

Análisis de la Seguridad Vial de Travesías Peatonales. Un Nuevo Método para el Modelado y una Aplicación en Carreteras

Hugo Pietrantonio
D.Sc. en Ingeniería del Transporte, Professor Doutor
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)
e-mail: hpietran@usp.br

Veridiana Maria Armond Vasconcelos
M.Sc. en Ingeniería del Transporte, Ingeniera de Seguridad
Petrobrás-Petróleo Brasileiro S.A.
e-mail: veridianavasconcelos@hotmail.com

Sun Hsien Ming
M.Sc. en Ingeniería del Transporte, Gerente de Tecnología
CET/Sp-Companhia de Engenharia de Tráfego da Prefeitura do Município de São Paulo
e-mail: shmsun@uol.com.br

Andrea Laurindvicius Ribeiro
M.Sc. en Ingeniería del Transporte, Ingeniera de Proyecto
Ecorodovias-Concessões e Serviços S.A.
e-mail: andrea.lribeiro@uol.com.br

RESUMEN

Este trabajo tiene el objetivo de estudiar métodos para análisis de la seguridad de las travesías peatonales con el uso de modelos de oportunidad de maniobra y de oportunidad de conflicto de tránsito. Estos conceptos tienen la ventaja de utilizar solamente los datos de la operación del tramo estudiado, tales como la velocidad, el flujo de tráfico, el flujo de peatones, entre otros, e inferir el nivel de seguridad con modelos lógicos y estructurados. Se presenta la estructura teórica de este tipo de modelo, recientemente ampliado para analizar la evitabilidad de accidentes y su severidad potencial, y se presentan los resultados de una aplicación en sitios de carreteras.

Palabras-clave: seguridad vial, accidentes de tránsito, pasos peatonales.

ABSTRACT

The objective of this work is the study of analysis methods for pedestrian safety at crossings through the use of models for maneuver opportunities and conflict opportunities in road traffic. These concepts have the advantage of using only operational data on the studied area, such as speed, traffic flow, pedestrian flow, among others, and infer the level of safety from logical and structured models. The theoretical structure of these types of model is presented, recently extended to analyze the preventability of accidents and their potential severity, as well as the results of illustrative applications made in sites of two highways.

Keywords: roadway safety, road accidents, pedestrian crossings.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con estudios internacionales sobre la salud (WHO, 2008), los accidentes de tránsito son una de las principales causas de muertes, pérdidas económicas o de calidad de vida, en casi todos los países. En particular en los países menos desarrollados o emergentes, su amenaza parece ser creciente a pesar de convivir con otras endemias y males sociales que son una carga mayor o por lo menos igualmente importante (además de seguir una causa relevante aún en los países desarrollados). Entre los efectos de los accidentes de tránsito, se puede destacar su impacto en los usuarios vulnerables de la vía, especialmente los peatones, y su incidencia generalizada (afecta a áreas más ricas o menos ricas o desarrolladas, incluyendo las clases sociales acomodadas). En general, según el último informe de evaluación de las Naciones Unidas (WHO, 2013, que consolida los datos desde 2007 hasta 2010), los peatones representan el 22% de todas las muertes en accidentes de tránsito (los ciclistas 5%, los ocupantes de vehículo de 2 o 3 rodas 23%, los de los automóviles 31%, y los demás tipos 19%). Las cifras varían en cada país (o en función del nivel de ingresos, y en particular de la motorización, de los países) y según diferentes estadísticas (muertes o pérdida de años de vida, por ejemplo), pero siguen siendo relevantes en todos los casos y contextos habituales.

Tomando el ejemplo de Brasil, las estadísticas oficiales de la salud (Brasil, 2013) indican que en 2011 los peatones representan 21,37% de las muertes por accidentes de tránsito en el país (9244 muertes en las categorías V01-V09 de 43256 muertes en las categorías V01-V89 de CID-10). Particularmente, el Estado de São Paulo (donde la actividad económica se concentra de una manera relevante), los peatones son 27,15% (2003 muertes en las categorías V01-V09 de 7377 muertes en las categorías V01-V89 de CID-10). Datos más específicos y detallados son recogidos por la policía y consolidados por las agencias responsables de la gestión del tránsito. La situación en las carreteras concesionadas en el Estado de São Paulo, no es distinta (ARTESP, 2013): en 2011, el atropellado es el tipo de accidente que causa más muertes, aproximadamente un 1,9% (787 en 41.425) del total de

accidentes pero el 25,7% (253 en 986) de las muertes totales. Del mismo modo, en la ciudad de São Paulo (mayor ciudad del país, capital del Estado de São Paulo), se repite el escenario (CET/Sp, 2012): en 2011, el atropellado representó 26,59% (6751 en 25.391) de los accidentes de tránsito con heridos y el 45,20% (617 en 1365) de las muertes resultantes.

Este estudio busca desarrollar técnicas para analizar la seguridad del tránsito ofrecido a los peatones y las medidas objetivas relacionadas con el riesgo de accidentes con estos usuarios vulnerables de la vía. En vista de las dificultades de la evaluación de la seguridad de la circulación en los proyectos de carreteras basado en el potencial de accidentes (Ogden, 1996), la investigación pretende incluir otras variables más directamente observables. El método propuesto para el análisis de la seguridad de los peatones en el presente trabajo tiene como objetivo lograr un proceso de análisis objetivo y analítico, con la adición de recursos para las investigaciones de campo (incluyendo las inspecciones o auditorías de proyectos, cf. Gold, 1998) y, finalmente, un diagnóstico de gestión integrada (que puede considerar los datos de accidentes, si están disponibles y tienen una calidad adecuada).

Los conceptos de oportunidad de maniobra y oportunidad de conflicto han sido propuestos para obtener medidas empíricas de seguridad como complemento o alternativa a la escasez de datos sobre accidentes de tránsito recogidos. Este enfoque también permite el desarrollo de métodos para obtener estimaciones de las oportunidades de maniobra y de las oportunidades de los conflictos, lo que hace que este parámetro una medida potencialmente adecuada para determinar el grado de seguridad de un proyecto determinado o hacer proyecciones acerca de la eficacia de los proyectos de seguridad vial. Estos conceptos pueden ser vistos como una derivación de los conflictos de tránsito relacionados (en general, estudiados empíricamente, cf. Pietrantonio y Tourinho, 2005, 2006), que proporciona una técnica para predecir su ocurrencia en diferentes contextos.

A seguir, el método de análisis de las oportunidades de maniobra y de las oportunidades de conflicto se presenta, incluyendo los modelos de predicción de su ocurrencia y evaluación de la evitabilidad de los accidentes y su potencial de severidad para travesías de peatones simples y sin semáforos. Se describe a continuación un estudio ilustrativo para la demostración y la validación preliminar del método, tanto para el análisis de los modelos predictivos propuestos cuanto para su aplicación en el diagnóstico de problemas de seguridad para los peatones. Finalmente, se discuten las conclusiones y recomendaciones que los modelos y resultados obtenidos nos permiten formular.

2. MÉTODO PROPUESTO

Dados la dificultad de recopilar datos suficientes sobre los accidentes (como es habitual en el análisis de seguridad), la importancia de contar con un método preventivo (aplicable tanto a las etapas iniciales de la operación como de las etapas del proyecto) y la necesidad de considerar formas específicas alternativas de tratamiento en un sitio determinado, por todo esto justificase el interés en obtener medidas de seguridad vial que podrían estimarse en función de los datos recogidos sobre el tránsito de vehículos y peatones y los datos físicos de los tratamientos locales, tales como la geometría, las fases y tiempos de semáforos, etc. Este tipo de medida, llamada de Medida Operacional de Seguridad (o OSM-*Operational Safety Measure*), es el objeto de nuestro esfuerzo de investigación.

