

ROTONDAS EN CHILE: MODELACION PRELIMINAR

Juan Enrique Coeymans

Departamento de Ingeniería de Transporte
Pontificia Universidad Católica de Chile

y

Sergio J. Aguayo
Sonda Ltda.

Resumen

El empleo de rotondas en Chile ha sufrido el impacto producido en el mundo por el cambio en las reglas de operación a partir de la década del 60.

La necesidad de conocer cual es el real comportamiento de las rotondas en nuestro país a fin de explicar capacidades y demoras, motivó la puesta en marcha de una serie de investigaciones al respecto, de las cuales este trabajo es una síntesis de los primeros resultados.

El trabajo describe los acercamientos más importantes al problema de modelar las rotondas en el mundo, centrándose principalmente en las investigaciones inglesas.

Se explica las razones para optar por el acercamiento del TRRL, y la forma de realizar los experimentos en Chile, a fin de calibrar curvas para el país, así como el procesamiento y tratamiento de la información recogida,

Junto con los resultados más relevantes producidos en términos de tipos de curvas seleccionadas, vehículos equivalentes promedio producidos, y curvas ajustadas, se entrega una comparación con experiencias análogas.

Finaliza el trabajo con las principales conclusiones a fin de perfeccionar los resultados y continuar las investigaciones.

1. Introducción

1.1. Antecedentes preliminares

El empleo de rotondas como mecanismo de control de intersecciones tiene una larga historia. Desde comienzos de siglo (Laurence, 1980), y aun antes, ya existían famosos lugares en el mundo que operaban como rotondas, el Columbus Circle en Nueva York, la plaza de l'Etoile y la Plaza de la Nation.

En Chile, ellas hicieron su primera aparición en la actual plaza Baquedano, pero no empezó su utilización masiva sino hasta la década del sesenta con la puesta en marcha del Plan Intercomunal de Desarrollo Vial Urbano.

Las rótondas construídas en Chile tuvieron como padrón de diseño a las rotondas europeas y norteamericanas de la época, las cuales operaban con la regla de prioridad a los vehículos que entraban. Mientras se construían estas rotondas chilenas, cambió en Inglaterra y en muchos países del mundo la regla de prioridad; ahora los vehículos que se desplazan alrededor de la isla central tienen la prioridad, y los vehículos que desean entrar deben esperar una brecha para incorporarse al flujo circulante. También nuestro país se incorporó al cambio de la regla de operación de rotondas.

Las consecuencias de lo anterior fueron múltiples:

- las fórmulas de capacidad y demoras para entender el funcionamiento de las rotondas quedaron obsoletas
- comenzó una fuerte investigación sobre ellas principalmente en Inglaterra, que todavía no termina
- las rotondas chilenas presentaron y siguen presentando problemas en la operación (ninguna rotonda antigua ha experimentado un rediseño adecuado), y la opinión pública tiene una imagen prejuiciada sobre sus beneficios
- no se sabe cuan adecuadas son las fórmulas y modelos explicativos de la operación de rotondas, desarrollados en otros contextos culturales (diferente conducta de choferes), y no se ha validado y/o generado acercamientos chilenos al problema.

1.2. Objetivos y alcances

El contexto explicado en la sección 1.1., motiva la necesidad de investiguar sobre la validez de los modelos de capacidad y demoras (en definitiva los modelos de capacidad son los fundamentales ya que las demoras son una función de ella) desarrollados en otros países.

El objetivo del presente trabajo es entregar los resultados preliminares a que se ha llegado en este tema, como parte de una investigación más amplia sobre mecanismos de control de intersecciones.

El trabajo se concentra principalmente en la modelación de las capacidades, y en la determinación de funciones de éstas con respecto a características geométricas o de diseño. El objetivo subyacente es producir herramientas analíticas que permitan diseñar rotondas que operen en niveles cercanos al óptimo.

1.3. Contenido

Aparte de esta introducción, este trabajo comprende cuatro capítulos. Una breve fundamentación teórica sobre el desarrollo de modelos de capacidad de rotondas se entrega en el capítulo 2.

Los experimentos realizados en Chile a fin de seleccionar y validar los modelos que parecieran más adecuados conforman el capítulo 3. Junto con la metodología de recolección de antecedentes se explica el proceso - miento a que se sometió la información.

El capítulo 4 se concentra en los resultados obtenidos hasta la fecha tanto en términos del mejor modelo seleccionado, los vehículos equivalentes en rotondas, las funciones de capacidad y la forma como influyen las características geométricas, así como la comparación con los resultados de trabajos similares.

Finaliza el trabajo con el capítulo 5 en el que se entregan las principales conclusiones.

2. La Modelación de Rotondas

2.1. Introducción

La modelación de rotondas comprende variados aspectos. Ellos sin embargo, pueden sintetizarse en dos grandes grupos: la modelación de la capacidad y la modelación de las demoras.

Las demoras, no forman parte de la etapa actual de la investigación que se está realizando, ya que ellas son función de la capacidad. Mientras no se haya encontrado y validado una modelación adecuada de la capacidad, no puede avanzarse a la etapa siguiente que es la comprensión de las demoras.

