



**Nuno Manuel da
Balinha Santos**

**Análise do Desempenho de Rotundas segundo o
HCM 2010**



**Nuno Manuel da
Balinha Santos**

**Análise do Desempenho de Rotundas segundo o
HCM 2010**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

À minha família e amigos

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Luís Pimentel Vasconcelos
Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viseu

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A realização desta dissertação contou com o apoio e colaboração de um grupo de pessoas, às quais quero expressar o meu sincero e sentido agradecimento.

Ao Professor Doutor Joaquim Macedo, meu orientador, pelo material fornecido, pela disponibilidade, dedicação, atenção e profissionalismo revelados.

À minha família e amigos por todo o apoio que direta ou indiretamente sempre me deram.

Ao meu irmão João por toda a ajuda, mas em especial na recolha de dados.

Ao meu amigo Alberto Almeida pela motivação, paciência e compreensão demonstrados, pelos bons momentos passados e pela ajuda na recolha de dados.

Aos meus camaradas e à Instituição Militar (Exército) pela ajuda e pelas facilidades nos horários que sempre que foi necessário, nunca nada me foi negado.

A todos eles, um muito obrigado.

palavras-chave

rotunda, HCM 2010, matriz origem/destino, atraso de referência, atraso geométrico, nível de serviço, capacidade

resumo

A construção de interseções giratórias, ou simplesmente rotundas, tem crescido substancialmente nos últimos anos. Com esta tipologia pretende-se alcançar maior segurança e fluidez relativamente aos outros tipos de interseções de nível utilizados.

O objetivo deste trabalho é analisar a capacidade de uma rotunda segundo o HCM 2010, verificar se o método escolhido será o mais adequado e também se é viável a sua aplicação em Portugal.

A capacidade de uma rotunda pode ser obtida recorrendo a diferentes métodos, entre eles os probabilísticos, os estatísticos e os modelos de simulação. O HCM 2010 é um método probabilístico que tem em conta os fluxos de veículos na rotunda para fazer a sua avaliação.

Neste trabalho são apresentados os valores de capacidade obtidos não só através da aplicação do HCM mas também do método do TRL e da FCTUC. Foi ainda determinado o atraso de referência para os valores de capacidade obtidos através do HCM e uma estimativa para o atraso geométrico da mesma rotunda.

Conclui-se que os valores de capacidade revelados pelo HCM e os restantes métodos são significativamente diferentes o que nos indica que a aplicação do HCM à realidade portuguesa não deverá ser feita de forma direta e deverá ser alvo de algum tipo de calibração para que possa ser utilizado como um método válido.

keywords

roundabout, HCM 2010, origin/destiny matrix, control delay, geometric delay, level of service, capacity

abstract

The construction of round intersections, or just roundabouts, has significantly increased over recent years. With this typology it's intended to achieve greater safety and fluidity compared to other types of level intersections used.

This works aims to analyze a roundabout capacity using the HCM 2010, verify if the chosen method is adequate and also if its application to Portugal is viable.

A roundabout's capacity can be estimated using different methods, including probabilistic, statistical and simulation models. HCM 2010 is a probabilistic method that takes into account the flows of vehicles at the roundabout to make an assessment.

This work displays the capacity values obtained using not only the HCM but also the TRL and FCTUC methods. The control delay for the capacity values achieved with the HCM and an estimate for the geometric delay on the same roundabout were also ascertained.

It is concluded that the capacity values revealed by the HCM and the other methods are significantly different, which indicates that the application of HCM to the Portuguese reality should not be done directly and should be subject to some kind of calibration so that it can be used as a valid method.

Índice

Índice.....	I
Índice de Figuras.....	III
Índice de Tabelas.....	V
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Enquadramento.....	2
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Organização da dissertação.....	5
2. Rotundas.....	7
2.1. Definição e sua aplicação.....	7
2.2. Tipos de rotundas.....	8
2.2.1. Rotunda normal e rotunda semi-galgável.....	8
2.2.2. Mini-rotunda.....	9
2.2.3. Rotundas desniveladas.....	11
2.2.4. Rotundas semaforizadas.....	12
2.2.5. Outros tipos.....	13
3. Análise de desempenho de rotundas.....	15
3.1. Introdução.....	15
3.2. Modelos estatísticos.....	15
3.2.1. TRL.....	16
3.2.2. FCTUC.....	18
3.3. Modelos de microssimulação.....	20
3.4. Modelos probabilísticos.....	22
3.4.1. Highway Capacity Manual 2010.....	22
4. Caso de estudo.....	35
4.1. Introdução.....	35
4.2. Geometria da rotunda.....	36
4.3. Recolha de dados de tráfego.....	37
4.3.1. Tipos de recolhas.....	37
4.3.2. Recolhas de dados em campo.....	39
4.4. Capacidades.....	51
4.5. Atrasos.....	52
4.5.1. Atraso devido às filas de espera.....	52
4.5.2. Atraso geométrico.....	56
5. Conclusões e perspectivas futuras.....	59
5.1. Conclusões.....	59
5.2. Perspetivas futuras.....	60

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo de comparação entre pontos de conflito (FHWA, 2010).....	3
Figura 2 - Pontos conflito Peão/Veículo (FHWA, 2010).....	4
Figura 3 - Rotunda normal (Bastos Silva & Seco, 2006).....	9
Figura 4 - Mini-rotunda (com ilha central materializada) (Bastos Silva & Seco, 2006).....	9
Figura 5 - Mini-rotunda com ilha central pintada (Bastos Silva & Seco, 2006).....	10
Figura 6 - Rotunda desnivelada de grandes dimensões (Bastos Silva & Seco, 2006).....	11
Figura 7 - Rotunda desnivelada - solução com um viaduto (Bastos Silva & Seco, 2006).....	12
Figura 8 - Rotunda semaforizada (Bastos Silva & Seco, 2006).....	13
Figura 9 - Rotunda dupla (Bastos Silva & Seco, 2006).....	13
Figura 10 - Rotunda em anel (Bastos Silva & Seco, 2006).....	14
Figura 11 - Parâmetros Geométricos – modelo TRL (Bastos Silva, 2002).....	18
Figura 12 - Volume conflituante no ramo A para uma rotunda de 4 ramos.....	25
Figura 13 – Débito de saída no ramo A para uma rotunda de 4 ramos.....	26
Figura 14 - Planta Referenciada da Rotunda da Policlínica.....	36
Figura 15 - - Planta Referenciada da Rotunda da Policlínica com disposição das Câmaras de Vídeo.....	41
Figura 16 - Vista Superior da Rotunda (Google, 2016).....	42
Figura 17 - Vista da Câmara 1.....	42
Figura 18 - Vista da Câmara 2.....	43
Figura 19 - Vista da Câmara 3.....	43
Figura 20 - Vista da Câmara 4.....	44
Figura 21 - Vista da Câmara 5.....	44
Figura 22 - Fila de espera ramo A (vista da Câmara 1).....	53
Figura 23 - Fila de espera ramo D (vista da Câmara 2).....	54

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Generalização dos casos assumidos	27
Tabela 2 - Distribuição de Volumes	28
Tabela 3 - Fatores de ajuste para a capacidade de entrada de dupla-via devido à presença de peões	30
Tabela 4 – Níveis de Serviço.....	32
Tabela 5 - Dados Geométricos da Rotunda.....	37
Tabela 6 - Intervalos de tempo considerados na recolha de dados	39
Tabela 7 - Matriz Origem/Destino com "esquema de contagem"	45
Tabela 8 - Matriz Origem/Destino com referência às respetivas camaras de filmar.....	45
Tabela 9 - Veículos Ligeiros (manhã)	46
Tabela 10 - Veículos Pesados (manhã).....	46
Tabela 11 - Veículos Ligeiros (tarde)	47
Tabela 12 - Veículos Pesados (tarde).....	47
Tabela 13 - Matriz O/D Veículos Ligeiros (veículos/15min).....	48
Tabela 14 - Matriz O/D Veículos Pesados (veículos/15min)	48
Tabela 15 - Matriz O/D de cálculo para 15 min (veículos/15min)	49
Tabela 16 - Matriz O/D de cálculo com valores/hora (veículos/hora)	49
Tabela 17 - Matriz O/D com fph (veículos/hora)	50
Tabela 18 - Capacidades TRL e FCTUC (veículos/hora)	51
Tabela 19 - Capacidades HCM (veículos/hora).....	51
Tabela 20 - Relações volume/capacidade HCM.....	52
Tabela 21 – Atraso devido às filas de espera HCM (em segundos).....	53
Tabela 22 - Capacidades HCM corrigidas (veículos/hora)	54
Tabela 23 - Relações volume/capacidade HCM corrigidas.....	54
Tabela 24 – Atrasos devido à fila de espera HCM corrigidos (em segundos).....	55
Tabela 25 - Níveis de serviço por via	55
Tabela 26 - Níveis de serviço por ramo	55
Tabela 27 - Estimativa de tempo (em segundos) por movimento sem existência da rotunda.....	56
Tabela 28 - Tempos reais por movimento (em segundos).....	56
Tabela 29 - Atrasos geométricos por movimento (em segundos).....	57
Tabela 30 - Distribuição de percentagens	57
Tabela 31 - Atraso geométrico por ramo (em segundos)	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Devido ao aumento do tráfego rodoviário acentuado ao longo dos últimos anos tem vindo a ser necessário atualizar e melhorar constantemente as nossas redes de circulação. De entre os vários problemas e aspetos a ter em conta nessas melhorias, as intersecções desempenham um papel bastante importante, visto serem um dos pontos mais críticos na circulação rodoviária.

Quando existe a necessidade de fazer a ligação entre diferentes vias, um dos principais objetivos é conseguir que essas ligações sejam seguras, rápidas e fluídas. Uma intersecção considera-se mais ou menos capaz de acordo com a menor ou maior diferença de tempo, respetivamente, que se demoraria a percorrer o mesmo caminho, caso essa intersecção não existisse. (HCM, 2010)

Existem, portanto várias formas de fazer a ligação entre os diferentes traçados rodoviários. No entanto, podemos, numa primeira fase dividi-las em dois grupos principais, nomeadamente intersecções desniveladas ou de nível.

As intersecções desniveladas conseguem na maior parte das vezes melhores resultados, mas também implicam um maior investimento aquando da sua construção, no que diz respeito a estruturas e a infraestruturas. São por isso economicamente menos vantajosas e por isso normalmente apenas aplicadas em situações fora do contexto urbano e também onde a diferença na importância das vias que se cruzam é mais notória (exemplo: intersecções entre autoestradas ou vias equiparadas com estradas nacionais).

Quanto às intersecções de nível, mais comuns em meios urbanos ou equivalentes, têm a vantagem da maior economia da construção, no entanto a menor segurança está-lhes mais associada uma vez que os diferentes volumes de tráfego se cruzam ao mesmo nível. Neste tipo de intersecções podemos dar vários exemplos como as de prioridade à direita, os

cruzamentos com sinais luminosos, ou as rotundas. Este último, e precisamente por ser o elemento em estudo, é de elevada importância porque nos últimos anos tem vindo a ser bastante adotado. O desempenho de uma rotunda depende diretamente da sua capacidade. A sua avaliação pode ser feita através de métodos estatísticos, métodos probabilísticos ou através de modelos de simulação.

1.2. Enquadramento

Uma rotunda é um tipo de intersecção, geralmente de forma circular, do tipo praça ou largo, na qual o trânsito se processa em sentido giratório (sentido anti-horário na maior parte dos países europeus e americanos) com prioridade para os veículos que nela circulam.

A obrigatoriedade de ceder a passagem aos veículos no interior da rotunda, através da colocação de sinalização de cedência de passagem, faz com que se abandone a regra da prioridade à direita, contribuindo assim para uma redução da velocidade de circulação praticada. (Bastos Silva & Seco, 2002)

A existência de grandes praças circulares ou mesmo quadradas na Europa vem já desde a idade média, bastante antes da existência dos primeiros veículos automóveis. Só mais tarde, no início do Séc. XX, com o aparecimento e desenvolvimento do tráfego rodoviário, estas praças, por intermédio da ação do arquiteto Eugène Henard que criou o conceito da circulação giratória, passaram a desempenhar também a função de gestão de circulação. (Bastos Silva & Seco, 2006)

Já nos Estados Unidos da América as primeiras referências daquilo a que mais tarde se veio a chamar rotunda vem também do início do Séc. XX, mais precisamente em 1905 pela mão de William Phelps Eno que desenhou o Columbus Circle em Nova Iorque e que foi o pioneiro das rotundas naquele continente. (FHWA, 2010)

Em Portugal, segundo várias referências bibliográficas, o aparecimento deste tipo de conceção geométrica terá sido no final do Séc. XIX aquando da reconversão da cidade de Lisboa, em que foram construídas várias rotundas pelo Engenheiro Ressano Garcia, nomeadamente a do Marquês de Pombal, Entre-Campos e Saldanha. (Bastos Silva & Seco, 2006)

Durante a primeira metade do Séc. XX os resultados com este tipo de rotundas não foram muito positivos, já que em vários países resultou em aumento de tráfego e até da sinistralidade. Só a partir de cerca de 1966/1967 quando em Inglaterra se institucionalizou a regra da prioridade para os veículos que circulam dentro da rotunda, é que passaram a revelar resultados positivos, o que levou a que vários outros países voltassem a adotar esta solução. Atualmente e desde as duas últimas décadas tem-se difundido bastante esta solução quase a nível mundial. (Bastos Silva & Seco, 2006)

A introdução deste tipo de intersecções trouxe um aumento do nível de segurança em relação a outros tipos de intersecções até então existentes. As principais razões que contribuíram para este aumento do nível de segurança, de acordo com FHWA 2010, foram:

- Menor número de pontos de conflito em comparação com outro tipo de intersecções mais convencional (Figura 1). A possibilidade de ocorrência de conflitos de alta gravidade é significativamente reduzida com a adoção deste tipo de intersecção;

