

EL ANALISIS DE ACELERACIONES EN LA CONSISTENCIA DE ELEMENTOS SIMPLES DE ALINEAMIENTOS HORIZONTALES

Tomás Echaveguren Navarro, Juan Basualto Riquelme
Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil
Casilla 160 – C, Correo 3, Concepción
Fono: (56)(41)20.43.20, Fax: (56)(41)25.25.24
e-mail: techaveg@udec.cl

RESUMEN

La consistencia es una condición deseable en el diseño geométrico. El análisis de consistencia se realiza aplicando tres criterios: de elementos simples, de elementos sucesivos, y de estabilidad dinámica. En particular, la consistencia de elementos simples se analiza aplicando el criterio de diferencia de velocidad de diseño y operación. Estos consideran como hipótesis que la velocidad se mantiene constante al interior de la curva.

Esta hipótesis es restrictiva y no considera el efecto de la deceleración en el ingreso a la curva ni la posibilidad que los conductores continúen decelerando dentro de la curva. Este hecho se ha evidenciado en mediciones de terreno realizada por los autores de este artículo. Asimismo, se ha observado que la magnitud de la deceleración es sensible al radio de curvatura, aspecto tampoco considerado en la aplicación de los criterios de consistencia en elementos simples.

Los criterios de consistencia basados en aceleración son escasos. Resaltan estudios realizados en Estados Unidos por Fitzpatrick et al (2000) y Steyer et al (2000) en Alemania. En el primero se definen criterios de consistencia basados en aceleraciones que deben ser contrastados con valores de velocidad a nivel nacional. En el segundo estudio se definen modelos de cálculo de cambio de velocidad, pero como la resultante de la suma ponderada de aceleración y razón de velocidad de aproximación a una curva y la velocidad en el interior de la curva.

Ante esta evidencia, se ha propuesto un cuarto criterio de consistencia basado en el cambio de velocidad entre la aproximación a la curva y un punto característico al interior de ella. El criterio considera explícitamente el efecto de los cambios de velocidad al ingresar a curvas circulares.

La aplicación del modelo desarrollado en Alemania, con datos chilenos, mostró que no existe relación estadística entre la razón de velocidad de aproximación a una curva y la velocidad en el interior de la curva, por lo cual no es adecuado emplear la ecuación desarrollada por Steyer.

También se concluyó que en el estudio de consistencia de elementos simples, el uso de velocidad de percentil 85 obtenida a partir de la velocidad instantánea registrada en la mitad de la curva, resulta adecuado únicamente para vehículos livianos y no para vehículos pesados.

1. LA CONSISTENCIA EN EL DISEÑO GEOMETRICO

La consistencia es una condición de importancia en la provisión de seguridad en el diseño geométrico. Se define como “la condición bajo la cual una vía se encuentra en armonía con las expectativas del conductor” (Irrizary y Krammes, 1998). Se logra en la medida que se reduzca la diferencia entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación . El estudio de la consistencia en elementos de trazado es un instrumento de apoyo a la verificación del diseño geométrico. Siguiendo a Echaveguren y Sáez (2001a) el estudio de consistencia se fundamenta en la hipótesis de Mclean, quien plantea que las inconsistencias se deben a que el trazado induce una variación en la velocidad de operación, lo cual se traduce en continuas aceleraciones y deceleraciones en tramos cortos de trazado. Esto lleva al conductor a tomar decisiones que pueden inducir una situación de accidente o de no accidente (Echaveguren, 2002).

Las técnicas de identificación de trazados que potencialmente induzcan estos problemas, así como la elaboración de índices que permitan identificar inconsistencias ha sido objeto de amplios estudios. Cítese por ejemplo a Bavkov (1968), Lamm (1995) y recientemente Fitzpatrick et al (2000). Desde la década del 60, se han elaborado diversos índices de carácter geométrico para identificar inconsistencias. Una revisión de ellos puede verse en (Echaveguren y Sáez, 2001a). En la actualidad, son tres los criterios que diversos países han adoptado para el estudio de consistencia (Echaveguren y Sáez, 2001a): (I) Consistencia entre elementos simples; (II) consistencia entre elementos sucesivos; y (III) estabilidad dinámica. En particular, el criterio de consistencia entre elementos simples proporciona una medida de la expectativa del conductor al enfrentar una curva circular, a través del estudio de la velocidad en el punto medio de la misma.

Echaveguren y Sáez (2001b) en un estudio desarrollado en la octava región de Chile, determinaron que las variaciones de velocidad al interior de la curva dependen del tipo de vehículo y del ángulo de deflexión de la curva, motivo por el cual no siempre el valor de velocidad en la mitad de la curva es adecuado para el análisis. A raíz de lo anterior, es necesario considerar el efecto de los cambios de velocidad en el criterio de consistencia entre elementos simples.

