

Optimización 3D de la Coordinación Planta-Alzado para Maximizar la Visibilidad Disponible



Optimal 3D Alignment Coordination to Maximize the Available Sight Distance

Ana Tsui Moreno

*Personal Investigador
Grupo de Investigación en
Ingeniería de Carreteras
Universitat Politècnica de València*

Vicente M. Ferrer

*Profesor Asociado
Grupo de Investigación en
Ingeniería de Carreteras
Universitat Politècnica de València*

Alfredo García

*Catedrático
Grupo de Investigación en
Ingeniería de Carreteras
Universitat Politècnica de València*

Resumen

La visibilidad disponible es uno de los factores más importantes en la seguridad vial puesto que permite a los conductores percibir, en cada momento, las características de la vía y su entorno y así poder realizar una circulación segura y eficiente. Los trazados actuales se plantean fundamentalmente curvilíneos, lo que obliga a la disposición de curvas horizontales coincidentes con acuerdos verticales, pudiendo verse restringida la visibilidad disponible.

Con el fin de obtener la visibilidad a lo largo de la vía, se ha implementado una aplicación en Matlab para calcular el perfil de visibilidad tridimensional. Posteriormente, se ha aplicado al caso concreto de acuerdos verticales convexos solapados con curvas horizontales para optimizar la coordinación planta-alzado y maximizar la visibilidad de parada disponible, generando más de 500000 escenarios diferentes como combinación de los parámetros de coordinación entre la planta y el alzado.

Los resultados de la optimización se presentan en tablas. Se ha encontrado que la distancia de parada depende del ratio entre el parámetro del acuerdo vertical (K_v) y el radio de la curva horizontal. Es más, se ha obtenido que valores de K_v inferiores a los establecidos en la Instrucción de Trazado también satisfacen la visibilidad de parada necesaria. Por otro lado, el desfase entre el vértice del acuerdo vertical y el centro de la curva horizontal también afecta a la visibilidad disponible, mientras que el efecto de la pendiente de la rampa de entrada es importante si el ángulo girado por el acuerdo vertical es fijo. Por último, destacar que la visibilidad se pierde principalmente en el punto donde el peralte cambia de signo, por lo que el punto más alto del acuerdo no es el que proporciona una mayor visibilidad.

PALABRAS CLAVES: Trazado, Coordinación Planta-Alzado, Perfil de Visibilidad Tridimensional, Elementos Finitos.

Abstract

Sight distance is one of the most important factors of road safety since it allows the driver perceiving, at real time, the characteristics of the road and its surroundings. A misperception of this crucial information could induce to a decision to drive with a maneuver with less margin of safety. Current design practice leads to frequent overlapping of vertical and horizontal curves which may reduce available sight distance.

A finite element optimization has been carried out to maximize the available stopping sight distance at vertical crest curves overlapped with horizontal curves in two-lane roads. A software application in Matlab was developed to calculate the sight distance profile. In order to simulate possible scenarios, different combinations of the parameters on the model have been taken into account.

The results of the software application are presented in tables. The stopping sight distance was found dependent on the ratio between the vertical crest curve parameter (K_v) and the horizontal radius. Values of K_v lower than the minimal values established in the Spanish design guidelines satisfy the required stopping distance. On the other hand, the offset between the horizontal curve midpoint and vertical curve vertex slightly affects the available stopping sight distance. Finally, the effect of the approach grade is important even if the algebraic difference of vertical grades is kept fixed.

The three dimensional effect of the road was analyzed by the sight distance profile. It was observed that the layout visibility gets principally lost in the point where the superelevation changes its sign. Thus, the vertical curve midpoint is not the point with the highest available sight distance.

KEY WORDS: Alignment, Coordination, Tridimensional Sight Distance Profile, Finite Elements.

1. Introducción

El diseño geométrico posee una gran influencia en el nivel de seguridad vial de las carreteras. A pesar de que la seguridad vial depende de numerosos factores, la visibilidad disponible se considera uno de los más importantes puesto que permite a los conductores percibir con suficiente antelación las características de la vía y su entorno, de tal forma que una mala percepción de esta información visual puede inducir a la decisión de realizar una maniobra con menor margen de seguridad.

La concepción geométrica clásica de las vías ha sido la de caracterizar por separado el trazado en planta, el trazado en alzado y la sección transversal en un proceso iterativo, sin considerar directamente la naturaleza tridimensional de la carretera debido a la dificultad que entraña. Así, en las normativas actuales y algunas investigaciones se suele recurrir a un análisis bidimensional (2D) de la visibilidad, aunque diversos autores están ampliando el análisis con métodos tridimensionales (3D), que reflejan la visibilidad real disponible en el trazado. Si se comparan los métodos 2D y 3D, los diseños basados en métodos 2D pueden infravalorar o sobreestimar la visibilidad disponible (Hassan et al., 1997). Dentro de los modelos 3D, se han realizado aproximaciones gráficas (Sánchez, 1994), con elementos finitos (Hassan et al., 1996; Hassan y Easa, 1998; García y Romero, 2007; Romero y García, 2007; Yan et al., 2008) o analíticas (Lovell et al., 2001; Ismail y Sayed, 2007; Lovell y Kim, 2010). Únicamente se han aplicado métodos de elementos finitos para optimizar la visibilidad del trazado (Romero y García, 2007).

La visibilidad disponible depende de la geometría de la vía. Los trazados actuales se suelen caracterizar por un frecuente solape de curvas horizontales y acuerdos verticales con el fin de conseguir una mejor adaptación al terreno, lo cual permite minimizar tanto el volumen de tierras como los impactos

ambientales. En estos casos, la coordinación del trazado en planta y en alzado mejora la seguridad, la operación del tráfico y la estética (Hassan y Easa, 1998). Es más, una coordinación pobre puede generar zonas con visibilidad disponible inferior a la distancia de visibilidad requerida (Lovell et al., 2001; Lovell y Kim, 2010).

Hasta ahora, las normativas de diseño geométrico proporcionan criterios generales de coordinación planta-alzado y se especifica que el trazado en planta y en alzado no deben ser diseñados de forma independiente (AASHTO, 2004; Ministerio de Fomento, 2000). En el caso del Libro Verde (AASHTO, 2004), se estipula que el acuerdo vertical debe estar contenido completamente en la curva horizontal, mientras que en la normativa española se indica que los puntos de tangencia del acuerdo vertical deben situarse dentro de la clotoide en planta y lo más alejados de las rectas de entrada y salida a la curva. Hassan et al. (1997) estudiaron las localizaciones donde una curva horizontal no debería comenzar en relación con un acuerdo vertical para asegurar que la distancia de parada o la distancia de anticipación fueran superiores a las necesarias, definiéndolas como zonas rojas. En su estudio, concluyeron que las zonas rojas disminuían con el incremento del peralte en la curva horizontal y el uso de acuerdos verticales más tendidos. No obstante, no se analizó el efecto del desfase entre el vértice del acuerdo vertical y la curva horizontal. Además, otros autores han analizado el perfil de visibilidad disponible para determinar el trazado en alzado (Taignidis, 1998; Hassan, 2003; Nehate, 2006) aunque los métodos de cálculo de la visibilidad eran 2D.