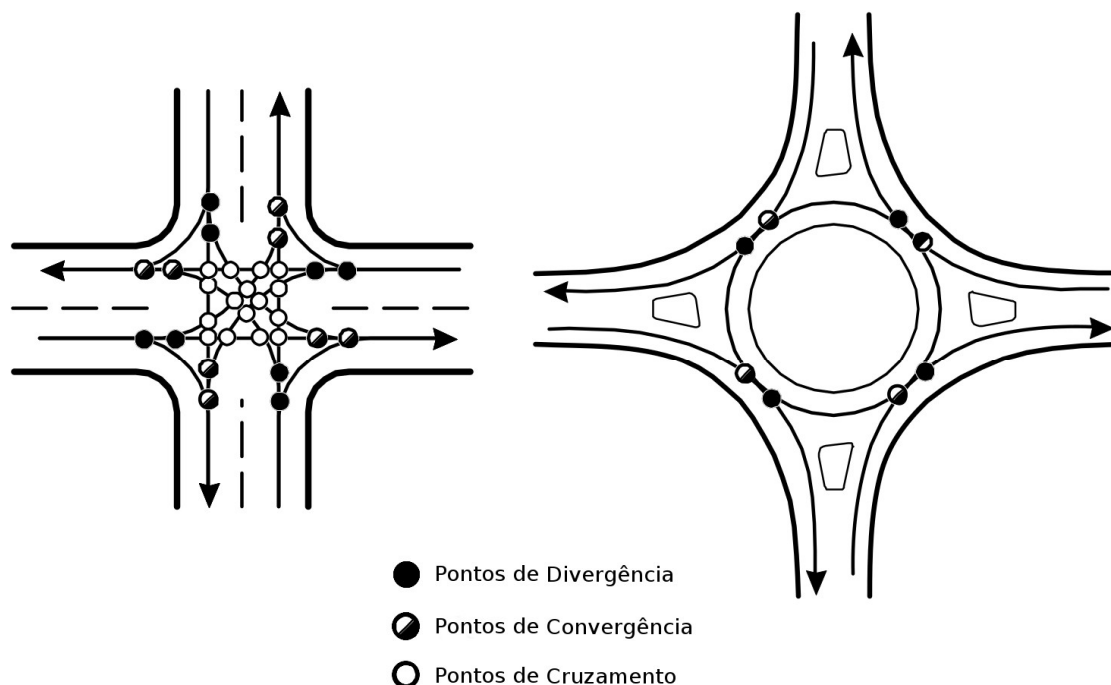


Figura 1 - Exemplo de comparação entre pontos de conflito (FHWA, 2010)

- As velocidades globais praticadas normalmente associadas às rotundas permitem aos condutores maior tempo de reação a potenciais conflitos, ajudando também ao seu aumento de performance em termos de segurança. As velocidades baixas dos veículos ajudam a reduzir a gravidade dos acidentes, reduzindo os acidentes graves ou mortais;
- Uma vez que a maior parte dos condutores circulam a velocidades semelhantes nas rotundas (ou seja, a velocidades relativamente baixas), a gravidade dos acidentes baixa em relação a outro tipo de intersecções e mais tradicionais;
- Os peões apenas precisam de cruzar um sentido de tráfego de cada vez. Os pontos de conflito peão/veículo (Figura 2) são, normalmente menores em rotundas, para além de que a velocidade dos veículos nas proximidades das rotundas tendem a ser baixas.

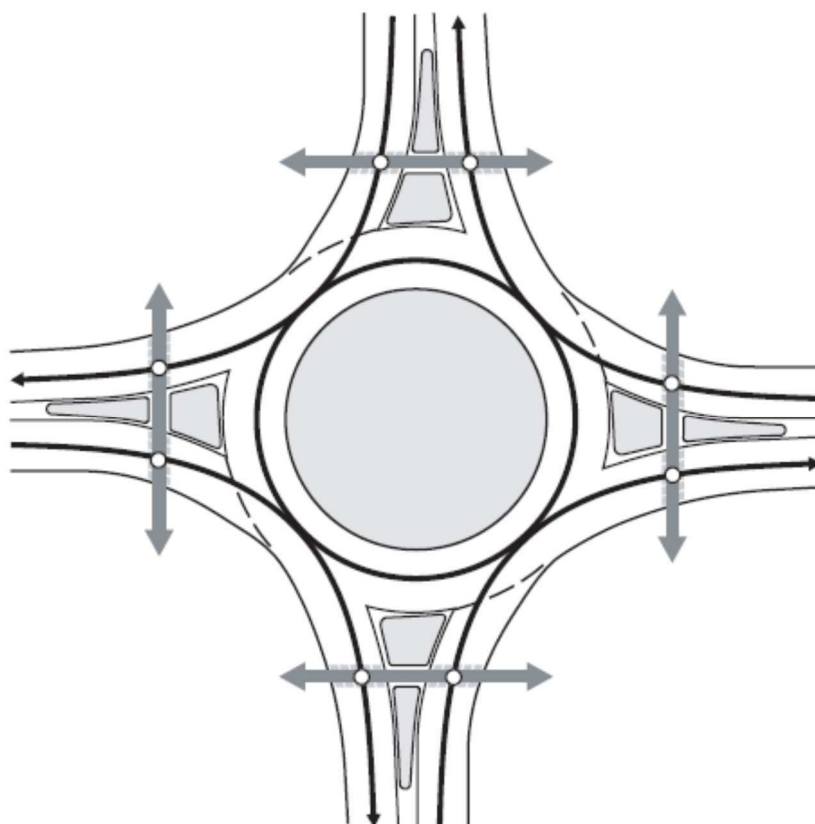


Figura 2 - Pontos conflito Peão/Veículo (FHWA, 2010)

1.3. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a avaliação da capacidade de uma rotunda segundo a metodologia preconizada pelo *Highway Capacity Manual (HCM)* versão de 2010. Para tal foi escolhida na cidade de Aveiro a chamada rotunda da Policlínica, rotunda esta construída na Estrada Nacional 109, fazendo a ligação entre esta via, a Avenida Vasco Branco, a Alameda Silva Rocha e um outro ramo de acesso à localidade de Sta. Joana. Esta interseção, pela sua localização tem bastante importância para a rede viária da cidade.

Para a aplicação da metodologia apresentada por este manual é necessário a realização de uma matriz Origem/Destino (O/D) que permite monitorizar todos os movimentos efetuados na interseção.

Para além dos resultados de capacidade obtidos através deste método, para efeitos de comparação serão também apresentados os resultados obtidos através da aplicação de outros métodos, nomeadamente o método do *Transport Research Laboratory (TRL)* e o método da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC). Posteriormente será feita a determinação do atraso devido às filas de espera de acordo com o estabelecido pelo HCM e será também apresentada uma aproximação ao atraso geométrico através de medições feitas no local.

1.4. Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita a introdução ao tema das rotundas e são definidos os objetivos.

No segundo capítulo é feita uma breve definição de rotunda e a apresentação dos diferentes tipos de rotundas existentes, distinguindo as principais características de cada um desses tipos e o que as distingue.

O terceiro capítulo fala sobre a análise do desempenho de rotundas, as formas como pode ser feita, alguns dos diferentes métodos existentes e as diferenças entre si. Também é feita uma apresentação da metodologia do HCM 2010, do TRL e FCTUC.

No quarto capítulo é feita a apresentação do caso de estudo. É apresentada a rotunda em estudo, com referência à sua localização e dados geométricos. São apresentados diferentes tipos de recolhas de dados e a sua aplicação. São também apresentados os valores das capacidades obtidos com a aplicação dos 3 diferentes métodos (HCM, TRL e FCTUC) São também apresentados os resultados dos atrasos devido às filas de espera e geométrico, calculados e medidos respetivamente. São também apresentadas as diferentes classificações do nível de serviço da rotunda segundo o HCM (classificação por via, por ramo e da rotunda)

No quinto capítulo é feita uma conclusão dos resultados obtidos e uma interpretação das limitações do método e da sua aplicação fora do seu âmbito. São ainda apresentadas as perspetivas de desenvolvimento do presente trabalho.

2. ROTUNDAS

2.1. Definição e sua aplicação

As interseções giratórias, ou simplesmente rotundas, são uma forma de ordenamento, normalmente com uma geometria circular, na qual o tráfego circula em seu torno de forma giratória e com prioridade em relação aos fluxos de tráfego dos ramos que lhe convergem.

Como já foi dito anteriormente, ao longo da rede viária, as interseções são os pontos mais críticos, pois é nelas que as diferentes correntes de tráfego se cruzam, e normalmente originam conflitos. No Código da Estrada estão previstos diferentes tipos de regras e normas específicas para cada tipo de interseção de forma a garantir o seu bom funcionamento. O bom desempenho da interseção contribui diretamente para o aumento do desempenho da rede viária que é determinado através da sua capacidade. A falta de capacidade das interseções acaba normalmente por se traduzir em congestionamentos nas vias, uma vez que a quantidade de veículos que abordam uma determinada interseção é superior àquela a que ela consegue fazer normalmente fluir, logo podemos dizer que a procura supera a oferta disponível. (HMSO, 1987)

Como também já foi referido anteriormente, existem então dois grandes tipos de interseções: niveladas e desniveladas. As rotundas fazem, normalmente parte do tipo de interseção nivelada, uma vez que os cruzamentos de tráfego são feitos todos ao mesmo nível, no entanto também existem rotundas desniveladas nas quais o tráfego de determinados ramos, normalmente os de maior importância e/ou volume, cruzam a rotunda num nível diferente e dessa forma é causada menor restrição ao seu fluxo.

De uma forma geral as rotundas conseguem apresentar níveis de capacidade semelhantes aos das interseções semaforizadas, portanto a aplicação de ambos é muitas das vezes feita em situações semelhantes. (Austroads, 1993).

Contudo, as rotundas são uma solução menos flexível no que diz respeito ao seu modo de funcionamento, uma vez que tratam todos os ramos da mesma forma, não estabelecendo preferências nem prioridades a nenhum deles ao contrário das interseções semaforizadas, nas quais se podem atribuir correlações de prioridades aos ramos de forma a atingir uma melhor otimização do cruzamento.

Existe no entanto uma vantagem para as rotundas em relação às interseções de viragem à esquerda e para os movimentos de inversão de marcha, sendo que para este tipo de movimento são a única solução em termos de interseções de nível a permitir fazê-lo facilmente.

2.2. Tipos de rotundas

2.2.1. Rotunda normal e rotunda semi-galgável

A maior parte das rotundas existentes nas nossas redes rodoviárias são conhecidas como Rotundas normais (Figura 3). Este tipo de rotundas caracteriza-se por ter uma zona central, ou ilha não galgável de forma circular ou arredondada com diâmetro superior a 4m e DCI superior a 28m (DCI é o diâmetro do círculo inscrito de uma entrada, ou seja é o maior diâmetro possível no interior da rotunda, incluindo bermas e que passa tangencialmente à delimitação da entrada em questão). Estas rotundas podem ter uma ou mais vias de circulação, todas com o mesmo sentido. A arquitetura deste tipo de rotundas deverá permitir a circulação de todo o tipo de veículos garantindo que as velocidades praticadas no seu interior se mantenham moderadas.

Para DCI compreendidos entre os 28m e os 40m e com pouco tráfego de veículos pesados, como alternativa e em especial para estes casos pode optar-se pelas chamadas Rotundas semi-galgáveis. Este tipo de rotundas distingue-se por possuir uma via, junto da zona central, construída em material ligeiramente mais irregular que permita ser galgado quando necessário, normalmente por veículos mais pesados, mas que não incentive à prática de velocidades elevadas por parte dos veículos ligeiros. (Bastos Silva & Seco, 2006)

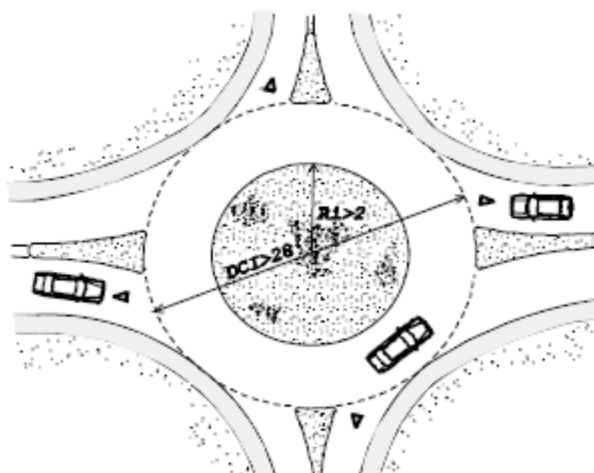


Figura 3 - Rotunda normal (Bastos Silva & Seco, 2006)

2.2.2. Mini-rotunda

Este é um tipo de rotunda ainda com pouca aplicação no nosso país ao contrário do que acontece noutros países, como a Inglaterra ou a Austrália. É caracterizada por ter uma ilha central com diâmetro inferior a 4m e DCI entre os 14m e os 28m. A ilha central pode ser materializada ou simplesmente marcada no pavimento com recurso a sinalização horizontal.

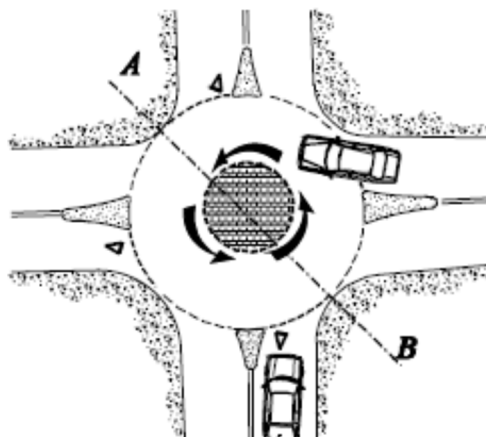


Figura 4 - Mini-rotunda (com ilha central materializada) (Bastos Silva & Seco, 2006)

Para DCI superiores a 18m aplica-se, normalmente a solução em que a ilha central é materializada (Figura 4), garantido que a via de circulação mantém largura suficiente para o trânsito tanto de veículos ligeiros como dos pesados assumindo que estes poderão ter que a galgar.

