

Sistemas Urbanos de Drenagem

Prof. Antonio Cardoso Neto

1. INTRODUÇÃO E GENERALIDADES

Drenagem é o termo empregado na designação das instalações destinadas a escoar o excesso de água, seja em rodovias, na zona rural ou na malha urbana, sendo que a drenagem desta última é o objetivo do nosso estudo. A drenagem urbana não se restringe aos aspectos puramente técnicos impostos pelos limites restritos à engenharia, pois compreende o conjunto de todas as medidas a serem tomadas que visem à atenuação dos riscos e dos prejuízos decorrentes de inundações aos quais a sociedade está sujeita.

O caminho percorrido pela água da chuva sobre uma superfície pode ser topograficamente bem definido, ou não. Após a implantação de uma cidade, o percurso caótico das enxurradas passa a ser determinado pelo traçado das ruas e acaba se comportando, tanto quantitativa como qualitativamente, de maneira bem diferente de seu comportamento original.

As torrentes originadas pela precipitação direta sobre as vias públicas desembocam nos bueiros situados nas sarjetas. Estas torrentes (somadas à água da rede pública proveniente dos coletores localizados nos pátios e das calhas situadas nos topos das edificações) são escoadas pelas tubulações que alimentam os condutos secundários, a partir do qual atingem o fundo do vale, onde o escoamento é topograficamente bem definido, mesmo que não haja um curso d'água perene. O escoamento no fundo do vale é o que determina o chamado *Sistema de Macro-Drenagem*. O sistema responsável pela captação da água pluvial e sua condução até o sistema de macro-drenagem é denominado *Sistema de Micro-drenagem*, e será o objeto do nosso estudo.

De uma maneira geral, as águas decorrentes da chuva (coletadas nas vias públicas por meio de bocas-de-lobo e descarregadas em condutos subterrâneos) são lançadas em cursos d'água naturais, no oceano, em lagos ou, no caso de solos bastante permeáveis, esparramadas sobre o terreno por onde infiltram no subsolo. Parece desnecessário dizer que a escolha do destino da água pluvial deve ser feita segundo critérios éticos e econômicos, após análise cuidadosa e criteriosa das opções existentes. De qualquer maneira, é recomendável que o sistema de drenagem seja tal que o percurso da água entre sua origem e seu destino seja o mínimo possível. Além disso, é conveniente que esta água seja escoada por gravidade. Porém, se não houver possibilidade, pode-se projetar estações de bombeamento para esta finalidade.

Dentre os diversos fatores decisórios que influenciam de maneira determinante a eficiência com que os problemas relacionados à drenagem urbana podem ser resolvidos, destacam-se a existência de:

- 1)- meios legais e institucionais para que se possa elaborar uma política factível de drenagem urbana;
- 2)- uma política de ocupação das várzeas de inundação, que não entre em conflito com esta política de drenagem urbana;
- 3)- recursos financeiros e meios técnicos que possam tornar viável a aplicação desta política;
- 4)- empresas que dominem eficientemente as tecnologias necessárias e que possam se encarregar da implantação das obras;

5)- entidades capazes de desenvolver as atividades de comunicação social e promover a participação coletiva;

6)- organismos que possam estabelecer critérios e aplicar leis e normas com relação ao setor.

Há, além disso, a necessidade de que as realidades complexas de longo prazo em toda a bacia sejam levadas em consideração durante o processo de planejamento das medidas locais de curto e médio prazos. Por fim, mas não menos importante, a opinião pública deve ser esclarecida através da organização de campanhas educativas.

2. CONSEQÜÊNCIAS DA URBANIZAÇÃO NA DRENAGEM DA BACIA

O comportamento do escoamento superficial direto sofre alterações substanciais em decorrência do processo de urbanização de uma bacia, principalmente como conseqüência da impermeabilização da superfície, o que produz maiores picos e vazões. Já na primeira fase de implantação de uma cidade, o desmatamento pode causar um aumento dos picos e volumes e, conseqüentemente, da erosão do solo; se o desenvolvimento urbano posterior ocorrer de forma desordenada, estes resultados deploráveis podem ser agravados com o assoreamento em canais e galerias, diminuindo suas capacidades de condução do excesso de água. Além de degradar a qualidade da água e possibilitar a veiculação de moléstias, a deficiência de redes de esgoto contribui também para aumentar a possibilidade de ocorrência de inundações. Uma coleta de lixo ineficiente, somada a um comportamento indisciplinado dos cidadãos, acaba por entupir bueiros e galerias e deteriorar ainda mais a qualidade da água. A estes problemas soma-se a ocupação indisciplinada das várzeas, que também produz maiores picos, aumentando os custos gerais de utilidade pública e causando maiores prejuízos. Os problemas advindos de um mal planejamento não se restringem ao local de estudo, uma vez que a introdução de redes de drenagem ocasiona uma diminuição considerável no tempo de concentração e maiores picos a jusante.

Estes processos estão inter-relacionados de forma bastante complexa, resultando em problemas que se referem não somente às inundações, como também à poluição, ao clima e aos recursos hídricos de uma maneira geral.

Os problemas que dizem respeito ao controle de inundações são decorrentes da elevação dos picos das cheias, ocasionada tanto pela intensificação do volume do escoamento superficial direto (causado pelo aumento da densidade das construções, e conseqüente impermeabilização da superfície), como pela diminuição dos tempos de concentração e de recessão. Esta diminuição é também oriunda do acréscimo na velocidade de escoamento devido à alteração do sistema de drenagem existente, exigida por este aumento da densidade de construções.

Os problemas de controle de poluição diretamente relacionados à drenagem urbana têm sua origem na deterioração da qualidade dos cursos receptores das águas pluviais. Além de aumentar o volume do escoamento superficial direto, a impermeabilização da superfície também faz com que a recarga subterrânea, já reduzida pelo aumento do volume das águas servidas (conseqüência do aumento da densidade populacional), diminua ainda mais, restringindo as vazões básicas a níveis que podem chegar a comprometer a qualidade da água pluvial nestes cursos receptores, não bastasse o fato de que o aumento do volume das águas servidas já é um fator de degradação da qualidade das águas pluviais.

Os problemas climáticos são, basicamente, decorrentes do aumento da densidade das construções. Embora se constituam em impactos de pequena escala que se processam de forma lenta, podem, a longo prazo, alterar significativamente o balanço

hídrico que, por sua vez, podem reduzir as vazões mínimas e, conseqüentemente, produzir certo impacto sobre a qualidade das águas pluviais. Segundo Uehara (1985), as precipitações totais podem aumentar em até 10% em relação à zona rural. Segundo a mesma fonte, a umidade relativa do ar pode sofrer um acréscimo de até 8% e pode chegar a haver um aumento de 1°C na temperatura do ar, enquanto o aumento da nebulosidade pode atingir até 100%. Já os problemas relacionados aos recursos hídricos são uma conseqüência direta do aumento da demanda de água, decorrente do aumento da densidade populacional.

