

Aspectos relacionados con el factor humano en el diseño de carreteras

Por el Comité Técnico de Seguridad Vial de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC).

Redactado por: **José M^a Pardillo Mayora** (Universidad Politécnica de Madrid), **Francisco Morales Ortega** (Ferrovial S.A.),

José de Oña Ortega (Ineco-Tífsa), **Pablo Pérez del Villar Cruz** (Dirección General de Carreteras, M^o de Fomento),

Francisco Javier Saura López (Aepo S.A.).

Prólogo: **Roberto Llamas Rubio**, (Dirección General de Carreteras, M^o de Fomento y Presidente del Comité).



Resumen

Para conseguir que las carreteras alcancen unos niveles de seguridad elevados resulta necesario adaptar su diseño a las limitaciones humanas, en cuanto al desarrollo del proceso de conducción de los vehículos. En este artículo se presentan los resultados obtenidos por el grupo de trabajo sobre incorporación del factor humano en el diseño de carreteras del Comité de Seguridad Vial de la ATC, que ha sintetizado la experiencia nacional e internacional sobre incorporación del factor humano

en el diseño de carreteras. Los temas tratados incluyen el análisis del proceso de percepción de la información y de la velocidad durante la conducción, la consideración de la carga mental y de las expectativas del conductor y su influencia en la atención y en los tiempos de percepción y reacción, los mecanismos de percepción del riesgo y los condicionantes de los conductores de edad avanzada.

Palabras clave: Diseño de carreteras, seguridad vial, factor humano, percepción, carga mental, expectativas, atención, riesgo, edad avanzada.

Prólogo

Cada vez ha ido adquiriendo mayor relevancia la consideración de las facultades y capacidades físicas y psíquicas del conductor (habitualmente englobadas en la denominación genérica del “factor humano”) a la hora de diseñar y proyectar las carreteras o sus equipamientos.

No se debe olvidar que el factor humano es el responsable último en la ocurrencia de los accidentes de circulación, estando admitido en el campo científico e investigador de los siniestros viales que en más del 90%

de los casos figura algún aspecto del conductor como factor concurrente principal en los accidentes (errores humanos, distracciones, conducción inadecuada a las condiciones meteorológicas o de la vía,...).

Por ello, en los últimos años se han llevado a cabo notables esfuerzos en la investigación del comportamiento de los conductores y su interrelación con las características o configuración de las vías, para poder extraer criterios de diseño de las carreteras o de determinados elementos de las mismas, con objeto de facilitar la conducción y la percepción de las situaciones de riesgo de accidente y de esta forma reducir las posibilidades de tener lugar siniestros viales.

Esta inquietud motivó al Comité Técnico de Seguridad Vial de la Asociación Técnica de la Carretera (ATC) a llevar a cabo un estudio y análisis de ciertos temas relacionados con el factor humano y reflexionar sobre aquellos aspectos fundamentales que deberían tenerse en cuenta a la hora de proyectar las carreteras. Así se creó un grupo de trabajo "ad hoc" dentro del seno de dicho comité, cuyos objetivos se materializaron en cinco líneas claves de actuación: el "proceso de conducción: modelos de comportamiento del conductor y de otros usuarios de la carretera. Procedimientos de medida"; la "visión en el proceso de conducción"; los "factores determinantes de la elección de la velocidad de circulación" y los "condicionantes particulares de los conductores de edad avanzada".

Dentro de la labor realizada por este grupo de trabajo se enmarca el presente artículo donde se ha sintetizado el estado del arte sobre este tema y se exponen algunas de las consecuencias prácticas analizadas y que deberían estar presentes a la hora de incorporar el comportamiento humano al diseño de las carreteras.

Por último y como Presidente del citado Comité, quisiera expresar mi agradecimiento a todos los miembros que de alguna manera han participado y contribuido al trabajo desarrollado por el grupo anteriormente ci-

tado, y en especial a los autores de este artículo por su esfuerzo y dedicación.

Roberto Llamas Rubio, Presidente del Comité Técnico de Seguridad Vial de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC).

Introducción

La adaptación del diseño de las carreteras y de los vehículos para facilitar su utilización por los usuarios y reducir en la medida de lo posible los errores humanos en el proceso de conducción constituye un elemento clave para conseguir mejorar la seguridad de la circulación. Surge por ello la necesidad de investigar la influencia de la configuración de las carreteras en el comportamiento y las prestaciones de los conductores y del resto de los usuarios de las vías, y deducir de ello criterios de diseño que sirvan de referencia en el desarrollo de los proyectos de carreteras. Resulta particularmente importante que el diseño de la carretera responda en la mayor medida posible al objetivo de simplificar la tarea de conducir y de facilitar la percepción de las situaciones de riesgo por los conductores.

Esta necesidad ha tenido ya reflejo en iniciativas de investigación y desarrollo de técnicas de diseño de carreteras en los países más avanzados. Así, en Estados Unidos la Administración Federal de Carreteras publicó en 2001 un Manual de Diseño de Carreteras para Conductores de Edad Avanzada y Peatones (Staplin y otros, 2001) y viene trabajando desde 2001 junto con el TRB y la AASHTO en la elaboración de las Recomendaciones relativas al Factor Humano en el Diseño de Carreteras, de las que se ya se han publicado una primera parte (Campbell y otros, 2008).

En Europa, el tema ha sido abordado en el proyecto de investigación Ripcord ISEREST del VI Programa Marco de la Unión Europea, en el que se elaboró un informe sobre el factor humano en el diseño de carreteras (Weller y otros, 2006).

Por su parte, el Comité Interna-

cional de Seguridad Vial de la AIPCR constituyó en 2003 un grupo de trabajo con el objetivo de estudiar la relación entre el factor humano, el diseño de las carreteras y la seguridad vial, que ya presentó unos primeros resultados en el Congreso Mundial de París.