Para DCI entre os 14m e os 18m pode-se aplicar a solução da ilha central marcada no pavimento (Figura 5). Neste tipo de rotundas a ilha central é galgada ou até transposta não só pelos veículos pesados, mas eventualmente também pelos ligeiros.

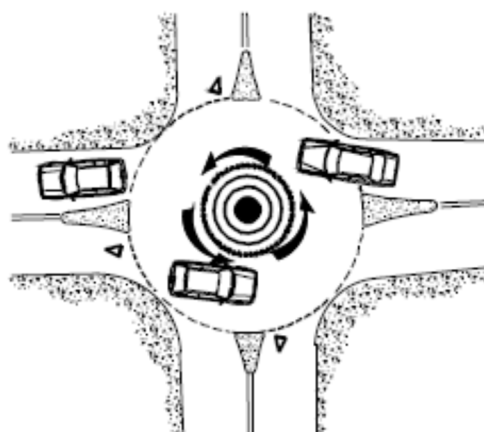


Figura 5 - Mini-rotunda com ilha central pintada (Bastos Silva & Seco, 2006)

Independentemente do tipo de ilha, as mini-rotundas são uma solução bastante compacta, o que por vezes dificulta bastante ou até acaba mesmo por impossibilitar a normal circulação recorrendo apenas à ilha central. Isto implica que sejam adotadas algumas medidas complementares.

Contudo, e apesar das reduzidas dimensões, este tipo de rotundas quando bem concebidas e localizadas conseguem atingir relativamente bons níveis de segurança e capacidade. (Bastos Silva, Seco, Ferreira, & Pires da Costa, 2008)

2.2.3. Rotundas desniveladas

As rotundas desniveladas consistem num nó ao qual está associado uma ou mais rotundas para as quais é conduzida a circulação de uma via secundária e de mudança de direção. As formas geométricas mais comuns caracterizam-se pela existência de um atravessamento desnivelado associado a uma rotunda de grandes dimensões ou a duas rotundas compactas interligadas por um viaduto central.

A solução com rotundas de grandes dimensões (Figura 6) é caracterizada pela existência de uma rotunda central que liga os acessos de uma via principal a uma via secundária. Neste tipo de rotunda, por permitirem praticar velocidades mais elevadas, os níveis de sinistralidade são também superiores relativamente a outros tipos de rotunda. Esta solução é também bastante dispendiosa.

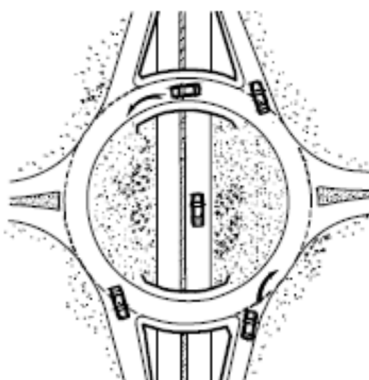


Figura 6 - Rotunda desnivelada de grandes dimensões (Bastos Silva & Seco, 2006)

A solução com duas rotundas interligadas por viaduto central (Figura 7) consiste na construção de duas rotundas de menor dimensão construídas fora de uma via principal, pelas quais se efetuam os movimentos de entrada e saída da referida via principal para vias secundárias. Esta solução é apesar de tudo menos dispendiosa que a anterior.

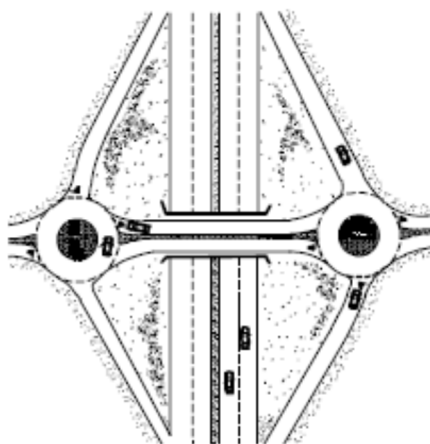


Figura 7 - Rotunda desnivelada - solução com um viaduto (Bastos Silva & Seco, 2006)

Qualquer uma destas soluções funciona bem para fazer a ligação entre determinadas vias principais mais importantes que pretendemos beneficiar. (Bastos Silva, Seco, Ferreira, & Pires da Costa, 2008)

2.2.4. Rotundas semaforizadas

A criação de rotundas semaforizadas (Figura 8) veio da necessidade de controlar o tráfego de ramos afluentes desequilibrados ou aumentos de tráfego acentuados e não previstos aquando da construção inicial de determinadas rotundas. Este tipo de controlo luminoso pode ser aplicado em todas as vias afluentes ou só naquelas em que se ache necessário. O seu funcionamento pode também ser permanente ou alternado conforme as necessidades.

Uma rotunda não se pode considerar um cruzamento semaforizado, mesmo que geometricamente se possam assemelhar. No entanto, para o caso das rotundas semaforizadas que não funcionem de forma permanente, os pressupostos para a sua conceção devem ter em conta o melhor compromisso possível entre os princípios básicos de conceção e funcionamento tanto das rotundas convencionais como dos cruzamentos semaforizados. (Bastos Silva & Seco, 2006)

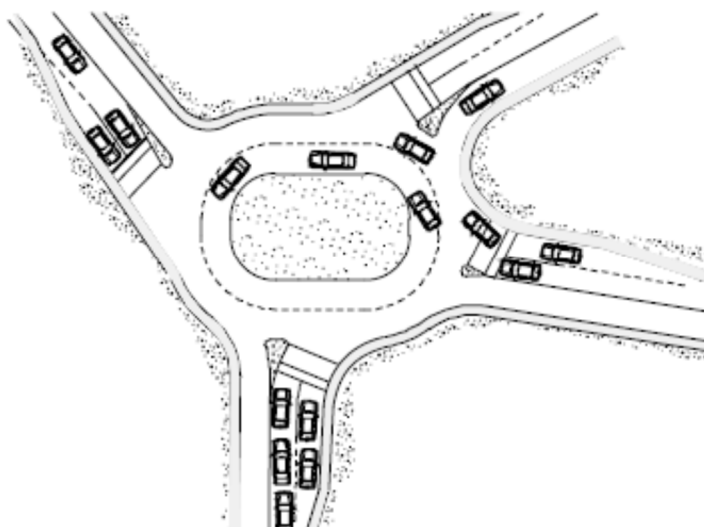


Figura 8 - Rotunda semaforizada (Bastos Silva & Seco, 2006)

2.2.5. Outros tipos

Para além de todos os outros tipos de rotundas apresentados anteriormente existem ainda vários outros tipos. Normalmente são rotundas que apresentam geometrias mais complexas ou para aplicações mais específicas.

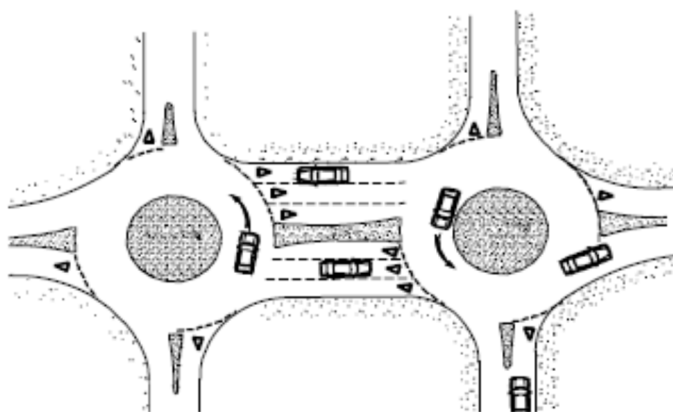


Figura 9 - Rotunda dupla (Bastos Silva & Seco, 2006)

Um dos exemplos mais comuns são as rotundas duplas (Figura 9), bastante utilizadas em Inglaterra. Este tipo de rotundas, quando bem executadas conseguem bons resultados a nível de segurança e de capacidade, para além de serem também uma forma mais eficiente de ocupação do terreno, já que são compostas por duas pequenas rotundas contíguas ou interligadas por um pequeno separador central. (Bastos Silva & Seco, 2006)

Outro tipo são as rotundas dispostas em anel (Figura 10). Este invulgar tipo de rotundas, uma vez que permitem a circulação nos dois sentidos do anel, apenas devem ser utilizadas no tratamento de zonas que permitam assegurar consideráveis distâncias entre os diferentes ramos afluentes e por sua vez um grande raio da ilha central. Não é um tipo de rotundas muito usuais em Portugal. (Bastos Silva & Seco, 2006)

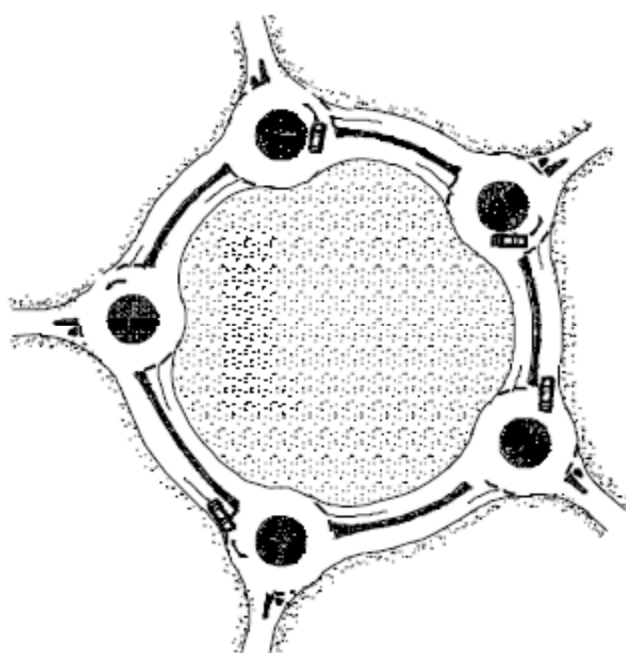


Figura 10 - Rotunda em anel (Bastos Silva & Seco, 2006)

3. ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ROTUNDAS

3.1. Introdução

Existem várias formas para a avaliar a capacidade de uma rotunda. Umás baseiam-se em dados de tráfego e outras em características geométricas. Contudo, segundo Bastos Silva & Seco, 2006, podemos distinguir 3 tipos de modelos de avaliação de capacidade.

Os modelos estatísticos que procuram reconstituir de uma forma empírica a curva da capacidade, por recurso a observações locais efetuadas durante períodos de saturação de diferentes entradas com características geométricas diferenciadas e para níveis de fluxos prioritários variados.

Os modelos de microssimulação baseados na modelação, veículo a veículo, das interações entre os veículos do fluxo de entrada e do prioritário, ou seja, dos veículos que circulam no anel de circulação apresentando-se de forma geral em sofisticados programas computacionais.

Os modelos probabilísticos que se baseiam na conjugação da distribuição dos veículos da corrente prioritária com o processo de chegada das vias secundárias, assumindo que ambas as distribuições obedecem a leis de aleatoriedade e a uma determinada lei de aceitação de intervalos entre veículos.

A descrição mais detalhada de cada um destes modelos é feita nos pontos seguintes.

3.2. Modelos estatísticos

Como exemplo dos modelos estatísticos temos o modelo do TRL (*Transport Research Laboratory*) e o modelo da FCTUC (Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra).

3.2.1. TRL

O método do TRL foi desenvolvido durante os anos 80 em Inglaterra pelo então TRRL, *Transport and Road Research Laboratory*, atual TRL, *Transport Research Laboratory*. Este método permite não só o cálculo de capacidades em rotundas, mas também dos atrasos e das filas de espera. O programa de cálculo automático ARCADY (*Assessment and Roundabout Capacity and Delay*) também desenvolvido pelo TRL, e cuja primeira versão foi lançada em 1981, incorpora todos os procedimentos de cálculo de capacidades, atrasos e filas de espera em rotundas. (Macedo, 2005)

A sua formulação geral resulta de uma função linear, que relaciona a capacidade da entrada com o volume conflituante e a geometria prevalecente da intersecção, em que a capacidade de uma entrada numa rotunda, segundo este método, é formulada a partir das seguintes expressões:

$$Q_e = K(F - f_c \times Q_c) \text{ se } F_c \times Q_c < F, \quad (1)$$

$$Q_e = 0 \quad \text{se } F_c \times Q_c < F, \quad (2)$$

onde:

Q_e – capacidade de entrada;

Q_c – volume conflituante;

F – capacidade máxima de armazenamento;

f_c – fator de correção,

em que os parâmetros F e f_c são dependentes das características geométricas da entrada e da rotunda. Assim, F e f_c resultam dos cálculos seguintes:

Fator de acumulação

$$K = 1 - 0.00347(\varphi - 30) - 0.978 \left\{ \frac{1}{r} - 0.05 \right\}. \quad (3)$$

