidentes como resultado de mejorar un elemento, será mayor si los otros elementos también son mejorados.

La tabla 3 sintetiza las recomendaciones de la Referencia 11 sobre anchos, conjuntos de carril, y acotamiento.

Tabla 3. Anchos de Carril y Acotamiento Recomendados

TDPA	VELOCIDAD DE PROYECTO  (km/h)	PORCENTAJE DE VEHÍCULOS DE CARGA			
		> 10 %		< 10 %	
		ANCHOS EN METROS			
		CARRIL	CARRIL + ACOTAMIENTO	CARRIL	CARRIL + ACOTAMIENTO
1 – 750	< 50	3.0	3.7	2.7	3.3
	> 50	3.0	3.7	3.0	3.7
751 – 2000	< 50	3.3	4.0	3.0	3.7
	> 50	3.7	4.6	3.3	4.3
> 2000	Todas	3.7	5.5	3.3	5.2

TDPA = Tránsito Diario Promedio Anual

#### **4.3.4 Pendiente transversal**

El drenaje es una parte esencial en cualquier carretera, e involucra tres aspectos: drenaje de la superficie, drenes en zonas laterales y puentes y alcantarillas. En esta sección, sólo se hará referencia al primero.

La Referencia 13 puntualiza sobre la necesidad de contar con un buen drenaje superficial, ya que una película o capa de agua de 6 mm puede generar hidropneumático al reducir el coeficiente de fricción cercano al cero, haciendo virtualmente imposibles las operaciones de frenado así como de dar vuelta. Señala también que la mayoría de los accidentes en ambiente húmedo o mojado, ocurre en pavimentos con baja resistencia al derrapamiento, y que una película de agua en curvas de radio elevado, puede tener casi el doble de espesor que la de una sección en tangente con bombeo a uno y otro lado de la rasante, con la misma pendiente transversal.

Este es un factor importante a considerar en el proyecto carretero, especialmente donde la distancia de drenaje superficial es más larga que el ancho de un carril.

#### **4.3.5 Síntesis**

Los anchos de carril y acotamiento en la tabla 3 representan la recomendación más actualizada. Los anchos de carril en exceso de 3.7 m son innecesarios, excepto donde haya altos volúmenes de camiones de carga; anchos de carril menores de 3 m son menos seguros. El ancho de acotamiento debe ser considerado a la luz del ancho de carril, como es el caso en la tabla 3. La calidad del acotamiento (revestido, no revestido o pavimentado) así como su condición, son también consideraciones importantes. Adicionalmente, en el proyecto de los elementos de la carretera debe prestarse especial cuidado a consideraciones del drenaje, con el fin de evitar el hidropneumático.

## **4.4 Distancia de visibilidad**

Todo conductor debe ser capaz de ver la carretera que está por transitar, con el fin de navegar, guiar y controlar su vehículo. Esta distancia de visibilidad frontal (a diferencia de la distancia de visibilidad en intersecciones) no debe ser menor que la distancia requerida para hacer alto, conocida como distancia de visibilidad de parada (DVP). De ahí la importancia de que el proyectista llegue a garantizar que el conductor pueda viajar con seguridad a la velocidad adecuada según la carretera, proporcionando la distancia de visibilidad frontal apropiada.

### **4.4.1 Distancia de visibilidad general**

La Referencia 12 da a saber que en la mayoría de los casos, la incidencia de accidentes se reducen al aumentar la distancia de visibilidad promedio, especialmente para los accidentes de noche con un sólo vehículo involucrado. Asimismo, que distancias de visibilidad menores de 200 m son frecuentes en curvas horizontales en las que se generan elevadas frecuencias de accidentes.

### **4.4.2 Distancia de visibilidad en curvas verticales en cresta**

Por su parte, la Referencia 11 reporta frecuencias de accidentes 52% mayores en sitios con restricciones a la visibilidad debidas a la curvatura vertical, en relación con sitios de control. Asimismo, a partir de un modelo generado con el fin de estimar cuando es rentable alargar una curva vertical para aumentar la distancia de visibilidad sobre una cresta, concluye que reconstruir esas crestas es rentable cuando la velocidad de proyecto es 33 km/h menor que las velocidades operativas en el sitio, el flujo vehicular excede 1,500 vehículos por día y/o existe un riesgo importante (p ej, una intersección de flujo elevado, una curva horizontal cerrada, una pendiente descendente pronunciada o una interrupción de carril).