En cuanto a la capacidad, el cambio de reglas de operación desde la prioridad a los flujos entrantes hacia la prioridad a los flujos circulan tes, llevó a una modificación radical en la modelación de ellas. Desde la capacidad de una rotonda definida por la capacidad de la sección de entrecruce se reorientó la investigación hacia la capacidad de las ramas o pistas de entrada como elementos críticos.

A continuación, se presenta en forma resumida el desarrollo conceptual de ambos acercamientos.

2.2. Capacidad de secciones de entrecruce

Aunque se conocía ya desde antes algunas recomendaciones entregadas por los gobiernos (Troutbeck, 1984), no fue hasta finales de la década de los 50, que se llegó a formulaciones analíticas. Wardrop (1957) hizo el primer intento de estimar la capacidad de la sección de entrecruce. Llegó a una expresión en que dicha capacidad es una función de las características geométricas de la sección de entrecruce, del ancho de entrada, y del entrecruzamiento de vehículos en el tramo. En la Fig. 1. se detalla gráficamente los parámetros definidos por Wardrop (1957).

La fórmula a la que llegó después de experimentos en terreno fue:

$$Q_w = \frac{354(1 + e/w)(1-p/3)}{1 + w/L} \quad (1)$$

en que Q_w = capacidad total de la sección de entrecruce en pcu/hr

p = proporción de tráfico entrecruzado y los demás parámetros corresponde a características geométricas según la Fig. 1.

Diversos investigadores trataron de modificar y perfeccionar dicha fórmula, ya sea introduciendo factores que tomaran en cuenta la composición del tráfico o la adecuación a las nuevas reglas de operación mencionadas en el punto 1 (Philbrick, 1977).

El cambio realizado, asumido también en muchos otros países, permitió aumentar la capacidad de las rotondas existentes hasta la fecha en alrededor de 10% y reducir las demoras en un 40% (Troutbeck, 1984).

Las nuevas reglas de operación introdujeron cambios sustanciales en la forma de entender los elementos críticos de una rotonda en términos de capacidad. La sección de entrecruce no fue más la parte decisiva, sino que los accesos; como consecuencia de lo anterior, diversos autores cuestionaron la aplicabilidad de la fórmula de Wardrop (Ashworth y Field 1973). Para un detalle de las críticas, consultar Coeymans y Aguayo (1984)

Hasta la década del 70, no hubo otra fórmula para el diseño que la de Wardrop antes mencionada. En esta década, comienza los intentos por perfeccionar, modificar y/o cambiar completamente el acercamiento que se tenía hasta ese momento (Blackmore, 1970; Marlow y Blackmore, 1973 y 1975). Los intentos desembocaron en el empleo de herramientas ya conocidas (aceptación de brechas o gaps, Tanner, 1962) y a desarrollos analíticos y empíricos basados en ellas.

2.3. Capacidad de accesos

Dado que las nuevas normas de operación de rotondas (off-side-priority) conducen a que los vehículos en los accesos se incorporen a la rotonda solo si encuentran una brecha lo suficientemente grande, pareció natural entender a las rotondas como una colección de intersecciones prioritarias en forma de "T".

a) Tanner

La modelación anterior condujo a tratar de emplear las fórmulas a que había llegado Tanner (1962), para determinar el flujo máximo que puede entrar a una intersección prioritaria.

La fórmula de Tanner para el caso de rotondas postula que:

$$q_e \text{ máx} = \frac{q_c (1 - \Delta q_c) e^{q_c (T - \Delta)}}{e - e^{-q_c T_o}} \quad (2)$$

donde: $q_e \text{ máx}$ = flujo entrante máximo

q_c = flujo circulante

Δ = headway mínimo entre vehículos circulantes

T = gap crítico de aceptación

T_o = brecha mínima entre vehículos entrantes.

Asumiendo que la fórmula de Tanner es correcta había dos formas de acercarse a una modelación apropiada. La primera, linealizar la ecuación de Tanner y relacionar los parámetros de la recta con las características geométricas del acceso. La segunda forma, consiste en tratar de correlacionar los parámetros geométricos a partir de datos en terreno. El primer acercamiento fue el del TRRL. El segundo fue el de la Universidad de Southampton.

b) TRRL

Maycock (1974) fue de los primeros en aceptar la formulación de Tanner, pero que postuló una linealización de ella a fin de simplificar su empleo.

La Fig. 2 muestra que la fórmula lineal es una buena aproximación de la fórmula de Tanner.

Analíticamente la expresión de Maycock postula que:

$$Q_e = F - f_c Q_c \quad (3)$$

Q_e = flujo entrante

Q_c = flujo circulante

F y f_c parámetros a calibrar. En este caso F es el máximo flujo entrante y f_c es el vehículo entrante equivalente de un vehículo circulante (Troutbeck, 1984).

Philbrick (1977), Kimber y Summens (1977), Glen, Sumner y Kimber (1978) y Kimber (1980) desarrollaron relaciones para correlacionar F y f_c con diferentes parámetros geométricos.