En el seno del Comité de Seguridad Vial de la Asociación Técnica de Carreteras se ha constituido un grupo de trabajo con el objeto de analizar los antecedentes internacionales sobre la materia y obtener consecuencias sobre su aplicación al diseño de carreteras en España. En el presente artículo se exponen los resultados de la primera fase del plan de trabajo del grupo, en la que se han sintetizado los antecedentes internacionales y se han estudiado los aspectos a considerar en la incorporación del factor humano al diseño de carreteras.

El proceso de conducción

El proceso de conducción comprende muchas tareas, algunas de las cuales se deben realizar de forma simultánea. Estas tareas atienden a tres funciones principales (Lunefeld y Alexander, 1990):

- Control: Mantener el vehículo en la trayectoria deseada a la velocidad elegida.
- Guía: Realizar las maniobras necesarias para interactuar con otros usuarios de la vía (seguimiento de otros vehículos, adelantamiento, frenado, cesión del paso a peatones, etc.).
- Orientación: Seguir la ruta adecuada para desplazarse desde el origen al destino del viaje.

Cada una de las funciones exige percibir e interpretar fuentes de información diferentes, adoptar decisiones y actuar en consecuencia. La conducción se basa por ello en un proceso continuo de recepción de información por diversos canales (vista, oído, tacto,...), que debe ser procesada para tomar decisiones y actuar realizando las maniobras ade-



Figura 1.
El proceso de conducción comprende tres funciones principales: control, guía y navegación.

cuadas. La adquisición de datos está limitada por las capacidades propias de cada persona, que pueden ser variables en función de múltiples factores. La clave para que la conducción se desarrolle con seguridad consiste en que el proceso de obtención, comprensión y análisis de la información se realice sin errores. Los estudios realizados sobre las situaciones típicas en que se producen los errores humanos que originan accidentes de circulación muestran que éstos están asociados en una proporción mucho mayor al análisis de la situación y la adopción de decisiones que a la actuación sobre los mandos del vehículo.

El hecho de que algunos conductores sufran accidentes en las mismas situaciones en las que muchos otros han podido pasar sin ningún daño, ha llevado a investigar cuáles son las variables que pueden influir sobre el comportamiento humano durante la conducción, con el fin de estudiar si es posible disminuir la frecuencia de estos accidentes. Estas variables pueden clasificarse en tres grupos:

- La capacidad física para la conducción (aptitud).
- Los conocimientos precisos (formación y experiencia).

- Las condiciones psíquicas del conductor (actitud).

Por otra parte, las alteraciones psíquicas o somáticas de muy diversa naturaleza modifican la conducta de los conductores de forma que no siempre responden de la misma forma. Los factores que influyen en la actitud de los conductores se pueden clasificar en las siguientes categorías (Pline, 1999):

- Motivación: la motivación básica para conducir es el deseo de desplazarse entre dos puntos. Sin embargo, pueden existir otros factores como la competitividad o la autoafirmación.
- Emociones: las emociones afectan todos los aspectos del comportamiento humano. Se estima que entre un 10% y un 35% de los conductores que sufren accidentes se encuentran bajo algún tipo de tensión emocional que limitaba su capacidad en el momento del accidente.
- Personalidad: las personas agresivas, ansiosas, inmaduras o indisciplinadas presentan habitualmente comportamientos como usuarios de las carreteras que suponen un mayor riesgo que el resto.
- Estado de salud.
- Factores sociales: las expectativas en cuanto al comportamiento de

los otros usuarios de la vía, la imitación de su comportamiento, la influencia de la presencia de otros en el comportamiento individual, los prejuicios respecto a determinados grupos de personas, la reacción ante las acciones del resto y la influencia de las normas sociales son los principales factores sociales que influyen en el comportamiento de los usuarios de las carreteras.

Todo ello induce una gran variabilidad en el comportamiento de los conductores, por lo que resulta complicado caracterizarlo a través de parámetros fijos de referencia para el diseño de los componentes técnicos.

Percepción de la información durante la conducción

La recepción de la información necesaria para desarrollar el proceso de conducción se produce a través de los sentidos. Aunque la mayor parte de los estímulos son visuales, otros sentidos también tienen importancia:

- La sensibilidad muscular permite apreciar las reacciones de los mandos del vehículo, y con ello estimar cómo están funcionando.
- El oído permite recibir información de otros conductores mediante



Figura 2. El campo visual del ojo humano abarca aproximadamente el 55° por encima de la horizontal, el 70° por debajo de la horizontal y el 90° a la izquierda y a la derecha.

las señales acústicas y también detectar cambios en el funcionamiento de ciertas partes del vehículo (así como el olfato en algunas ocasiones).

- La sensibilidad al movimiento es determinante en el comportamiento de los conductores. Durante la conducción aparecen aceleraciones en los cambios de velocidad y dirección. Si las aceleraciones sobrepasan ciertos mínimos resultan claramente perceptibles y, a partir de ciertos niveles, originan una sensación de malestar. El conductor tiende a realizar las maniobras de forma que las sensaciones que percibe estén dentro de límites admisibles. En la conducción normal los conductores suelen utilizar deceleraciones entre 1 y 2 m/s² y sólo ocasionalmente mayores de 3 m/s², siendo rara vez superiores a 4 m/s² (Kraemer y otros, 2003).

En todo caso, la mayor parte de la información que utilizan los conductores es visual. El campo visual del ojo humano es amplio. Aproximadamente abarca 55° por encima de la horizontal, 70° por debajo de la horizontal y 90° a la izquierda y a la derecha. Sin embargo, sólo una pequeña zona del campo visual permi-

te una visión nítida. Esta área incluye un cono de dos a cuatro grados de amplitud respecto del eje focal.

La resolución del campo visual fuera de la zona de la visión nítida se conoce como la visión periférica. Aunque en ella se reduce la agudeza, la visión periférica permite detectar objetos. Una vez detectados, los ojos cambian su enfoque para incluir el objeto detectado en el campo de visión nítida. En general, los objetos que se detectan con mayor facilidad mediante la visión periférica son los que están más cerca del punto focal, los que se diferencian de su entorno por el brillo, el color y la textura, los de mayor tamaño o los que se mueven. La detección de objetos mediante la visión periférica depende también de la demanda a que esté sometido el conductor. Cuanto más exigente es la tarea, más se reduce el denominado cono visual consciente o el campo de visión útil, reduciéndose las probabilidades de que el conductor perciba los objetos situados en el campo periférico.