En nuestra línea de investigación principal, las medidas de seguridad vial basadas en los conceptos de oportunidad de maniobra y de oportunidad de conflicto fueron estudiadas y desarrolladas, particularmente (pero no sólo) en travesías peatonales. Un estudio preliminar, que se encuentra en Vasconcelos (2004), analizó los conceptos en un contexto empírico y fue aplicado a los peatones en una intersección con semáforo. Modelos analíticos predictivos también se desarrollaron en Ming (2008), especialmente para las oportunidades de conflicto de tránsito, ahora considerando los peatones y vehículos en las intersecciones con o sin semáforos, incluyendo su aplicación a dos casos de estudio. Un estudio de validación de los conceptos empíricos y de los modelos de predicción formulados para travesías peatonales, contrastando su diagnóstico con datos de accidentes observados, se realizó en Ribeiro (2011), la fuente del trabajo de campo que se describirá adelante, incluyendo desarrollos relacionados con el análisis de evitabilidad de los accidentes y de su potencial de severidad.

En el estudio de Vasconcelos (2004), el concepto de oportunidad de maniobra (OT) se define con evento elemental en que el peatón acepta cruzar la vía, categorizadas en oportunidades de cruce con un riesgo aceptable (OTRA) o inaceptable (OTRI), teniendo en cuenta la proximidad de los vehículos que lo amenazan. En Vasconcelos (2004) también se definió oportunidades de conflicto (OC) como situaciones en las que hay ciertas condiciones previas para la aparición de riesgo de accidentes como un peatón que se enfrenta a los vehículos con una separación insuficiente para darle clara seguridad en la travesía (otros aspectos también fueron analizados). Las medidas empíricas de OTRA e OC fueron obtenidas evaluando la interacción entre vehículos y peatones a cada segundo, como capturadas en videos, y su frecuencia computada por la cantidad de veces en ocurren los eventos. Como criterio de validación para las medidas alternativas propuestas se analizó su correlación con la seguridad de los cruces observados, evaluada subjetivamente. En pocas palabras, el estudio concluyó que las oportunidades de maniobra no lograron un buen grado de predicción de la seguridad observada y que un complemento esencial es la observación de las oportunidades de conflicto, identificadas con un criterio de separación de 3 segundos durante la exposición del peatón en la calle a los vehículos en llegada (OC3a), el concepto operacional mejor correlacionado con la evaluación subjetiva.

El estudio de Ming (2008), por su vez, desarrolló modelos matemáticos para predecir las medidas de oportunidades, particularmente de conflicto, en intersecciones con y sin semáforos, tratando de conseguir precisión necesaria para la aplicación práctica (tanto para vehículos cuanto para peatones). Ming (2008) no desarrolló los modelos correspondientes a las oportunidades de maniobra (cruce), pero estas pueden considerarse implícitas en los modelos desarrollados. Diversas hipótesis fueron desarrolladas (para cruces de peatones, en general, se admitió que no hay acumulación de los peatones mas se formuló versiones con exposición por calzada o por carril, con agregación o no de flujos vehiculares, con ponderación o no de la visibilidad del peatón, etc.). Estos modelos fueron aplicados a dos intersecciones urbanas típicas (una con y otra sin semáforo) y se analizó la correlación entre el diagnóstico obtenido con sus resultados teóricos y el análisis técnico subjetiva de la seguridad vial existente. La adecuación de las formulaciones alternativas fue evaluada, seleccionándose las formas al mismo tiempo, sencillas y sensibles para mejor análisis de la seguridad vial en intersecciones.

Por fin, para el estudio de Ribeiro (2011), se desarrolló el análisis de la evitabilidad del accidente en las oportunidades para el conflicto implícita en los modelos de Ming (2008) y se adicionó un análisis del potencial de su severidad para el peatón. Ribeiro (2011) añadió el análisis de correlación de las medidas empíricas y teóricas de oportunidad, así como la validación de los diagnósticos de seguridad vial con estas medidas y con datos de accidentes. Las condiciones de evitabilidad fueron relacionadas al éxito de una maniobra evasiva para evitar el riesgo de accidente cuya falla puede ocurrir por varios aspectos, como las restricciones a la visibilidad (obstrucciones visuales o mala iluminación) o errores humanos en la sentencia del riesgo (sea por error de decisión o falta de atención). La restricción física fue incorporada a los modelos como limitante del tiempo de reacción disponible y determinante de la probabilidad de falla (y accidente). El grado de severidad del accidente fue relacionado con la velocidad de impacto con el peatón y traducido en una probabilidad de accidente fatal, grave o leve. Con estos conceptos y modelos, Ribeiro (2011) evaluó dos travesías peatonales con histórico distinto de accidentes para analizar su poder discriminatorio. Este ejercicio, cuyos resultados prácticos que se

presentarán adelante, fue repetido en tramos con calzada simple en área urbana y en tramos con calzadas dobles en área rural, ambos ubicados en carreteras concesionadas del Estado de São Paulo.

En esta sección, los modelos empleados en este estudio de campo serán revisados.

2.1 Modelos de Oportunidad de Maniobra y de Oportunidad de Conflicto

A seguir, se resumen los modelos para predicción de oportunidades de conflicto propuestos por Ming (2008) y utilizados en Ribeiro (2011). Una discusión más extensa de la fundamentación teórica y las referencias históricas que fomentaran su desarrollo está en Ming (2008). Las fórmulas para las medidas teóricas de oportunidades de maniobra (OT) y de oportunidades de conflicto (OC) están convenientemente resumidas en la Tabla 1 (la identificación de los modelos 1a, 1b, 1c y 4 corresponde a las presentadas en Ming, 2008).

TABLA 1: Fórmulas Teóricas de OT y OC Utilizadas en RIBEIRO (2011)

Modelo	Oportunidad de Maniobra	Oportunidad de Conflicto
1a-con exposición total	$OT = Q_v \cdot e^{-q \cdot T_c}$	$OC = Q_p \cdot (1 - e^{-q \cdot T_c})$
1b-exposición por conflicto (i)	$OT = \left(\sum_i Q_{ci} \right) \left(\prod_i e^{-q_{ci} \cdot T_{ci}} \right)$	$OC = Q_p \cdot \sum_i (1 - e^{-q_{ci} \cdot T_{ci}})$
1c-exposición por carril (i)	$OT = \left(\sum_i Q_{ci} \right) \left(\prod_i e^{-q_{ci} \cdot T_{ci}} \right)$	$OC = Q_p \cdot \sum_i (1 - e^{-q_{ci} \cdot T_{ci}})$
4-con brechas inadecuadas	$OT = Q_v \cdot e^{-1,25 \cdot q \cdot T_c}$	$OC = Q_p \cdot (1 - e^{-0,5 \cdot q \cdot T_c})$

En general, la probabilidad de tener una oportunidad de conflicto considera la probabilidad de una llegada de vehículo desde un flujo en conflicto durante el tiempo de exposición del peatón durante el cruce de la vía. Las fórmulas derivadas para los modelos 1a, 1b y 1c difieren en la agregación de la descripción.

La fórmula para el modelo 4 representa una hipótesis de comportamiento diversa. En todos los casos, las llegadas de vehículos se describen por modelos de Poisson simples (una hipótesis que se puede generalizar). La Figura 1 presenta un resumen de las fórmulas que se desarrollará adelante.