Los parámetros más empleados, cuya descripción física se encuentra en las Fig. 3 y 4 son los siguientes:

- e = ancho de entrada o desemboque en la rotonda (m)
- u = ancho de circulación (m)
- D = diámetro de la circunferencia inscrita (m)
- ℓ = longitud sobre la cual se produce el ensanche de entrada
- v = ancho de pistas de llegada de accesos (m)
- r = radio de entrada (m)
- $s = (e - v)/\ell$ = agudeza del ensanche
- ϕ = ángulo de entrada

Para una descripción más detallada de los diferentes acercamientos puede consultarse Coeymans y Aguayo (1984), así como Troutbeck (1984).

Esfuerzos hechos para ajustar curvas diferentes a la líneal (Kimber; 1980) no mejoraron significativamente las predicciones.

c) Southampton

Al mismo tiempo que el TRRL trataba de ajustar las fórmulas lineales, otros investigadores trabajaban en determinar los valores de los parámetros de Tanner. Entre ellos el trabajo de la Universidad de Southampton aparece como el más importante.

En efecto, Armitage y Mc Donald (1974) estimaron los parámetros a partir de gaps aceptados y rechazados. Así mismo, se desarrolló una ecuación de Tanner modificada para entradas con ensanches, se indicó un método para estimar T y T_0 de datos de intervalos o "headways".

2.4. Modelos de simulación: SIMRO y ARCADY

Las simplificaciones de Tanner y las nuevas definiciones geométricas introducidas por Southampton (Coeymans y Aguayo, 1974), constituyen la base para el diseño de SIMRO (Chin, 1985) que es el modelo de simulación de rotondas más elaborado y ajustado hasta la fecha, aunque desgraciadamente todavía no está en etapa de comercialización y de empleo masivo.

A su vez, los desarrollos del TRRL llevaron al diseño de ARCADY (A Roundabout Capacity and Delay Model), que sin tener el grado de afinamiento de SIMRO a nivel microscópico, permite sin embargo emplearlo con relativo éxito para el diseño de las rotondas.

3. Experimento

3.1. Elección de tipo de modelo

La simplicidad de los modelos lineales desarrollados por el TRRL, condujo a elegirlos como aquellos a validar en el caso chileno. Aunque se conocían los aportes y afinamientos que las investigaciones de McDonald habían introducido, la reducida cantidad de rotondas existentes en Chile, y la dificultad de medir y estimar parámetros de gaps y headways como los que éste requería, aparte de la escasez de un rango significativo de parámetros geométricos, llevó a no emplearlos y estudiarlos por el momento (Aguayo, 1985).

3.2. Recolección de la información

En un acceso de rotonda se encuentran dos flujos, el compuesto por los vehículos entrantes y el de los circulantes. Para analizarlos, se requiere conocer ambos flujos en un período de tiempo con condiciones homogéneas.

La condición de homogeneidad de la información está dado por la "saturación plena", definida como el flujo suficiente para causar una cola estable en un acceso a la intersección (Kimber, 1980).

El conjunto de movimientos que componen un acceso de rotonda en condiciones de "saturación plena", pudo ser cubierto por mediciones con equipo de video portátil ya que este reúne las ventajas de facilidad de operación en las mediciones en terreno así como un manejo seguro y repetible de la información cuando ella se procesa.

Las mediciones se efectuaron durante períodos de "saturación plena", tratando en lo posible de llegar a al menos entre 50 y 60 períodos de 1 minuto (50 a 60 minutos). En algunos casos se llegó hasta cerca de 3 horas de recolección.

La diferencia en el número de períodos está dada porque a igual tiempo de filmación, no necesariamente se tiene igual número de intervalos con saturación plena. Se prefirió realizar el rechazo de intervalos en laboratorio, donde se podía repetir y rever la situación, que hacerlo en terreno cometiendo errores y perdiendo información.

3.3. Lugares de recolección

Con el fin de lograr la condición de "saturación plena", se obtuvo la valiosa ayuda de Carabineros de Chile, ya sea provocando colas o cambiando el diseño de la intersección con conos.

De esta forma la muestra quedó compuesta por 21 intersecciones y cinco cambios de diseño.

Los accesos medidos fueron:

Rotonda	Intersección	N° intervalos recolectados	Configuración
IF	Vitacura Oriente	59	1
IF	Manquehue Sur	51	1
P2	Vitacura Oriente	48	1
PA	Tomás Moro	60	1
PA	Crist. Colon Oriente	49	1
PA	Los Dominicos	69	1
PA	Chesterton	61	1
PA	IV Centenario Norte	53	1
PA	Crist. Colon Poniente	51	2
GR	Américo Vespucio Sur-2	49	2
GR	Américo Vespucio Sur-3	79	3
QU	Américo Vespucio Sur-1	66	2
QU	Américo Vespucio Sur-3	73	3
QU	Américo Vespucio Nor-1	59	1
QU	Américo Vespucio Nor-3	61	3
DE	J.P. Alessandri Oriente	58	1
DE	Departamental Oriente	43	1
DE	Américo Vespucio Nor	199	1
DE	J.O. Alessandri Nor	66	3
DE	Américo Vespucio Sur-1	72	1
DE	Américo Vespucio Sur-2	49	2
DE	Américo Vespucio Sur-3	68	3
VM	Vicuña Mackenna Norte	124	1
VM	Américo Vespucio Norte	45	1

Configuraciones : 1 = dos pistas de acceso y dos pistas de aproximación
 2 = dos pistas de acceso y una pista de aproximación
 3 = una pista de acceso y una pista de aproximación

TABLA 1: Antecedentes sobre recolección

3.4. Procesamiento

La información recolectada por equipo de video se reprodujo en una pantalla de TV y se contaron los vehículos entrantes v/s los circulantes en condiciones de "saturación plena" durante lapsos de tiempo de un minuto.

