

## **2 INTRODUCCIÓN A LAS INTERSECCIONES GIRATORIAS**

### **2.1 Evolución histórica de la rotonda**

#### **2.1.1 Eugène Hénard y el nacimiento de la intersección giratoria**

Las primeras rotondas aparecieron antes de la generalización del automóvil. En las grandes ciudades europeas de finales del siglo XIX ya existían problemas de saturación del tráfico debidos a la enorme cantidad de vehículos que circulaban<sup>1</sup>, estos problemas se iniciaban generalmente en las intersecciones como consecuencia de la falta de una regulación de la circulación, de algún accidente<sup>2</sup>, o bien sencillamente porque la intersección llegaba al límite de su capacidad. Los atascos se trasmitían al resto de las vías afluentes a la intersección provocando nuevos problemas.

La organización de la circulación comienza a preocupar a las autoridades de las grandes ciudades europeas de principios del siglo XX, que muestran un interés creciente por hallar soluciones<sup>3</sup> al problema de la saturación de las principales vías urbanas.

---

<sup>1</sup> Sin ir más lejos, tan sólo en la ciudad de París se contabilizaban en 1906 los siguientes vehículos: 9.619 coches particulares, 15.775 vehículos de carga de tracción animal, 2.572 coches públicos (como omnibuses o tranvías), 33.500 coches de todo tipo destinados al comercio y 4.077 automóviles, además de los aproximadamente 165.800 velocípedos, carretas de mano y otros tipos de vehículos con influencia sobre el tráfico. A todo este potencial de vehículos en circulación hay que añadir aquellos provenientes de las afueras, resto de provincias o del extranjero, cuyo recuento parece imposible. Fuente: HÉNARD, E.

<sup>2</sup> Según el anuario estadístico de París en 1903 se produjeron 3.125 accidentes entre coches.

<sup>3</sup> Como el primer semáforo con los colores rojo y verde (que funcionaba como una lámpara de gas) instalado en Westminster (Londres) en 1868. La creación de una brigada de policía especial en París (“bâtons blancs”) o la redacción de la ordenanza general de la policía de París del 10 de julio de 1900 (en cuyo artículo cuarto se especifica que los vehículos deben circular por el lado derecho de calzada) son otros ejemplos de éste interés.

Si bien éstas medidas funcionaron en la mayoría de intersecciones sencillas, no resultaron demasiado útiles en aquellas en las que desembocaban cinco o más calles. Ello se debe al aumento considerable del número de itinerarios posibles y el consecuente aumento de los puntos de conflicto entre trayectorias.

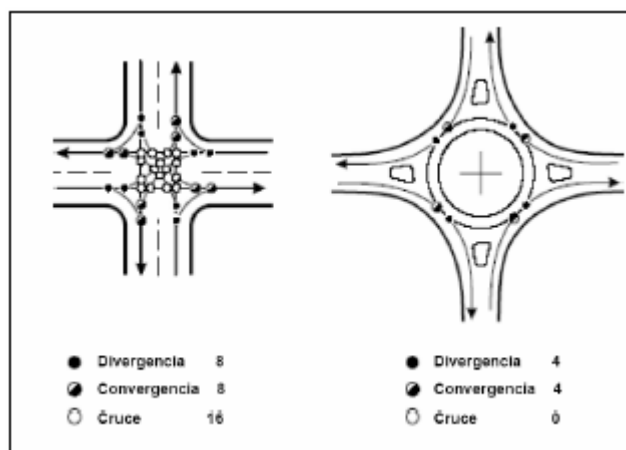


Fig. 2.1: Reducción de los puntos de conflicto en una intersección de cuatro ramales

Históricamente se atribuye a los ingenieros ingleses la concepción por primera vez de una solución en forma de intersección giratoria para resolver los problemas que se han citado. Sin embargo parece que éste mérito se debe al arquitecto francés Eugène Hénard (1849-1923), quién trabajando en el servicio de arquitectura de la ciudad de París, proyectó las primeras glorietas urbanas.



Fig. 2.2: Proyecto de rotonda para la intersección de los "Grands Boulevards" en París, diseñada por E. Hénard.

Existe controversia en este sentido ya que en 1903 William Phelps Eno propuso un sistema de circulación giratoria en un solo sentido alrededor del Columbus Circle en Nueva York, que fue puesto en práctica en 1904. Al parecer ambos urbanistas llegaron a la misma solución de manera independiente, sin embargo existe una diferencia entre los principios expuestos por Hénard y los de Eno: el tamaño del islote central. Mientras Hénard sostiene que el islote central debe tener un diámetro mayor a los 8 metros, Eno recomienda que el islote central sea de acero y con un diámetro del orden del metro y medio a los dos metros.

Hénard demuestra ser un visionario al idear un sistema de enlaces con vías a distinto nivel para solucionar la congestión del tráfico en algunas intersecciones. A pesar de todo, él mismo

reconoce que la solución es excesivamente difícil y costosa y que tan sólo podría aplicarse en determinadas situaciones especiales. Por eso se decide por una solución más simple y elegante, la intersección giratoria.

Además en sus “Estudios de las transformaciones de París” realiza un despiece de los factores que intervienen en la circulación, incluyendo un estudio exhaustivo de los vehículos y el comportamiento de sus conductores, en el que analiza los movimientos que se producen en las intersecciones y clasifica y enumera las interacciones entre trayectorias para cruces con 3, 4, 5 y 6 ramas (en función de si el vehículo abandona la fila, se incorpora a ella o corta la trayectoria de otro vehículo en lo que él denomina un punto de conflicto).

Hénard considera que los problemas de las intersecciones se deben a los puntos de conflicto entre trayectorias y que la solución consiste en suprimirlos o reducirlos al máximo. En su estudio, demuestra que se puede evitar que los vehículos pasen por estos puntos si se les obliga a rodear un obstáculo que los englobe. Forzados a seguir una trayectoria circular alrededor del obstáculo los vehículos solo pueden realizar maniobras de entrada y salida de la fila (movimientos tangenciales), siempre que todos giren en el mismo sentido. De este modo se evitan los peligrosos puntos de conflicto y un solo agente situado en el centro de la intersección podría regular el tráfico sin problemas.

El arquitecto-urbanista francés reconoce que según las condiciones geométricas del lugar, puede resultar imposible adoptar una forma completamente circular para el islote central, según él, en estos casos se puede optar por una geometría elíptica u ovalada, con la condición de que su excentricidad (relación entre semieje menor y mayor de la elipse) sea mayor a 0,75.

A pesar de las ventajas que ofrece este nuevo sistema, que se puede aplicar perfectamente a las líneas de tranvía, existe el inconveniente de la afectación a los peatones, a los que obliga a realizar itinerarios más largos. Para evitar esta situación el arquitecto propone pasos subterráneos para peatones con entradas en las aceras. Pero es consciente del elevado coste de la solución y de los problemas que supondría de cara a la instalación de futuras líneas de metro, por lo que propone que los peatones crucen las calles convencionalmente con la ayuda de refugios, pero sin permitir nunca el acceso a la calzada anular.

Para mejorar la percepción de la intersección giratoria por parte de los vehículos que se aproximan, Hénard propone instalar un sistema de iluminación en el centro de la intersección. Este sistema, reforzado con carteles en forma de flecha que indican claramente el sentido que se debe seguir, constituye la señalización de la glorieta.

Pero las inquietudes de Hénard le llevan a buscar una formulación que permita el correcto dimensionamiento de la intersección ideada por él. Afirma que el diámetro del islote central es un parámetro importante y que no debería ser inferior a 10 metros para facilitar el giro de los vehículos y para que los ángulos de entrada sean suficientemente suaves.

También intuye que el ancho de la calzada anular no puede ser arbitrario, sino que depende del flujo de vehículos que llegan a la intersección. Para ello define los conceptos de **capacidad de una vía de circulación** (cantidad de vehículos de cualquier tipo y tamaño que pasan por una sección de la calzada en un tiempo dado) y el **coeficiente de acumulación** (de llenado o de embotellamiento, que define como el porcentaje de superficie ocupada por los vehículos en una unidad de superficie de la calzada) y, partiendo de dos sencillas hipótesis como son una repartición equitativa de los flujos de entrada entre todas las salidas y la

proporcionalidad entre el ancho de una vía y su capacidad, Hénard demuestra una ley general para el dimensionamiento de la calzada anular: *“El ancho de la calzada anular de la intersección giratoria debe ser igual a la cuarta parte de la suma de los anchos de las calzadas que desembocan en ella”*.

En definitiva, vemos como la intersección giratoria propuesta por Eugène Hénard en 1906 consta de los mismos elementos básicos que las rotondas actuales: calzada anular en torno a un islote central inaccesible, además de las isletas triangulares en los encuentros entre las vías que convergen en la intersección y la propia calzada anular. Estas isletas triangulares cumplen la doble función de reconducir la circulación de los vehículos que entran en la rotonda, reforzando la obligación de seguir un único sentido de giro, además de proporcionar un refugio a los peatones que pretenden cruzar alguna de las vías en un punto próximo a la intersección. Además los motivos que llevan a su implantación coinciden con algunos de los que se utilizan hoy en día: aumento de la capacidad de una intersección, mejora de la seguridad, facilidad de control de la circulación, etc. Si a todo esto le añadimos el primer intento para hallar una formulación que permita un correcto diseño de la geometría de la intersección, podemos afirmar que Hénard es el inventor de la rotonda.

### **2.1.2 Las primeras rotondas**

La implantación de la primera intersección giratoria fue propuesta por Hénard en la intersección formada por las avenidas de Richelieu y Drouot y los boulevards de Montmartre, Hausmann y des Italiens, en París. Finalmente este proyecto no se llevó a cabo, pero Hénard dejó constancia de que en la ciudad de París existían algunas intersecciones que cumplían las condiciones para que su solución fuera susceptible de ser adoptada, por ejemplo aquellas que ya disponían de un monumento central.

De todas maneras en 1907 se instaura la circulación giratoria en sentido único en dos importantes plazas parisinas: la Paza de l'Étoile (hoy Plaza Charles de Gaulle) en torno al Arco del Triunfo y la Plaza de la Nación. Dieciocho años más tarde, en 1925, aparece la primera rotonda inglesa en Aldwych, en el centro de Londres, siguiendo los principios enunciados por Eugène Hénard.

Las rotondas se generalizan en Gran Bretaña y en las colonias inglesas entre 1920 y 1930. Su construcción responde sobretodo a la voluntad de mejorar las condiciones de seguridad. Por ello no solo se acondicionan rotondas urbanas, sino que en el periodo entreguerras también se comienzan a utilizar en los principales cruces de carreteras interurbanas.

Éstas se diseñan con grandes islotes centrales y en algunos casos se conciben como grandes nudos a distinto nivel. La lógica de sus dimensiones se debe a que se considera que los tramos entre una entrada y una salida consecutivas funcionan como zonas de trenzado entre vehículos en las que se producen las interferencias entre las trayectorias por movimientos de incorporación o abandono de la fila, interferencias que aumentan a medida que aumenta el número de filas (podríamos llamarlas carriles) que aparecen en el interior de la calzada anular.

Entre los años treinta y cuarenta se llevan a cabo los primeros ensayos para determinar la capacidad de las rotondas. Los británicos H. Watson, F.G. Royal-Dawson y el norteamericano K. Norman, estudian en diferentes trabajos la dependencia de la capacidad de las rotondas

respecto algunos parámetros como los flujos, el tipo de vehículos, su velocidad y los ángulos de convergencia.

En 1945 A.J. Clayton realiza el primer ensayo de una sección de trenzado que le lleva a proponer una fórmula de la capacidad en la que introduce el **factor de cruce** o de trenzado. Sus trabajos influirán en el diseño de las rotondas hasta diez años más tarde.

En 1955 el “Road Research Laboratory” (Laboratorio de investigación viaria norteamericano) comienza a realizar sus propios ensayos en pistas experimentales que permiten variar las condiciones de diseño (geométricas y de tráfico) de las configuraciones que se van a estudiar. Los investigadores llegan a la conclusión de que la capacidad de una vía de trenzado ( $Q_w$ ) depende básicamente de cinco parámetros, a saber: la longitud ( $l$ ) y la anchura ( $a$ ) de la zona de trenzado, la anchura media entre entrada y salida de la vía ( $e$ ), el porcentaje de vehículos que realizan la maniobra de trenzado ( $p$ ) y el tipo de vehículos. La **fórmula de Wardrop** definida en 1957 incluye todos estos parámetros para la determinación de la capacidad y añade una interesante aportación que consiste en utilizar unos coeficientes de equivalencia para ponderar la mayor influencia de los vehículos pesados y la menor de los vehículos a dos ruedas. Se escribe así:

$$Q_w = \frac{K \cdot w \left( l + \frac{e}{w} \right) \left( l - \frac{p}{3} \right)}{l + \frac{w}{l}} \quad [1]$$

dónde  $K$  es un coeficiente que varía según las unidades empleadas.

### **2.1.3 El autobloqueo y la saturación de las rotondas.**

Durante el periodo entreguerras las rotondas son el único tipo de intersección en Gran Bretaña para el cual no existe ninguna norma que regule la prioridad. En ellas la circulación funciona por el cruce o trenzado entre los vehículos que circulan por la calzada anular y los que se incorporan a ella o la abandonan. Esto no resulta en modo alguno preocupante debido a la asombrosa cortesía de los conductores ingleses toda vez que los volúmenes de circulación no son demasiado grandes, sobretodo fuera de las grandes ciudades.

No obstante, la generalización del automóvil acontecida tras la segunda guerra mundial conlleva un aumento de estos volúmenes de circulación y el funcionamiento de las rotondas se resiente, sobretodo en horas punta.

Hasta 1966 las rotondas inglesas se rigen por la norma de prioridad a la izquierda (a la derecha en el resto de países). Los vehículos entrantes se aproximan a la rotonda a velocidades mayores que los que circulan en el anillo, forzando la entrada y obligando a éstos a reducir aun más sus velocidades. Este proceso tiende a favorecer la entrada de los vehículos que provienen de una de las ramas de la rotonda por encima de los que ya están en ella, obligándoles incluso a detenerse, lo que provoca una cola en la calzada anular que impide las entradas y salidas y, bajo ciertas circunstancias puede llegar a bloquear todo movimiento.

