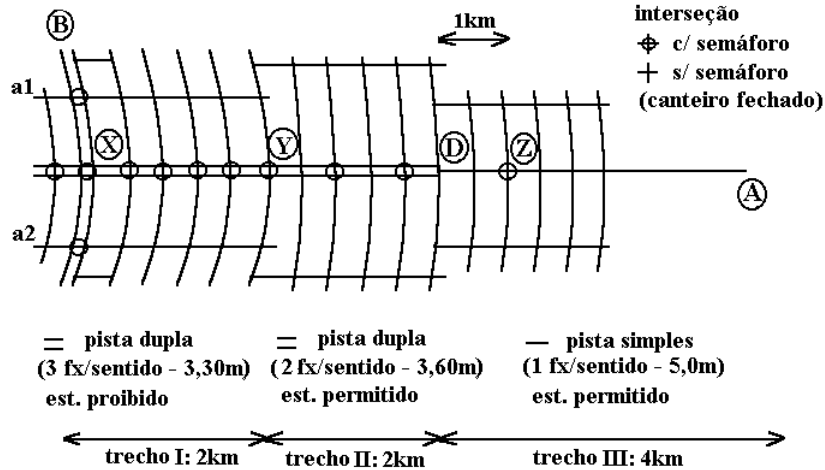
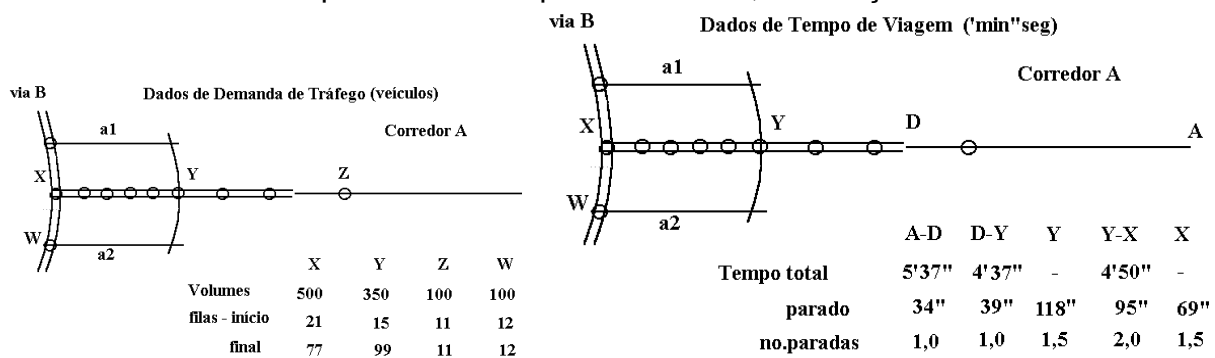


EXERCÍCIO: ANÁLISE OPERACIONAL

Corredor **A**: ligação entre o Leste e o Centro da cidade de São Poli extensão de cerca de 8 km até o Anel **B** (limita face leste da área central), distinguindo-se 3 trechos em função de suas particularidades físicas da sua seção transversal (seu perfil longitudinal é nivelado e retilíneo).

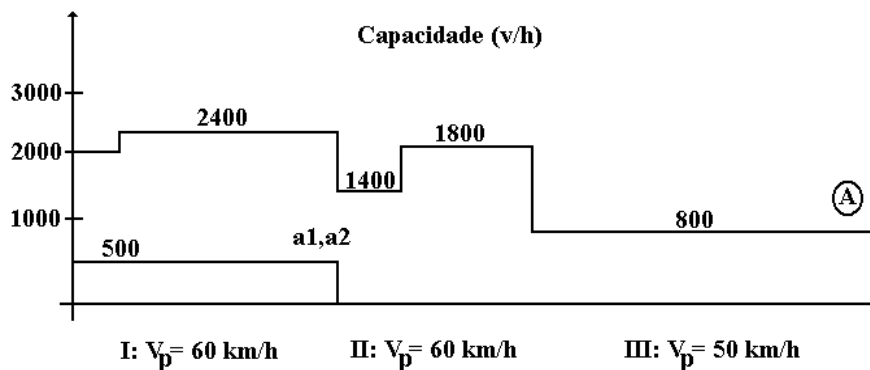


Operação atual: problemas restritos às horas de pico; dois gargalos principais (os semáforos das interseções **X** e **Y**); semaforização excessiva. dados coletados para a hora de pico da manhã, na direção centro:



(dados coletados para um período de 15 minutos no início da saturação).

