

INTERSEÇÕES RODOVIÁRIAS NO BRASIL: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Fábio Quintela Fortes

Mario Augusto Fattori Boschiero

Divisão Regional de Araraquara – DR.4 – DER-SP

(fr.fortes@uol.com.br) (camahuma@uol.com.br)

Pedro Ricardo Frissina Blassioli (*in memoriam*)

Superintendência do DER – SP

Antonio Clóvis Coca Pinto Ferraz

Escola de Engenharia de São Carlos – USP

(coca@sc.usp.br)

RESUMEN

La mayor parte de los dispositivos en nivel utilizados en las autovías brasileñas es la rotonda abierta en el medio, en la cual los vehículos de la autovía principal pasan directo con total prioridad, y por eso mismo con altas velocidades. Por consecuencia, el número de accidentes es muy alto y, en general, bastante graves, con grande ocurrencia de víctimas fatales. Al contrario, en los países desarrollados, sobre todo en los últimos 10 años, ha sido grande la utilización de dispositivos del tipo modernas rotundas (giradores o glorietas), en las cuales todos los vehículos que llegan necesitan disminuir mucho la velocidad y muchas veces parar, pues la prioridad es para el flujo de la vía circular. Con esa solución se ha logrado reducir bastante los índices de accidentes. En Brasil, la moderna rotonda aún es mucho poco utilizada en las autovías, siendo su utilización mas frecuente en las ciudades. Lo que pasa es que los ingenieros nacionales entienden ser muy arriesgado utilizar en el país las modernas rotundas, pues los conductores no están acostumbrados a conceder la prioridad (muchas veces necesitando parar) estando en la autovía principal. Por eso, el indicado para el país, en el presente, es el empleo de la rotonda cerrada (en la cual todos los vehículos necesitan contornear el dispositivo y por eso disminuir la velocidad) con prioridad para la autovía principal. Esa solución ha presentado muy buen desempeño en las autovías nacionales. Otro aspecto también relevante es la mayor capacidad de las rotundas cerradas en comparación con las rotundas abiertas. Con la intención de traer mas informaciones acerca de la cuestión, en esta ponencia es presentada estudio comparativo de la seguridad entre los tres tipos de dispositivos: la rotonda abierta, la rotonda con prioridad para la autovía principal y la rotonda con prioridad para la vía circular (moderna rotonda). La conclusión es que las rotundas con prioridad para la vía principal presentan mucho mas seguridad que las rotundas abiertas. En futuro, no obstante, todo indica que el país pasara a utilizar la moderna rotonda, debido a las mayores ventajas que proporciona en lo tocante a seguridad y capacidad.

1. INTRODUÇÃO

As interseções vazadas permitem uma elevada velocidade de transposição, os fluxos secundários atravessam em uma única etapa os fluxos opostos da via principal, ocorrem manobras de cruzamento com ângulos próximos de 90° e não existe separação dos fluxos opostos da via principal. O uso disseminado de interseções com essas características tem levado a uma alta freqüência de acidentes, na maioria graves, por causa da elevada velocidade na via principal.

Nos países desenvolvidos que possuem alto índice de segurança viária, notadamente nos países da Europa, há muitos anos as interseções vazadas deixaram de ser empregadas nos cruzamentos com volumes de tráfego significativos. A interseção com ilha central tipo rotatória e com prioridade para a via de contorno (RFPC), também conhecida como moderna rotatória, é a solução que vem sendo utilizada de maneira generalizada nesses países, inclusive em rodovias de pista dupla com duas faixas por sentido e, também, em substituição a interseções semaforizadas. Isso vem ocorrendo em razão do elevado nível de segurança e capacidade que a moderna rotatória proporciona.

No Brasil, a moderna rotatória ainda é muito pouco utilizada nas rodovias, sendo o seu uso mais freqüente nas áreas urbanas. Na área rodoviária existe certa prevenção quanto ao uso das modernas rotatórias em razão da necessidade do fluxo da via considerada principal ter que ceder a prioridade e eventualmente ter que parar. Muitos engenheiros acreditam que os motoristas brasileiros, quando trafegando pela via considerada principal, não estão preparados para a necessidade de ceder prioridade na entrada da interseção - o que atuaria no sentido de aumentar o risco de acidentes.

Como a moderna rotatória ainda é uma alternativa considerada radical para a realidade nacional, um primeiro passo para melhoria da segurança e do nível de serviço das interseções rodoviárias nacionais seria a implantação de interseções fechadas com prioridade para a via principal (RFPP). Recentemente, tem-se observado no país a transformação de interseções vazadas em interseções fechadas nos cruzamentos de maior volume de tráfego. Muitas interseções do tipo semi-rotatória vazada (SRVPP) estão sendo fechadas através do bloqueio do fluxo direto da via principal, obrigando os veículos da via principal a também contornarem a nova ilha central.

