
LA VELOCIDAD EN LA NUEVA NORMA DE TRAZADO

Justo Borrajo Sebastián

1.- INTRODUCCION

Cualquier **fallo** en una obra proyectada y construida por ingenieros de caminos es atribuido por la sociedad a un **error**. Ello se debe a la confianza que la misma tiene en los conocimientos y cálculos físico-matemáticos de los ingenieros, que en muchos casos participan de la misma creencia. La verdad es que la mayoría de los conocimientos se basan en la experiencia y la estadística, lo que unido a la economía determina que en todo proyecto se acepte un **riesgo** basado, entre otras cosas, en la diferente y variable cantidad de condiciones y usos a que deben responder nuestras obras.

Mi permanencia en la Comisión que ha estado revisando la nueva Instrucción de Trazado, junto a excelentes profesionales con amplia experiencia y con los que he aprendido muchas cosas, no ha hecho más que aumentar mi conciencia de lo que ignoramos. En cambio, si entre lo aprendido tuviese que destacar algo no tengo ninguna duda que lo principal ha sido que una Norma es el resultado de un **compromiso** entre numerosas variables, entre las que destacan la economía y la seguridad.

Aceptando que la seguridad absoluta es inalcanzable, y además sería muy costosa, el problema es establecer el límite razonable, sobre todo si se tiene en cuenta que las carreteras son utilizadas por un tráfico variable en intensidad y velocidad, tanto espacial como temporalmente, compuesto por vehículos muy diferentes y conducidos por personas, en general no profesionales, con comportamientos muy distintos.

Mi postura ha sido siempre apostar por una evolución desde situaciones de **dirigismo paternalista** por parte de los proyectistas hacia situaciones de **libertad responsable** por parte de los usuarios, basadas en una buena información. Como ingenieros no somos responsables de que un conductor temerario se mate en una curva, pero sí de que la misma esté integrada en el resto del trazado y en su entorno, así como debidamente señalizada.

El aumento de las características geométricas de las carreteras para tratar de mejorar su seguridad se ha mostrado siempre ineficaz pues, por una parte, los conductores incrementan su velocidad hasta asumir el mismo riesgo, aumentando la gravedad de los accidentes, y por otra, los costes unitarios de construcción crecen de forma significativa, con el resultado de poder mejorar menos carreteras o dejar de atender otras necesidades también importantes de los ciudadanos.

Es un hecho objetivamente demostrable que existen autopistas de peaje en nuestro país con características A-80 tan seguras o más que otras con características A-120. Todo depende del entorno y la orografía en el que se insertan y la homogeneidad de su trazado. Sin embargo, los costes pueden verse incrementados hasta en un 50% al pasar de una categoría a otra.

Conviene también no confundir el alcance de una reglamentación técnica con el de una jurídica, pues mientras en ésta las conductas pueden ser claramente especificadas como correctas o no, en las técnicas hay multitud de factores y variables difíciles de fijar con exactitud, por lo que entre lo deseable y lo prohibido hay una gama muy amplia de soluciones aceptables.

La **velocidad** es el parámetro fundamental en el proyecto de una carretera, pues la mayor parte de los accidentes, sobre todo los mortales, está relacionada con una velocidad inadecuada, consecuencia no solo de la no observación de las limitaciones establecidas, sino también de una estimación incorrecta de la velocidad a la que una carretera puede ser recorrida con seguridad. Por ello, es muy importante que **la velocidad que se tenga en cuenta para proyectar la carretera sea comprendida y aceptada por el usuario**, que las **características de la carretera en cada tramo sean homogéneas** y no haya grandes diferencias entre tramos consecutivos, y que **la señalización esté justificada; sea creíble y respetada**.

También es muy importante distinguir dos niveles en el diseño: El de **seguridad estricta**, basado en las velocidades más altas y en maniobras de emergencia, y el de **comodidad en la conducción**, basado en las velocidades normales y maniobras con mayor margen.