Está demostrado que las condiciones de visibilidad afectan notablemente a la estimación de la distancia

y velocidad. Una correcta iluminación y claridad son condiciones fundamentales en este aspecto.

Hay que destacar que ante problemas de visibilidad, como la presencia de niebla, se tiende a percibir que la distancia de separación es mayor, lo que implica una subestimación de la velocidad. Este mismo efecto se produce en entornos insuficientemente iluminados. Por lo tanto, es muy recomendable disponer elementos que mejoren la visibilidad sobre todo en aquellos tramos donde la velocidad de circulación deba ser muy inferior a la de tramos precedentes; por ejemplo, en las travesías.

Percepción de la velocidad

La velocidad es uno de los aspectos cruciales en materia de seguridad vial, ya que no sólo afecta a las consecuencias de las colisiones, sino que está relacionada con el riesgo de sufrir un accidente (Aarts y Van Schagen, 2005). Al aumentar la velocidad, se reduce el tiempo para percibir cambios del entorno, aumenta la distancia de parada y se limita la maniobrabilidad. Además, si se produce una colisión, sus consecuencias están directamente relacionadas con la energía cinética del vehículo, que depende linealmente de la masa y cuadráticamente de la velocidad. Por otra parte, se ha demostrado que, aparte de la velocidad en términos absolutos, es tan importante o más la dispersión de velocidades dentro del flujo de tráfico (Hauer, 2009).

La mayor parte de la información que utilizan los conductores para percibir la velocidad se encuentra en las márgenes de la carretera. Hay que tener en cuenta que el tronco de una carretera no presenta apenas variaciones mientras que, exteriormente a los carriles de circulación pueden existir numerosos elementos cuya disposición cambia a lo largo de cualquier itinerario. A este respecto, está demostrado que cuanto más amplio es el campo de visión periférica menor es la percepción de velo-

cidad (Cavallo y Cohen, 2001). Del mismo modo, cuanto más variación de texturas exista en este campo, la sensación de velocidad resulta mayor. En este sentido, se ha demostrado que la percepción de la velocidad se mejora notablemente cuando se disminuye el campo de visión a base de reducir la visión periférica. Esto sucede, por ejemplo, en los túneles. Por tanto, para que el conductor aumente su percepción de velocidad se puede reducir el campo de visión lateral y resaltar la textura de los elementos más próximos. Por el contrario, sucede que arcones, bermas y cunetas amplias inducen a una mayor velocidad de circulación.

Por otra parte, existe una estrecha relación entre el punto donde se fija la vista durante la conducción y la velocidad a la que se circula. A mayor velocidad, menor proximidad de este punto y viceversa. Ante espacios amplios y expeditos, los conductores tienden a aumentar de forma instintiva la velocidad, mientras que la disminuyen si a lo largo de su recorrido la distancia de visibilidad objetiva disminuye. A este respecto, se puede recurrir a evitar en la medida de lo posible la existencia de alineaciones rectas de gran longitud en tramos donde la velocidad de circulación deba estar limitada por motivos distintos al trazado.

Aparte de las visuales, otras sensaciones también pueden ser determinantes en la percepción de velocidad. Concretamente el sonido y la captación de aceleraciones contribuyen notablemente a esta percepción. Instintivamente, la ausencia de sonido va asociada a un estado de calma que, particularizado a la carretera, se traduce en una menor percepción de la velocidad. Por otro lado, a velocidad constante y sin estímulos externos tampoco es posible percibir el estado de movimiento, cosa que no sucede si se experimentan variaciones en esta velocidad, es decir, aceleraciones. A este respecto, con pavimentos poco sonoros y buena regularidad superficial la percepción de la velocidad es menor que



Figura 3. Al aumentar la velocidad, se reduce el tiempo para percibir cambios del entorno, aumenta la distancia de parada y se limita la maniobrabilidad.

en los que sucede lo contrario. Por este motivo, a igualdad del resto de condiciones, en los primeros la velocidad de circulación suele ser mayor que en los segundos. Se ha comprobado que una buena medida puntual para transmitir sensación de velocidad a los conductores sin merma de la comodidad y seguridad consiste en la utilización de pavimentos con capas superficiales de alta fricción ya que, aparte de aumentar la resistencia al deslizamiento, producen un mayor ruido lo que puede inducir a los conductores a reducir la velocidad. La realización de microfresados transversales también produce ruido a la vez que aceleraciones verticales, por lo que también aumenta la percepción de la velocidad. Este mismo efecto lo producen las juntas transversales de los pavimentos de hormigón.

En todo caso, los vehículos disponen de velocímetros que aportan una información objetiva de la velocidad, por lo que en muchos casos los usuarios no precisan tanto conocer la velocidad a la que circulan de forma objetiva como tener información de la que sería adecuada para las condiciones de contorno. Esta información puede transmitirse explícitamente a través de la señalización, y ésta puede reforzarse con medidas

coercitivas de vigilancia policial. Numerosos estudios señalan que, en puntos donde la velocidad inadecuada es el factor desencadenante mayoritario de los accidentes, la simple colocación de señales de limitación de velocidad trae consigo una reducción significativa de los mismos (Elvik y Vaa, 2004). Complementariamente, está constatado que en tramos con alta siniestralidad también por problemas de adaptación de la velocidad a las condiciones del entorno, la disposición de controles fijos de velocidad mediante radares consigue reducciones de la accidentalidad entre el 50% y el 85% y también muy significativas en su gravedad (Lipphard, 2005). Algunos estudios demuestran que, aunque la moderación de la velocidad de los conductores ante este tipo de medidas coercitivas tiene una repercusión puntual, la distribución frecuente de controles fijos a lo largo de un corredor tiene efectos más allá de los tramos puntuales donde se colocan (Chen, Meckle y Wilson, 2002).