La Referencia 14, sin embargo, concluyó que es rentable mejorar la distancia de visibilidad en curvas en cresta, sólo cuando la mejora va de distancias de visibilidad muy cortas a distancias de visibilidad muy largas, así como cuando los flujos vehiculares son suficientemente elevados para justificar el gasto. También advierte sobre el peligro de mejorar curvas verticales en cresta con deficiencias extremas de visibilidad, actualizándolas a un estándar que aún es menor que el mínimo, pues puede conducir a un deterioro en la seguridad, ya que la longitud carretera con distancia de visibilidad deficiente, necesariamente tiende a aumentar.

#### **4.4.3 Distancia de visibilidad en curvas horizontales**

La Referencia 14 señala que mejorar de la distancia de visibilidad en curvas horizontales es altamente rentable. Sugiere que ciertos tratamientos de bajo costo, tales como la eliminación de la vegetación u otros obstáculos menores en el interior de las curvas horizontales, puede ser eficiente en casi todas las carreteras. Enfatiza la conveniencia de aprovechar trabajos de reconstrucción o rehabilitación mayor de las carreteras, para mejorar las distancias de visibilidad.

La distancia de visibilidad es particularmente importante para los camiones de carga, dado que en general éstos tienen un comportamiento inferior al frenado el que debe ser compensado, en parte, por una mayor distancia de visibilidad. La Referencia 8 concluye que el aumento de la altura del ojo en los camiones de carga compensa el inferior comportamiento al frenado para el promedio de todos los tamaños de camiones; esto no se cumple para los camiones más grandes y más pesados, los cuales requieren mayores distancias de frenado.

También señala que los requerimientos de distancia de visibilidad en curvas verticales en columpio, determinados por la distancia de visibilidad nocturna generada por los faros, son satisfactorios para los camiones de carga. Sin embargo, sugiere que las distancias de visibilidad en el entorno de las curvas

horizontales pueden ser un problema para los camiones de carga, dado que en esos sitios la mayor altura del ojo es de poca utilidad.

En resumen, las distancias de visibilidad insuficientes están asociadas con la ocurrencia de accidentes. El grado de riesgo varía con las características de la carretera, pero algunas características y combinaciones de ellas son más peligrosas que otras. La reconstrucción de curvas horizontales para incrementar la distancia de visibilidad suele no ser rentable, excepto en casos extremos. Por otra parte, mejorar la distancia de visibilidad de curvas horizontales suele ser rentable si involucra medidas de bajo costo, tales como la eliminación de vegetación u otros obstáculos menores. Esto es particularmente recomendable cuando hay flujos considerables de camiones de carga.

## **4.5 Alineamiento**

La curvatura horizontal es el factor principal que afecta la velocidad de los vehículos en carreteras, particularmente a velocidades por debajo de 100 km/h. Por tanto, las curvas horizontales deben ser proyectadas de tal forma que puedan ser transitadas seguramente. Las curvas verticales y las pendientes también afectan la seguridad vial, pero el proyectista debe preocuparse primordialmente del requerimiento de integrar los detalles de los alineamientos vertical y horizontal, así como de la necesidad de mantener un estándar uniforme de proyecto a lo largo de toda la carretera.

### **4.5.1 Alineamiento horizontal**

Es más probable que los accidentes ocurran en las curvas que en las tangentes (secciones rectas de carretera). La Referencia 14 reporta que la frecuencia promedio de accidentes en segmentos en curvas horizontales es tres veces la de segmentos en tangente, siendo esta relación de cuatro veces para accidentes de un vehículo del tipo “salidas del camino”. Adicionalmente, los segmentos en curva suelen tener mayores proporciones de accidentes severos en superficie mojada.

En numerosos estudios se ha tratado de investigar la relación entre el proyecto de curvas horizontales y los accidentes; inclusive, han identificado varias características geométricas, de la sección transversal y del tránsito, relacionadas con la seguridad vial de las curvas horizontales, prestando atención al radio y la longitud de la curva, la intensidad vehicular, el ancho de carriles y acotamientos, los peligros en las zonas laterales, la distancia de visibilidad de frenado, el alineamiento vertical en las curvas horizontales, la distancia a curvas adyacentes, la distancia a intersecciones cercanas, la presencia de dispositivos para el control del tránsito, etc.