Se acepta que el segundo nivel debe ser el utilizado para el proyecto de la carretera, mientras el primero se debe utilizar para la comprobación de ciertos aspectos de la seguridad en la circulación.

2.- LAS VELOCIDADES UTILIZADAS EN LA NUEVA NORMA

La Instrucción de 1961 definía algunas velocidades, como la geométrica, que luego no eran empleadas para el trazado. En la nueva Norma hemos considerado que solo hay que definir aquellos conceptos que después se utilizan para conseguir un buen trazado.

Las velocidades definidas son las siguientes:

- **Velocidad específica de un elemento de trazado (V_e)**, que amplía el concepto anterior referido a una curva circular a cualquier elemento considerado aisladamente, y se define como la máxima velocidad que puede mantenerse en el mismo, en condiciones de seguridad y comodidad con pavimento húmedo y neumáticos en buen estado, sin considerar restricciones por condiciones meteorológicas, del tráfico o legales.

- **Velocidad de proyecto de un tramo (V_p)**: Es la velocidad específica mínima de los elementos que constituyen dicho tramo, entendiéndose éste como cada una de las partes en que se divide un itinerario a efectos de redacción de proyectos.

- **Velocidad de planeamiento de un tramo (V)**: Es la media armónica de las velocidades específicas de los elementos de tramos homogéneos de longitud superior a 2 Km. Viene dada por la expresión:

$$V = \frac{\sum l_k}{\sum l_k / V_{ek}}$$

donde l_k es la longitud del elemento K y V_{ek} la velocidad específica del mismo.

La velocidad de proyecto determina en la nueva Instrucción:

- La clase de carretera
- La distancia de parada mínima
- La distancia de adelantamiento
- La distancia de cruce
- Las longitudes máximas y mínimas de las rectas
- Los radios y peraltes de las curvas circulares
- La longitud mínima de las curva de transición
- Las inclinaciones máximas de las rasantes
- Los parámetros mínimos y deseables de los acuerdos verticales
- La anchura mínima de los arcenes
- El nivel de servicio en la hora de proyecto del año horizonte
- La longitud de los carriles adicionales y las cuñas de transición
- La longitud de los carriles centrales de espera.

Una vez realizado el trazado de un tramo con una velocidad de proyecto, la Instrucción ordena que se calculen las velocidades de planeamiento de subtramos homogéneos de longitud superior a 2 km, para

compararlas entre sí y con la velocidad de proyecto y conocer la homogeneidad de la geometría. Para ello, en el apartado 4.5, se establece que la velocidad de planeamiento en dos subtramos consecutivos no se diferencie en más de 30 Km/h. Asimismo, y con el mismo fin, se establece que la diferencia entre la velocidad específica de elementos consecutivos será igual o menor que 20 km/h, excepto en el caso de ser uno de ellos una alineación recta en cuyo caso se admitirá una diferencia máxima de 25 Km/h.

3.- RELACION DE LAS VELOCIDADES DEFINIDAS EN LA NORMA CON LA DISTRIBUCION ESPACIAL Y TEMPORAL DE VELOCIDADES EN UNA CARRETERA

La velocidad de un vehículo, en ausencia de otros que le dificulten su marcha, es variable a lo largo de una carretera, aunque ésta sea homogénea en cuanto a diseño. Hay, por tanto, una distribución espacial de velocidades que es consecuencia de las características de la parte del tramo recién recorrida y de las posibilidades percibidas por el conductor en cada momento.

Las velocidades en las curvas, por sí solas, no son un buen indicador de la distribución de velocidades en un tramo, ya que la proporción de alineaciones rectas o de poca curvatura tiene mucha más influencia.