Logo se vê que estes problemas são inerentes ao aumento das densidades populacional e de construções ou, em outras palavras, ao processo de urbanização em si, formando um emaranhado complexo de causas e efeitos, relacionados de forma não bi-unívoca. Portanto, tal complexidade não permite que possa haver soluções eficientes e sustentáveis que não abranjam todos os processos e suas inter-relações, o que exige que se atue sobre as causas.

Entretanto, os impactos decorrentes do processo de urbanização em uma bacia não são apenas de origem hidrológica. Não menos importantes são os impactos não-hidrológicos que, no caso específico do Brasil, possuem relevância bastante significativa. Devido a suas características particulares, os impactos não-hidrológicos mais importantes no que concerne à drenagem urbana no Brasil são provenientes da ocupação do solo e do comportamento político-administrativo.

Dentre os problemas relativos à ocupação do solo, sobressaem-se as conseqüências da proliferação de loteamentos executados sem condições técnicas adequadas, decorrente da venalidade e da ausência quase total de fiscalização apropriada, idônea e confiável, o que dificulta (e muito) a aplicação de critérios técnicos na liberação de áreas para loteamento. Como conseqüência direta da ausência absoluta da observação de normas que impeçam a ocupação de cabeceiras íngremes e de várzeas de inundação, são ocupados terrenos totalmente inadequados ao assentamento. Os problemas sociais decorrentes, principalmente, da migração interna, faz com que grandes contingentes populacionais se instalem em condições extremamente desfavoráveis, desprovidos das mínimas condições de urbanidade, inviabilizando a imposição das mais básicas normas de atenuação de inundações. Compostas em grande parte por indivíduos analfabetos ou semi-alfabetizados, estas comunidades são praticamente impermeáveis a qualquer tentativa de elucidação de problemas tipicamente urbanos. O êxodo rural e o conseqüente crescimento desenfreado e caótico das populações urbanas no Brasil têm contribuído negativa e significativamente aos problemas relacionados às questões da drenagem urbana. A inexistência de controle técnico da distribuição racional da população dificulta a construção de canalizações para que se possa eliminar áreas de armazenamento. Dentro da realidade brasileira, a hipertrofia acelerada e desordenada das grandes cidades faz com que dificilmente seja possível impedir o loteamento e a ocupação de áreas vazias, já que não há interesse do poder público em desapropriá-las e ocupá-las adequada e racionalmente, fazendo que surjam áreas extensas e adensadas sem qualquer critério.

Via de regra, o comportamento político-administrativo no Brasil dispensa quaisquer comentários. Nos ateremos apenas a suas conseqüências no que diz respeito à drenagem urbana, deixando uma discussão mais profunda sobre o assunto aos que estudam o código penal brasileiro. O crescimento de uma cidade exige que a capacidade dos condutos seja ampliada, o que aumenta os custos e acirra a disputa por recursos financeiros entre os diversos setores da administração pública, fazendo com que prevaleça, quase sempre, a tendência viciosa de se atuar corretivamente em pontos isolados da bacia, sendo que a escolha desses locais é freqüentemente desprovida de

quaisquer critérios técnicos. A drenagem secundária é, então, sobrecarregada pelo aumento da vazão, fazendo com que ocorram impactos maiores na macrodrenagem. A isso, soma-se o fato de que, invariavelmente, as políticas corretivas de médio e longo prazos são relegadas a segundo plano, devido ao populismo imediatista frente aos propósitos eleitorais periódicos, a cada quatro anos. Além disso, os grandes *lobbies* de especuladores junto ao poder público dificultam a aplicação de medidas para disciplinar a ocupação do solo.

Devido às características do relevo, há uma tendência natural de que a ocupação humana de uma bacia hidrográfica ocorra no sentido de jusante para montante. Como quase não há controle público sobre a urbanização indisciplinada das cabeceiras da bacia, além de não haver interesse político na ampliação da capacidade de macrodrenagem, há um aumento significativo na frequência das enchentes, o que acaba por provocar prejuízos periódicos e desvalorização de propriedades de maneira sistemática, principalmente para as populações assentadas a jusante, em consequência da ocupação a montante.

Nota-se que os impactos de características não-hidrológicas na drenagem urbana se originam, em sua totalidade, nos problemas sociais brasileiros, consequência dos interesses políticos locais e, em última instância, da estrutura organizacional macro-econômica do país. No entanto, cabe ao engenheiro propor soluções técnicas a esses problemas de origem alheia à engenharia, mesmo em condições adversas, de difícil solução a curto e médio prazos.

É necessária a quantificação do impacto das condições reais da urbanização sobre o escoamento, para que se possa disciplinar a ocupação do solo, através de uma densificação que seja compatível com os riscos de inundação. A construção de pequenos reservatórios em parques públicos e o controle sobre a impermeabilização dos lotes e das vias públicas devem ser adotados antes que o espaço seja ocupado. Essas medidas, quando exercidas nos estágios iniciais da urbanização, exigem recursos relativamente limitados. A construção de reservatórios e diques, a ampliação das calhas dos rios e outras soluções estruturais de alto custo podem ser evitadas com o planejamento racional da ocupação urbana. Além disso, a ampliação da calha dos rios é, de certa forma, um paliativo, pois há aumento da velocidade no canal, o que pode agravar as inundações a jusante. A construção de reservatórios não é uma solução barata e, se houver um nível de poluição significativo na água do rio, seu represamento pode vir a se constituir em uma eventual fonte de moléstias e até de epidemias.

3. PLANOS DIRETORES DE DRENAGEM URBANA

Uma estratégia essencial para a obtenção de soluções eficientes é a elaboração de planos diretores. É altamente recomendável que um plano diretor de drenagem urbana evite medidas locais de caráter restritivo (que freqüentemente deslocam o problema para outros locais, chegando mesmo a agravar as inundações a jusante), através de um estudo da bacia hidrográfica como um todo; no que diz respeito às normas e aos critérios de projeto adotados, deve-se considerar a bacia homogênea, através do estabelecimento de período de retorno uniforme, assim como dos gabaritos de pontes, travessias, etc. O plano diretor deve possibilitar a identificação das áreas a serem preservadas e a seleção das que possam ser adquiridas pelo poder público antes que sejam ocupadas, loteadas ou que seus preços se elevem e tornem a aquisição proibitiva. É também fundamental a elaboração do zoneamento da várzea de inundação e o estabelecimento de um escalonamento cronológico e espacial da implantação das medidas necessárias, de forma tecnicamente correta e de acordo com os

recursos disponíveis. O plano de drenagem deve ser articulado com as outras atividades urbanas (abastecimento de água e de esgoto, transporte público, planos viários, instalações elétricas, etc.) de forma a possibilitar o desenvolvimento da forma mais harmonizada possível. Do plano deve também constar a elaboração de campanhas educativas que visem a informar a população sobre a natureza e a origem do problema das enchentes, sua magnitude e conseqüências. É de capital importância o esclarecimento da comunidade sobre as formas de solução existentes e os motivos da escolha das soluções propostas. A solicitação de recursos deve ser respaldada técnica e politicamente, dando sempre preferência à adoção de medidas preventivas de maior alcance social e menor custo.

