

IX-060 – INDICADORES DE DESEMPENHO PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

Andressa Juliana Boldrin⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas - PUCCAMP. Mestranda em Engenharia Civil na Área de Concentração de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais na UNICAMP.

José Anderson do Nascimento Batista⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo, docente do Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP.

Endereço⁽¹⁾: Rua França nº 80 – Vila Municipal - Jundiaí – São Paulo - CEP: 13301380 - País - Tel: +55 (11) 4591-8129 - Fax: +55 (11) 4491-8100 - e-mail: andressaboldrin@gmail.com

RESUMO

O crescimento populacional das cidades traz demandas por equipamentos públicos e comunitários. À medida que são construídos para atender as necessidades dos habitantes, o solo é impermeabilizado, aumentando o escoamento superficial e surgindo assim a necessidade da implantação dos sistemas de drenagem de águas pluviais. Considerando a dinâmica das cidades, é necessário que o sistema de drenagem de águas pluviais urbanas seja avaliado. Esta avaliação pode ser realizada direta ou indiretamente. Devido aos custos da medição direta, este trabalho busca aplicar indicadores de desempenho técnico para avaliar o sistema de drenagem de águas pluviais urbanas da Cidade Universitária “Zeferino Vaz”, campus da Universidade Estadual de Campinas. Foi aplicado o seguinte indicador: a matriz de sobrecarga da rede de drenagem de águas pluviais.

Ao analisar os resultados obtidos por meio da análise hidráulica e da matriz de sobrecargas da rede de drenagem de águas pluviais foi possível verificar que a rede em questão está operando afogada para transportar uma vazão de período de retorno de 5 anos.

PALAVRAS-CHAVE: Indicador de desempenho, drenagem de água pluvial, análise hidráulica.

INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras vêm crescendo rapidamente, dados recentes do censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontam que 84% da população brasileira residem na área urbana. Com o incremento da população, aumenta a demanda por infraestrutura urbana, tais como rede de abastecimento de água, rede coletora de esgoto, sistema viário, iluminação pública e rede de energia elétrica, entre outros.

A implantação da infraestrutura urbana necessária para atender a população, tais como, construção de residências, de equipamentos urbanos e equipamentos comunitários impermeabilizam o solo. Neste caso, a maior parcela da precipitação escoar superficialmente, necessitando assim da implantação do sistema de drenagem de águas pluviais. As águas pluviais urbanas são formadas pelo escoamento das águas de chuva no lote, em loteamentos, condomínios, estacionamentos, praças e parques. Os sistemas de drenagem de águas pluviais são constituídos pela microdrenagem (composta por guia, sarjeta, boca de lobo, condutos de pequeno porte e poços de visita) (Tucci, 2003) e pela macrodrenagem (constituída por canais artificiais ou naturais, galerias de grande porte, reservatórios urbanos e estruturas auxiliares de proteção contra erosão – dissipadores de energia) (Aisse, 1984).

Com a impermeabilização do solo, a velocidade do escoamento superficial é acelerada e agrava-se com o uso de condutos e canais (Tucci & Montenegro, 2005). As principais consequências hidrológicas da urbanização no tocante às vazões do sistema hídrico são: aumento da vazão máxima (em cerca de seis vezes), antecipação do pico e aumento do volume do escoamento superficial. Vale salientar ainda que a combinação do impacto de diferentes loteamentos intensifica a ocorrência de inundações a jusante, pois sobrecarrega a macrodrenagem. Assim, as áreas mais afetadas são as residências mais antigas, localizadas a jusante (Tucci, 1995).

Além disso, podem ocorrer as inundações localizadas devido à falta de planejamento na implantação da infraestrutura, tais como: redução da seção de escoamento do curso d'água pela presença de aterros e pilares de pontes, estradas, aterro para aproveitamento de área, assoreamento do leito do curso d'água, resíduos sólidos e sedimentos, remanso devido à redução da velocidade a montante obtida pelo represamento à jusante, bem como erros de execução e de projeto da drenagem das rodovias e avenidas. Estes percalços são comuns nas áreas urbanas visto que não há integração entre os órgãos que atuam na infraestrutura urbana, onde rodovias e pontes são projetadas sem considerar seu impacto sobre a drenagem das águas pluviais urbanas (Tucci, 1995).