Los vehículos siguen un modelo de deceleración-aceleración para ajustar su velocidad al tránsito por las curvas, y la distribución espacial de velocidades depende de las características del trazado siguientes:

- La sinuosidad en planta
- La ondulación de la rasante
- La anchura de la plataforma
- La visibilidad disponible
- La frecuencia de accesos y nudos

El valor representativo de la distribución espacial de velocidades en un tramo homogéneo de más de 2 Km es la media armónica de las velocidades instantáneas en cada sección del mismo.

Este valor es el que se ha utilizado en la Norma como velocidad de planeamiento para dar idea, por una parte, de la homogeneidad del trazado al comparar las correspondientes a tramos contiguos y éstas con la velocidad de proyecto y, por otra, de la velocidad a la que realmente se puede circular por una carretera en ausencia de restricciones por tráfico.

En cuanto a la **distribución temporal**, la experiencia demuestra que en una misma sección de una carretera no todos los vehículos circulan a la misma velocidad. Existe pues una distribución temporal de velocidades en la que influyen los factores siguientes:

- La clase de carretera y la limitación genérica de velocidad en ella.
- Las características del tramo que se acaba de recorrer y la percepción de las correspondientes al tramo siguiente.
- La composición del tráfico y, especialmente, la proporción de vehículos pesados.
- La relación entre la intensidad de la circulación y la capacidad de la carretera en cada sección
- La climatología favorable o adversa (lluvia, niebla, nieve, hielo)
- Las ayudas exteriores a la conducción: balizamiento, señalización, iluminación, etc.

La circulación en España pone de manifiesto, a partir de las campañas de medida de velocidades realizadas por el CEDEX, durante 1990-92, unas pautas de comportamiento diferentes a las de otros

países europeos. Así, en la tabla 1 se recogen las velocidades en diferentes tipos de carreteras para los fractiles más representativos (velocidades no superadas por el 1%: V_{99} ; el 15%: V_{85} ; y el 50%: V_{50}) así como las relaciones entre ellas. Puede observarse que la velocidad máxima (V_{99}) en autovías es de 160 Km/h muy superior a la legalmente permitida, y que incluso la velocidad que generalmente se asocia con la de proyecto (V_{85}) es también elevada (125 Km/h). La relación V_{99}/V_{85} disminuye desde 1,35 a 1,28 al pasar de carreteras convencionales a calzadas separadas, aunque siguen siendo muy superiores a los de otros países europeos, lo que significa que en España haya una mayor proporción de conductores temerarios y que lo son más que en dichos países.

Hay que precisar que al haberse tomado las velocidades en tramos rectos y en condiciones favorables (de día, con firme seco y baja intensidad de circulación) son representativas de las máximas practicadas en cada tipo de carretera, siendo razonable esperar que en otras circunstancias las velocidades sean inferiores, aunque no existen datos.

Toda sociedad debe hacerse esta reflexión ¿para quién se proyecta el trazado de una carretera?, siendo consciente de que hacerlo para proporcionar una conducción cómoda a los fractiles más altos de velocidad resultaría muy caro. Por tanto, los conductores más rápidos deben estar dispuestos a asumir un cierto grado de incomodidad. En cuanto a la seguridad, ya se ha indicado que se debe actuar sobre la señalización, haciéndola creíble y combinando la libertad responsable con el castigo real y ejemplar de los infractores, sobre todo de los que pongan en peligro a terceros.

La Sociedad debe, por tanto, establecer un compromiso aceptable entre los costes de construcción y los de explotación, entre los que se encuentran los correspondientes a los accidentes, que dependen también de las políticas de educación vial y sanciones que se adopten y no solo de las características de la carretera.

En general, las normativas modernas suelen asociar a la velocidad V_{85} los aspectos del diseño relacionados con la comodidad y a la V_{99} los relativos a la seguridad, asumiendo que los conductores que circulen a velocidades comprendidas entre ambas deben contar con un margen de seguridad aceptable aunque con una mayor incomodidad.

