

Análisis por microsimulación de las mini-rotondas urbanas

Julián Rivera, j. j.¹, Gustavo A. Das Neves, G. A.², Villanueva, M.³ y Rolón F. R.⁴

Fecha de recepción: 10 de marzo de 2008 – Fecha de aceptación: 25 de noviembre de 2008

RESUMEN

Las mini-rotondas son unas de las soluciones viales en intersecciones urbanas incluibles en las “soluciones para la seguridad vial de bajo costo”. Se trata de mini-rotondas como las rurales, insertas en una trama urbana, pero con mucho menor diámetro en la isleta central y, por lo tanto, un comportamiento diferente ante los cruzamientos de tránsito. Esto hace que su campo de aplicación y diseño sean diferentes y, por ello, deban ser analizados en forma particular. Además, por ser soluciones que llegan del orden internacional, su empleo debe efectuarse contemplando la normativa local y otras particularidades de orden técnico. Estas condicionantes se repiten en otros tipos de soluciones para la seguridad vial. Atento a esto el LEMaC (Centro de Investigaciones Viales de la Universidad Tecnológica Nacional La Plata), con el apoyo de Peugeot-Citroën de Argentina ha redactado un proyecto de investigación y desarrollo incluido en el Programa de Incentivos de la Nación denominado “Empleo de microsimulación de tránsito para análisis de soluciones viales”. Mediante éste se busca analizar y adaptar diversas soluciones viales a los condicionantes propios de la Argentina y estudiar sus potenciales campos de aplicación y características imponibles mediante el empleo de moderno software de micro-simulación. Se incluyen en este trabajo las conclusiones arribadas mediante el citado proyecto para el empleo de mini-rotondas urbanas, las cuales toman en consideración los rangos de tránsito para los cuales resultan la alternativa óptima desde el punto de vista técnico-económico.

Palabras clave: soluciones viales urbanas, microsimulación de tránsito, seguridad vial

Micro-simulation analysis of urban mini-roundabouts

ABSTRACT

Mini-roundabouts are one of the solutions in urban road intersections, regarded as one of the "inexpensive solutions to road safety". These urban mini-roundabouts are like rural roundabouts, but embedded in an urban frame, with much smaller diameter in its central island and, therefore, different behavior of the crossing traffic. This makes their scope and design different, and therefore they should be discussed in particular. Furthermore, as they are solutions of the international order, its use must be made considering local codes and other unique technical features. These constraints are repeated in other types of solutions to road safety. Mindful of this, the LEMaC (Roads Research Center of the National Technological University of La Plata), with the support of Peugeot-Citroën of Argentina has drafted a study included in the Incentive Program of the Nation entitled "Use of micro-simulation traffic analysis for road solutions". This study deals with the analysis and adaptation of road solutions to the road specific conditions of Argentina, and studies their potential fields of application and specifications, using modern micro-simulation software. This work shows the conclusions obtained through that project for the use of urban mini-roundabouts, including the range of transit for which they are the best technical-economic alternative.

Keywords: Urban road solutions – traffic micro-simulation - road safety

¹ Sub-director del Centro de Investigaciones Viales. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata, Argentina. E-mail: jrivera@frlp.utn.edu.ar

² Investigador del Centro de Investigaciones Viales. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata, Argentina.

³ Becario del Centro de Investigaciones Viales. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata, Argentina.

⁴ Becario del Centro de Investigaciones Viales. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Los aumentos en los niveles de movimientos de cargas y personas registrados en los últimos años, son sólo un indicio de la importancia que tiene, y tendrá en el futuro, el transporte para el desarrollo de una región (Wahr C., 2003). Este crecimiento se ha traducido en un aumento de la demanda en los diversos medios de transporte, entre los cuales se destaca el terrestre automotor, con la consecuente puesta en juego de un factor muy importante, la “seguridad vial”.