La información fue procesada computacionalmente.

4. Resultados

4.1. Tendencia de curvas

Asignando factores de equivalencia arbitrarios, se probaron las si guientes curvas:

- regresión lineal
- regresión bilineal
- semi-log para la variable dependiente
- semi-log para la variable independiente

Para el análisis estadístico de estas distintas tendencias se usó el paquete Biomedical Computer Programs-P serie (BMDP) en su versión 1981 (Dixon, 1981).

En cada acceso, con los datos de flujos entrantes y circulantes por intervalo, se ajustaron regresiones para cada uno de los tipos de curvas anteriores.

Para las regresiones el BMDP entrega los siguientes estadígrafos:

- Matriz de covarianza
- Matriz de correlación
- Coeficiente de correlación múltiple cuadrado
- Test F
- Análisis gráfico de los residuos
- Gráfico cuadrático de la probabilidad normal de los residuos.

Sin embargo, el uso de los estadígrafos no es determinante para obte ner la mejor curva (Gujarati, 1978), sino además se debe verificar que las regresiones se ajusten a las condiciones teóricas.

En este caso, la condición teórica relevante es la de obtener pen - dientes negativas para la regresión, ya que de otra manera se esta ría aceptando que las capacidades de los accesos crecen junto con el aumento de flujos circulantes.

4.2. Obtención del mejor ajuste

De las tendencias probadas, en el modelo bilineal, tan sólo una in tersección cumple los requisitos para comportarse como tal, sin em bargo, no tienen una configuración que permita este comportamiento.

Las curvas del tipo lineal y tipo semi-log son las que arrojan mejo res resultados, sin embargo, el comportamiento en los límites de es tos últimos tipos de curva no resulta aceptable (flujo entrante cero o capacidad infinita), por lo cual se optó por el modelo del tipo li neal.

La bondad de los resultados de las curvas semi-logarítmica deja abierta la posibilidad de probar estos modelos en condiciones que calibren extremas.

De los resultados es posible inferir que la dispersión de la varianza de los puntos, admite la existencia de curvas lineales o semi-log por lo menos (Aguayo, 1985)

4.3. Vehículos equivalentes

Usando la metodología de Philbrick (1977) se obtienen factores de equivalencia para accesos de rotondas aceptando un comportamiento lineal.

Se tentaron una serie de valores para los factores de equivalencia de los vehículos entrantes. Se ajustaron así 16 regresiones para cada acceso.

La combinación de factores de equivalencia que arrojó un mejor coeficiente de correlación múltiple cuadrático fue la alternativa elegida.

De esta manera, para las distintas configuraciones probadas, ya descritas en el punto 2 de este trabajo se obtuvo:

Configuración	Tipo de Vehículo	Factor Equival. (v_{eq}/v_{eq})
1	Buses entrantes	2,08
	Camiones entrantes	2,08
	Buses circulantes	2,44
	Camiones circulantes	2,00
3	Buses entrantes	1,50
	Camiones entrantes	2,25
	Buses circulantes	3,15
	Camiones circulantes	3,55

TABLA 2: Factores de equivalencia

Para la configuración dos no se obtuvo valores convergentes.

4.4. Curvas resultantes

Siguiendo el criterio de Philbrick (1977), se buscó la relación entre los parámetros del modelo lineal (la pendiente f y la intercepción F) y las características geométricas del acceso modelado.

Aunque las medidas, obtenidas de planos y/o de mediciones en terreno no tienen toda la precisión que daría un levantamiento topográfico, resulta interesante observar los resultados de la primera aproximación para obtener tendencias.

Para la fórmula lineal:

$$Q_e = F + f_c Q_c$$

Donde:

Q_e = vehículos entrantes veq/min

Q_c = vehículos circulantes veq/min

F = punto de intercepción (veq/hr)

f_c = pendiente

Después de haber tentado numerosos ajustes con diferentes parámetros las siguientes fueron las mejores relaciones encontradas:

a) Para el parámetro F :

$$F = 180,76 + 194,00 e$$

$$R^2 = 0,68$$

Rango de $e = 3,5$ a $12,0$ m

b) Para el parámetro f_c :

$$f_c = 0,22803 - 0,04510 e - 0,00568 r - 0,00297 D/2$$

$$R^2 = 0,65$$

Rangos $e = 3,5 - 12,0$ m $r = 35,0$ m

$D/2 = 47,0 - 138,0$ m

Donde

e = ancho de entrada en metros

r = radio de giro (m)

D = diámetro de la rotonda (m)

No se obtuvieron regresiones con variables explicativas diferentes (tales como agudeza de ensanche, ángulos de entrada, etc.) debido a que no existe una cantidad suficiente de accesos que presente un rango interesante para esas variables.

