
CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CAMINOS BASADA EN LA VISIBILIDAD

Dr. Tomás Echaveguren (autor de correspondencia)
Profesor Asistente – Universidad de Concepción – Chile. E-mail: techaveg@udec.cl

Dr. Sergio Vargas Tejeda. Profesor Asistente – Universidad del Bio Bio – Chile

Dr. Aníbal Altamira. Profesor Asistente – Universidad Nacional de San Juan – Argentina.

Dra. (C). Dalila Riveros. Instructora – Universidad Diego Portales – Chile.

RESUMEN

Los estudios de consistencia del diseño geométrico asumen que existe visibilidad suficiente, y que en casos restringidos, esta no modifica la velocidad de operación. Sin embargo, los modelos disponibles no consideran explícitamente este efecto. El objetivo de éste artículo, es proponer un método que permite evaluar la consistencia de alineamientos verticales, teniendo en cuenta los perfiles de visibilidad disponible y requerida, aplicado a curvas verticales convexas. Para ello se estima primeramente ambos perfiles de visibilidad punto a punto a lo largo de la curvas, para posteriormente determinar en base al equilibrio de ambos, la velocidad de operación teórica. Luego se propone un criterio de análisis de consistencia comparando la velocidad de diseño con la velocidad de operación teórica que se aplica a un caso práctico. Se concluyó que el método es coherente en sus resultados y de fácil implementación, por lo cual constituye un criterio adicional para el estudio de trazados geométricos. El método puede extenderse a otros tipos de curvas verticales.

Palabras Clave: Consistencia – Velocidad – Visibilidad – Diseño Geométrico

ABSTRACT

Consistency assessment assumes that enough visibility is available in the road. In addition, assumes that the lack of visibility do not change operating speed. Existent models do not consider this effect. The objective of this paper is to propose a method for assessing consistency for vertical crest curves, considering required and provided visibility profiles. First, required and provided visibility profiles are computed point to point along the vertical curve. Considering the equilibrium between both profiles, a theoretical operating speed is calculated. After, a consistency criterion based on the comparison of theoretical operating speed and design speed is proposed. The method was applied to a case of study. It was concluded that is reliable and easy tool for assessing road geometric designs. The method can be applied for assessing any type of vertical curves.

Key Words: Consistency – Speed – Visibility – Geometrical Design

1. INTRODUCCION

El diseño geométrico de caminos y carreteras se fundamenta en la cinemática del conjunto conductor vehículo. Este enfoque, se basa en la definición de elementos geométricos aislados a partir de una cierta velocidad de diseño, la cual se asume es siempre superior a la de operación. Estudios desarrollados por McLean (1981), Krammes et al (1995) y Echaveguren y Sáez (2001) entre otros, han probado que esta hipótesis es falsa en el caso de caminos diseñados para velocidades de diseño entre 50 y 100 km/h. Este hallazgo abrió en la década del 90 una nueva línea de investigación en el diseño geométrico, basado en las expectativas de los conductores, la cual puede aproximarse, bajo la hipótesis de McLean (1981) mediante el estudio de la velocidad de operación.

Glennon y Harwood (1978) acuñaron el término de consistencia del diseño geométrico para referirse al grado de relación que existe entre los elementos del diseño geométrico y la velocidad de operación. Posteriormente, Lamm et al (1986) lo refirió además a la desviación entre la velocidad de operación y de diseño, siguiendo a McLean. Actualmente la consistencia del diseño geométrico se entiende como diseño consistente a aquel que se encuentra en armonía con las expectativas del conductor (Irizarry y Krammes, 1998).

Diversos autores han propuesto métodos para el análisis de consistencia (Véase por ejemplo Lamm et al, 1999; Polus y Mattar-Habib, 2004). En su mayoría se han enfocado al análisis de trazados horizontales de carreteras en elementos simples y compuestos. Estos métodos asumen que en el trazado existe visibilidad disponible adecuada, lo cual es válido para pendientes longitudinales suaves y moderadas, propias de vías de alto estándar.

Por el contrario, en caminos bi-direccionales con restricciones en el trazado vertical, es posible que dicho supuesto no se verifique, y que las inconsistencias del trazado estén dadas por el efecto de zonas del trazado ocultas a la vista del conductor antes que el trazado horizontal. Este aspecto ha sido poco estudiado desde el punto de vista de la consistencia. La investigación existente en el mundo se ha abocado principalmente a calcular la visibilidad teórica disponible y la visibilidad provista por el trazado vertical, pero sin llegar a integrar estos aspectos en el estudio de la consistencia del trazado aplicado al diseño geométrico.