Hasta esa fecha el cálculo de la capacidad de las intersecciones giratorias se realizaba considerando la calzada como una serie de tramos de trenzado.

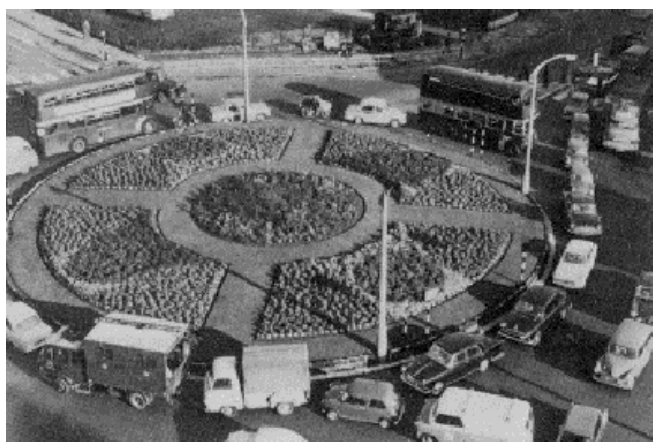


Figura 2.3: Una rotonda inglesa saturada. Fuente: MIMEE, H.

La creencia en el funcionamiento de la rotonda como tramos de trenzado se basaba en que debido al sistema de prioridad la mejor manera de facilitar la entrada a los vehículos (y por lo tanto hacer la circulación más fluida) consiste en que la trayectoria de entrada sea lo más tangente posible a la calzada anular, situación que aparentemente es la misma que se da en las incorporaciones con trenzado. En consecuencia la mejor manera de aumentar la capacidad y de paso evitar los problemas de bloqueo consiste en aumentar el tamaño de las rotondas. Con esto se consiguen mayores longitudes de trenzado y, al alargar las distancias entre entradas y salidas, más espacio para que en caso de producirse colas éstas no lleguen a bloquear los accesos.

Sin embargo la implantación de este tipo de rotondas sólo podía llevarse a cabo donde hubiera suficiente espacio disponible. Es por eso que se opta por regular total o parcialmente la circulación de algunas rotondas urbanas mediante semaforización.

Pero la mejor solución al problema del autobloqueo característico de las rotondas se gesta en la década de 1950 a 1960, cuando los ingenieros ingleses comienzan a experimentar con la inversión de las prioridades.

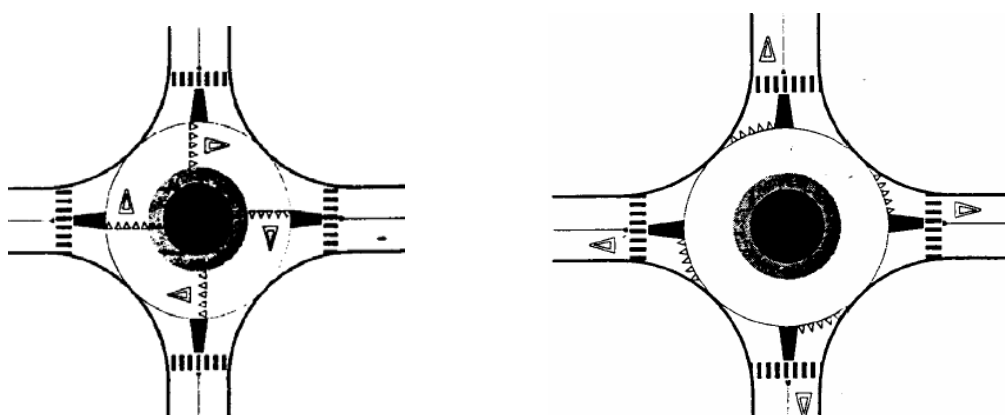


Figura 2.4: Esquema de prioridades en una rotonda, antes y después de la inversión propuesta por los ingleses. Fuente: "Guide Suisse des Giratoires".

#### **2.1.4 La prioridad del anillo en las rotondas modernas.**

En 1956 y en colaboración con las autoridades de numerosas localidades que sufrían el colapso de sus rotondas el “Road Research Laboratory” comenzó una serie de ensayos consistentes en la observación del funcionamiento de estas rotondas antes y después de la introducción, de manera experimental, de la regla de prioridad del anillo. Los resultados no pudieron ser más satisfactorios y en noviembre de 1966 después de otra serie de pruebas realizadas sobre 83 rotondas, la prioridad del anillo (Offside Priority Rule), se instaura oficialmente en Gran Bretaña. Francia hace lo propio en 1984 y Suiza en 1987. En España esta regla adopta el carácter de norma en 1990.

A partir de la entrada en vigor del nuevo sistema de prioridad las rotondas pasan a comportarse como una serie intersecciones en “T” lo que anula el sistema tradicional de trenzado y permite reducir la distancia entre entradas y salidas consecutivas, lo que lleva a una disminución significativa de los diámetros de las rotondas. Ha cambiado el diseño de las glorietas, los islotes centrales se hacen más pequeños y las entradas y salidas se abocinan.

Este cambio de concepción facilita la generalización de las rotondas, pues es posible diseñar rotondas más compactas, que requieren mucha menos superficie y que pueden llegar a implantarse en intersecciones existentes en ciudad sin producir afecciones importantes en las edificaciones del entorno (ver figura 2.5).

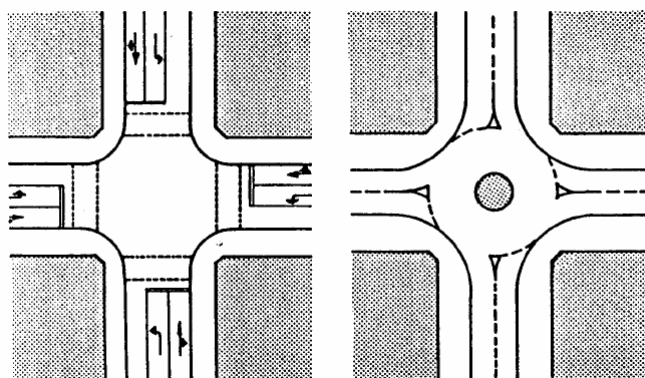


Figura 2.5: Ocupación de una rotonda frente a una intersección convencional.

En 1970, F.C. Blackmore del “Road Research Laboratory” propone una fórmula para calcular la capacidad global de una rotonda moderna que considera como parámetros influyentes un factor de eficacia (K) en función del número de ramas de la rotonda, los anchos (en m) de las calzadas que llegan a la rotonda antes de abocinarse (w) y la superficie (en m<sup>2</sup>) añadida a la rotonda como consecuencia del abocinamiento de entradas y salidas (A):

$$Q = K \left( \sum w + \sqrt{A} \right) \quad [2]$$

Las observaciones realizadas por el mismo “Transport and Road Research Laboratory” (en adelante TRRL) demostraron en 1973 que el factor de trenzado de Wardrop no tenía ninguna influencia en las rotondas modernas.

El cálculo de la capacidad de las rotondas modernas se presenta como un nuevo problema, ahora ya no interesa tanto conocer la capacidad global de una rotonda como la capacidad de sus entradas. La fórmula de Wardrop, vigente durante muchos años, deja de ser útil y se

sustituye por la **fórmula de Kimber** que permite calcular la capacidad de una entrada ( $Q_e$ ) y que tiene la forma:

$$Q_e = F - f_c \cdot Q_c \quad [3]$$

que relaciona la capacidad de una entrada con el tráfico circulante entre la entrada a considerar y la inmediatamente anterior en el sentido de giro de la calzada anular ( $Q_c$ ) mediante las constantes  $F$  y  $f_c$  que dependen de la geometría de cada rotonda (ancho de la entrada, ancho de la rama de entrada, longitud del abocinamiento de la entrada, diámetro, radio de entrada, ángulo de entrada, ancho de la calzada anular).

En 1975 se conocieron los resultados de un estudio realizado sobre 110 nudos viarios que habían sido reconvertidos en rotondas modernas (más compactas y con prioridad al anillo), este estudio demostró que además de mejorar la capacidad se había conseguido un importante aumento de la seguridad, reduciéndose el número de accidentes (entre un 30 y un 40%) y la gravedad de los mismos.

A partir de 1970 se extiende la utilización de las rotondas a otros países, sobretudo Francia y Australia<sup>4</sup>, apareciendo numerosas publicaciones al respecto<sup>5</sup>.

### **2.1.5 Las glorietas en Europa y Estados Unidos.**

A pesar de los buenos resultados de la experiencia británica con la regla de prioridad del anillo, se creía que la regla general de prioridad a la derecha<sup>6</sup> estaba demasiado inculcada en los conductores como para que una excepción pudiera ser aplicada con éxito en las glorietas. Sin embargo la mayoría de las pocas glorietas europeas existentes se colapsaba bajo las fuertes cargas de tráfico de las horas punta, mientras que en Gran Bretaña esta situación dejó de producirse a partir de 1966.

#### Estados Unidos

Las rotondas estadounidenses no se regían por una regla general que definiera las prioridades, cada rotonda se regulaba por un tipo de norma en función del lugar en que ésta se encontraba. En 1913 el estado de Wisconsin adopta de manera generalizada la prioridad a la derecha (o lo que es lo mismo, a las entradas).

De nuevo Eno, en 1929, apuntó los primeros inconvenientes del autobloqueo asociado a altos volúmenes de tráfico cuando se da la prioridad a las entradas. En esta ocasión Eno (considerado el “padre del control del tráfico”) no fue capaz de convencer a los ingenieros de tráfico acerca de la necesidad de invertir las prioridades.

---

<sup>4</sup> También, aunque en menor medida en Dinamarca, Suecia, Noruega, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Canadá y Japón.

<sup>5</sup> Sin duda entre los países con mayor número de aportaciones destacan Gran Bretaña a través del “Transport and Road Research Laboratory” (TRRL), Francia, que divide sus publicaciones entre el “Centre d’Etudes des Transports Urbains” (CETUR) y el “Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes” (SETRA) y Australia con la “National Association of Australian State Roads Authorities” (NAASRA).

<sup>6</sup> Inscrita en el artículo 18 de la Convención Internacional de Viena de 1968 y conservada en los acuerdos de Ginebra de 1971.



Por aquel entonces los volúmenes de tráfico no eran preocupantes, pero cuando estos comenzaron a crecer, las advertencias realizadas por Eno se cumplieron. Incomprensiblemente las rotondas, que igual que en Gran Bretaña cada vez eran más grandes, se saturaban.

A partir de la década de los 1950's y como consecuencia del fenómeno del autobloqueo, las rotondas cayeron en desgracia y dejaron de ser utilizadas por los ingenieros norteamericanos.

En 1980, contagiados por el creciente éxito de las rotondas inglesas, una minoría de ingenieros vuelve a apostar por las rotondas, esta vez concebidas según la regla de la prioridad en el anillo. Las dos primeras rotondas modernas de los Estados Unidos se construyen en Summerlin, Florida, en 1990.

Para demostrar la escasa repercusión que hasta la fecha ha tenido este tipo de intersección en un país que está acostumbrado a ir a la cabeza en materia de tráfico, hay que destacar que en 1997 tan solo había en funcionamiento 38 rotondas modernas en todo el territorio de los estados Unidos, frente a las aproximadamente 15.000 con que contaba Francia en el mismo año. Pero esta situación ha cambiado y en los últimos años han ido apareciendo numerosas rotondas modernas en los Estados Unidos.

Veamos que situaciones se dieron en algunos países europeos:

#### Alemania y Suecia

Si bien es cierto que los primeros estudios sobre la prioridad del anillo se llevaron a cabo por investigadores ingleses, este régimen de prioridad estaba en vigor en todas las intersecciones giratorias de la República Federal Alemana y de Suecia desde principios de la década de los 60. De hecho las rotondas alemanas disponían de una señal especial en las entradas de la rotonda que instaba a los conductores a ceder el paso a los vehículos que circulaban por la calzada anular.

Alemania se niega a abandonar el sistema de prioridad que tan bien funciona en sus rotondas, pero a fin de respetar las directivas internacionales dictadas en Viena y dirigidas a unificar los criterios de señalización retira su señal especial pero la sustituyen por el triángulo invertido (señal de “ceda el paso”).

En Suecia el 3 de septiembre de 1967 se produce un cambio drástico en el sistema general de circulación, se abandona la circulación por la izquierda de la calzada para pasar a circular por la derecha, con lo que se adopta como obligatoria la regla general de prioridad a la derecha en las intersecciones a excepción de las rotondas, en las que se debe respetar la prioridad del anillo.

#### Francia

Las rotondas francesas han seguido una evolución paralela a las británicas pero más tardía. Recordemos que en la época de Eugène Hénard tan solo una ordenanza policial (que databa de 1900) regulaba la prioridad en las intersecciones y no fue hasta 1925 que esta regla se convirtió en una norma generalizada en el territorio francés<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> A pesar de que ya en 1905 el presidente del Club del Automóvil de Los Vosgos propusiera que la regla de prioridad a la derecha fuera implícita en todas las intersecciones.

El primer paso hacia un cambio en la reglamentación de las prioridades en las rotondas se produce cuando en 1972 una modificación del código de circulación permite que cada ayuntamiento decida el tipo de prioridad que rige sus rotondas urbanas.

Las diferentes experiencias desde 1976 hasta 1983 permiten demostrar que las rotondas regidas por la prioridad al anillo son más seguras y, en general, tienen más capacidad que las intersecciones normales o semaforizadas además de suponer un ahorro importante de combustible.

La prioridad del anillo entra en vigor en Francia el 1 de mayo de 1984. Antes, en febrero del mismo año, se había dictado la obligatoriedad de señalar todas las aproximaciones a rotondas mediante una señal vertical de peligro (triángulo con el vértice hacia arriba, bordes rojos y fondo blanco) con tres flechas dispuestas en círculo que indicaran el sentido de la circulación.