Los estudios que analizan este efecto en elementos simples son escasos y de reciente data. En un estudio realizado por la *Federal Highway Administration* de Estados Unidos en 1994, se propuso la hipótesis que la aceleración (deceleración) ocurre en el exterior de las curvas manteniéndose la velocidad constante al interior de ellas. Esto orientó la mayoría de los estudios de velocidades a utilizar este criterio dejando de lado el problema de las aceleraciones. No es sino hasta el año 2000 en que se publican los trabajos de Fitzpatrick et al y Steyer et al cuando se replantea el problema de las aceleraciones y se formulan criterios de consistencia considerando el efecto de los cambios de velocidad al interior de la curva.

En este trabajo se analizan los resultados de un estudio realizado en la octava región de Chile, en el cual se analizaron las variaciones de velocidad en curvas horizontales de caminos bidireccionales. Con los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico de los cambios de velocidad, y se plantean las consideraciones que estructuran un criterio de consistencia basado en aceleraciones, como complemento del criterio de consistencia entre elementos simples.

2. CRITERIOS DE CONSISTENCIA

Las variables comúnmente consideradas para explicar el comportamiento del conductor, son el radio, el ángulo de deflexión y la velocidad de operación. Este comportamiento se evalúa mediante la velocidad en la mitad de la curva bajo el supuesto que es constante dentro de ella (Sáez, 2001). Sin embargo, la velocidad dentro de la curva es variable y en combinación con la recta de aproximación y salida se pueden producir deceleraciones y aceleraciones que tienen una influencia en la seguridad del tránsito (Fitzpatrick et al, 2000). La diferencia de velocidad de diseño entre la recta de aproximación y la curva pueden causar un déficit de seguridad si el conductor requiere decelerar en demasía al ingresar a una curva (Steyer et al, 2000)

Para analizar estas variaciones, Lamm et al (1995) crearon tres criterios de consistencia basados en la velocidad. La insuficiencia de estos criterios de captar los cambios espaciales de velocidad, llevó a que en forma independiente, Fitzpatrick et al (2000) en Estados Unidos y Steyer et al (2000) en Alemania, incorporaran criterios de análisis de consistencia basados en la aceleración. Este se denominará Criterio IV: Consistencia de Aceleración en Elementos Simples. A continuación se describen someramente cada uno de ellos. Una revisión más detallada de estos criterios puede verse en Echaveguren y Sáez (2001).

Criterio I: Consistencia en Elementos Simples Este criterio consiste en lograr la armonía en elementos simples, evaluando las diferencias entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación respecto del punto medio de una curva simple.

Criterio II: Consistencia entre elementos sucesivos. Consiste en evaluar las diferencias de la velocidad de operación entre elementos sucesivos del trazado. El que exista equilibrio entre la velocidad de operación de elementos sucesivos de un segmento del camino (tangente de aproximación – curva , tangente – transición, etc..) con la misma velocidad de diseño, revela consistencia y la homogeneidad en la conducción.

Uno de los precursores de este criterio fue Bakov (1968), quien recomendó el uso de un coeficiente de seguridad (K) para caracterizar los trazados. Lo definió como “el cuociente entre la velocidad del flujo medio vehicular que se logra en una sección y la velocidad que se logra en la sección precedente”.

El diseño se clasifica por el valor adoptado por este coeficiente en tres rangos. Durth (1995), Weise et al (1995) y Weise y Steyer (1999) (Citados por Steyer et al, 2000) establecieron los valores de dichos umbrales para evaluar la diferencia de velocidad entre la recta de aproximación y la curva ($k = V_{85,CURVE}/V_{85,APP}$). Los valores que determinaron fueron similares a los obtenidos por Bakov.

Criterio III: Estabilidad Dinámica. Este criterio especifica que la diferencia de fricción lateral provista por el diseño y la fricción lateral demandada evidencia inconsistencia en el trazado, puesto que el conductor modifica su velocidad al enfrentar la curva, dependiendo de su trayectoria y de la presencia de otros vehículos. Por lo tanto, el criterio consiste en evaluar la seguridad mediante las diferencias entre la fricción lateral demandada y la fricción lateral asumida en el diseño.

El elemento base para el análisis de consistencia es el perfil de velocidad. Hasta antes de los estudios de Fitzpatrick et al (2000) y Otessen y Krammes (2000), se asumía que toda la aceleración y deceleración ocurría antes o después de la curva horizontal en un tramo de corta longitud, de modo tal que se asumían tramos de velocidad constante. El valor especificado en el estudio FHWA – RD – 94 – 034, tanto para aceleración como deceleración era 0.85 m/s^2 (Fitzpatrick et al, 2000). El uso de este criterio lleva que se produzcan discontinuidades en la estimación del perfil de velocidad, especialmente en las cercanías de las curvas horizontales. Este hecho motivó los trabajos de los autores antes citados, quienes obtuvieron modelos para calcular la longitud críticas de aceleración y deceleración, en función de valores de cambio de velocidad medidos en terreno, diferentes del criterio propuesto en el estudio de la FHWA.

Fitzpatrick et al (2000), estimaron valores de cambio de velocidad en curvas simples planas, curvas horizontales combinadas con curvas verticales; y curvas cóncavas y convexas en recta. A partir de los resultados obtenidos, identificaron tres conjuntos de valores de aceleración y deceleración para evaluar la consistencia del diseño, los que se muestran en Tabla 1.