A su vez, la Referencia 14 determinó que el radio es el principal factor que afecta la seguridad en curvas horizontales, pero que el ancho de acotamiento, el ancho de circulación y la longitud de la curva (en ese orden) son también importantes. Asimismo, encontró que radios de curvatura mayores a 500 m no generan problemas de seguridad, pero que curvas con radios menores a ese valor están asociadas con un incremento abrupto en el riesgo.

La Referencia 12 obtuvo que la frecuencia de accidentes en carreteras suecas de un carril por sentido aumenta en curvas con radio por debajo de 1,000 m, así como si el radio excede los 3,300 m. Este último comportamiento quizá se deba a que curvas con radio elevado, por lo mismo pueden ser muy largas dando lugar a maniobras peligrosas de rebase.

Por su parte la Referencia 11 sugiere que la relación entre los accidentes y la geometría de la carretera tiene que ver con la consistencia de sus características dentro del contexto global del segmento carretero. Lo anterior sirvió como base para desarrollar guías para el “suavizamiento” de curvas (es decir, la reconstrucción de la curva para darle un mayor radio). Los resultados sugirieron que esto es rentable si el flujo vehicular excede los 750 vehículos por día, y la velocidad de proyecto se encuentra más de 25 km/h por debajo del percentil 85 de las velocidades de los vehículos aproximándose a la curva. Asimismo, se fortalece el uso del “suavizamiento” de curvas mediante argumentos sobre beneficios

adicionales derivados a los usuarios en términos de reducción de tiempos de viajes y costos de operación vehicular.

Sin embargo, concluye que no es conveniente generar guías universales, debido al alto grado de variación en las condiciones de sitio a sitio. También se evaluaron los niveles de fricción lateral generados por cada conductor transitando por curvas, antes y después del “suavizamiento”, concluyéndose que en tanto que la velocidad aumenta, las demandas de fricción lateral generalmente disminuyen, pero que el margen de seguridad se incrementa en todas las curvas, lo cual se respalda con datos de accidentes.

De mayor importancia que su consideración por si sólo desde el punto de vista de la seguridad, es la consideración del radio de curvatura de manera consistente con otros parámetros a lo largo de un segmento.

El “suavizamiento” de curvas es caro y únicamente es rentable bajo ciertas condiciones. Otros tratamientos alternos que pueden utilizarse para mitigar problemas de seguridad vial en curvas horizontales, son:

- La rehabilitación física y/o la reconstrucción parcial, incluyendo la remoción de riesgos en las zonas laterales (árboles, postes, etc), la reducción de los taludes laterales, la reposición de la superficie de los carriles de circulación con el fin de mejorar la resistencia al derramamiento, el aumento de la sobreelevación, la pavimentación de los acotamientos y la eliminación de escalones en los bordes del pavimento.
- Tratamientos de bajo costo, tales como el repintado de las rayas centrales y laterales del pavimento, la instalación de vialetas reflejantes, la colocación de delineadores del alineamiento de la curva, la rehabilitación del señalamiento preventivo, etc.

## **4.5.2 Alineamiento vertical**

Incluye las pendientes y las curvas verticales. Las curvas verticales en columpio rara vez son un problema (excepto cuando se encuentran en la vecindad de una curva horizontal), en tanto que en el caso de las curvas verticales en cresta los problemas tienen que ver con la distancia de visibilidad.

Las pendientes pronunciadas están generalmente asociadas con mayor frecuencia a los accidentes. La Referencia 15 sugiere que la frecuencia y la severidad de los accidentes aumentan con la pendiente, tanto en el sentido ascendente como en el descendente. Asimismo, ha encontrado que el sentido descendente es más problemático, debido principalmente a los accidentes de camiones de carga, aunque se reconoce que el comportamiento y capacidad de frenado de estos últimos han mejorado en los últimos años. Concluye que las pendientes pronunciadas de más de 6% se asocian a una mayor presencia de accidentes.