O primeiro passo no processo de planejamento é determinar as características da bacia urbana, para que o comportamento

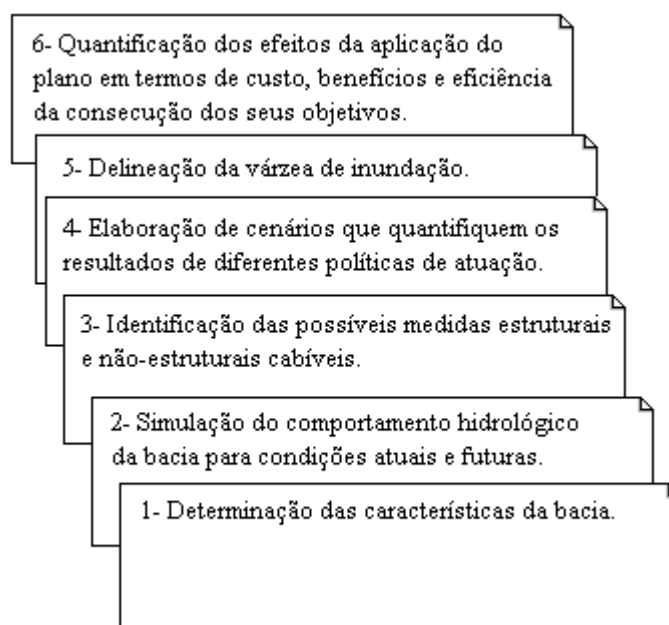


Figura 1- Etapas do processo de planejamento de uma bacia urbana.

3.2. Princípios Básicos

Por seu caráter técnico, um plano diretor de drenagem urbana deve ser elaborado por equipes técnicas competentes, que dominem os ferramentais tecnológicos adequados a cada caso. É também essencial que conte com o apoio dos poderes decisórios e da comunidade em geral, por se constituir em um documento político importante. Entre as estratégias que podem ser utilizadas para conferir-lhe peso político, pode-se atribuir força de lei ao planejamento, constituir fundos financeiros para garantir a estabilidade do fluxo de recursos e obter apoio da sociedade por meio de campanhas de comunicação social bem conduzidas.

Nunca se pode esquecer que o sub-sistema de drenagem não é isolado dos diversos sub-sistemas que constituem a organização das atividades urbanas, fazendo parte de uma rede complexa, devendo, portanto, ser articulado com os outros sub-sistemas, possibilitando a melhoria do ambiente urbano de forma ampla e harmônica. A ocupação das várzeas de inundação — áreas de armazenamento e escoamento cuja conformação foi delineada naturalmente pelo curso d'água em seu estado primitivo — somente deve ocorrer após a adoção de medidas compensatórias, que são, geralmente,

onerosas. A solução mais racional é a preservação das várzeas, não apenas visando problemas de inundação, como também no que diz respeito à preservação do ecossistema e à criação de oportunidades de recreação.

Uma vez que as águas pluviais atinjam o solo, irá escoar, infiltrar ou ficar armazenada na superfície, independente da existência, ou não, de um sistema de drenagem adequado. Se armazenamento natural for eliminado pela implantação de uma rede de drenagem sem a adoção de medidas compensatórias eficientes, o volume eliminado acabará sendo conduzido para outro local. Em outras palavras, os canais, as galerias, os desvios e as reversões deslocam a necessidade de espaço para outros locais, ou seja, transportam o problema para jusante.

Deve-se levar em conta que a qualidade e a quantidade da água são variáveis indissociáveis e que devem sempre ser consideradas em conjunto. As conseqüências das inundações em áreas onde a água está deteriorada são muito mais graves, pois estes locais podem se transformar em fontes propagadoras de moléstias e enfermidades. É inviável a construção de reservatórios de amortecimento, nessas condições. Ademais, a boa qualidade das águas pluviais pode proporcionar recursos utilizáveis para a recarga de aquíferos, irrigação, abastecimento industrial, combate a incêndios e recreação, entre outros benefícios.

Estas observações são princípios essenciais à elaboração do plano diretor, e constituem a base fundamental sobre a qual devem ser orientadas todas as fases do processo.

4. HIDROLOGIA URBANA

A hidrologia urbana abrange todas as inter-relações entre causas e efeitos dos impactos hidrológicos.

4.1. Classificação das Bacias Urbanas

Normalmente, as bacias ocupadas pelo processo de urbanização são de portes pequeno e médio. Devido à variação natural dos parâmetros que influem no comportamento hidrológico da bacia, a distinção entre bacias pequenas e médias é imprecisa e até mesmo subjetiva. Comumente, bacias com tempo de concentração inferior a 1 hora e/ou área de drenagem não superior a $2,5 \text{ km}^2$ são classificadas como pequenas. Bacias com tempo de concentração superior a 12 horas e/ou área de drenagem maior que 1.000 km^2 se classificam como grandes; bacias médias se situam entre esses dois tipos.

Na grande maioria das vezes, não se dispõe de registros de vazão nas áreas nas quais se pretende realizar obras de drenagem urbana. No entanto, pode-se sintetizar as vazões de projeto por meio dos dados de precipitação. É nesse contexto que a classificação da bacia em pequena ou média é fundamental. Embora se possa utilizar o método racional em bacias pequenas, não é recomendável que o mesmo seja usado para o cálculo das vazões em bacias de porte médio. Devido à necessidade de se considerar a variação temporal da intensidade da chuva e o amortecimento na bacia de porte médio, são usadas, normalmente, técnicas baseadas na teoria do hidrograma unitário, pois do contrário as vazões de pico seriam superestimadas.

A escolha do método de cálculo pode ser auxiliada por meio da tabela 3, por apontar alguns atributos das bacias pequenas e médias.