Tabla 1
Evaluación del Diseño Según Criterio de Fitzpatrick

Deceleración d (m/s^2)	Clasificación del Diseño (Condición para todo Alineamiento)	Aceleración a (m/s^2)
$1.0 \leq d \leq 1.48$	Bueno	$0.54 \leq a \leq 0.89$
$1.48 < d \leq 2.0$	Crítico	$0.89 < a \leq 1.25$
$d > 2.0$	Peligroso	$a > 1.25$

Por el contrario, Steyer et al (2000) utilizaron explícitamente valores de aceleración como criterio de análisis de seguridad basado en el comportamiento del conductor al circular por curvas horizontales, en conjunto con los criterios de consistencia de Lamm. Proponen un modelo para estimar la variación de velocidad al ingresar a la curva desde la tangente de aproximación (Ecuación 1) y posteriormente realizar una calificación de seguridad en base a la Tabla 2.

$$\Delta V_{85} = 0.5 * K_{EV} + 0.5 * a \quad (1)$$

ΔV_{85} es la variación de velocidad al ingresar a la curva; K_{EV} la razón entre la velocidad al entrar a la curva y la velocidad en la tangente de aproximación; y a la tasa de deceleración.

Tabla 2
Evaluación del Diseño Según el Criterio de Steyer

$K_{EV} = V_{85,CURVE}/V_{85,APP}$	Valor de Deceleración de un Vehículo cuando entra a una curva. $a < 0.8 \text{ m/s}^2$ $0.8 \text{ m/s}^2 < a \leq 1.4 \text{ m/s}^2$ $a > 1.4 \text{ m/s}^2$		
$K_{EV} \geq 0.9$	Buen	Comportamiento critico del conductor	
$0.9 > K_{EV} \geq 0.75$	Comportamiento		Comportamiento
$K_{EV} < 0.75$	Comportamiento critico del conductor		Peligroso

$V_{85,CURVE}$: V85 en el punto medio de la curva; $V_{85,APP}$: v85 en el punto medio del segmento de aproximación;

Ambos criterios presentan diferencia conceptuales. Por un lado, el criterio de Steyer et al, considera únicamente curvas horizontales, lo cual permite complementar los criterios I y II de Lamm. Asimismo, la calificación propuesta por Steyer apunta hacia el comportamiento del

conductor al circular por curvas, mas que a calificar la consistencia de un elemento de trazado. Por otro lado, los criterios de Fitzpatrick, consideran una envolvente de los valores de aceleración y deceleración obtenidos para diferentes combinaciones de segmentos de trazado en planta y elevación, lo cual impide realizar comparaciones entre este criterio y los de Lamm.

3. ESTIMACION DE VELOCIDAD Y ACELERACION

Se estimaron velocidad y aceleración en curvas horizontales en curvas circulares con y sin espirales de transición a partir de datos reales. Aquí se presenta el caso de curvas sin espirales transición. Para el caso de la velocidad, se aplicó la metodología de toma y procesamiento de datos desarrollada por Sáez (2000). Para el caso de las aceleraciones se aplicó la metodología sugerida por Fitzpatrick et al (2000).

3.1. Toma de Datos

Se realizaron mediciones de velocidad en 32 sitios localizados en las rutas O - 50, 148, 156, N - 49 y N - 55, en la octava región de Chile (Ver Figura 1).



Figura 1: Localización de Sitios de Medición (Basualto, 2003)

La velocidad instantánea se registró mediante un equipo láser, con un margen de error de +/- 3 Km/h para velocidad superiores a los 100 Km/h.. La velocidad se registró en cada uno de los puntos característicos definidos en el modelo de 4 zonas, minimizando el ángulo de esvaje, a fin de limitar la ocurrencia del “error del coseno”, característico de mediciones esviadas. El esquema de medición se muestra en la Figura 2.

En total, se tomaron 300 puntos de registro de velocidad. De estos en 297 el test de normalidad de Fisher resultó positivo para un nivel de confianza entre 93 y 95 %. Por tal motivo, los 3 restantes fueron eliminados de la muestra.

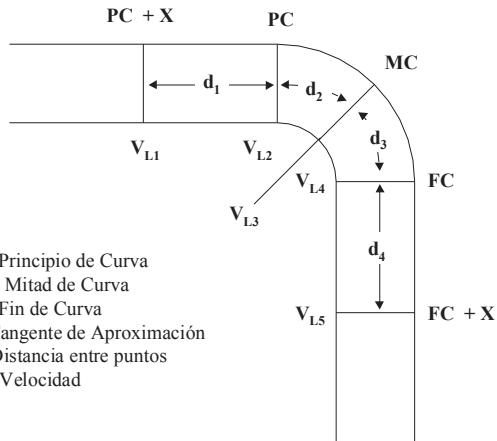


Figura 2: Esquema de Mediciones de Velocidad en Modelo de Cuatro Zonas (Basualto, 2003)

En cada sitio se realizaron levantamientos topográficos, a partir de los cuales se obtuvieron los valores de los parámetros geométricos y de velocidad de diseño. Los intervalos de medición obtenidos fueron: $65 < VD < 90$ Km./h; $190 < R < 540$ m., para curvas circulares sin transición.