4.5. Comparación con otros modelos

Se comparó las fórmulas obtenidas en este trabajo con las fórmulas de Philbrick (1977), las Philbrick calibradas y las de Kimber (1980). Se entiende por Philbrick calibrado el haber ajustado las expresiones a que llegó, a partir de los F y f_c y parámetros geométricos de cada acceso

Los resultados se presentan en la Tabla 3. De ellos es posible inferir, que aunque alejados de la realidad en algunas ocasiones, consistentemente, los valores predichos para el ajuste chileno son mejores que los entregados por otros modelos, incluso cuando ellos se validan en sus parámetros.

Int	Valores	Medidos	Valores Predichos			
	Q_c veh/h	Q_e veh/h	Chile Q_e veh/h	Philbrick Q_e veh/h	Philbrick calibrado veh/h	Kimber Q_e veh/h
-						
11	890	1526	1761	2250	1790	2192
15	848	996	1499	2042	1477	1744
41	1181	2530	1383	2071	1837	1389
51	860	1316	1454	-	-	1492
53	2018	670	938	757	604	999
55	2217	454	792	672	716	995
56	1531	543	1046	646	611	1200
57	1053	586	635	-	-	-
733	971	950	599	-	-	-
74	997	593	539	-	-	-
75	1017	1424	1298	1789	1097	-
812	629	1562	1344	1980	1289	-
831	924	1591	1469	2313	1805	-
833	619	1030	837	-	-	-
93	1189	1426	1418	2450	1805	-
961	1027	1184	1605	-	-	-
101	973	1694	1662	2288	1875	3222
106	2536	817	649	1033	52	845

TABLA 3: Comparación entre flujos entrantes medidos y estimados a partir de los distintos modelos

5. Conclusiones

Las principales conclusiones son las siguientes:

- En términos generales, la condición de saturación plena es indispensable para la validez del modelo, lo que queda comprobado por la dispersión de los puntos que no cumplen esta condición y el mejor ajuste de la configuración tipo 3 en donde hay cola permanente.
- Si bien los estadígrafos del modelo obtenido son en rigor bajos, comparando con experiencias similares de otros países, encontramos un rango similar de valores.

- c) La confiabilidad de la base de datos y la suficiente documentación sobre los puntos medidos permitirá continuar la línea de investigación.
- d) De las características geométricas medidas y observadas se puede inferir:
 - Los diseños de rotondas en Santiago de Chile fueron hechos en el concepto de las antiguas rotondas inglesas, que daban prioridad al flujo entrante sobre el circulante.
 - Los accesos no tienen un diseño que permita aprovechar una adecuada interrelación entre flujos entrantes y circulantes, sino que mas bien la entorpecen, como por ejemplo angostamientos en un acceso conflictivo u obstáculos visuales para el flujo entrante.
- e) En general la Rotonda es una buena solución, siempre que esté diseñada apropiadamente. No hay sin embargo en Santiago diseños que incorporen los aportes de estudios recientes.
- f) Sería interesante realizar pequeñas modificaciones al actual diseño de rotondas y verificar el efecto que se produce con su introducción. Esto serviría para ampliar la base de datos existentes y el rango de las variables de diseño.
- g) Aparece conveniente realizar con la base de datos existentes, ajustes a partir de intervalos diferentes de 1 minuto. Así como volver a medir en aquellos accesos en que las fórmulas ajustadas no entregan una buena predicción. Se verificaría por una parte que los datos son correctos o se podría detectar las causas o motivos operacionales que llevan a una distorsión en las predicciones. En este sentido, se aprende más del comportamiento y de las variables explicatorias de las rotondas por los casos fuera de rango que por el conjunto de accesos promedio.
- h) Cuando se llegue a un ajuste razonable en las capacidades se debe avanzar a la etapa siguiente de ajustar fórmulas para las demoras y colas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al financiamiento de la Dirección de Investigaciones de la Pontificia Universidad Católica de Chile y el Fondo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica.

Referencias.

- AGUAYO, S.J. (1985) Modelamiento de Rotondas. Memoria de Título Ingeniero Civil, Departamento Obras Civiles, Universidad de Chile, Santiago.
- ARMITAGE, D.J. y Mc DONALD, M.C. (1974) Roundabout capacity. Traffic Engineering and Control, Vol 15, N° 18, 812-815
- ASHWORTH, R. y FIELD, J.C. (1973) The capacity of rotary intersections. The Highway Engineer, Vol 20, N° 3, 14-21.
- BLACKMORE, F.C. y MARLOW, M. (1975) Improving the capacity of large roundabouts. TRRL Report LR 677, Transport and Road Research Laboratory Crowthorne.
- BLACKMORE, F.C. (1970) Capacity of single-level intersections. RRL Report LR 356, Road Research Laboratory, Crowthorne.
- COEYMANS, J.E. y AGUAYO, S.J. (1984) Diseño de rotondas: el estado del arte. Documento de Trabajo N°48, Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- CHIN, H.C. (1985) SIMRO: a model to simulate traffic at roundabouts. Traffic Engineering and Control, Vol. 26, N° 3, 109-113.
- DIXON, W.J. (1981) BMDP Statistical Software. University of California Press, Berkeley.
- GLEN, M.G.M., SUMNER, S.L. y KIMBER, R.M. (1978) The capacity of offside priority roundabouts entries. TRRL Report SR 436, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- GUJARATI, (1978) Econometría. Editorial Mc Graw Hill Latinoamericana, S.A., México.
- KIMBER, R.M. y SEMMENS, M. (1977) A track experiment on entry capacities of offside priority roundabouts. TRRL Report SR 334, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- KIMBER, R.M. y HOLLIS, E. (1979) Traffic queues and delays at road junctions. TRRL Report LR 909, Transport and Road Research Laboratory Crowthorne.
- KIMBER, R.M. (1980) The traffic capacity of roundabouts. TRRL Report LR 942, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- LAURENCE, C.J.D. (1980) Roundabouts-evolution, revolution and future. Highway Engineering, Vol 27, N°5, 2-20.