Por su parte, las cada vez más amplias facilidades ofrecidas por la computación, han favorecido a la aparición de complejas técnicas resolutorias para las diversas problemáticas que se originan sobre la red vial. Por esto en la actualidad resulta habitual, si no necesario, el desarrollo de proyectos de seguridad vial para obras viales que tratan en forma simultánea y en un área reducida temas tales como: diseño geométrico especial, semaforización actuada, señalamiento activo, estacionamiento público, paradas de transporte público, segregación de tránsito, etc. (Vidal Roca, 2007).

Cada uno de estos aspectos posee una técnica resolutoria distinta, que incluso muchas veces proceden de instituciones o normalizaciones diferentes. Así, se torna factible la pérdida de confiabilidad en la obtención de los resultados buscados, ya que la situación excede a los pronósticos que por experiencias previas pueda efectuar el proyectista. Por esto han aparecido en los últimos años programas computacionales que permiten la micro-simulación de una zona en estudio previo a la obra vial, durante su ejecución y su operación, permitiendo el reajuste de los diseños implementados y la optimización de las soluciones de seguridad vial (Vidal Roca, 2007).

Es necesario por consiguiente el análisis de estos programas de micro-simulación; el desarrollo de una metodología de levantamiento de datos tipificada, adaptada a las técnicas habituales de los proyectistas viales de nuestra región; la micro-simulación de diversas opciones de soluciones viales para la seguridad vial; y la generación de un manual en donde se vuelquen los resultados obtenidos en estas experiencias, para que sean aprovechados por reparticiones públicas o privadas de la Argentina (Rivera J., 2007).

Buscando cubrir estas tareas el LEMaC, con el apoyo de la empresa Peugeot-Citroën, ha redactado un proyecto de investigación y desarrollo denominado “Empleo de micro-simulación de tránsito para análisis

de soluciones viales” a ser incorporado en el Programa de Incentivos del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación Argentina.

Se incluyen en este trabajo las conclusiones arribadas mediante el citado proyecto para el empleo de mini-rotondas urbanas.

METODOLOGIA

Para el citado proyecto se ha establecido un listado de tareas entre las cuales se encuentra la redacción de un catálogo de soluciones viales urbanas para la seguridad vial (Rivera J., Das Neves G., 2007).

Se encuadran dentro de este grupo aquellos elementos o dispositivos de seguridad vial aplicables en puntos conflictivos, donde estudios preliminares arrojen niveles preocupantes de accidentes, lo cual hace indispensable la toma de medidas correctivas. Como alternativa a los proyectos de infraestructura que demandan grandes presupuestos, existe una gama de medidas llamadas de ingeniería de bajo costo a las que se las puede definir como “*las medidas físicas tomadas especialmente para aumentar la seguridad del sistema viario que se caracterizan por tener un bajo costo económico, rápida implementación y alta tasa de rentabilidad*” (Asociación Española de Carreteras).

Entre estos elementos se destacan las mini-rotondas, las que instaladas en intersecciones se constituyen en herramientas encauzadoras del flujo vehicular, basándose en la circulación de todos los vehículos por una calzada anular en la que confluyen las diferentes vías, que discurre en torno a una isla central o islote central y que funciona con prioridad a los vehículos que circulan por la calzada anular.

El islote central es de pequeño diámetro, cercano a los 4 m, dependiendo de que las características del entorno permitan su adecuada percepción. Se recomienda construirlo abombado, con materiales diferentes a los de la calzada. No puede haber actividad peatonal en la isla central. La reducción de la velocidad que consiguen en la circulación se produce, en gran medida, por la percepción que tienen los conductores de la existencia de un obstáculo en su camino (el islote central), que les obliga a frenar, para desviar su trayectoria y rodearlo. Es decir, las mini-rotondas, en tanto que son reductores de la velocidad, actúan básicamente por la percepción visual del obstáculo que suponen al tránsito. De ahí, la importancia que tiene en ellas una buena visibilidad en sus accesos (MIDEPLAN, 1998). El desarrollo de un buen aspecto estético y a la vez efectivo de una mini-rotonda, debe formar parte del proyecto de

trazado de la misma, ya que ayuda al conductor a apreciar la existencia de la intersección y por consiguiente a ajustar su velocidad y trayectoria. Por ejemplo, un contraste en color y configuración con islas cubiertas de hierbas o con plantaciones de

grupos de arbustos que destaquen a distancia, avisa al conductor que se aproxima a la mini-rotonda y que necesita reducir la velocidad. La única precaución que hay que tener en cuenta es que las plantaciones no reduzcan la visibilidad necesaria.