3.2. Procesamiento de Datos

Se estimó el percentil 85 de velocidad en cada uno de las secciones descritas en la Figura 2. El intervalo de velocidad obtenido fue de $77 < V85 < 86$ Km./h para vehículos pesados y $86 < V85 < 94$ Km./h para livianos.

La aceleración se estimó a partir de los cambios de velocidad entre puntos, aplicando la ecuación de la cinemática: $a = 0.5(V_F^2 - V_I^2)/d$, siendo a la aceleración (o deceleración), d la distancia entre puntos de medición, V_F^2 y V_I^2 son las velocidades de percentil 85 entre dos puntos sucesivos. Los valores obtenidos para vehículos livianos oscilan entre 0.79 m/s^2 y -0.84 m/s^2 ; y para vehículos pesados entre 0.48 m/s^2 y -0.58 m/s^2 . En la Tabla 3 se muestra un resumen de los estadígrafos asociados a la velocidad y aceleración en curvas circulares.

Tabla 3
Estadígrafos asociados a Velocidad y Aceleración en Curvas Circulares

Estadígrafo	Velocidad												Aceleración													
	Pesados						Livianos						Pesados						Livianos							
	PC+X	PC	MC	FC	FC+X	PC+X	PC	MC	FC	FC+X	PC+X a PC	PC a MC	MC a FC	FC a FC+X	PC+X a PC	PC a MC	MC a FC	FC a FC+X	PC+X a PC	PC a MC	MC a FC	FC a FC+X	PC+X a PC	PC a MC		
Promedio	81	79	77	77	78	90	87	85	86	86	-0,31	-0,11	0,00	0,20	-0,43	-0,18	0,09	0,12	-0,31	-0,09	0,01	0,20	-0,46	-0,18	0,09	0,15
Mediana	80	79	78	78	80	90	87	86	87	87	-0,31	-0,10	0,01	0,22	-0,47	-0,18	0,10	0,19	-0,31	-0,09	0,02	0,22	-0,47	-0,17	0,11	0,19
Varianza	30	25	28	25	24	23	22	30	32	32	-0,31	-0,10	0,01	0,22	-0,47	-0,18	0,10	0,19	-0,32	-0,10	0,02	0,20	-0,45	-0,18	0,12	0,18
CV	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	-0,33	-0,09	0,02	0,22	-0,47	-0,17	0,11	0,19	-0,33	-0,11	0,03	0,20	-0,51	-0,18	0,11	0,19
Des Vest	5,5	5,0	5,3	5,0	4,9	4,8	4,7	5,5	5,6	5,7	-0,32	-0,10	0,02	0,20	-0,45	-0,18	0,12	0,18	-0,33	-0,12	0,05	0,20	-0,51	-0,19	0,12	0,19
Mínimo	72	69	68	67	67	83	80	71	72	71	-0,33	-0,11	0,03	0,20	-0,51	-0,18	0,11	0,19	-0,35	-0,11	0,05	0,20	-0,52	-0,20	0,12	0,18
Maximo	94	89	87	84	84	100	97	91	92	94	-0,35	-0,12	0,05	0,20	-0,51	-0,19	0,12	0,19	-0,30	-0,15	0,10	0,20	-0,51	-0,23	0,17	0,20
Rango (95 %)	2,5	2,3	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,5	2,6	2,6	-0,32	-0,13	0,10	0,21	-0,55	-0,19	0,19	0,22	-0,32	-0,13	0,10	0,21	-0,55	-0,19	0,19	0,22
Asimetría	0,5	0,1	-0,1	-0,9	-1,1	0,3	0,2	-1,1	-1,1	-1,1	-0,30	-0,15	0,10	0,20	-0,51	-0,23	0,17	0,20	-0,30	-0,15	0,10	0,21	-0,51	-0,23	0,17	0,20
Curtosis	0,7	0,3	-0,3	0,1	0,7	-0,6	-0,3	0,9	0,5	1,7	-0,32	-0,13	0,10	0,21	-0,55	-0,19	0,19	0,22	-0,32	-0,13	0,10	0,21	-0,55	-0,19	0,19	0,22

Los valores medios de velocidad para vehículos livianos y pesados se presentan en la Figura 3. En ella se aprecia que la reducción de velocidad ocurre desde la tangente de aproximación y finaliza, dependiendo del radio, en el punto MC de la curva. Esta tendencia es válida tanto para vehículos livianos como para pesados. Para radios inferiores a 250 m, toda la deceleración ocurre en el exterior de la curva, manteniéndose aproximadamente constante al interior de ella. Para curvas de radio mayor, la deceleración ocurre hasta el punto medio de la curva en el caso de vehículos livianos y al final de la curva en el caso de vehículos pesados.