Otro de los criterios específicos de coordinación entre la planta y el alzado es la razón entre el parámetro del acuerdo vertical y el radio de la curva horizontal (K_v/R). Con el fin de evitar efectos ópticos inseguros, la normativa española recomienda que dicha razón sea la inversa del peralte

en tanto por uno o como mínimo 6. García (2004) analizó analíticamente el problema tridimensional, partiendo de unos análisis previos de Miguel Vallés, suponiendo que la carretera se encontraba embebida en un único plano, igual al peralte, de forma que la visibilidad es completa en toda la curva horizontal solapada con el acuerdo vertical aunque el análisis 2D mostrara que existían zonas ocultas en la proyección vertical. Se propuso que para maximizar la visibilidad disponible la razón debería encontrarse entre 6 y 14. Posteriormente, Romero y García (2007) desarrollaron una aplicación para optimizar la visibilidad de trazado empleando algoritmos genéticos. Los resultados indicaron que la razón óptima se encontraba entre 5,5 y 16,8. Además, valores del parámetro del acuerdo vertical (K_v) inferiores a los indicados en la normativa española también proporcionaban una visibilidad de trazado adecuada si la coordinación entre la planta y el alzado era óptima.

2. Objeto del Estudio

El principal objetivo de la investigación es maximizar la visibilidad de parada disponible en los acuerdos verticales convexos solapados con curvas horizontales en carreteras de calzada única. Para alcanzar el objetivo principal, se han determinado los siguientes objetivos secundarios: desarrollar una metodología de cálculo de la visibilidad 3D e implementarla en una aplicación informática, generar múltiples escenarios combinando los parámetros tanto de la planta, el alzado y su coordinación y analizar los resultados para maximizar la visibilidad disponible.

3. Metodología

La metodología para calcular la visibilidad tridimensional se ha desarrollado en Matlab, e incluye cuatro procesos principales: obtención de la superficie de la vía en 3D; cálculo de la

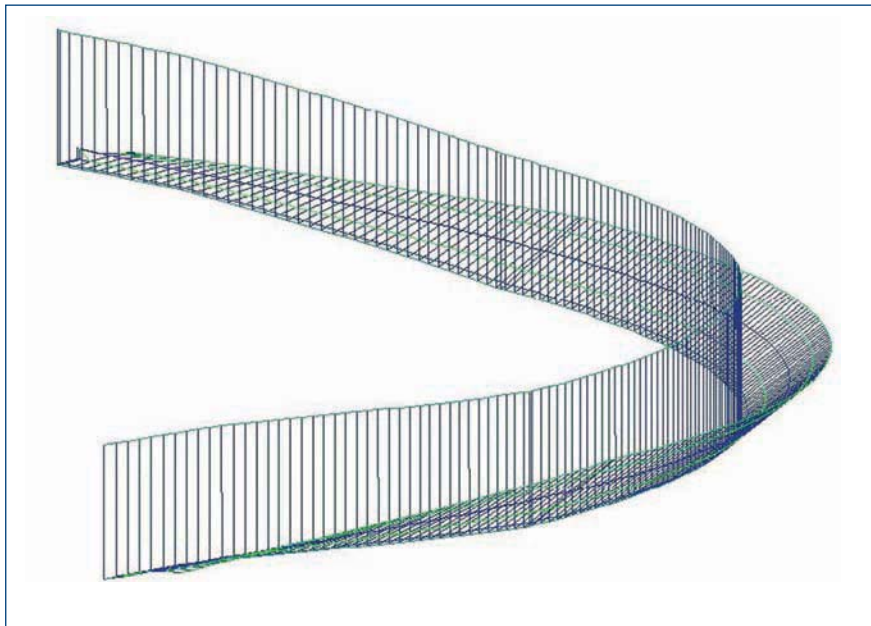


Figura 1: Modelo de superficie 3D de acuerdo vertical convexo y curva horizontal.

distancia de visibilidad 3D; determinación del perfil de distancia de visibilidad; y deducción de la distancia de visibilidad mínima a lo largo de la curva.

Posteriormente, la metodología se ha aplicado a diferentes escenarios. En ellos, se ha considerado la variación de los siguientes parámetros: (a) de la curva horizontal: radio, ángulo girado; parámetro de las clotoideas; y peralte; (b) del acuerdo vertical: pendiente de la rampa de entrada; pendiente de la rampa de salida; y parámetro del acuerdo vertical; (c) de la coordinación entre la planta y el alzado: desfase entre el vértice del acuerdo vertical y el

centro de la curva horizontal; (d) de la sección transversal: anchura de carril y de arcén; (e) posición del conductor: distancia lateral respecto al borde del carril y altura; (f) posición del objeto: distancia lateral respecto al borde del carril y altura; y (g) sentido de giro. Un total de 665.280 geometrías se han analizado variando estos parámetros.

Superficie 3D de la vía

El primer paso para el cálculo de la distancia tridimensional es la obtención de la malla que representa la superficie de la vía. Para ello, se han

empleado elementos rectangulares de cuatro nodos dentro del modelo de elementos finitos.

El primer paso de este proceso es parametrizar todas las características de la curva horizontal y vertical al eje de la vía. Así, a partir de los datos de entrada al algoritmo se han calculado las coordenadas (x,y,z) de cada punto del eje. Posteriormente, se calculan para cada nodo de la malla las coordenadas (x,y,z) a partir de las del eje dada la distancia al eje y la pendiente transversal. Al indexar todas las características al eje, era posible modelizar las geometrías más genéricas tanto en planta como en alzado y su coordinación. La distancia entre secciones transversales puede ser controlada por el usuario, y tras los correspondientes análisis de sensibilidad, se determinó que 2 m eran suficientes para obtener un perfil de visibilidad adecuado sin aumentar en exceso el tiempo de computación.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de superficie 3D. En la margen izquierda se ha representado un talud vertical con un plano vertical.

Visibilidad tridimensional

La visibilidad se ha calculado con una metodología iterativa basada en un bucle de comprobación. En él, se