Todas as transformações efetuadas têm se mostrado vantajosas: em termos de segurança e de aumento da capacidade para o fluxo secundário. Existem, porém, alguns detalhes relativos ao projeto geométrico e de sinalização nessas readequações que necessitam ser cuidadosamente observados para otimizar ainda mais a segurança. A Divisão Regional de Araraquara do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, DER-SP, desenvolveu uma concepção geométrica adequada, adaptando alguns novos conceitos de segurança das modernas rotatórias à condição de prioridade para a via principal.

Neste artigo são apresentados os conceitos de segurança importantes e uma análise comparativa desses aplicados aos três tipos de interseções, além de dados de capacidade de tráfego e custos de implantação.

2. ANÁLISE DE SEGURANÇA

A accidentalidade viária está ligada a vários fatores, entre eles a falha humana. A experiência mostra que o fator “falha humana” está presente de forma preponderante na grande maioria dos acidentes. À luz desse fato, se houvesse a possibilidade hipotética de zerar a ocorrência de falhas humanas, a quantidade de acidentes se reduziria a valores mínimos. Como isso não é possível, pois o ser humano inexoravelmente comete erros, deve-se adotar duas medidas para minimizar a quantidade e a gravidade dos acidentes:

1. Construir interseções que facilitem a tomada de decisão por parte dos condutores e pedestres, para que estas sejam feitas com maior clareza e segurança, minimizando a probabilidade de ocorrência de erros. Quanto mais simples a tarefa do usuário, menor a probabilidade dos erros acontecerem.
2. Construir interseções, tanto quanto possível, toleráveis às falhas humanas, para reduzir as consequências dos acidentes. A configuração geométrica da interseção deve evitar a possibilidade de ocorrência de acidentes graves que resultem em vítimas fatais ou com seqüelas para o resto da vida. A punição para um pequeno erro, muitas vezes por distração, não pode levar à morte.

Para contemplar essas duas recomendações, a seguir, são analisados os fatores que as afetam.

2.1. Análise da complexidade das tarefas nas tomadas de decisão

♦ *Velocidade de transposição*

A tarefa de travessia ou interação com fluxos prioritários é tanto mais complexa, quanto mais elevada for a velocidade desses fluxos. O usuário do fluxo secundário tem maior facilidade de avaliar corretamente as velocidades do fluxo prioritário, quando este possui velocidades mais reduzidas uma vez que existe uma faixa menor de dispersão entre essas velocidades. Dessa forma, ele avalia com maior precisão a real velocidade de cada veículo e tem maior facilidade de estabelecer corretamente o seu padrão de intervalo aceitável, diminuindo a probabilidade de ocorrência de erros.

Com velocidades mais reduzidas, no caso de haver uma saída anterior para o fluxo principal antes da entrada do fluxo secundário, a distância segura para avaliação correta do destino do veículo do fluxo principal por parte do condutor do fluxo secundário é menor, diminuindo a probabilidade de situações duvidosas quanto ao destino do veículo do fluxo principal. Da mesma forma, com velocidades mais reduzidas são maiores as chances do motorista do fluxo principal reagir a tempo e evitar a colisão, freando ou desviando do veículo que está à frente; e mesmo que a colisão for inevitável, a gravidade do acidente é muito menor. Além disso, no caso de convergência com o fluxo principal, se as velocidades são menores, o motorista do fluxo secundário consegue, em menor período de tempo, acelerar e atingir a velocidade do fluxo principal evitando situações de conflito.

Portanto, com velocidades mais reduzidas, as interseções se tornam mais amistosas, as tarefas de decisão se tornam mais simples e com menores probabilidades de erros. Elevadas velocidades

transmitem uma sensação de agressividade que leva a uma maior insegurança para todos os usuários, sejam eles motoristas dos fluxos secundários, pedestres, ciclistas, etc.

- ♦ *Número de direções a serem observadas para tomada de decisão*

A quantidade de direções que o motorista tem de observar para poder tomar a decisão de prosseguir e transpor a interseção afeta significativamente a segurança. Alguns movimentos nas interseções, como o mostrado na situação **a** da Figura 1, exigem que o motorista da via secundária necessite observar dois ou três fluxos em sentidos praticamente opostos. No momento em que ele observa um dos fluxos, o outro sai do seu campo de visão, e ele armazena na memória apenas a condição do último instante que conseguiu registrar. Essa condição exige um exercício rápido de memória, que nem sempre é eficiente para todos os motoristas, principalmente quando o volume de tráfego é elevado na via principal, o tempo de espera é grande e as velocidades são elevadas. No instante da tomada de decisão, o condutor estará observando apenas um lado e o outro estará registrado na memória com uma condição de alguns instantes anteriores. O processo de tomada de decisão é complexo aumentando a probabilidade do motorista errar na sua avaliação e tornando a manobra menos segura.