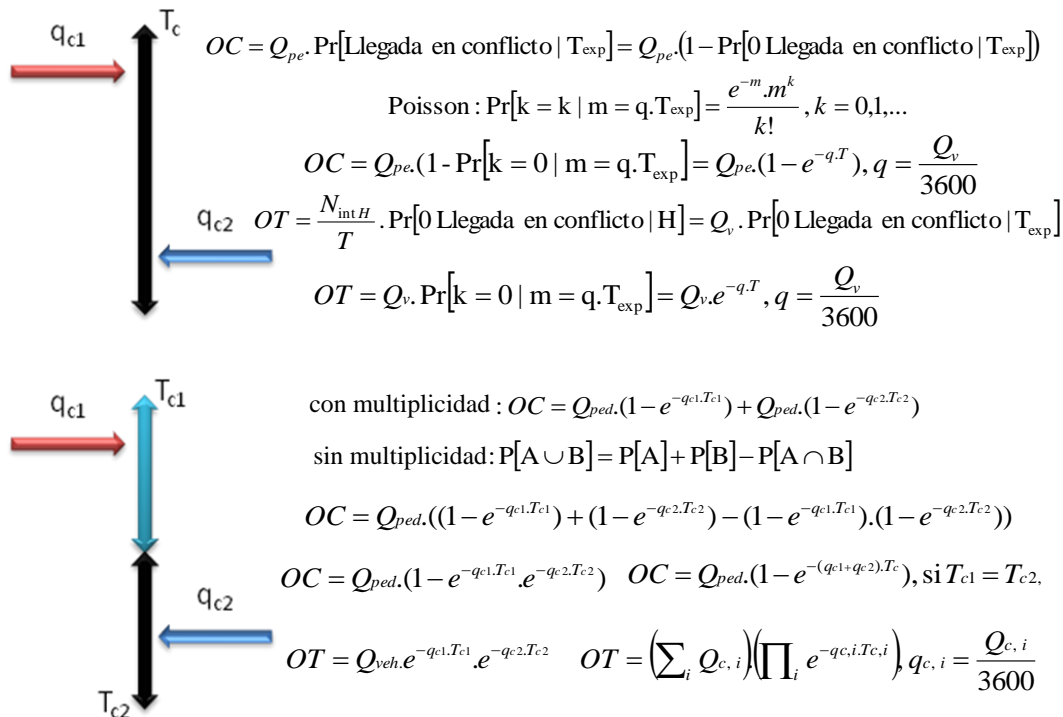


FIGURA 1: Resumen de las Fórmulas Desarrolladas (Travesía Integral o en Etapas)

El primer diagrama adopta un tiempo de exposición total, $T_{exp} = T_c$, para la calzada y un flujo vehicular total (la suma de los flujos en conflicto de ambos los sentidos, $q_v = q_{c1} + q_{c2}$). El segundo diagrama indica la desagregación del flujo y del tiempo de exposición por carril (los flujos pueden contener giros y generar tipos de conflicto diversos). Denótase por Q el flujo vehicular en v/h y por q el valor correspondiente en v/s , del mismo flujo vehicular en conflicto.

Dada la probabilidad de ocurrir una oportunidad de conflicto para un peatón, la frecuencia de oportunidades de conflicto puede escribirse como el producto del flujo de peatones y la probabilidad de llegada de vehículo del flujo en conflicto durante el tiempo de exposición:

$$OC = Q_p \cdot (1 - e^{-q \cdot T_c}) \quad (1a)$$

(debe observarse que, durante el cruce, las amenazas múltiples contarán como sólo una).

De forma correspondiente, una oportunidad de maniobra (sin conflicto) puede ocurrir siempre que el intervalo entre dos vehículos sucesivos es mayor que el tiempo de exposición (dado que genera la oportunidad para que un peatón en cruce venga a completarla sin conflicto). Como el flujo de vehículos en conflicto determina el número de intervalos, la frecuencia de oportunidades de maniobra puede estimarse con la probabilidad de no tener conflicto:

$$OT = Q_v \cdot e^{-q \cdot T_c} \quad (2a)$$

(una oportunidad de maniobra permite pero no garantiza la ausencia de conflicto, dado que el peatón puede empezar el cruce al final de un intervalo amplio).

Para evaluar la multiplicidad de conflictos para un mismo peatón, los flujos de vehículo deben ser desagregados así como su tiempo de exposición (que puede diferir para cada flujo en conflicto). Dada la probabilidad de ocurrir una oportunidad de conflicto para un peatón, que debe computarse en cada carril (o con otro criterio de desagregación conveniente), la frecuencia de oportunidades de conflicto puede escribirse como el producto del flujo de peatones y de la probabilidad de una llegada de vehículo del flujo en conflicto específico durante el tiempo de exposición del cruce en cada carril:

$$OC = Q_p \cdot \sum_i (1 - e^{-q_{ci} \cdot T_{ci}}) \quad (1b \text{ y } 1c)$$

(ahora observarse que, durante el cruce, las amenazas múltiples contarán con su multiplicidad).

Por su vez, permanece que una oportunidad de maniobra (sin conflicto) puede ocurrir siempre que el intervalo entre dos vehículos sucesivos es mayor que cada tiempo de exposición:

$$OT = \left(\sum_i Q_{ci} \right) \left(\prod_c e^{-q_{ci} \cdot T_{ci}} \right) \quad (2b \text{ y } 1c)$$

(permite pero no garantiza la ausencia de conflicto). Las fórmulas pueden distinguir zonas de conflicto de diferentes flujos (1b y 2b) o simplemente los carriles (1c y 2c) de la calzada.

Hasta aquí el modelo implícito de comportamiento es el de preferencia al peatón. Si se adopta la hipótesis inversa, el peatón cruza cuando hay un intervalo o brecha suficiente y las oportunidades de conflicto resultarían de aceptar un margen de seguridad inadecuada.

Esto es el caso del modelo 4 de Ming (2008), en que el margen de seguridad aceptable se adopta como siendo mitad del tiempo de cruzar la vía. Esta formulación deriva de considerarse que el cruce ocurrirá si el intervalo es mayor que $0,75 \cdot T_c$ y que resultará en riesgo inaceptable se llega un vehículo en conflicto antes de

$1,25 \cdot T_c$ (o un $T_c \pm \tau$). Con base en el modelo de Poisson adoptado, la probabilidad de una oportunidad de conflicto sería la probabilidad de un intervalo de $0,75 \cdot T_c$ a $1,25 \cdot T_c$ condicionada a que permita una travesía (sea mayor o igual a $0,75 \cdot T_c$), lo que se escribe como:

$$\Pr[0,75 \cdot T_c \leq H \leq 1,25 \cdot T_c / H \geq 0,75 \cdot T_c] = \frac{e^{-q \cdot 0,75 \cdot T_c} - e^{-q \cdot 1,25 \cdot T_c}}{e^{-q \cdot 0,75 \cdot T_c}} = 1 - e^{-0,5 \cdot q \cdot T_c}$$

y resulta en

$$OC = Q_p \cdot (1 - e^{-0,5 \cdot q \cdot T_c}) \quad (1d)$$

(la forma condicionada corrige la propuesta por Zhang y Prevedouros, 2003, entre otros, y proporciona una fórmula que es estrictamente creciente en el flujo y el tiempo de exposición).