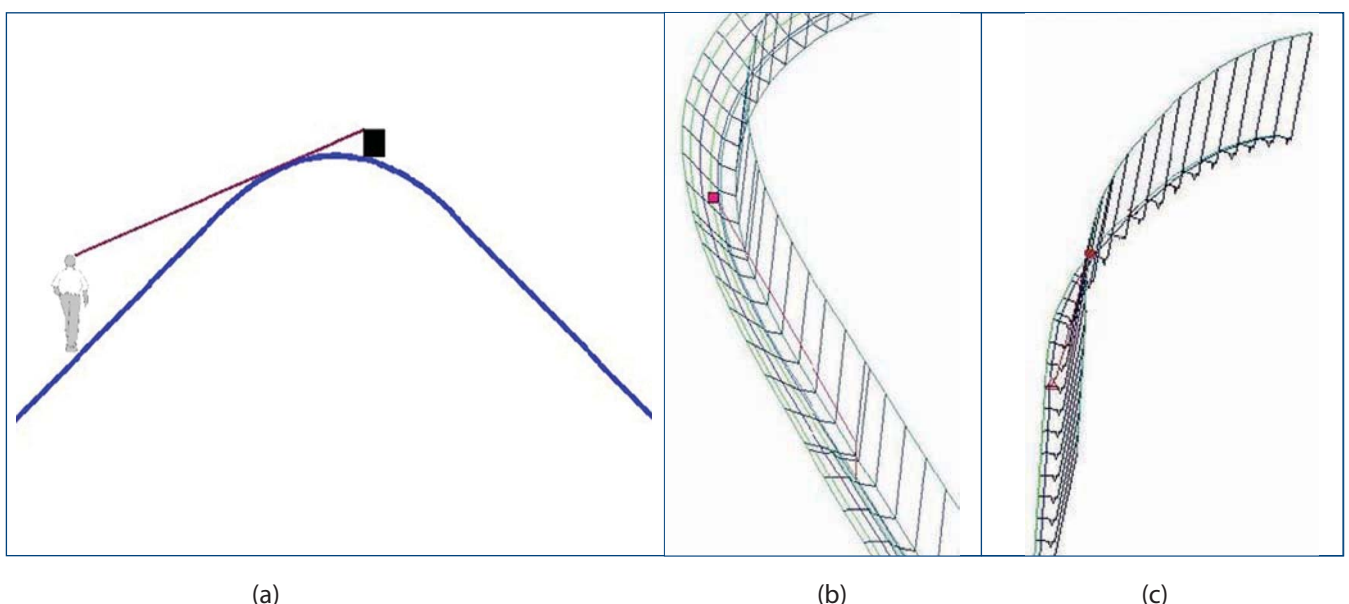


Figura 2: Primera posición del objeto: (a) localización; (b) caso visible; (c) caso no visible.

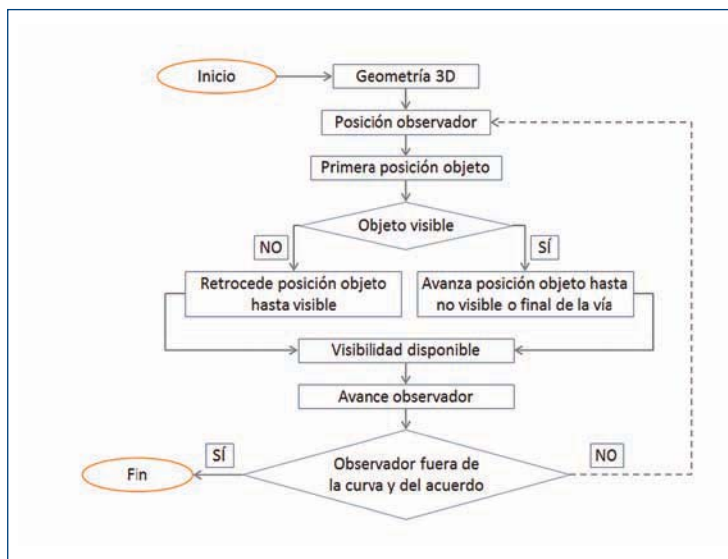


Figura 3: Diagrama de flujo para el cálculo de la visibilidad de parada disponible.

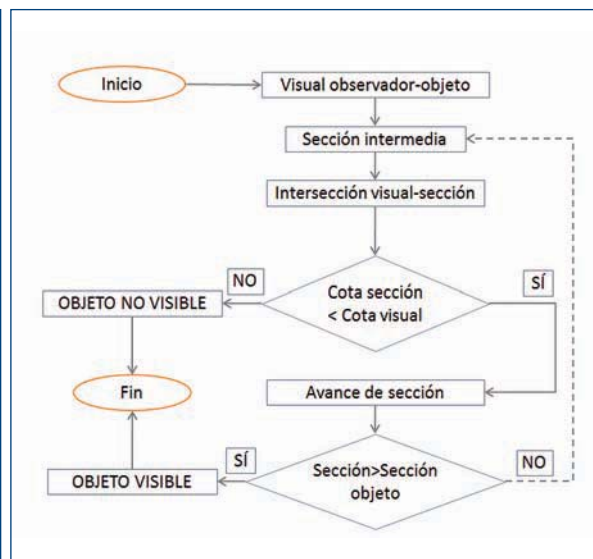


Figura 4: Diagrama de flujo para la comprobación de visibilidad.

colocaba el conductor en una sección transversal y el objeto a una distancia variable S por delante de la posición del conductor; y en dicha situación se comprobaba si la visual entre el conductor y el objeto se obstruía por alguna superficie de la vía. En caso contrario, el bucle continuaba hasta que el objeto no era visible o el objeto se encontraba más allá de la curva horizontal. En consecuencia, en este estudio, el proceso básico de iteración era el siguiente:

- Paso 1: iniciar S (primera posición del objeto).

- Paso 2: actualizar S ($S=S+\Delta S$).
- Paso 3: posicionar el objeto a una distancia S delante de la posición del conductor con una altura H sobre la superficie de la carretera.
- Paso 4: comprobar si algún elemento obstruye la visual entre el conductor y el objeto.
- Paso 5: si la visual no se obstruye por ningún elemento, repetir los pasos 2-4.
- Paso 6: si la visual se obstruye por algún elemento entre el observador y el objeto, la distancia de visibilidad se determina como $S-\Delta S$ y

se detiene el proceso de iteración.

Para optimizar el tiempo de computación, el primer objeto se colocaba donde la visual entre el conductor y el objeto con una altura H era tangente con la proyección vertical del acuerdo (Figura 2a).

En caso de que el objeto en su primera posición era visible, se seguía el proceso básico de iteración. En caso contrario, el proceso de iteración se modificaba de la siguiente manera:

- Paso 1: iniciar S (primera posición del objeto).
- Paso 2: actualizar S ($S=S-\Delta S$).
- Paso 3: posicionar el objeto a una distancia S delante de la posición del conductor con una altura H sobre la superficie de la carretera.
- Paso 4: comprobar si algún elemento obstruye la visual entre el conductor y el objeto.
- Paso 5: si la visual se obstruye por ningún elemento, repetir los pasos 2-4.
- Paso 6: si la visual no se obstruye por algún elemento entre el observador y el objeto, la distancia de visibilidad se determina como S y se detiene el proceso de iteración.

En la Figura 3 se resume el diagrama de flujo para determinar la visibilidad de parada disponible.