Característica	Bacia pequena	Bacia média
Varição temporal da intensidade de chuva.	Constante	Variável
Varição espacial da intensidade de chuva.	Uniforme	Uniforme
Escoamento superficial.	Predominante em superfícies	Em superfícies e canais
Armazenamento na rede de canais.	Desprezível	Desprezível

Tabela 3- Classificação de bacias.¹

4.2. Período de Retorno

Para se decidir o grau de proteção conferido à população com a construção das obras de drenagem, deve-se determinar a vazão de projeto. Deve-se, também, conhecer a probabilidade P de o valor de uma determinada vazão ser igualado ou superado em um ano qualquer. A vazão de projeto é imposta de tal forma que sua probabilidade P não exceda um determinado valor pré-estabelecido. Uma vez que a sociedade, através de seus representantes, é que deve decidir o risco aceitável pela comunidade e o quanto ela está disposta a pagar pela proteção conferida pelas obras, a escolha do período de retorno é um critério definido em esferas políticas.

É difícil avaliar os danos resultantes de uma inundação, principalmente quando esses danos não passam de mero transtorno. Os prejuízos decorrentes de inundações (mesmo que freqüentes) de sarjetas e cruzamentos em áreas residenciais, podem até mesmo ser desprezíveis, se o acúmulo de água durar pouco de cada vez. Já em uma zona comercial, esse mesmo tipo de ocorrência pode causar transtornos mensuráveis. Em alguns casos, a disposição e possibilidade da população beneficiária em financiar as obras por meio de tributos é que acaba definindo o projeto.

A aplicação de métodos puramente econômicos para o estabelecimento do período de retorno é limitada pela impossibilidade de levar em conta aspectos que não podem ser expressos em termos monetários, por motivos éticos. Além disso, a relação benefício-custo é de difícil quantificação. Quanto maior o período de retorno adotado, maior será a proteção conferida à população; por outro lado não só o custo, como também o porte das obras e sua interferência no ambiente urbano² serão maiores. Tal fato, comumente, leva os poderes decisórios a escolher períodos de retorno pequenos, imprimindo uma falsa sensação de segurança na população, encorajando-a, de certa forma, a ocupar áreas impróprias.

Devido a essas dificuldades em estabelecer o período de retorno de forma objetiva, sua escolha acaba recaindo sobre critérios técnicos. Quando a escolha do período de retorno adequado fica a critério exclusivo do projetista, pode-se usar os valores da tabela 4, que são valores aceitos de forma mais ou menos ampla pelos técnicos e gozam de certo consenso.

¹ Sugerida por Ponce (1989) e citada por Tucci(1993).

² A interferência no ambiente urbano é entendida como uma série de perturbações como, desapropriação de imóveis, relocação de populações, interrupções no tráfego e prejuízos ao comércio durante a fase de construção das obras, que induzem a custos adicionais e implicações políticas de tratamento delicado.

Tipo de obra	Tipo de ocupação	Período de retorno (anos)
Micro-drenagem	Residencial	2
Micro-drenagem	Comercial	5
Micro-drenagem	Edifícios de serviços ao público	5
Micro-drenagem	Aeroportos	2-5
Micro-drenagem	Áreas comerciais e artérias de tráfego.	5-10
Macro-drenagem	Áreas Comerciais e residenciais	50-100
Macro-drenagem	Áreas de importância específica	500

Tabela 4- Períodos de retorno em função da ocupação da área.³

Para que se possa escolher o valor desejado, é fundamental a distinção entre *risco* e *período de retorno*. A probabilidade P da vazão de projeto ser igualada ou superada durante a vida útil da obra (N anos) é o inverso do período de retorno T , ou seja: $P=1/T$. Há portanto, a cada ano, uma probabilidade de que a obra não falhe igual a $1-1/T$. Portanto, a possibilidade de que ela não venha a falhar em toda sua vida útil é $(1-1/T)^N$, o que implica que o risco, ou probabilidade de que a obra falhe pelo menos uma vez durante sua vida útil é $R=1-(1-1/T)^N$.

Uma vez obtido o período de retorno, conhece-se a tormenta de projeto e a chuva excedente. São, então, aplicadas técnicas que determinam o hidrograma de projeto através do hietograma da chuva excedente. Os parâmetros que controlam a forma do hidrograma têm dimensão de tempo (como é mostrado na figura 3), e os principais são:

4.3. Tempo de Concentração

- ① *Tempo de retardo* (t_l). É o intervalo de tempo entre os centros de gravidade do hietograma e do hidrograma.
- ② *Tempo do pico* (t_p). É o intervalo entre o centro de massa do hietograma e o tempo em que ocorre o pico do hidrograma.
- ③ *Tempo de ascensão* (t_m). É o intervalo de tempo decorrido entre o início da chuva e o pico do hidrograma.
- ④ *Tempo de base* (t_b). É o tempo entre o início da precipitação e aquele em que a precipitação ocorrida já escoou através na superfície, ou que a superfície volta às condições anteriores à ocorrência da precipitação.
- ⑤ *Tempo de recessão* (t_e). É o tempo necessário para a vazão baixar até o ponto C, quando cessa o escoamento superficial.
- ⑥ *Tempo de concentração* (t_c). É o tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia participe na vazão do fundo do vale. Esse tempo

³ Sugerida pelo DAEE/CETESB (1980).

também é definido como o intervalo de tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma.

Entretanto, esses parâmetros estão inter-relacionados através de fórmulas empíricas o que torna suficiente o conhecimento apenas do tempo de concentração.

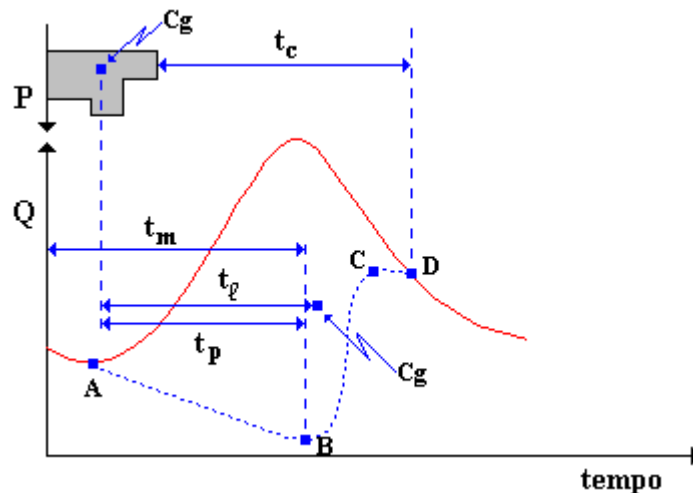


Figura 3- Hidrograma típico.