Existe evidencia empírica que la falta de visibilidad restringe la velocidad de operación ya que las ondulaciones del trazado ocultan a los ojos del conductor la curvatura verdadera de las curvas horizontales, o zonas completas del trazado en alineamientos rectos o de gran curvatura. Esta restricción de visibilidad puede cuantificarse a través de la comparación de perfiles de visibilidad requerida y disponible con lo cual es posible estimar la reducción de velocidad impuesta y por tanto el efecto que esta tiene en la consistencia del diseño.

En este trabajo se presenta un método que integra en un cuerpo coherente los métodos de cálculo de visibilidad disponible y provista por el diseño con los principios del análisis de consistencia. El objetivo es proporcionar una herramienta práctica del análisis de consistencia del alineamiento vertical, de especial importancia en trazados emplazados en terrenos ondulados y montañosos.

2. INDICADORES DE CONSISTENCIA, VISIBILIDAD Y PERFILES DE DISEÑO

2.1. Indicadores de Consistencia

Los indicadores de consistencia se clasifican de acuerdo a sus variables explicativa en indicadores basados en velocidad, en fricción y en aceleraciones. Una descripción detallada de ellos puede verse en Lamm et al (1999), Echaveguren y Sáez (2001) y Echaveguren y Basualto (2003).

Los indicadores basados en velocidad determinan la diferencia entre velocidad de operación y la velocidad de diseño en curvas horizontales aisladas y compuestas. La velocidad de operación se obtiene a partir de mediciones mediante sistemas portátiles o sensores dispuestos en curvas, para posteriormente estimar el percentil 85 de la muestra de velocidad medida (V_{85}). Este valor es un indicador de la velocidad de operación.

Los indicadores basados en fricción estiman la diferencia entre fricción demandada y asumida. La fricción demandada se obtiene mediante estudios directos de resistencia al deslizamiento. Alternativamente se estima mediante la ecuación de estabilidad dinámica en curvas, pero utilizando V_{85} . La fricción asumida en tanto, corresponde a la fricción de diseño recomendada por las normas de diseño geométrico de cada país.

Los indicadores basados en aceleraciones estiman el valor de aceleraciones y deceleraciones en las tangentes de entrada de curvas horizontales o bien en la tangente común en curvas compuestas. Con esto, permiten determinar el diferencial de velocidad en las entradas o salidas de las curvas horizontales el cual se contrasta con los valores teóricos de aceleración y velocidad de operación.

Los indicadores precedentes están basados en los postulados de Lamm et al (1986), que se mantienen vigentes hasta el día de hoy. Recientemente, Polus y Mattar-Habbib (2004), propusieron un indicador que permite integrar los resultados de los indicadores de Lamm en segmentos de caminos más extensos que curvas, tangentes y rectas, el cual posee la importante ventaja de permitir calificar un camino según su grado de consistencia. Una desventaja común a ambos enfoques es la no consideración de la visibilidad.

2.2. Visibilidad

Para el propósito de este trabajo la visibilidad se clasificará en dos tipos: visibilidad requerida y visibilidad disponible. La visibilidad requerida corresponde a la demanda de visibilidad que experimentan los conductores para ejecutar maniobras completas, tales como adelantamiento, detención total o parcial; o maniobras incompletas, como por ejemplo adelantamiento desistido. La visibilidad disponible, corresponde a la visibilidad que proporciona el trazado dependiendo su geometría, de la presencia de obstrucciones laterales o dentro de la calzada, de condiciones climáticas, de la configuración geométrica y del cono de visión dinámica del conductor. Es un valor que se modifica punto a punto a lo largo del trazado de una vía.

A pesar que la mayoría de las normativas recomiendan que en todo momento el trazado deba proporcionar una visibilidad que permita ejecutar las maniobras en forma segura, (igualando la visibilidad disponible con la requerida), no siempre es posible. Cuando existen restricciones sobre el trazado los conductores experimentan disminuciones en su velocidad de operación, con lo cual en algunos casos puede favorecerse un comportamiento consistente, pero en otros puede agudizar las inconsistencias.