Por otro lado, ha sido necesario desarrollar otro algoritmo para evaluar si un objeto es visible dadas la posición del observador y el objeto. En la Figura 4 se

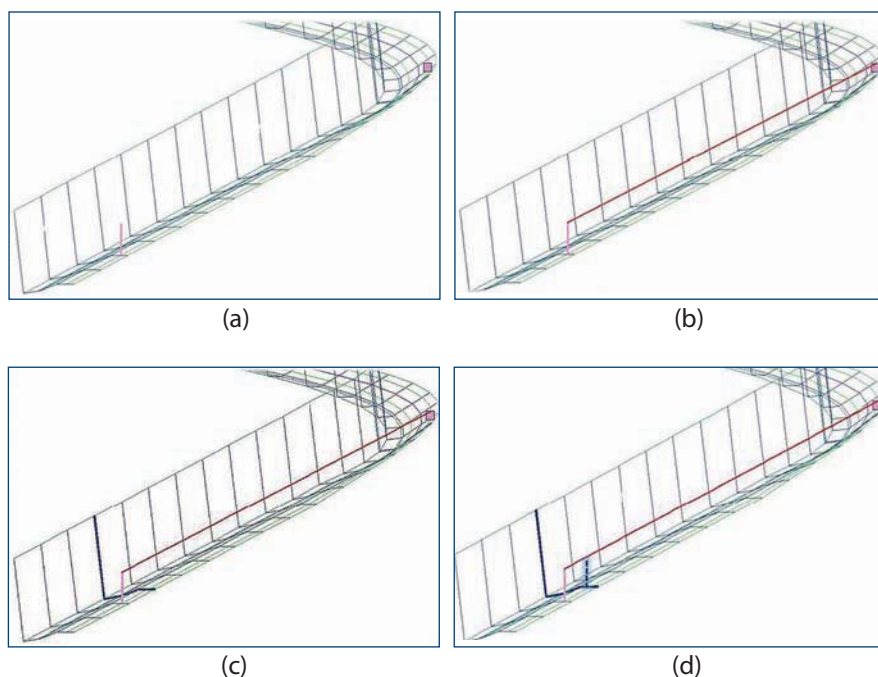


Figura 5: Proceso de comprobación de visibilidad: (a) ubicar el conductor y el objeto; (b) visual; (c) determinar una sección intermedia; (d) comprobar la intersección entre la visual y la sección intermedia.

muestra el diagrama de flujo seguido. Una vez las ubicaciones de conductor y objeto se han fijado, la condición de visibilidad se comprobaba en todas las secciones intermedias entre ambos. En cada sección intermedia, se calculaba la intersección en planta entre la visual y la sección transversal. En dicho punto, se comparaba la cota entre la sección transversal y la visual, de tal forma que si la cota de la visual era superior a la cota de la carretera, la visual no estaba obstruida por la vía en dicha sección, por lo que no suponía un obstáculo a la visual. A continuación, se consideraba la siguiente sección intermedia. En caso de que en alguna de las secciones intermedias se encontrara la visual por debajo de la cota del elemento correspondiente de la sección transversal, la vía intercepta la visual entre el conductor y el objeto, por lo que el objeto resultaría no visible desde la posición del conductor.

La Figura 5 ilustra el proceso de comprobación de visibilidad.

Perfil de visibilidad y visibilidad mínima

El perfil de visibilidad indica la visibilidad disponible en cada una de las posiciones de conductor evaluadas. De él, es posible deducir la visibilidad mínima a lo largo del elemento viario, valor que puede reflejar dónde la curva debe ser mejorada, en caso de que la visibilidad mínima sea inferior a la requerida. La precisión del algoritmo se ha comprobado comparando los resultados de visibilidad en numerosas curvas con programas comerciales.

Modelo de optimización

La investigación estaba centrada en la optimización de la distancia de visibilidad de parada. En consecuencia, se han adoptado la posición y altura del conductor y el objeto de las especificadas en la Instrucción de Trazado (2000): 1,1 m de altura del conductor; 0,2 m de altura de objeto y po-

sición tanto del conductor como del objeto a 1,5 m del borde derecho del carril. El algoritmo permite también el cálculo de la distancia de visibilidad de trazado (de la propia calzada) y de adelantamiento disponible si se varía la posición y altura de ambos.

El modelo de optimización ha generado 665.280 geometrías diferentes analizando distintas combinaciones de parámetros de la planta, el alzado y su coordinación. Los escenarios simulados han considerado los siguientes parámetros:

- De la planta:
 - Radio: entre 100 y 350 m.
 - Ángulo de giro: entre 30 y 100°.
 - Parámetro de las clotoides: entre el mínimo y el máximo indicados en la normativa española de trazado.
 - Longitud de la recta de entrada y salida: 200 m.
- Del alzado:
 - Pendiente de la rampa de entrada: entre -5 y 5%.
 - Pendiente de la rampa de salida: entre -5 y +5%. Se han considerado un total de 55 combinaciones de ángulo girado en el acuerdo vertical desde 1 al 10%.
 - Parámetro del acuerdo vertical: entre el 80% del mínimo y el parámetro deseable indicados en la normativa española de trazado.

- De la coordinación planta-alzado:
 - Desfase entre el vértice del acuerdo vertical y el centro de la curva horizontal: entre -18 y +18 m.
- De la sección transversal:
 - Carriles: anchura de 3,5 m y peralte del 7%.
 - Arcenes: anchura de 1,5 m y peralte del 7%.
 - Bermas: anchura de 0,5 m y peralte del 4%.
 - Cuneta: triangular con anchura de 1,5 m y profundidad de 0,5 m.
 - Despeje lateral: 100 m.
 - Distancia entre secciones transversales: 2 m.
- Sentido de giro:
 - Izquierda.
 - Derecha.

A partir de la combinación de los parámetros, se obtenía la geometría de la vía. Era posible que el acuerdo vertical no quedara incluido totalmente en la curva horizontal.

4. Resultados y Análisis

De los numerosos resultados obtenidos, en los siguientes apartados se va a desarrollar el análisis del perfil de visibilidad de parada y el efecto de la geometría en la visibilidad disponible mínima en un acuerdo vertical convexo solapado con una curva horizontal.

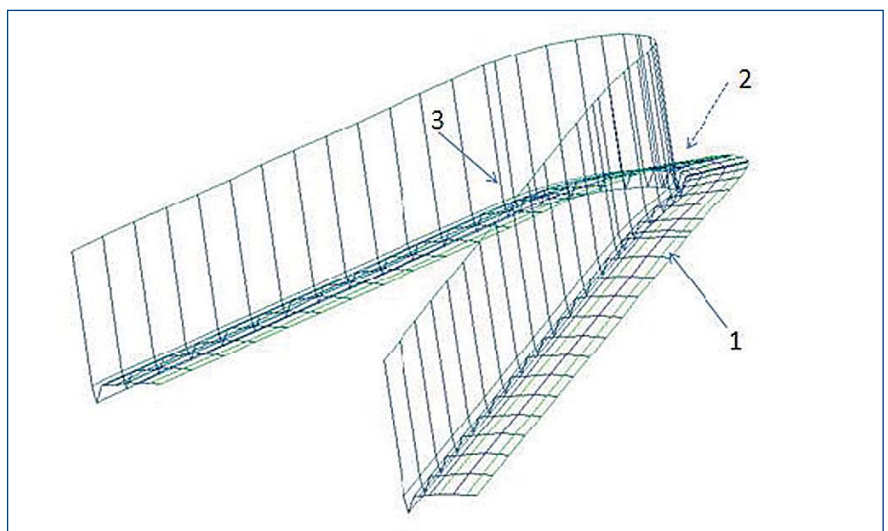


Figura 6: Efecto de la coordinación 3D de un acuerdo convexo solapado con una curva horizontal.