La Referencia 12 sugiere que en Suecia cualquier pendiente es potencialmente un problema y que las pendientes de 2.5 y 4% tienden a ser frecuentes en accidentes mayores a 10 y 20% respectivamente, en relación con segmentos horizontales adyacentes. Esto puede ser un reflejo de las condiciones climáticas de Suecia. Asimismo, sugiere que curvas y pendientes deben considerarse conjuntamente en relación con la ocurrencia de accidentes.

## **4.5.3 Combinaciones de alineamiento vertical y horizontal**

Más importante que el alineamiento vertical o el horizontal considerados individualmente, es la forma en que ambos se combinan a lo largo de un tramo carretero. Los alineamientos vertical y horizontal no deben ser considerados independientemente entre sí, o independientemente de los estándares de proyecto aplicables al resto de la carretera.

La Referencia 11 señala al respecto, que aquellos casos en los que se violan las expectativas de los conductores, suelen ser importantes generadores de

accidentes; por ejemplo, curvas horizontales precedidas de tangentes largas; intersecciones con alto flujo vehicular en zonas rurales aisladas; curvas horizontales compuestas en el mismo sentido, en donde la primera es muy ligera y la segunda muy pronunciada, etc. Asimismo, indica que la presencia simultánea de dos o más factores (pendientes, curvas, intersecciones, estructuras), produce de 2 a 3 veces el número de accidentes que en segmentos sin esas características; y que la presencia de combinaciones de elementos geométricos genera mayor frecuencia de accidentes que la presencia de los elementos individuales.

Las combinaciones generan frecuencias de hasta seis veces la que se presenta en segmentos sencillos. Recomienda evitar curvas horizontales con radio menor de 450 m y pendientes de más de 4%, particularmente de manera combinada. Asimismo, se genera una situación particularmente peligrosa donde una curva horizontal es ubicada justo en una curva vertical en cresta.

La consistencia a lo largo de una carretera es particularmente importante. En otras palabras, el efecto de una característica del proyecto geométrico depende de su contexto. De aquí que, por ejemplo, una curva cerrada aislada en una carretera constituida básicamente de tangentes largas y curvas de gran radio, tenga una alta probabilidad de generar accidentes, pero la misma curva en una carretera de menor estándar geométrico podría no generar problemas. Por la misma razón, la primera curva en una serie de curvas podría tener más accidentes que curvas similares e incluso más severas ubicadas en contextos más sencillos.

La Referencia 16 señala que curvas cuya velocidad de proyecto queda más de 10-15 km/h por debajo del percentil 85 de las velocidades del flujo, representan un peligro para los conductores. Debe recordarse que para éstos la carretera es una sola, y la continuidad es crítica para sus expectativas y comportamiento.

La implicación de lo anterior es que la consistencia es muy importante, y cuando las expectativas de los conductores sean violadas, es necesario tomar medidas serias para alertarlos, por ejemplo, a través del uso extensivo de señalamiento

preventivo u otros elementos de delineación, incluyendo aquellos que afectan las percepciones visuales de los conductores. Lo anterior también implica que cualquier trabajo de reconstrucción realizado en una carretera, debe realizarse a un estándar consistente; es decir, a menos que haya una política específica para actualizar la longitud total de una carretera que de origen tenga un estándar bajo, cualquier trabajo que se realice en ella debe ser a ese estándar bajo, en interés de la consistencia.

La Referencia 11 sugiere las siguientes guías para tratar casos de estándares geométricos diversos, así como características inesperadas:

- La colocación de transiciones geométricas graduales, apropiadas a la velocidad vehicular anticipada.
- El mejoramiento de la distancia de visibilidad para la detección oportuna de la presencia de características críticas.
- La implementación de zonas laterales benignas con pendientes laterales suaves y sin obstáculos peligrosos, en los sitios críticos.
- La instalación de dispositivos de control del tránsito, apropiados a la situación.

#### **4.5.4 Curvas de transición**

Las curvas horizontales son casi siempre diseñadas como arcos circulares. Un vehículo no puede cambiar instantáneamente, de moverse en línea recta a moverse en un arco circular, sino que le llevará alguna distancia cambiar su trayectoria. Algunas veces se inserta un pequeño segmento carretero entre la tangente y la curva circular para facilitar dicho cambio; tal curva tiene un radio de curvatura que cambia constantemente, propiedad que suele denominarse como espiral.