Em relação aos impactos sociais, as inundações podem ocasionar danos tangíveis e intangíveis. Os danos tangíveis são compostos pelos prejuízos físicos (limpeza de prédios, perda de objetos, materiais e mobílias), prejuízos financeiros (interrupção das atividades econômicas e de serviços públicos) e custos emergenciais (evacuação e habitação provisória). Já os prejuízos intangíveis são os danos em que não há a possibilidade de atribuir um valor monetário, como perdas de vidas humanas, de obras e de patrimônios históricos (Brasil *et al*, 2006).

Tendo em vista o cenário atual, os sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas precisam ser avaliados. A avaliação do desempenho pode ser realizada por meio de pesquisa com os habitantes, observação direta durante as inundações, sensores eletrônicos e medidores de valor (Kolsky & Butler, 2002). Entretanto, como estes métodos exigem recursos humanos e financeiros que grande parte dos municípios brasileiros não dispõe, a utilização dos indicadores pode ser uma boa opção.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é discutir indicadores de desempenho para avaliar sistemas de drenagem de águas pluviais em funcionamento. Para isto, serão aplicados indicadores de desempenho técnico a um estudo de caso.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desempenho de um sistema é definido pela capacidade de atendimento aos objetivos para o qual o sistema foi criado (Kolsky & Butler, 2002). Na avaliação do desempenho do sistema de drenagem de águas pluviais é possível destacar os principais objetivos do sistema de drenagem de águas pluviais urbanas:

- Prevenção das inundações: bem comum que visa assegurar a segurança e a saúde da população, evitando os danos materiais decorrentes do evento chuvoso.
- Preservação / recuperação ambiental e usos sustentáveis: redução da poluição das águas superficiais (canais, lagoas, lagos e cursos d'água), promoção de atividades de recreação e contemplação com a população (usos não consuntivos), preservação de áreas brejosas.
- Gerenciamento hídrico (operacional): redução dos custos de operação e da quantidade de sedimentos nas tubulações.

A avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de drenagem de águas pluviais pode ser realizada utilizando os seguintes critérios:

- Capacidade hidráulica das seções.
- Frequência e duração das inundações.
- Volume transbordado.
- Duração das inundações.
- Área afetada pelas inundações.
- Custos dos danos causados à propriedade privada.

Baseado nos objetivos e critérios acima elencados e nas experiências de Artina *et al* (2005), Kolsky & Butler (2002), Bennis *et al* (2003), Moura (2004), Baptista *et al* (2005) e Mendonça (2009), os indicadores selecionados foram: matriz de sobrecarga da rede de drenagem de águas pluviais e tempo de retorno do projeto da rede de drenagem de águas pluviais.

• Matriz de Sobrecarga da Rede de Drenagem de Águas Pluviais

A metodologia utilizada neste trabalho foi proposta por Bennis *et al* (2003) que consiste em conhecer detalhadamente o sistema de drenagem de águas pluviais por meio da análise do seu desempenho hidráulico atual, através do diagnóstico hidráulico das seções do sistema.

A matriz da sobrecarga da rede de drenagem de águas pluviais consiste em avaliar:

- O grau de sobrecarga de cada conduto.
- O grau de sobrecarga que cada conduto causa dentro de si.
- O efeito da sobrecarga em cada conduto, oriundo de jusante.

A falha hidráulica de um conduto está diretamente relacionada com a altura da sobrecarga máxima (H_i^{US}) necessária para transportar a vazão de projeto. Quando $H_i^{US} = 0$, o conduto é hidráulicamente adequado e funciona sob regime livre. Contudo, quando a altura da sobrecarga alcança a superfície do solo, as inundações se iniciam. Entre os extremos, é possível estabelecer uma relação linear apresentada na equação 01 (Bennis *et al*, 2003).

$$N_i = (H_i^{US} / G_i) * 100\% \quad \text{equação (1)}$$

Em que:

N_i = grau de sobrecarga do conduto, expresso pela porcentagem da profundidade do poço de visita a montante, variando de $N_{\min} = 0\%$ a $N_{\max} = 100\%$.