2.3. Perfiles de Velocidad y Visibilidad

Los perfiles de velocidad son una herramienta esencial para el diseño y para el análisis de consistencia. Consisten en representar punto a punto a lo largo del trazado valores de velocidad de diseño (o de operación) en sus diversos elementos. El perfil de velocidad habitualmente se construye en base al diseño planimétrico. Superponiendo los perfiles de velocidad de diseño y de operación es posible identificar sectores de trazado en los cuales existen diferencias apreciables entre las velocidades de diseño y de operación. Este procedimiento forma parte esencial del enfoque de Lamm para el análisis de consistencia.

En el caso del alineamiento vertical, la velocidad de diseño y de operación en cambio está condicionada por la visibilidad. Superponiendo los perfiles de velocidad de operación y de visibilidad requerida y disponible se pueden identificar zonas de visibilidad restringida y sus efectos sobre la velocidad de operación. La normativa australiana utiliza perfiles de velocidad y de visibilidad de adelantamiento para definir las zonas de adelantamiento (NAASRA, 1980). El Manual de Capacidad de Carreteras, lo utiliza indirectamente para determinar la necesidad de incorporar pistas para vehículos lentos o pistas de adelantamiento por la derecha (Transportation, 2000).

3. MODELACION DE PERFIL DE VISIBILIDAD

La modelación del perfil de visibilidad consiste en construir un diagrama en sentido de avance del kilometraje que describe la visibilidad requerida y disponible. La primera en términos de visibilidad de parada y la segunda en términos de la configuración geométrica de las curvas verticales.

3.1. Visibilidad Requerida

La visibilidad requerida se cuantifica en términos de la distancia de percepción y reacción y de la distancia de frenado. La condición más desfavorable para realizar la estimación corresponde a curvas verticales convexas con pendientes G_1 y G_2 menores que cero en sentido de avance del vehículo. La Figura 1 muestra dicho caso. En ella se aprecia que la pendiente cambia linealmente. En ella se asume que la aplicación de los frenos comienza en la posición R donde la pendiente es G_1 y el vehículo se detiene en la posición O, donde la pendiente es G_f . Por lo tanto RO corresponde a la distancia de frenado. Puesto que en ese segmento la pendiente es variable, es necesario realizar una integración para determinar el valor a considerar en el cálculo de la

distancia de frenado. Taiganidis y Kanellaidis (2001) proponen calcular la pendiente media G_m a partir de la ley de variación de la pendiente en el tramo RO, según la ecuación (1).

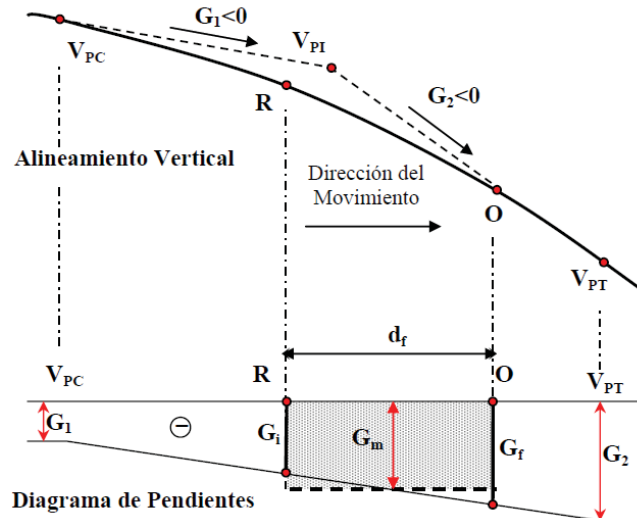


Figura 1. Elementos del perfil de visibilidad en curvas verticales convexas

$$G_m = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} G(x) dx \quad ; \quad G(X) = \begin{cases} G_1 & ; \quad x \leq 0 \\ G_1 - \frac{x}{K} & ; \quad 0 < x < L \\ G_2 & ; \quad x \geq L \end{cases} \quad (1)$$

En donde x_i son la posición inicial y final del vehículo durante la maniobra de frenado respecto de una referencia, L es la proyección de la longitud de la curva y K el parámetro de curvatura.

Aplicando la expresión simplificada de cálculo cinemático de la distancia de frenado, se obtiene la distancia de visibilidad disponible mediante la expresión 2, en la cual t_{pr} es el tiempo de percepción y reacción (usualmente 2 segundos) y f , la resistencia al deslizamiento longitudinal de diseño.

$$DV_{req} = d_{pr} + d_f = \frac{V t_{pr}}{3,6} + \frac{V^2}{254(f + G_m)} \quad (2)$$

Durante el desplazamiento del vehículo sobre la curva la distancia de visibilidad requerida (DV_{req}) cambia continuamente incrementándose desde un valor mínimo a un valor máximo. Estos valores se determinan utilizando las pendientes $G=G_1$ y $G=G_2$ en el cálculo de la DV_{req} .