A grande quantidade de fórmulas que fornecem o valor do tempo de concentração em função das características da bacia e da intensidade de precipitação se originam de estudos experimentais e devem ser aplicadas em condições aproximadas àquelas para as quais foram determinadas. Cada fórmula procura representar um tipo diferente de escoamento, que podem ser classificados em três grupos:

- ① *Escoamentos em superfícies.* Prevalcem em bacias diminutas e são constituídos de lâminas que escoam à baixa velocidade sobre planos. Dependem sobretudo da intensidade da chuva e da rugosidade e declividade da superfície. A extensão deste tipo de escoamento é raramente superior a 100 metros e, portanto, as fórmulas que os refletem podem ser aplicadas a aeroportos, parques de estacionamento, etc.
- ② *Escoamentos em canais naturais.* As velocidades são maiores que no caso anterior, pois prevalecem em bacias de maior porte, nas quais os canais são bem delineados, implicando em um escoamento mais eficiente. Escoamentos que se encaixam nesta categoria dependem menos da intensidade da chuva e da rugosidade do terreno, pois o tempo que a água demora para escoar no canal é maior que na superfície.
- ③ *Escoamentos em canais artificiais e galerias.* As velocidades são ainda mais altas, pois este tipo de escoamento ocorre em bacias que tiveram suas condições primitivas modificadas por obras de drenagem, de maneira significativa.

Com maior ou menor predominância, as três categorias de escoamento ocorrem simultaneamente em uma mesma bacia, dependendo das características da mesma. As fórmulas mais usuais são apresentadas a seguir. Em todas elas, o tempo de concentração é obtido em minutos, a declividade S da bacia é dada em m/km e o comprimento L do talvegue, em km . Todas as fórmulas apresentam resultados semelhantes para $L \leq 10 km$, a partir do qual passam a divergir.

❶ **Fórmula de Kirpich.** Para ser utilizada em bacias não maiores que 0,5 km² e declividades entre 3 e 10%.

$$t_c = 3,989 \frac{L^{0,770}}{S^{0,385}} \quad (1)$$

onde L é o comprimento do talvegue e S é sua declividade. Esta fórmula foi obtida para bacias com canais bem definidos e declividades altas. No entanto, o fato de ter sido desenvolvida para bacias tão pequenas, parece indicar que reflete o escoamento do primeiro tipo⁴.

❷ **Fórmula da Federal Aviation Agency.** Usada em bacias pequenas, com predominância de escoamento de superfície, pois foi especificamente desenvolvida para drenagem de aeroportos.

$$t_c = 22,73(1,1 - C) \frac{\sqrt{L}}{\sqrt[3]{S}} \quad (2)$$

onde C é o coeficiente de escoamento do método racional.

❸ **Fórmula da Onda Cinemática.** Deduzida teoricamente a partir da equação de Chézy com coeficiente de Manning sob a suposição de precipitação de intensidade constante com duração igual ao tempo de concentração. É aplicável a bacias pequenas nas quais o escoamento sobre a superfície é predominante.

$$t_c = 447(nL)^{0,6} \frac{S^{0,3}}{I^{0,4}} \quad (3)$$

onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning e I é a intensidade de precipitação.

❹ **SCS Lag Formula.** Desenvolvida para bacias rurais com áreas de drenagem inferiores a 8 km².

$$t_c = 3,42 \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} \frac{L^{0,8}}{S^{0,5}} \quad (4)$$

onde CN é o número da curva (curve number) do método desenvolvido pelo Soil Conservation Service. Deve-se ajustar o valor de CN para bacias urbanas em função da parcela dos canais que foram modificados e da área impermeabilizada. Para uma ocupação não-homogênea do solo urbano, o SCS recomenda que seja feita uma média ponderada dos números da curva.

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^k A_i \cdot CN_i}{A} \quad (5)$$

⁴ Tucci (1993) cita o fato de que o valor do tempo de concentração é subestimado para L ≥ 10 km.

Como as velocidades de escoamento também se alteram, o SCS propõe que o tempo de concentração seja ajustado através da seguinte expressão:

$$F_a = 1 + \text{PRCT} \left(0,02185\text{CN}^3 + 0,4298\text{CN}^2 - 335\text{CN} + 6789 \right) \times 10^6 \quad (6)$$

onde F_a é o fator de correção e PRCT é a porcentagem impermeabilizada da bacia.⁵

5 Método Cinemático do SCS. Para bacias compostas de trechos de declividades variáveis, esta fórmula se baseia no fato de que a somatória dos tempos de trânsito em cada trecho nada mais é que o tempo de concentração.

$$t_c = \frac{100}{6} \sum \frac{L}{V} \quad (7)$$

Do ponto de vista conceitual, este método é o mais correto, pois permite que se leve em conta as características específicas da bacia. O SCS propõe que se use a tabela 5 para o cálculo das velocidades na parte superior da bacia onde há predominância de escoamento em superfície.

Tipo de escoamento	0% ≤ S ≤ 3%	4% ≤ S ≤ 7%	8% ≤ S ≤ 11%	S ≥ 12%
1 Em superfície				
- Florestas	0-0,5	0,5-0,8	0,8-1,0	1,0-
- Pastagens	0-0,8	0,8-1,1	1,1-1,3	1,3-
- Áreas cultivadas	0-0,9	0,9-1,4	1,4-1,7	1,7-
- Pavimentos	0-2,6	2,6-4,0	4,0-5,2	5,2
2 Em canais				
- Mal definidos	0-0,6	0,6-1,2	1,2-2,1	***
- Bem definidos	Manning	Manning	Manning	Manning

Tabela 5- Velocidades médias (m/s).

6 Fórmula de Dooge. Foi determinada para bacias rurais com áreas de drenagem variando de 140 a 930 km², servindo para os três tipos de escoamento descritos, embora seja mais apropriada para escoamentos em canais.

$$t_c = 21,88 \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}} \quad (8)$$

onde A é a área de drenagem da bacia em km².

É recomendável que se calcule a velocidade média e compare o valor encontrado com os da tabela 5. Também se recomenda que seja feita uma análise de sensibilidade do hidrograma de projeto com relação à rugosidade, número da curva e outros parâmetros que são determinados com alto grau de incerteza.

⁵ Para maiores detalhes, ver McCuen (1982).

5. ELEMENTOS DE MICRO-DRENAGEM URBANA

Os elementos principais da micro-drenagem são os meio-fios, as sarjetas, as bocas-de-lobo, os poços de visita, as galerias, os condutos forçados, as estações de bombeamento e os sarjetões.