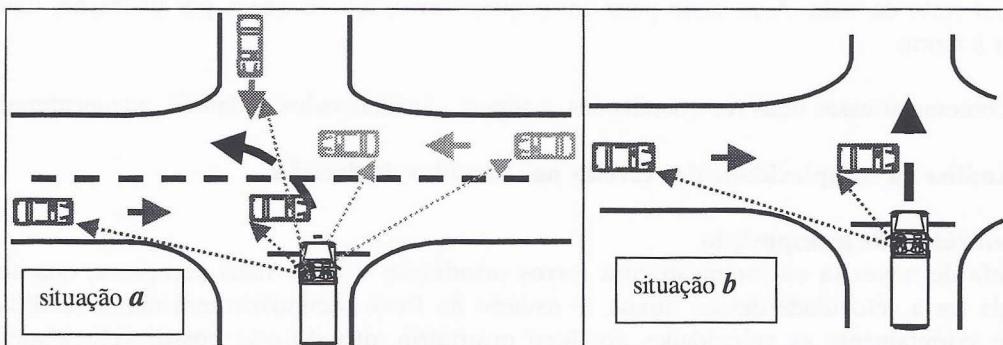


Figura 1: Número de direções a serem observadas para tomada de decisão.

Interseções, como a da situação **b** da Figura 1, em que no instante da tomada de decisão o motorista necessita observar apenas um lado, ele toma a decisão de avançar ou não, olhando e avaliando constantemente os intervalos aceitáveis do fluxo conflitante, são mais seguras. O processo de tomada de decisão é mais simples. Assim, as interseções que trazem na sua concepção o menor número possível de direções a serem observadas para tomadas de decisão são mais favoráveis em termos de segurança.

- ♦ *Ângulo de observação para tomada de decisão*

O ângulo de entrada nas interseções tem que favorecer as condições de visibilidade para todos os tipos de veículos, principalmente nos locais em que o motorista tem que tomar uma decisão de avançar ou aguardar uma oportunidade mais segura. Os ângulos de visibilidade mais acessíveis aos motoristas resultam em movimentos mais confortáveis com melhores condições de avaliação da real situação, minimizando a probabilidade de cometerem erros. A Figura 2 ilustra as condições mais comuns de visibilidade para o motorista no interior de um veículo tipo camioneta furgão, caminhão caçamba, caminhão baú, etc. - que podem ser considerados os mais críticos em termos de bloqueio visual.

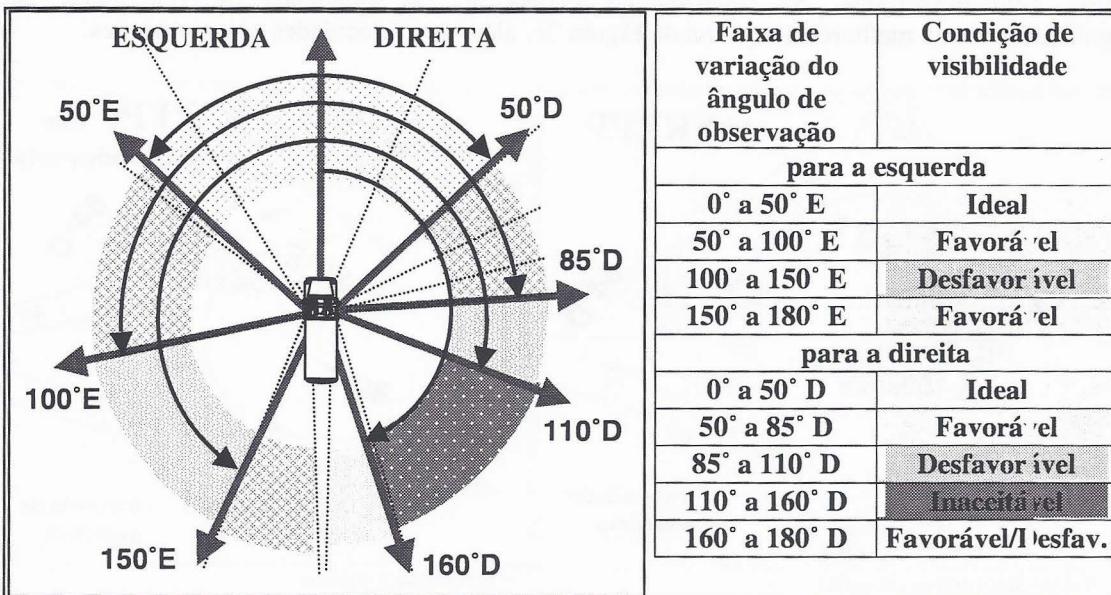


Figura 2: Condições de visibilidade em função do ângulo de observação

Todas as entradas das interseções devem ser ajustadas para permitir as melhores condições de visibilidade possíveis conforme a Figura 2. As interseções que trazem na sua concepção ângulos de observação mais favoráveis para tomada de decisão são mais indicadas.

♦ *Legibilidade da interseção*

Um dispositivo será tanto mais seguro e eficiente quanto mais legível for o seu ordenamento geométrico. Conforme Silva (Silva, 1997), “o motorista deve compreender instantaneamente o funcionamento da interseção e adotar naturalmente uma trajetória e um comportamento adequados sem qualquer embaraço ou hesitação”. Nesse sentido, quanto mais simples for a geometria melhor. Um bom projeto em termos de legibilidade pode ser considerado aquele no qual a própria configuração geométrica induz os usuários, de uma forma natural, a terem um comportamento adequado, prescindindo inclusive da necessidade de sinalização - esta passa a ser apenas um reforço para orientar os usuários.