Para una posición cualquiera del conductor antes, durante o después de la curva, la DV_{req} debe estar de acuerdo con la pendiente promedio (G_m) en la sección de frenado. Sin embargo, G_m depende de la ubicación y valor de la distancia de frenado (d_f), la cual a su vez depende de la pendiente promedio. Por lo tanto, el valor de DV_{req} se calcula mediante iteraciones. Este procedimiento se aplica con ciertas variantes a curvas verticales convexas simétricas y asimétricas, utilizando además para el cálculo la velocidad de operación.

3.2. Visibilidad Disponible

Según AASHTO (2004), el desplazamiento vertical (h) de una tangente a la parábola es proporcional al cuadrado de la distancia hasta el punto de tangencia. Dicha tangente corresponde a la línea de visibilidad del conductor y posee una longitud S . De acuerdo a esto, la visibilidad disponible se obtiene en términos genéricos mediante la ecuación 3.

$$h = \frac{1}{2} \frac{|G_1 - G_2|}{100L} S^2 = \frac{S^2}{200K} \Rightarrow S = \sqrt{200Kh} \quad (3)$$

Dicha ecuación es válida cuando en el punto de tangencia entre la línea de visibilidad y la superficie del pavimento existe un objeto de altura $h_2 = 0$, junto al cual el vehículo debe detenerse. También se interpreta como el punto en donde se produce la pérdida de trazado.

Cuando el objeto posee una altura $h_2 \neq 0$, la longitud total de la línea de visibilidad (S) corresponde a la suma de la distancia desde la posición del vehículo hasta el punto de tangencia (S_1) y la distancia desde dicho punto hasta la posición del objeto (S_2): $DV_{disp.} = S_1 + S_2$.

En tal caso, S corresponde a la visibilidad disponible y la visibilidad disponible dependerá de la posición del conductor respecto de la localización de la curva. Se distinguen así dos casos de estudio: conductor sobre la curva y conductor sobre la tangente de la curva.

a) Caso 1: Conductor sobre la curva vertical

En este caso, la componente S_1 se calcula directamente mediante la expresión 3 reemplazando S por S_1 y h por h_1 . De igual manera, la componente S_2 se calcula usando la misma expresión 3 para $h = h_2$.

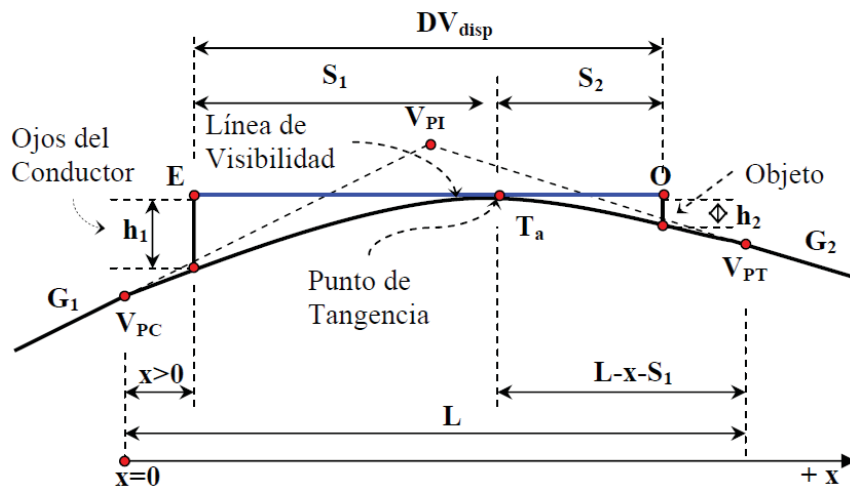


Figura 2. Longitud de la línea de visibilidad y elementos de la distancia de visibilidad disponible cuando el conductor se encuentra sobre la curva vertical

b) Caso 2: Conductor sobre la tangente de la curva vertical

En este caso, es necesario agregar a la expresión 3 el efecto la distancia comprendida entre la posición del conductor y el inicio de la curva vertical, resultando finalmente la expresión 5 en la cual el conductor se encuentra.

$$S_1 = \sqrt{200Kh_1 + x^2} \tag{4}$$

Si el conductor se encuentra más allá del punto de tangencia, entonces la distancia S_2 queda definida según la expresión 5.