Figura 1. Demarcación de una mini-rotonda

Las mini-rotondas, con la pérdida de prioridad que imponen a todas las vías que en ellas confluyen, son intersecciones muy adecuadas para marcar cambios en el régimen de circulación. En particular resultan muy útiles:

- En zonas urbanas para intersecciones a las cuales llegan tres y más brazos; en donde existen muchos conflictos de giro a la izquierda; y donde las velocidades de circulación no superan los 50 Km/h.
- Como reductores de velocidad, en general.



Figura 2. Encauzador vehicular con rebaje peatonal

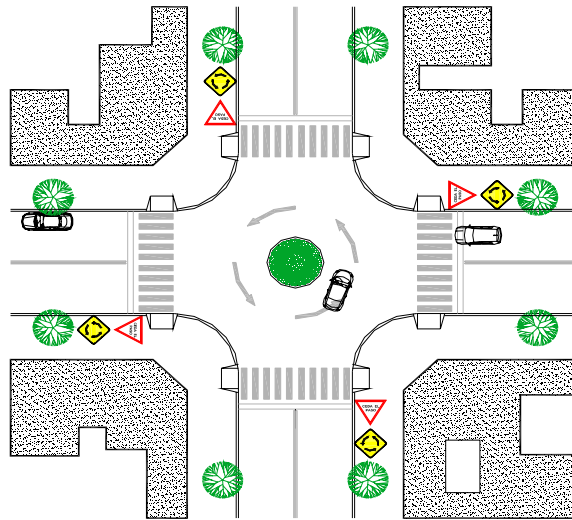


Figura 3. Señalamiento de una mini-rotonda (Fuente: elaboración propia)

Las mini-rotondas requieren señales informativas y preventivas, etc, reflectantes o preferiblemente iluminadas, ellas desempeñan un papel preponderante en la seguridad del tránsito, en especial cuando es necesaria una reducción de velocidad en los accesos (Cal y Mayor R., 2004).

Corresponde que su demarcación horizontal sean tres o cuatro flechas blancas de dirección del círculo. Deben estar desde su borde interior al borde de la isla a una distancia de aproximadamente el doble del

diámetro de la isla pero no inferior a 1,25 m ni mayor que 3 m.

Por su parte, su señalización vertical se materializa por una señal que posee un círculo formado por tres flechas sucesivas indicando sentido de giro contrario al de las agujas del reloj. La señal debe estar a una distancia tal de la mini-rotonda de modo que el vehículo de mayor velocidad pueda detenerse totalmente antes de la misma (aunque la detención no sea necesaria). Esta señal complementa con una señal reglamentaria de Ceda el Paso.



Figura 4. Señal preventiva de rotonda



Figura 5. Señal reglamentaria de ceda el paso

Para determinar el campo de aplicación óptimo de las mini-rotondas se decide efectuar un análisis empleando el software comercial de micro-simulación de tránsito TSIS 5.0 (Traffic Software Integrated System) de la FHWA (Federal Highway Administration). Este software, de uso difundido entre los profesionales de la Ingeniería de Tránsito, permite modelar obras viales y simular sobre ellas el tránsito de diversas características para obtener así indicadores en cuanto a la calidad de la circulación, integrando además una interfase gráfica que simplifica el posterior análisis visual.