- ① *Meio-fio*. São constituídos de blocos de concreto ou de pedra, situados entre a via pública e o passeio, com sua face superior nivelada com o passeio, formando uma faixa paralela ao eixo da via pública.
- ② *Sarjetas*. São as faixas formadas pelo limite da via pública com os meio-fios, formando uma calha que coleta as águas pluviais oriundas da rua.
- ③ *Bocas-de-lobo*. São dispositivos de captação das águas das sarjetas.
- ④ *Poços de visita*. São dispositivos colocados em pontos convenientes do sistema, para permitir sua manutenção.
- ⑤ *Galerias*. São as canalizações públicas destinadas a escoar as águas pluviais oriundas das ligações privadas e das bocas-de-lobo.
- ⑥ *Condutos forçados e estações de bombeamento*. Quando não há condições de escoamento por gravidade para a retirada da água de um canal de drenagem para um outro, recorre-se aos condutos forçados e às estações de bombeamento.
- ⑦ *Sarjetões*. São formados pela própria pavimentação nos cruzamentos das vias públicas, formando calhas que servem para orientar o fluxo das águas que escoam pelas sarjetas.

5.1. Elementos Físicos e o Esquema Geral do Projeto

Para elaborar um projeto de micro-drenagem, são necessários os seguintes dados:

- ① *Plantas*. 1)- Planta da localização estadual da bacia; 2)- Planta da bacia em escala 1:5.000 ou 1:10.000; 3)- Planta altimétrica da bacia em escala 1:1.000 ou 1:2.000, constando as cotas das esquinas e outros pontos importantes. Plantas da bacia em escala de 1:1.000 até 1:5.000 normalmente atendem às necessidades de projeto de um sistema de drenagem urbana, em sua fase preliminar. As curvas de nível devem ter equidistância tal que permita a identificação dos divisores das diversas sub-bacias do sistema. Admite-se um erro máximo de três centímetros na determinação das cotas do terreno nos cruzamentos das ruas e nas rupturas de declividade entre os cruzamentos. Deve-se fazer um levantamento topográfico de todas as esquinas, mudanças de greides das vias públicas e mudanças de direção. Deve-se, também, dispor de um cadastro das redes públicas de água, eletricidade, gás, esgotos e águas pluviais existentes que possam interferir no projeto. No projeto definitivo são necessárias plantas mais minuciosas das áreas onde o sistema será construído. As plantas devem indicar com precisão os edifícios, as ferrovias, as rodovias, os canais,

as redes de gás, água, esgotos, telefone, eletricidade, enfim quaisquer estruturas que possam interferir com o traçado proposto das tubulações de águas pluviais.

- ② *Dados sobre a urbanização.* Dispor de dados sobre o tipo de ocupação das áreas, a porcentagem de ocupação dos lotes e a ocupação do solo nas áreas não-urbanizadas pertencentes à bacia, tanto na situação atual como nas previstas pelo plano diretor. É necessário obter o perfil geológico, por meio de sondagens, ao longo do traçado projetado para a tubulação, se houver suspeita da existência de rochas sub-superficiais, para que se possa escolher o traçado definitivo com um mínimo de escavação em rocha.
- ③ *Dados sobre o curso receptor.* Dispor de informações sobre os níveis máximos do curso de água no qual será efetuado o lançamento final, assim como do levantamento topográfico do local deste lançamento.

A rede coletora deve ser lançada em planta baixa de escala 1:1.000 ou 1:2.000, de acordo com as condições naturais de escoamento, segundo as seguintes normas:

- ① *Traçado da rede.* ① As áreas contribuintes de cada trecho das galerias, entre 2 poços de visita consecutivos e os divisores das bacias devem ser assinalados de maneira adequada e conveniente nas plantas. ② Os trechos nos quais o escoamento ocorre exclusivamente pelas sarjetas devem ser identificados por meio de setas. ③ Sempre que for possível, as galerias devem ser situadas sob os passeios. ④ É permitido que em uma determinada via pública, o sistema coletor seja composto por uma rede única ligada às bocas-de-lobo de ambos os passeios. ⑤ Deve-se estabelecer a solução economicamente mais viável, sempre que possível.
- ② *Bocas-de-lobo.* A localização das bocas-de-lobo deve respeitar o critério de eficiência na condução das vazões superficiais para as galerias. É necessário colocar bocas-de-lobo nos pontos mais baixos do sistema, com vistas a impedir alagamentos e águas paradas em zonas mortas.
- ③ *Poços de visita.* A colocação dos poços-de-visita deve atender à necessidade de visita em mudanças de direção, de declividade e de diâmetro, ao entroncamento dos trechos e às bocas-de-lobo. O afastamento entre poços de visita consecutivos deve ser o máximo possível, por critérios econômicos.
- ④ *Galerias.* O diâmetro mínimo das galerias de seção circular é de 30 cm. Deve-se observar as seguintes normas básicas: ① O dimensionamento das galerias é de tal forma que funcione à vazão plena para a vazão de projeto, sendo que a velocidade máxima admissível é função do material empregado (Ex.: $0,60 \text{ m/s} \leq V \leq 5,0 \text{ m/s}$ para concreto). ② Ao se empregar canalizações sem revestimento especial, o recobrimento deve ser maior que 1,00 m. Se, por motivos topográficos, houver imposição de um recobrimento menor, as tubulações deverão ser dimensionadas sob o ponto de vista estrutural. ③ Os tubos devem ser alinhados pela geratriz superior, no caso de mudanças de diâmetro.

5.2. Distribuição Espacial dos Componentes

- ① *Traçado preliminar das galerias.* O traçado das galerias deve ser desenvolvido simultaneamente com o projeto das vias públicas e parques, para evitar imposições

ao sistema de drenagem que geralmente conduzem a soluções mais onerosas. Deve haver homogeneidade na distribuição das galerias para que o sistema possa proporcionar condições adequadas de drenagem a todas as áreas da bacia.

- ② **Coletores.** Como já foi visto, a rede coletora pode se situar sob o meio-fio ou sob o eixo da via pública, com recobrimento mínimo de 1,00 m e possibilitar a ligação das tubulações de escoamento das bocas-de-lobo, ligações estas que devem ter um recobrimento mínimo de 60 cm.
- ③ **Bocas-de-lobo.** Recomenda-se que a localização das bocas-de-lobo obedecem os seguintes critérios: ① Quando for ultrapassada sua *capacidade de engolimento*, ou houver saturação da sarjeta, deve haver bocas-de-lobo em ambos os lados da via. ② Deverá haver bocas-de-lobo nos pontos mais baixos de cada quadra. ③ Se não se dispuser de dados sobre a capacidade de escoamento das sarjetas, recomenda-se um máximo espaçamento de 60 m entre as bocas-de-lobo. ④ Não se recomenda colocar bocas-de-lobo nas esquinas, pois os pedestres teriam de saltar a torrente em um trecho de descarga superficial máxima para atravessar a rua, além de ser um ponto onde duas torrentes convergentes se encontram. A melhor localização das bocas-de-lobo é em pontos um pouco à montante das esquinas.
- ④ **Poços de visita.** DAEE/CETESB (1980) sugere o uso da tabela 6, que apresenta o espaçamento máximo recomendado para os poços de visita. Deve haver poços de visita nos pontos onde há mudança de direção, de declividade e de diâmetro e nos cruzamentos de vias públicas.⁶

Diâmetro do conduto (cm)	Espaçamento (m)
30	120
50 - 90	150
100 ou mais	180

Tabela 6- Espaços entre poços de visita.