$$S_1 = \sqrt{200Kh_1 + (S_1 + S_2 - L + x)^2} \tag{5}$$

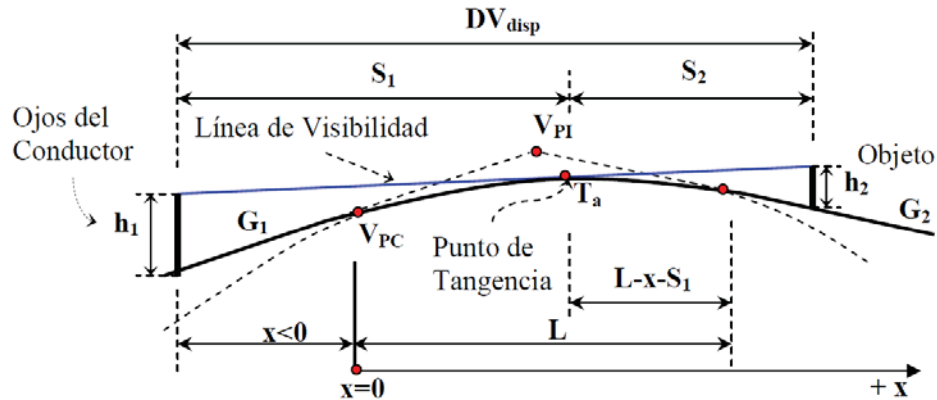


Figura 3. Visibilidad disponible y sus elementos cuando el conductor se encuentra sobre la tangente de curva vertical

La visibilidad disponible varía desde un valor mínimo, hasta un valor máximo que en la teoría aumenta asintóticamente. El valor mínimo se localiza en un punto de coordenadas x_U y el máximo en un punto de coordenadas x_M , como lo muestra la Figura 4.

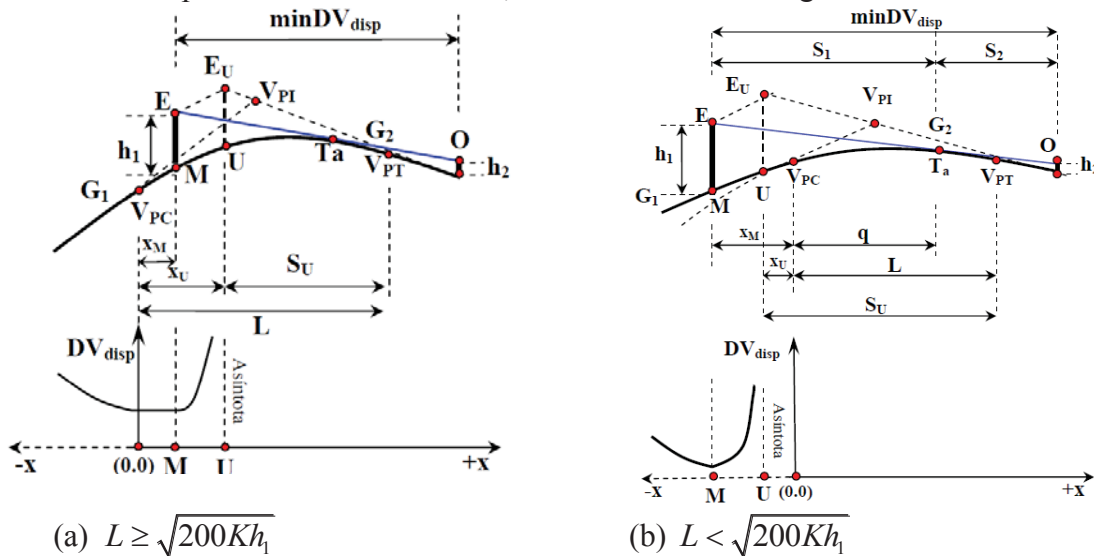


Figura 4. Coordenadas características del perfil de visibilidad disponible

Las coordenadas de los puntos característicos así como la mínima distancia de visibilidad se obtienen usando las ecuaciones 8, deducidas por Taiganidis (1998).

$$\begin{aligned}
 x_U &= L - \frac{200Kh_1 + L^2}{2L} \quad ; \quad x_{M,S \leq L} = L - DV_{disp}^{\min} \quad ; \quad x_{M,S > L} = -\frac{100K}{L} \sqrt{h_1} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \\
 DV_{disp,S \leq L}^{\min} &= \sqrt{200K} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad ; \quad DV_{disp,S > L}^{\min} = \frac{1}{2} \left\{ L + \frac{200K}{L} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2 \right\}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