De manera similar, la pendiente transversal de la carretera puede variar a medida que el alineamiento cambia de una tangente a un arco circular, particularmente en el carril exterior donde la pendiente transversal puede cambiar de descendente a partir de la rasante en la tangente (para efectos de drenaje) a ascendente en la curva. Esta sección transversal en la curva se denominada sobreelevación, y deber ser implementada también a través de cierta longitud. Hay, por tanto, cuando menos dos longitudes de transición que son requeridas: una para el cambio de curvatura, y otra para el cambio de sobreelevación.

La Referencia 17 menciona que el uso de espirales de transición tiene un efecto positivo en la seguridad al reducir las demandas de fricción de los movimientos vehiculares críticos a través de la curva. Demuestra que su uso reduce los accidentes en curva de 2 a 9%, dependiendo del radio de curvatura y la deflexión. Asimismo, reporta que su aplicación a ambos extremos de una curva de una carretera de dos carriles y dos sentidos, redujo los accidentes totales en la curva en 5%. También examina el efecto de tener una cantidad incorrecta de sobreelevación, concluyendo que, para un déficit de sobreelevación (o diferencia entre la cantidad recomendada por las especificaciones menos la medida en la curva) de 0.2, puede esperarse una reducción en los accidentes de 10% en promedio si se corrige ese déficit. Si dicho déficit es de entre 0.1 y 0.2, la reducción esperada en los accidentes podría ser de 5%.

Los problemas relacionados con la ausencia de curvas de transición, son particularmente críticos para los camiones de carga articulados. La Referencia 8 señala que la ausencia de curvas de transición afecta la fricción desarrollada entre la llanta y la superficie, la trayectoria a través de la curva y la probabilidad de invasión del carril contrario o el acotamiento. Sugiere que el enfoque de ingeniería convencional para el proyecto de curvas horizontales, es satisfactorio para los automóviles, pero existe preocupación en relación con la estabilidad y control de los vehículos con centro de gravedad más elevado y torsionalmente menos rígidos, como son los camiones de carga. Asimismo, enfatiza en relación con las rampas de autopistas, que al ser éstas segmentos cortos de curva (sin espiral), parecen ser puntos críticos que afectan negativamente los camiones.

En síntesis, las curvas horizontales de carreteras no deben tener radio menor a 600 m; por debajo de 450 m, puede esperarse una mucho mayor frecuencia de accidentes. Las pendientes no deben exceder 6%, ni 4% cuando haya una alta proporción de camiones pesados. Al mejorar las carreteras, conviene prestar particular atención a las características críticas aisladas o inesperadas, incluyendo curvas horizontales cerradas y pendientes pronunciadas, así como otros elementos tales como intersecciones.

La peor situación ocurre cuando dos o más de esas características se presentan simultáneamente o cercanamente entre sí; esto puede generar una situación varias veces más peligrosa que donde sólo hay un segmento recto plano. Sin embargo, la consistencia en el estándar de proyecto a lo largo de la carretera es más importante que el estándar de un elemento individual, dado que las expectativas de los conductores determinan significativamente su comportamiento. Las curvas horizontales deben tener transiciones en ambos extremos que conecten las tangentes con el arco circular, particularmente en carreteras con alta proporción de camiones pesados. También contribuye a la seguridad proporcionar la cantidad adecuada de sobreelevación.

## **4.6 Puentes, estructuras y alcantarillas**

Los puentes y alcantarillas pueden ser significativos en términos de su influencia en los accidentes por salida del camino, requiriendo por tanto ser considerados en programas para mejorar la seguridad.

Para nuevos puentes, la Referencia 18 recomienda que el puente debe ser 1.8 m más ancho que la sección de circulación (p ej, llevando dos acotamientos de 0.9 m a lo largo del puente). En carreteras de flujo vehicular elevado, los anchos completos de ambos acotamientos deben ser llevados a lo largo del puente (fotografía 7).



**Fotografía 7. Detalles diferentes de estructuras de puentes en el cruce de una autopista, con protección de barrera metálica**

Los pasos superiores deben tener pilas diseñadas para posible impacto. Sus contrafuertes tienen que estar alejados de la sección de circulación que pasa perpendicularmente por debajo, e idealmente no son aconsejables las pilas en los bordes de la misma; si el contrafuerte está ubicado en la cima de terraplén, estará alejado de la sección de circulación que pasa por debajo. Dependiendo del claro del puente, se requerirá una pila en la mediana de la carretera que pasa por debajo.