Perfil de capacidade de tráfego em 1 hora (incluindo as vias auxiliares **a1** e **a2**):



(a) Com os dados fornecidos, estime a demanda de tráfego ao longo do corredor até atingir o Centro. Qual a contribuição gerada por cada trecho do corredor? Qual a relação entre a demanda que utiliza a via Arterial **A** e as vias auxiliares **a1** e **a2**? Qual a sobre-demanda total existente, considerando que ela perdura por ½ ou 1 hora?

(b) Qual a velocidade média global e de percurso em cada trecho do corredor? Considerando que o efeito da existência dos gargalos sobre o tempo de viagem manifesta-se pela sobre-fila (em excesso à fila inicial), preveja o efeito final nas interseções **Z**, **Y** e **X**, com um período de pico de 15 minutos, ½ hora e 1 hora.

(c) Qual seria o impacto da eliminação do gargalo em **Y** (por exemplo, com a proibição do estacionamento no trecho anterior a **Y** elevando sua capacidade para 2000 v/h) sobre o tráfego nas interseções **X** e **Y** (suponha que o pico tem duração de 1 hora e que a via **A** recebe em **X** todo o efeito decorrente da eliminação)? E com a eliminação do gargalo em **X** também (elevando sua capacidade para 2500 v/h, proibindo a conversão à esquerda em **B**)?

(d) Considerando os princípios de hierarquização funcional, como você avalia a seleção da via **A** como opção para constituir um corredor estrutural e como você avalia a articulação do corredor **A** com as vias lindeiras? Em que aspectos a avaliação da operação nas vias lindeiras difere da do corredor estrutural?

$$\Rightarrow \text{fórmula para sobre-fila: } n_s = \frac{C \cdot T_p}{4} \cdot \left[\sqrt{A^2 + B} + A \right], \quad A = (X-1), \quad B = \frac{8 \cdot X}{C \cdot T_p}$$

$$\text{sobre-atraso: } d_s = \frac{T_p}{4} \cdot \left[\sqrt{A^2 + B} + A \right] \quad \text{ou} \quad d_s = \frac{n_s}{q}$$

$$\Rightarrow \text{fórmula para fila regular (uniforme): } n_r = \frac{q \cdot t_b}{2} \cdot \frac{1-u}{1-y}, \quad u = \frac{g_e}{tc}, \quad y = \frac{q}{S}, \quad t_c = 120s$$

$$\text{Atraso regular (uniforme): } d_r = \frac{t_b}{2} \cdot \frac{1-u}{1-y} \quad \text{ou} \quad d_r = \frac{n_r}{q}$$

$$(\text{sem semáforos, } n_r \cong \frac{q_2}{C_2} \text{ e } d_r \cong \frac{1}{C_2} \text{ com } C_2 \cong \frac{e^{-q_0 \cdot \alpha}}{1 - e^{-q_0 \cdot \beta}} \cdot q_0; \quad q_0: \text{ fluxo oposto})$$

SOLUÇÃO:

(a) A partir dos dados de 15 minutos, do início do congestionamento, a demanda total pode ser avaliada observando os fluxos e a variação das filas. O procedimento de medição da sobre-demanda é razoavelmente complexo em vista da existência de outros componentes de fila e do fato que os termos de correção devidos à dimensão física dos veículos e ao tempo de dissipação das filas serem também função da própria demanda. Entretanto, quando a demanda é constante, os componentes da fila não relacionados com sobre-demanda não variam ao longo do tempo, como a sobre-fila (que é cumulativa). Neste caso, supondo que os valores fornecidos são medidos no início do vermelho (que é a sobre-fila), basta incorporar a correção devida à dimensão física dos veículos.