Perfil de visibilidad disponible

El efecto tridimensional de la vía sin presencia de obstáculos laterales se ha analizado empleando el perfil de visibilidad disponible 3D. El análisis 2D de un acuerdo vertical convexo simétrico indica que el punto medio del acuerdo es el punto con una mayor visibilidad, puesto que su cota en la proyección bidimensional es la mayor de todas y la visual lanzada desde dicho punto no podría ser interceptada por la superficie de la vía. No obstante, en el análisis 3D de la visibilidad se puede observar cómo dicho punto se encuentra en un mínimo local del perfil. En consecuencia, el concepto bidimensional no se produce en la realidad. De hecho, el efecto tridimensional de la vía genera no una única cima, sino que se producen dos promontorios y una hondonada. Los promontorios se localizan con anterioridad al punto medio de la curva, aproximadamente donde el peralte cambia de signo, mientras que la hondonada se ubica alrededor del punto medio del acuerdo. En consecuencia, el punto medio, el cual en la proyección vertical tiene la máxima cota, queda obstruido por los promontorios adyacentes, por lo que el punto medio presenta una visibilidad disponible menor. En la Figura 6, donde se muestra la representación tridimensional de un acuerdo convexo

solapado con una curva horizontal, se observa el efecto de la coordinación 3D, donde los puntos indican los dos promontorios (1 y 3) y la hondonada (2).

El perfil de visibilidad disponible determina la distancia de visibilidad de parada disponible para el conductor en cada posición y es posible la distinción de dos tipos de perfil de visibilidad: con obstáculos laterales y sin obstáculos laterales.

En el primero de los perfiles, la visibilidad disponible únicamente depende de la geometría tridimensional de la vía. En este perfil, se pueden observar dos puntos de visibilidad mínima (Figura 7a). Ambos mínimos corresponden con los puntos ubicados con anterioridad a los dos promontorios que se generan por el efecto de la coordinación 3D, mientras que existe un máximo local coincidente con el primero de los promontorios. Se puede observar en la figura cómo tanto el giro a derechas como a izquierdas (ambos en la misma curva, es decir, los dos sentidos opuestos) tienen el mismo efecto tridimensional, aunque la visibilidad 3D en el giro a izquierdas es mayor que en el giro a derechas puesto que en el giro a derechas el conductor está ubicado en la parte inferior del plano del peralte, resultando una mayor limitación de visibilidad por la superficie de la vía.

El segundo tipo de perfil de visibilidad se corresponde con los acuerdos

verticales convexos solapados con curvas horizontales a lo largo de secciones en desmonte, donde existe un talud de desmonte vertical en el interior de la curva que limita la visibilidad disponible (Figura 7b). La sección transversal empleada en este caso es una sección 7/10, con bermas de 0,5 m de anchura y 6,5 m de despeje lateral (medido desde el borde interior de la calzada). Se puede observar cómo se genera únicamente una zona de mínimo local causada por la obstrucción lateral. En esta zona, la visibilidad mínima se mantiene aproximadamente constante puesto que la visibilidad de parada se limita por el obstáculo lateral más que por el efecto tridimensional de la vía. Además, la diferencia entre la visibilidad disponible mínima entre el giro a izquierdas y a derechas es mayor en comparación con las curvas sin obstáculos laterales. En este caso, en el giro a izquierdas, el conductor está posicionado en el carril exterior, por lo que la propia plataforma de la carretera le proporciona un despeje lateral adicional en comparación con el giro a derechas, y, en consecuencia, la distancia de visibilidad disponible es superior.

Efecto de la geometría

En este apartado, se analiza la influencia de los parámetros geométricos en la visibilidad disponible,

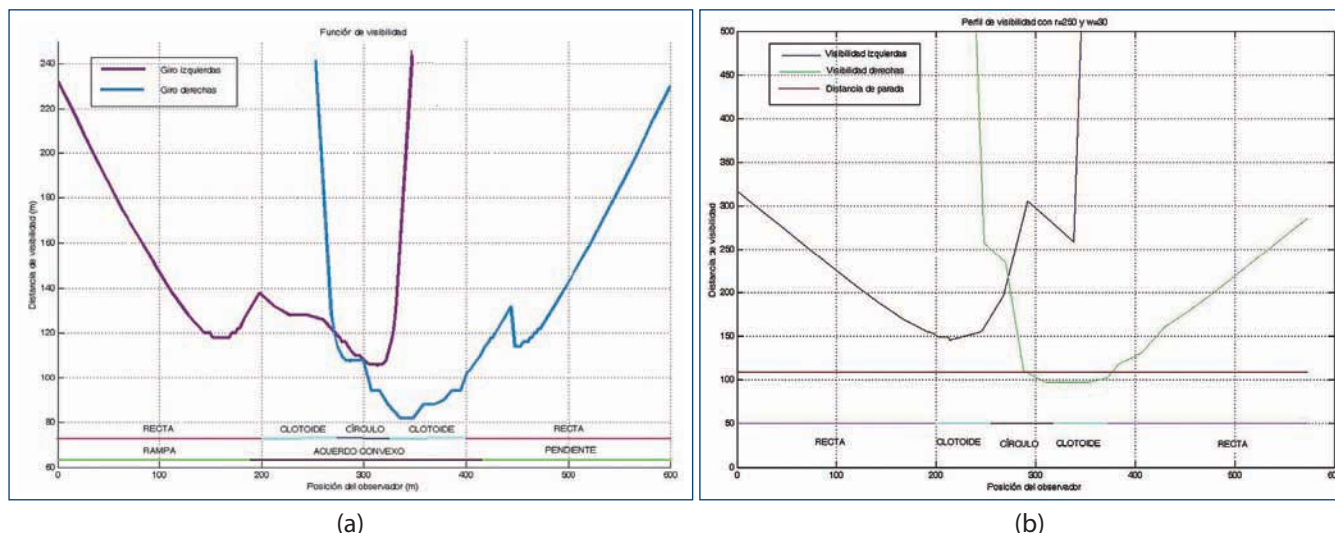


Figura 7: Perfiles de visibilidad disponible: (a) sin obstáculos laterales; (b) con obstáculos laterales.

concretamente: el desfase entre el vértice del acuerdo vertical convexo y el centro de la curva horizontal (d), la pendiente de la rampa de entrada (pe), la longitud de la curva horizontal (L), y la razón entre el parámetro del acuerdo vertical y el radio de la curva horizontal (K_v/R). Para ello, se ha comparado la distancia de visibilidad disponible mínima resultante en los escenarios simulados.

Desfase entre el vértice del acuerdo vertical convexo y el centro de la curva horizontal

En primer lugar, se ha analizado el efecto entre el desfase existente entre el vértice del acuerdo vertical y el centro de la curva horizontal. Se ha definido como desfase positivo aquél donde el centro de la curva horizontal se encuentra en una posición anterior al vértice del acuerdo vertical, considerando el sentido de avance según el giro a izquierdas en la curva.