H_i^{US} = altura máxima da sobrecarga no poço de visita localizado imediatamente a montante do conduto i para a vazão de projeto.

G_i = profundidade que o conduto está enterrado, medido a partir da superfície do solo até o topo a montante do conduto i.

Ao avaliar o desempenho hidráulico do conduto i, deve ser considerada a sobrecarga do poço de visita a jusante, conforme apresenta a equação 2 (Bennis *et al*, 2003).

$$N_i^i = [(H_i^{US} / H_i^{DS}) / G_i] * 100\% \quad \text{equação (2)}$$

Em que:

N_i^i = efeito líquido da sobrecarga que o conduto i causa dentro de si.

H_i^{DS} = altura da sobrecarga a jusante em relação ao topo do conduto i.

Para obter a avaliação do efeito do remanso a jusante do conduto i, é necessário subtrair a equação 2 a partir da equação 1, resultando na equação 3 (Bennis *et al*, 2003).

$$N_i^{DS} = N_i - N_i^i = (H_i^{DS} / G_i) * 100\% \quad \text{equação (3)}$$

Em que:

N_i^{DS} = efeito da sobrecarga no conduto i, oriundo de jusante.

Se houver apenas um conduto a jusante com saída livre, então $N_i^j = N_i^{DS}$ e representa a contribuição do conduto j (sendo j o conduto de jusante com $j > i$) na sobrecarga do conduto i. No entanto, se H_j^{US} é a altura da sobrecarga a jusante do conduto j, o efeito líquido da sobrecarga a jusante do conduto j no conduto i será descrita pela equação 4:

$$N_i^j = [(H_i^{DS} - H_j^{US}) / G_i] * 100\% \quad \text{equação (4)}$$

ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido para testar a metodologia descrita foi a Cidade Universitária “Zeferino Vaz”, campus da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) localizado no distrito de Barão Geraldo no município de Campinas a doze quilômetros do centro de Campinas, Estado de São Paulo, conforme ilustra a figura 1.