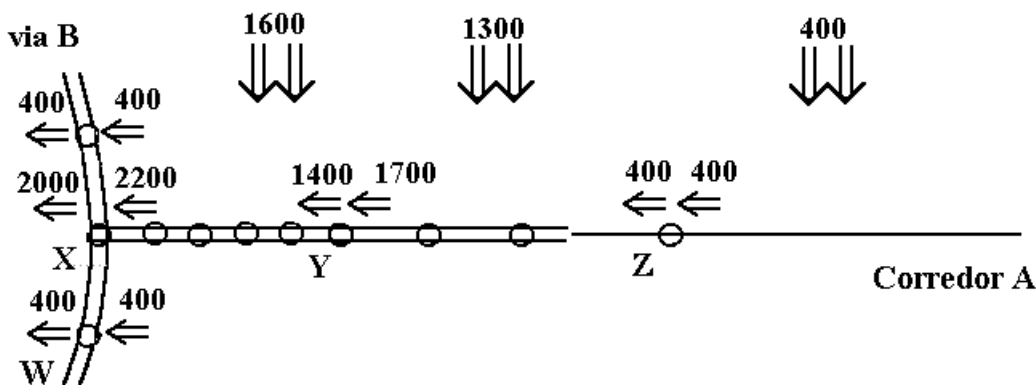
Como a demanda é $Q = q + \frac{\Delta n}{T}$, com as filas referidas à linha de retenção, e a correção da dimensão física da fila é também função da demanda, com

$$\Delta n = \frac{\Delta n}{1 - Q_m \cdot \frac{l_v}{V}}, \quad Q_m = \frac{Q}{m} \quad (\text{nas } m \text{ faixas}), \quad \text{tem-se } Q = \frac{q + \frac{\Delta n}{T}}{1 + \frac{\Delta n}{T \cdot m} \cdot \frac{l_v}{V}}.$$

A contribuição líquida de cada trecho é então calculada como a variação entre o fluxo no início e a demanda no final do trecho. Adotando um comprimento médio do veículo de 8 metros e uma velocidade de aproximação de 60 km/h, os dados referidos à hora pico da manhã seriam:

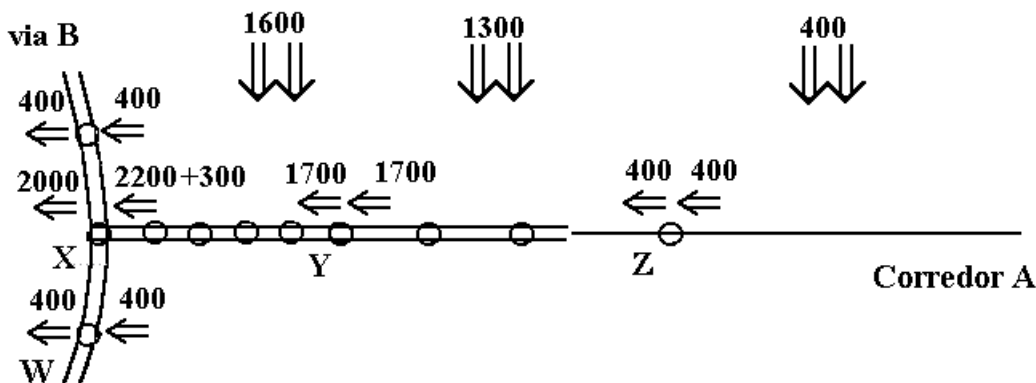
trecho =>	Até Z	Z-Y	Y-X (e W)
fluxo final(v/h)	$\frac{100}{0,25} = 400$	$\frac{350}{0,25} = 1400$	$\frac{500}{0,25} = 2000$ e $\frac{100}{0,25} = 400$
Variação de fila física (v)	0	$99 - 15 = 84$	$77 - 21 = 56$ e 0
demanda não corrigida (v)	400	$1400 + \frac{84}{0,25} = 1736$	$2000 + \frac{56}{0,25} = 2224$ e $2 \cdot 400 = 800$
demanda corrigida (v)	400	$\frac{1736}{1 + \frac{84}{0,25 \cdot 2} \cdot \frac{0,008}{60}} \cong 1700$	$\frac{2224}{1 + \frac{56}{0,25 \cdot 3} \cdot \frac{0,008}{60}} \cong 2200$ e 800
contribuição anterior (fluxo)	0	400	1400
contribuição líquida do trecho	400	$1700 - 400 = 1300$	$2200 + 800 - 1400 = 1600$

Estes resultados obtidos para a situação atual estão esquematizados na Figura seguinte:



A avaliação da contribuição líquida é a diferença entre as viagens produzidas e as viagens atraídas pelo trecho. A contribuição efetiva em termos de viagens produzidas (e atraídas) poderia ser avaliada medindo diretamente o tráfego de passagem e utilizando as relações: contribuição líquida = viagens entrando - viagens saindo e viagens saindo = produção de viagens + fluxo de passagem ou viagens entrando = atração de viagens + fluxo de passagem (considerando ambos os sentidos de percurso, para ser mais preciso).