Las barandillas de los puentes son barreras longitudinales diseñadas para prevenir que un vehículo descontrolado al salirse del camino, caiga del puente. Por tanto, deberán tener poca o ninguna deflexión. Sin embargo, si existe una barrera a lo largo de las aproximaciones al puente, ésta seguramente se habrá diseñado para deformarse ante un impacto, de ahí que, se requiere una transición en la rigidez de dicha barrera en la dirección del poste final del puente; asimismo, la barandilla debe fijarse rígidamente a este poste.

En síntesis, la seguridad vial es una consideración importante en el diseño de puentes nuevos. Apegarse a estándares vigentes relacionados con el ancho del puente, acotamientos, barandillas y postes, así como con la ubicación de las pilas y columnas, es importante para asegurar que el nuevo puente será seguro y funcional.

## **4.7 Rebase**

Restringir las oportunidades de rebase en carreteras de un carril por sentido, combinado con la presencia de vehículos más lentos, puede generar un congestionamiento sustancial y, por ello, accidentes al rebasar. La Referencia 16 señala que alrededor de 10% de los accidentes carreteros con heridos se generaron en este tipo de operaciones.

En carreteras de un carril por sentido, el vehículo que rebasa debe superar al vehículo rebasado, ingresando al carril opuesto, así que, la oportunidad para rebasar requiere de un espacio suficientemente grande en el tránsito de frente

para que la maniobra pueda realizarse, más la distancia recorrida por el vehículo que rebasa, más un margen de seguridad. El alineamiento vertical y horizontal tiene que proporcionar distancias de visibilidad de la suma de los tres elementos anteriores, y con ello permitir el rebase. En carreteras de alto flujo vehicular, el tráfico de frente limitará las oportunidades para rebasar, en tanto que en terreno en lomerío o montañoso, la distancia de visibilidad puede no ser suficiente tomar la decisión y rebasar.

En estas circunstancias, los carriles de rebase pueden ser muy efectivos al mejorar las operaciones del tránsito, rompiendo los pelotones y reduciendo los retrasos causados por oportunidades inadecuadas de rebase sobre longitudes sustanciales de carretera. En tráfico moderado, un esquema razonable de varios de estos carriles, totalizando una longitud de 10% de la carretera, puede proporcionar mucho del beneficio de duplicar la carretera (p ej, proporcionar otro cuerpo).

La Referencia 16 informa de una reducción de 35% en todos los accidentes al haber proporcionado este tipo de carriles en carreteras de Australia, así como de 25% en los accidentes con muertos y/o heridos. La Referencia 12 reporta una baja de 10 a 20% en los accidentes al instalarse carriles de rebase en pendientes ascendentes de 3 a 4%, así como una reducción de 20 a 40% en pendientes más pronunciadas.

Ambas referencias señalan que la reducción de accidentes también se extiende un poco más allá de la sección ampliada, lo cual es indicativo de un alivio en la presión por rebasar vehículos más lentos.

Este efecto puede su vez extenderse antes de la sección ampliada mediante la instalación de señalamiento informativo anticipado, 2 a 5 kilómetros antes del inicio de la sección ampliada. Por su parte la Referencia 12 también discute el efecto de secciones cortas de cuatro carriles, que proporcionan oportunidades para rebasar en ambos sentidos, lo cual puede ser parte de una construcción por etapas de una duplicación eventual de toda la longitud de la carretera. Para este

tipo de solución, reporta 35% de reducción en todos los accidentes y 40% en los accidentes con muertos y/o heridos.

Los detalles de proyecto de los carriles para rebasar varían, sin embargo, hay bastante consenso en que es más deseable proporcionar un número de carriles de rebase relativamente cortos y frecuentes a lo largo de una carretera, en vez de secciones aisladas de carriles más largos. La Referencia 10 sugiere para carreteras de un carril por sentido con velocidad de proyecto de 100 km/h, una longitud mínima de carril de rebase (incluyendo transiciones inicial y final) de 600 m y una longitud máxima de 1,200 m, así como una longitud para cada transición de 250 m (fotografía 8). Asimismo, sugiere que vale la pena considerar carriles de rebase en carreteras de un carril por sentido cuando la oportunidad de rebasar ocurre en menos de 30% del tiempo. El espaciamiento óptimo también varía con las oportunidades para rebasar, lo cual se determina primordialmente por el alineamiento y el flujo vehicular. Se sugieren espaciamientos típicos del orden de 10 a 15 km para carreteras con flujos vehiculares moderados.