La expresión correspondiente para las oportunidades de maniobra sería:

$$OT = Q_v \cdot e^{-1,25 \cdot q \cdot T_c} \quad (2d)$$

(la forma con $T_c \pm \tau$ y $\tau = 2 \text{seg}$ es adoptada por Zhang y Prevedouros, 2003; una forma con $\tau = 0,25 \cdot T_c$ corresponde a la fórmula propuesta por Ming, 2008).

Debe notarse que las oportunidades de maniobra y de conflicto son evaluadas en base a las probabilidades de intervalos en el flujo vehicular. Todavía, las oportunidades de conflicto al menos deberían ser evaluadas en base a las probabilidades de travesía de peatones en cada intervalo (o cada margen de seguridad). El problema clásico de la travesía de peatones como fenómeno estocástico fue detallado desde Tanner (1951), donde se obtiene algunos momentos de las distribuciones correspondientes pero no se logra obtenerlas en forma cerrada, el que también ocurre con trabajos posteriores que relajan el modelo de Poisson. Esta es la justificativa para la simplificación adoptada.

2.2 Modelos de Evitabilidad y Severidad de los Accidentes

El concepto de evitabilidad ya aparece en Ming (2008), que discute un aspecto específico: la viabilidad de una maniobra evasiva destinada a evitar el riesgo de accidente con restricciones de visibilidad y tiempo de reacción aleatorio, y lo traduce en una probabilidad de falla al evitar el accidente, como:

$$P_{sv} = P[D_p > D_v] \Leftrightarrow P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A] \quad \delta_A = \frac{D_v}{V} - \frac{V}{2b} \quad (3)$$

en donde:

$$D_p \text{ es la distancia requerida para parada } D_p = \delta_R \cdot V + \frac{V^2}{2b},$$

D_v es la distancia de visibilidad disponible o efectiva,
 δ_R es el tiempo de reacción del conductor (función de tipo de evento y contexto),

δ_A es el tiempo de reacción disponible para el conductor

$$\delta_A = \frac{D_v}{V} - \frac{V}{2b},$$

y la probabilidad es computada con una aproximación de segunda orden y una distribución logística (

$$P[X > x] = 1 - P[X \leq x], P[X \leq x] = \frac{1}{1 - e^{-(x-m)/a}},$$

$$m = E[X], a = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \sqrt{V[X]}$$

En la formulación adoptada por Ribeiro (2011) sólo las velocidades de los vehículos son consideradas aleatorias (y los otros parámetros asumen valores típicos, aunque su aleatoriedad también se puede considerar de forma general en el método aproximado propuesto en Ming, 2008). Este término es importante porque incorpora el efecto de la velocidad de los vehículos, un aspecto relevante pero ausente de los otros términos en los modelos propuestos por Ming (2008), indicando su primer efecto (comprometer la evitabilidad).

La misma formulación puede ser traducida en una probabilidad de accidente dada por:

$$P_{sv} = P[D_p > D_v] \Leftrightarrow P_{sv} = P[V > V_A] V_A = \sqrt{b^2 \cdot \delta_R^2 + 2b \cdot D_v - b \cdot \delta_R} \quad (4)$$

en donde V_A es la velocidad que corresponde a $D_p = D_v$ para $\delta = \delta_R$ (y también $\delta_A = \delta_R$).

Cuando sólo la velocidad de los vehículos es considerada aleatoria, esta expresión puede ponerse directamente en función de la distribución de la variable aleatoria V y $P_{sv} = P[V > V_A] = 1 - F_V[V_A]$, donde F_V es la función de distribución de probabilidad acumulativa para las velocidades de los vehículos (convenientemente, la incertidumbre sobre F_V corresponde más al valor promedio en cada sitio y, en general, se puede admitir una distribución normal o logística con coeficiente de variación de 10% a 20% como razonable simplificación, con F_V por tipo de vehículo si se quiera).

La formulación con base en la distribución de velocidad permite pasar de forma sencilla a la evaluación del potencial de severidad de un accidente, que para peatones es usualmente relacionada con la velocidad del vehículo al impacto. Traduciendo las expresiones anteriores en término de la velocidad de impacto del vehículo con el peatón, tomando el tiempo de reacción por su valor típico $\delta = \delta_R$, llegase a $V_I = \sqrt{V^2 - 2b \cdot (D_v - \delta_R \cdot V)}$ si $V > V_A$ (por lo contrario $V_I = 0$ porque no hay accidente) y $\frac{D_v}{V} > \delta_R$ o

$V < \frac{D_v}{\delta_R}$ (por lo contrario $V_I = V$, porque no hay tiempo de

reacción). Generalizando, $V_I = \min\{\sqrt{V^2 - 2b \cdot (D_v - \delta_R \cdot V)}; V\}$ si $V > V_A$ y $V_I = 0$ si $V \leq V_A$. o, revertiendo para velocidades de llegada, $V = \max\{\sqrt{V_I^2 + 2b \cdot D_v + (b \cdot \delta_R)^2} - b \cdot \delta_R; 0\}$ si $V > V_A$ (i.e. en la condición de accidente).

Con base en la revisión de Davis (2001), la velocidad de impacto puede ser relacionada con la severidad de los accidentes con peatones por un modelo de distribución logística ordenada:

$$P_{ac}[Leve/V_I] = \frac{e^{\alpha_1 - \beta V_I}}{1 - e^{\alpha_1 - \beta V_I}} \quad (5a)$$

$$P_{ac}[Grave/V_I] = \frac{e^{\alpha_2 - \beta V_I}}{1 - e^{\alpha_2 - \beta V_I}} - \frac{e^{\alpha_1 - \beta V_I}}{1 - e^{\alpha_1 - \beta V_I}} \quad (5b)$$

$$P_{ac}[Fatal/V_I] = 1 - \frac{e^{\alpha_2 - \beta V_I}}{1 - e^{\alpha_2 - \beta V_I}} \quad (5c)$$

en donde los parámetros calibrados están resumidos en la Tabla 2.

TABLA 2: Parámetros (y Error Standard) en los Modelos Estimados por DAVIS (2001) para Severidad de los Accidentes con Peatones en Función de la Velocidad de Impacto (en km/h)

Grupos de Edad de las Víctimas	β	α_1	α_2
Niños (hasta 14 años)	0,120 (0,019)	4,678 (0,543)	8,846 (0,809)
Adultos (15 a 59 años)	0,127 (0,018)	4,970 (0,531)	8,866 (0,822)
Mayores (más de 60 años)	0,204 (0,035)	5,290 (0,811)	9,728 (1,433)

El criterio puede ser aplicado en función de la distribución aleatoria de las velocidades, determinando valores límites para rangos velocidad para cada nivel de severidad o, alternativamente, integrando directamente las expresiones propuestas por Davis (2001) en función de la distribución de velocidades (por lo menos numéricamente). Se puede también evaluar de forma específica los niños, adultos y mayores.

Sin embargo, como simplificación, se consideró adecuado asociar la severidad resultante a valores típicos de las probabilidades para adultos, admitiendo que la severidad es leve si $P_{ac}[Leve] > 50\%$ (o $V_I < V_{I1}$) y es fatal si $P_{ac}[Fatal] \geq 50\%$ (o $V_I \geq V_{I2}$), con:

$$V_I < V_{I1} = \frac{\alpha_1}{\beta} \quad (6a)$$

$$V_I \geq V_{I2} = \frac{\alpha_2}{\beta} \quad (6b)$$

siendo la severidad intermedia en caso contrario (o sea, grave si $V_{I1} = \frac{\alpha_1}{\beta} \leq V_I < V_{I2} = \frac{\alpha_2}{\beta}$), si son casos de accidentes.