Eliminando o gargalo em Y, com sua capacidade passando a 2500 v/h, sua demanda reprimida de 300 veículos na hora pico passaria ao trecho seguinte. Portanto, o novo fluxo em X seria de 2500 v/h (maior que sua capacidade, gerando um problema adiante). Os resultados obtidos para a situação com eliminação do gargalo em Y seriam os esquematizados na Figura seguinte:



A demanda em a1 e a2 pode ser parcialmente derivada da que normalmente utilizaria a via A, em vista da sua saturação atual. Os atrasos excessivos, causados pelos gargalos existentes, representam para os usuários o sinal desta deficiência operacional e podem vir a fazê-los buscar rotas alternativas como a1 e a2 (casos estas apresentem operação comparável ou melhor, por exemplo, em termos de tempo de viagem).

A rigor, do ponto de vista de medição da demanda efetiva do corredor, é possível considerar que a demanda correspondente ao tráfego de passagem do corredor que é desviada da via **A**, em vista de suas deficiências operacionais, representa demanda da própria via principal, que deveria cumprir a função de escoar o tráfego de passagem (e não das vias que a demanda desviada acaba por utilizar, especialmente quando estas vias tem categorias funcionais inadequadas para servir a este tráfego de passagem recebido). Entretanto, a posição contrária é também razoável (no caso de atribuir-se às outras vias parte da função de escoar o tráfego de passagem), o que é uma questão de concepção funcional (aspecto que será discutido na resposta ao último item).

Deixando de lado esta ponderação (que tornaria necessário separar o tráfego de passagem e local nas vias **a1** e **a2**), e considerando que o período de sobre-demanda (que seria identificado pelo crescimento contínuo das filas armazenadas no sistema viário) é de $\frac{1}{2}$ hora, pode-se estimar a sobre-demanda total em 150 veículos em **Y** (correspondente a 300 v/h) e 250 veículos em **X** (correspondente a 500 v/h), notando-se que esta sobre-demanda em **X** somente seria observada caso não existisse a retenção anterior em **Y**. Essas seriam as filas que se acumulariam em **Y** e **X** por sobre-demanda apenas. Com a duração de sobre-demanda igual a uma hora, os valores seriam 300 e 500 veículos respectivamente (a diferença entre demanda e capacidade horária).

Note que esta demanda calculada poderia não passar diretamente para **X** porque as interseções anteriores tem capacidade igual a 2400 v/h (e portanto poderiam “represar” parte da demanda, liberando apenas sua capacidade), mas pode-se supor que este ganho marginal de capacidade pode ser obtido ajustando os tempos de semáforo das interseções intermediárias (esta foi a suposição recomendada no enunciado).

Por outro lado, o mesmo comportamento de adaptação na escolha de rotas, buscando uma distribuição de equilíbrio em função do congestionamento das alternativas disponíveis, manifesta-se em outras situações e também poderia alterar a demanda observada. Por exemplo, o acréscimo de demanda após remover o gargalo em **Y** (300 v/h) poderia ser maior, visto que a melhora operacional resultante pode fazer com que a demanda que dividiu-se entre a rota para **X** na via **A** e as rotas alternativas por **W1** e **W2** volte a considerar o trajeto direto como mais atrativo após a melhora. Portanto, a hipótese recomendada (de que a via **A** recebe toda a demanda adicional em **X**) é, neste aspecto, conservativa do ponto de vista de avaliar a operação da via arterial.

(b) A partir dos dados apresentados (médias das medições ao longo do início do período de pico), as velocidades e atrasos podem ser estimadas.