En la Figura 8 se han representado los perfiles de visibilidad disponible, para una curva de radio 250 m, en función del desfase para el sentido de giro a izquierdas. Para ello, se ha incorporado a la representación de los perfiles de visibilidad una nueva dimensión: el desfase. Cada una de las líneas de la figura corresponde con el perfil de visibilidad asociado a un determinado desfase entre el vértice del acuerdo vertical y el centro de la curva horizontal, estando representados los perfiles sobre un eje transversal al plano de representación de la gráfica. En ella se puede observar cómo la distancia de visibilidad mínima se maximiza cuando los dos mínimos locales que presenta el perfil de visibilidad son iguales. Se han unido los puntos correspondientes a los mínimos locales, y la intersección entre las dos líneas, que determina el desfase óptimo, se encuentra en un desfase ligeramente negativo, aunque la sensibilidad en los valores de distancia de visibilidad es escasa. En el giro a derechas, el efecto del desfase es contrario, por lo

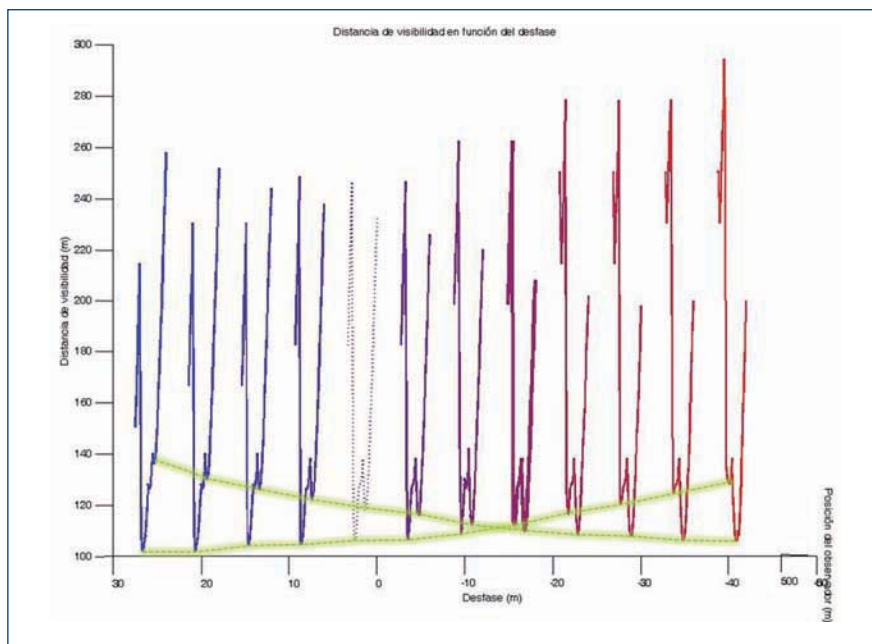


Figura 8: Efecto del desfase en el perfil de visibilidad de parada de un giro a izquierdas

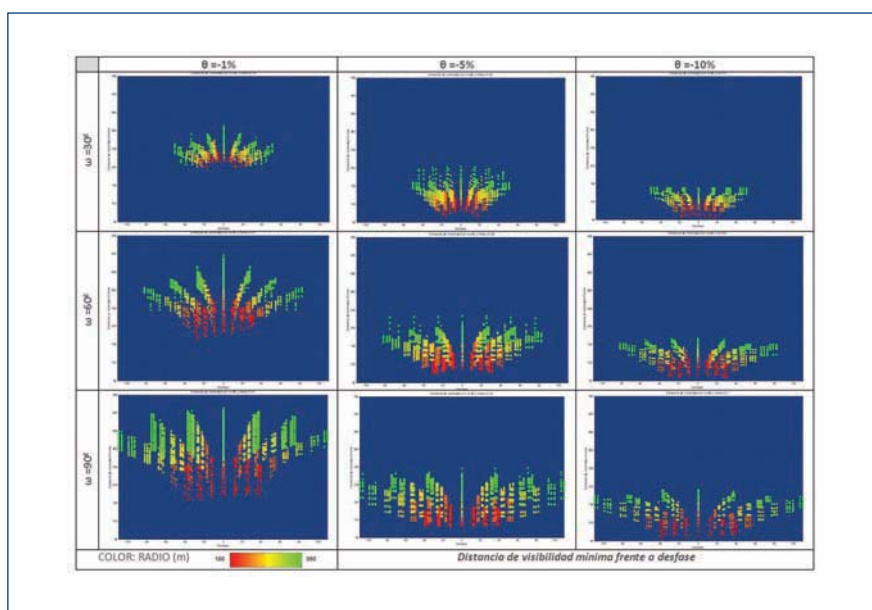


Figura 9: Efecto del desfase en la visibilidad disponible

que el desfase que optimiza la visibilidad de parada es positivo.

En otras palabras, tanto en los giros a derechas como en los giros a izquierdas, el centro de la curva horizontal debería situarse en una posición posterior al vértice del acuerdo vertical en el sentido de giro para maximizar la visibilidad disponible, por lo que el signo del desfase favorece a un sentido de giro penalizando la visibilidad resultante en el sentido de giro contrario.

Como las curvas de las carreteras de calzada única poseen los dos sentidos de giro, se debería encontrar el

óptimo considerando ambas direcciones de circulación. Debido a que el giro a derechas es más restrictivo que el giro a izquierdas, la distancia de visibilidad mínima de la curva se limitaría por el giro a derechas. En consecuencia, el desfase óptimo es ligeramente positivo. Por otro lado, se ha estudiado la influencia del desfase en diferentes curvas mediante un ábaco (Figura 9).

Las filas y las columnas del ábaco representan el ángulo girado por la curva horizontal y el ángulo girado (diferencia algebraica de pendientes) por el acuerdo vertical, respectivamente.

Además, el color de los puntos de las gráficas indica el radio según la leyenda. Se puede observar cómo el desfase óptimo se encuentra cercano a cero en la mayoría de los casos, aunque el desfase ligeramente positivo es más favorable en el caso de acuerdos más tendidos y curvas horizontales de menor longitud, mientras que el desfase negativo proporciona más visibilidad en los acuerdos más pronunciados. No obstante, se puede concluir que el impacto del desfase es bastante reducido, por lo que un criterio general de optimización sería adoptar un desfase nulo.

Pendiente de entrada

Al igual que en el caso del desfase, el impacto de la pendiente de entrada en la visibilidad disponible se ha representado en un ábaco que depende de cuatro parámetros (Figura 10). En las filas, se representa el ángulo girado por la curva horizontal mientras que en las columnas se encuentra la diferencia algebraica de pendientes, por lo que en cada celda se muestran los resultados para curvas con igual ángulo de deflexión y ángulo girado por el alzado. En las gráficas, se representa la visibilidad disponible frente a la pendiente de entrada, con el color indicando el radio de la curva horizontal.

Se puede observar cómo el efecto de la pendiente de entrada es superior en aquellas curvas con una mayor diferencia algebraica entre pendientes, al igual que en las curvas con mayor desarrollo y en las curvas con menor radio, y el valor óptimo de la pendiente de entrada está entre 0 y 3%. Por otro lado, la dispersión en la visibilidad disponible es superior en curvas con mayor ángulo de giro.