Para esto se establecen una serie de parámetros fijos para la simulación, otros variables y finalmente los indicadores que permiten desde ese punto de vista saber cuando una solución es óptima. Si bien los índices accidentológicos no son incluidos explícitamente como indicadores, si lo son de forma implícita a buscar parámetros de "circulación segura". Los casos en estudio propuestos por los autores para el análisis comparativo son:

- Intersección normal
- Mini-rotonda de un carril
- Mini-rotonda de dos carriles

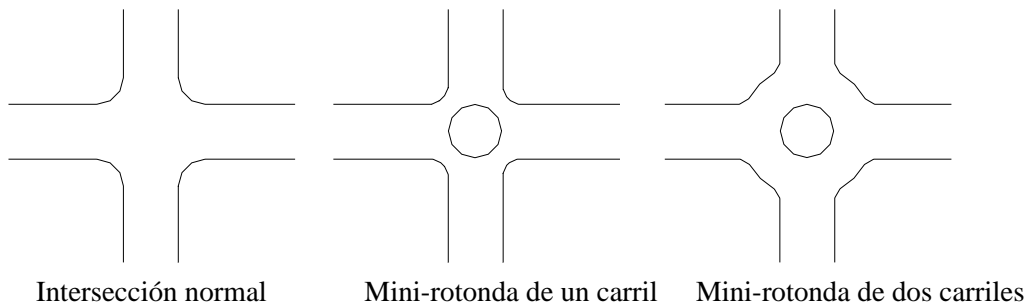


Figura 6. Casos de estudio propuestos para el análisis

Los parámetros fijos para todas las corridas de la simulación y para todos los casos en estudio, seleccionados para esta investigación por las razones que se detallan en cada uno de ellos, son:

- Tránsito de sólo automóviles con longitud de 4,3 m y máxima desaceleración en emergencia de $4,6 \text{ m/s}^2$ y en situaciones de no emergencia de $2,4 \text{ m/s}^2$. Estas son características medias de los automóviles del parque automotor argentino. Además se ha fijado el análisis en sólo automóviles como una simplificación, ante tránsitos con otra clasificación el empleo de las tablas resultantes deberá efectuarse tomando vehículos equivalentes para cada categoría, de forma tal de llevar el tránsito real a autos equivalentes.
- Ingreso de los vehículos al sistema en intervalos con distribución normal, por la simplificación del análisis estadístico que conlleva la misma.
- Intersección de vía principal de dos sentidos con un carril por sentido y vía secundaria de idéntica geometría.
- Vía principal y secundaria sin carriles de estacionamiento, con velocidad de flujo libre de 40 km/h (máxima admisible para vías de estas características según la Ley Nacional de Tránsito 24.449) y anchos de carril 3,65 m, habitual en la red vial argentina.
- Solo giros a la izquierda en intersección (por hipótesis los autores consideran a los giros a la derecha con idéntico efecto de cruces francos de la intersección).
- Tiempo de simulación 1 hora.
- Configuración básica de intersección sirviendo a 4 cuadras de 100 m cada una, configuración típica de la red vial urbana argentina.

Los parámetros variables establecidos por los autores para el estudio, en valores típicos de análisis similares (Navin F., 1993), son:

- Volúmenes horarios cada 200 veh/h por sentido (igual volumen en sentidos contrario de una misma vía), analizándose 100, 300, 500, 700 y 900 veh/sentidoxhora, considerados flujos de hora pico para el ingreso posterior a las tablas resultantes. Estos valores permiten el análisis de los volúmenes habituales en vías con las características de las seleccionadas.
- Giros a la izquierda para un mismo volumen de tránsito cada 20 %, analizándose para los grupos de 0 % a 20 %, 20 % a 40 %, 40 % a 60 %, 60 % a 80 % y 80 % a 100 %.

Los parámetros indicadores seleccionados por los autores luego de algunas corridas de ensayo son:

- Tiempo Total (TT), constituido por la sumatoria del Tiempo de Recorrido (TR) de todos los vehículos simulados desde el ingreso hasta la salida del sistema y el Tiempo de Demora (TD) de estos mismos vehículos (por detenciones o por tramos en donde no pueden alcanzar la velocidad máxima de flujo libre establecida).

RESULTADOS

Una vez efectuada la totalidad de las corridas, con los resultados obtenidos, pueden realizarse las siguientes observaciones:

- En la situación sin proyecto existen menores demoras cuando aumentan los giros a la izquierda desde ambos lados, pues el programa considera que dos vehículos girando a la izquierda desde sentidos contrarios en una misma intersección pueden efectuar esta maniobra simultáneamente, como se observa en la Figura 7. Esto no sería admisible en intersecciones de vías poco anchas, pero se incluyen los resultados obtenidos en estos casos pues de todos modos resultan indicativos del comportamiento esperable.