Traduciendo en términos de la velocidad inicial, si $V > V_A$, hay accidente leve si

$$V < V_1 = \max\{\sqrt{V_{I1}^2 + 2b \cdot D_v + (b \cdot \delta_R)^2} - b \cdot \delta_R; V_{I1}\} \quad (7a)$$

y hay accidente fatal si

$$V \geq V_2 = \max\{\sqrt{V_{I2}^2 + 2b \cdot D_v + (b \cdot \delta_R)^2} - b \cdot \delta_R; V_{I2}\} \quad (7b)$$

siendo accidente grave en el caso intermedio. Por lo tanto, la distribución de la severidad de los accidentes es obtenida como:

$$P_{ac} = P[V > V_A] \quad (8a)$$

$$P_{ac}[Leve/V > V_A] = P[V < V_1 / V > V_A] \quad (8b)$$

$$P_{ac}[Fatal/V > V_A] = P[V \geq V_2 / V > V_A] \quad (8c)$$

y

$$P_{ac}[Grave/V > V_A] = 1 - P[V < V_1 / V > V_A] - P[V \geq V_2 / V > V_A] \quad (8d)$$

en donde

$$P[V < V_1 / V > V_A] = \frac{P[V_A < V < V_1]}{P[V > V_A]} = \frac{F[V_1] - F[V_A]}{1 - F[V_A]}$$

$$(0 \text{ si } V_1 < V_A) \text{ y } P[V \geq V_2 / V > V_A] = \frac{P[V \geq V_2 > V_A]}{P[V > V_A]} = \frac{1 - F[V_2]}{1 - F[V_A]}$$

(1 si $V_2 < V_A$) (estos valores son relativos a la probabilidad de accidente $P_{sv} = P[V > V_A] = 1 - F[V_A]$). En términos de la ocurrencia de las oportunidades de conflicto, los valores correspondientes serían

$$P_{ac}[Leve/V] = F[V_1] - F[V_A] \quad (0 \text{ si } V_1 < V_A), \quad (9a)$$

$$P_{ac}[Fatal/V] = 1 - F[V_2] \quad (P_{ac} \text{ si } V_2 < V_A) \text{ y} \quad (9b)$$

$$P_{ac}[Grave/V] = P_{ac} - P_{ac}[Leve/V] - P_{ac}[Fatal/V], \quad (9c)$$

en donde $P_{ac} = P_{sv}$ (condicionada a la ocurrencia de la oportunidad de conflicto).

Esta es la forma como se evaluó el potencial de severidad de los accidentes en el estudio de campo, el segundo efecto de la velocidad de los vehículos. Dos comentarios apoyan tal enfoque como promisor.

En apariencia, la formulación tiene solamente el efecto de la restricción física de visibilidad (y no del error humano). Sin embargo, adelante la distancia de visibilidad tomará la limitación de percepción humana, como función de la iluminación vial, con base en Schnell *et al.* (2001), en adición a la restricción generada por obstáculos físicos. Si se estudia la investigación reciente sobre iluminación vial, con todo, se percibe que la percepción humana sería mejor caracterizada como una probabilidad de detección como función del tiempo de exposición a una dada intensidad del estímulo (la luminancia del objeto). Por lo tanto, la probabilidad de percepción puede tener relación con la distribución del tiempo de reacción requerido, como representado en Ming (2008), así como la probabilidad de decisión y actuación correcta por parte del conductor.

Además, la relación entre severidad de accidente con los peatones y la velocidad de impacto (un facto bastante citado en la investigación sobre seguridad vial) es tan sólo uno capítulo de las relaciones detalladas que se utilizan para evaluar la severidad potencial de los accidentes de tránsito (Richard, Cuerden, 2009) en la disciplina de reconstrucción de accidentes de tránsito (Limpert, 2008; Simms, Wood, 2009) o en el campo de la biomecánica (Houston, 2009), en los cuales se estudian muchas otras relaciones así como otros tipos de accidentes de tránsito. En este campo se puede investigar, por ejemplo, el potencial de severidad resultante del impacto con diferentes tipos de vehículos (automóviles, motos o vehículos pesados), aspecto ignorado en los estudios usuales, como el de Davis (2001).

3. ESTUDIO DE CAMPO

Para los casos de estudio se ha seleccionado tramos de dos carreteras concesionadas del Estado de São Paulo, la SP 270 – Rod.Raposo Tavares y la SP 280 – Rod.Castello Branco (ambas conectan capital, a Este, e interior, a Oeste), y se recogieron datos de accidentes de tránsito de 2005 a 2011, identificando los relacionados con peatones (por año y km). Aun teniendo en cuenta la disponibilidad de monitorización con CCTV para obtener videos sobre la operación regular, se ha decidido concentrar el estudio en dos tramos de cada carretera, que difieren por su histórico de accidentes: en la SP 270, los tramos de calzada simple con un sólo carril por sentido en el km 60,5 (control) y el km 63 (el tramo con accidentes); en la SP 280, los tramos de calzada doble con 3 carriles por sentido en el km 29,5 (control) y el km 30 (el tramo con accidentes).

Visitas a campo y análisis locales permiten entonces hacer una caracterización de los sitios y relacionarlos con los datos de accidentes observados (en particular su ubicación, considerando los tramos adyacentes), como se resume a seguir. En el km 63 de SP-270, facilidades para el cruce de peatones fueron instaladas en 2008, con la provisión de una isla de refugio protegida por barreras de hormigón al mismo tiempo en que se proporcionó un carril más por sentido, proporcionando un contexto para un estudio antes-después.

El mismo efecto se buscó en la carretera de calzada doble, en donde se instalaron diversas pasarelas para peatones en el período de estudio. Sin embargo, no se logró identificarlas en áreas cubiertas por el sistema de CCTV.

Los sitios de carretera de calzada simple son de áreas urbanas. En el km 60,5 de la SP-270, los dispositivos que facilitan el cruce de peatones son los reductores de velocidad (resaltos para 30km/h) en ambos los sentidos, antes y después del punto de cruce (los dos sentidos cuentan con aceras y bermas, carriles con cerca de 3,50m, bahías centrales para paraderos de auto-buses y lazos para retornos en U). El sitio configura una intersección en X en que las vías transversales se utilizan de las pistas de retorno para cruzar la carretera y proporcionan un efecto “barrera” de protección a los peatones que cruzan en paralelo. No hubo registro de accidentes con peatones en este sitio. En el km 63 de la SP 270, los dispositivos para facilitar el cruce de peatones eran ausentes hasta 2008, a la excepción de reductores de velocidad (resaltos para 30 km/h) y de aceras y bermas en ambos los lados de la carretera.

En 2008, una gran intervención se realizó entre el km 62 y el km 64 (construcción de un nuevo entroncamiento, un enlace en trompeta por el nivel inferior), cuando entonces también, en el km 63, se instalaron islas para peatones con demarcaciones de pasos peatonales en la carretera, se instalaron barreras de hormigón para protección de la isla y demarcaciones centrales achuradas con hitos delineadores retro-reflectantes para canalización del flujo vehicular, y se transformaron las bermas en un carril más para circulación de vehículos motorizados (pasando de 1 a 2 carriles por sentido). La nueva señalización llama la atención para la eventual presencia de peatones pero la amplia extensión demarcada con achurado facilita el cruce irregular afuera del paso de peatones y la transformación de la berma en carril dificulta la circulación de ciclistas y aumenta la distancia a cruzar para los peatones. Con las demarcaciones de canalización, los reductores de velocidad están ahora instalados sólo en la aproximación de los pasos peatonales (a cerca de 50m) de cada sentido. Aquí, las vías locales existentes no cruzan la carretera (hay sólo pistas de convergencia en cada sentido). En este sitio, se han registrado 4 accidentes con peatones de 2005 a 2007, 5 accidentes con peatones en 2008 (en un período atípico de obras) y 2 accidentes con peatones de 2009 a 2011. Todos los accidentes ocurridos han sido leves, con excepción de 1 grave (el que ocurrió en 2010). De los 11 accidentes con peatones (todos del sitio en el km 63,5), 6 fueron en horario nocturno.