Se aprecia que en promedio los vehículos pesados no recuperan la velocidad de operación con que circulaban al ingresar al punto de control (FC + X). Esto permite afirmar que el conductor requiere de una mayor longitud y visibilidad que la proporcionada en los 60 m de salida de la curva. Por tal motivo, este acelera hasta llegar al valor de velocidad deseada. La longitud requerida para lograr este propósito se denomina *Tangente Crítica*.

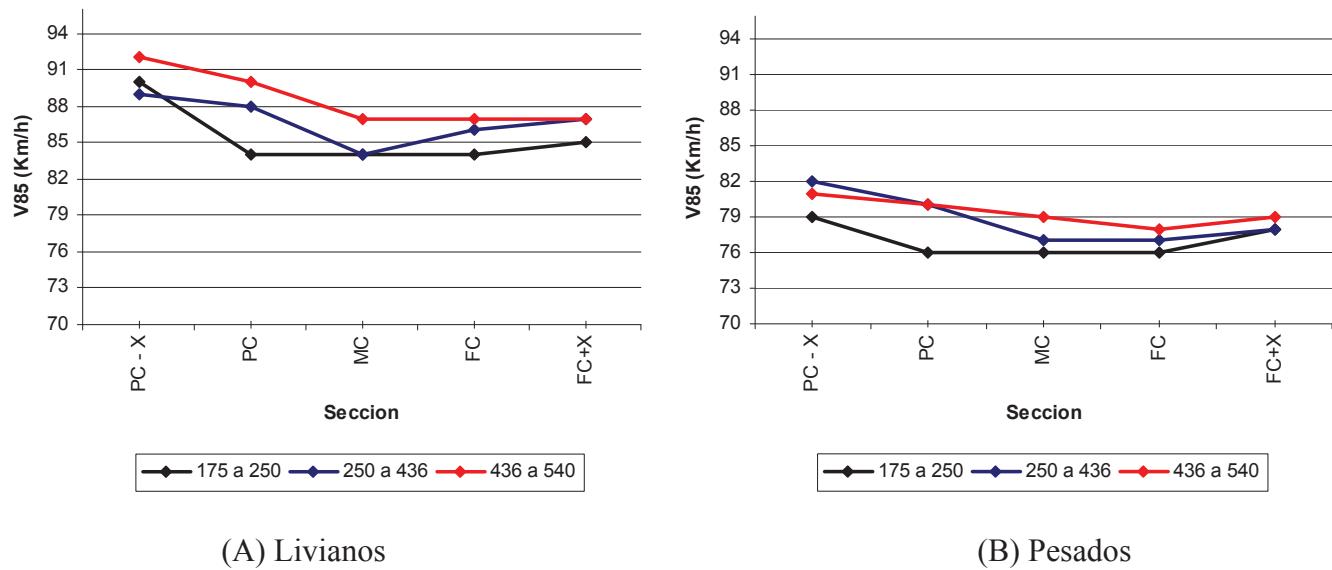


Figura 3: Tendencia de Variación de Velocidad de Percentil 85 en Curvas Circulares

Estos resultados muestran que el considerar velocidad de percentil 85 en base a velocidad instantánea registras en la mitad de la curva (MC) aplicado por Sáez (2001), es adecuado únicamente en el caso de vehículos livianos. En el caso de vehículos pesados, se debe emplear la velocidad V85 medida en el fin de la curva (FC). En ambos casos, los valores al ser más bajos, permiten describir el caso más desfavorable de diferencia entre V85 y la velocidad de diseño.

Queda en evidencia la necesidad de analizar el efecto de reducción de velocidad desde la tangente de aproximación, puesto que es este efecto el que determina el valor característico de V85 a emplear en el análisis de consistencia. Este es el punto de partida para construir el criterio de consistencia IV.

Los valores de aceleración promedio, segmentados por sección y radio, se muestran en Figura 4. En ella se aprecia que tanto para vehículos livianos como pesados, la aceleración que asume el conductor es sensible a la percepción que tenga del radio al aproximarse a la curva.

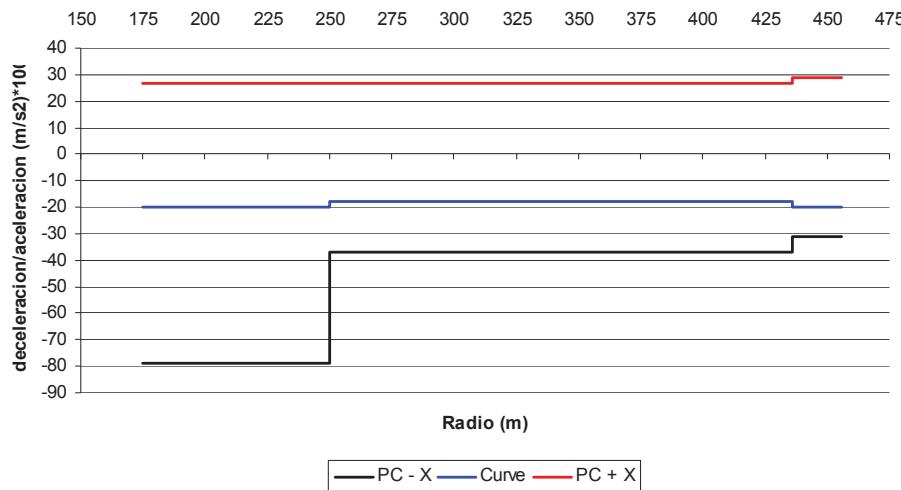


Figura 4a: Valores Promedio del Percentil 85 de Aceleraciones en Curvas Circulares. Vehículos Livianos