- MARLOW, M. y BLACKMORE, F.C. (1973) Experiment at Brook Hill roundabouts Sheffield Yorkshire. TRRL Report 562, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- MAYCOCK, G. (1974) Capacity safety and delay at new types of roundabouts with offside priority. PIAR 12th International Study Week, in Traffic Engineering and Safety, 2-7 Septiembre, Belgrado.
- MC DONALD, M. y ARMITAGE, D. J. (1978). The capacity of roundabouts. Traffic Engineering and Control, Vol 19, N°10 , 447-450.
- PHILBRICK, M.J. (1977) In search of a new capacity formula for conventional roundabouts. TRRL Report LR 773, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- TANNER, J.C. (1962) A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection. Biometrika, Vol 49, 163-170.
- TROUTBECK, R.J. (1984) Capacity and delays at roundabouts. A literature review. Australian Road Research Board, Vol 14, N°4, 205-216
- WARDROP, J.G. (1957) The traffic capacity of weaving sections of roundabouts. Proceedings of the First International Conference on Operational Research, 226-280

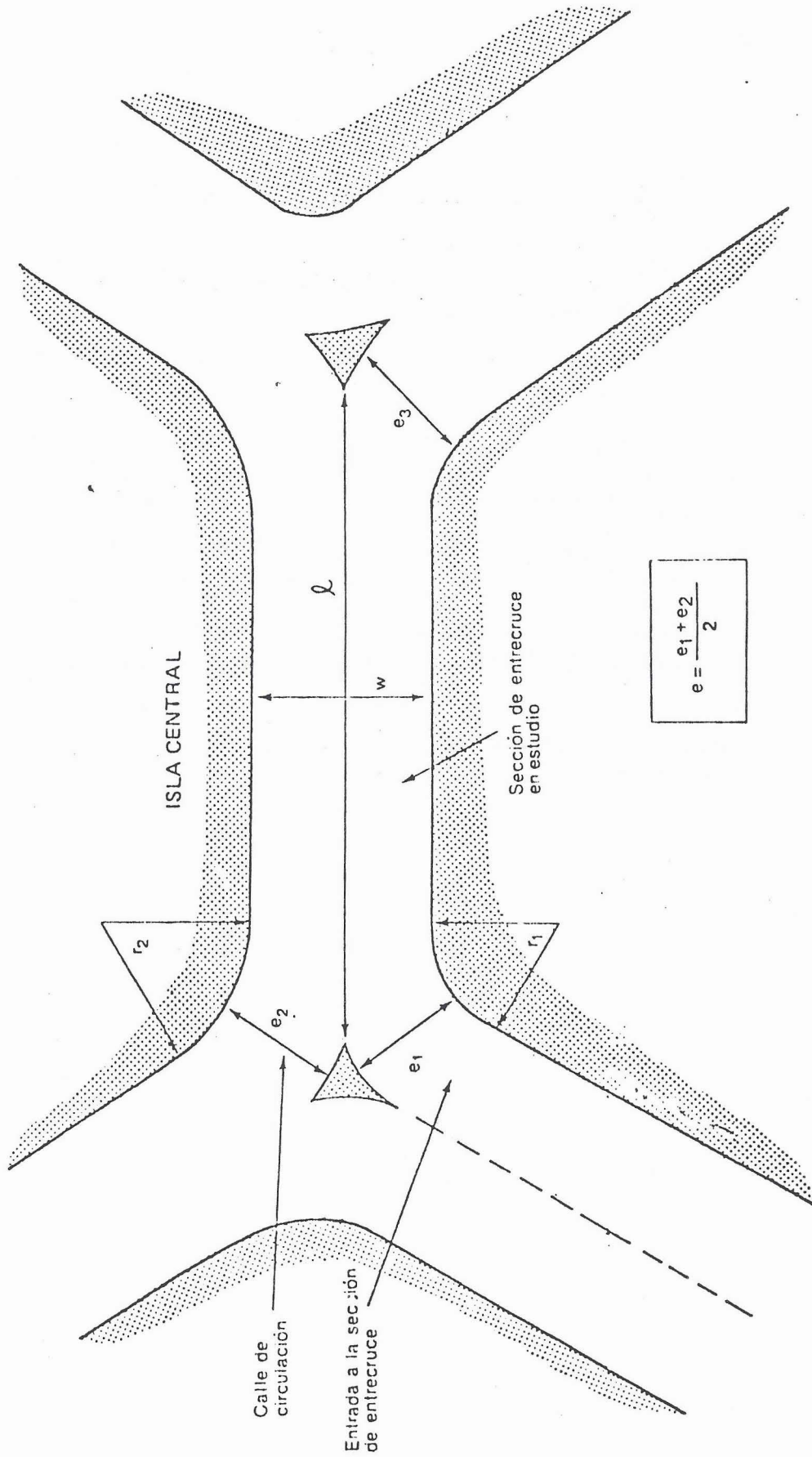


FIGURA 1: Parámetros de Wardrop.