Los buenos resultados cosechados se manifestaron en una constante proliferación de este nuevo tipo de rotonda, algunas grandes rotondas fueron dimensionadas a la baja y muchas intersecciones semaforizadas fueron transformadas. A modo de ejemplo en 1991 el número de rotondas crecía a un ritmo de aproximadamente 1000 cada año.

### Suiza

Como el resto de países europeos Suiza sufrió un incremento extraordinario de la motorización y en consecuencia de la cantidad de problemas asociados a la circulación: saturación y accidentes que se daban en su mayoría en las intersecciones.

La búsqueda de soluciones a estos problemas contempló algunas tímidas tentativas de implantación de rotondas “clásicas”, es decir con prioridad a la derecha, que presentaron los mismos problemas que en los países vecinos: se autobloqueaban como consecuencia de tráfico elevados.

Además éstas se concebían como nudos que necesitaban una enorme cantidad de espacio para funcionar correctamente, de ahí que las rotondas no tuvieran demasiado éxito en un país pequeño y muy urbanizado.

En 1964 entra en servicio la primera rotonda suiza según los principios de las grandes rotondas convencionales. Con un diámetro exterior de 150 m y un islote central de 120 m de diámetro y regida según la regla de prioridad a la derecha se convierte en uno de los puntos negros de la ruta Ginebra-Lausana, por lo que en 1974 se decide la inversión de prioridades.

A partir de 1985 se opta por la importación de los modelos ingleses de rotondas compactas, rotondas dobles y mini-rotondas y es en 1987 cuando la prioridad del anillo se adopta de manera oficial en las glorietas suizas.

Suiza pasó de poseer 19 rotondas en 1980 a 220 en 1992 (además de 500 rotondas más en proyecto) el 80% de ellas urbanas.

### **2.1.6 El caso español**

El caso de España no difiere demasiado del de sus vecinos europeos: también se produce un aumento de la motorización, algo más moderado, que se da sobretodo a partir de los años 60 con el acceso de la clase obrera al automóvil gracias a la generalización de vehículos utilitarios como el SEAT 600.

Históricamente se ha optado por el tradicional diseño en cruz para las intersecciones entre carreteras de baja intensidad de tráfico y por la construcción de enlaces en aquellos cruces de carreteras más importantes o autovías y autopistas con el resto de vías. Mientras que las intersecciones urbanas se han diseñado en su mayoría con control semafórico o mediante la prioridad a la derecha.

La popularización de las rotondas acontecida en Europa y debida sobretodo al gran éxito de este tipo de intersección en países como Reino Unido y Francia, no tuvo excesiva repercusión durante la dictadura franquista (1939-1975) y las pocas rotondas que datan de esa época son adecuaciones de intersecciones urbanas que ya disponían de un monumento u otro tipo de obstáculo central o plaza en las que era obligado el sentido giratorio.

El primer intento de introducir este tipo de intersección en nuestro país data de 1974, fecha en la que la 5ª Jefatura Regional de Carreteras redacta el estudio de la Red Arterial Metropolitana (en Cataluña) en el que se plantean cerca de 50 rotondas todavía de dimensiones considerables (siguiendo el criterio de trenzado), que, finalmente, no se llegaron a construir.

La primera glorieta española regida por la prioridad del anillo se construye en Palmanova (Mallorca) en 1976 ya dentro del periodo de transición democrática<sup>8</sup>, desde entonces la implantación de este tipo de intersecciones ha tenido un éxito creciente, más aún desde la instauración generalizada en todo el territorio español de la regla de prioridad del anillo, en 1990.

## **2.2 Conceptos generales sobre glorietas**

### **2.2.1 Definición**

Entendemos como rotonda o glorieta un tipo especial de nudo o intersección, que se caracteriza por la manera en que se tratan los tramos que confluyen en él, ya que se comunican a través de una calzada anular en la que se establece una circulación giratoria alrededor de una isleta central.

De esta manera las trayectorias de los vehículos no se cruzan con trazadas secantes, sino que convergen y divergen tangencialmente, aumentando la seguridad al disminuir los puntos de conflicto.

---

<sup>8</sup> La primeras experiencias sobre glorietas modernas en nuestro país tienen lugar en las Islas Baleares, sobretodo en Mallorca e Ibiza, donde se construyeron varias decenas de ellas durante la década de los 80, quedando demostrada su eficacia como refleja Torres Llodrá, J. en el artículo *Intersecciones giratorias en Baleares*, publicado en “Jornadas de Estudio de Ingeniería de Tráfico” Asociación Permanente de los Congresos de Carreteras, Madrid, 1985.

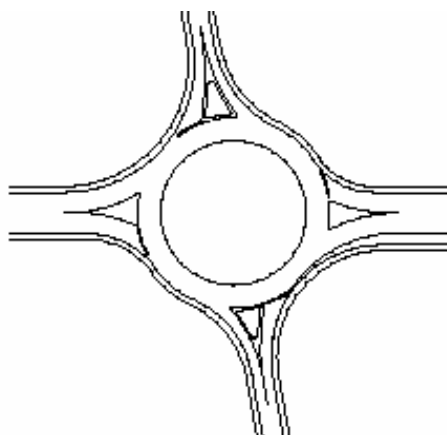


Fig 2.6: Intersección giratoria.

En las rotondas españolas la circulación a través de la calzada anular se realiza en sentido antihorario y, si bien no siempre ha sido así<sup>9</sup>, actualmente esta circulación se considera prioritaria respecto a la de las entradas.

De este modo un vehículo que desee entrar en la glorieta debe ceder el paso a los vehículos que circulen por el interior de la calzada anular, a pesar de que éstos se aproximen desde la izquierda, contradiciendo así la regla general de prioridad a la derecha en las intersecciones.

### **2.2.2 Funcionamiento**

El modo de utilización de este tipo de intersección está íntimamente ligado a su geometría pero también a la especial regla que las rige y que da prioridad a los vehículos circulantes por la calzada anular respecto a aquellos que entran en ella.

Efectivamente cuando un vehículo llega a una intersección de este tipo, sea cual sea la maniobra que va a realizar (girar a derechas, continuar recto, girar a izquierdas o cambiar el sentido) debe, salvo en caso de existir carriles de giro directo, incorporarse a la calzada anular y seguir en ella una circulación giratoria que en España sigue el sentido contrario al de las agujas del reloj. Debido a la prioridad de los vehículos del anillo sobre los vehículos entrantes, éstos deben esperar en la entrada hasta que haya un intervalo entre vehículos circulantes por la calzada anular que les permita incorporarse a ésta con total seguridad.

Otra característica especial del funcionamiento de las glorietas es que, en general, dotan a la intersección de una mayor flexibilidad de itinerarios, posibilitando la corrección de errores y los cambios de sentido además de permitir a los usuarios indecisos dar una vuelta más a la rotonda para asegurarse de qué salida deben utilizar.

### **2.2.3 Elementos**

A continuación se enumeran y se definen los elementos que tienen mayor importancia en el diseño de una intersección giratoria, no solo por geometría, también por funcionalidad, capacidad y seguridad.

---

<sup>9</sup> Véase el apartado anterior (2.1 Evolución histórica de la rotonda).

### Anillo de circulación

También llamado calzada anular, el anillo de circulación es la zona, generalmente asfaltada, comprendida entre el diámetro exterior de la rotonda y el islote central. En la mayoría de casos adopta una forma de corona circular (menos cuando la rotonda es elíptica).

Como su nombre indica es la zona de la intersección destinada al tránsito de los vehículos en sentido giratorio. La calzada anular recoge el tráfico entrante en la intersección y lo reconduce hacia las salidas, obligando a los vehículos a seguir una circulación giratoria en un único sentido hasta que abandonan la intersección por una de sus salidas.

Todos los estudios, recomendaciones y normativas consultados coinciden en señalar que la anchura de este anillo debe ser constante, si bien no hay consenso a la hora de determinar la relación que debe guardar el número de carriles de la calzada anular con el de las entradas.

Lógicamente la calzada anular debe tener anchura suficiente para recibir el volumen de tráfico de la entrada con mayor capacidad, por lo tanto deberá tener al menos igual número de carriles que los que llegan por la vía más ancha. También debe ser suficientemente ancha para permitir el giro de los vehículos pesados más largos que se prevea que van a circular por ella.

A menudo se dispone un peralte en la calzada anular. Tampoco hay acuerdo sobre cual es el mejor sistema para peraltar la calzada anular. Un peralte hacia el interior facilita la circulación giratoria pero dificulta las salidas y el drenaje de la calzada. Por otro lado un peralte hacia el exterior facilita el drenaje y las conexiones con las entradas y salidas además de no ocasionar demasiados problemas circulatorios debido a las bajas velocidades asociadas a estas intersecciones, sin embargo se debe ir con cuidado ya que a bajas velocidades y con radios de giro reducidos algunos vehículos pesados (por lo general con el centro de gravedad más alto) pueden tener tendencia a volcar si el peralte no es demasiado pequeño. En algunas publicaciones se recomienda adoptar una disposición mixta de peralte con limatesas suaves. Al parecer, la disposición de un peralte hacia el exterior es la que ofrece más ventajas tanto por mantenimiento como por comodidad y funcionalidad.

A modo indicativo unos valores corrientes de la anchura podrían ser de 5 a 6 metros para calzadas de un solo carril, de unos 8 metros en el caso de dos carriles y de hasta 12 metros para tres carriles. Evidentemente todos estos valores están supeditados al del diámetro interior de la calzada y a la existencia o no de una zona transitable en el exterior del islote central.

Se suelen dejar arcenes en el interior y en el exterior de la calzada, si bien éstos no deben ser demasiado anchos para evitar en medida de lo posible la tendencia a la estacionamiento que conllevan, simplemente deben servir como referencia de los límites de la calzada. En el caso en que el islote central sea franqueable o semifranqueable no se dispone de arcén interior.

### Islote central

Es la zona no destinada a la circulación de vehículos que queda comprendida en el interior del anillo de circulación, de manera que la calzada anular lo bordea. Suele ser circular y en algunos casos oval o elíptico, siempre que la excentricidad sea mayor a 0,75.

Este islote cumple varias funciones: supone un obstáculo que se encuentra en la dirección que llevan las vías que se aproximan a la intersección por lo que induce a la reducción de la velocidad y al cambio de dirección para evitarlo. Por su tamaño y su ubicación en el interior de la calzada anular introduce cambios forzados en la trayectoria de los vehículos, que unidos a la circulación giratoria en sentido único sirven para evitar los puntos de conflicto por trayectorias secantes.

En algunos casos el islote central dispone de una corona exterior circulable para aquellos vehículos que, por su longitud, no puedan ejecutar la maniobra de circulación giratoria con normalidad al no disponer de espacio suficiente para efectuarla. En estos casos la corona exterior del islote suele estar construida con materiales distintos a los del anillo de circulación y, en ocasiones, con un peralte mayor para diferenciarla de la calzada anular y como método de disuasión para el resto de usuarios ya que no solo se diferencia en el aspecto, sino que también lo hace en la sonoridad y la comodidad de circulación.

España no se caracteriza por el uso de miniglorietas con el islote central totalmente franqueable, sin embargo éstas son comunes en algunos países europeos. Se caracterizan por el hecho de que el islote central no suele representar un obstáculo, sino tan solo una indicación del límite interior de la calzada anular, a menudo se representa el islote mediante señalización horizontal (pintura) por lo que los vehículos más largos pueden pisarlo completamente. Esta solución es útil sobretodo en zonas urbanas en las que se quiera convertir una intersección convencional existente en una intersección giratoria cuando la escasez de espacio disponible impida la construcción de una glorieta de características normales.

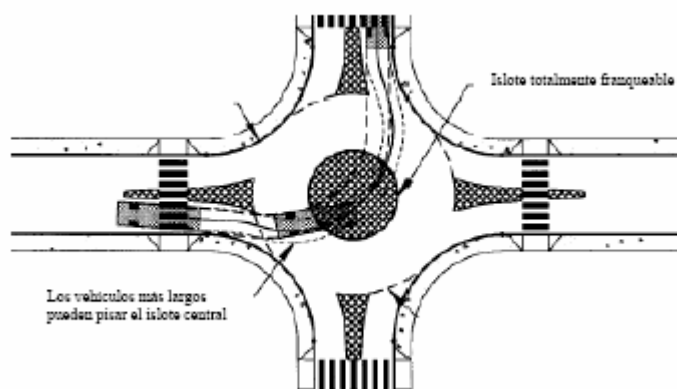


Fig 2.7: Mini-rotonda con islote central totalmente franqueable

El islote central es además una herramienta más para la percepción de la intersección y su adecuación al entorno. En determinadas circunstancias puede ser recomendable la instalación de elementos escultóricos o la plantación de árboles y siempre se le puede dar un tratamiento paisajístico. También se puede usar para situar el alumbrado, aunque por motivos de seguridad se recomienda que, debido al peligro de colisión, de existir una posibilidad manifiesta de que los vehículos irrumpieran accidentalmente en el islote central no se dispongan en el interior del mismo elementos que puedan representar un obstáculo.

### Entradas y salidas

La preferencia de los vehículos que circulan por la rotonda respecto aquellos que quieren incorporarse a ella hace que el tratamiento geométrico dado a las entradas sea diferente al de

las salidas y afecte al trazado de las vías que confluyen en la intersección en las proximidades de ésta.

Se llama entrada a la zona de la vía que desemboca en la intersección y que esta separada de ésta por la línea de *Ceda el paso*. Se diseñan de manera que los conductores que se aproximan a la rotonda tomen plena conciencia de la proximidad de la intersección y estén obligados a reducir la velocidad facilitando el cumplimiento de la regla de prioridad del anillo. Esto se consigue curvando la entrada con radios pequeños (10-30 metros).