La estimación de la velocidad está íntimamente relacionada con la percepción de la distancia al ser la velocidad la variación de la distancia en el tiempo. Aunque los conductores tienden a sobreestimar la distancia, estos fallos sólo son notables cuan-

do existe algún elemento externo que distorsiona la percepción de la profundidad. Por ejemplo, Cavallo y otros demostraron que ante la presencia de niebla, los conductores sobreestimaban como media un 60% la distancia de los vehículos que les precedían. Del mismo modo, también minusvaloraban la distancia de separación con los vehículos que circulan en sentido contrario. Desafortunadamente, dado que ante esta situación se siguen subestimando las velocidades de los vehículos que circulan a altas velocidades, pueden darse al mismo tiempo estas dos circunstancias que, conjugadas pueden ser críticas para la seguridad vial, sobre todo en los cruces.

En el proceso de conducción surgen numerosas situaciones en las que los conductores tienen que estimar el movimiento de otros vehículos (maniobras de adelantamiento, de incorporación a una corriente de flujo prioritaria, de cruce de una vía prioritaria, etc.). La percepción de la profundidad se puede definir como la capacidad de juzgar la distancia a la que está un objeto y los cambios en esa distancia. La principal referencia que utilizan los conductores para determinar la velocidad de aproximación a otro vehículo es la tasa de variación del tamaño de la imagen. Los conductores tienen dificultades para detectar cambios en la velocidad del vehículo a larga distancia debido a la reducida tasa de variación del tamaño del vehículo que se perciben.

Las limitaciones de percepción de la velocidad de aproximación a otros vehículos que viajan en el mismo sentido también pueden originar riesgo de colisiones por alcance cuando los conductores que viajan a las velocidades de flujo libre en autopistas deben detenerse o frenar para reducir sensiblemente su velocidad y calculan mal la distancia de frenado disponible. Este problema de seguridad se agrava cuando los conductores no se esperan esta situación, por lo que si es recurrente se puede considerar la instalación de elementos de seña-

lización dinámica de advertencia de peligro.

Carga mental

La conducción de un vehículo exige que el conductor realice múltiples tareas simultáneas y divida su atención y sus recursos cognitivos entre ellas. En ocasiones se añaden además otras actividades no relacionadas con la conducción, como mantener una conversación con otros ocupantes del vehículo o por teléfono, manipular los equipos de sonido del vehículo, etc. Se puede definir la carga mental como la cantidad de esfuerzo mental deliberado que se debe realizar para conseguir un resultado concreto; este proceso exige un estado de atención (capacidad de estar alerta) y de concentración (capacidad de permanecer pendiente de una actividad o un conjunto de ellas durante un período de tiempo). Se admite que la calidad de la conducción depende de la carga de trabajo mental que soporta el conductor. Una carga de trabajo excesivamente baja provoca una baja calidad de la conducción al propiciar la falta de atención y las distracciones. Una carga de trabajo alta provoca una baja calidad de la conducción al dificultar la adopción de decisiones acertadas. Una carga media favorece una conducción de mayor calidad en la que se reducen los errores.

Durante la conducción, los conductores determinan inconscientemente la carga de información a la que pueden atender. Cuando la información que reciben excede su límite, seleccionan inconscientemente la información a la que atribuyen más importancia. La atención selectiva es la capacidad para dirigir y concentrar la atención en la información relevante. De particular importancia es que el conductor sea capaz de retirar su atención de la información irrelevante, y seleccionar rápidamente y atender a la información que es importante para evitar accidentes y tener una conducción segura. Al igual que con la toma de decisiones de

cualquier tipo, durante este proceso se pueden producir errores y en algunos casos no se presta atención a determinadas circunstancias que pueden resultar críticas para la seguridad, al haberse centrado la atención en otras menos importantes.

La capacidad de procesar información de un ser humano tiene limitaciones y, en ocasiones, el conductor puede sufrir una sobrecarga de su capacidad de asimilar la información necesaria para realizar múltiples tareas simultáneamente; lo que desencadena que cometan errores. Así, por ejemplo, no es infrecuente que se cometan errores de juicio acerca de la velocidad de aproximación, el intervalo entre vehículos necesario para realizar una incorporación a un flujo prioritario, o las velocidades adecuadas de entrada en una curva o de aproximación a una intersección. Las distracciones, la falta de atención del conductor o el cansancio del conductor hacen que éstos u otros errores se cometan con mayor frecuencia. En la mayor parte de las ocasiones estos errores no originan accidentes, bien porque unos conductores compensan los errores de otros bien porque la carretera y las condiciones de circulación proporcionan un margen suficiente de tolerancia a los fallos. De esta forma los conflictos o incidentes sin daños son mucho más frecuentes que los accidentes; pero en todo caso estos llegan a producirse y son más probables en los tramos en los que se producen fallos de los conductores con mayor frecuencia. Resulta por tanto necesario limitar en la medida de lo posible a través del diseño de los componentes técnicos las situaciones en las que se pueda comprobar que los fallos o errores humanos resultan más probables. Para ello resulta importante analizar la carga de trabajo mental que la disposición de la carretera puede inducir en las situaciones previsibles de circulación por ella, para en la medida de lo posible adaptar el diseño para limitarla en aquellos tramos en los que pudiera llegar a ser crítica.



Figura 4 (izquierda).
La carga mental aumenta cuando la complejidad del trazado y de los elementos de la carretera es grande.



Figura 5 (derecha).
Una carga de trabajo excesivamente baja puede propiciar la falta de atención y las distracciones.

La carga mental aumenta si la complejidad del trazado y de los elementos de la carretera es grande. También aumenta si disminuye el tiempo del que se dispone para procesar la información debido a la velocidad de circulación o a una visibilidad reducida. De la misma forma, si hay presentes muchos estímulos no relacionados con la circulación, el conductor podrá dejar de prestar atención a algunos relacionados con ella.