Razón Kv/R

El efecto de la razón entre el parámetro del acuerdo vertical y el radio de la curva horizontal en la visibilidad de parada depende de la diferencia algebraica entre pendientes. Como se

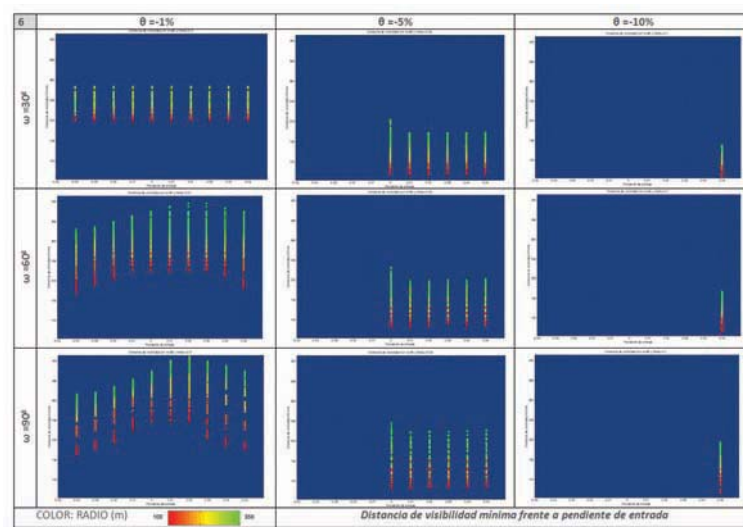


Figura 10: Efecto de la pendiente de entrada en la visibilidad disponible

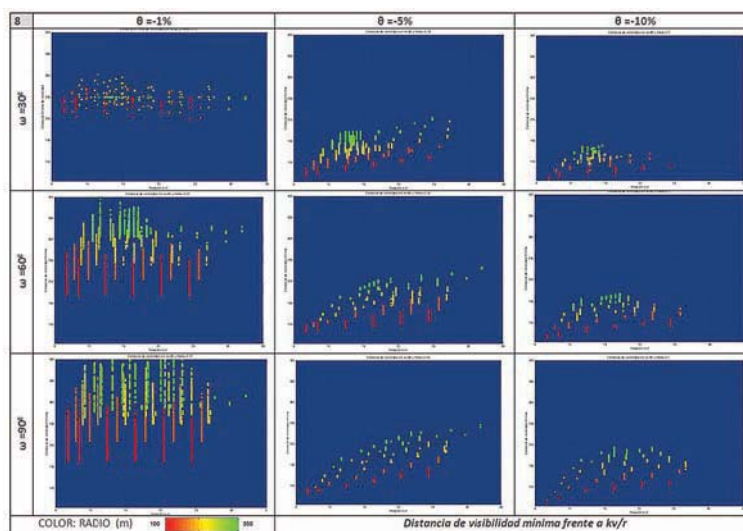


Figura 11: Efecto de Kv/R en la visibilidad disponible

observa en la Figura 11, se ha representado la visibilidad disponible en función de la razón Kv/R, el radio de la curva horizontal (color), el ángulo de giro (filas) y la diferencia algebraica entre pendientes (columnas). Se puede deducir que al aumentar la razón Kv/R, la visibilidad disponible aumenta en aquellas curvas donde el acuerdo es más pronunciado, mientras que en los acuerdos con diferencia algebraica de pendientes reducida, la visibilidad no depende de dicha razón. Es más, al aumentar la razón Kv/R se reduce la visibilidad disponible.

Por otro lado, se ha comparado la distancia de visibilidad disponible

disponible con la distancia de parada requerida según la Instrucción de Trazado (Ministerio de Fomento, 2000).

En la Figura 12, se ha representado en ordenadas el ratio entre la visibilidad disponible y la distancia de parada necesaria, de tal forma que si dicho ratio es superior a la unidad, la curva proporciona la visibilidad necesaria para realizar la maniobra de parada. Como se muestra en la Figura 11, los radios mayores proporcionan una mayor distancia de parada. No obstante, el ratio entre la visibilidad disponible y la distancia de parada es inferior que en las curvas con un radio

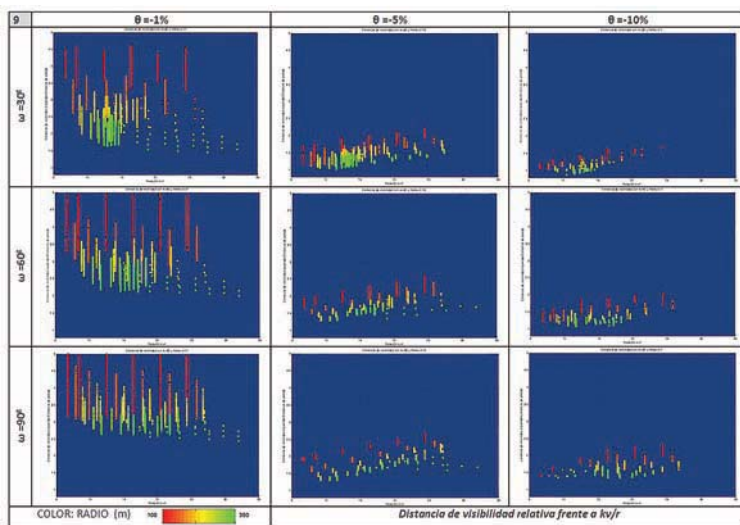


Figura 12: Efecto de Kv/R en la visibilidad disponible.

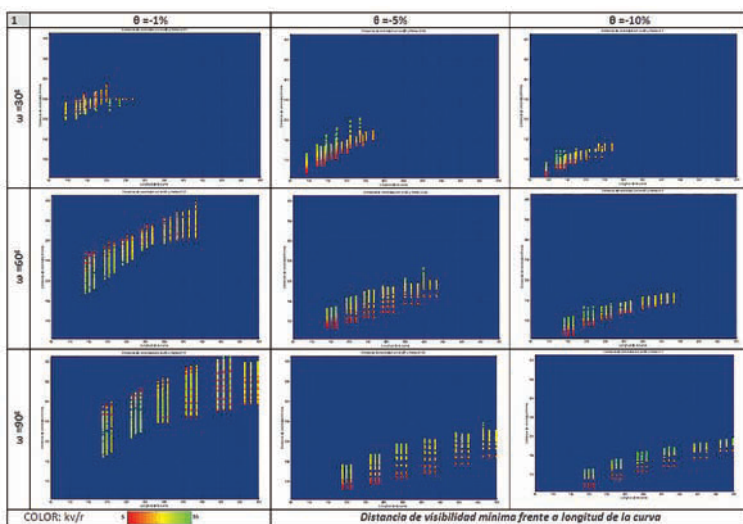


Figura 13: Efecto de la longitud de la curva horizontal en la visibilidad disponible.

más reducido.

En consecuencia, el incremento de la visibilidad disponible es inferior al incremento de la distancia de parada necesaria. Además, aun con un parámetro del acuerdo vertical un 20% inferior del indicado en la normativa se satisface la visibilidad necesaria en prácticamente todos los casos, excepto en las curvas con menor ángulo de giro y los acuerdos con diferencia algebraica de pendientes del 10%.