Considerando cada um dos trechos, tem-se

	A-D	D-Y	Y-X
extensão total	4	2	2
tempo total	5'37"	4'37"	4'50"
velocidade global	42,7	26,0	24,8
tempo parado	34"	2'37"	2'44"
tempo de percurso	5'03"	2'00"	2'06"
velocidade de percurso	47,5	60,0	57,1

No caso do atraso, pode-se avaliar separadamente a contribuição de **Y** e **X** e dos demais semáforos intermediários (1 no trecho **A-D**, 2 no trecho **D-Y** e 4 no trecho **Y-X**) e realizar projeções para as diferentes situações a serem analisadas (como as relativas à duração da sobre-demanda).

Tomando como exemplo a interseção **X**, para um período de 15 minutos com a demanda de 2200 v/h e a capacidade de 2000 v/h, tem-se:

$$X = \frac{Q}{C} = \frac{2200}{2000} = 1,10$$

$$A \cong X - 1 = 0,10$$

$$B \cong \frac{8 \cdot \kappa \cdot X}{C \cdot T_p} = \frac{8 \cdot 1 \cdot 0,10}{2000 \cdot 0,25} = 0,0176$$

$$\tilde{n} = \frac{C \cdot T_p}{4} \cdot (\sqrt{A^2 + B} + A) = \frac{2000 \cdot 0,25}{4} \cdot (\sqrt{0,10^2 + 0,0176} + 0,10) = 33,27v$$

$$n = \frac{\tilde{n}}{1 - \frac{Q}{m} \cdot \frac{\ell_v}{V}} = \frac{33,27}{1 - \frac{2200}{3} \cdot \frac{0,008}{60}} = 36,87v$$

$$\tilde{d}_n = \frac{1}{q_n} \cdot n = \frac{3600}{2000} \cdot 36,87 = 66,37\text{seg}$$

$$d_n = \left(\frac{1}{q_n} - \frac{\ell_v}{m \cdot V_n} \right) \cdot n = \left(\frac{3600}{2000} - \frac{8}{3 \cdot 60/3,6} \right) \cdot 36,87 = 60,47\text{seg}$$

que corresponde ao total no sentido Bairro-Centro (dominado por **X**).

Considerando, na situação observada, cada uma das interseções (Y, X e as intermediárias), tem-se

verificação das fórmulas	A-D	D-Y	Y	Y-X	X
número de cruzamentos	1	2	1	4	1
número de faixas	1	2	2	3	3
demanda (v/h)	400	1700	1700	2200	2200
capacidade (v/h)	800	1800	1400	2400	2000
X	0,500	0,944	1,214	0,917	1,100
A	-0,500	-0,056	0,214	-0,083	0,100
B	0,0200	0,0168	0,0277	0,0122	0,0176
sobre-fila média	0,98	9,58	42,45	8,27	33,27
sobre-fila corrigida	1,04	10,81	47,87	9,17	36,87
sobre-atraso médio (s)	4,66	21,62	123,10	13,76	66,37
sobre-atraso corrigido (s)	4,16	19,02	111,61	12,29	60,47
sobre-atraso do trecho (s)	4,16	38,05	111,61	49,16	60,47
atraso medido (seg)	34	39	99	95	69

Obs.: estimativas para $T_p = 15$ minutos = 0,25 hora.

(* adotado o valor correspondente ao final do trecho).

Note que os atrasos estimados em regra são menores que os valores medidos, o que é um resultado esperado em vista de existirem outros componentes de atraso (além do sobre-atraso). As fórmulas teóricas de estimativa de atraso contêm dois termos:

$$\text{atraso total} = \text{atraso regular} + \text{sobre-atraso}$$

e, portanto, a comparação feita acima estaria considerando apenas um termo da estimativa (ao não adicionar uma estimativa do atraso regular).

Além disso, fórmulas teóricas, como as utilizadas, teriam normalmente que ser calibradas para aplicação prática e, eventualmente, também ajustadas para considerar fatores adicionais (como a eficiência da coordenação semaforica, no caso de ter-se interseções próximas) e incorporar termos de correção relacionados com a dimensão física dos veículos e com o tempo de dissipação das filas.

A calibração normalmente estimaria fatores de ajuste para o atraso regular (não considerado) e para o fator de aleatoriedade do sobre-atraso. Para tanto, as medições teriam de ser divididas nestes dois componentes e ajustados por comparação com as estimativas teóricas de cada um (o que não é possível com os dados fornecidos).