- ⑤ **Caixas de ligação.** Quando é necessária a construção de bocas-de-lobo intermediárias ou para evitar que mais de quatro tubulações cheguem em um determinado poço de visita, utilizam-se as chamadas caixas de ligação. A diferença entre as caixas de ligação e os poços de visita é que as caixas não são *visitáveis*.

6. DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DOS COMPONENTES

6.1. Ruas e Sarjetas

A capacidade de descarga das sarjetas depende de sua declividade, rugosidade e forma. Se não houver vazão excessiva, o abaulamento das vias públicas faz com que as águas provenientes da precipitação escoem pelas sarjetas. O excesso de vazão ocasiona inundação das calçadas, e as velocidades altas podem até erodir o pavimento. Pode-se

⁶ Se a diferença de nível entre os tubos efluente e afluente for superior a 70 cm, o poço de visita se denomina *poço de quebra*.

calcular a capacidade de condução das ruas e sarjetas sob duas hipóteses: ❶ *Água escoando por toda a calha da rua*. Admite-se que a declividade da via pública⁷ seja de 3% e que a altura da água na sarjeta seja de 15 cm. ❷ *Água escoando somente pelas sarjetas*. Neste caso se admite que a declividade da via seja também de 3%, porém com 10 cm de altura da água na sarjeta. Para os dois casos, usa-se normalmente a fórmula de Chézy com coeficiente de Manning:

$$V = \frac{\sqrt{S}}{n} R_h^{2/3} \quad (9)$$

onde V é a velocidade na sarjeta em m/s, S é a declividade longitudinal da rua em m/m, R_h é o raio hidráulico e n é o coeficiente de rugosidade de Manning, adotado como 0,0167 para pavimentos comuns de vias públicas. Deve-se levar em conta que as tensões de cisalhamento junto às paredes da sarjeta é irregular, devido à profundidade transversalmente variável, o que ocasiona um escoamento não-uniforme, mesmo quando em regime permanente. Se a água da sarjeta se acumula em torno da boca-de-lobo, as características da boca-de-lobo serão mais determinantes na altura do escoamento que a sarjeta.

6.2. Bocas-de-Lobo

Há três tipos principais de bocas coletoras, como pode ser visto na figura 4.

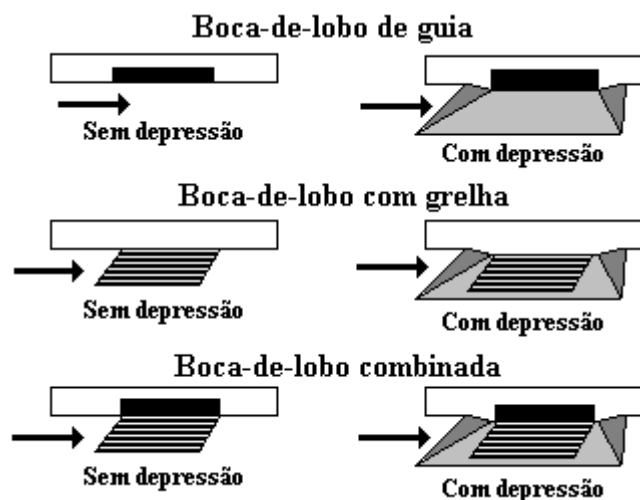


Figura 4- Tipos de bocas-de-lobo.⁸

A água, ao se acumular sobre a boca-de-lobo com entrada pela guia, gera uma lâmina d'água mais fina que a altura da abertura no meio-fio, fazendo com que a abertura se comporte como um vertedouro de seção retangular, cuja *capacidade de engolimento* é:

$$Q = 1,7Ly^{3/2} \quad (10)$$

onde Q é a vazão em m³/s, y é a altura da lâmina d'água próxima à abertura da guia e L é o comprimento da soleira em metros.

⁷Também chamada de *declividade transversal do leito carroçável*.

⁸DAEE/CETESB (1980).

Se a altura da água superar o dobro da abertura no meio-fio, a vazão é calculada pela seguinte expressão:

$$Q = 3,101Lh^{3/2} \sqrt{\frac{2y - h}{2h}} \quad (11)$$

onde h é a altura do meio-fio em metros. A opção por uma ou outra fórmula para $h < y < 2h$, fica a critério do projetista.

Para lâminas d'água de profundidade inferior a 12 cm, as bocas-de-lobo com grelha funcionam como um vertedouro de soleira livre, cuja equação é:

$$Q = 1,7Py^{3/2} \quad (12)$$

onde P é o perímetro do orifício. Se um dos lados da grelha for adjacente ao meio-fio, o comprimento deste lado não deve ser computado no cálculo do valor de P .

Se a profundidade da lâmina for maior que 42 cm, a vazão deve ser calculada por:

$$Q = 2,91A\sqrt{y} \quad (13)$$

onde A é a área livre da grade em m^2 , ou seja: as áreas das grades devem ser excluídas. Como no caso anterior, o projetista deve se encarregar do critério a ser adotado para $12 \text{ cm} < y < 42 \text{ cm}$.

Teoricamente, a capacidade de engolimento das bocas-de-lobo combinadas é aproximadamente igual à soma das vazões pela abertura na guia e pela grelha. A figura 5 mostra detalhes de bocas-de-lobo em corte longitudinal.

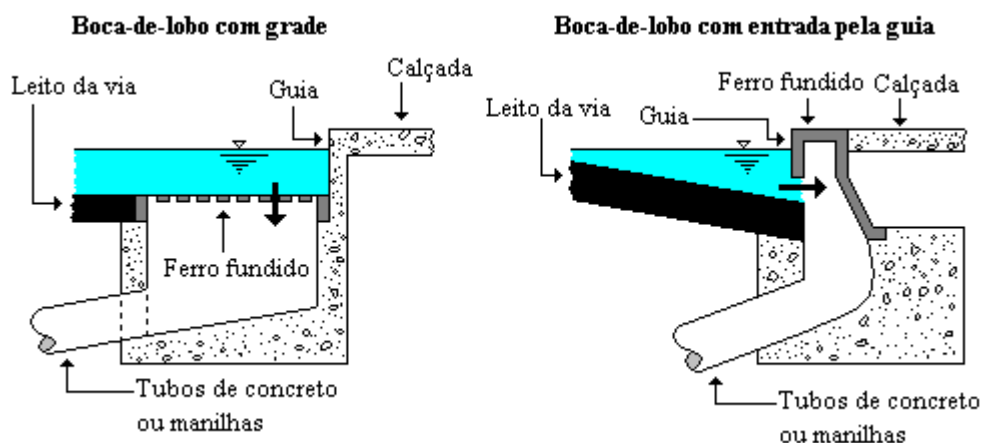


Figura 5- Bocas-de-lobo.