En la carretera de calzada dividida, las condiciones de la vía son similares y rurales en los dos tramos (que, en efecto, son adyacentes). En ambos los sitios no hay dispositivos para facilitar el cruce de los peatones, al contrario, el área de separación con la valla entre las calzadas dificulta el cruce y tiene un cerco en la mediana. Por esto, se puede concluir que no se desea el cruce de peatones. Sin embargo, la presencia de actividad linderas (fábrica en el km 29,5, fábrica y estación de servicio en el km 30) indica la demanda (al menos eventual) de peatones (hay bermas que permiten tanto la circulación de ciclistas cuanto de peatones a lo largo de la carretera, que incluso permiten contornar el cerco mediano).

Ninguna intervención notable fue hecha en estos sitios durante el período considerado (todavía no se logró datar la instalación del cerco mediano). En el km 29,5 se ha registrado sólo 1 accidente con peatones en todo el período, pero esto fue fatal (en 2010). En el km 30 se registraron 15 accidentes con peatones de 2005 a 2011, siendo 3 fatales, 6 graves y 6 leves. De los 16 accidentes con peatones (ambos los sitios), 4 han ocurrido en horario nocturno (siendo 3 en 2011), todos en el km 30 (predominan accidentes en los horarios de punta).

3.1 Obtención de las Medidas Empíricas y Teóricas de OT y OC

Definidos los conceptos operacionales de oportunidad de maniobra y oportunidad de conflicto en las travessías de los peatones, se analizó los videos del CCTV para mensurarlos empíricamente.

La oportunidad de maniobra es función del tiempo requerido para el cruce y de la margen de seguridad, que determinan un intervalo adecuado, T_G , por su vez una función del ancho de la vía a cruzar y de la velocidad del peatón (V_{pe}), teniéndose

$$T_G = \frac{L}{V_{pe}} + \delta_{seg}$$

Para este estudio se consideró el concepto tradicional de brecha integral con $\delta_{seg} = 3\text{seg}$, en que L es la anchura total de los carriles a cruzar. Para la SP 270 (dos carriles), $L = 7,0\text{m}$ tanto en calzada simples sin isla peatonal (km 60,5 y km 63 antes de 2008) cuanto con isla peatonal en el km 63 (en cada etapa, con 2 carriles por sentido). Para la SP 280, $L=10,5\text{m}$ (km 29,5 y km 30, en cada etapa con 3 carriles por sentido). La velocidad del peatón aquí considerada es 1,2m/s, valor típico generalmente utilizado para el peatón adulto. En esta forma, $T_G=8,83\text{seg}$ para la SP-270 y $T_G=11,75\text{seg}$ para la SP-280. Las OTs son siempre evaluadas por etapa de travésia (entre aceras, entre acera y isla o mediana). Si se desea tener el valor total de OTs integrales de acera a acera, se toma el valor de la etapa crítica de la travésia (la de menor OT).

Las oportunidades de conflicto son evaluadas directamente del video siempre que se observa un peatón en cruce, siguiendo su línea de travésia y el pasaje por cada carril y mensurando la separación en el tiempo entre su llegada, ocupación o salida del carril y la llegada del próximo vehículo en conflicto del mismo carril (en frente a un peatón que llega, en el carril que él ocupó o por detrás de un peatón que sale). Se cuenta una OC se la separación del vehículo que se aproxima de la línea de travésia del peatón es menor que la margen (δ_{seg}) de seguridad de 3seg, como en el concepto OC3a de Vasconcelos (2004). Las OCs fueron obtenidas de dos formas distintas, según el cómputo de la multiplicidad.

Todavía, los valores obtenidos se muestran prácticamente indistinguibles y, por lo tanto, el análisis adoptó sólo una de las medidas en el análisis subsiguiente (OC con multiplicidad). En este caso, las OCs totales siempre se computan por suma (al contrario, se tendría que eliminar la multiplicidad de OCs correspondientes al mismo peatón en cada etapa de travésia y en el cruce total).

Aquí también, en todos los casos, el análisis se hace por etapa de la travésia (separadas por medianas o islas, sean islas físicas o marcas con achurados). Los datos de flujo vehicular y de peatones fueron obtenidos del conteo manual a partir del análisis del video del CCTV. Las velocidades vehiculares se obtuvieron con un proceso similar pero con una muestra seleccionada de forma sistemática (el primero vehículo de cada tipo a cada 5 minutos o otro período menor). Con estos datos para cada uno de los períodos (mañana, medio-día y tarde) se obtuvieron las medidas teóricas correspondientes a las medidas obtenidas empíricamente. Esta es la información suficiente para aplicar el método.

Todavía, en el estudio de Ribeiro (2011), para el km 63 (cuya cámara de CCTV estaba bastante distante), los videos quedarán inutilizables en el período de la mañana y los peatones indistinguibles en el período de la tarde (en razón de la baja luminosidad). Sin embargo, en nuestra visión, esta pérdida de datos no trae perjuicio demasiado para la evaluación preliminar del método propuesto.

Un análisis de regresión lineal con especificación $O_{Medida} = \text{intercepto} + \text{coeficiente} * O_{Modelo}$ muestra que las distintas medidas de OT son indistinguibles en términos prácticos y logran un ajuste adecuado (el coeficiente de determinación está al redor de 88%, el intercepto no es significativo estadísticamente y el coeficiente lineal es estadísticamente significativo a un nivel superior a 99% y está alrededor de 0,90, razonablemente próximo a 1). Para OCs, las medidas teóricas sobre-estiman los valores obtenidos empíricamente y los resultados estadísticos son bastante peores: el mejor resultado es obtenido por el modelo 4 (el coeficiente de determinación es de 68%, el intercepto no es significativo estadísticamente y el coeficiente lineal es estadísticamente significativo a un nivel superior a 99% pero está alrededor de 0,55, razonablemente inferior a 1), que se aceptó como una escala aproximada.

Tomando los datos de forma interpretativa, se puede también decir que ciertas conclusiones indicadas parecen firmes y reveladoras (por ejemplo, la ausencia de oportunidades de maniobra en el km 29,5 y 30 de la SP-280, el hecho de que las travésias casi ciertamente experimentan conflictos en el km 30 de la SP-280, por fin, el fato de que los km 60,5 y 63 tienen un significativo potencial de conflictos para los niveles de flujo de vehículos y de peatones existentes). Los modelos alternativos no afectan de forma significativa, en este caso, el contenido del diagnóstico cualitativo. Resulta claro también que tanto la cantidad de oportunidades de maniobra cuanto las oportunidades de conflicto son más frecuentes en los sitios de la SP-270. Esta conclusión apunta claramente para la necesidad de evaluar el riesgo de accidentes y su potencial de severidad para un diagnóstico propio, como hecho a seguir.