Por motivos de capacidad ninguna entrada debería tener mayor número de carriles que la calzada anular, en caso contrario podrían producirse colas en las entradas a pesar de no haber tráfico circulando por la calzada anular al que cederle el paso. Por otro lado se ha comprobado que se puede aumentar la capacidad de una entrada añadiéndole más carriles de los que la vía original dispone, esto se consigue mediante el abocinamiento de las entradas.

El diseño de las salidas es completamente diferente, ya que se pretende que la maniobra de abandono de la calzada anular sea lo más expeditiva posible y se realice en las mejores condiciones de seguridad posibles. Para ello hacen falta radios de salida mayores que los de las entradas, así como carriles de salida más anchos. El único inconveniente radica en la problemática que esto supone para los cruces de peatones, de ahí la importancia de conocer a priori los diferentes tráfico previstos, no solo de vehículos, también de peatones, ya que este último puede llegar a influir determinadamente en el diseño de la rotonda. Las salidas también tienen forma abocinada que permita una transición cómoda y segura entre el ancho de la salida y el ancho de la vía.

### *Isletas deflectoras*

Situadas en el punto de unión entre los brazos de la rotonda (o ramas o ramales, que es el nombre que comúnmente se da a las vías que confluyen en la glorieta) acostumbran a tener forma triangular y separan los dos sentidos de circulación del ramal.

Las isletas deflectoras cumplen múltiples funciones: por un lado señalan la proximidad de la rotonda y generan una inflexión en las trayectorias de los vehículos entrantes (y salientes) induciendo a la reducción de la velocidad a la vez que éstos adoptan un ángulo de entrada adecuado con respecto a las trayectorias de circulación de la calzada anular.

Por otra parte las isletas sirven como refugio para el cruce de peatones y para la ubicación de señalización.

Por último también cumplen con la función de crear una separación entre una entrada y la salida inmediatamente anterior que permita que los conductores que desean entrar en la calzada anular tengan una visibilidad adecuada y puedan prever con la antelación suficiente que les permita incorporarse sin peligro si los vehículos que circulan por el interior de la rotonda la abandonan o no.

### *Señalización y balizamiento*

La finalidad principal de la señalización es advertir de la proximidad de la rotonda, de las condiciones extraordinarias de circulación y prioridad que se dan en ella y la de orientar sobre

los posibles destinos o direcciones que se pueden tomar, además de balizar los islotes deflectores, el islote central y los límites de la rotonda.

A medida que un vehículo se aproxima a la rotonda la señalización dispuesta en el ramal debe indicarle como mínimo la proximidad de la intersección (mediante la señal P-4), la obligatoriedad de ceder el paso a los vehículos que circulan por la calzada anular mediante la disposición de una señal vertical de tipo R-1 y la correspondiente señal horizontal de CEDA EL PASO (en el caso de entradas con más de un carril se sitúa otra señal R-1 en la isleta deflectora). Es recomendable la ubicación de señales destinadas a reducir la velocidad de aproximación y la de carteles-esquema con los principales destinos indicados que sirvan de orientación y además ayuden a comprender el funcionamiento de la rotonda.

Las isletas deflectoras sirven también para la ubicación de otro tipo de señales como los carteles-flecha con indicación de destino o dirección de una salida. En el islote central se disponen señales verticales del tipo R-402 que indican el sentido giratorio que se debe seguir.

Es importante que la ubicación tanto en planta como en alzado garantice una correcta percepción por parte de los usuarios de la rotonda a la vez que no represente una molestia, bien por interferencias en la visibilidad, bien por el peligro de impacto.



Fig. 2.8: Señales P-4 (Peligro: glorieta), R-1 (ceda el paso) y R-402 (sentido giratorio obligado)

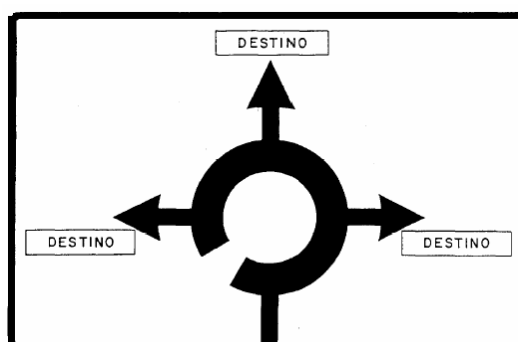


Fig. 2.9: Cartel-esquema en el que se indican las posibles direcciones.

### Alumbrado

Es otro de los factores importantes a la hora de proyectar una rotonda y esta íntimamente ligado a la seguridad. Es básico para que de noche la intersección pueda distinguirse a distancia, además debe garantizar una buena visibilidad nocturna tanto en la calzada anular como en las entradas y salidas.

La glorieta representa una obstrucción para el tráfico, por ello es importante que el alumbrado público permita conocer la existencia de la rotonda. Por otro lado existe un peligro añadido que se debe a la geometría y el funcionamiento de la glorieta y es que la curvatura de la



calzada anular a menudo impide advertir la presencia de otros vehículos a través de sus propios faros.

Todavía resulta peor el caso de glorietas sin alumbrado público en zonas urbanas iluminadas, ya que los conductores que se aproximan a la intersección no pueden distinguirla ya que tiene como fondo la zona urbana iluminada, que se convierte en su referencia y su hito exclusivo de orientación.

Por los motivos de seguridad (existe peligro de impacto siempre que haya elementos rígidos dispuestos en el interior del islote central) es recomendable una instalación situada en el perímetro exterior de la rotonda, aunque en determinadas circunstancias puede ser necesario situar la instalación en el interior del islote central.

#### **2.2.4 Comportamiento de los usuarios**

La circulación en una rotonda moderna se basa en la prioridad de paso de los vehículos que circulan por el anillo ante los que pretenden entrar en ella procedentes de los accesos.

Señalizar la maniobra de salida con antelación debería ser un hábito entre todos los usuarios que redundaría en una mejora del funcionamiento de la rotonda al proporcionar información sobre la trayectoria del vehículo al resto de usuarios. Esta información es especialmente útil para los vehículos que se aproximan por la entrada inmediatamente siguiente a la salida señalada, pues están esperando un intervalo entre vehículos que les permita entrar en la calzada anular con seguridad.

Pero esta conducta no solo es beneficiosa para la seguridad de vehículos que entran en la rotonda, también lo es para los posibles peatones que desean cruzar por esa salida y que conociendo la maniobra que va a realizar el vehículo, prefieren esperar a que este pase. Además se mejora la fluidez del tráfico y disminuyen las esperas en las entradas a la vez que se aumenta la capacidad.

En las rotondas con más de un carril de entrada y en la calzada anular el uso adecuado de estos carriles también permite optimizar el funcionamiento de la rotonda y su capacidad de absorción de vehículos.

##### *Ejemplos de buena práctica:*



**Si el conductor tiene que tomar la salida situada inmediatamente a la derecha de su entrada:**

-Debería acceder a la rotonda por el carril de la derecha.

-Dentro de la rotonda debería permanecer en el carril exterior y señalar la maniobra de salida con el intermitente de giro a la derecha.

Fig. 2.10: giro a derechas.

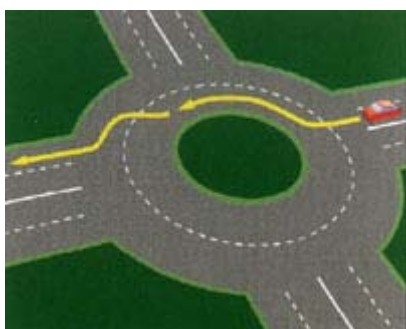


Fig. 2.11: sin cambio de dirección

### **Cuando desee continuar recto:**

-Preferentemente acceder a la rotonda por el carril izquierdo (o central si hay tres carriles). En caso de estar colapsado también se puede utilizar el derecho.

-Una vez en la rotonda:

- Incorporarse al carril interno de la rotonda.
- Señalar con el intermitente derecho una vez superada la salida anterior a la escogida.
- Para salir de la rotonda, desplazarse al carril exterior sin obstaculizar a los vehículos que circulen por éste, entendiéndolo que tienen prioridad. En caso de tener dificultades es preferible dar una vuelta completa a la rotonda y salir con mayor seguridad.



Fig. 2.12: giro a izquierdas.

### **Cuando la salida se encuentre a la izquierda o se desee realizar un cambio de sentido:**

-Acceder a la rotonda por el carril de la izquierda.

-Dentro de la rotonda:

- Incorporarse al carril interno de la rotonda.
- Mantenerse en el carril interno.
- Señalar con el intermitente derecho una vez superada la salida anterior a la escogida
- Para salir de la rotonda, desplazarse al carril exterior sin obstaculizar a los vehículos que circulen por éste, entendiéndolo que tienen prioridad. En caso de tener dificultades es preferible dar una vuelta completa a la rotonda y salir con mayor seguridad.

### *Entradas en doble circulación*

Las entradas en doble circulación, es decir, la entrada de un vehículo a la calzada anular mientras otro vehículo circula por el carril interior de la misma sin que exista el intervalo suficiente entre ambos, sólo pueden darse en glorietas de dos o más carriles.

Este fenómeno es muy esporádico, normalmente llevado a cabo por vehículos que abandonan la glorieta en la siguiente salida y que, en general, aumenta la peligrosidad y la accidentalidad de este tipo de intersecciones (CETUR 1988).

Un estudio llevado a cabo sobre 12 glorietas en la Comunidad de Madrid (DE LA HOZ 1995), comprobó que este tipo de acciones no aportan un incremento significativo a la capacidad de la rotonda ya que las producen menos de un vehículo de cada mil de los entrados en glorietas con anillo de dos o más carriles, mientras que por el contrario sí repercuten en la conflictividad de la intersección, puesto que en un elevado porcentaje de ocasiones van acompañadas de situaciones de inseguridad.

### Esperas en el interior del anillo

Este es otro comportamiento irregular que en ocasiones se observa en las glorietas. Consiste en que los vehículos que desean acceder a ella esperen parcial o totalmente dentro del anillo en lugar de hacerlo por detrás de la línea de Ceda el Paso como deberían.

Las motivaciones de este comportamiento pueden proceder tanto del propio diseño de la rotonda como de la personalidad del conductor implicado. De todas maneras para evitar este tipo de comportamientos se recomienda que las glorietas se diseñen con una correcta visibilidad desde la línea de Ceda el Paso, además se considera que las entradas tangentes al anillo o con un ángulo muy abierto y los anillos de circulación con más carriles que la entrada más amplia pueden favorecer este tipo de conductas (DE LA HOZ 1995).

### Entradas con escaso intervalo

Son aquellas entradas a calzada anular que algunos vehículos realizan sin que los vehículos que circulan por ella lo hagan con un intervalo que permita la maniobra de incorporación en condiciones de seguridad<sup>10</sup>. Este tipo de situaciones suelen estar protagonizadas por vehículos pesados ya que al ser mucho más largos y tener menos capacidad de aceleración que los vehículos ligeros, necesitan un intervalo mucho mayor, que no siempre se da con la suficiente frecuencia.

### Entradas en paralelo

Normalmente no producen situaciones de inseguridad, ya que los vehículos que realizan estas entradas suelen abandonar la glorieta por salidas diferentes, por lo que sus trayectorias no se cruzan.

### Entradas en paralelo de más filas de vehículos que carriles en la entrada o en el anillo

Evidentemente este tipo de maniobras aumenta el riesgo de accidente, los vehículos no pueden circular correctamente a la vez, por lo que se producen frenazos y aceleraciones. Estas situaciones se dan sobretodo en rotondas congestionadas y en entradas con una entrada mal dimensionada (línea de Ceda el Paso demasiado ancha para el número de carriles de la entrada).

## **2.2.5 Clasificación**

Se pueden establecer numerosísimas clasificaciones distintas en función del aspecto de la rotonda que se desee destacar, se enumeran unas cuantas:

### En función del modo de explotación o de funcionamiento:

#### **- Rotondas convencionales que funcionan por trenzado**

---

<sup>10</sup> En este caso no se entiende el intervalo entre dos vehículos de la misma manera que el intervalo crítico o “gap” que se utiliza en el cálculo de la capacidad. Aquí se interpreta como entradas con escaso intervalo aquellas que obligan a frenar a los vehículos que circulan por el anillo, con independencia del tiempo que los separa (De la Hoz 1995).

Son del mismo tipo que las primeras rotondas que se proyectaron en Gran Bretaña en la primera mitad del siglo XX, en las que no existía ninguna regla de prioridad, de manera que las incorporaciones se producen por trenzado entre los vehículos que entran y los que ya circulan por la intersección. Esto último exige que para que no se produzcan problemas de autobloqueo<sup>11</sup> las longitudes de trenzado deben ser suficientemente generosas, lo que lleva a que este tipo de rotondas tenga un tamaño considerable.

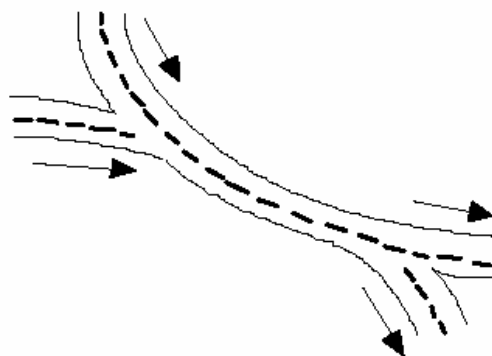


Fig. 2.13: carriles de trenzado.

#### **- Rotondas convencionales con prioridad a la derecha (prioridad a las entradas)**

Similares a las anteriores salvo en que se establece la norma genérica de prioridad a la derecha, lo que significa dar prioridad a los vehículos entrantes respecto a los que ya circulan por la calzada anular. El fenómeno del autobloqueo se acentúa por lo que las rotondas tienden a ser más grandes.

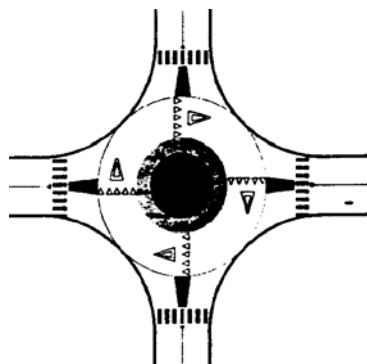


Fig.2.14: Esquema de rotonda con prioridad a las entradas.