4. CRITERIO DE CONSISTENCIA

La consistencia de un trazado nuevo o existente puede evaluarse como buena, regular o mala. Un diseño bueno es considerado consistente y no requiere cambios en el diseño. Los diseños regulares poseen inconsistencias menores que pueden afectar el comportamiento del conductor pero no se recomienda su rediseño. Los diseños malos tienen inconsistencias que pueden producir quiebres en el perfil de velocidad e inducir a maniobras críticas. Por lo tanto, en estos casos se recomienda el rediseño.

Desde el punto de vista de la visibilidad, mientras el conductor cuente con la mayor distancia de visibilidad disponible, podrá evaluar de mejor manera lo que ocurre delante de él, y podrá tomar las decisiones adecuadas ante cualquier evento que se presente sobre el trazado. De acuerdo a esto:

- Mientras mayor sea la DV_{disp} con respecto a la DV_{req} a la velocidad de diseño, mayor seguridad tendrá el conductor para realizar una eventual detención.
- Si ambas distancias son iguales, el conductor tendrá la visión justa sobre el trazado para detenerse en caso de percibir un objeto en la vía y por consiguiente un estrecho margen de seguridad a favor.
- Si la DV_{disp} es menor a la DV_{req} , el conductor no contará con la visibilidad necesaria para realizar una detención adecuada, lo cual significa que de encontrar un objeto en su recorrido, no podrá detenerse y eventualmente lo colisionará.

De acuerdo a lo anterior, es plausible postular un criterio general de evaluación de consistencia según la Tabla 1. En ella, la DV_{req} es función de la velocidad de diseño y la DV_{disp} , de la geometría.

Tabla 1. Clasificación del diseño según índice de consistencia basado en visibilidad

Clasificación del Diseño	Índice de Consistencia
Bueno	$DV_{req} - DV_{disp} < 0$
Regular	$DV_{req} - DV_{disp} \approx 0$
Malo	$DV_{req} - DV_{disp} > 0$

Si el conductor del vehículo cuenta con una DV_{disp} muy extensa, tenderá a aumentar su confianza y por tanto a aumentar su velocidad de circulación. Esto tiene dos consecuencias. Una aumentar cuadráticamente la visibilidad requerida; y otra, puede llegar a sobrepasar los intervalos de consistencia de Lamm. Lo contrario ocurre en el caso en que el conductor no cuente con suficiente DV_{disp} . Al sentirse inseguro de la percepción que tiene del trazado tenderá a disminuir la velocidad con que recorre la vía.

En consecuencia, este criterio encierra una paradoja: mientras mayor visibilidad se otorgue al trazado, más se alienta al conductor a circular a mayor velocidad, aumentando así las potenciales inconsistencias en el trazado horizontal.

Lo anterior conduce naturalmente a la necesidad de calcular la máxima velocidad de operación del conductor para lograr una detención adecuada usando la DV_{disp} . Para ello, se iguala la visibilidad requerida con la disponible y se estima la velocidad de operación teórica ($V_{OP}(DV_{req})$) que puede desarrollar el conductor. Esta velocidad se compara con la velocidad de diseño para evaluar la consistencia en diseños en donde existe equilibrio entre la visibilidad requerida y disponible, aplicando los límites de consistencia de Lamm et al (1986).

Los casos en que la $V_{OP}(DV_{disp}) < VD$ corresponden a los puntos en que la $DV_{disp} < DV_{req}$. Si la velocidad de operación obtenida al evaluar la DV_{disp} resulta menor a la de diseño, el conductor no cuenta con la suficiente distancia de visibilidad para realizar adecuadamente una detención. De acuerdo a esto se llega a los índices y criterios de consistencia indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Índices y criterios de consistencia propuestos

Clasificación del Diseño	Índice y Criterio de de Consistencia
Bueno	$0 < V_{OP}(DV_{disp}) - VD \leq 10$ (Km/h)
Regular	$10 < V_{OP}(DV_{disp}) - VD \leq 20$ (Km/h)
Malo	$V_{OP}(DV_{disp}) - VD > 20$ (Km/h) ó $V_{OP}(DV_{disp}) - VD < 0$

El análisis de consistencia posee dos niveles: De diseño y de operación. En el nivel de diseño, si no se cuenta con modelos que relacionan velocidad de operación con geometría, es posible realizar la comparación que se indica en la Tabla 3 directamente. En el caso de contar con modelos de velocidad de operación basados en la curvatura vertical, por ejemplo, se sustituye en la Tabla 3 este valor por el de velocidad de diseño, limitándose la comparación a una relación entre la velocidad de operación medida y la velocidad de operación teórica.