Por isso, a análise feita a seguir considerará apenas os valores das sobre-filas teóricas (próximas das reais apenas quando há sobre-demanda) e deve ser, portanto, tomada como uma avaliação parcial que poderia ter maior precisão.

No caso das interseções Y e X, como as filas estão crescendo devido à sobre-demanda, os atrasos também estão crescendo e os valores obtidos para este período de 15 minutos (o primeiro com saturação) não são representativos do restante do período de pico. Para as demais interseções, admitindo que sua operação tenha atingido uma situação próxima da estacionária, os mesmos valores podem ser extrapolados para o restante do período.

Portanto, apenas os valores para **Y** e **X** precisam ser revisados em função das hipóteses sobre a duração do período de sobre-demanda (o que não ocorrerá quando a demanda for alterada, no item a seguir), tendo-se:

sensibilidade à duração T_p período de sobre-demanda	Y		X	
	½ hora	1 hora	½ hora	1 hora
demanda (v/h)	1700	1700	2200	2200
capacidade (v/h)	1400	1400	2000	2000
X	1,214	1,214	1,100	1,100
A	0,214	0,214	0,100	0,100
B	0,014	0,014	0,009	0,009
sobre-fila média	80,29	160,59	59,28	118,56
sobre-fila corrigida	90,56	181,11	65,70	131,41
sobre-atraso médio	232,859	465,717	118,265	236,529
sobre-atraso corrigido (s)	211,125	422,250	107,752	215,504
variação do sobre-atraso	89,16%	278,33%	78,19%	256,38%

Pode-se observar que a duração da sobre-demanda é um dado crucial para avaliar de forma efetiva as condições de operação do tráfego. Mesmo sendo apenas um dos componentes do atraso, o sobre-atraso é o efeito dominante para situação com sobre-demanda significativa ou duradoura. Caso contrário, o atraso regular é o componente mais relevante e pode ser reduzido principalmente por medidas de melhoria da coordenação semaforica (um efeito que não foi considerado na avaliação).

(c) O aumento da capacidade em **Y**, além de reduzir os atrasos nesta interseção, teria o efeito de aumentar a demanda em **X** (ao eliminar seu papel de gargalo que retém parte da demanda no pico). Neste caso, a demanda em **X** passaria a 2500 v/h (e a sobre-demanda passaria de 200 v/h para 500 v/h). O aumento da capacidade em **X** para 2500 v/h poderia também eliminar, portanto, este gargalo.

Ambas as previsões, feitas segundo os critérios recomendados no enunciado, não estariam considerando o acréscimo adicional decorrente da demanda atraída de **a1** e **a2** em função das melhorias obtidas no corredor **A** (e, portanto, seriam insuficientes para avaliar o efeito do congestionamento na situação final caso esta reorientação da demanda fosse significativa).

Considerando os dois cenários sugeridos, pode-se avaliar os resultados obtidos nas interseções críticas, tendo-se:

cenários, pico 1h interseção	melhoria em Y		melhoia em Y e X	
	Y	X	Y	X
**demanda (v/h)	1700	2500	1700	2500
capacidade (v/h)	2000	2000	2000	2500
X	0,850	1,250	0,850	1,000
A	-0,150	0,250	-0,150	0,000
B	0,0034	0,0050	0,0034	0,0050
sobre-fila média	5,47	254,90	5,47	44,19
sobre-fila corrigida	5,56	261,63	5,56	45,36
sobre-atraso médio	10,02	470,94	10,02	65,32
sobre-atraso corrigido (s)	8,681	429,078	8,681	58,062
variação do sobre-atraso	-97,94%	99,10%	-97,94%	-73,06%

Obs.: duração da sobre-demanda de 1 hora (e variação correspondente).