Al igual que en el caso anterior este tipo de rotondas son cada vez menos frecuentes.

#### **- Rotondas modernas con prioridad en el anillo**

Concebidas como solución al problema del autobloqueo de las rotondas convencionales, la adopción de la regla de prioridad de los vehículos que circulan por la calzada anular frente aquellos que pretenden entrar en ella desde los ramales permitió reducir el tamaño de las rotondas, haciéndolas más compactas.

---

<sup>11</sup> Véase el apartado 2.1.3. “El autobloqueo y la saturación de las rotondas” de esta misma tesina.

Si a todo ello añadimos las nuevas soluciones de diseño destinadas a aumentar la capacidad y la seguridad vemos que, hasta la fecha, las rotondas explotadas de esta manera son las que más éxitos han cosechado, hasta el punto de llegar a convertirse en una solución demasiado estándar, a menudo implantada a la ligera.

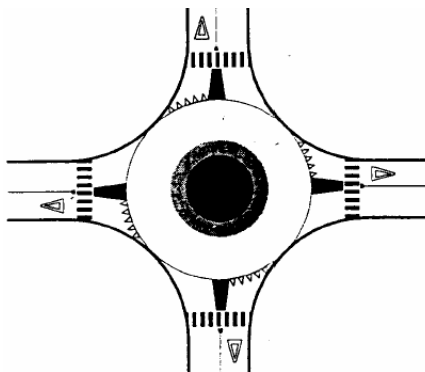


Fig. 2.15: Esquema de rotonda con prioridad al anillo.

#### **- Rotondas convencionales con prioridad en el anillo**

Son aquellas rotondas diseñadas para circular según el principio de trenzado (o con prioridad a las entradas) en las que posteriormente se ha instaurado la prioridad del anillo. Como consecuencia suelen tener grandes diámetros, por lo demás su funcionamiento es idéntico al de las rotondas modernas.

#### **- Rotondas semaforizadas.**

Las razones para la implantación de una rotonda controlada por semáforos pueden ser varias, pero en general este tipo de rotondas se encuentran en medio urbano y su semaforización guarda relación con las importantes cargas de tráfico que soportan.

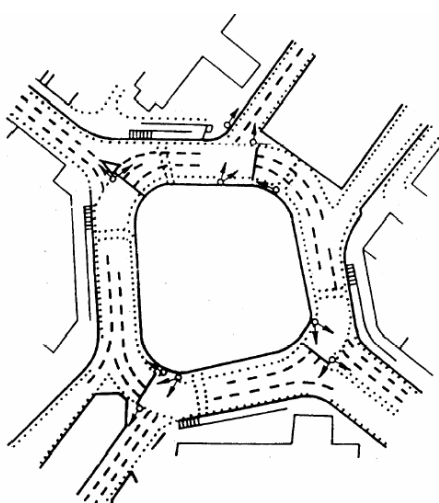


Fig. 2.16: Rotonda semaforizada

En efecto, una rotonda urbana puede sufrir periodos de punta durante los que un flujo dominante de un cierto movimiento impida la incorporación de los vehículos de las otras entradas a la calzada anular. El desequilibrio entre las entradas puede llegar a impedir la autorregulación propia de las glorietas llegando a producirse colas en algunas entradas cuyos

efectos se propaguen hacia atrás. Además este tipo de demoras suelen llevar asociados comportamientos temerarios provocados por la tensión o los nervios por la espera y que pueden acabar por convertirse en un accidente.

En zona urbana existe también un importante tráfico peatonal que también se convierte en usuario de la rotonda y por consiguiente debe ser tenido en cuenta a la hora de proyectarla a fin de garantizar su seguridad y evitar recorridos o esperas innecesarios.

También se puede desear que, por cuestiones de tiempo de recorrido o seguridad en la intersección, cierto tipo de vehículos de transporte público como autobuses o tranvías tengan prioridad en la incorporación a la calzada anular.

Por último también es posible que la rotonda se encuentre en una zona en la que interesa una cierta gestión del tráfico, incompatible con el funcionamiento de la rotonda a no ser que esté semaforizada.

Estos son sólo algunos aspectos de las rotondas en medio urbano que pueden ser solucionados mediante un sistema de señalización luminosa, pero hay que señalar que desde el momento en que se adopta un sistema de este tipo la rotonda deja de funcionar como tal para pasar a ser una intersección convencional entre dos vías de una sola dirección.

#### Según su geometría:

##### **- Rotondas circulares**

Son la gran mayoría de las rotondas. El islote central es un círculo y la calzada anular tiene una anchura constante, ello facilita la comprensión de la intersección por parte de los usuarios además de mejorar la circulación por la calzada anular (se puede mantener la trayectoria circular sin mover el volante de una posición de giro fija).

##### **- Rotondas ovals o elípticas**

Son aquellas que por diferentes motivos no pueden seguir una planta circular. Se recomienda que sean elipsoidales y que su excentricidad esté entre  $\frac{3}{4}$  y 1.

##### **- Rotondas partidas.**

Son un tipo especial de intersección que se utiliza sobretodo entre vías con intensidades de tráfico muy diferentes. No se pueden considerar como rotondas ya que su funcionamiento es completamente diferente al de éstas, en realidad se asemejan más a una intersección convencional. A nivel geométrico la intersección es muy similar a una rotonda salvo por que la calzada de la carretera o vía principal atraviesa el islote central, partiéndolo en dos mitades. Así lo que podría parecer la calzada anular se encuentra interrumpida por la vía principal por la que los vehículos circulan sin pérdida de prioridad. La rotonda tan sólo es rodeada por los vehículos que desean realizar un giro a izquierdas y por los que circulan por la vía secundaria.

Su utilidad radica en que permite las mismas maniobras que la glorieta sin introducir cambios en la trayectoria de los vehículos que desean permanecer en la vía principal. Es por esto por lo que generalmente se ubican fuera de poblado para dar acceso a una carretera de menor

importancia a través de la principal, sin embargo también existen numerosas rotondas de este estilo en zonas urbanas y periurbanas, generalmente semaforizadas.

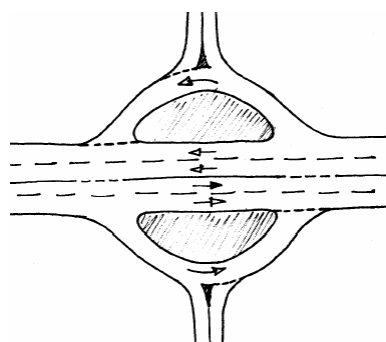


Fig. 2.17: Rotonda partida.

Como principal inconveniente hay que destacar que esta maniobrabilidad no es gratuita, para algunos movimientos es preciso cruzar la vía principal, por la que los vehículos circulan más frecuentemente y a mayores velocidades, con el peligro que ello supone, de ahí que una buena visibilidad y una correcta señalización sean de vital importancia.

#### **- Rotondas dobles**

Se utilizan cuando las vías que confluyen en la intersección están demasiado separadas o bien hay un obstáculo entre ellas (como un río, unas vías de ferrocarril o una carretera, por ejemplo).

La rotonda doble no es más que una adaptación del diseño en el que una rotonda que resultaría demasiado grande se transforma en un sistema de dos rotondas contiguas o unidas por un tramo común.

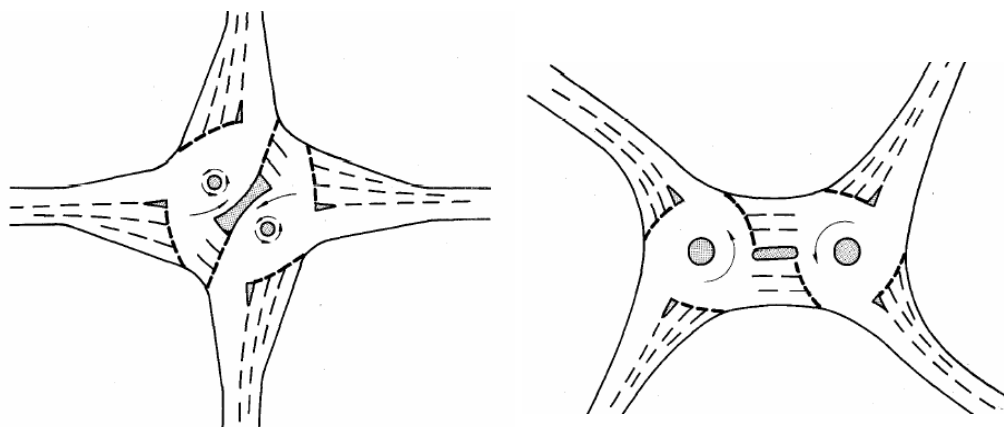


Fig. 2.18: Dos ejemplos de rotondas dobles.

#### Según los diámetros exterior e interior:

#### **- Grandes rotondas**

Son aquellas de diámetro interior muy superior a los 20 metros y diámetro exterior de más de 40 metros. En general son rotondas concebidas para funcionar según el principio del trenzado y que posteriormente han sido convertidas en rotondas modernas.

Existen ejemplos de implantación de rotondas de grandes dimensiones después de la entrada en vigor de la regla de prioridad del anillo. Se utilizan como intersecciones entre vías con elevada velocidad de circulación (en vías interurbanas o en rondas de poblaciones), o en intersecciones entre múltiples vías (caso urbano).

### **- Rotondas compactas**

Son el tipo de glorieta más utilizado, su diámetro interior oscila entre los 4 y los 20 metros, mientras que el diámetro exterior no suele ser menor que 24 metros ni exceder de los 40.

En algunos casos el islote central puede ser franqueable en su periferia, pero nunca totalmente.

### **- Mini-rotondas**

Su uso se da mayoritariamente en zonas fuertemente urbanizadas con edificaciones consolidadas, en las que el espacio disponible escasea. A menudo se utilizan para sustituir una intersección convencional.

Tienen un diámetro interior inferior a 4 metros y un diámetro exterior que no es mayor de 24 metros (comúnmente el diámetro de este tipo de glorietas oscila en torno a los 20 metros). Su islote central puede ser semi o completamente franqueable. Existen mini-rotondas con diámetros exteriores de 14 metros, pero no permiten el cambio de sentido a los vehículos largos.

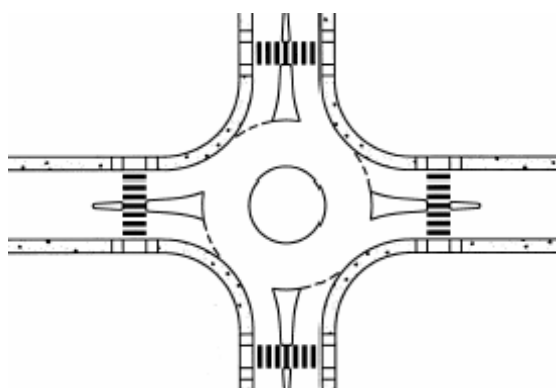


Fig. 2.19: Típica mini-rotonda.

A pesar de su reducido diámetro tienen una capacidad respetable, por el contrario exigen velocidades de circulación reducidas y suelen presentar dificultades para la maniobrabilidad de los vehículos largos a no ser que cuenten con una calzada anular muy amplia.

*Según el contexto en el que se ubican:*

### **- Rotondas urbanas**

Se pueden encontrar rotondas en todo tipo de zonas urbana, desde las densamente pobladas como las ciudades, a las áreas residenciales o polígonos industriales.



Su característica principal es que las velocidades máximas permitidas en las vías que se cruzan en la intersección son del orden de los 50 km/h. Además se hallan sometidas a tráficos intensos, con periodos de punta muy marcados y con una gran presencia de tráfico peatonal. Pueden ser de cualquier tamaño.

#### **- Rotondas suburbanas o periurbanas**

Son rotondas que se ubican en vías de tráfico importante con velocidades elevadas y que normalmente cumplen la función de acceso o de circunvalación de una población o polígono industrial. Actividades que generan importantes volúmenes de desplazamiento como son centros de ocio o grandes superficies se suelen ubicar en las inmediaciones de intersecciones de este tipo, aprovechando las ventajas de accesibilidad que ello supone.

Normalmente son de gran diámetro o bien de tipo compacto pero nunca se utilizan mini-rotondas para este tipo de intersecciones.

#### **- Rotondas fuera de poblado**

Son rotondas, casi siempre de tipo compacto, que se utilizan para regular una intersección de tres o cuatro brazos entre dos vías interurbanas. La implantación de una rotonda soluciona los problemas de siniestralidad que se producen en estos puntos al imponer una reducción de velocidades a la vez que aumenta la atención de los conductores.

En la mayoría de casos estas rotondas están desprovistas de cualquier edificación en sus inmediaciones por lo que el tráfico peatonal es prácticamente inexistente.

#### **- Rotondas a distinto nivel**

Son glorietas cuyos brazos conectan con vías que cruzan la calzada anular a distinto nivel en uno o más tramos. La calzada anular puede encontrarse elevada (mediante pasos superiores o puentes) o deprimida (mediante pasos inferiores o cajones) respecto la o las vías que une.

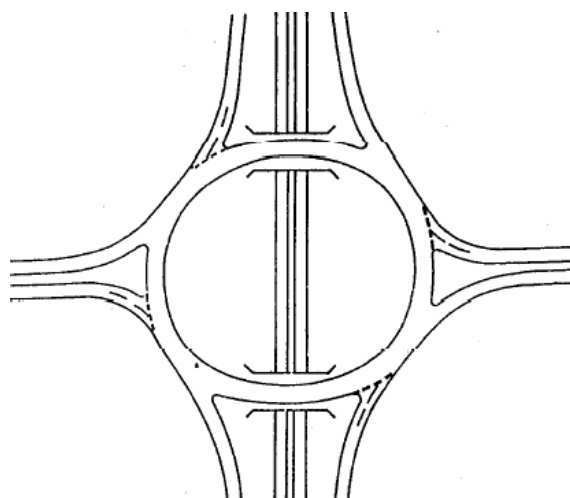


Fig. 2.20: Rotonda de dos puentes.