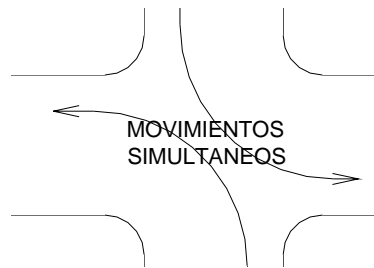


Figura 7 – Maniobra de giro a izq. Simultáneo

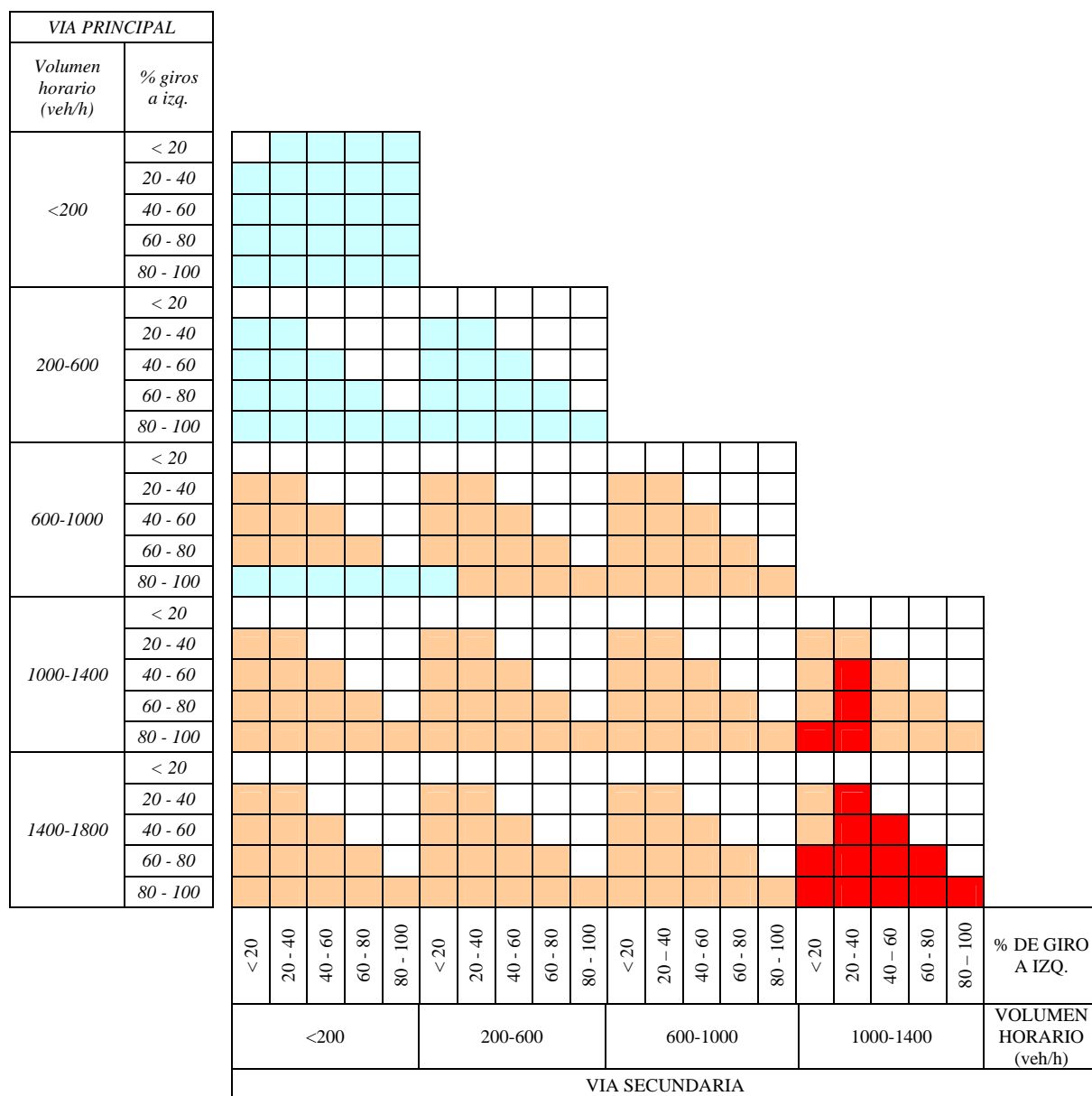
- Para el análisis deben llevarse las comparaciones a términos monetarios. Para esto, tomando un costo de operación medio por recorrido de 0,50 \$/km (considerar aproximadamente \$ 3,1 por cada 1 dólar estadounidense), calculado para el estudio como el aporte de los costos unitarios de combustible, lubricantes, neumáticos, etc. (Banco Mundial, 2002), y un recorrido de 40 km/h, en función de la velocidad máxima de flujo libre buscada, se puede considerar un costo por recorrido de 20 \$/hora para los vehículos en hora pico dada por los volúmenes con que se ingresa al cuadro.
- Partiendo de una intersección normal ya pavimentada (hipótesis del estudio) y que, en función del mercado actual, para la mini-rotonda de un carril se tiene un costo aproximado de \$ 250.000 y para la de dos carriles de \$ 350.000 (aproximadamente 250 \$/m² por pavimentación, más demolición, señalización y demarcación). Una vida útil de la obra de 15 años de 52 semanas de 5 días típicos con 6 horas “pico” en las cuales es justificable la obra (tres por la mañana y tres por la tarde), se tiene un costo por hora de \$ 10 para la mini-rotonda de un carril y de \$ 15 para la de dos carriles. Para el análisis no se incluyen los conceptos de mantenimientos ni beneficios en el tiempo, lo que implicaría el empleo de tasas de descuento para llevar los valores monetarios al año 0, por ejemplo.
- La elección se basará en tomar el menor costo total (costo por recorrido más costo de obra) entre las tres alternativas (se analiza el costo de recorrido por hora por el TT más el costo de la obra por hora).
- Considerando todo lo expuesto se generan las corridas de simulación para los parámetros fijos establecidos, en cada una de las combinaciones de parámetros variables, tanto para la intersección normal, la mini-rotonda de un carril y la mini-rotonda de dos carriles. Con estos resultados se confecciona la Figura 8 de resumen. En esta figura se observan en las dos primeras columnas a la izquierda la combinación de volumen horario (veh/h) simulado para la vía principal, y para ese