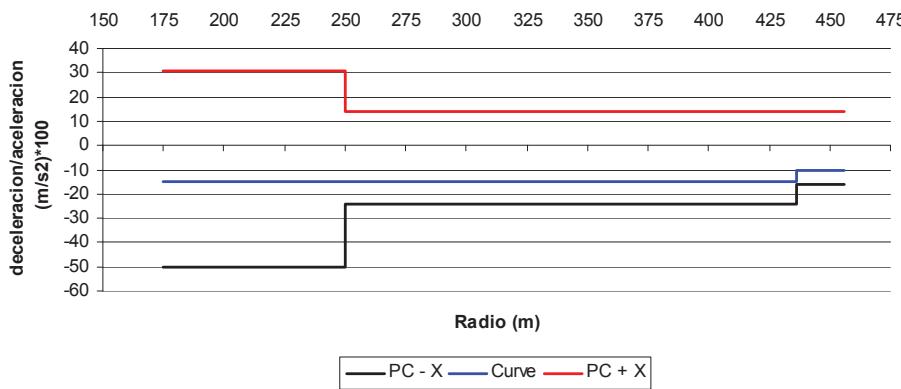


Figura 4b: Valores Promedio del Percentil 85 de Aceleraciones en Curvas circulares. Vehículos Pesados.

Los valores de aceleración y deceleración obtenidos se muestran en la Tabla 4. En ella se incluyen los valores obtenidos en este estudio, en el de Fitzpatrick et al y en el de la FHWA. Se aprecia la diferencia existente entre los resultados obtenidos en este estudio y los desarrollados por los otros autores. En el caso de la tangente de entrada, las diferencias varían entre un 13 % y un 25 % entre los valores obtenidos con el presente estudio y los de Fitzpatrick et al.

Tabla 4
Comparación de Valores de Aceleración y Deceleración, en m/s^2
(Fitzpatrick et al, 2000; Basualto, 2003)

Radio (m)	Este Estudio			Fitzpatrick et al		FHWA
	PC - X	Curva	PC + X	Deceleración (1)	Aceleración	Decel/Acel
175 - 250	- 0,65	- 0,18	0,29	- 0,75	0,54	0,85
250 - 436	- 0,31	- 0,17	0,21	- 0,25	0,43	0,85
436 - 540	- 0,24	- 0,15	0,22	0,00	0,21	0,85

(1). Deducido de la expresión $d = 0.6794 - 295.1/R$.

Se concluye que los valores de aceleración tanto de la FHWA como los deducidos por Fitzpatrick, no son adecuados para aplicar un análisis de consistencia en Chile, puesto que los valores difieren hasta en un 25 % en la aproximación a la curva, siendo inferiores los valores obtenidos en este estudio.

4. PROPOSICION DE UN CRITERIO DE CONSISTENCIA

Tomando en cuenta los datos de terreno, se elaboraron modelos de cálculo de ΔV_{85} , para aplicar un criterio de consistencia basado en aceleraciones. Primeramente se utilizó la forma funcional de la Ecuación 1, planteada por Steyer et al. Los resultados se muestran en Ecuación 2 (entre paréntesis se presentan los valores t de student de cada variable). Posteriormente se definieron valores umbrales de variación de velocidad de percentil 85 en base a los valores de aceleración y K_{EV} propuestos por Steyer et al.

$$\begin{aligned} \text{Livianos: } \Delta V_{85} &= 0.18 * K_{EV} + 0.26 * a_{EV} & R^2 a = 0.84 & ; F = 103 \\ &(0.75) & (3.42) & \\ \text{Pesados: } \Delta V_{85} &= 0.01 * K_{EV} + 0.30 * a_{EV} & R^2 a = 0.93 & ; F = 36 \\ &(1.21) & (6.3) & \\ \text{Totales: } \Delta V_{85} &= 0.02 * K_{EV} + 0.27 * a_{EV} & R^2 a = 0.88 & ; F = 90 \\ &(1.45) & (6.6) & \end{aligned} \quad (2)$$

Se puede apreciar que la variable K_{EV} es poco significativa, lo cual implica que a variación de velocidad al ingresar a la curva queda explicada únicamente por la deceleración. Al contrastar las ecuaciones 2 con la ecuación de Steyer se llegó a diferencias que oscilaban entre un 60 y 90 %.

Los criterios de consistencia para aplicar estas ecuaciones, se obtuvieron a partir de los umbrales de Steyer et al especificados en la Tabla 2, considerando las diferencias deducidas entre las ecuaciones (1) y (2) y los resultados obtenidos por Fitzpatrick et al. Los umbrales obtenidos se presentan en la Tabla 5. Los valores se expresan en m/s^2 .