Las ubicaciones adecuadas para los carriles de rebase incluyen cuellos de botella (p ej, pendientes pronunciadas), sitios que presentan alta incidencia de accidentes por rebase, ubicaciones donde la construcción es de bajo costo (p ej, se evitan cortes o terraplenes profundos, la ampliación de puentes, etc) y sitios donde pueden generarse distancias de visibilidad apropiadas en las transiciones inicial y final. Deben evitarse ubicaciones, tales como sitios cercanos a pueblos, segmentos que incluyan intersecciones importantes, o segmentos con una gran cantidad de puntos de acceso.

Debe prestarse particular atención al señalamiento de los carriles para rebasar a fin de maximizar su efectividad. Como se dijo, la colocación de señalamiento anticipado al inicio de la sección ampliada reduce las presiones de los conductores por realizar maniobras, dado que pronto tendrán la oportunidad para rebasar. La práctica más común es inducir a todos los vehículos al carril de baja velocidad (el de la derecha), lo cual significa que los conductores deben realizar una maniobra deliberada para rebasar, en vez de que directamente se metan al carril de rebase.



**Fotografía 8. Vista del inicio y terminación de un tercer carril de ascenso en una carretera de un carril por sentido**

Al final del segmento para rebasar, los vehículos en el carril de rebase tienen la preferencia, ya que los que se encuentran en el carril de la derecha poseen mejor visibilidad de la carretera y del tránsito y de llegar a presentarse un conflicto que requiriese una maniobra evasiva a la salida, es mejor que el vehículo de la derecha se meta en el acotamiento a que el vehículo en el carril de rebase invada el carril del sentido opuesto.

Para concluir, las operaciones de rebase están asociadas con los accidentes en carreteras por lo que los carriles para rebasar proporcionan significativos beneficios operativos y de seguridad. Su efecto específico depende de la ubicación, siendo mayor su efectividad si son instalados como parte de una estrategia para la carretera en su conjunto, en términos de los intervalos entre carriles de rebase y el número proporcionado en relación con el flujo de tránsito y el terreno.

## **4.8 Rampas de escape para camiones de carga**

Uno de los pocos tratamientos de seguridad específicamente diseñados para camiones de carga involucra la instalación de una rampa de escape que reduzca el riesgo de un camión descontrolado en una pendiente descendente. La Referencia 8 indica que los siguientes factores están asociados con tales incidentes:

- La pendiente
- Error en la conducción tal como no hacer el cambio de velocidad adecuado
- Falla del equipo (de los frenos, por ejemplo)
- Inexperiencia en la conducción en montaña
- Inexperiencia en la conducción del vehículo
- Falta de familiaridad con el sitio
- Presencia de fatiga o alcohol en el conductor
- Señalamiento inadecuado en la pendiente

Hay seis tipos diferentes de diseño general para las rampas de escape destinados a camiones de carga:

- Pila de arena
- Rampa de gravedad
- Cama de detención sobre tramo con pendiente ascendente
- Cama de detención sobre tramo horizontal
- Cama de detención sobre tramo con pendiente descendente
- Cama de detención sobre las zonas laterales

Dichos tipos funcionan cuando menos con dos de los siguientes métodos básicos de deceleración de vehículos: por gravedad, o mediante alguna forma de material de detención que aumenta la resistencia a que giren las ruedas del camión (fotografía 9).

La Referencia 8 señala que la más exitosa de las rampas que analizó mostró un 400% de reducción en accidentes, con una relación beneficio/costo de 10/1. Asimismo, demuestra que este tipo de rampas son utilizadas, lo cual en principio implica una reducción en la severidad de los accidentes.

Una técnica correlacionada se refiere al uso de señales en la cima de las pendientes descendentes, las cuales recomiendan determinada velocidad a los vehículos pesados dentro de diferentes rangos de peso bruto vehicular. Las velocidades recomendadas varían entre rampas de diferentes pendientes y longitudes.