Capacidade máxima de armazenamento

$$F = 303X_2. \quad (4)$$

Fator de correção

$$fc = 0.21 \times tp(1 + 0.2X_2). \quad (5)$$

Potencial de acumulação

$$tp = 1 + \frac{0.5}{1 + M}, \quad (6)$$

com

$$M = \exp \left\{ DCI - \frac{60}{10} \right\}, \quad (7)$$

$$X_2 = v + \left(\frac{e - v}{1 + 2S} \right), \quad (8)$$

$$S = 1.6 \frac{(e - v)}{l'}, \quad (9)$$

em que (Figura 11):

v - largura da via na aproximação da rotunda

e - largura efetiva da entrada junto à linha de cedência de passagem e na perpendicular ao lancil

l' - comprimento médio efetivo do leque

r - raio da entrada medido no ponto de menor curvatura

DCI - diâmetro do círculo inscrito

φ - ângulo de entrada

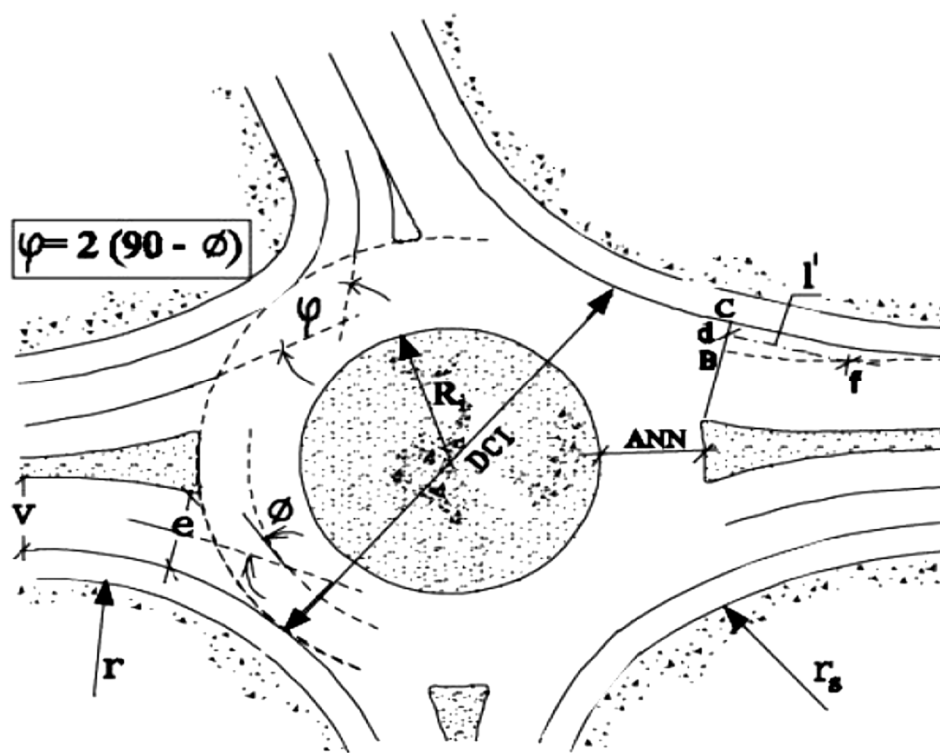


Figura 11 - Parâmetros Geométricos – modelo TRL (Bastos Silva, 2002)

3.2.2. FCTUC

O modelo da FCTUC é uma adaptação do modelo TRL à realidade portuguesa. A FCTUC já desde 1996 que se dedica ao desenvolvimento de estudos no domínio das

intersecções giratórias, no âmbito dos quais procura desenvolver um modelo de estimação de capacidades adaptado às condições de circulação e às características dos condutores portugueses. (Bastos Silva, 2002)

O modelo criado foi calibrado com base em onze entradas de oito rotundas nacionais (seis entradas corresponderam a quatro rotundas no meio urbano e as restantes em zona periurbana), com 952 minutos de observação com uma variância observada de 61,7%, valor que advém da sua reduzida amostra em termos de dimensão da amostra, em particular ao nível dos parâmetros geométricos, pelo que os resultados do método devem ser encarados com uma ligeira precaução. (Ferreira, 2010)

A formulação resultante do estudo é a seguinte:

$$Qe = K(F - fc \times Qc), \quad (10)$$

onde:

Qe – capacidade de entrada;

Qc – volume conflituante;

F – capacidade máxima de armazenamento;

fc – fator de correção,

em que os parâmetros F e fc são dependentes das características geométricas da entrada e da rotunda. Assim, F e fc resultam dos cálculos seguintes:

Fator de eficiência

$$K = 1 - 0.00163(\varphi - 30) - 0.978 \left\{ \frac{1}{r} - 0.05 \right\}. \quad (11)$$

Capacidade máxima de armazenamento:

$$F = 335.47X_2. \quad (12)$$

Fator de correção:

$$fc = 0.611 \times t_d(-0.457 + 0.2X_2). \quad (13)$$

Potencial de acumulação:

$$t_d = 1 + \frac{0.983}{1 + M'} \quad (14)$$

com:

$$M = \exp\left\{DCI - \frac{60}{10}\right\}, \quad (15)$$

$$X_2 = v + \left(\frac{e - v}{1 + 2S}\right), \quad (16)$$

$$S = 1.6 \frac{(e - v)}{l'}, \quad (17)$$

em que cada parâmetro tem o mesmo significado do apresentado no método TRL.

3.3. Modelos de microssimulação

Para além dos anteriores modelos mais clássicos, os probabilísticos e os estatísticos, ultimamente tem-se vindo a tornar mais populares e acessíveis os modelos de microssimulação. Estes modelos inserem-se numa área de estudo de tráfego que é a simulação e que pode ser dividida 3 submodelos, macroscópicos, mesoescópicos e microscópicos. Os que mais se adequam ao estudo de interseções isoladas são os modelos de simulação microscópicos ou modelos de microssimulação.

Tanto os modelos probabilísticos como os estatísticos, baseiam-se num conjunto de premissas relativamente à infraestrutura e à procura de tráfego que poderão ser difíceis de observar, particularmente em redes urbanas. Quando estas condições não se verificam poderá ser necessário introduzir ajustamentos aos modelos ou, como recomendado pelo próprio HCM 2010, recorrer a modelos de microsimulação.

Neste tipo de modelos cada veículo é tratado como uma entidade individual, com os seus objetivos, métodos e propriedades, tendo a possibilidade de interagir com as outras entidades. Estas interações são modeladas através de algoritmos complexos que descrevem o comportamento dos condutores quando seguem outros veículos (*car-following*), quando mudam de via (*lane-changing*) ou quando entram numa interseção (*gap-acceptance*).

O submodelo de *car-following* é fulcral aos modelos microscópicos e tem como objetivo gerar a resposta de um condutor relativamente ao veículo que segue à sua frente. Dividem-se, segundo Janson Olstam & Tapani, 2004 em três classes:

- Modelos Gazis-Herman-Rothery – pressupõem que a aceleração do veículo seguidor é proporcional à velocidade do líder, à diferença de velocidades entre o líder e o seguidor, bem como ao inverso da separação espacial.
- Modelos de distância segura – assumem que os condutores tendem a manter uma distância de segurança para os veículos que seguem à sua frente. Essa distância é calculada como a distância que evita a colisão, em caso de desaceleração súbita do veículo líder.
- Modelos psicofísicos – assumem que os condutores reagem a alterações da velocidade do veículo líder e/ou da separação espacial apenas quando são atingidos determinados limiares.

O modelo *lane-changing* determina a motivação e possibilidade para um condutor mudar de via, tendo por base o seu objetivo próximo. A mudança pode ser obrigatória caso o condutor necessite de mudar de direção. Será opcional caso a mudança seja justificada pelo desejo de aumentar a velocidade. A oportunidade de mudar é determinada pela relação entre o benefício e o risco associado à manobra. (Casas, Ferrer, Garcia, Perarnau, & Torday, 2010)

A representação do comportamento dos condutores nas interseções tem como base o modelo de *gap-acceptance*. Este modelo determina se um veículo não prioritário tem ou não condições para avançar para o interior da interseção, em função da posição e da velocidade dos veículos prioritários, da distância dos veículos não prioritários ao eventual ponto de colisão e da sua capacidade de aceleração. Com estes elementos o modelo determina o tempo necessário para que os veículos não prioritários libertem a zona de conflito e produz uma decisão que é também dependente do nível de risco que cada condutor está disposto a aceitar. Este nível de risco é, por sua vez, dependente do tempo de espera na linha de cedência de passagem. (Vasconcelos, 2014)

3.4. Modelos probabilísticos

3.4.1. Highway Capacity Manual 2010

O *Highway Capacity Manual* (HCM) é uma publicação da *Transportation Research Board da National Academies of Science* dos Estados Unidos da América. Apresenta conceitos, diretrizes e processos de cálculo para determinar a capacidade e qualidade de serviço de várias estruturas rodoviárias (incluindo estradas, auto-estradas, rotundas, cruzamentos sinalizados e não sinalizados e estradas rurais) e os efeitos dos transportes coletivos, dos peões e das bicicletas no desempenho destes sistemas.

O HCM já vai na sua quinta edição com melhorias e atualizações nos procedimentos desde 1950 até 2010, sendo que a edição de 1985 recebeu atualizações mais significativas em 1994 e 1997. O HCM tem sido uma referência a nível mundial para a engenharia responsável pelos transportes e tráfego quer a nível académico como profissional. O HCM tem sido também a base para alguns manuais específicos de alguns países.

Foi desenvolvido como um modelo de regressão empírica não-linear com uma base na teoria da aceitação de intervalo crítico. É sabido que este tipo de modelo é fortemente afetado pelo comportamento do condutor e hábitos locais. Portanto, o modelo de capacidade HCM 2010 deveria ser calibrado para as condições locais, o que nem sempre se verifica. (A., T., A., & R., 2010)

O HCM define a capacidade de uma instalação como "a máxima taxa horária em que se pode esperar que um razoável número de pessoas ou veículos possam percorrer um determinado troço ou estrada durante um determinado período de tempo perante as mais frequentes condições de estrada, tráfego e controlo". Enquanto a capacidade é uma medida específica que pode ser definida e calculada, o nível de serviço é uma medida qualitativa que "caracteriza as condições de tráfego e o comportamento dos condutores e passageiros perante as mesmas". Para quantificar o nível de serviço, o HCM define medidas específicas de eficácia para os diferentes tipos de estruturas rodoviárias. O atraso devido às filas de espera é a forma de medição utilizada para definir o nível de serviço das intersecções. Para além do atraso devido às filas de espera, as intersecções, devido às trajetórias curvas que implicam, também causam o atraso geométrico. A análise de uma rede viária também deve incluir o atraso geométrico devido à perda de velocidade dos veículos causada pelos caminhos mais lentos que acabem por ter que percorrer. (FHWA, 2010)

O atraso total é então a soma do atraso devido às filas de espera e do atraso geométrico. O atraso total estimado através de um método de simulação não pode ser comparado diretamente com o atraso devido às filas de espera calculado através de um método determinístico. Perto do limite de capacidade de uma rotunda, o atraso geométrico é relativamente pequeno comparando com o valor total do atraso, pelo que o atraso total é aproximadamente igual ao atraso devido às filas de espera. (Stanek, 2011)

De seguida é feita uma apresentação da metodologia usada por esta ferramenta, neste caso, e por ser o objeto de estudo, aplicada ao tipo de Rotunda Multivias.

1. O primeiro passo definido no HCM 2010 é a conversão do volume de afluência de veículos para um débito de veículos. Para tal o que é feito é afetar o referido volume de um fator de ponta horária.

$$v_i = \frac{V_i}{F_{ph}}, \quad (18)$$

em que:

v_i – débito (veíc./h)

V_i – volume de entrada (veíc./h)

F_{ph} – fator de ponta horário

sendo que o fator de ponta horário seria a relação entre o volume de veículos no período de ponta de 15 minutos e o volume total de veículos durante a hora de contagem.

$$F_{ph} = \frac{4 \times V_{p15}}{\sum V_{0-60}} \quad (19)$$

em que:

V_{p15} – volume de veículos no período de ponta de 15 minutos

$\sum V_{0-60}$ – somatório do volume de veículos durante a hora de contagem

2. O segundo passo é o ajuste dos débitos (homogeneização das correntes de tráfego) em veículos ligeiros de passageiros equivalentes, ou seja os veículos pesados são convertidos a veículos passageiros. Para isso é necessário definir uma equivalência entre ligeiros e pesados

$$v_{i,elp} = \frac{v_i}{f_{vp}} \quad (20)$$

$$f_{VP} = \frac{1}{1 + P_{VP}(E_{Lp} - 1)} \quad (21)$$

em que:

$v_{i,elp}$ – débito em veículos ligeiros de passageiros equivalentes

v_i – débito (veíc./h)

f_{vp} – fator de ajuste para veículos pesados

P_{VP} – percentagem de veículos pesados

E_{LP} – veículos ligeiros de passageiros equivalentes

3. O volume de tráfego de circulação, ou volume conflituante é o volume de veículos que circulam no anel de circulação em frente à entrada de determinado ramo. Por exemplo (Figura 12) para uma rotunda com 4 ramos, para o volume conflituante no ramo A, contribuem os movimentos:

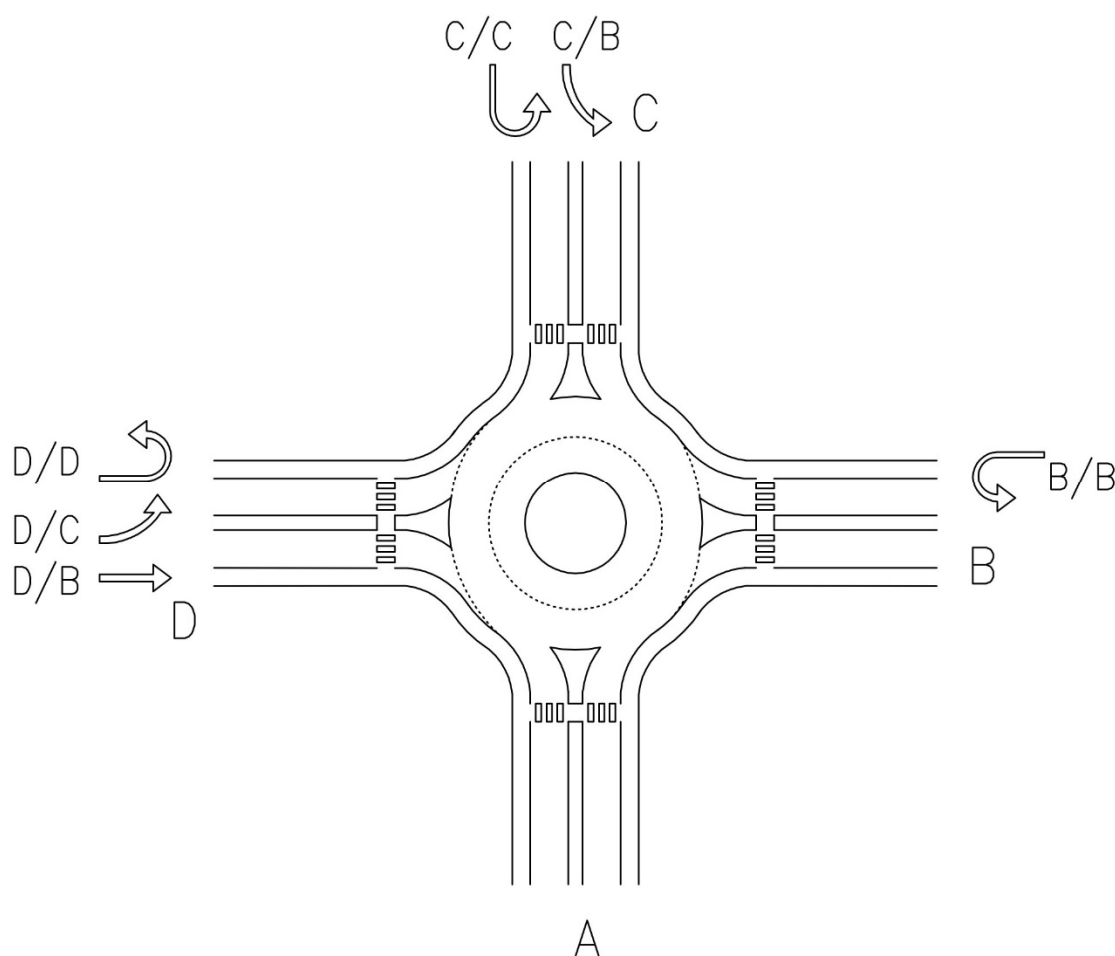


Figura 12 - Volume conflituante no ramo A para uma rotunda de 4 ramos

$$v_{cA} = v_{B/B} + v_{C/B} + v_{C/C} + v_{D/B} + v_{D/C} + v_{D/D} \quad (22)$$