5. APLICACIÓN A UN CASO

El método planteado se aplicó a una curva vertical convexa aislada. Los parámetros de diseño, así como los perfiles de visibilidad se muestran en la Figura 5. A dicha curva se le calculó la visibilidad requerida y disponible mediante las ecuaciones 2 y 6, para posteriormente realizar el contraste con el valor de velocidad de diseño de la curva vertical.

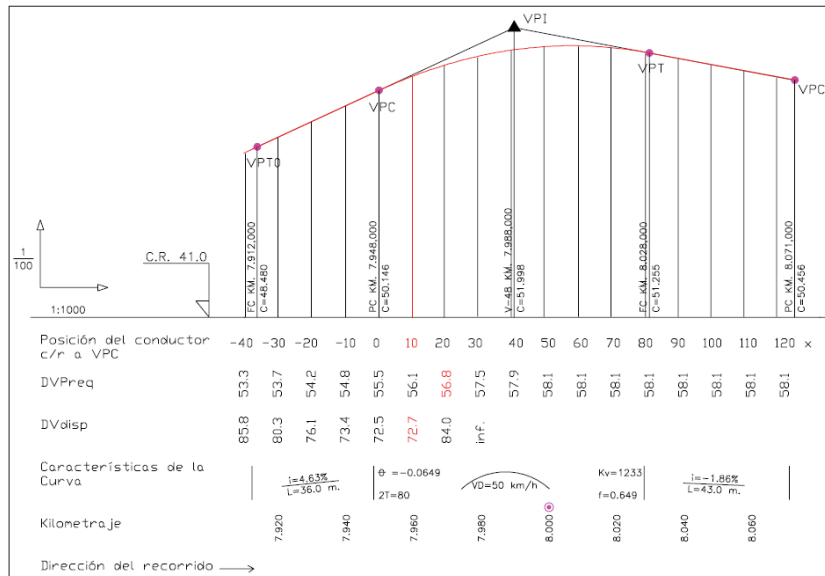


Figura 5. Características de la curva vertical en análisis

De acuerdo a esto, se obtuvo que en la mayor parte de la curva, el trazado posee un nivel de consistencia teórico de regular. Asimismo, se aprecia que el patrón de inconsistencia tiende a mejorar en la medida que el conductor se acerca al centro de la curva, debido a que al disminuir la velocidad de operación crítica, esta se acerca más a la velocidad de diseño de la curva. Una vez que el conductor posee más visibilidad, la velocidad de operación tiende a aumentar.

De ese modo que si se requiere un mejoramiento con este criterio se puede establecer un valor de velocidad de diseño que modifique el parámetro de curvatura, lo cual modifica a su vez la velocidad disponible y por extensión la velocidad de operación teórica. Con esto es posible caracterizar en términos numéricos, las diversas opciones de diseño de curvas verticales convexas.

Tabla 6. Resultados de la evaluación de la consistencia

Posición	DV _{disp.} (m)	V _{OP} (DV _{disp.})	VD	V _{OP} (DV _{disp.}) - VD	Evaluación
-40,0	85,8	67,5	50	17,5	Regular
-30,0	80,3	64,4	50	14,4	Regular
-20,0	76,1	61,9	50	11,9	Regular
-10,0	73,4	60,0	50	10,0	Bueno
0,0	72,5	59,1	50	9,1	Bueno
+10,0	72,7	58,7	50	8,7	Bueno
+20,0	84,0	63,8	50	13,8	Regular
+26,7	96,2	71,8	50	24,4	Malo
+30,0	∞	∞	50	∞	No aplica

6. CONCLUSIONES

La consistencia de los trazados se ha estudiado profusamente en alineamientos horizontal. En contraparte, poco se ha estudiado en base al alineamiento vertical. Este trabajo, utilizando herramientas existentes, logra la integración de los conceptos de visibilidad requerida y disponible para evaluar teóricamente la consistencia de los diseños cuando no se cuenta con ecuaciones velocidad – geometría.