Existen algunos procedimientos para evaluar la carga mental del conductor, como los test de oclusión de la visión, que en su mayor parte son aplicables sólo en condiciones experimentales a través del empleo de simuladores de conducción.

En Estados Unidos se desarrolló un procedimiento para estimar la carga mental asociada a la circulación por un tramo de la carretera (Messer y otros, 1981). El procedimiento se basa en la asignación de un índice de carga de trabajo potencial a cada elemento de la carretera. Los valores del índice en una escala de 0 a 6 fueron fijados a partir de unas valoraciones subjetivas de un grupo de expertos,

en las que el valor 0 corresponde a elementos que no plantean ningún problema y el valor 6 a los que suponen un grave problema para el conductor. El valor de este índice se modifica en cada caso particular mediante la aplicación de unos factores de corrección que dependen de la visibilidad del elemento, el grado de familiaridad de los conductores con él, lo previsible que resulte dentro de itinerario en que se encuentra y la carga mental originada por los elementos de la carretera contiguos.

Expectativas del conductor

Los conductores emplean los conocimientos adquiridos a priori, basados en patrones aprendidos de la respuesta, para reducir la carga de información que deben procesar. En la imagen anticipada que el conductor tiene de la carretera influye por una parte, la experiencia inmediata de lo que ha encontrado en los tramos que acaba de recorrer y, por otra, la experiencia acumulada en viajes anteriores, respecto de lo que es habitual encontrar en itinerarios de

características parecidas a aquél por el que circula. Esto crea unas expectativas inconscientes del conductor con respecto a lo que va a encontrar. Las investigaciones realizadas en distintos países sobre el efecto del trazado en la seguridad de la circulación coinciden en señalar la importancia de respetar las expectativas del conductor. Cuando se encuentra con una situación inesperada, debe adoptar una decisión y actuar con rapidez, con lo que aumenta el riesgo de que cometa un fallo. En determinados casos estos fallos provocan la pérdida del control del vehículo, y en consecuencia un posible accidente. Por tanto, el proyecto debe tener como objetivo genérico el respetar las expectativas del conductor. Resulta por ello muy importante que en el proyecto de un tramo de carretera se tengan en cuenta las características de los tramos con los que estará conectado el que se proyecta, y que se prevean las medidas necesarias para conseguir que la transición entre ellos se produzca sin una ruptura brusca de la continuidad de características, es decir: sin que se puedan dar situa-

ciones en las que se vulneren las expectativas del conductor.

Para ello será necesario analizar las características del trazado (velocidades específicas de las alineaciones precedentes y posteriores al tramo que se proyecta), los criterios de señalización (en particular en lo que se refiere a la continuidad de la señalización de orientación) y de balizamiento, la tipología de los nudos y cualquier otra característica de la carretera que pueda ser determinante en las pautas de conducción en el tra-

ados desde hace años en países como Estados Unidos, Suiza y Alemania (Krammes y otros, 1994).

En España, la Norma de Trazado 3.1. IC del Ministerio de Fomento tiene en cuenta implícitamente este aspecto a través de la velocidad de planeamiento, que se define como la media armónica de las velocidades específicas de los elementos de trazado en planta de tramos homogéneos de longitud superior a dos km. La Norma prescribe que al proyectarse el trazado se compare la velo-

de señalización vertical y horizontal, y de balizamiento.

Atención

Además de las limitaciones de procesamiento de información, la atención de los conductores no está totalmente dentro de su control consciente. A este respecto, se pueden distinguir dos conceptos distintos: la distracción y la desatención. La distracción se produce cuando se desvían ciertas capacidades necesarias para una conducción segura hacia algún estímulo externo; por ejemplo para manipular un navegador. La falta de atención está relacionada en muchos casos con el hecho de que la conducción es una tarea altamente automatizada para los conductores con algún grado de experiencia, por lo que puede llevarse a cabo mientras el conductor piensa en otras cuestiones. La mayoría de los conductores han experimentado alguna vez la sensación de que no han estado prestando atención durante los últimos kilómetros de la conducción, especialmente en cuando circulan por una ruta que les es familiar.

En todo caso, tanto las distracciones como la falta de atención pueden ocasionar la falta de percepción de elementos de información críticos para la seguridad, como la presencia de una señal de *stop*, la presencia de un semáforo en rojo o la presencia de un vehículo o un peatón en la trayectoria de paso por una intersección, con el consiguiente incremento del riesgo de que se produzcan accidentes.

En lo que se refiere a la falta de atención, existen muchos factores que pueden influir en el nivel de la vigilancia de una persona. Entre ellos se pueden citar los siguientes:

- Relacionados con las condiciones de la persona: edad, estado de fatiga, privación del sueño, ingestión de alcohol, etc.
- Relacionados con la situación: momento del día o de la noche, duración de la conducción, monotonía de la tarea, experiencia anterior de



Figura 6. Tanto las distracciones como la falta de atención pueden ocasionar la falta de percepción de elementos de información críticos para la seguridad.

mo objeto del proyecto, para establecer las medidas necesarias para que exista una transición gradual y fácilmente reconocible por los usuarios.

En lo que se refiere a las características del trazado, internacionalmente se vienen aplicando distintos métodos para evaluar lo que se denomina consistencia del trazado, es decir: la relación entre las características geométricas de una carretera y las que espera encontrar el conductor de un vehículo que circula por ella. Los métodos de evaluación de la consistencia basados en la estimación del percentil 85 de la distribución de velocidades (V_{85}) a lo largo de la carretera vienen siendo emple-

ados desde hace años en países como Estados Unidos, Suiza y Alemania (Krammes y otros, 1994).

Las variaciones de las características de la sección transversal tienen también una influencia significativa en la seguridad. Los aspectos más importantes son la anchura de carriles, la anchura y el tratamiento de los arcenes y, en carreteras con dos calzadas separadas, la anchura y el tratamiento de la mediana. Los cambios en cualquiera de ellos deben ser graduales y estar adecuadamente marcados mediante elementos adecuados



Figura 7. El tiempo de percepción-reacción aumenta en situaciones inesperadas.

conducción, condiciones climáticas, etc.