La poca experiencia existente en nuestro país sobre valores reales medidos en nuestras carreteras, unida a la tipología tan diferente de las vías de gran capacidad existentes y la dificultad que introduciría la adopción de modelos matemáticos, nos ha llevado en la nueva Instrucción 3.1.-I.C. a suprimir las referencias a V_{85} y V_{99} , manteniendo los conceptos de conducción cómoda y segura, asociando la primera a la velocidad de proyecto (V_p) y la segunda a la de proyecto incrementada en 20 Km/h.

Así, en curvas circulares se establece un radio-peralte en función de la velocidad específica que se quiera adoptar en la misma, y además, que recorrida dicha curva a la velocidad específica aumentada en 20 Km/h el valor del coeficiente de rozamiento transversal movilizado (f_t) no supere el valor 0,25, para evitar el quiebro en vehículos articulados. Por ello, en la figura 4.2 de la Norma la curva que relaciona la velocidad con f_t , dada por la ecuación $V^2 = 127 \cdot R (f_t + P/100)$, presenta un quiebro en el valor correspondiente a 80 Km/h, en el que los radios que se deducen para la V_e con los f_t de la tabla 4-2 y para la $V_e + 20$ con $f_t = 0,25$ son prácticamente iguales.

La velocidad de proyecto incrementada también influye fundamentalmente en la visibilidad de parada deseable, la distancia y visibilidad de adelantamiento y la visibilidad de cruce deseable, es decir en los parámetros más importantes en la seguridad, pero esto será objeto de la conferencia posterior de D. Manuel Crespo.

Los valores del coeficiente de rozamiento transversal (f_t) dependen del tipo de pavimento, del estado del mismo (pulimento, deformaciones), la humedad, el estado de los neumáticos y la velocidad del vehículo.

Los valores de f_t varían fuertemente con la humedad, distinguiéndose el pavimento seco del ligeramente mojado (espesor de película de agua del orden de 0,2 mm) y del muy mojado (espesor de película de agua del orden de 2 mm). También el estado del neumático varía de manera importante el valor de f_t , ya que el dibujo en buen estado contribuye a evacuar la película de agua aumentando el contacto con el pavimento.

En la tabla 2 se representan los valores típicos de f para distintas velocidades y diferentes estados de humedad y neumáticos.

Los datos anteriores se pueden aproximar por fórmulas tales como:

$$\log f_i = -\frac{V}{a} - b$$

siendo a y b coeficientes que dependen de la humedad y del estado de los neumáticos.

En la Figura 1 se han representado las ecuaciones anteriores junto a los valores admitidos por el diseño de curvas en la antigua y nueva Norma. Se pueden extraer las conclusiones siguientes:

- Con pavimento seco la resistencia al deslizamiento es muy elevada y depende poco de la velocidad o del estado del neumático.
- La resistencia al deslizamiento con neumático bueno y pavimento muy mojado es del mismo orden de magnitud que con neumático desgastado y pavimento ligeramente mojado. Además, es inferior a la adoptada en la antigua Instrucción para velocidades superiores a 70 km/h, mientras con la nueva Norma eso no ocurre hasta velocidades superiores a 100 Km/h.
- La resistencia al deslizamiento con neumáticos desgastados y pavimento muy mojado es bastante inferior a la propuesta en la Norma, considerando que en este caso es el conductor quien debe valorar cuanto debe disminuir su velocidad.

Para curvas de distintos radios, peraltadas con arreglo a la Tabla 4.3 de la nueva Instrucción y con los valores del coeficiente de rozamiento transversal anteriores, se representan en la Figura 2 las máximas velocidades compatibles con la condición de que no se produzca un accidente por deslizamiento. También se han representado las velocidades específicas de proyecto dadas por la antigua y la nueva Instrucción.

Puede apreciarse que la velocidad máxima a igualdad de radios es inferior en la nueva Norma que en la antigua para velocidades inferiores a 80 Km/h, siendo prácticamente igual para velocidades más altas.