O débito de saída é o volume de veículos que saem num determinado ramo. Por exemplo (Figura 13) para uma rotunda com 4 ramos, para a débito de saída no ramo A, contribuem os movimentos:

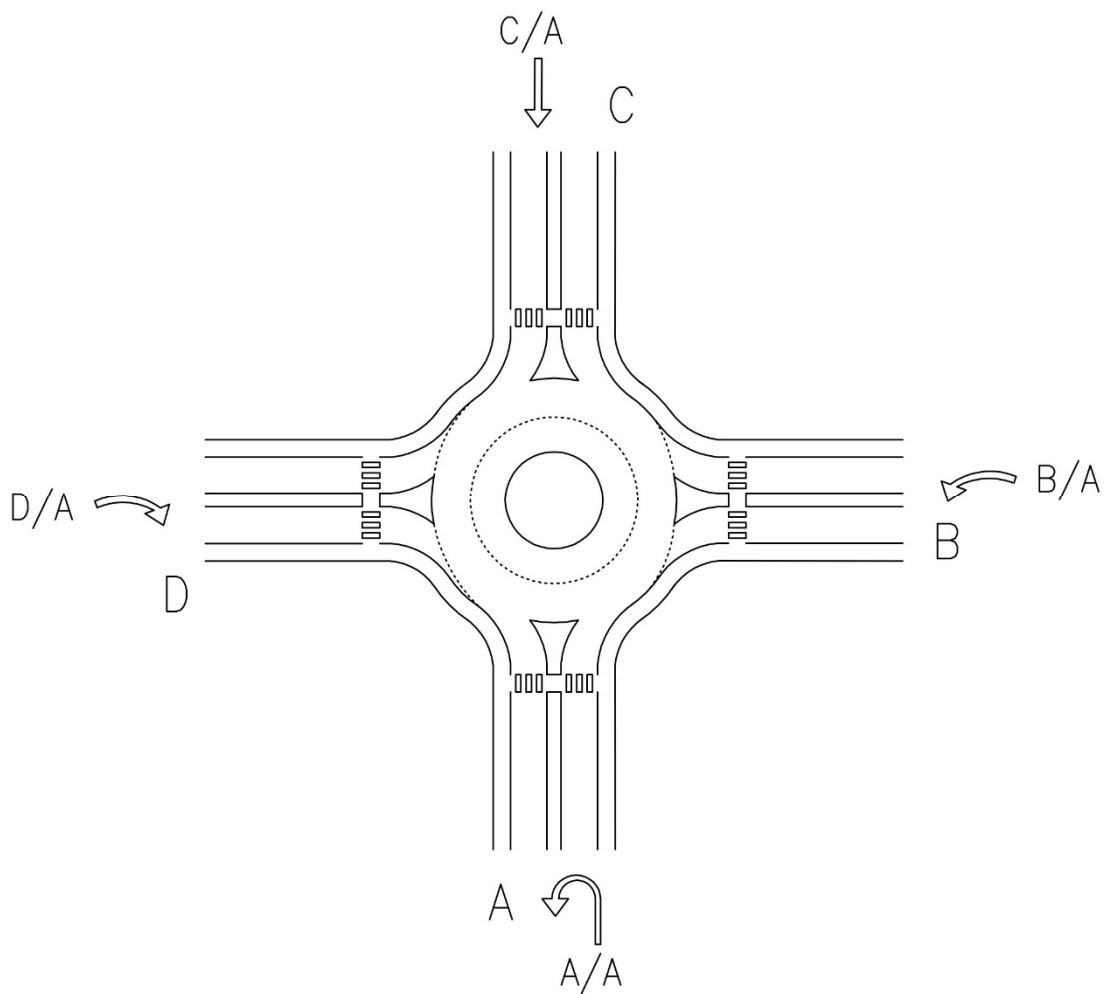


Figura 13 – Débito de saída no ramo A para uma rotunda de 4 ramos

$$v_{sA} = v_{A/A} + v_{B/A} + v_{C/A} + v_{D/A} \quad (23)$$

4. Para o cálculo dos volumes de entrada por via, é necessário o seguinte procedimento:
- Se existir uma via de *bypass*, o volume que usar essa via é retirado do cálculo para as outras vias;
 - Se apenas uma via está disponível para um determinado movimento, o volume para esse movimento é contabilizado apenas para essa via.

Os restantes volumes para os restantes casos assumem uma distribuição pelas vias. Para tal terão que ser analisados 5 casos generalizados de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 1 - Generalização dos casos assumidos

Via designada	Via assumida
EFr, FrD (Esquerda-Frente + Frente-Direita)	<i>Se</i> $v_{im} + v_{esq} > v_{fr} + v_{dir}$: E, FrD (de facto via de viragem à esquerda)
	<i>Se</i> $v_{dir} > v_{im} + v_{esq} + v_{fr}$: EFr, D (de facto via de viragem à direita)
	Outros casos EFr, FrD
E, EFrD (Esquerda + Esquerda-Frente-Direita)	<i>Se</i> $v_{fr} + v_{dir} > v_{im} + v_{esq}$: Esq, Fr (de facto via de frente-direita)
	Outros casos E, EFrD
EFrD, D (Esquerda-Frente-Direita + Direita)	<i>Se</i> $v_{im} + v_{esq} + v_{fr} > v_{dir}$: EFr, D (de facto via de frente-esquerda)
	Outros casos EFrD, D

em que:

V_{im} – volume de veículos que fazem inversão de marcha (veíc./h)

V_{esq} – volume de veículos que seguem para a esquerda (veíc./h)

V_{fr} – volume de veículos que seguem em frente (veíc./h)

V_{dir} – volume de veículos que seguem para a direita em vias não *bypass* (veíc./h)

De acordo com o verificado pelas condições anteriores, a distribuição dos volumes por via será feita conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 - Distribuição de Volumes

Caso		Via Esquerda	Via Direita
1	E, FrD	$v_{im} + v_{esq}$	$v_{fr} + v_{dir}$
2	EFr,D	$v_{im} + v_{esq} + v_{fr}$	v_{dir}
3	EFr,FrD	$(\%FE)v_i$	$(\%FD)v_i$
4	E,EFrD	$(\%FE)v_i$	$(\%FD)v_i$
5	EFrD,E	$((\%FE)v_i$	$(\%FD)v_i$

em que:

V_{im} – volume de veículos que fazem inversão de marcha (veíc./h)

V_{esq} – volume de veículos que seguem para a esquerda (veíc./h)

V_{fr} – volume de veículos que seguem em frente (veíc./h)

V_{dir} – volume de veículos que seguem para a direita em vias não *bypass* (veíc./h)

$(\%FE)v_i$ – percentagem de entrada de veículos que utilizam a via da esquerda

$(\%FD)v_i$ – percentagem de entrada de veículos que utilizam a via da direita

5. A capacidade de entrada de cada ramo ou de cada via de *bypass* é calculada de acordo com a situação encontrada. O HCM 2010 prevê 4 situações possíveis:

- Rotunda com uma via de entrada a conflitar com uma via de circulação

$$V_{E,i} = 1130e^{(-1 \times 10^{-3})v_{C,i}} \quad (24)$$

- Rotunda com duas vias de entrada a conflituar com uma via de circulação

$$V_{E,i} = 1130e^{(-1 \times 10^{-3})v_{C,i}} \quad (25)$$

- Rotunda com uma via de entrada a conflituar com duas vias de circulação

$$V_{E,i} = 1130e^{(-0.7 \times 10^{-3})v_{C,i}} \quad (26)$$

- Rotunda com duas vias de entrada a conflituar com duas vias de circulação

$$V_{E,D,i} = 1130e^{(-0.7 \times 10^{-3})v_{C,i}} \quad , \text{ Para a via da direita} \quad (27)$$

$$V_{E,E,i} = 1130e^{(-0.75 \times 10^{-3})v_{C,i}} \quad , \text{ Para a via da esquerda} \quad (28)$$

em que:

$V_{E,i}$ – capacidade de entrada da via, para *single-lane* (veíc./h)

$V_{E,D,i}$ – capacidade de entrada da via da direita, para *multi-lane* (veíc./h)

$V_{E,E,i}$ – capacidade de entrada da via da esquerda, para *multi-lane* (veíc./h)

$V_{E,i}$ – capacidade de entrada da via da direita, para *multi-lane* (veíc./h)

$v_{C,i}$ – volume de conflito no ramo (veíc./h)

6. A circulação dos peões pode interferir e causar atrasos na circulação dos veículos, principalmente quando a quantidade de veículos e a velocidade média a que circulam são relativamente altas. Por outro lado, quando há

poucos veículos e/ou se estes circularem a velocidades baixas, os peões conseguem circular quase sem interferir na sua circulação.

Contudo, o seu efeito deverá ser analisado da seguinte forma de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3 - Fatores de ajuste para a capacidade de entrada de dupla-via devido à presença de peões

Caso	Fator de ajuste para a capacidade de entrada de dupla-via devido à presença de peões
Se: $n_p < 100$	$f_p = \min \left[1 - \frac{n_p}{100} \left(1 - \frac{1260.6 - 0.329 v_{i,elp} - 0.381 \times 100}{1380 - 0.5 v_{i,elp}} \right), 1 \right]$
Caso contrário	$f_p = \min \left[\frac{1260.6 - 0.329 v_{i,elp} - 0.381 n_p}{1380 - 0.5 v_{i,elp}}, 1 \right]$

7. A capacidade de circulação e o volume de entrada terão que ser convertidos novamente a veículos por hora:

- Capacidade de Circulação:

$$c_i = c_{i,Ep} \times f_{VP} \quad (29)$$

em que:

c_i – capacidade de circulação (veíc./h)

$c_{i,Ep}$ – capacidade de circulação em veículos ligeiros de passageiros equivalentes (veíc./h)

f_{VP} – fator de ajuste para veículos pesados

- Volume de Entrada:

$$v_i = v_{i,Ep} \times f_{VP} \quad (30)$$

em que:

v_i – volume de entrada (veíc./h)

$v_{i,Ep}$ – volume de entrada em veículos ligeiros de passageiros equivalentes (veíc./h)

f_{VP} – fator de ajuste para veículos pesados

8. A relação volume/capacidade é uma comparação entre o volume de veículos à entrada da rotunda com a sua capacidade de entrada e permite fazer uma avaliação direta de uma determinada arquitetura de rotunda. Para uma dada via, a relação volume/capacidade, x_i , é calculada dividindo a capacidade calculada da via pelo seu volume de entrada. Ambos os valores de entrada são em veículos por hora.

$$x_i = \frac{v_i}{c_i} \quad (31)$$

em que:

x_i – relação volume/capacidade

v_i – volume de Entrada (veíc./h)

c_i – capacidade de circulação (veíc./h)

9. O atraso devido às filas de espera é medido na intersecção, e é a diferença entre o tempo que um determinado veículo demora a percorrer a intersecção e o tempo que demoraria se essa mesma intersecção não existisse ou se não provocasse atraso

É dado pela expressão:

$$d = \frac{3600}{c_i} + 900T \left[x_i - 1 \sqrt{(x_i - 1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_i}\right) x_i}{450T}} \right] + 5 \times \min[x, 1] \quad (32)$$

em que:

d – atraso devido às filas de espera (segundos)

x_i – relação volume/capacidade

c_i – capacidade de circulação (veíc./h)

T – período de análise (hora)

10. O HCM 2010 caracteriza as rotundas de acordo com a sua eficácia, estabelecendo assim níveis de serviço que variam de “A” (melhor) até “F” (pior) como é mostrado na Tabela 4:

Tabela 4 – Níveis de Serviço

Atraso devido às filas de espera (seg./veículo)	Nível de Serviço	
	Volume/Capacidade ≤ 1.0	Volume/Capacidade ≥ 1.0
0-10	A	F
>10-15	B	F
>15-25	C	F
>25-35	D	F
>35-50	E	F
>50	F	F

11. Independentemente do atraso devido às filas de espera de uma rotunda, se a relação volume/capacidade for superior a 1.0, automaticamente terá classificação nível “F”.