- Relacionados con los factores ambientales inmediatos: ruido, vibraciones, luminosidad, comodidad de la conducción, etc.

Por otra parte, la ausencia de variaciones visuales debido a la niebla o a la oscuridad o a tramos de aproximación muy largos y monótonos da lugar a una disminución de la carga de trabajo y de la atención. La monotonía del entorno de la carretera provoca una disminución de la atención que el usuario tiende a compensar con un aumento de la velocidad [AIPCR, 2003].

En consecuencia, en los proyectos de carreteras deberían evitarse las situaciones en las que el conductor vaya a experimentar una carga de trabajo que resulte insuficiente, pues puede dar lugar a faltas de atención prolongadas, o excesiva, y provocar distracciones.

Tiempos de percepción y reacción

El tiempo de percepción-reacción (TPR) incluye el tiempo necesario para detectar un objeto, asimilar la información, decidir la respuesta, e iniciar una reacción. Aunque los valores de 2s a 2,5s son de uso común como referencia en la normativa inter-

nacional de diseño de carreteras, ya que cubren a una gran proporción de los conductores en la mayoría de situaciones, es importante señalar que el TPR no es fijo sino que depende de los factores humanos comentados en apartados anteriores, incluyendo la visión, la carga de trabajo mental, el estado de alerta del conductor y las expectativas del conductor.

Se han realizado numerosas investigaciones y estudios en los que se ha intentado evaluar el TPR, e identificar los aspectos o parámetros que pueden influir en él. Entre estos estudios se pueden destacar los realizados por Johansson y Rumar (1971) en Suecia, que fueron tomados como referencia por la AASHTO para adoptar el valor de 2,5s reflejado en la Norma de proyecto de carreteras de los Estados Unidos (*A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*). Johansson y Rumar realizaron sus ensayos con conductores en sus propios vehículos recibiendo una señal acústica de alerta para frenar obteniendo valores entre 0,30 y 2,0 segundos. Numerosas investigaciones realizadas en distintos países han obtenido valores medios de tiempos de percepción y reacción que confirman el rango de valores hallados por Johanson y Rumar.

En 2003, Muttart desarrolló un exhaustivo análisis estadístico para ob-

tener diversas expresiones que permiten estimar el tiempo de reacción en función de un gran grupo de parámetros. Es de destacar de su estudio que obtiene un tiempo promedio de reacción del conductor de 1 segundo para un objeto estático en condiciones diurnas, que se incrementa a 3 segundos en condiciones nocturnas. Señala además como el tiempo de percepción-reacción se incrementa a muy altas velocidades por la gran cantidad de estímulos que recibe el conductor.

En todo caso el diseño de los elementos críticos de la carretera desde el punto de vista de la seguridad debería referirse al análisis de los rangos de tiempos que necesitan los diferentes usuarios que transitan por ella en función de la complejidad de las situaciones que puedan encontrarse, teniendo en cuenta la configuración de la carretera y los flujos de tráfico esperados.

Percepción del riesgo

Se puede definir el riesgo asociado a una actividad humana como el grado de exposición de la persona que realiza una actividad a sufrir un daño o unas potenciales pérdidas. La forma en que el usuario percibe los estímulos y los interpreta le lleva a establecer una valoración del riesgo que es subjetiva. Este riesgo subjetivo o riesgo percibido por el usuario de la carretera, es un importante factor determinante del comportamiento del conductor. Está relacionado con el riesgo objetivo o riesgo real de que un determinado usuario sufra un accidente en un lugar determinado de la red y en unas circunstancias determinadas, en el sentido de que los usuarios basan sus percepciones en las características físicas del entorno, y aprenden a través de la experiencia y del sentido común qué situaciones o emplazamientos son objetivamente peligrosos. Las percepciones, sin embargo, no siempre se corresponden fielmente con la realidad, y a menudo la falta de percepción del nivel real de riesgo ori-

gina un accidente (Wright y otros, 1989).

Tradicionalmente se ha considerado que los accidentes que suceden en un determinado tramo de carretera son independientes de las características del resto de la red. Este modelo ha sido cuestionado por algunos psicólogos, que consideran que el conductor adapta su conducta a los cambios que suceden en el entorno. Cuando percibe un cambio en el nivel de riesgo en un determinado punto del viaje, el conductor cambia su conducta, tratando de compensar esta variación del riesgo. Cuando éste aumenta, el conductor se siente amenazado y compensa disminuyendo la velocidad y actuando con mayor cautela, lo que influye en el funcionamiento desde el punto de vista de la seguridad de los tramos posteriores.

Cada tramo de carretera presenta un cierto riesgo objetivo que puede variar en función del individuo y de sus condiciones particulares en el momento de circular por él. Con el mismo nivel de atención, habilidad y esfuerzo aplicados en emplazamientos con riesgos objetivos distintos, se producirían distintas frecuencias de accidentes, que serían proporcionales al riesgo objetivo. Así, por ejemplo, una curva cerrada es intrínsecamente más peligrosa que un tramo recto, ya que la conducción en ella entraña mayor dificultad. Sin embargo, el riesgo asociado a un determinado elemento de la vía puede ser evaluado de forma distinta por conductores distintos, o incluso por el mismo conductor en distintos momentos. Por otra parte, el riesgo percibido puede ser sustancialmente distinto del objetivo para cualquier interacción usuario/ emplazamiento, de forma que los accidentes suceden con más frecuencia cuando el riesgo percibido subestima el riesgo real, debido a que los conductores no toman las decisiones adecuadas. En cambio, cuando el riesgo percibido es una estimación correcta o una sobrestimación del riesgo objetivo, los accidentes son escasos.