♦ *Análise comparativa da complexidade das tarefas*

A Figura 3 ilustra a complexidade das tarefas nos três tipos de interseções, incluindo duas concepções geométricas distintas para a RFPP.

O motorista do fluxo secundário, na travessia da via principal da SRVPP da Figura 3a, necessita observar simultaneamente dois fluxos com velocidades altas e praticamente opostos, para tomar a decisão de avançar ou aguardar uma próxima oportunidade, situação esta muito desfavorável. Os ângulos de visibilidade nas RFPPs dependem das características geométricas, que necessitam ser

muito bem observadas. Na rotatória da Figura 3b, as condições de visibilidade são significativamente melhores do que na da Figura 3c, além das velocidades serem menores.

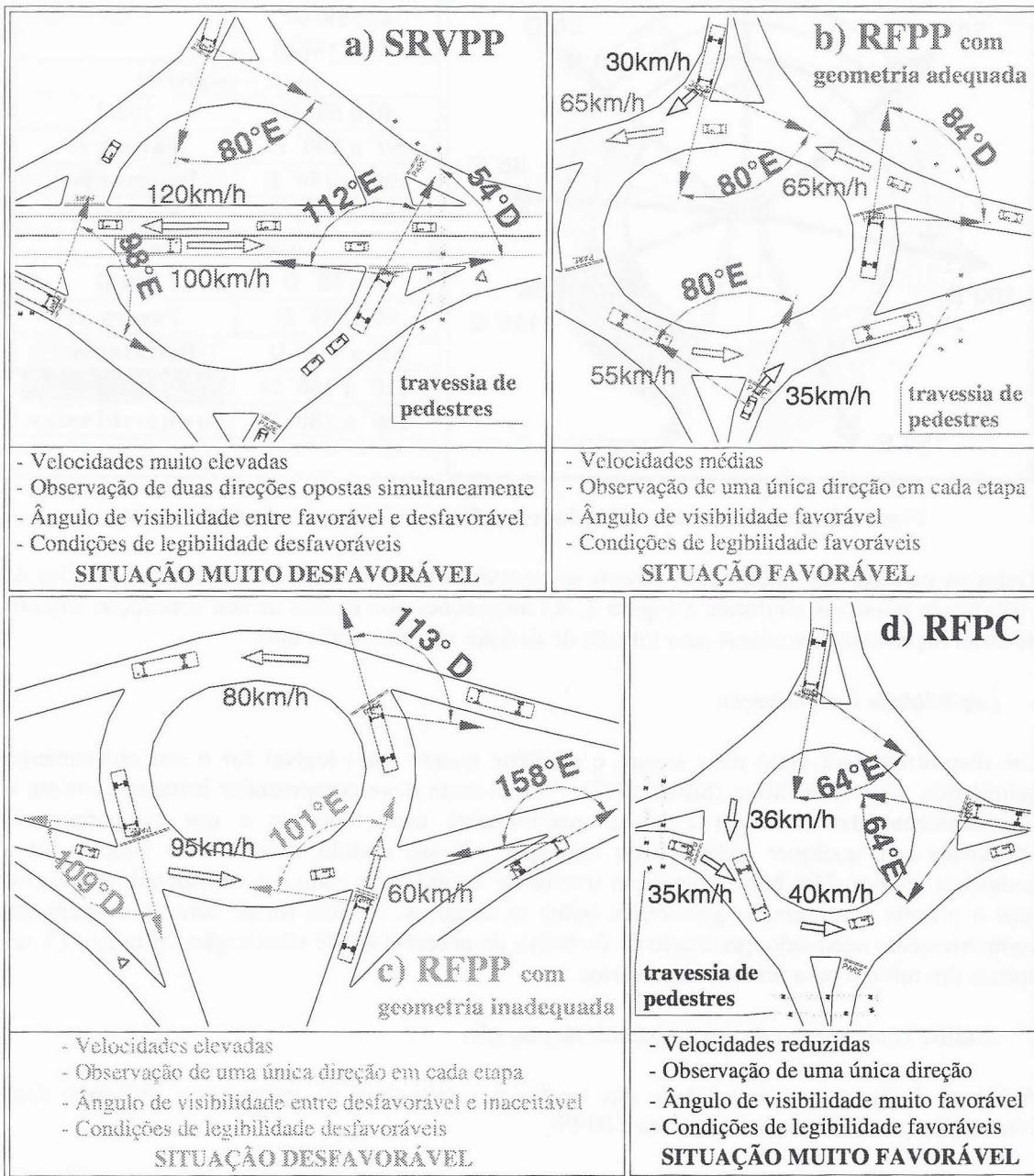


Figura 3: Complexidade das tarefas nos diferentes tipos interseções em análise.