Los márgenes de seguridad solo desaparecen para pavimento ligeramente mojado y neumático desgastado con velocidades superiores a 80 Km/h, o con pavimento muy mojado para velocidades superiores a 80 Km/h con neumático bueno, o a 60 Km/h con neumático desgastado. Todas ellas circunstancias excepcionales que no deben ser cubiertas por la Instrucción.

Las cuestiones de señalización de velocidad máxima en curvas, así como prohibiciones de adelantamiento, se ha decidido dejarlas para la Norma correspondiente.

El peralte máximo se ha decidido establecerlo en un 8% para radios inferiores a 700 m ($V_e = 120$ Km/h) descendiendo gradualmente hasta un 2% con radios de 5000 m o más. Hay que decir que, contrariamente a una opinión bastante extendida, tiene poca influencia en la velocidad máxima a la que puede recorrerse una curva: Pasar de peralte 3% al 10% en una curva de radio 300 m solo aumenta la velocidad máxima en un 12%.

4.- MODELO DE ACELERACION EN RECTAS ENTRE CURVAS SUCESIVAS

La Instrucción incluye un modelo que permite, conocidas las velocidades específicas en la curva primera (V_1), en la segunda (V_2) y la longitud de la recta (L), determinar la velocidad en la recta (V_r) dada por la expresión:

$$V_r = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 - 12,81V_1 + 4,608.L}{2}}$$

La longitud L estará comprendida entre unos mínimos, según sean las curvas en el mismo sentido o no, y un máximo.

Establecida una longitud L que cumpla lo anterior, se comprobará que la velocidad V_2 está comprendida entre dos valores, máximo y mínimo, que dependen del valor V_1 y de L.

Este modelo permite asignar las velocidades en rectas para calcular la velocidad de planeamiento, necesaria para comprobar la homogeneidad del trazado.

5.- VELOCIDADES DE PROYECTO Y PLANEAMIENTO A ESTABLECER EN LAS ORDENES DE ESTUDIO

La velocidad de proyecto de un tramo de carretera homogéneo en cuanto a trazado, debe constituir una referencia encaminada a obtener un trazado coordinado con la lectura que de la carretera hace el usuario, relacionada sobre todo con su tipología y con las características del entorno y la orografía. Por ello, debe ser un objetivo elegido político-administrativamente en función de un estudio de rentabilidad económica de la inversión necesaria para alcanzar distintas velocidades.

La existencia de tramos con dificultades orográficas importantes puede aconsejar la reducción de las velocidades de proyecto de los mismos, estableciendo tramos de transición para cumplir con las condiciones fijadas en aras de la homogeneidad.

El problema en los estudios informativos es que los mismos, al tener una longitud importante, pueden abarcar tramos de condiciones muy diferentes por lo que fijar una única velocidad de proyecto no tiene mucho sentido, debiendo interpretarse como la del tramo más restrictivo y pudiendo aumentarse en los demás cumpliendo las condiciones de homogeneidad.

La experiencia de los últimos estudios informativos supervisados es que no se hace así, y se mantienen velocidades de proyecto superiores a la establecida en la orden de estudio incluso en terreno accidentado, sin estudios de rentabilidad que lo justifiquen.

La velocidad de planeamiento es la mejor representa a la real a la que puede circular un vehículo por una carretera y debería ser, en mi opinión, la que se proporcionase a la opinión pública en la puesta en servicio de tramos de nuevas carreteras. No obstante, no puede ser fijada en la orden de estudio, siendo necesario su cálculo una vez realizado el trazado con la velocidad de proyecto.

Se han calculado en algún estudio informativo de autovía las velocidades de planeamiento, comprobándose que sus intervalos superaban los 30 Km/h para una velocidad de proyecto de 120 Km/h, lo que debería dar lugar a mejorar los radios de algunas curvas acortando las rectas entre ellas. Además, la velocidad de planeamiento supera en más de 30 Km/h la de proyecto, lo que indica que la velocidad a la que se puede circular sin restricción de capacidad es mayor de 150 Km/h.