3.2 Análisis de la Evitabilidad y Severidad de las Oportunidades de Conflicto

La extensión de los modelos de oportunidades de conflicto para analizar las cuestiones de la evitabilidad y severidad de los accidentes potenciales empieza por computarlas en valores anuales. La expansión se puede hacer como para conteos de tránsito que se quiere convertir para Tránsito Diario Medio Anual (TDMA) y Tránsito Diario Anual (TMA), en donde factores de expansión por hora del día, día de la semana y época o mes del año transforman cada conteo en una estimativa del TDMA y TMA, o como para estudios de evaluación de proyectos, en que se estiman las horas anuales que se representan por cada período típico.

En nuestro caso, se necesita de una suposición o factor adicional para definir la contribución para cada condición de luminosidad (diurna y nocturna). En el ejemplo ilustrativo, la expansión para OC_{Anual} nocturno se estimó por 4,8h del valor promedio del período de la tarde (18:30-19:30) y la expansión para el OC_{Anual} diurno se estimó por 9,6h de cada uno de los promedios de la mañana (06:30-07:30) y del medio-día (12:00-13:00) que transforman los valores de OC/hora en el OC_{Diario} por tipo de período (el OC_{Anual} correspondiente por tipo de período se obtiene multiplicando por 365 días/año, llegando a OCs/año). De todo modo, lo que importa en la interpretación de los resultados es que el efecto de los factores de expansión será lineal (i.e. impacta en la misma proporción las estimativas).

Las restricciones físicas de visibilidad se consideran computando el factor P_{sv} , mencionado en la sección 2, que evalúa el grado de evitabilidad de las OCs y genera la predicción de oportunidades de conflicto efectivas anuales ($OC_E/\text{año}$), una *proxy* del potencial de accidentes anuales en el sitio.

En este aspecto, a fin de retratarse de forma preliminar la diferencia existente en términos de visibilidad diurna y nocturna, el análisis de las restricciones físicas a la visibilidad fue complementada por límites para la distancia exigida en la detección de peatones en baja luminosidad.

Nuevamente, fueron asumidos parámetros preliminares para obtener el límite de la visibilidad nocturna con base en los datos de Schnell et al. (2001) que la estimó como siendo de 109,9m para ropas oscuras (índice de reflexión de 0,11) y 182,2m para ropas ligeras (índice de reflexión de 0,81) con luz baja (con luz alta, se estimó el incremento de visibilidad en 50% aunque no se evaluó el correspondiente incremento para iluminación vial o diurna). Para el límite de la visibilidad con iluminación vial o diurna se adopta un múltiple convenientemente mayor.

Las inspecciones de campo indicaron las restricciones físicas de visibilidad existentes en los recorridos hechos con automóviles, lo que permitió mensurar las correspondientes distancias de visibilidad en *Google Earth*, considerando el efecto de obstrucciones físicas. En la SP 270, los valores medidos fueron 125m en el sentido Este y 130m en el sentido Oeste para el km 60,5; fueron 140 m en el sentido Este y 220m en el sentido Oeste para el no km 63. En la SP 280, para ambos los sitios, no había obstrucción física. A estos valores se añadieron las limitaciones de percepción de peatones, con base en los datos mencionados, como 200m en período nocturno (con iluminación vial) y 400m en período diurno. Además, se consideró adecuado adoptar valores distintos de tiempo de reacción de 1seg en la SP-270 (como travesía de peatones esperada, dado el contexto urbano del sitio) y de 2,5seg en la SP-280 (como travesía de peatones inesperada, dado el contexto rural del sitio). Por fin, se adoptó un frenado de 10km/h/seg con la distribución de velocidades generada a partir de la velocidad promedio medida en campo y un coeficiente de variación de 20%.

Para los sitios de la SP-270 se indica un potencial de accidentes notable (pero reducido) sólo en el km 63 para su período nocturno (que se relaciona con su mayor velocidad y restricciones de visibilidad) y para los sitios de la SP-280 se indica un potencial de accidentes sólo en el km 30, aunque nuevamente sólo en el período nocturno pero ahora bastante mayor y sólo en el sentido Oeste (que se relaciona nuevamente a diferencias de velocidad). Sobre la severidad de los accidentes, para los sitios de la SP-270 se estima una predominancia de casos leves y para los sitios de la SP-280 se predice una probabilidad bastante mayor de casos graves y fatales, pero en proporciones distintas a las observadas. Por lo tanto, se puede concluir que mismo considerando que la dirección de las ponderaciones introducidas es correcta, la escala de las estimativas no tiene precisión adecuada. Debe notarse que las diferencias en las velocidades observadas entre los sentidos de la SP-280 fueron motivadas, en parte, por período de congestión excepcionales que se observaron en las horas punta de la tarde (por lo tanto, parece conveniente recomendar que se evalúen las velocidades en operación normal y/o que se delimite claramente los períodos de congestión de manera específica).

3.3 Análisis del Diagnóstico de la Seguridad Vial con el Método Propuesto

Por supuesto, modelos de predicción fidedignos serían de todo deseables para garantizar que las conclusiones de diagnósticos cualitativos sean bien basadas. Todavía, debe preguntarse aún más si las conclusiones indicadas por el método propuesto genera juicios y decisiones adecuadas. Esta cuestión se evaluó analizando el diagnóstico cualitativo de la seguridad vial.

Con relación a la situación actual, la discusión anterior permitió percibir que diversas de las conclusiones que serían obtenidas son esencialmente correctas (presencia/ausencia de oportunidades de maniobra, riesgo y frecuencia de oportunidades de conflictos, evitabilidad de accidentes y severidad potencial, entre los sitios de la SP-270 y SP-280). Todavía, para los sitios de la SP-270, las medidas de OT y OC indicarían que ambos tienen esencialmente la misma condición de seguridad (marginally peor en el km 60,5 en función del mayor flujo de peatones) y una diferenciación más relevante aparecería solamente en la ponderación de un grado de accidentalidad y severidad resultante de la mayor velocidad en el km 63 (una conclusión claramente distinta de la obtenida con los datos de accidentes). A pesar de la precariedad en la cualidad de los datos de accidentes, parece haber una fuerte evidencia que esta no es la situación real. Condiciones específicas del sitio en el km 60,5 que podrían explicar su frecuencia de accidentes menor (a lo más de la velocidad menor) serían el efecto protector de los movimientos vehiculares de los lazos de retorno que cruzan la carretera por afuera de las travesías de peatones, y una condición de iluminación aparentemente mejor. Ya para los sitios de la SP-280, las conclusiones parecen ser trivialmente correctas: los sitios parecen similares y las diferencias de accidentalidad se explican de forma simples gracias a la mayor presencia de peatones en travesías en el km 30 (la conclusión cualitativa es clara: las condiciones existentes son bastante agresivas para los peatones y, en las condiciones existentes, siempre donde hay travesías de peatones, hay un riesgo bastante relevante).