Os resultados acumulados em X e Y permitem fazer uma avaliação preliminar dos efeitos finais das intervenções e estão sumarizados a seguir:

previsão (comparativo)	Y	X	X+Y	variação
atual (X+Y, 1 hora)	422,250	215,504	637,755	
melhoria em Y	8,681	429,078	437,759	-31,36%
melhoria em X e Y	8,681	58,062	66,743	-89,53%

Portanto, com a melhoria em Y apenas, o problema transfere-se quase totalmente para X (o sobre-atraso total estimado passa de 637,8 seg. para 437,0 seg. mesmo sem considerar o efeito da demanda adicional nas interseções intermediárias do trecho Y-X que afluiriam a partir da eliminação do gargalo em Y). Com a melhoria de Y e X, a previsão indica uma melhoria significativa (com redução do sobre-atraso total estimado para 66,7 seg. sem considerar o efeito sobre as interseções intermediárias). Neste caso, a melhor operação na via A tenderia a atrair a demanda de tráfego de passagem em a1 e a2, o que dividiria os benefícios da intervenção com os usuários locais dessas vias.

O efeito nas interseções intermediárias do trecho Y-X seria mais difícil de avaliar nestes cenários, porque estas estariam ou não além do limite de capacidade em função da sua demanda específica (isto é, seria mais crítica a hipótese de que a demanda é a mesma do final do trecho).

(d) A partir dos princípios de hierarquização viária, a escolha da via A para constituir o corredor de acesso ao centro é adequada, visto que ela representa uma opção direta (de menor trajeto), com continuidade e características geométricas favoráveis no trecho final (em que a demanda, e portanto a necessidade de capacidade, é maior).

Estes aspectos favorecem o desempenho da função deslocamento na via A (prioritária no corredor). Entretanto, a interrelação da via A com as vias lindeiras é inadequada, visto que não há definição clara do caminho preferido para acesso dos bairros ao corredor (as vias coletoras), levando à dispersão da demanda entre as diversas vias interceptantes e à multiplicação de semáforos ao longo do corredor.

Em relação à avaliação do desempenho no corredor (que poderia tomar como medida básica o tempo de deslocamento), a avaliação das vias lindeiras tem de considerar outros aspectos prioritários em relação à facilidade de deslocamento em vias coletoras e locais como: facilidade de estacionamento, circulação, travessias de pedestres, ausência de ruídos ou poluição ... Estas variáveis são relacionadas com outras funções que tem mais prioridade nas vias coletoras e locais.

Note que a existência de tráfego de passagem significativo em a1 e a2 pode ser entendida de duas formas: sua função atual está sendo distorcida ou sua hierarquia atual não reflete sua função real. Na verdade, estas visões representam justificativas para duas estratégias distintas para reduzir os problemas operacionais do corredor A: melhorar a operação da via arterial A ou incorporar as vias a1 e a2 no corredor.

A melhoria da operação na via A decorreria principalmente da remoção dos seus gargalos atuais (em Y e X), aumentando a capacidade de junto a estes semáforos

(ambos), de forma a eliminar a saturação da via (ponderando que parte da demanda em **a1** e **a2**, retornariam então para a via **A**). Após a eliminação destes gargalos, haveria o problema relacionado com a semaforização excessiva no trecho **Y-X**. Portanto, a menos da possibilidade de obter ótima eficiência de coordenação semafórica nesse trecho, restaria a necessidade de eliminar algumas interseções intermediárias para definir de forma mais efetiva as vias coletoras a serem utilizadas para cruzar a via **A**.

A incorporação de **a1** e **a2** ao corredor arterial **A** poderia ser feita de diversas formas, seguindo a estratégia de melhorar sua velocidade para o tráfego de passagem (aumentando sua capacidade, definindo uma rota com prioridade no acesso a via **B**, eliminando interferências locais, ...). A ação mais radical com esta orientação seria a criação de um binário auxiliar em **a1** e **a2** com vias de mão única e múltiplas faixas (o que provavelmente exigiria a semaforização de seus cruzamentos com a via **B**).

Esta discussão ilustra o fato de que o diagnóstico operacional é muitas vezes dependente de uma visão sobre qual é a melhor estratégia disponível (comparando custos e benefícios no curto e longo prazo) para acomodar o tráfego em uma área ou corredor. Portanto, as avaliações das intervenções não podem ser vistas de forma absoluta mas sim em função das estratégias globais (selecionando a melhor forma de operacionalizá-las). A avaliação destas estratégias globais, por sua vez, tem de considerar diversos outros aspectos além da operação do tráfego (mais amplos).