La más habitual es aquella en la que una vía principal pasa por debajo (o por encima, según el caso) de la calzada anular, situada a la misma cota que la vía secundaria. En esta configuración la vía principal mantiene la prioridad mientras que los accesos a la carretera

secundaria se producen por ramales de salida que conducen a la glorieta, y las entradas procedentes de la vía secundaria se incorporan a través de los ramales de salida de la glorieta.

Esta situación hace que desde el punto de vista de la vía principal las rotondas a distinto nivel se comporten como enlaces, permitiendo además el cambio de sentido, mientras que desde el punto de vista de la vía secundaria sigue tratándose de una intersección giratoria.

Un caso particular es el llamado enlace tipo pesa, a menudo considerado como un tipo de glorieta a distinto nivel, aunque más bien se trata de un caso particular de glorieta doble, a medio camino entre ésta y el enlace tipo diamante, en el que el tramo entre rotondas se cruza a distinto nivel con la vía principal de la que salen (y a la que llegan) algunos de los ramales de las glorietas.

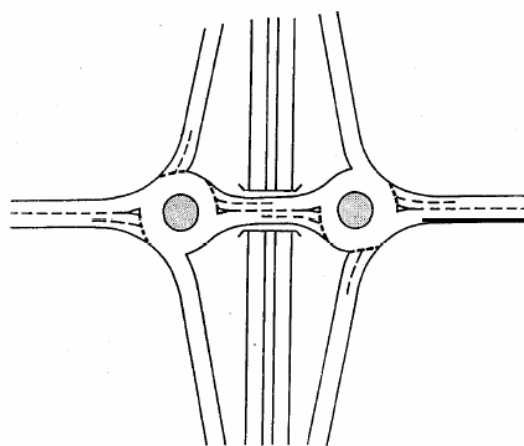


Fig. 2.21: Enlace tipo pesa, con dos rotondas.

## 2.3 Capacidad

El concepto de capacidad de una glorieta no puede entenderse de la misma manera que para el resto de intersecciones convencionales. Por lo menos no se puede hablar de “capacidad global de una glorieta” porque no existe una correspondencia unívoca entre la geometría de una rotonda y la capacidad global de la misma. Esto se debe a que el comportamiento de los usuarios y la distribución del tráfico influyen de manera determinante en dicha capacidad.

En efecto, supongamos que en una rotonda todos los vehículos abandonan la calzada anular por la salida inmediatamente posterior a la entrada que han utilizado, de esta manera todos los vehículos realizarían un sencillo giro a derechas sin que se produjeran interferencias en la calzada anular, con lo que alcanzaría una capacidad máxima igual a la suma de las capacidades de las entradas (o salidas según cual sea más restrictivo). Sin embargo es evidente que en el caso más real en que los vehículos abandonen la calzada anular por cualquiera de las salidas se producirían interferencias que implicarían una disminución de la capacidad respecto el caso anterior.

Aunque se pudiera cuantificar esta disminución de alguna manera, parece lógico que para cada distribución de tráfico exista una capacidad global de la rotonda. Además sabemos que

una misma rotonda admite un gran abanico de distribuciones de tráfico posibles, por lo tanto parece que hablar de la capacidad global de una glorieta no es de gran utilidad.

Cuando se abandona el modelo que asimila la calzada anular a carriles de trenzado y se pasa a considerar las entradas a la calzada anular como intersecciones en “T”<sup>12</sup> los cálculos de la capacidad se reorientan en la búsqueda de fórmulas que determinen la capacidad de cada una de estas intersecciones en “T” en las que se puede descomponer la glorieta.

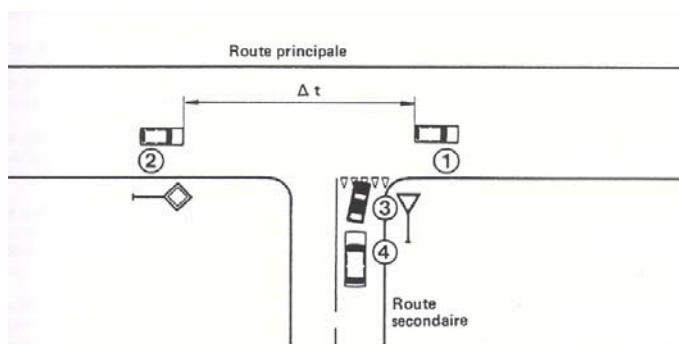


Fig. 2.22: Funcionamiento de una rotonda como intersección en “T”.

Para modelizar la nueva situación se parte de la premisa de que en cada intersección (en cada entrada) se deben tener en cuenta dos tráficos interrelacionados: por un lado el tráfico circulante por la calzada anular y, por otro, el tráfico entrante. La relación entre ambos tráficos debe ser inversa ya que a medida que el tráfico circulante por el anillo crece, la capacidad de entrada de los vehículos en cada intersección (entrada) debe disminuir.

Todo ello lleva a sustituir el concepto de capacidad global de una glorieta por el de **capacidad de una entrada**, para cuyo cálculo se consideran sus características geométricas y el tráfico circulante por el anillo<sup>13</sup>.

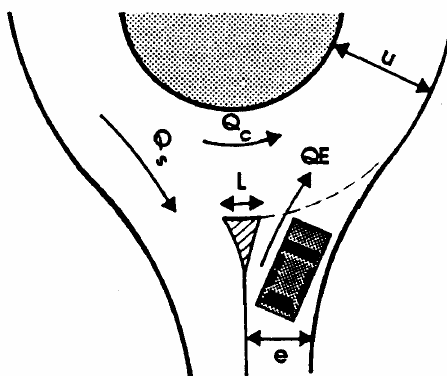


Fig. 2.23: La capacidad de una entrada depende de la geometría de la rotonda y del tráfico circulante.

<sup>12</sup> Modelo que, por otro lado, llevó a la reconsideración de las dimensiones de las rotondas.

<sup>13</sup> A título informativo hay que añadir que se podría considerar la capacidad global de una rotonda como la suma de capacidades que se da cuando todas las entradas están saturadas. No obstante hay que recordar que cuando se alcanza la máxima capacidad, se produce un aumento del tiempo de espera medio debido a la aparición de colas en las entradas. Es por ello por lo que si se desea trabajar con valores de capacidad global de una intersección giratoria se recomienda utilizar lo que se denomina “capacidad práctica” que se suele tomar como un 80% de la capacidad total.

### 2.3.1 Estimación de la capacidad

Existen dos tipos de métodos para calcular la capacidad de las rotondas: los métodos empíricos y los métodos probabilistas. Los primeros se basan en el estudio y la observación de numerosas rotondas con sus ramales de acceso en condiciones de saturación (bien sea en el campo, bien en laboratorio de ensayos), y utilizan regresiones estadísticas a partir de los valores de los parámetros geométricos de las rotondas y los conteos de tráfico realizados para establecer las formulas que permiten estimar la capacidad de las rotondas.

Los métodos probabilistas tienen su base en los modelos de aceptación de “**intervalos**” desarrollados en Alemania que consideran que el flujo de tráfico anular (prioritario) está compuesto por vehículos que circulan dejando una cierta distancia entre ellos -intervalo- (generalmente aleatoria, pero que no baja de un valor mínimo) y que los vehículos en espera de entrar a la calzada anular lo hacen solo cuando este intervalo supera un cierto valor que se lo permite.

En función del método aplicado (empírico o probabilística) para calcular la capacidad de una entrada y según sea el origen de cada fórmula (autor, país, ámbito de aplicación, etc...) se tienen en cuenta unos parámetros u otros, así como los diferentes coeficientes que se aplican para calcular el valor de la capacidad de la entrada. Pero todos tienen en cuenta aspectos comunes que tienen una repercusión directa en el valor de ésta capacidad, como por ejemplo considerar el tráfico circulante por la calzada anular o la adopción de coeficientes de equivalencia entre vehículos.

Existen numerosas formulaciones que tratan de adaptarse a la realidad de las situaciones para las que han sido diseñadas y que cuando se aplican en las circunstancias adecuadas, se ajustan bastante a la realidad.

Tabla 2.1: Recapitulación no exhaustiva de los métodos de cálculo de la capacidad de las rotondas

ROTONDAS CONVENCIONALES	ROTONDAS CON PRIORIDAD EN EL ANILLO		FORMULAS UTILIZADAS EN LA ACTUALIDAD	
	VARIAS	CAPACIDAD DE UNA ENTRADA		
		PROBABILISTAS		EMPÍRICAS
HÉNARD (Fr. 1905) CLAYTON (GB. 1945 y 1955) WARDROP (GB. 1957) LEUTZBACH (RFA. 1967)	<p><u>Capacidad global :</u></p> <p>BLACKMORE (GB. 1970)</p> <p><u>Capacidad de una sección de trenzado:</u></p> <p>WARDROP (GB. 1973) <i>formulación modificada</i></p>	<p>TANNER (GB. 1962)</p> <p>HARDES (RFA. 1968)</p> <p>McDONALD y ARMITAGE (GB. 1974 y 1978)</p> <p>MÉTODO SUIZO (S. 1977)</p>	<p>PHILBRICK (GB. 1977)</p> <p>GLEN. SUMMER y KIMBER (GB. 1978)</p> <p>KIMBER (GB. 1980)</p> <p>CETUR-86 (Fr. 1986)</p> <p>SETRA-87 (Fr. 1987)</p>	
			<p>Modelo de Harders modificado (F. 1986) CETE D'AIX</p> <p>FÓRMULA UNIFICADA DE KIMBER</p> <p>CETUR-86</p> <p>SETRA-87</p>	

Fuente: ARAGAO, P.

Sin embargo existe una tendencia generalizada a asimilar ciegamente fórmulas que pueden no ser las más adecuadas para modelizar las situaciones que se darán en la realidad. Es el caso de la inclusión de fórmulas en las normativas de algunos países en los que la idiosincrasia de los conductores o el tipo de rotondas para las que se aplican estas formulaciones no tienen nada que ver con las del país de procedencia<sup>14</sup>, lo que lleva a la construcción de rotondas mal dimensionadas (por exceso o por defecto).

#### *Parámetros influyentes en la capacidad de una entrada*

La geometría de la entrada es un concepto muy amplio que abarca multitud de parámetros que influyen directamente en la capacidad. En la bibliografía consultada al respecto parece haber acuerdo sobre cuales son los más importantes:

- Número de carriles de entrada.
- Anchura de los carriles en la entrada (a mayor ancho, más capacidad).
- Ángulo de entrada (o ángulo entre las trayectorias de entrada y anular)
- Abocinamiento de la entrada (se pueden utilizar parámetros derivados como la longitud efectiva del abocinamiento o la agudeza del mismo).
- Anchura de la vía de acceso.
- Radio de la entrada.
- Características de la calzada anular (radio exterior, anchura del anillo, nº de carriles, etc...).

De ellos la anchura de los accesos, la anchura de la entrada y la longitud del abocinamiento son los más importantes. El diámetro del islote central también tiene un efecto significativo. Por último el radio de entrada y el ángulo entre trayectorias influyen en menor medida.

El tráfico de la calzada anular también tiene una repercusión importante en la capacidad de una entrada, pero no solo se debe considerar el tráfico que circula directamente por delante de ésta. Existe un porcentaje del tráfico que abandona la calzada anular por la salida inmediatamente anterior y que, de alguna manera, resulta “molesto” a la hora de que los vehículos entrantes realicen la maniobra de incorporación a la calzada anular lo que repercute negativamente en la capacidad de la entrada.

Pero además existen otros factores que influyen en la capacidad de una entrada. Es el caso de la presencia de vehículos pesados: éstos necesitan de un mayor intervalo de paso entre vehículos circulantes por la calzada anular para incorporarse a la misma con lo que si el número de estos vehículos es elevado la capacidad de la entrada se resiente.

El tráfico peatonal también es una variable que no puede ser obviada ya que, como es lógico, cuando el volumen de peatones que cruzan por delante de una entrada o por la salida inmediatamente posterior a ésta es importante, la capacidad de la entrada disminuye, bien sea porque los vehículos entrantes deben ceder el paso a los peatones y no pueden aprovechar todos los intervalos para incorporarse a la calzada anular, bien porque el importante flujo de peatones cruzando una salida haga que los vehículos que quieren abandonar la rotonda se

---

<sup>14</sup> En las “Conclusiones de la observación de doce glorietas de la Comunidad de Madrid” (DE LA HOZ, C. Y POZUETA, J) se indica que la aplicación de la fórmula francesa del CETUR a las glorietas estudiadas arroja resultados de capacidades teóricas significativamente inferiores a las reales cuando éstas se hallan saturadas.

detengan antes de poder hacerlo llegando a colapsarla e impidiendo la entrada de los vehículos y la circulación por la calzada anular<sup>15</sup>.

Además influyen otros factores como los ambientales (falta de visibilidad de noche o por causa de la niebla, pavimento mojado por la lluvia,...) y los llamados psicosociales que engloban toda una serie de comportamientos de los usuarios (prudencia o temeridad, cortesía para con los peatones, aprovechamiento de los intervalos entre vehículos, etc...).

### Capacidad global de una glorieta

A pesar de los argumentos en contra de la utilidad de obtener un valor de la capacidad global de una glorieta existe un caso en el que puede resultar interesante e incluso necesario conocer éste valor.

Cuando se desea implantar una glorieta de nueva construcción en una intersección (o modificar una glorieta existente) y se conoce la distribución de las intensidades de tráfico de todas las vías que llegan a ella (incluyendo los movimientos de giro) se puede realizar una modelización de la capacidad de la glorieta mediante un cálculo iterativo. De este modo se puede comprobar de antemano si la glorieta tendrá capacidad suficiente para absorber las cargas de tráfico.