Nesses tipos de rotatórias deve-se adotar raios de curvatura das aproximações e da ilha central para que a condição de visibilidade na segunda etapa da travessia não atinja uma condição inaceitável, conforme o que ocorre na Figura 3c. Em ambos os exemplos, os motoristas observam

um único lado por etapa nos locais de tomada de decisão condição que é muito mais favorável do que a observada na SRVPP. Conforme Figura 3d, as RFPC são as que apresentam tarefas menos complexas para seus usuários e, portanto, menor probabilidade de cometerem erros.

Na SRVPP, muitos motoristas da via principal transpõem a interseção com elevada velocidade sem sequer notar que ali existe uma interseção, em razão de terem na interseção um trecho em tangente similar aos trechos de vias adjacentes. Muitas vezes, o motorista é surpreendido por veículos ou pedestres que atravessam a pista a sua frente sem tempo de reagir. Essa é uma situação de legibilidade desfavorável que não ocorre nas demais alternativas de rotatórias fechadas, uma vez que a existência de canteiros centrais e de deflexões chama a atenção do condutor e exige redução da velocidade para se adequar a geometria da interseção. Nesses casos, é praticamente impossível transpor a interseção sem percebe-la e ficar alerta aos possíveis conflitos. Assim, pode-se considerar que a RFPP da Figura 3b, apresenta melhor legibilidade do que a da Figura 3c, em razão das deflexões mais acentuadas, tanto para as aproximações da via principal como da via secundária, que forçam uma maior redução da velocidade e favorecem a conscientização do motorista de que está se aproximando de uma interseção.

Quanto às condições de travessia de pedestres, observa-se que as alternativas de rotatórias fechadas são mais favoráveis, em função de três fatores: travessia dos fluxos opostos da via principal em duas etapas, o pedestre necessita observar um único lado por vez para tomar a decisão de atravessar ou não; as distâncias a serem vencidas nas travessias são menores, geralmente a largura de uma faixa de tráfego; e as velocidades dos veículos são mais reduzidas, aumentando as chances dos motoristas reagirem a tempo de evitar o atropelamento.

2.2 Gravidade das possíveis colisões

♦ *Probabilidade de vítima fatal em função da velocidade e do tipo de choque*

A severidade das lesões nos ocupantes dos veículos em uma colisão é função da velocidade e do nível de proteção que o usuário tem no momento do choque. Para os usuários protegidos dentro da estrutura de um veículo, se o choque for frontal ou lateral as condições de proteção são distintas. Para choques frontais e traseiros, os veículos possuem uma estrutura que garante uma maior proteção aos seus ocupantes do que nos choques laterais. Assim para uma mesma velocidade de colisão, as lesões são mais graves nos choques laterais do que nos frontais.

A Figura 4 mostra a probabilidade de acidentes com vítimas fatais em função da velocidade de impacto no caso de atropelamento de pedestre, choque lateral e choque frontal, conforme estudos da *Associação Sueca* (CALM STREETS, 1999). Nessa figura observa-se que para uma mesma velocidade, a probabilidade de vítima fatal é maior para pedestres, depois para choque lateral e, por último, para choque frontal. Na figura observa-se, também, que para reduções de velocidade relativamente pequenas, ocorre uma grande queda da probabilidade de morte para todos os tipos de acidentes.

♦ *Relação raio de curvatura/velocidade*

Como a redução da velocidade é o principal foco para melhorar a segurança das interseções, as soluções que trazem na sua concepção elementos que forcem a redução da velocidade são as

que tem maior perspectiva de sucesso. O principal recurso utilizado para reduzir as velocidades tem sido implantar deflexões horizontais obrigatórias para todos os veículos, de maneira a não permitir, em nenhuma circunstância, que um veículo transponha a interseção com velocidade elevada.