Por otra parte, de acuerdo con la

teoría del comportamiento, las personas adaptan sus conductas para que su riesgo subjetivo se mantenga en un cierto nivel que maximiza el beneficio global esperado de una actividad. A este nivel de riesgo se le puede denominar riesgo tolerado o fijado por la persona. Existe una teoría que sostiene que la compensación de riesgos es homeostática (del griego homeo: concordante o similar, y stasis: condición o estado de las cosas), de forma que los conductores tienen un nivel de riesgo prefijado por unidad de tiempo pasado en la carretera, y adaptan su comportamiento en función de los cambios en el riesgo que perciben para alcanzar el nivel fijado. De esta manera, si el nivel de riesgo subjetivamente experimentado es menor que el aceptable, la gente tiende a embarcarse en acciones que incrementan su exposición al riesgo. Sin embargo, si el nivel de riesgo subjetivamente experimentado es mayor que el aceptable, se toman mayores precauciones [Wilde, 1994].

Aunque es muy posible que la compensación de riesgo exista hasta cierto punto, no está demostrado que sea homeostática. Por tanto las medidas de prevención deberían diseñarse de tal manera que, manteniendo la seguridad objetiva, tuvieran en cuenta al mismo tiempo el aspecto subjetivo y disuadieran al participante en el tráfico de anular la ganancia de seguridad con un riesgo adicional.

Se puede concluir que el nivel de seguridad de la circulación disminuye si el riesgo objetivo es superior al percibido. Desde el punto de vista de la seguridad vial es fundamental que sea tal, que los usuarios perciban coherentemente el riesgo real inherente a la configuración de la carretera. Con respecto a la velocidad, debe tratarse de que su estimación por parte de los conductores nunca sea minusvalorada. En este sentido, existen numerosos aspectos relacionados con el equipamiento y diseño de la carretera que influyen sobre esta estimación. A este respecto las medidas de mejora de la seguridad pue-

den tener dos modalidades:

a) Aumentar el riesgo percibido a través de la señalización, o de otros medios que atraigan la atracción del usuario hacia factores de riesgo imperceptibles o de difícil percepción.

b) Disminuir el riesgo objetivo.

Condiciones de los conductores de edad avanzada

Muchos aspectos de la función sensorial cognoscitiva se deterioran en la madurez, lo que podría llevar asociada una disminución en la habilidad de conducir con seguridad. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la gran mayoría de los adultos de edad avanzada tienen miles de horas de experiencia en el desempeño de esta tarea. Las exigencias cognitivas de la conducción son menores cuanto mayor sea la experiencia del conductor, ya que ésta tiene como consecuencia que una parte importante de las tareas se pueda realizar de forma refleja. También se ha contrastado que los adultos mayores, a través de la experiencia, pueden desarrollar estrategias compensatorias que se traducen en un comportamiento experto que permanece intacto frente a la disminución en el componente de los procesos asociados a la conducción.

Las diferencias de los conductores de edad avanzada respecto al conductor medio se pueden agrupar en cuatro áreas (FHWA, 1997):

- Visión y atención visual
- Memoria y cognición
- Capacidades físicas
- Percepción de riesgos

Visión y atención visual

La agudeza visual disminuye con la madurez y la disminución en los adultos mayores se acentúa bajo condiciones de bajo contraste, baja iluminación y donde hay acumulación de estímulos visuales; y permanece relativamente constante a lo largo de la vida hasta aproximadamente los 50 años; y entonces disminuye progresivamente con el aumento de edad. La agudeza visual dinámica



Figura 8. La señalización puede utilizarse para aumentar el riesgo percibido.



también disminuye con la edad, existiendo indicios de que la disminución con la edad de la dinámica es mayor que la de la estática. Estudios realizados sobre la conducción y los ancianos han llegado a la conclusión de que la agudeza visual dinámica varía ampliamente de una persona a otra y está más fuertemente asociada con el riesgo de accidentes.

Aunque no hay acuerdo entre los investigadores sobre cómo afecta el envejecimiento a la sensibilidad al contraste, parece que en general, los adultos mayores tienden a tener menor sensibilidad al contraste. Esta pérdida es más pronunciada en los niveles más bajos de luz y puede redundar en una mayor sensibilidad al deslumbramiento.

En cualquier caso, todas las formas de la visión espacial se deterioran con la disminución de los niveles de iluminación. Se ha comprobado que la degradación visual resultante de reducir los niveles de iluminación tiene un mayor impacto en la tercera edad, y que los conductores mayores se encuentran en una situación de desventaja en la conducción nocturna. Sin embargo, no hay un mayor porcentaje de conductores de edad avanzada en los accidentes nocturnos, porque en bastantes casos los conductores mayores evitan conducir de noche, y cuando se ven obligados a hacerlo lo hacen con gran cautela.

Por otra parte, los efectos de la degradación de la percepción de la profundidad comienzan a notarse antes de los 40 años, aumentan de forma significativa a los 50 años, y si-

guen aumentando a partir de entonces. Se ha comprobado que los conductores mayores tienden a subestimar la velocidad de los vehículos que se aproximan en comparación con los conductores más jóvenes. Las personas de edad, al parecer, tienden a aceptar un hueco para cruzar de frente cuando un vehículo que se aproxima está a una distancia fija, independientemente de la velocidad del vehículo. Estas disminuciones en la percepción de la distancia y la velocidad pueden explicar en parte el mayor porcentaje de conductores de mayor edad en los accidentes producidos en los giros a la izquierda.

Memoria y cognición

Hay pocos estudios que relacionen directamente envejecimiento, función

cognitiva, y errores de conducción. La conducción es un comportamiento complejo que claramente tiene muchos aspectos cognitivos; sin embargo, es difícil una clara comprensión de cómo los cambios relacionados con la edad en la función cognitiva afectan al comportamiento del conductor.

Tiempo de reacción

Por el contrario, hay un acuerdo casi unánime entre los investigadores en cuanto a que el tiempo de reacción aumenta con la edad, aunque los cambios en el proceso mental parecen ser el principal contribuyente a la ralentización, en lugar de los componentes sensoriales o motores.

No se ha comprobado que haya diferencias respecto a la edad en los diferentes estudios realizados para obtener el tiempo de reacción en las operaciones de frenado, comprobándose que los 2,5 segundos utilizados en el Manual de la AASHTO proporcionan en general un margen suficiente, variando en función del tipo de carretera y del estado de fatiga del conductor más que de la edad de éste.