Si bien la aplicación se desarrolló únicamente para curvas verticales convexas, es posible, con las adaptaciones de rigor, desarrollar el método en curvas verticales cóncavas y en curvas verticales compuestas.

El método es susceptible de ser mejorado si se cuenta con ecuaciones que relacionen la velocidad de operación con la curvatura y longitud de la curva, caso en el cual es posible contrastar la velocidad de operación teórica con la real.

El método permite evaluar la consistencia punto a punto de la curva, dado que en su concepción la visibilidad requerida y disponible puede estimarse punto a punto también. Esto implica que la velocidad de operación es variable y no constante, lo cual plantea la necesidad de revisar el criterio de diseño usual para curvas verticales. En tal caso es necesario además establecer directrices para estimar convenientemente la densidad de puntos de estimación, para incluir valores realistas de aceleración y deceleración entre cada par de puntos.

En trazados nuevos la elección del parámetro de curvatura está asociada a la velocidad específica del segmento del trazado a enlazar. Mediante la metodología expuesta, es posible determinar cuál es valor adecuado del parámetro de curvatura que permite asegurar un valor de consistencia regular o bueno para un diseño específico. Sin embargo, este valor no es generalizable puesto que depende de los valores de pendiente de entrada y de salida y de la posición del vehículo en la curva. No obstante, como criterio general se recomienda que se asegure una buena consistencia en el primer tercio de la curva vertical, dado que es la posición más crítica según los análisis realizados.

Aún cuando en el trabajo se expone la aparente paradoja de divergencia, el análisis de consistencia también está acotado por otros elementos de trazado, particularmente por la curvatura horizontal, por lo cual al complementar los criterios es posible acotar el análisis. Asimismo, existen otros criterios que condicionan la elección del parámetro de curvatura, como los costos de operación, la tasa de aceleración vertical máxima admisible y los costos de construcción, por lo cual el método de análisis de consistencia propuesto debe considerarse como un complemento para optimizar el diseño geométrico, caso en el cual es necesario realizar las evaluaciones de factibilidad económica correspondientes.

Un aspecto necesario de abordado en futuras investigaciones es adaptar este modelo al caso en que las curvas verticales se encuentran traslapadas con las tangentes de entrada (o de salida), de curvas horizontales, puesto que la visibilidad en la curva vertical puede determinar la velocidad en la tangente de entrada y por extensión la velocidad en la curva horizontal.

REFERENCIAS

- AASHTO (2004) **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington D.C., United States.
- Echaveguren, T. y J. Sáez (2001) Indicadores de Consistencia en el Diseño Geométrico de Carreteras. **Actas del X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 8 al 12 de Octubre de 2001, Concepción, 315 – 327.
- Glennon, J. y Harwood, D. (1978) Highway Design Consistency and Systematic design related to highway safety. **Transportation Research Record**, 681, 77 – 88.
- Echaveguren, T. y J. Basualto (2003) El análisis de aceleraciones en la consistencia de elementos simples en alineamientos horizontales. **Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. 20 al 24 de Octubre de 2003, Santiago, 391 – 402.
- Krammes, R. Rao, K. y Oh, H. (1995) Highway Geometric Design Consistency Evaluation Software. **Transportation Research Record**, 1500, 19 – 24.
- Lamm, R. Hayward, J. y Cargin, J. (1986) Comparison of Different Procedures for Evaluating Speed Consistency. **Transportation Research Record**, 1100, 10 – 20.
- Lamm, R. Psarianos, B. y Mailaender, T. (1999) **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook**. 1st Edition, McGraw Hill, New York.
- McLean, J. (1981) Driver speed behavior and rural road alignment design. **Traffic Engineering and Control**, 4, 208 – 211.
- NAASRA (1980) **Interim Guide to the Geometric Design of Rural Roads Sydney**. National Association of Australian State Road Authorities. Sydney. Australia.
- Polus, A. y Mattar-Habib, C. (2004) New Consistency Model for Rural Highways and its relationship to safety. **Journal of Transportation Engineering**, 130(3), 286 – 293.
- Taiganidis, I. (1998) Aspects of stopping-sight distance on crest vertical curves. **Journal of Transportation Engineering** 124(4), 335 – 342.
- Taiganidis, I. y Kanellaidis, G. (2001) Required stopping sight distance on crest vertical curves. **Journal of Transportation Engineering** 127(4), 272 – 282.
- Transportation Research Board (2000) **Highways Capacity Manual 2000**. National Research Council, Washington D.C., United States.