Como conclusión puede decirse que, las rampas de escape para vehículos pesados, cuando se diseñan apropiadamente, resultan efectivas para detener camiones descontrolados, no obstante el alcance de su aplicación se limita a pendientes pronunciadas largas, instalándose sólo cuando la geometría lo permite. Estas rampas son únicamente efectivas después de que el camión se ha descontrolado. Una medida efectiva es el uso de señales en la cima de las pendientes descendentes, que recomiendan determinadas velocidades a los vehículos pesados dentro de diferentes rangos de peso bruto vehicular.



**Fotografía 9. Detalles de una rampa de emergencia ubicada en una autopista**

## 5 Conclusiones

---

Se concluye que tanto en el diseño de carreteras nuevas como en la reconstrucción de carreteras existentes, debe darse particular atención a la seguridad vial como un criterio principal de proyecto. En este trabajo se ha presentado una serie de consideraciones en lo referente a la seguridad.

Aunque se buscó que las consideraciones presentadas tuviesen el carácter más general posible, debe destacarse que su aplicación puede variar de un lugar a otro debido a aspectos tales como el clima, el comportamiento de los usuarios, el cumplimiento de las regulaciones, etc.



## Referencias Bibliográficas

---

1. Walker, C. D. y C. J. Lines. *Accident Reductions from Trunk Road Improvements*. Research Report CR 321, 15 p. Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1991.
2. *Accidents and Road Type*. Australian Road Research Board, Melbourne, Australia, 1988.
3. Krammes, R. *Design Speed and Operating Speed in Rural Highway Alignment Design*. Transportation Research Record 1701, Transportation Research Board, Washington, D C, 2000.
4. Chavarría, J, A Mendoza y E Mayoral. *Algunas medidas para mejorar la seguridad vial en las carreteras nacionales*. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 89, México, D F, 1996.
5. *ArcView GIS 3.1*. Environmental System Research Institute, Inc, 1996.
6. *ArcInfo GIS*. Environmental System Research Institute, Inc, 1991.
7. *Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico, Carreteras*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), México, D F, 1984.
8. *Guide for Monitoring and Enhancing Safety on the National Truck Network*. Federal Highway Administration, Washington, D C, 1986.
9. Cirillo, J. A. *Safety Effectiveness of Highway Design Features, Volume 1, Access Control*. 9 p, Federal Highway Administration, Washington, D C, 1992.

10. Homburger, W. S., E. A. Deakin, P. C. Bosselmann, D. T. Smith y B. Beukers. *Road Design and Traffic Control*. 152 p, Institute for Transportation Engineers, Washington, D C, 1989.
11. *Relationship Between Safety and Key Highway Design Features*. State of the Art Report 6, Transportation Research Board, Washington, D C, 1987.
12. Hedman, K. O. *Road Design and Safety*. VTI Rapport 351A, pp 225-238, Swedish Road and Traffic Research Institute, Linkoping, Sweden, 1990.
13. Lay, M. G. *Handbook of Road Technology*. Gordon and Breach, London, 1986.
14. Glennon, J. C. *Effect of Key Highway Features on Highway Safety*. Transportation Research Board, Washington, D C, 1987.
15. *Hazardous Road Locations: Identification and Countermeasures*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, France, 1976.
16. Hoban, C. J. *Selecting Appropriate Geometric Design Standards for Rural Road Improvements*. Compendium of Technical Papers, 58<sup>th</sup> Annual Meeting, Institute of Transportation Engineers, Washington, D C, 1988.
17. Zegeer, C. V., J. Stewart, F. M. Council y D. Reinfurt. *Cost-Effective Geometric Improvements for Safety Upgrading of Horizontal Curves*. Report FHWA-RD-90-021, Federal Highway Administration, Washington, D C, 1991.
18. Mak, K. K. *Effect of Bridge Width on Highway Safety*. State of the Art Report 6, Transportation Research Board, Washington, D C, 1987.



**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683  
Col. San Juan Mixcoac  
03370 México, D.F.  
Tels. (55) 56 15 35 75  
56 98 52 18  
Fax (55) 55 98 64 57

**SANFANDILA**

Km 12+000 Carretera  
Querétaro-Galindo  
76700 Sanfandila, Qro.  
Tels. (442) 216 97 77  
216 97 46  
216 95 97  
Fax (442) 216 96 71

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