En los diversos estudios realizados se ha comprobado que los adultos mayores responden peor que los jóvenes a situaciones en las que hay que ejecutar dos tareas a la vez; y que el deterioro de calidad de la realización de la tarea principal originada por la adición de una segunda ta-

Hay un acuerdo casi unánime entre los investigadores en cuanto a que el tiempo de reacción aumenta con la edad

rea son desproporcionadamente grandes para los adultos mayores en comparación con los más jóvenes.

Capacidad física

Las capacidades físicas (funciones motoras) necesarias para la conducción son: fuerza, rango del movimiento de las extremidades, movilidad de tronco y cuello y propiocepción (sentido que informa al organismo de la posición de los músculos, y que influye en la coordinación de movimientos). Con la excepción de la propiocepción ha quedado establecida la disminución de las capacidades físicas en función de la edad y también en función de la salud en general. Sin embargo, muchos de los vehículos actuales tienen dirección asistida y sistemas antibloqueo de frenos, lo que quita importancia a la menor fuerza de los conductores mayores.

En todo caso, se ha comprobado que los ángulos de intersección de 75° o menos causan problemas a los conductores mayores, ya que esta situación requiere un amplio movimiento de la cabeza. Una gama limitada de movimientos puede reducir en un conductor de más edad la capacidad para manejar un automóvil, especialmente para la exploración eficaz directa e indirectamente a través de los espejos de la parte trasera y los laterales de su vehículo, para observar los puntos ciegos, así como puede obstaculizar el reconocimiento oportuno de conflictos durante el giro y las maniobras en las intersecciones.

Percepción de riesgos

Las investigaciones muestran que los conductores jóvenes en general tienden a subestimar el riesgo que entraña la conducción en determinadas situaciones, pues sobreestiman su propia capacidad de conducción de vehículos.

Las conclusiones de las investigaciones desarrolladas en este campo sugieren que esta menor percepción del riesgo por los conductores más jóvenes puede explicar gran parte de su mayor implicación en los accidentes de tráfico en comparación con otros grupos de edad.

También las diferencias de comportamiento de riesgo entre hombres y mujeres tienden a disminuir con la edad, mientras que entre los jóvenes es mayor en los hombres que en las mujeres.

Continuación de los trabajos

A partir de estos resultados, el grupo de trabajo continuará su labor a lo largo del presente año con el objetivo de concretar consideraciones aplicables al diseño de carreteras en España y proponer las líneas de desarrollo posterior de los correspondientes criterios de proyecto.

Referencias

(1) AIPCR (2003): Informe del Comité 13 Seguridad Vial. Actas de Congreso Mundial de Carreteras. Durban, Sudáfrica.

(2) Aarts, L. y Van Schagen, L. (2006): Driving speed and the risk of road crashes: A review. Accident Analysis and Prevention 38 pp. 215-224.

(3) Campbell, J.; Richard, C. y Graham, J.(2008): Human Factors Guidelines for Road Systems. Collection A. NCHRP Report 600 A. Transportation Research Board, Washington DC, Estados Unidos.

(4) Cavallo, V. y Cohen, A. (2001): Perception. In P.E. Barjonet (Ed.), Traffic psychology today, pp. 63-89. Kluwer Academic, Dordrecht, Países Bajos.

(5) Chen, G., Meckle, W., y Wilson, J. (2002). Speed and safety effect of photo radar enforcement on a highway corridor in British Columbia. Accident Analysis & Prevention, 34. (2), 129-138.

(6) Elvik, R., y Vaa, T. (2004): The handbook of road safety measures. Amsterdam: Elsevier.

(7) Federal Highway Administration.(1997): Synthesis of Human Factors Research on Older Drivers and Highway Safety. Volume I: Older Driver Research Synthesis. FHWARD-97-09. Washington DC, Estados Unidos.

(8) Hauer, E. (2009): Speed and Safety. TRB 2009 Annual Meeting. Washington D.C .Estados Unidos.

(9) Johansson, G. y Rumar, K. (1971): Drivers' Brake Reaction Time. Human. Factors, Vol. 13, No. 1, pp. 23-27.

(10) Kraemer C. et al. (2003): Ingeniería de Carreteras. McGraw Hill, Madrid.

(11) Krammes, R. et al. (1994): Horizontal Alignment Design Consistency for Rural TwoLane Highways. FHWA-RD-94-034. Federal Highway Administration, Washington DC.

(12) Lipphard, D. (2005): Starenkasten" in Deutschland. Zum Forschungsstand und Verbreitungsgrad von ortsfesten Überwachungsanlagen. Zeitschrift für Verkehrs-sicherheit, 51(4), 189-193.

(13) Lunefeld, H. y Alexander, G.(1990): A User s Guide to Positive Guidance. Federal Highway Administration. Washington DC.

(14) Messer, C. et al. (1981): Highway Geometric Design Consistency Related to Driver Expectancy RD-81/036, Federal Highway Administration, Washington D.C. Estados Unidos.

(15) Muttart (2003): Development and evaluation of driver perception-response equations based upon meta-analysis, (2003). Society of Automotive Engineers. Technical paper # 2003-01-0885. Warrendale, PA, Estados Unidos.

(16) Pline, J. ed. (1999): Traffic Engineering Handbook, 5th ed. ITE, Washington DC.

(17) Staplin, L., Lococo, K., Byington, S., y Harkey, D. (2001): Highway Design Handbook for Older Drivers and Pedestrians,. FHWA-RD-01-103. Federal Highway Administration, Washington DC, Estados Unidos.

(18) Weller, G. et al. (2006): Human Factor in Road Design. State of the art and empirical evidence. Sixth Framework Programme. RIPCORDER-ISE-REST. Comisión Europea, Bruselas.

(19) Wilde, G. (1982): The Theory of Risk-Homeostasis: Implications for Safety and Health. Risk Analysis, Vol. 2 pp. 209-255. ■