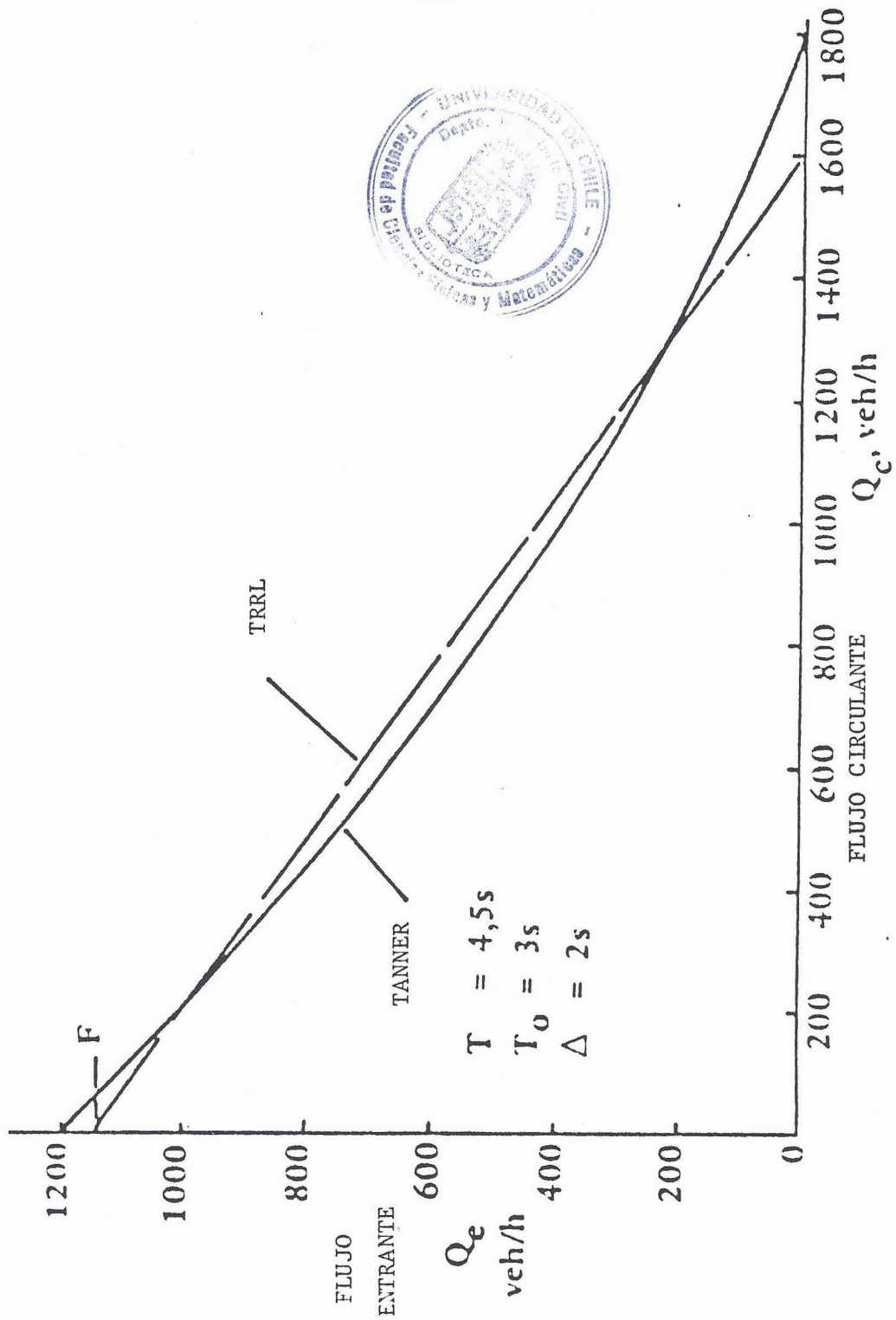
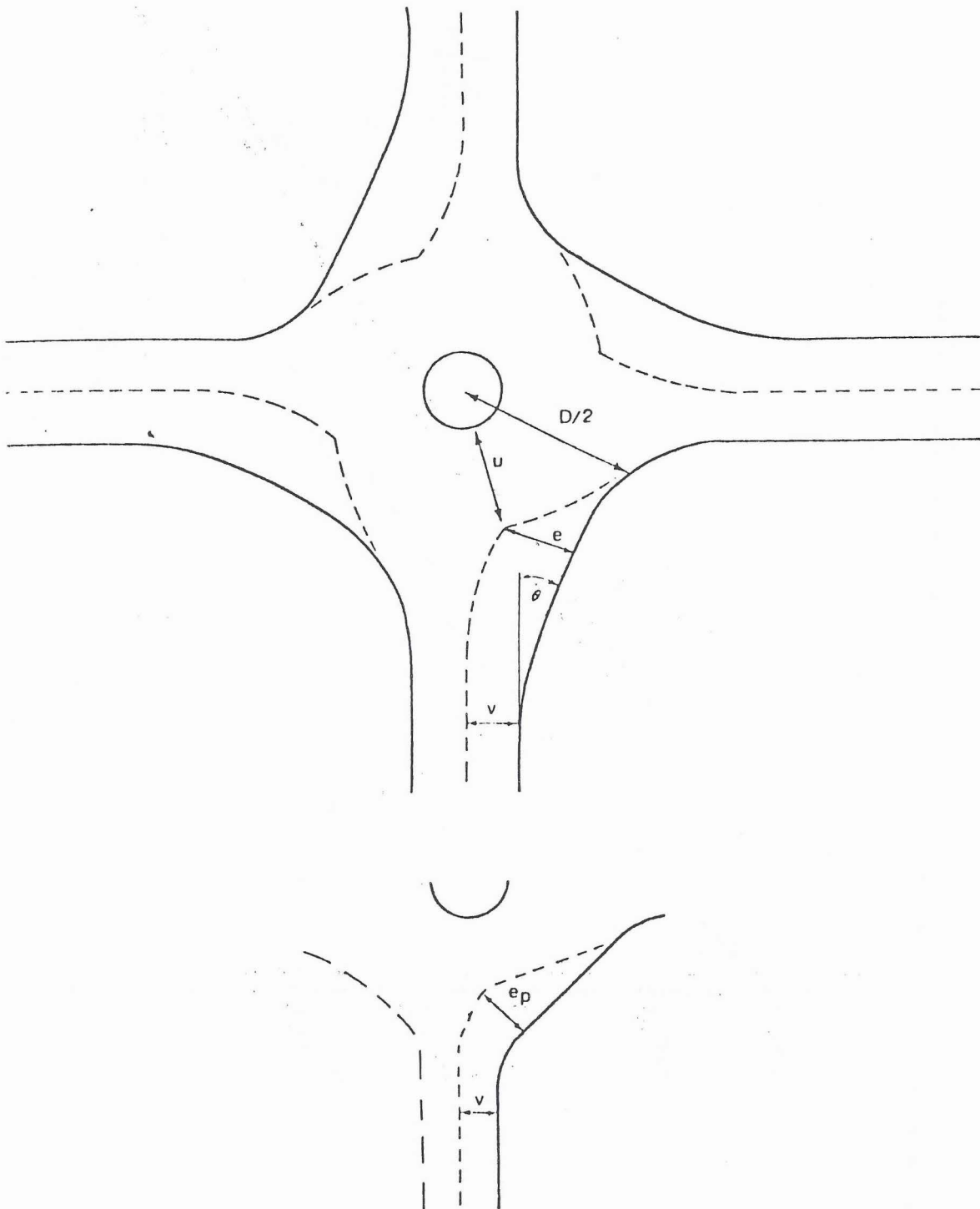