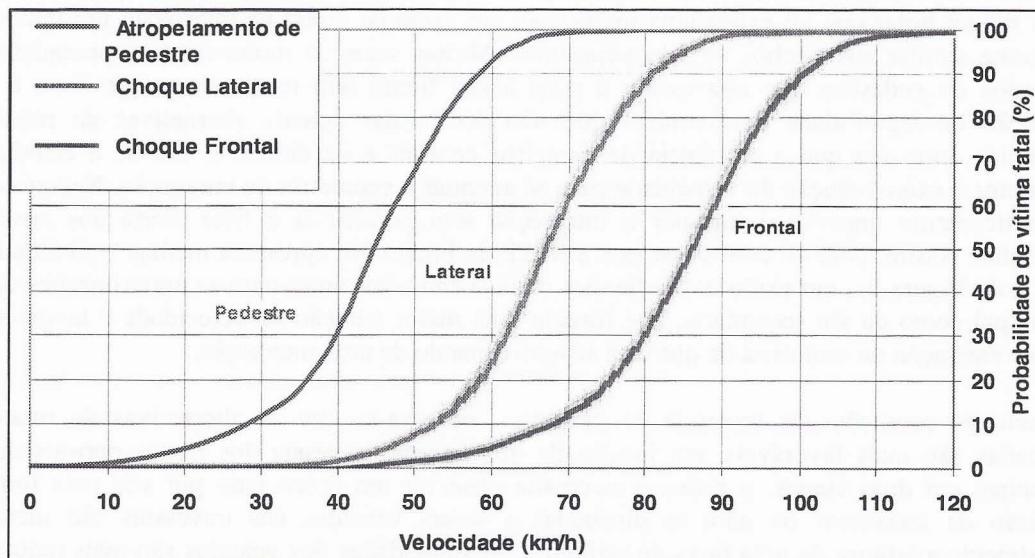


Figura 4: Probabilidade de acidente com vítima fatal em função da velocidade

Existe uma relação entre o raio de curvatura da trajetória de um veículo e a velocidade máxima que este consegue alcançar, mantendo garantidas condições mínimas de conforto e segurança. Alguns testes realizados na região de Araraquara mostraram que os veículos atuais mais rápidos percorrem trajetórias com raios de deflexão de 20m, 60m, 100m, 140m e 180m com velocidades de 32km/h, 55km/h, 70km/h, 82km/h e 92km/h respectivamente. Essa correspondência de valores será utilizada na análise comparativa a seguir.

♦ *Trajetória de maior velocidade*

Existe certa tendência dos motoristas, ao transpor uma interseção, de percorrer a trajetória mais cômoda, que implica em deflexões menos acentuadas. Isso é possível, dentro dos limites de largura das faixas disponíveis, através de trajetórias que tangenciam as bordas das pistas pavimentadas. Como para a análise comparativa de segurança é necessário considerar as situações mais críticas, será considerada a relação velocidade em função do raio de curvatura da trajetória de maior velocidade, e não o raio de curvatura do eixo da pista.

♦ *Velocidade relativa de impacto em função do ângulo de colisão*

A dinâmica da dissipação da energia cinética envolvida numa colisão entre veículos é bastante complexa. Para permitir uma análise comparativa da gravidade das colisões nas diferentes interseções foram utilizados modelos simplificados. Para uma colisão transversal como a da situação “a” da Figura 5, com ângulo de colisão de 90°, 100% da energia da energia cinética do movimento do veículo 1 é dissipada quase que integralmente sobre o veículo 2. Para ângulos de

colisão menores do que 90° , como o caso da situação “b”, uma parte da energia é dissipada na forma de desvios de trajetória. De forma simplificada, pode-se admitir que a energia a ser dissipada no choque entre os veículos é proporcional ao seno do ângulo formado entre as trajetórias. Dessa forma, a velocidade relativa com que o veículo 1 atingiria o veículo 2 seria $V1 \cdot \text{sen} \lambda$ e, da mesma forma, o veículo 2 atingiria o 1 com velocidade relativa $V2 \cdot \text{sen} \lambda$.

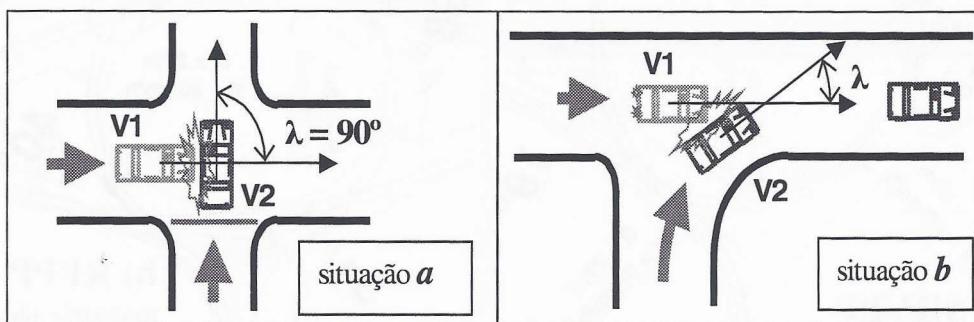


Figura 5: Diferentes ângulos de colisões

- ♦ *Análise comparativa das possíveis colisões e da colisão crítica*

Na Figura 6 são apresentados os fatores ligados à gravidade das possíveis colisões. Como colisão crítica foi admitida a de maior gravidade possível, considerando todas as manobras permitidas e realizadas com as máximas velocidades. Conforme Figura 6a, na SRVPP existe a possibilidade de ocorrência de colisões gravíssimas, com praticamente 100% de probabilidade de vítimas fatais, tanto envolvendo veículos dos fluxos da via principal e secundária, como veículos dos fluxos opostos da via principal. Como não existe o afastamento entre os fluxos opostos nesta via, se houver a necessidade de um pequeno desvio de trajetória e/ou a perda de controle de um dos veículos, tanto a probabilidade de ocorrência da colisão frontal como a gravidade do acidente são elevadas.