mismo volumen los distintos porcentuales de giros a la izquierda (%) límites de la fracción analizada. Por ejemplo si el volumen horario de la vía principal fuera de 450 veh/h con un porcentaje de giros a la izquierda del 25 %, correspondería entrar en volumen horario 200-600 (entre 200 y 600) y % giro a izquierda 20-40 (entre 20 y 40). Se observa además para las dos últimas filas un análisis análogo para la vía secundaria, detallándose para ésta el volumen horario (veh/h) y el porcentaje de giros a la izquierda (%). Combinando la situación de volumen de tránsito y giro a izquierda tanto para la vía principal como para la secundaria, se genera cada una de las celdas que conforman la matriz, las cuales se han coloreado en celeste si la intersección normal resulta la más económica en términos de costos totales frente a las mini-rotondas de uno y dos carriles, en amarillo si la más económica resulta la mini-rotonda de un carril y en naranja si es más económica la mini-rotonda de dos carriles. Además se ha identificado con rojo aquellos casos en los cuales, si bien la mini-rotonda de dos carriles resulta la más económica de las tres, conlleva costos muy por encima de los que venía mostrando hasta ese nivel, esto se debe a altos costos de recorrido generados por demoras excesivas, claro signos de una circulación cercana a la congestión.

- En esta misma Figura 8 se observa cómo ante volúmenes bajos en ambas arterias los costos de la intersección normal son menores que con la inclusión de la mini-rotonda, pero al incrementarse los mismos y los porcentajes de giro comienzan a ser más económicas las mini-rotondas, hasta que éstas llegan a su capacidad. Aunque en un principio la mini-rotonda de un carril ofrece menores costos que la de dos carriles, cuando deja de ser óptima la intersección normal ya es la mini-rotonda de dos carriles más económica que la de un carril. Por esto puede deducirse que de incluirse una mini-rotonda en la intersección, ésta debe ser directamente de dos carriles.
- Luego de este estudio comparativo se efectuaron nuevos ensayos variando los costos por recorrido en un ± 20 % y los costos por obra en ± 10 % para

analizar la sensibilidad de la metodología empleada según lo recomendado (Vidal Roca, 2007), obteniéndose resultados similares en cada experimento. La Figura 9 se obtiene al resumir la comparación de los resultados de costos totales

obtenidos en el estudio luego del análisis de sensibilidad, ante una misma condición de parámetros fijos y variables para una intersección normal, una mini-rotonda de un carril y una mini-rotonda de dos carriles.



Referencias:

- Solución óptima intersección normal
- Solución óptima mini-rotonda de un carril
- Solución óptima mini-rotonda de dos carriles
- Solución óptima mini-rotonda de dos carriles cercana a la congestión

Figura 8. Cuadro de resultados del estudio obtenidos por simulación

Volumen horario pico vía principal (veh/h)	1400-1800				
	1000-1400				
	600-1000				
	200-600				
	<200				
		<200	200-600	600-1000	1000-1400
		Volumen horario pico vía secundaria (veh/h)			

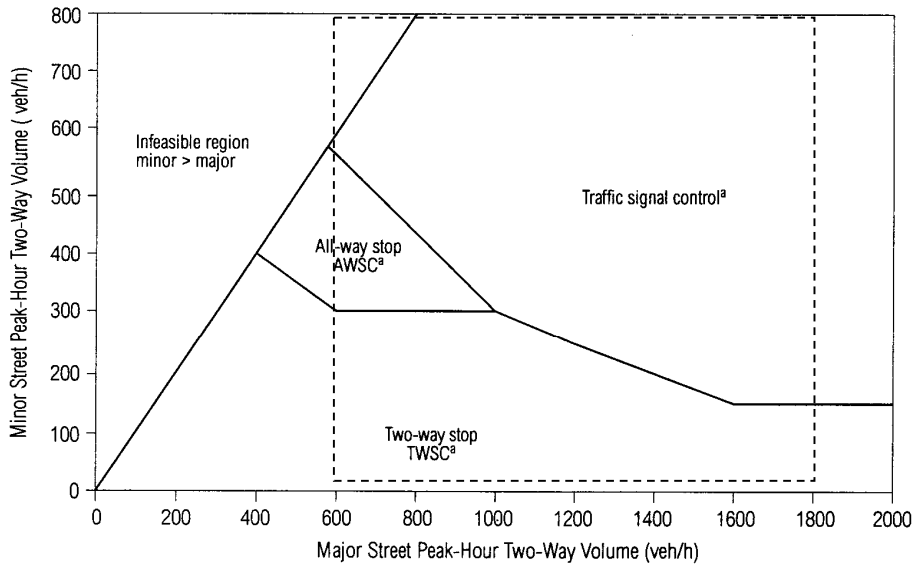
Referencias:

- Intersección normal es solución óptima
- Mini-rotonda de 2 carriles es solución óptima
- Mini-rotonda de 2 carriles es solución óptima pero en estado cercano a la congestión

Figura 9. Campo de aplicación para intersección normal y mini-rotondas de 2 carriles, según los resultados del estudio

Los volúmenes óptimos para las mini-rotondas obtenidos (cuadro de trazos discontinuos) son amplios y engloban los recomendados por el Highway

Capacity Manual (Transportation Research Board, 2000).



Notes

a. Roundabouts may be appropriate within portion of these ranges.

Source: Adapted from *Traffic Control Devices Handbook* (8, pp. 4-18) - peak-direction, 8-h warrants converted to two-way peak-hour volumes assuming ADT equals twice the 8-h volume and peak hour is 10 percent of daily. Two-way volumes assumed to be 150 percent of peak-direction volume.