O atraso para cada ramo determinado através da soma ponderada dos atrasos de cada via:

$$d_{ramo} = \frac{d_{esq}v_{esq} + d_{dir}v_{dir} + d_{bypass}v_{bypass}}{v_{esq} + v_{dir} + v_{bypass}} \quad (33)$$

em que:

d_{ramo} – atraso para o ramo (segundos)

d_{esq} – atraso na via da esquerda (segundos)

d_{dir} – atraso na via da direita (segundos)

d_{bypass} – atraso na via de *bypass* (segundos)

v_{esq} – volume de entrada na via da esquerda (veíc./h)

v_{dir} – volume de entrada na via da direita (veíc./h)

v_{bypass} – volume de entrada na via de *bypass* (veíc./h)

E o atraso para a rotunda como um todo é a relação entre o somatório ponderado dos atrasos dos ramos:

$$d_{rotunda} = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i} \quad (34)$$

em que:

$d_{rotunda}$ – atraso para a rotunda (segundos)

d_i – atraso nos ramos (segundos)

v_i – volume dos ramos (segundos)

12. O cálculo da fila de espera para o percentil 95 corresponde ao número de veículos na fila de espera que não é excedido 95% do tempo. A sua determinação é feita através da expressão:

$$Q_{95} = 900T \left[x_i - 1 \sqrt{(1 - x_i)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_i}\right) x_i}{150T}} \right] \left(\frac{c_i}{3600}\right) \quad (35)$$

em que:

Q_{95} – percentil 95 de fila de veículos na fila

x_i – relação volume/capacidade

c_i – capacidade de circulação (veíc./h)

T – período de análise (hora)

4. CASO DE ESTUDO

4.1. Introdução

A rotunda escolhida (Figura 14) está situada nos arredores da cidade de Aveiro, construída na Estrada Nacional 109 que liga esta cidade a Norte à cidade do Porto, e a Sul à Figueira da Foz. É também conhecida como Rotunda da Policlínica. Por ser uma intersecção numa Estrada Nacional, pela sua localização num local de importante acesso à cidade de Aveiro, e pela sua proximidade à Estação Ferroviária da mesma cidade, entre outros fatores, a sua tarefa é bastante importante. A construção desta rotunda terá sido terminada no ano de 2006.

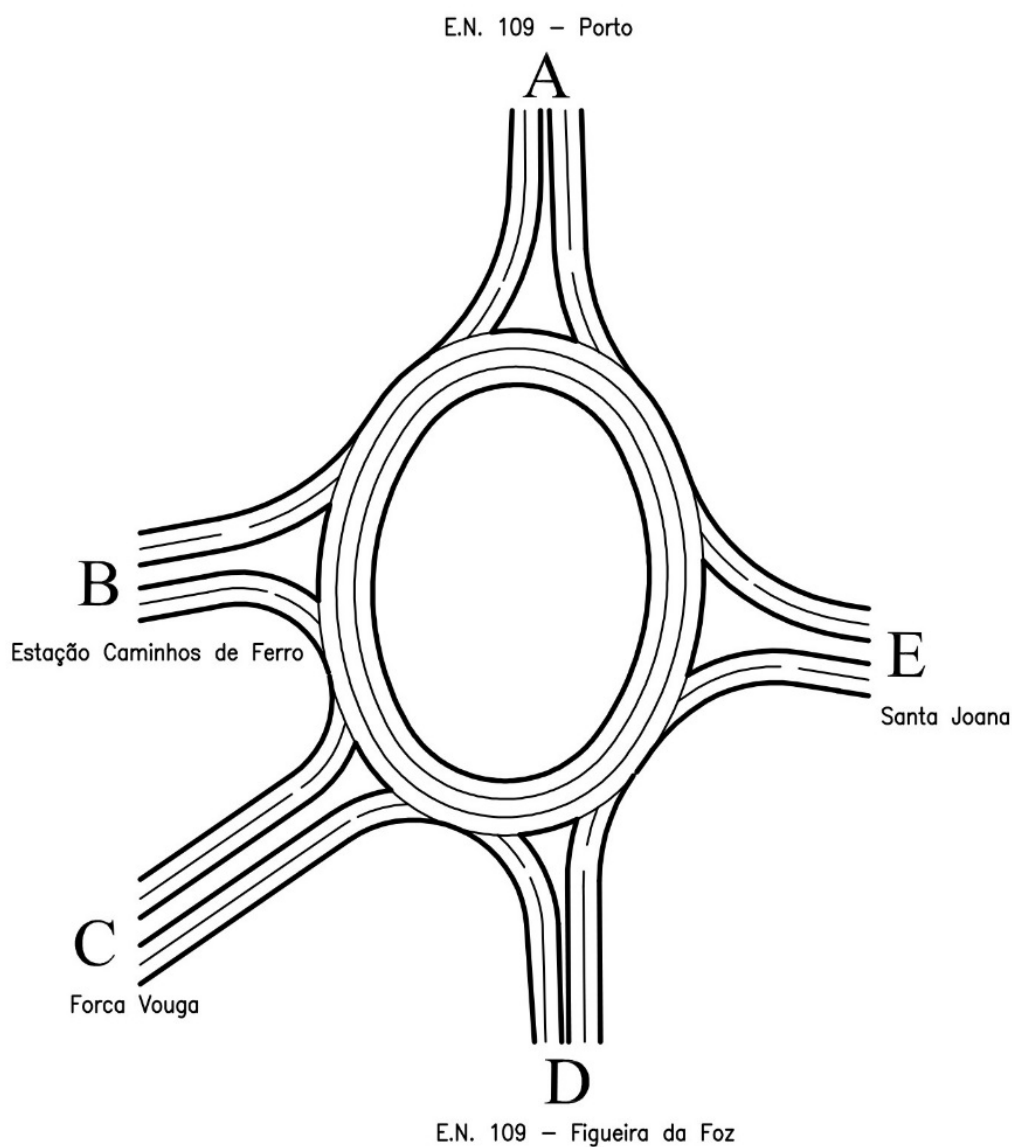


Figura 14 - Planta Referenciada da Rotunda da Policlínica

4.2. Geometria da rotunda

A rotunda analisada pode ser considerada uma grande rotunda, porque apresenta uma forma elipsoidal e é composta por cinco ramos de entrada, sendo que todos os ramos apresentam duas vias nas entradas e duas vias nas saídas com cerca 3,5m de largura cada. No que diz respeito ao seu anel de circulação, este é constituído por três vias de circulação

com uma largura de 4,0m cada uma delas. Após as medições para os parâmetros geométricos considerados na metodologia do TRL, chegou-se aos valores do DCI de 74 metros no menor raio e 144 metros no maior.

Esses valores encontram-se resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados Geométricos da Rotunda

	A	B	C	D	E
<i>DCI (m)</i>	74	144	74	74	144
<i>e (m)</i>	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
<i>v (m)</i>	7	7	7	7	7
<i>r (m)</i>	50	20	25	40	45
\varnothing (°)	45	45	45	45	45
<i>l' (m)</i>	0	0	0	0	0

4.3. Recolha de dados de tráfego

4.3.1. Tipos de recolhas

Para realizar estudos de tráfego é necessário conhecer o seu volume e um dos aspetos fundamentais para conseguir caracterizar as deslocações de veículos é a obtenção das matrizes O/D.

Os volumes de tráfego são obtidos através de contagens ou estimativas do número de veículos que cruzam determinadas secções durante determinadas unidades de tempo. As contagens podem ser manuais ou automáticas e são a forma mais comum, exceto quando a recolha de dados não é possível ou suficiente e nesse caso recorrer-se-á a estimativas.

É costume recorrer-se a contagens manuais quando há a necessidade de classificar com maior rigor determinados dados de tráfego ou para caracterizar movimentos direcionais (exemplo matrizes O/D) necessários para o estudo em intersecções. Este tipo de contagem pode ser utilizado para complementar os dados recebidos de contagens

automáticas, para ajudar à calibração dos contadores automáticos e também quando os períodos de contagem são relativamente curtos (até uma hora) e não é rentável a aplicação de contadores.

No que diz respeito à recolha, esta está sujeita a algumas condicionantes:

- Variáveis a medir;
- Recursos disponíveis;
- Características dos locais;
- Período de observação;
- Precisão requerida;
- Quantidade dos dados a recolher;
- Metodologias para a obtenção dos dados necessários a partir do resultado da recolha.

Os períodos de observação variam com a finalidade do estudo pretendido. Podem também ser feitas recolhas de carácter permanente ou temporário (horas a semanas).

Recolhas permanentes aplicam-se à criação de dados estatísticos ou à gestão do tráfego em tempo real. Recolhas temporárias aplicam-se também à gestão de tráfego e ao dimensionamento das infraestruturas e posicionamento do equipamento rodoviário.

A técnica de contagem varia de acordo com o tipo de recolha a efetuar. Para recolhas temporárias é comum recorrer-se a contagens manuais ou a contadores automáticos de carácter mais móvel. Para recolhas permanentes recorre-se normalmente a contadores automáticos fixos. O quadro seguinte (Tabela 6) resume a relação entre os intervalos de tempo das recolhas e a sua aplicação.

Tabela 6 - Intervalos de tempo considerados na recolha de dados

Intervalo de Agregação	Utilização Corrente
Veículo a veículo	Exploração em tempo real (por exemplo, soluções atuadas em sistemas de sinalização luminosa)
Alguns segundos a minutos	Ações em tempo real ou ligeiramente desfasadas
15 minutos a 1 hora	Estudos de Capacidade (Níveis de Serviço) Estudos de Impacte Ambiental Gestão e Controlo de Tráfego
Dia, Mês, Ano	Estudos estatísticos Exploração/Manutenção Previsões a longo prazo

Nos casos em que não é possível a observação direta de todos os movimentos direcionais pretendidos, poderão ter que ser usadas técnicas alternativas, tais como o registo de matrículas ou sistemas de vídeo. Estes métodos implicam maior dificuldade de concretização, maior recurso a equipamentos e uma pós análise dos registos. A possibilidade de falha dos equipamentos, os erros de interpretação ou os diferentes conceitos de classes de veículos por parte dos observadores poderá resultar na ocorrência de erros que irão influenciar o resultado final das contagens. (Andrade, 2000)

4.3.2. Recolhas de dados em campo

A análise operacional das rotundas requer a recolha ou projeção dos movimentos para períodos de ponta. Para rotundas existentes, os movimentos podem ser recolhidos usando várias técnicas:

- Registo no local de todos os movimentos - recorrendo à utilização de observadores de campo. Isso só é possível em condições de baixo volume, onde toda a rotunda é visível a partir de uma localização.
- Gravações em vídeo de toda a rotunda - através das gravações será possível contar todos os movimentos. Esta técnica é mais aconselhada quando é

possível a mesma camera captar toda a rotunda. Também recorrer a esta técnica com a utilização de várias camaras, mas estas devem estar corretamente sincronizadas.

- Utilização de observadores de campo em cada um dos ramos registando manualmente os movimentos
- Ligação de contadores colocados em cada entrada, saída e dentro do anel de circulação em frente a cada ramo, além da contagem manual dos movimentos de viragem à direita.

O desempenho operacional de uma rotunda também pode ser medido diretamente em campo através da determinação dos seguintes elementos:

- Atraso devido às filas de espera - pode ser calculado medindo o tempo médio que um veículo demora a percorrer desde um ponto no início da fila de espera máxima de uma via até a um determinado ponto imediatamente após a saída do anel de circulação. O atraso devido às filas de espera será então a diferença entre este tempo e o tempo que o mesmo veículo demoraria a percorrer a mesma distância sem que existisse constrangimento (a não existência de filas de espera ou a necessidade de ter que aguardar na entrada);
- Atraso geométrico - é determinado através da diferença entre o tempo que um veículo demora a percorrer a intersecção sem constrangimento e o tempo que demoraria a percorrer o mesmo troço, também sem constrangimento, se não existisse essa intersecção (a medição deste tempo deveria ter sido feita antes da construção da intersecção, ou então terá que ser estimado). O conhecimento do atraso geométrico é de elevada importância quando queremos comparar tempos de viagem ao longo de um troço.

As recolhas de campo devem ter uma duração tanto maior quanto possível, devido à possibilidade de grande variabilidade das medições ao longo dos dias. (FHWA, 2010)

Para este estudo a recolha de dados foi feita no dia 27/11/2014 na parte da manhã durante 1 hora, entre as 8:18h e as 9:18h, e na parte da tarde também durante 1 hora entre

as 17:00h e as 18:00h. Por se tratar de um estudo de capacidade (Nível de Serviço) o período de recolha escolhido foi de 1 hora.

A técnica de recolha adotada foi a contagem manual, tendo para isso sido colocadas 5 câmaras a filmar em simultâneo. A disposição destas câmaras (Figura 15) foi feita por forma a favorecer a otimização e simplificação da realização da matriz O/D.