Conforme Figuras 6b e 6c, a probabilidade da ocorrência de acidentes graves na RFPP depende das características geométricas. No exemplo apresentado na Figura 6b, praticamente inexiste a possibilidade de acidentes graves, em razão das maiores limitações dos raios das trajetórias e dos ângulos mais reduzidos das possíveis colisões. Já na rotatória da Figura 6c as colisões podem ser gravíssimas com probabilidades de vítima fatal muito elevadas.

Conforme Figura 6d, na moderna rotatória as possíveis colisões são de baixíssima severidade praticamente sem nenhuma probabilidade de vítimas fatais. Nas três alternativas de rotatórias fechadas a probabilidade de colisões frontais entre veículos dos fluxos opostos da via principal é muito pequena, em virtude do afastamento desses fluxos.

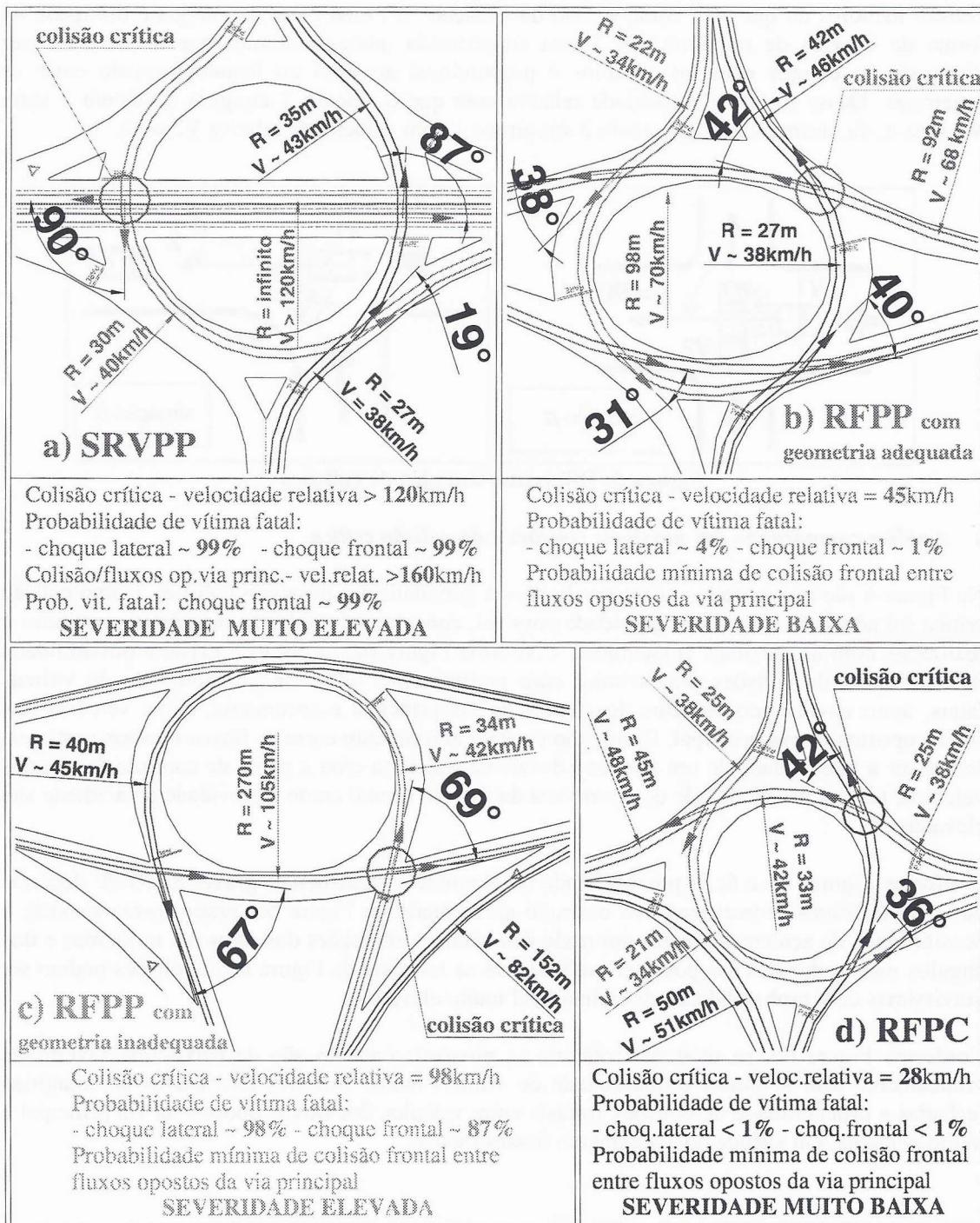


Figura 6: Gravidade das possíveis colisões nos diferentes tipos interseções em análise.

Outra possibilidade de acidentes nas rotatórias está relacionada à perda de controle dos veículos que se aproximam da interseção sem a devida redução de velocidade. O que foi constatado em

muitas rotatórias implantadas no interior do estado de São Paulo, é que se elas forem bem sinalizadas, principalmente nas primeiras semanas, a ocorrência desse tipo de acidente é bastante rara e de baixa gravidade.