Tabla 5
Umbrales para Criterio de Consistencia de Aceleración en Elementos Simples.

Calificación	Steyer et al	Este Estudio	
		Livianos	Pesados
Bueno:	$\Delta V_{85} \leq 0.85$	$\Delta V_{85} \leq 0.34$	$\Delta V_{85} \leq 0.17$
Crítico	$0.85 \leq \Delta V_{85} \leq 1.08$	$0.34 \leq \Delta V_{85} \leq 0.43$	$0.17 \leq \Delta V_{85} \leq 0.22$
Peligroso:	$\Delta V_{85} \geq 1.08$	$\Delta V_{85} \geq 0.43$	$\Delta V_{85} \geq 0.22$

Se realizó una aplicación de las ecuaciones (2) y los umbrales establecidos en Tabla 5. Se estimó ΔV_{85} a partir de las ecuaciones (2) para la base de datos obtenida en terreno y aplicando los criterios antes definidos, se llegó a los resultados que se muestran en Tabla 6. En ella se puede observar que en ningún momento se exceden los umbrales críticos propuestos en las curvas estudiadas. Esto implica que bajo las condiciones de diseño de dichas curvas, y para las velocidades de circulación medidas, desde el punto de vista de la consistencia el diseño se

clasifica como Bueno. Si se excediera el umbral denominado Crítico, es necesario realizar correcciones al diseño. De acuerdo a los resultados obtenidos por Echaveguren y Saéz (2001a) sería necesario aumentar el radio de curvatura o el peralte, para inducir un aumento de velocidad, verificar el criterio de consistencia I de Lamm, y posteriormente reaplicar el criterio de consistencia propuesto en este estudio.

Tabla 6
Aplicación de Criterio de Consistencia IV.

Sitio	Livianos			Pesados		ΔV_{85} (m/s)				
	Velocidad (Km/h)		Dec m/s^2	Velocidad (Km/h)		Dec m/s^2	Steyer et al		Este Estudio	
	PC - X	MC		PC - X	FC		Liviano	Pesado	Liviano	Pesado
Km 14.5_N55_E	90	83	0,23	82	78	0,12	0,58	0,53	0,23	0,05
Km 13.1_N49_E	85	79	0,28	73	68	0,17	0,60	0,55	0,24	0,06
Km 16.8_N49_E	87	88	-0,12	82	79	0,09	0,45	0,53	0,15	0,04
Km 28.5_O50_E	96	91	0,20	88	83	0,17	0,58	0,55	0,22	0,06
Km 44.1_O50_E	92	90	0,09	82	82	0,01	0,54	0,50	0,20	0,01
Km 51.5_O50_E	92	90	0,31	88	77	0,46	0,64	0,67	0,26	0,15
Km 54.0_O50_E	86	75	0,26	76	68	0,17	0,57	0,53	0,23	0,06
Km 14.5_N55_I	90	87	0,08	79	79	-0,01	0,52	0,49	0,19	0,01
Km 13.1_N49_I	93	83	0,45	80	74	0,26	0,67	0,59	0,28	0,09
Km 16.8_N49_I	83	82	-0,12	80	74	0,16	0,44	0,54	0,15	0,06
Km 28.5_O50_I	100	90	0,36	94	84	0,36	0,63	0,63	0,26	0,12
Km 44.1_O50_I	87	86	0,06	80	80	0,08	0,52	0,54	0,19	0,03
Km 51.5_O50_I	96	87	0,57	80	77	0,13	0,74	0,55	0,31	0,05
Km 54.0_O50_I	83	71	0,21	72	67	0,12	0,53	0,52	0,21	0,04

Para realizar estimaciones en base a datos de campo, es posible emplear los valores de aceleración señalados en la Tabla 4. Se estima primero el valor de K a partir de datos de terreno. Posteriormente se aplica en conjunto los valores de deceleración de la Tabla 4 con los valores de K en las ecuaciones (2).

Con esto es posible predecir ΔV_{85} y aplicar los umbrales de la Tabla 5 para verificar la consistencia. En el caso de proyectos existentes, los valores de K se obtienen directamente de terreno. En el caso de proyectos nuevos, es necesario aplicar modelos predictivos para estimar las velocidades características. En el caso de vehículos livianos, es posible emplear las ecuaciones desarrolladas por Echaveguren y Sáez (2001b) que relacionan velocidad de operación en la mitad de la curva, con el radio de curvatura.

5. CONCLUSIONES

El análisis de consistencia en elementos simples de trazado, se aborda comúnmente aplicando el criterio de consistencia en elementos simples de Lamm. Estudios desarrollados por diversos autores, muestran que el emplear la V85 a partir de la velocidad instantánea en el punto medio de una curva circular es insuficiente para analizar el comportamiento de los conductores al circular por una curva. Por lo tanto es necesario considerar el efecto de los cambios de velocidad.