Para ello se debe determinar la capacidad teórica de cada entrada en función de la intensidad de circulación anular que la corta. Luego se debe calcular la intensidad que aporta cada entrada que está condicionada por el tráfico anular que a su vez proviene de las entradas anteriores. Así pues se trata de predecir el equilibrio entre todas las intensidades de las entradas mediante un algoritmo que siga un proceso iterativo.

El proceso comienza asumiendo un tráfico nulo en un tramo de la calzada anular anterior a una entrada. Se debe tomar como intensidad de esta entrada al menor de dos valores: la capacidad de la entrada (calculada mediante la fórmula pertinente) o la intensidad de demanda. Esta intensidad de entrada, una vez restados los vehículos que abandonan la glorieta en la salida siguiente, se convierte en la intensidad de tráfico anular para la próxima entrada, cuya intensidad es igual al menor de los dos valores, intensidad de demanda o capacidad (calculada por la misma fórmula que la entrada anterior). Así se puede calcular el tráfico anular para la próxima entrada, y así sucesivamente a lo largo de toda la glorieta. Una vez completado todo un ciclo, se obtiene la intensidad de circulación anular para la primera entrada con lo que se puede determinar una intensidad de entrada revisada, que es el comienzo de la segunda iteración. Repitiendo todo el proceso y después de varias iteraciones, las intensidades de entrada de cada ramal tienden a converger hacia sus valores finales (MOPU, 1989).

### Fórmulas para el cálculo de la capacidad utilizadas en la actualidad

En la elección de un método de cálculo que resulte apropiado para determinar la capacidad de una rotonda se deben tener en cuenta un par de consideraciones previas, y que son de vital

---

<sup>15</sup> El investigador británico J.D. Griffiths desarrolló una fórmula que permite calcular la capacidad de una vía de circulación en función del tráfico de peatones que la cruza. Esta fórmula ha sido utilizada como base para calcular los efectos que un paso de peatones puede tener en la capacidad de una salida y en la de las entradas precedentes de una rotonda (ver ARAGAO, P. DE. p 58-60).

importancia para que los resultados que se obtengan sean acordes con lo que se puede esperar en la realidad:

- Las fórmulas empíricas se han obtenido a partir de observaciones y medidas de capacidad en rotondas construidas en países donde los principios y las directivas para su diseño pueden no ser las mismas que en otros países. Esto significa que la experiencia y los criterios de los ingenieros del país de origen de las fórmulas se traducen en disposiciones geométricas y otras particularidades que no tienen por que estar presentes en las rotondas proyectadas en otros países.
- El desarrollo de algunos métodos de cálculo y su validación ha sido efectuada en países en los que los automovilistas están acostumbrados a este tipo de intersección por lo que su comportamiento se encuentra, generalmente, adaptado a ellas. Esto influye en parámetros de ajuste como la longitud de los intervalos aceptados, el ralentizamiento a la entrada de la rotonda, respeto de las normas de prioridad, etc., que pueden influir en la validez de la fórmula se aplican en otros países menos acostumbrados a las glorietas.

**- Fórmula de Harders adaptada a las rotondas por el “CETE d’Aix” (Centro de estudios técnicos de Aix, Francia)<sup>16</sup>**

La fórmula de Harders sigue un modelo probabilista según los llamados **métodos de aceptación de intervalos** para estimar la capacidad de las intersecciones sin semaforizar basándose en una llegada aleatoria de los vehículos al punto de conflicto (según una distribución de Poisson). Harders considera un flujo principal y uno secundario que está a la espera de que se produzca un intervalo suficiente entre dos vehículos consecutivos del principal para unirse a éste. Para modelizar este comportamiento introduce los conceptos de **intervalo crítico** (intervalo mínimo entre dos vehículos del flujo principal para que un vehículo secundario situado justo tras la línea de ceda pueda incorporarse al flujo principal) e **intervalo complementario** (intervalo mínimo para que el segundo vehículo que está en espera pueda entrar en la intersección siguiendo inmediatamente al vehículo secundario que tenía delante y que ha encontrado un intervalo suficiente).

La aplicación de la fórmula original de Harders a las rotondas con prioridad al anillo ha resultado ser totalmente inadecuada. Ésta se corresponde con la capacidad teórica de una intersección en T para giros simples a la derecha con un intervalo crítico ( $t_c$ ) de 5,2 seg y un intervalo complementario ( $t_f$ ) de 2,7 seg y que considera que un 50% del tráfico saliente como molesto, valores todos ellos muy altos. En efecto, el porcentaje de tráfico molesto depende de la geometría del anillo de circulación y de la propia salida (a pesar de todo un 50% es un valor muy elevado), además los valores dados a los intervalos corresponden a los de una intersección en T perpendicular y no se adaptan a la geometría de las rotondas (con trayectorias de entrada más tangenciales).

Todo ello se traduce en una infravaloración de la capacidad de las rotondas. Por ello el CETE d’Aix propone una adaptación del método de Harders consistente en una elección juiciosa del valor de los parámetros intervalo crítico e intervalo mínimo en función del lugar de implantación de la rotonda y de las características del tráfico.

---

<sup>16</sup> En el Apéndice 1 que acompaña a esta tesina se incluyen ésta y las siguientes fórmulas comentadas a continuación.

La propuesta del CETE d'Aix contempla un intervalo crítico de 4,5 seg. y 2,5 seg. para el secundario. Además en el caso de rotondas de dimensiones reducidas en un contexto urbano estos valores se pueden reducir hasta 4 y 2,3 seg. respectivamente (pero siempre teniendo cuidado de la presencia de peatones que tienen una influencia importante en la capacidad). Por el contrario en el caso de rotondas sub-urbanas o periurbanas la fuerte presencia de vehículos pesados puede llevar a aumentar estos valores hasta los 5 seg. para el intervalo crítico y 3 seg. para el secundario.

También establece unas correcciones para el tráfico circulante en función de las dimensiones de la rotonda (diámetro del islote central y anchura del anillo de circulación).

#### **- Fórmula unificada de Kimber**

Es fruto de la unificación de las fórmulas empíricas obtenidas por el TRRL inglés. El TRRL propone una relación lineal entre el flujo en la entrada y el flujo anular a la derecha de ésta.

La fórmula unificada de Kimber establecida en 1980 permite calcular la capacidad de una entrada de una rotonda<sup>17</sup>.

#### **- Fórmula del SETRA para rotondas interurbanas**

También se trata de fórmulas empíricas obtenidas a partir de numerosos ensayos realizados en Francia, en su mayoría en rotondas situadas en zona peri urbana o interurbana.

Al contrario que la fórmula de Kimber, ésta considera importante el tráfico saliente, pero tiene en cuenta menos características geométricas.

El SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes) propone un método simple para el cálculo de la capacidad de una entrada que tan solo tiene en cuenta el tráfico molesto (que es una combinación del tráfico circulante y el tráfico saliente), la anchura de la entrada, de la isleta deflectora y del anillo de circulación, así como el tipo de vehículos para los que establece coeficientes de equivalencia. De todos estos parámetros el más importante es la anchura de la entrada.

Hay que señalar que pese a que la fórmula no incluye algunos parámetros como el abocinamiento o el ángulo de incidencia de la entrada esto no implica que no tengan repercusión en la capacidad.

## **2.4 Seguridad**

En este apartado se engloban diversos aspectos bajo un mismo punto de vista, el de la seguridad de TODOS los usuarios de la rotonda ya que a menudo se tiende a concebir este tipo de intersecciones únicamente desde el punto de vista de los automóviles. Sin embargo existen otros tipos de usuarios que en ocasiones no son tenidos en cuenta, lo cual agrava su situación en materia de seguridad.

---

<sup>17</sup> Hay que destacar que la fórmula unificada de Kimber no tiene en cuenta específicamente el efecto del tráfico saliente por un ramal para el cálculo de la capacidad de la entrada situada en el mismo ramal.



En el relativamente corto espacio de tiempo que llevan utilizándose, las rotondas (sobre todo las llamadas rotondas modernas o regidas por la prioridad de la calzada anular) han demostrado su superioridad en cuanto al nivel de seguridad respecto las intersecciones convencionales con o sin semaforizar<sup>18</sup>.

Esta reducción se debe, básicamente a cuatro motivos:

- La organización de la circulación en un único sentido giratorio entraña una reducción espectacular de los puntos de conflicto. No hay que olvidar que la mayoría de accidentes que se producen en las intersecciones se deben a maniobras relacionadas con los giros a la izquierda (que generalmente implican cruces de trayectorias –puntos de conflicto secantes–), maniobras que no tienen cabida en las intersecciones giratorias debido a la geometría y funcionamiento de las mismas. (Ver figura 2.1 y tabla 2.2.)
- La moderación de las velocidades impuesta, tanto en las entradas como en la calzada anular y en las salidas, que tiende a la homogeneización y que beneficia a los vehículos más lentos (como los camiones), muchas veces protagonistas de accidentes en las intersecciones convencionales.
- La pérdida de prioridad de todas las entradas (en efecto, al no priorizar ningún tráfico la rotonda acaba con todo tipo de jerarquía en las vías que confluyen en ella).
- Una mayor atención por parte de todos sus usuarios.

Tabla 2.2: Tipología de los conflictos entre trayectorias en intersecciones.

Tipo de intersección	3 brazos	4 brazos	5 brazos	6 brazos
Número de itinerarios	6	12	20	30
Conflictos por convergencia	3	4	5	6
Conflictos por divergencia	3	4	5	6
Conflictos secantes	3	16	50	120
<b>Número total de conflictos</b>	<b>9</b>	<b>24</b>	<b>60</b>	<b>132</b>

Fuente: HÉNARD

<sup>18</sup> Avalan este comentario estudios realizados en varios países sobre intersecciones convertidas en rotondas. En ellos se muestra como el número de accidentes y el de víctimas mortales se reduce considerablemente tras la implantación del nuevo tipo de intersección. Se nombran a continuación los principales estudios llevados a cabo en :

- Holanda: C. Schoon y J. van Minnen, en “The Safety of Roundabouts in the Netherlands”, publicado por el Institute for Road Safety Research en 1992 estudian 181 rotondas que antes eran intersecciones y que presentan reducciones del 51% en el número de accidentes y del 72% en la gravedad de los mismos (estas cifras son menores en el caso de los ciclistas con reducciones del 44%).
- Australia: R.T. Tudge publicó en 1990 un estudio llamado “Accidents at Roundabouts in New South Wales” realizado sobre 230 rotondas australianas que presentaron una disminución del 41% en el número de accidentes, reduciéndose asimismo su gravedad.
- Alemania: Werner Brilon analizó en 1996 34 intersecciones convertidas en rotondas modernas. Los accidentes se habían reducido un 40%.
- Francia: El Centre D’Etudes Techniques de l’Equipement de l’Ouest realizó en 1986 un estudio sobre 83 rotondas que concluye destacando las mejoras que se obtienen en materia de seguridad al cambiar una intersección convencional por una rotonda, a la vez que indica que estas mejoras se ven incrementadas por la regla de prioridad del anillo.

Los principales factores que influyen en la seguridad global de una rotonda son la visibilidad y la velocidad, pero existen muchos otros factores (relacionados o no con estos dos) que deben ser considerados en el diseño<sup>19</sup> (como por ejemplo la señalización).

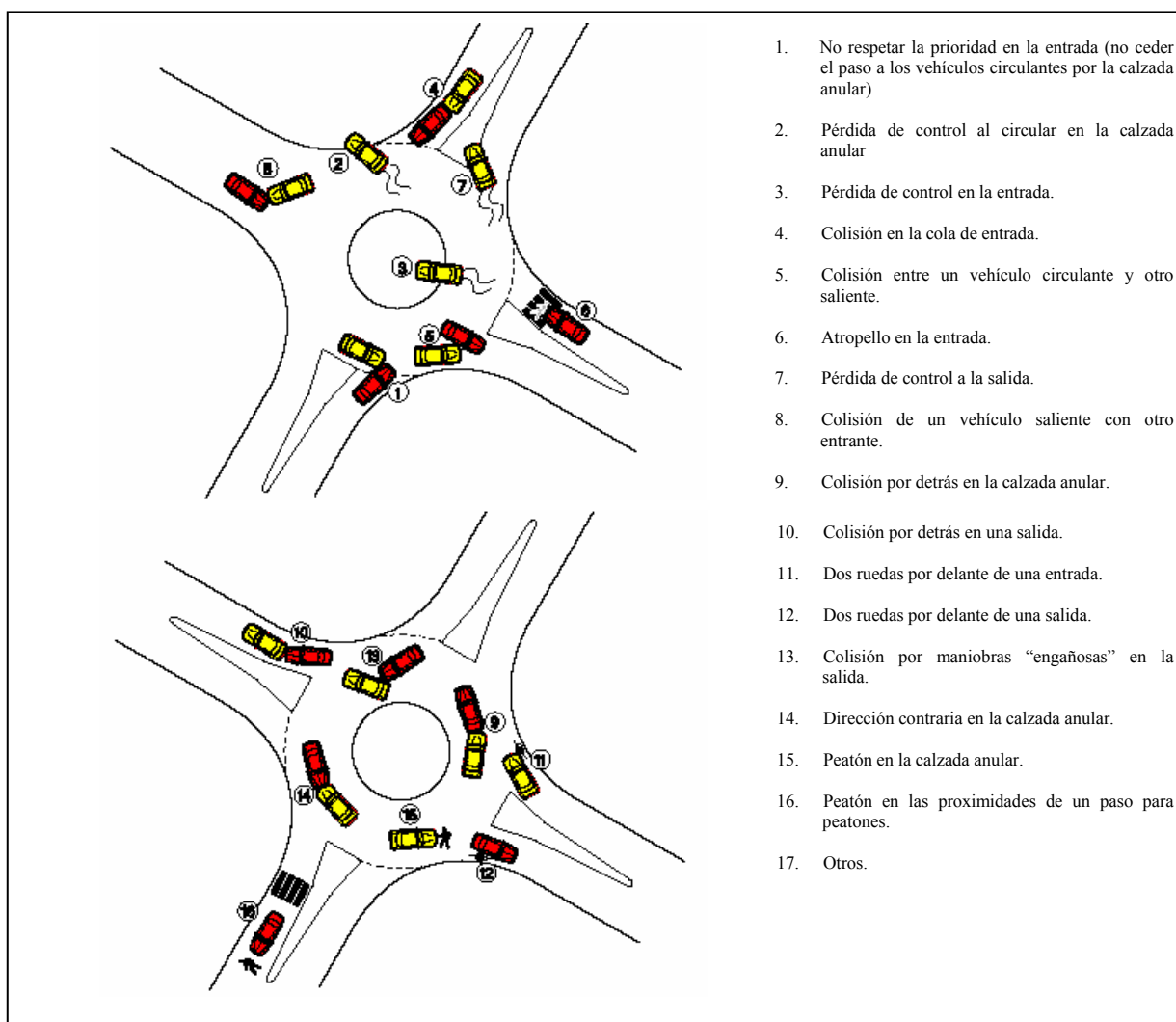


Fig. 2.24: Accidentes tipo en las rotondas. Fuente: Bared, J.G. K.Kennedy. "Safety Impacts of Modern Roundabouts" Capítulo 28, The Traffic Safety Toolbox: A Primer on Traffic Safety. Institute of Transportation Engineer. 2000.