6.3. Galerias

O dimensionamento das galerias é feito através das equações de Chézy, Manning e outras expressões adotadas para o escoamento da vazão de projeto em regime

permanente uniforme. O problema principal é a determinação das declividades e dimensões mais econômicas. No entanto, as normas seguintes podem orientar a escolha desses parâmetros.

- ① Os condutos devem ser calculados para escoamento permanente e uniforme à seção plena, e com velocidade não inferior a 76 cm/s.
- ② Deve-se adotar condutos de no mínimo 30 cm de diâmetro para evitar obstruções.
- ③ Nunca se deve diminuir as seções à jusante, pois qualquer detrito que venha a se alojar na tubulação deve ser conduzido até a descarga final.
- ④ Para que se minimize o volume de escavação, a declividade dos condutos deve se adaptar o mais que for possível à declividade do terreno.
- ⑤ Os ajustes nas conexões de condutos de seções diferentes deve ser feito pela geratriz superior interna. Porém, isto não se aplica a junções de ramais secundários que afluem em queda aos poços de visita.

6.4. Poços de Visita

Além de proporcionar acesso aos condutos para sua manutenção, os poços de visita também funcionam como caixas de ligação aos ramais secundários. Portanto, sempre deve haver um poço de visita onde houver mudanças de seção, de declividade ou de direção nas tubulações e nas junções dos troncos aos ramais.

Geralmente, os poços são construídos de concreto, tijolos, blocos de concreto ou metal corrugado. A figura 6 ilustra a forma mais usual de poços de visita de concreto ou de tijolos. O fundo do poço é, geralmente, de concreto e possui uma canaleta de seção semi-circular para o escoamento da água. Os ramais podem ser ligados diretamente ao poço, como mostrado na figura 6.a, ou pode-se, através de uma queda externa, ligá-los ao fundo do poço (figura 6.b). Quando a queda exceder 60 cm, normalmente, adota-se esta última solução. Se os condutos tiverem diâmetro superior a 1,20 m, o poço deve ser construído como esquematizado na figura 6.c.

As tampas dos poços, assim como as molduras onde se encaixam, devem ser de ferro fundido com peso variando entre 90 kg (quando submetida a tráfego leve) e 270 kg (em vias principais). As tampas não podem ser lisas para evitar que os veículos derrapem ao trafegar sobre elas. É aconselhável que as tampas sejam aferrolhadas, se houver possibilidade de saltarem por pressão de águas refluídas ou por explosão de gás de esgoto.

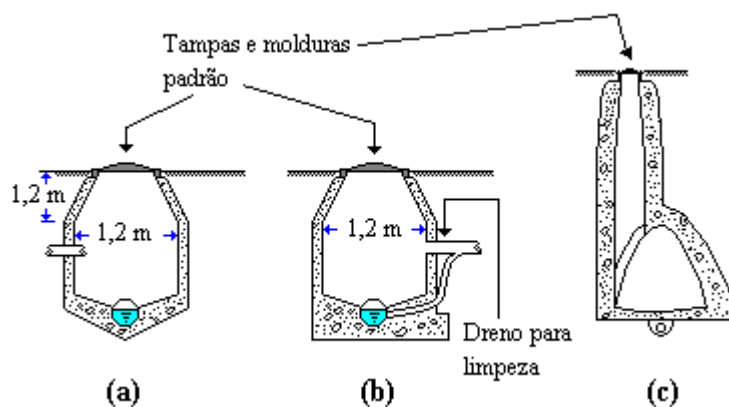


Figura 6- Poços de visita.

6.5. Redução da Capacidade de Escoamento

No caso das sarjetas de pequena declividade, multiplica-se o valor da capacidade calculada por um fator de redução que considera a obstrução por sedimentos. Recomenda-se o uso da tabela 7.

Tanto a obstrução ocasionada por detritos como a irregularidade do pavimento das vias públicas próximo às sarjetas fazem com que a capacidade real de engolimento das bocas-de-lobo seja inferior à calculada. Esta redução pode ser estimada por meio da tabela 8.⁹

Declividade da sarjeta	Fator de redução
0,4 %	0,50
1,0 % a 3,0 %	0,80
5,0 %	0,50
6,0 %	0,40
8,0 %	0,27
10,0 %	0,20

Tabela 7- Fatores de redução do escoamento nas sarjetas.¹⁰

Localização na sarjeta	Tipo de boca-de-lobo	Fator de redução
Ponto baixo	De guia	0,80
	Com grelha	0,50
	Combinada	0,65
Ponto intermediário	De guia	0,80
	Com grelha longitudinal	0,60
	Com grelha transversal ou longitudinal com barras transversais combinada	0,60
		110% dos valores indicados para a grelha correspondente.

Tabela 8- Fatores de redução da capacidade de engolimento das bocas-de-lobo.

⁹ DAEE/CETESB (1980).

¹⁰ DAEE/CETESB (1980).

7. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- DAEE/CETESB (1980)- **Drenagem Urbana**. Segunda Edição, São Paulo (SP).
- HALL, M. J. (1984)- **Urban Hydrology**. Essex: Elsevier.
- KIBLER, D. F. (1982)- **Urban Stormwater Hydrology**. American Geophysical Union, Washington DC. (EEUU).
- LINSLEY, R. K. e J. B. FRANZINI (1972)- **Water-Resources Engineering**. McGraw-Hill Inc., Nova Iorque (EEUU).
- McCUEN, R. H. (1982)- **A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- PONCE, V. M. (1989)- **Engineering Hydrology: Principles and Practice**. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- PORTO, R., K. ZAHED F° e A. N. GIKAS (1993)- **ABC3- Análise de Cheias Complexas. Manual do Usuário**. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, São Paulo (SP).
- TUCCI, C. E. M (1993)- **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. EDUSP, São Paulo (SP).
- UEHARA, K. (1985)- *Necessidade de Estudos de Novos Critérios de Planejamento de Drenagem de Várzea de Regiões Metropolitanas*. In: **Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 6.**, São Paulo (SP). Anais. São Paulo: ABRH, v.3, pp. 111-119.