Figura 10. Campo de aplicación de las mini-rotondas según HCM

En la Figura 10 se observa en la nota el área destinada a AWSC (all-way stop control) que puede ser

adecuada para la aplicación de mini-rotondas (roundabouts) y combinaciones de giros en donde el uso de señales de ALTO en dos sentidos (two-way stop control) y semáforos (traffic signal control).

Básicamente las diferencias en los volúmenes óptimos se deben a que en este estudio las mini-rotondas analizadas cuentan con dos carriles (por las razones ya explicadas), y en las detalladas en la Figura 10 se han considerado sólo mini-rotondas de un carril, agregándose además la siguiente frase "...las experiencias con mini-rotondas multi-carriles en EEUU son insuficientes para establecer un procedimiento de análisis... si es necesario establecer capacidades en estos casos, deberán emplearse modelos particulares para mini-rotondas...". (Transportation Research Board, 2000).

CONCLUSIONES

- Es posible determinar los flujos de tránsito para los cuales una mini-rotonda es viable y segura en un análisis preliminar mediante el empleo de software de micro-simulación.
- Cuando las mini-rotondas de un carril comienzan a ser económicamente viables frente a las intersecciones normales ya existentes, las mini-rotondas de dos carriles ya resultan más

económicas, razón por la cual no se recomienda el empleo de las primeras.

- Si bien fue necesario fijar algunas variables de borde y emplear costos locales, los resultados obtenibles en análisis similares en otros países no deberían variar ampliamente de los alcanzados en este estudio, por lo que, siempre a nivel preliminar, es posible emplear los resultados obtenidos como indicativos del campo de aplicación de las mini-rotondas de dos carriles. Esta afirmación se sustenta además en el análisis de sensibilidad efectuado sobre la metodología al variar los costos por recorrido y por obra.
- Para obtener una herramienta, adaptada a los condicionantes locales, que permita conocer la solución segura económicamente óptima, entre la gama de soluciones existentes, para una combinación de volúmenes horarios de tránsito, se debe extender el análisis efectuado a las otras soluciones disponibles (objetivo principal de este proyecto de investigación y desarrollo).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banco Mundial (2002), "Ciudades en movimiento", TWU-44.
- Cal y Mayor (2004), "Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y transporte", Alcaldía Mayor de Bogotá, Colombia.
- Cal y Mayor R., Cárdenas J. (1995), "Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones", Alfaomega, México.
- Hay W. (1998), "Ingeniería de transporte", Limusa, México.
- ITT (2001), "TSIS user guide", FHWA, EEUU.
- MIDEPLAN (1998), "Recomendaciones para el diseño del espacio vial-urbano (REDEVU)", Ministerio de Planificación y Cooperación, Chile.
- Navin F. (1993), "The science, engineering and practice of land transport", University of British Columbia, Canada.
- Rivera J. (2007), "Memoria de experimentos sobre rotondas", Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
- Rivera J., Das Neves G. et al (2007), "Diseño de soluciones viales rurales y urbanas. Empleo de micro-simulación", Universidad Tecnológica Nacional, ISBN 978-950-42-0086-4, Argentina.
- Sociedad Argentina de Ingeniería de Tránsito (1989), "2º Reunión de la Ingeniería de Tránsito", Equitel S.A., Argentina.
- Transportation Research Board (2000), "Highway Capacity Manual 2000", National Research Council, EEUU.
- TRRL (1995), "Overseas Development Administration", TRRL, Inglaterra.
- Vidal Roca (2007), "Aplicación de modelos de micro-simulación en la ingeniería de tránsito", Revista Vial, ISSN 0329-1146, N°56 pág. 82-85, Argentina.
- Wahr C. (2003), "Vialidad II", Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

Este documento se debe citar como:

Julián Rivera, j. j., Gustavo A. Das Neves, G. A., Villanueva, M. y Rolón F. R. (2008). **Análisis por microsimulación de las mini-rotondas urbanas**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-3, pp. 33-41, ISSN: 1665-529X.