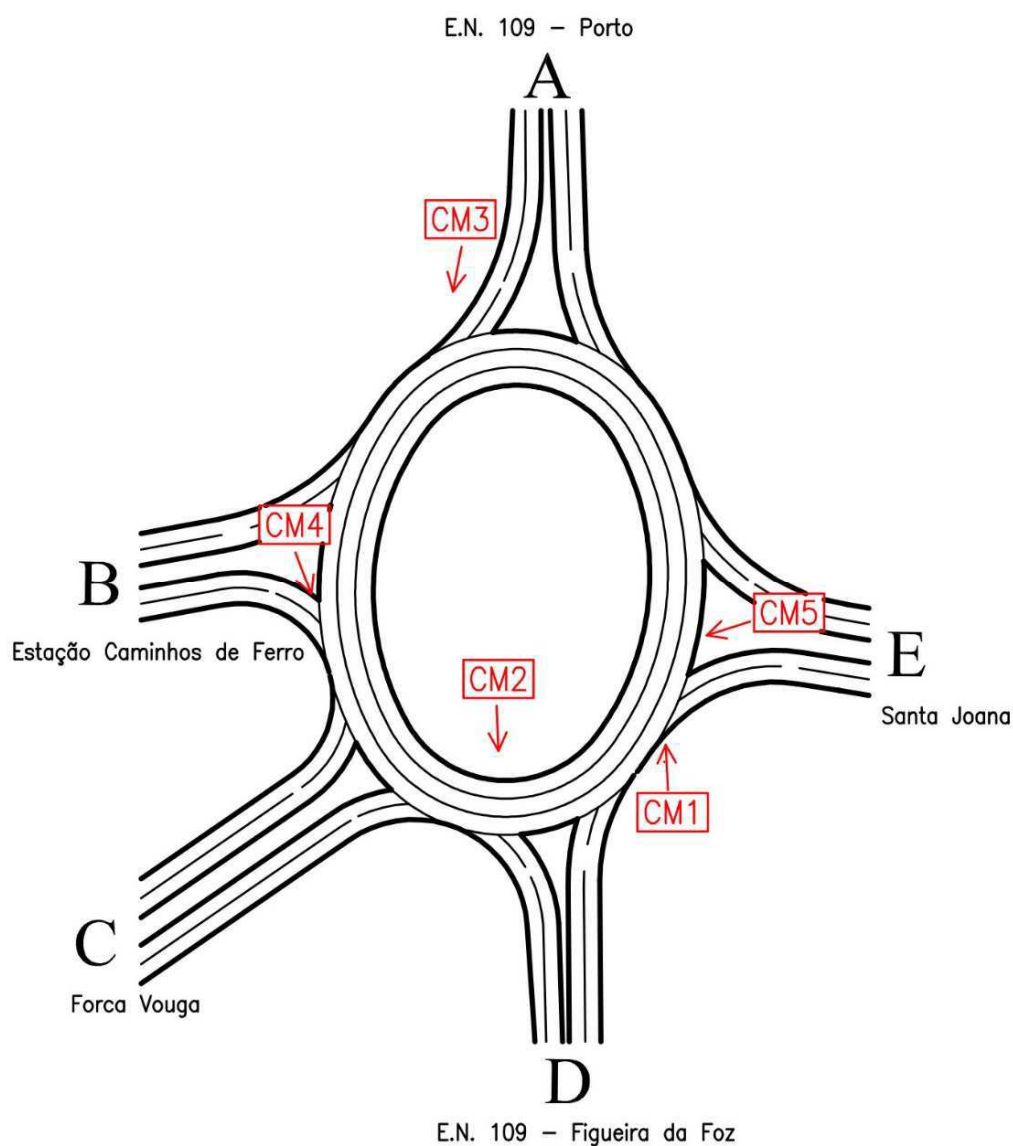


Figura 15 -- Planta Referenciada da Rotunda da Policlínica com disposição das Câmaras de Vídeo



Figura 16 - Vista Superior da Rotunda (Google, 2016)

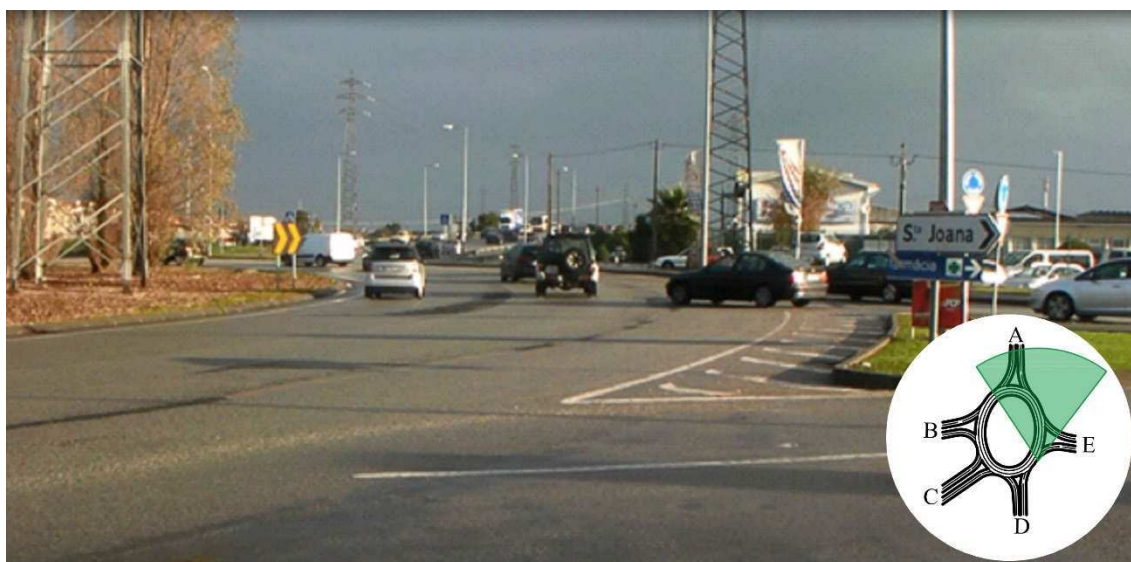


Figura 17 - Vista da Câmara 1



Figura 18 - Vista da Câmara 2

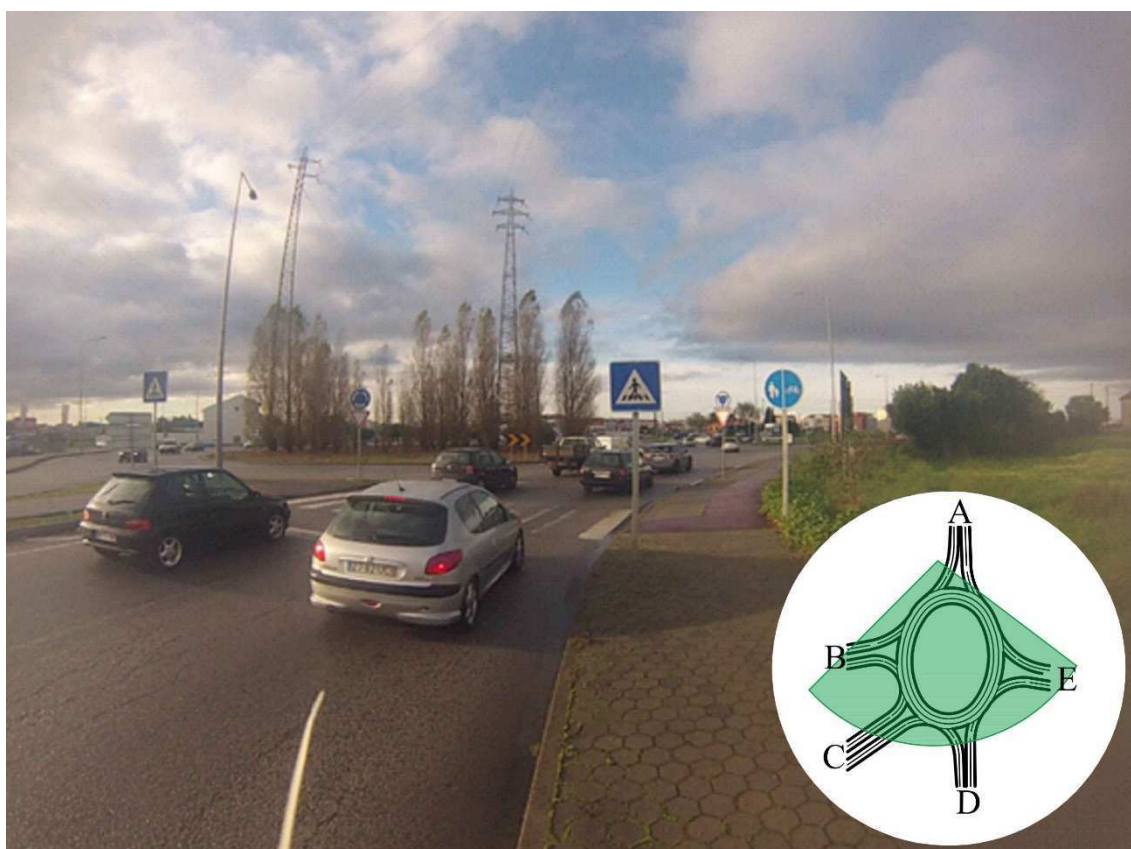


Figura 19 - Vista da Câmara 3



Figura 20 - Vista da Câmara 4



Figura 21 - Vista da Câmara 5

Como estamos perante uma rotunda de 5 ramos (5 entradas e 5 saídas) resulta-nos uma matriz O/D 5x5, no entanto como também é necessário conhecer os totais de entrada e saída em cada ramo, a nossa matriz passa para 6x6 (Tabela 7):

Tabela 7 - Matriz Origem/Destino com "esquema de contagem"

O/D	A	B	C	D	E	Totais Entrada
A	0	✓			✓	✓
B		0	✓	✓	✓	✓
C		✓	0	✓	✓	✓
D				0	✓	✓
E	✓	✓	✓		0	✓
Totais Saída		✓	✓	✓	✓	

Ficamos então com 35 incógnitas. Os movimentos de inversão de marcha consideraram-se nulos, pelo que nos sobraram então 30 incógnitas. Dessas 30, foi possível contar diretamente através dos vídeos 21 (indicadas na Tabela 7 com a simbologia ✓). As restantes 9 foram obtidas por cálculo. A escolha de movimentos para contar privilegiou aqueles de mais fácil controlo, deixando os que não eram de contagem direta para obtenção por cálculo. O resultado é demonstrado na Tabela 8:

Tabela 8 - Matriz Origem/Destino com referência às respetivas camaras de filmar

O/D	A	B	C	D	E	Totais Entrada
A	0	CM3			CM5	CM3
B		0	CM4	CM4	CM5	CM4
C		CM5	0	CM2/5	CM5	CM2/4/5
D				0	CM5	CM2
E	CM1	CM3/5	CM3/5		0	CM1
Totais Saída		CM3	CM4	CM2	CM1	

Depois de construídas as matrizes O/D para os 2 períodos, manhã e tarde, em intervalos de 5 minutos, separando as contagens dos veículos ligeiros dos veículos pesados, fez-se a soma de parciais de 15 minutos para descobrir o período mais agravado. Os resultados obtidos foram:

Tabela 9 - Veículos Ligeiros (manhã)

Período (min)	Total de Veículos	Total 15 min (veículos/15min)
0-5	374	
5-10	415	1185
10-15	396	1204
15-20	393	1188
20-25	399	1193
25-30	401	1250
30-35	450	1283
35-40	432	1281
40-45	399	1216
45-50	385	1160
50-55	376	1117
55-60	356	

Tabela 10 - Veículos Pesados (manhã)

Período (min)	Total de Veículos	Total 15 min (veículos/15min)
0-5	8	
5-10	4	17
10-15	5	19
15-20	10	21
20-25	6	24
25-30	8	26
30-35	12	31
35-40	11	30
40-45	7	26
45-50	8	26
50-55	11	29
55-60	10	

Tabela 11 - Veículos Ligeiros (tarde)

Período (min)	Total de Veículos	Total 15 min (veículos/15min)
0-5	336	
5-10	335	1016
10-15	345	1058
15-20	378	1061
20-25	338	1098
25-30	382	1101
30-35	381	1125
35-40	362	1121
40-45	378	1110
45-50	370	1117
50-55	369	739
55-60	0	

Tabela 12 - Veículos Pesados (tarde)

Período (min)	Total de Veículos	Total 15 min (veículos/15min)
0-5	7	
5-10	5	18
10-15	6	21
15-20	10	22
20-25	6	24
25-30	8	25
30-35	9	26
35-40	9	25
40-45	7	23
45-50	8	23
50-55	9	17
55-60		

Os períodos mais graves, tanto para veículos ligeiros como para veículos pesados foi encontrado da parte da manhã. Por coincidência, ambos períodos críticos estavam no mesmo intervalo de tempo (25-40 minutos).

Temos então as respetivas matrizes O/D para o período 25-40 minutos, tanto para os veículos ligeiros (Tabela 13), como para os pesados (Tabela 14):

Tabela 13 - Matriz O/D Veículos Ligeiros (veículos/15min)

O/D	A	B	C	D	E	Totais Entrada
A	0	54	115	299	6	474
B	43	0	4	47	9	103
C	109	9	0	13	10	141
D	364	70	21	0	15	470
E	20	30	18	27	0	95
Totais Saída	536	163	158	386	40	1283

Tabela 14 - Matriz O/D Veículos Pesados (veículos/15min)

O/D	A	B	C	D	E	Totais Entrada
A	0	4	5	11	1	21
B	0	0	0	2	0	2
C	0	0	0	0	0	0
D	5	1	1	0	0	7
E	0	1	0	0	0	1
Totais Saída	5	6	6	13	1	31

Para a matriz de cálculo todos os veículos são transformados em veículos ligeiros. Para tal multiplicou-se por 2 a matriz de veículos pesados pelo facto de que o HCM estabelece uma equivalência de 1 para 2, ou seja cada veículo pesado equivale a 2 veículos ligeiros:

$$\begin{bmatrix} \text{Matriz} \\ \text{Cálculo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz Veículos} \\ \text{Ligeiros} \end{bmatrix} + 2 \times \begin{bmatrix} \text{Matriz Veículos} \\ \text{Pesados} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Resultou portanto uma matriz O/D de cálculo para o período de 15 minutos (Tabela 15):

Tabela 15 - Matriz O/D de cálculo para 15 min (veículos/15min)

O/D	A	B	C	D	E	Totais Entrada
A	0	62	125	321	8	516
B	43	0	4	51	9	107
C	109	9	0	13	10	141
D	374	72	23	0	15	484
E	20	32	18	27	0	97
Totais Saída	546	175	170	412	42	1345

Como o período de contagem é de 15 minutos, temos totais de veículos/15min. Para efeitos de cálculo é necessário converter estes dados em veículos/hora.

$$\begin{bmatrix} \text{Matriz} \\ \text{Cálculo/hora} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz} \\ \text{Cálculo} \end{bmatrix} \times 4 \quad (37)$$

Ficamos então com a seguinte matriz de cálculo (Tabela 16):

Tabela 16 - Matriz O/D de cálculo com valores/hora (veículos/hora)

O/D	A	B	C	D	E	Totais Entrada
A	0	248	500	1284	32	2064
B	172	0	16	204	36	428
C	436	36	0	52	40	564
D	1496	288	92	0	60	1936
E	80	128	72	108	0	388
Totais Saída	2184	700	680	1648	168	5380

No entanto é necessário ainda aplicar o fator de ponta horário (f_{ph})

$$f_{ph} = \frac{\sum V_{0-60}}{4 \times V_{p15}} \quad (38)$$

$$f_{ph} = \frac{4976}{5380} = 0,925 \quad (39)$$

e multiplicar todos os valores da matriz por esse fator

$$\left[\begin{matrix} \text{Matriz} \\ \text{Corrigida} \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} \text{Matriz} \\ \text{Cálculo/hora} \end{matrix} \right] / f_{ph} \quad (40)$$

Ficamos com a nossa matriz O/D já com os valores afetados o fator de ponta horário (Tabela 17):

Tabela 17 - Matriz O/D com fph (veículos/hora)

O/D	A	B	C	D	E	Totais Entrada
A	0	285	561	1431	39	2315
B	185	0	17	229	39	470
C	470	39	0	56	43	608
D	1634	315	103	0	65	2117
E	86	142	78	116	0	423
Totais Saída	2376	780	759	1832	185	5933

Depois de estar construída esta matriz O/D são aplicadas as metodologias para obter resultados de capacidade.