### 2.4.1 Velocidad

El exceso de velocidad es una de las causas de accidentes más comunes. Cuanto mayor es la velocidad de un vehículo mayor será la distancia que necesita para detenerse por completo, no solo por la distancia de frenado, sino también por el espacio recorrido durante el tiempo de reacción.

Además como consecuencia del llamado efecto túnel, el campo visual de un conductor es más restringido cuando este circula a velocidades elevadas que cuando sigue una marcha más lenta.

<sup>19</sup> En 1984 G. Maycock y R.D May publicaron a través del TRRL un informe titulado "Accidents at 4-arms roundabouts" en el que se analizan las causas de los accidentes que se producen en las rotondas.

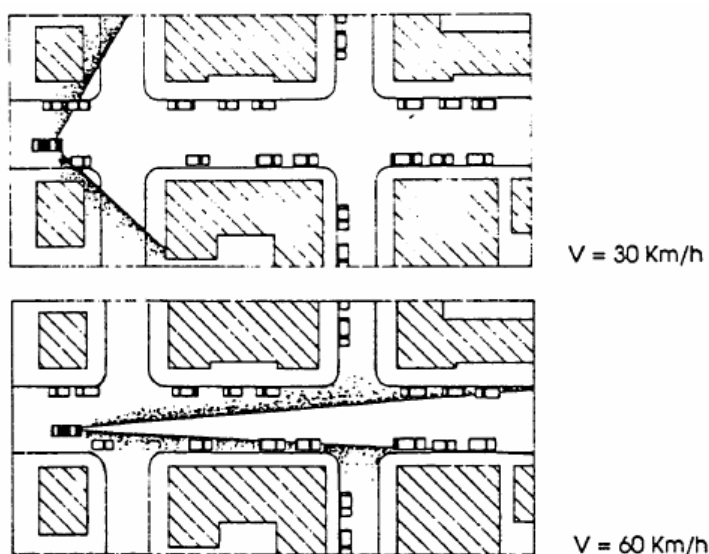


Fig. 2.25 Efecto túnel debido al aumento de la velocidad.

La gravedad de los accidentes también depende directamente de la velocidad de los vehículos implicados, y en el caso de atropellos la velocidad del vehículo juega un papel importantísimo en las consecuencias para el peatón (ver tabla 2.3).

Tabla 2.3: Consecuencias para un peatón atropellado, en función de la velocidad.

Velocidad del vehículo	Consecuencias para el peatón
0 – 20 Km/h	Contusiones leves
20 – 30 Km/h	Contusiones y lesiones sin gravedad
30 – 40 Km/h	Contusiones graves. Posibilidad de invalidez o muerte
40 – 55 Km/h	Invalidez. Con frecuencia casos mortales
+ de 55 Km/h	Casi siempre accidentes mortales

Fuente: Profesor Claude GOT, Institut de Reserches Ortopédiques de l'Hôpital R.Poicaré, en Garches (Hauts-de-Seine, Francia).

Las rotondas ejercen un efecto de reducción de la velocidad que se debe sobretodo a que sus características geométricas imponen una deflexión en las trayectorias.

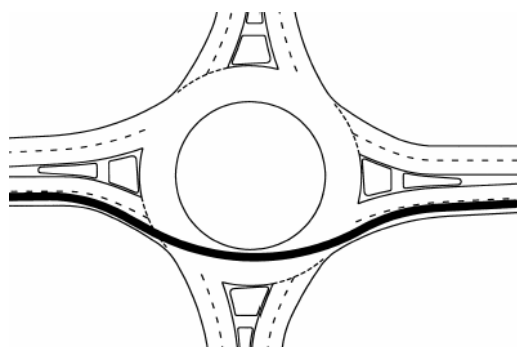


Fig. 2.26: Deflexión impuesta en las trayectorias

En efecto, la forma curva de las entradas, el radio de la calzada anular con el obstáculo que representa el islote central (que debe ser rodeado por los vehículos) y el contrarradio impuesto a la salida, son factores que obligan al conductor a modificar su trayectoria, no para evitar una colisión con otros vehículos sino por su propio instinto de seguridad que le impulsa a no salir de la vía de circulación y a esquivar los obstáculos.

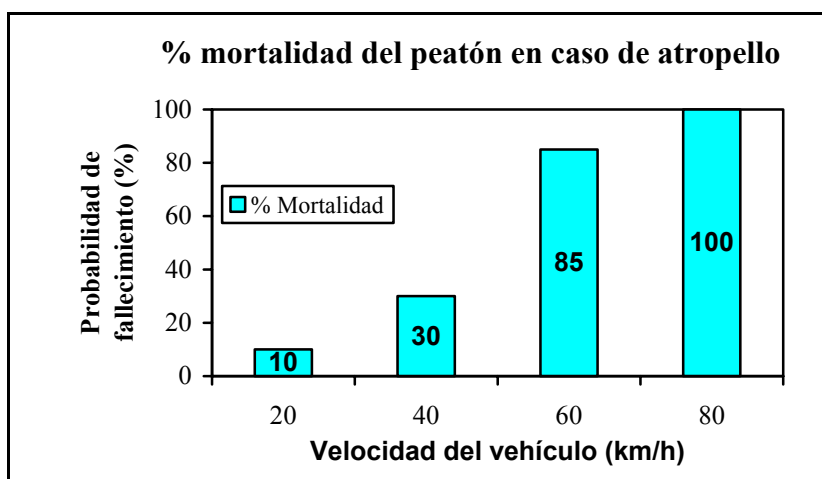


Fig. 2.27: Porcentaje de mortalidad en atropellos en función de la velocidad  
Fuente: SANZ ALDUÁN, A.

La regla de prioridad en el anillo refuerza aún más esta reducción de la velocidad en la aproximación a las entradas pues los vehículos que se acercan a la intersección deben reducir su velocidad para controlar el tráfico que circula por la calzada anular y en caso de ser necesario, poder detenerse a tiempo para cederle el paso.

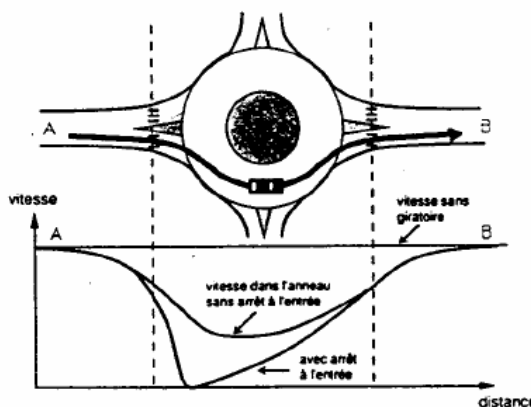


Fig. 2.28: Reducción de la velocidad a la entrada en una rotonda.

### 2.4.2 Visibilidad

La visibilidad es importante para la seguridad desde diferentes perspectivas. Por un lado es necesario que la rotonda sea reconocible a distancia suficiente de manera que los conductores puedan adecuar su velocidad. La rotonda debe ser visible tanto de día como de noche, por lo que un correcto alumbrado es fundamental para la visibilidad nocturna en la rotonda.

También es deseable que el tratamiento paisajístico del conjunto de la intersección contribuya a su reconocimiento como intersección giratoria desde una cierta distancia.

Por otro lado es de vital importancia que los vehículos que llegan a las entradas tengan visibilidad suficiente, tanto hacia la izquierda como hacia la derecha, para apreciar la presencia y las velocidades de los otros usuarios y maniobrar en consecuencia, por lo tanto se debe procurar que las plantaciones o el propio desarrollo de las edificaciones (en zona urbana) no actúen como obstáculos que limiten esta visibilidad.

En las zonas en las que exista tráfico peatonal se debe procurar que los pasos de peatones sean visibles por los vehículos que circulan por la calzada anular antes de realizar la maniobra de salida.

### **2.4.3 Facilidad de comprensión**

La seguridad de una rotonda también depende en gran medida del grado de comprensión que sus usuarios adquieran sobre su funcionamiento. Es por ello que la búsqueda de soluciones o métodos que hagan más comprensible la intersección giratoria es un elemento clave en la seguridad de los que la utilizan.

Hoy en día utilizar una intersección giratoria ya no nos supone ninguna novedad pues la mayoría de conductores cree estar acostumbrado a ellas, sin embargo son frecuentes diversos tipos de comportamientos inadecuados que empeoran la seguridad<sup>20</sup>, además durante los primeros días de uso de las rotondas de nueva construcción algunos conductores pueden desorientarse con relativa facilidad.

Es por eso por lo que es importante una correcta “legibilidad” de la intersección giratoria en tres niveles:

- Un primer nivel de comprensión del funcionamiento de las rotondas en general y del comportamiento que se debe seguir para realizar una maniobra en particular y que puede verse reforzado por la señalización, pero sobretodo mediante campañas de educación vial y concienciación de la población.
- El segundo nivel radica en la identificación de la intersección como giratoria que podríamos llamar de “percepción de aproximación”. Es trabajo del proyectista que a medida que los conductores se aproximen a una intersección se vea y se entienda si ésta es una rotonda para que así puedan adaptar su comportamiento y reducir la velocidad. Se consigue mediante señalización vertical y horizontal, iluminación, tratamiento paisajístico tanto del islote central como del entorno de la rotonda, y también mediante la corrección en el trazado no solo de la propia rotonda sino también de los accesos.
- Por último existe la comprensión particular o interna de la rotonda en concreto, su geometría y su funcionamiento así como los itinerarios posibles. Para ello el proyectista se sirve de la utilización de señales de orientación como carteles esquema y carteles flecha que sean simples y a la vez garanticen una comprensión instantánea de la información que contienen.<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> Ver el apartado 2.2.4 “comportamiento de los usuarios”.

<sup>21</sup> Hay que recordar que se pretende mejorar la seguridad: si estos carteles no dieran una información clara e inmediatamente entendible podrían provocar la confusión de algunos conductores lo que aumenta el riesgo de accidente en la rotonda.

#### **2.4.4 Medidas para acomodar tráfico especiales**

A menudo se tiende a infravalorar la presencia de otro tipo de usuarios que no sean vehículos automóviles de cuatro ruedas con la incidencia que este hecho tiene en el diseño de las mismas. Sin embargo los problemas de seguridad asociados a vehículos de dos ruedas, peatones y vehículos largos o pesados no deben ser menospreciados ya que representan un elevado porcentaje de los accidentes acontecidos en este tipo de intersecciones a pesar de no ser el tipo de usuario más numeroso.

La problemática derivada de la presencia de peatones y ciclistas es más común en las áreas urbanas y periurbanas, por lo que me remito al capítulo de esta misma tesina dedicado a las rotondas urbanas, en el que se trata los problemas que provoca la presencia de este grupo de usuarios más débiles.

Evidentemente las rotondas interurbanas también son susceptibles de ser utilizadas por ciclistas y peatones. En esta situación se debe estudiar cada caso por separado ya que la solución que se debe aportar depende en gran medida de la continuidad o la discontinuidad en la llegada de automóviles a la intersección y del volumen de tráfico peatonal o de dos ruedas esperados.

Las medidas que se pueden tomar van desde no realizar ninguna actuación hasta la instalación de pasos a distinto nivel o semáforos que funcionan cuando son pulsados.

El caso de los vehículos pesados tiene otro tipo de influencia en la seguridad. En general, este tipo de vehículos es más lento que el resto por lo que se pueden producir situaciones de inseguridad cuando éstos se incorporan al flujo anular con un intervalo ajustado.

Sin embargo existe otro tipo de problema: el de los vehículos pesados que vuelcan o pierden su carga en glorietas. Aún no se ha hallado una relación clara de estas situaciones con el diseño de las rotondas. Mientras que los accidentes con víctimas para este tipo de vehículo son escasos, son mucho más frecuentes los accidentes con sólo daños a terceros. La pérdida de la carga causa frecuentemente gran congestión, demoras y gastos de limpieza, especialmente en las intersecciones más importantes.

La experiencia<sup>22</sup> demuestra que donde se presentan estos problemas se dan una o varias de las siguientes circunstancias:

- Inadecuada inflexión de entrada, que conduce a altas velocidades.
- Largos tramos rectos en la calzada anular, que conducen a curvas inesperadas y cerradas.
- Giros bruscos a la salida.
- Cambios bruscos en la pendiente transversal de la calzada anular.
- Contraperalte en la parte exterior de la calzada anular.

Para algunos tipos de vehículos se presentan estos problemas aun a bajas velocidades<sup>23</sup>.

---

<sup>22</sup> “Recomendaciones sobre Glorietas”. MOPU, Mayo de 1989.

<sup>23</sup> Han volcado vehículos articulados cuyo centro de gravedad estaba a más de 2,5 m del suelo, con radios de 20 m a una velocidad tan baja como 25 km/h.