FIGURA 2: Fórmulas de Tanner y lineal (TRRL)



- e - Ancho de entrada (e_p para entradas angularmente divergentes)
 u - Ancho de circulación
 D - Diámetro circunferencia inscrita (factor de tamaño)
 v - Ancho de aproximación
 θ - Angulo de ensanche de el perímetro

FIGURA 3: Parámetros del TRRL

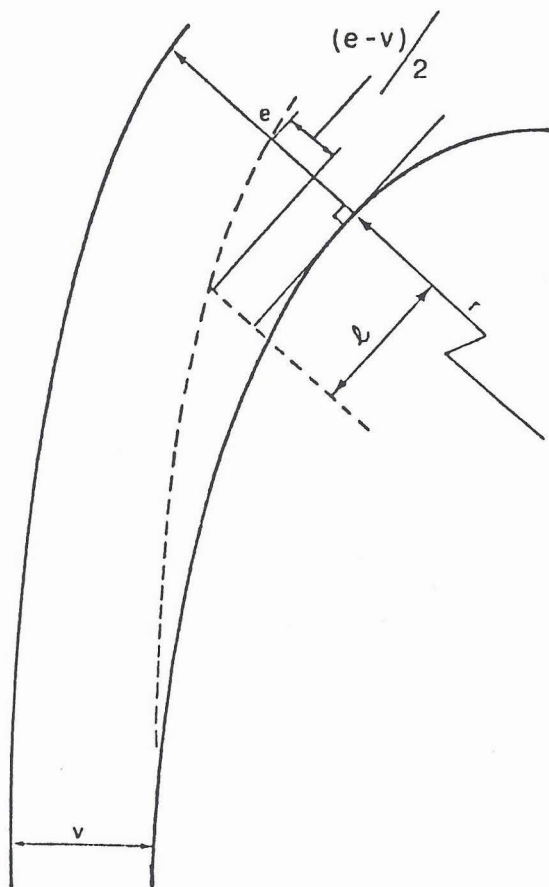


FIGURA 4: Agudeza ensanche, TRRL