Longitud de la curva horizontal: radio y ángulo de giro

La influencia de la longitud de la curva en la visibilidad disponible se ha representado en la Figura 13. En ella, como en las figuras anteriores, se muestran en filas y columnas el ángulo de giro y la diferencia algebraica de pendientes, respectivamente. Dentro de cada celda, se representa el radio de la curva y la razón Kv/R (color). Comparando los resultados en una celda, al aumentar la longitud de la curva, se consigue una mayor visibilidad de parada. En consecuencia, los radios mayores proporcionan más visibilidad.

En el caso de la diferencia algebraica de pendientes, se encuentra una relación logarítmica entre la distancia de visibilidad y la longitud de la curva. En el ábaco se puede observar cómo el efecto de la diferencia de pendientes es importante en la visibilidad: cuanto mayor es dicha diferencia, menor es la visibilidad resultante.

La leyenda de color indica la razón Kv/R. En este ábaco se pueden extraer conclusiones similares a las de la Figura 11, donde se observaba que en los acuerdos más tendidos y cercanos a la horizontal, una mayor razón Kv/R disminuía la visibilidad, mientras que en los acuerdos más pronunciados, al aumentar la razón también lo hace la visibilidad disponible.

5. Conclusiones y Recomendaciones

El objetivo de este estudio es maximizar la visibilidad disponible en los acuerdos verticales convexos solapados con curvas horizontales en carreteras de calzada única. En el artículo se ha presentado un método de elementos finitos para calcular la visibilidad tridimensional y se ha adaptado a la visibilidad disponible. Además, se han proporcionado criterios específicos en la coordinación planta-alzado para maximizar la visibilidad de parada, incluyendo un análisis del perfil de visibilidad tridimensional a lo largo de una curva.

Para ello, se ha desarrollado una aplicación en Matlab basada en el método de elementos finitos que calcula la visibilidad 3D mínima en un acuerdo vertical convexo coincidente con una curva horizontal, al igual que su perfil de visibilidad.

Sobre el perfil de visibilidad tridimensional, se ha podido constatar cómo la naturaleza tridimensional del trazado de las vías no se puede analizar únicamente desde la concepción clásica de visibilidad bidimensional. Se puede comprobar cómo la visibilidad en el trazado se pierde principalmente en la transición de peralte del

borde exterior de la curva, específicamente, en el punto en el que el peralte cambia de signo. En consecuencia, el punto central del acuerdo, con una mayor cota, no es el que proporciona una mayor visibilidad de parada disponible.

Los resultados de la aplicación del programa a más de 600.000 escenarios se han presentado en tablas donde la visibilidad de parada disponible depende de cuatro parámetros. Estos resultados han proporcionado numerosas conclusiones, entre las que destaca que la razón entre el parámetro del acuerdo vertical (K_v) y el radio de la curva horizontal afecta a la visibilidad de parada, y se ha podido observar que la proporción óptima se encuentra entre 5 y 15. Además, valores de K_v inferiores a los establecidos en la norma española también proporcionan visibilidad suficiente, por lo que se puede conseguir una visibilidad adecuada si la coordinación entre la planta y el alzado es correcta incluso con parámetros de acuerdo vertical menores que el mínimo indicado. Es más, en las curvas con escasa diferencia algebraica entre pendientes, el aumento del K_v reduce la visibilidad disponible. Es importante destacar que, a pesar de que al aumentar el radio de la curva horizontal la visibilidad disponible es mayor, el incremento de necesidad de distancia de parada es superior al aumento de la visibilidad disponible. Por otro lado, se ha observado una leve influencia del desfase entre el vértice del acuerdo vertical y el centro de la curva horizontal en la visibilidad de parada, por lo que un criterio general de optimización sería adoptar un desfase nulo. Por último, el efecto de la pendiente de entrada es importante incluso si la diferencia algebraica de pendientes se mantiene fija, encontrado el óptimo entre 0 y 3%.

A partir de los resultados y aplicaciones obtenidas, se plantean futuras líneas de investigación que incluyen la presencia de obstáculos laterales en diferentes posiciones y con distinta

naturaleza, la determinación del despeje lateral mínimo, la aplicación de esta metodología a proyectos de carreteras o a vías en explotación y el balance de diferenciales de coste y mejora de distancia de visibilidad. Además, se comprobará si el aumento de la visibilidad geométrica es percibido por los conductores en la realidad.

Referencias

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2004). A policy on geometric design of highways and streets, Washington, D.C.
- [2] Easa, S.M. (2009). Improved Sight Distance model for vertical curves with overpasses. *Journal of Transportation Research Board* vol 2120, 28-36
- [3] García, A. (2004). Optimal vertical alignment analysis for highway design – Discussion. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, Issue 1, pp 138.
- [4] García, A. y Romero, M.A. (2007). 3D Calculation of Stopping-Sight Distance from GPS Data – Discussion. *Journal of Transportation Engineering*, 2007, Vol. 133, Issue 11, pp. 645-646.
- [5] Hassan, Y., Easa, S.M., y Abd El Halim, A.O. (1996). Analytical model for sight distance analysis on three-dimensional highway alignments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1523, pp. 1-10.
- [6] Hassan, Y., Easa, S.M., y Abd El Halim, A.O. (1997). Design considerations for combined highway alignments. *Journal of Transportation Engineering*, Vol 123, No. 1, pp 60-68.
- [7] Hassan, Y. y Easa, S.M. (1998). Design considerations of sight distance red zones on crest curves. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 124, No. 4, pp 343-352.
- [8] Hassan, Y. y Easa, S.M. (2000). Modeling of required preview sight distance. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No.1, pp. 13-20.
- [9] Hassan, Y. (2003). Improved design of vertical curves with sight distance profiles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1851, pp. 13-24.
- [10] Ismail, K. y Sayed, T. (2007). New algorithm for calculating 3D available sight distance. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 133, No.10, pp. 572-581.
- [11] Lovell, D., Jong, J.C. y Chang, P. (2001). Improvements to sight distance algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127, No.4, pp. 283-288.
- [12] Lovell, D. y Kim, D.G. (2010). A procedure for 3-D sight distance evaluation using thin plate splines. *4th International Symposium on Highway Geometric Design*, Valencia.
- [13] Ministerio de Fomento. (2000). Instrucción de Carreteras, Norma 3.1 – IC “Trazado”, Madrid.
- [14] Romero, M.A. y García A. (2007). Optimal overlapping of horizontal and vertical curves maximizing sight distance by genetic algorithms. *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2007.
- [15] Sánchez, E. (1994). A 3-dimensional analysis of sight distance on interchange connectors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1445, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 1994, pp. 101-108.
- [16] Taiganidis, I. (1998). Aspects of stopping-sight distance on crest vertical curves, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 124, No. 4, pp. 335-342.
- [17] Yan, X., Radwan, E., Zhang, F. y Parker, J.C. (2008). Evaluation of dynamic passing sight distance problem using a finite-element model. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 134, No.6, pp. 225-235. ♦