3. CAPACIDADE DE TRÁFEGO

A Figura 7 apresenta os limites de volume de tráfego que podem operar em condições satisfatórias nas interseções em análise, segundo a metodologia do *HCM-2000* (TRB, 2000), considerando-se o atraso médio do movimento crítico da interseção e o nível de serviço D.

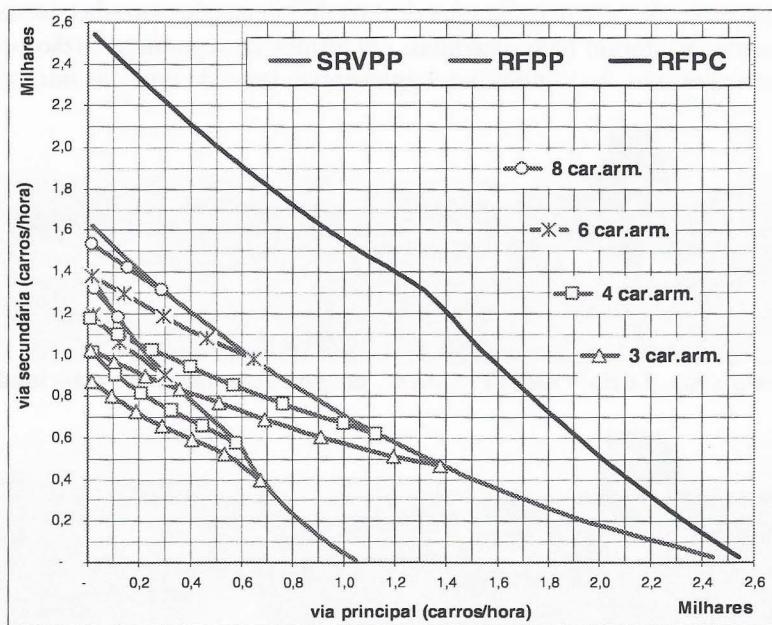


Figura 7: Volumes máximos em condições satisfatórias de operação.

Conforme Figura 7, a RFPP possui capacidade de tráfego superior à da SRVPP, porém, os dois tipos de interseções possuem limitações de armazenamento de veículos dentro do dispositivo, que podem levar a uma operação em condições indesejáveis. Nas modernas rotatórias, além de apresentarem capacidade de tráfego muito superior às demais, não existe a possibilidade de travamento – evento que pode ocorrer nas rotatórias com prioridade para a via principal.

4. CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

Existe grande variabilidade de dimensões dos diferentes tipos de interseções, que, obviamente, influem no custo de implantação. Na Tabela 1 estão indicadas faixas de variação da área pavimentada e do custo dos três tipos de interseções para as condições do estado de São Paulo, Brasil.

Tabela 1: Área de pavimento e custos de implantação.

Tipo	Área pavimentada (m²)	Custo (R\$)
SRVPP	de 2.400 a 2.700	96.000,00 a 108.000,00
RFPP	de 2.200 a 3.400	88.000,00 a 136.000,00
RFPC	de 1.900 a 2.100	76.000,00 a 84.000,00

5. TRANSFORMAÇÕES DE INTERSEÇÕES IMPLEMENTADAS PELO DER-SP

Seguindo as diretrizes apresentadas neste trabalho, a regional de Araraquara nos últimos três anos implementou transformações em mais de uma dezena de interseções vazadas, tornando-as RFPPs. Todas as implementações foram bem sucedidas, em termos de segurança, razão pela qual já estão programadas diversas outras. As Figuras 8 e 9 apresentam fotos de uma das interseções.



Figura 8: Acesso a Sta. Lúcia – SRVPP “antes”, tangente que incentiva velocidades elevadas.



Figura 9: Acesso a Sta. Lúcia – RFPP “depois”, deflexão que obriga a redução da velocidade.

6. CONCLUSÕES

A RFPP, desde que obedecidos certos requisitos geométricos, apresenta condições de segurança e capacidade superiores à da SRVPP devendo, portanto, ter o seu uso incentivado no presente. No futuro, entretanto, com a mudança de comportamento dos condutores, tudo indica que será inevitável a adoção da moderna rotatória ou RFPC no país, em razão das ainda maiores vantagens que proporciona em termos de segurança e capacidade. O fato de todos os veículos serem obrigados a reduzir mais significativamente a velocidade nas entradas da interseção leva a um grande aumento da segurança. Com a prioridade para o fluxo da via circular, é maior a capacidade da interseção, assim como é eliminada a possibilidade de travamento.

REFERÊNCIAS

- CALM STREETS (1999) The Swedish Association of Local Authorities. "Calm Streets! A planning process for safer, more eco-friendly, pleasant and attractive streets in urban areas". Svenska Kommunförbundet. 1999.
- Silva, A.M.C.B. Aplicabilidade e Concepção de Intersecções Giratórias nas Redes Viárias Urbana e Rural Portuguesas. Dissertação Mestrado, Universidade de Coimbra. 183p. 1997.
- TRB (2000) Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, Special Report 209. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 2000.