4.4. Capacidades

Os valores de capacidade obtidos para o TRL e FCTUC foram os seguintes:

Tabela 18 - Capacidades TRL e FCTUC (veículos/hora)

	A	B	C	D	E
TRL	1710	1168	1177	1660	961
FCTUC	1996	1117	1096	1944	960

Para o HCM, os cálculos de capacidade foram calculados por via e por ramo, tendo sido obtidos os seguintes resultados:

Tabela 19 - Capacidades HCM (veículos/hora)

Via	A		B		C		D		E	
	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir
HCM (via)	1058	261	949	951	793	1060	837	375	1031	919
HCM (ramo)	1320		1899		1853		1212		1951	

O gráfico seguinte faz uma comparação entre os diferentes valores de capacidades obtidos segundo os diferentes métodos. Como se pode ver, os valores entre o TRL e o FCTUC são sempre bastante semelhantes, como seria de esperar uma vez que um método deriva do outro. Em relação ao HCM podemos dizer que revela resultados ligeiramente invertidos em relação aos anteriores, ou seja, onde o TRL e FCTUC apresentam valores mais elevados, este apresenta valores bastante inferiores, e vice-versa.

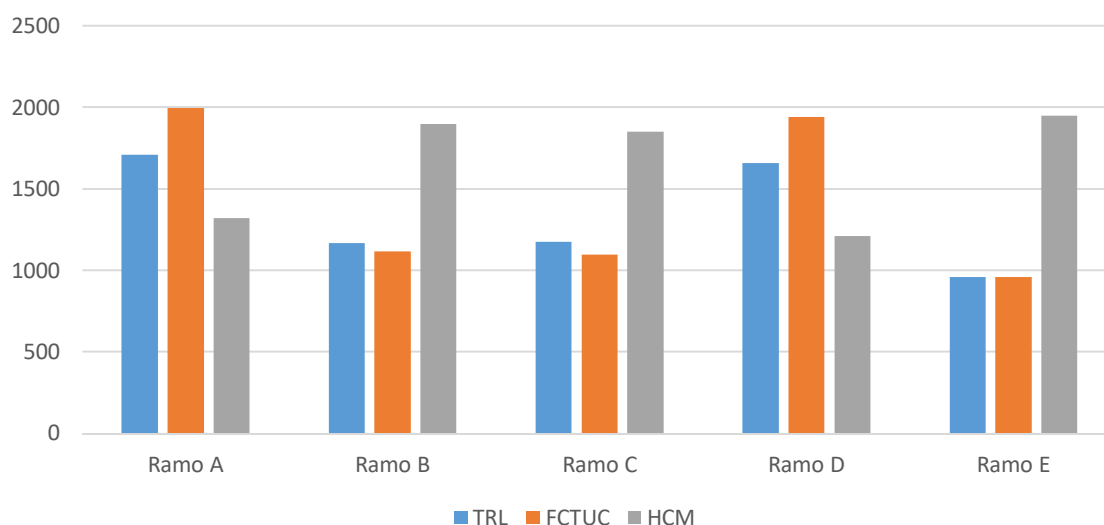


Gráfico 1 - Gráfico comparativo de capacidades

4.5. Atrasos

4.5.1. Atraso devido às filas de espera

Seguindo criteriosamente a metodologia do HCM obtiveram-se os valores de capacidades apresentados anteriormente na Tabela 19. Os valores das relações volume/capacidade obtidos por via e por ramo são apresentados na Tabela 20:

Tabela 20 - Relações volume/capacidade HCM

Via	A		B		C		D		E	
	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir
HCM (via)	0,03	7,46	0,22	0,23	0,60	0,09	0,45	4,09	0,10	0,30
HCM (ramo)	1,50		0,22		0,30		1,57		0,20	

Aplicando a expressão 32 apresentada anteriormente resultaram os seguintes valores de atraso devido às filas de espera:

Tabela 21 – Atraso devido às filas de espera HCM (em segundos)

Via	A		B		C		D		E	
	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir
HCM (via)	4	2940	6	6	14	4	10	1419	4	7
HCM (ramo)	2895		6		12		1142		6	

Estes valores de atraso, tanto por via como por ramo são bastante exagerados, e pelo que pôde ser verificado são também bastante diferentes da realidade. Posto isto, foi feita uma distribuição de volumes de entrada por via diferente daquela que a metodologia do HCM sugere. Esta correção foi feita apenas nos ramos A e D visto serem os que apresentam valores mais díspares. Portanto, em vez de as distribuições de volumes de entrada por via terem sido feitas de acordo com os parâmetros apresentados nas Tabelas 1 e 2, foram divididos de igual forma pelas duas vias. Esta opção foi tomada tendo em conta que durante o intervalo crítico (25-40 min), o que se verificou de facto foi uma distribuição de veículos semelhantes nas duas vias, tal como é demonstrado nas seguintes figuras:



Figura 22 - Fila de espera ramo A (vista da Câmara 1)



Figura 23 - Fila de espera ramo D (vista da Câmara 2)

Assim sendo foram novamente calculadas as novas capacidades,

Tabela 22 - Capacidades HCM corrigidas (veículos/hora)

Via	A		B		C		D		E	
	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir
HCM (via)	500	526	975	927	793	1060	539	566	977	967
HCM (ramo)	1026		1902		1853		1104		1944	

as novas relações volume/capacidade,

Tabela 23 - Relações volume/capacidade HCM corrigidas

Via	A		B		C		D		E	
	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir
HCM (via)	1,98	1,88	0,17	0,27	0,60	0,09	1,77	1,69	0,18	0,21
HCM (ramo)	1,93		0,22		0,30		1,73		0,20	

e sucessivamente os novos atrasos,

Tabela 24 – Atrasos devido à fila de espera HCM corrigidos (em segundos)

Via	A		B		C		D		E	
	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir
HCM (via)	467	422	5	7	14	4	373	335	5	6
HCM (ramo)	445		6		12		354		6	

Com estes valores procedeu-se então à avaliação de cada via obtendo-se as seguintes classificações de nível de serviço.

Tabela 25 - Níveis de serviço por via

Via	A		B		C		D		E	
	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir
Nível de Serviço	F	F	A	A	B	A	F	F	A	A

Em relação às classificações por ramo os resultados obtidos foram:

Tabela 26 - Níveis de serviço por ramo

Ramo	A	B	C	D	E
Nível de Serviço	F	A	B	F	A

No que diz respeito à rotunda de uma forma geral a classificação obtida é F, a pior classificação segundo o HCM.

4.5.2. Atraso geométrico

Tal como já foi referido anteriormente, este método probabilístico despreza a existência do atraso geométrico para a análise da capacidade das rotundas. No entanto, foram feitas medições de forma a tentar encontrar um valor aproximado do atraso geométrico para cada movimento. Em primeiro lugar foram definidos os trajetos que se efetuariam caso não existisse a rotunda. Admitiram-se também 50m de distância da entrada e saída da rotunda para início e fim de contagem, respetivamente. Assim sendo, e admitindo uma velocidade constante de 50Km/h, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 27 - Estimativa de tempo (em segundos) por movimento sem existência da rotunda

	A	B	C	D	E
A	-	11	15	18	13
B	13	-	11	13	14
C	17	12	-	10.5	14.5
D	16	14	12	-	11.5
E	12	15	15	13	-

Para efeitos de comparação foi medido no local o tempo que efetivamente se demora a realizar cada um dos movimentos com a existência da rotunda:

Tabela 28 - Tempos reais por movimento (em segundos)

	A	B	C	D	E
A	-	16,5	21	25	28
B	31	-	16	20	24
C	25	32	-	17	21
D	22	30	33	-	18
E	19	27	28	34	-

Obtendo-se então os seguintes atrasos por movimento:

Tabela 29 - Atrasos geométricos por movimento (em segundos)

	A	B	C	D	E
A	-	5,5	6	8	15
B	18	-	5	7	10
C	8	20	-	6,5	6,5
D	6	16	21	-	6,5
E	7	12	13	21	-

Determinando as percentagens de veículos que fazem os movimentos da matriz O/D durante toda a hora controlada, chegamos à seguinte distribuição:

Tabela 30 - Distribuição de percentagens

	A	B	C	D	E
A	0,0%	13,1%	25,1%	60,4%	1,3%
B	40,0%	0,0%	6,8%	45,7%	7,5%
C	76,2%	7,0%	0,0%	9,2%	7,7%
D	76,0%	16,5%	3,8%	0,0%	3,7%
E	15,1%	33,5%	25,9%	25,5%	0,0%

Foi então possível calcular a média ponderada da estimativa dos atrasos geométricos por ramo:

Tabela 31 - Atraso geométrico por ramo (em segundos)

A	B	C	D	E
7,3	11,5	8,6	8,2	13,8

Pode-se então considerar, de uma forma geral que o atraso geométrico terá alguma relevância.

5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

5.1. Conclusões

A capacidade para a Rotunda da Políclínica obtida através do HCM, mesmo após a correção introduzida, continua a ser bastante diferente da capacidade obtida pelos outros dois métodos utilizados. Essa diferença é agravada pelo facto de os valores de maior capacidade não se apresentarem nos mesmos ramos. Uma comparação da capacidade real com as capacidades calculadas poderia ser um bom indicador, mas a sua determinação é difícil, uma vez que durante os tempos de controlo não se verificou, em momento nenhum, a existência de filas de espera em todos os ramos em simultâneo.

De acordo com os atrasos devido às filas de espera calculados através do HCM, a rotunda obteve uma classificação de nível de serviço F, o que indica que não é eficaz na sua função de regulação de tráfego.

Tal como é descrito e admitido no próprio manual, existem limitações à aplicação do HCM fora dos EUA. Esse poderá ser um dos motivos pelo qual a classificação obtida tenha sido tão baixa. Também pelo facto de se estar perante uma rotunda com 5 ramos, situação não prevista no HCM 2010 e motivo pelo qual, para efeitos de cálculo, foram somados volumes de ramos, se pode reconhecer que o modelo, e consequentemente o resultado, não corresponda inteiramente à realidade.

Poderiam ser tomadas várias medidas como forma de melhoria para minimizar o congestionamento, como por exemplo o aumento de vias na entrada, pelo menos nos ramos do movimento principal. Esta uma solução mais rápida, fácil de construir e mais económica. Uma solução mais complexa e que implicaria maiores custos seria a construção de uma rotunda desnivelada com o objetivo de isolar o movimento principal.

5.2. Perspetivas futuras

Em trabalhos futuros o estudo pode ser aprofundado no que diz respeito, por exemplo, à medição do início das filas de espera de forma a permitir uma comparação do atraso por elas causado, estimado pelo HCM, e o atraso devido às filas de espera que de facto acontece.

Sugere-se também o aumento do tamanho da amostra, com o objetivo de alcançar resultados mais fiáveis. Poderá prolongar-se os tempos das filmagens, mais horas ao longo do mesmo dia e mais dias em diferentes semanas e meses. Desta forma conseguem-se conhecer diferentes períodos de ponta e assim encontrar com maior certeza os mais graves.

Outra forma de aumentar a amostra será aplicar o mesmo método nouro tipo de rotundas, por exemplo em rotundas de 4 ramos ou rotundas com apenas uma via para verificar a aplicabilidade do HCM.

Bibliografia

- A., Gazzarri; T., Martello M.; A., Pratelli; R., Souleyrette R.. (2010). *Gap Acceptance Parameters for HCM 2010*. Italy.
- Andrade, M. N. (2000). *Métodos e técnicas de recolha de dados de tráfego - algoritmo para a definição da matriz origem/destino*. Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Austrroads. (1993). *Guide to Traffic Engineering Practice; Part 6 - Roundabouts*. Sidney-Australia: Austrroads National Office Editor.
- Bastos Silva, A. M., & Maia Seco, A. J. (2002). *Dimensionamento de Rotundas. Textos Didáticos 2ª Edição*. Coimbra.
- Bastos Silva, A. M., & Seco, A. J. (2006). *Dimensionamento de Rotundas - Textos didáticos 3ª Edição*. Coimbra: Universidade de Coimbra; Universidade do Porto.
- Bastos Silva, A. M., Seco, A. J., Ferreira, S. M., & Pires da Costa, A. H. (2008). *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes*. Coimbra: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N) ; Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- Casas, J., Ferrer, J., Garcia, D., Perarnau, J., & Torday, A. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. (J. Barceló, Ed.) Springer New York.
- Ferreira, G. F. (2010). *Estudo do desempenho de uma rotunda da cidade de Aveiro usando a Micro-Simulação de tráfego*. Aveiro.
- FHWA. (2010). *NCHRP REPORT 672 - Roundabouts : An informational Guide*. Washington D.C.: NCHRP U.S. Department of Transportation.
- Google. (4 de Abril de 2016). *Google Maps*
- HCM. (2010). *Highway Capacity Manual*.

- HMSO. (1987). *Roads and Traffic in Urban Areas*. London, UK: Her Majesty's Stationery Office.
- Janson Olstam, J., & Tapani, A. (2004). *Comparison of Car-following models*. VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute).
- Macedo, J. M. (2005). *Seleção da Tipologia de Cruzamentos em Função da Procura*.
- Stanek, D. (2011). Comparing Roundabout Capacity Analysis Methods, or How the Selection of Analysis Method Can Affect the Design. *TRB Roundabout Conference*. Carmel, IN.
- Vasconcelos, A. L. (2014). *Avaliação do Desempenho Operacional de Rotundas: Modelos e Aplicações*. Coimbra: Tese de Doutoramento - Universidade de Coimbra.