Considerando la intervención observada en el km 63 de la SP-270, en 2008, y el histórico de accidentes en el período de 2005 a 2011, una validación preliminar del método propuesto también se puede hacer en este contexto (teniendo en cuenta la observación de una reducción pero también la persistencia de los atropellos después de la intervención). El análisis con el método propuesto tuvo que considerar que la intervención local (implantación de la isla central y adición de un carril por sentido) es parte de una intervención mayor (implantación de un entroncamiento en el km 62, con un enlace en trompeta) que alteró los flujos vehiculares (se estimó, con base en conteos actuales de los flujos desviados en el área del entroncamiento. A pesar de la modificación en la posición de los resaltos (antes bidireccionales y después unidireccionales en la llegada del sitio), se consideró que no hubo un cambio de velocidad (dado que las velocidades actuales son compatibles con ambas las situaciones). Evaluando la intervención de forma incremental en términos de medidas de oportunidad, el método propuesto indica que las modificaciones físicas tienen un impacto ambiguo (la división de la travesía sería efectiva si la distancia de cruce no se hubiera aumentado por la adición de un carril adicional por sentido) y que la mejoría es obtenida en la situación actual precipuamente en función de la reducción del flujo en relación a la situación previa. Además, comparándose la situación previa con la del km 60,5, la evaluación previa si reverte y el km 63 pasa a ser marginalmente peor (con flujos mayores, las oportunidades de conflicto son casi ciertas y múltiples si el flujo desviado aún se utilizara del km 63). El riesgo de accidente y su potencial de severidad se quedaría igual (lo que parece confirmarse por los datos recogidos).

Por lo tanto, parece claro que los modelos propuestos logran un grado interesante de poder predictivo pero aún necesitan ser mejorados para incorporar nuevas características físicas y operacionales que puedan explicar la diferencia en la seguridad vial entre los sitios de la SP-270 (e.g. el efecto barrera de flujos vehiculares, la posición de los resaltos, etc.).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En conclusión, queda demostrado que es posible derivar métodos de análisis de la seguridad vial que consideran como aspectos complementares la presencia/ausencia de las oportunidades de maniobra y de las oportunidades de conflicto, así como el riesgo de accidente y su potencial de severidad, tomando como ejemplo el contexto de las travesías peatonales en carreteras. Este principio para el modelado es una alternativa a los métodos predominantemente estadísticos (como en el *Highway Safety Manual*).

Con base en el ejemplo ilustrativo, la evaluación de la capacidad predictiva de una serie de modelos contra medidas empíricas de oportunidades y contra datos de accidentes observados (para travesías peatonales en carreteras que se difieren por los registros de accidentes) fue hecha y se ha demostrado que los modelos propuestos para oportunidad de maniobra obtuvieron un poder de predicción aceptable mientras los modelos propuestos para oportunidades de conflicto tenderán a subestimar su frecuencia. Sin embargo, por lo menos el modelo con travesías en brechas pareció ofrecer una escala de predicción aproximada. Para predecir el potencial de accidentes y su severidad, a partir de métodos simplificados para expandir las estimativas horarias de COs por período para valores anuales, se ha mostrado que la evaluación llega a una predicción de COs efectivas (una proxy para el potencial de accidentes anuales) y de la probabilidad de ocurrencias por nivel de severidad que adiciona una información relevante y particularmente sensible a la velocidad vehicular (entre otros aspectos discutidos de forma preliminar) y produce resultados de interés para el diagnóstico.

De manera similar, el diagnóstico cualitativo formulado con base en los resultados de la aplicación del método propuesto, comparada con el basado en los datos de accidentes, ha demostrado que muchas conclusiones relevantes se obtienen, aunque existan diversos aspectos a desarrollar para mejorar el poder de análisis.

Considerando la dificultad de obtención y la precariedad de la calidad de los datos de accidentes en muchos países y la posibilidad de formular un diagnóstico alternativo solamente con base en datos físicos y operacionales de los sitios, de forma sencilla y sensible, este enfoque parece promisor. Entre los estudios futuros, debe mencionarse la necesidad de incorporar más elementos relacionados con errores y comportamientos humanos o representar la contribución de otras variables relevantes (no solamente velocidad y visibilidad) para tornar los modelos más realistas. El enfoque propuesto debe también ser desarrollado para generalizar el análisis de severidad (que está restringida a los accidentes con peatones), además de ampliar el número de casos e controles para tener una muestra más representativa.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARTESP-Agência Reguladora dos Serviços Públicos Delegados de Transportes do Estado de São Paulo (2013) – **Relatório Consolidado de Acidentes de Trânsito nas Rodovias Concessionadas de São Paulo em 2012**, Relatório Interno, Brasil.

Brasil (2013) – **DATASUS-Informações sobre Saúde (TABNET)-Estatísticas Vitais**. Ministério da Saúde, Brasil (<http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/>, tabulación de datos referentes a 2011).

CET/Sp-Companhia de Engenharia de Tráfego da Prefeitura do Município de São Paulo (2012) – **Fatos e Estatísticas de Acidentes de Trânsito em São Paulo – 2011**, Brasil.

Davis, G. A. (2001) – Relating Severity of Pedestrian Injury to Impact Speed in Vehicle-Pedestrian Crashes. **Transportation Research Record**, 1773, pp 108-113.

Gold, P., A. (1998) – **Traffic Safety: Using Engineering to Reduce Accidents**, Inter-American Development Bank, USA.

Houston, R., L. (2009) – **Principles of Biomechanics**, 2nd Edition, CRC Press, USA.

IHME-Institute for Health Metrics and Evaluation (2010) – **The Global Burden Of Diseases: Generating Evidence, Guiding Policies**, University of Washington, USA.

Limpert, R. (2008) – **Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis**, 6th Edition, Lexis-Nexis, USA.

Ming, S. H. (2008) – **Oportunidades de Conflito de Tráfego – Modelos de Previsão** – Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Ogden, K. W. (1996) – **Safer Roads: A Guide to Road Safety Engineering**, Avebury Technical, Australia.

Pietrantonio, H.; Tourinho, L.F.B. (2005) – Parameters for the Evaluation of Pedestrian Safety Problems in Signalized Intersections with the Traffic Conflict Analysis Technique – a Study in São Paulo, Brazil. **Transportation Research Board Annual Meeting** (CD-ROM), Washington, USA.

Pietrantonio, H.; Tourinho, L.F.B. (2006) – A Decision-based Criterion for Selecting Parameters of Pedestrian Safety Problems with the Traffic Conflict Analysis Technique. In **Transportation Planning and Technology**, vol.29, No.3, pp-183-216.

Ribeiro, A. L. (2011) – **Método de Análise de Projetos Viários para Melhoria da Segurança de Pedestres e Ciclistas em Rodovias Concessionadas Paulistas** – Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Richards, D., Cuerden, R. (2009) – **The Relationship Between Speed and Car Driver Injury Severity**, Road Safety Web Publication 9, Road Research Laboratory/Department for Transport, UK.

Schnell, T., Aktan, F., MCGeehe, D.V., Dvorak, M., Hunt, J., Reyes, A.; Sorak, D. (2001) – Pedestrian Visibility Under Automobile Low-Beam Headlight Illumination. **Transportation Research Record**, 1773, pp 114-124.

Simms, C.; Wood, D. (2009) – **Pedestrian and Cyclist Impact: a Biomechanical Perspective**, Springer, UK.

Tanner, J. C. (1951) –The Delay to Pedestrians Crossing a Road. **Biometrika**, vol.38, no.3/4, pp.383-392.

Vasconcelos, V. M. A. (2004) – **Oportunidades de Travessia e Oportunidades de Conflito para Pedestres em Interseções Semaforizadas** – Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

WHO-World Health Organization (2008) – **The Global Burden Of Diseases- 2004 Update**, Switzerland.

WHO-World Health Organization (2013) – **Global Status Report on Road Safety 2013- Supporting a Decade of Action**, Switzerland.

Zhang, L.; Prevedouros, P.D. (2003) – Signalized Intersection Level of Service Incorporating Safety Risk. **Transportation Research Record**, 1852, pp.77-86.