Los primeros estudios de este efecto, plantearon como hipótesis de trabajo que la aceleración y deceleración ocurre en el interior de la curva y que tiene un valor constante igual a 0.85 m/s^2 . Esto permite asumir que la velocidad de entrada y de salida a la curva es igual.

Los estudios analizados en este trabajo, así como los resultados obtenidos, muestran que las hipótesis anteriores no resultan adecuadas. En este estudio se determinó que la deceleración ocurre desde la tangente de aproximación hasta la mitad o fin de curva dependiendo si se trata de vehículos livianos o pesados. Además se determinó la dependencia de los valores de deceleración del radio de curvatura y tipo de vehículo.

El uso de ecuaciones de aceleraciones y deceleración, permite estimar este efecto y la distorsión que induce sobre los resultados, la aplicación directa del criterio I. Los criterios desarrollados por Fitzpatrick et al y Steyer et al se orientan específicamente a ese propósito.

Las ecuaciones de $\Delta V85$ desarrolladas en este trabajo, muestran resultados inferiores a los obtenidos por la aplicación de la ecuación de Steyer et al. Esto se debe básicamente a que Steyer et al consideró un efecto promedio inducido por la aceleración y por el valor de K_{EV} . Por el contrario, los resultados obtenidos en este estudio muestran una mayor dependencia de la aceleración que de la razón de velocidad en el ingreso a la curva. Este aspecto fue considerado en la proposición de umbrales.

Se propuso un criterio complementario al criterio I de análisis de consistencia denominado “Criterio IV: Consistencia de aceleraciones en elementos simples”. Este criterio busca medir el efecto de la percepción de curvas horizontales en la fase de ingreso a la misma, acercándose al comportamiento real del conductor.

El criterio propuesto, posee la ventaja que no requiere conocer directamente la velocidad de diseño, y se adapta al tipo de vehículo (liviano o pesado) y radio de curvatura. En curvas circulares mostró un buen comportamiento. Es necesario profundizar los estudios extendiéndolo la aplicabilidad al caso de curvas con arcos de enlace y su relación con la tangente crítica. Asimismo, es necesario analizar con mayor detalle el efecto de la transición de peralte sobre la trayectoria y velocidad, aspectos que están relacionados con la estabilidad dinámica.

NOTA: Este estudio forma parte del Proyecto de investigación Interno DIUC No 201.091.032 – 01. Análisis de Relaciones Velocidad Geometría para verificación de consistencia en alineamientos horizontales. En desarrollo en la Universidad de Concepción.

AGRADECIMIENTOS

En el desarrollo de este trabajo, ha prestado una importante colaboración la Dirección de Vialidad de la VIII Región. A los funcionarios de esa Dirección, se extienden los agradecimientos por la colaboración y aportes en equipamiento.

REFERENCIAS

- Basualto, J (2003). **Incorporación de las Aceleraciones en el Análisis de Consistencia del Alineamiento Horizontal.** Memoria de Título. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Civil. Chile.
- Bavkov, V (1968). Road Design and Traffic Safety. **Traffic Engineering & Control.** 9, 236 – 239, London, UK.
- Echaveguren, T y Sáez, J (2001a). Indicadores de Consistencia en el Diseño Geométrico de Carreteras. **X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte.** 315 – 327. Chile.
- Echaveguren, T y Sáez, J (2001b). Estudio de Relaciones Velocidad - Geometría Horizontal en vías de la VIII Región. **X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte.** 341 – 350. Chile.
- Echaveguren, T (2002). **Una extensión del Modelo de Donges Bajo el Enfoque de Consistencia.** Documento no Publicado. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Civil. Chile.
- Fitzpatrick, K Elefteriadou, L Harwood, D Collins, J McFadden, J Anderson, I Krammes, R Irizarry, N Parma, K Bauer, K Passetti, K (2000). Speed Prediction for Two – Lane Rural Highways. Publication FHWA – RD – 99 – 171. Federal Highway Administration, Estados Unidos.
- Irizarry, N y Krammes, R (1998). Linear Regression Models for Estimating Operating Speeds of Passenger Vehicles on Rural Two-lane Highways. **Actas del X Congreso Panamericano de Transporte. Artículo No 12, 651 - 658.** Santander. España.
- Lamm, R Psarianos, B Choueiri, E and Soilemezoglou, G (1995). A Practical Safety Approach to Highway Geometric Design International Case Studies: Germany, Greece, Lebanon, and the United States. **1st International Symposium on Highway Geometric Design Practices.** Conference Paper 9 –1. Estados Unidos
- Ottesen, J y Krammes, R (2000). Speed Profile Model for Design Consistency Evaluation Procedure in The United States. **Transportation Research Record 1701.** 76 – 85. Estados Unidos.
- Saez, J (2001). **Estudio de la Consistencia en Vías Rurales.** Memoria de Título. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Civil. Chile.
- Steyer, R Sossoumihen, A y Weise, G (2000). Traffic Safety on two – lane roads. News concepts and findings. **2nd International Symposium on Highway Geometric Design Practices.** 299 – 311. TRB. FSGV. Alemania.