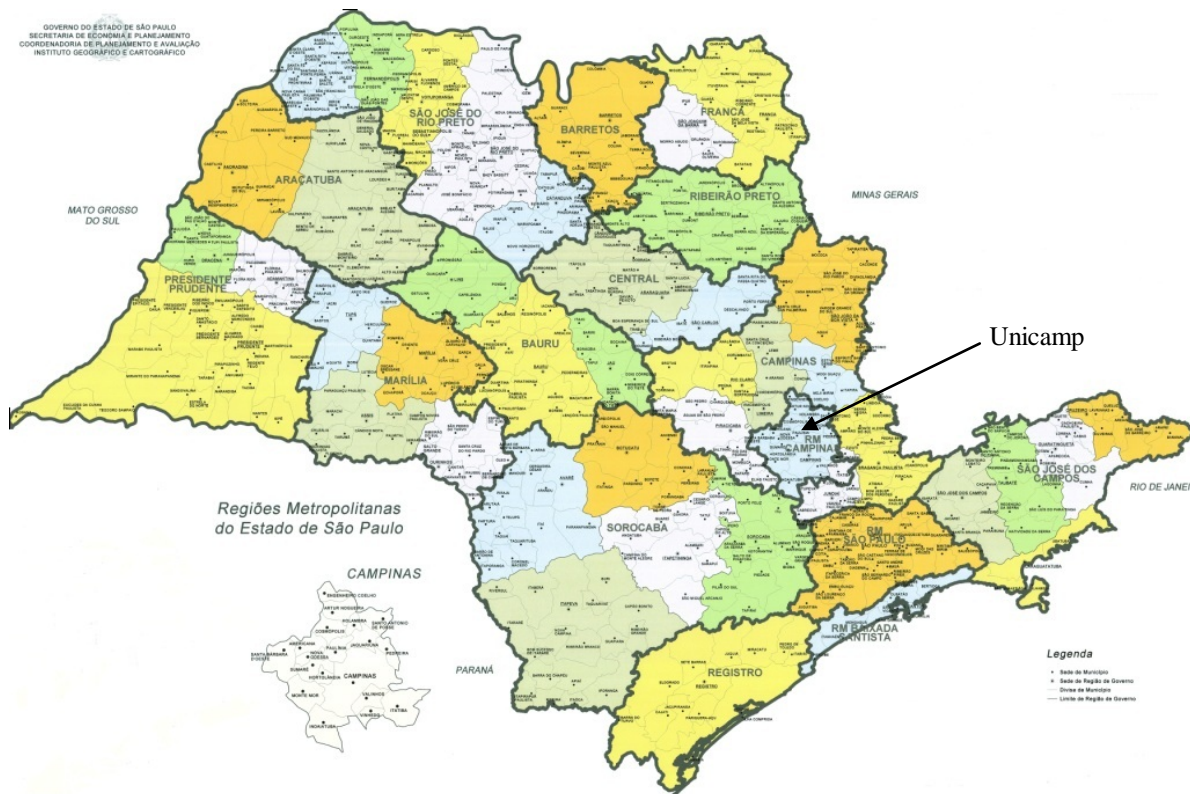


Figura 1: Localização da Área de Estudo

Com aproximadamente três milhões de metros quadrados e uma população equivalente de cerca de quarenta mil habitantes, a Unicamp possui uma infraestrutura de apoio para que as atividades de ensino, pesquisa e extensão da Universidade ocorram da melhor maneira possível.

Através de seus órgãos, a Pró Reitoria de Desenvolvimento Universitário (PRDU) é responsável pelo gerenciamento de toda a infraestrutura e pelo desenvolvimento institucional do Campus. Para este trabalho, a Coordenadoria de Projetos e Obras (CPO), órgão coordenado pela PRDU disponibilizou os arquivos contendo o levantamento planialtimétrico, cadastro das redes de drenagem de águas pluviais, mapa de uso e ocupação do solo e tabela contendo informações acerca do comprimento, diâmetro, material, cota da geratriz inferior de entrada e saída dos condutos recentemente mapeados.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRÁULICO DO SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

Os indicadores de desempenho foram avaliados por meio de cálculos hidrológicos e hidráulicos.

Os aspectos hidrológicos são de grande importância no planejamento, projeto e execução de obras de drenagem de águas pluviais. Entretanto, vale salientar que ainda são pouco conhecidos os fatores que influenciam a relação entre precipitação e escoamento nas áreas urbanas (CETESB, 1986). Dentre os métodos para estimar a magnitude do escoamento superficial direto em áreas urbanas o método racional, apresentado na equação 5, foi selecionado devido à ampla utilização nos projetos de microdrenagem urbana em pequenas bacias hidrográficas e o controle das variáveis a serem apreciadas (Pinto *et al*, 1976). Assim, a determinação do coeficiente de escoamento superficial e da intensidade da precipitação deve ser cuidadosamente realizada.

$$Q = (1000/6) * C * i * A$$

equação (5)

Em que,

Q – vazão de pico em l/s.

I – intensidade média da precipitação sobre toda a área drenada com duração igual ao tempo de concentração (mm/min).

C – coeficiente de escoamento superficial.

Assim, inicia-se com o cálculo da altura precipitada e da intensidade da precipitação. Para isto será utilizada a equação de chuva generalizada proposta por Uehara *et al* (1980) para o Estado de São Paulo expressa na equação 6.

$$P_t^T = (0,22 \ln T + 0,50) * (0,38 t^{0,31} - 0,39) P_{60,10}$$

equação (6)

Em que:

P_t^T – altura da precipitação para a duração t e para o período de retorno T (mm)

T – período de retorno (anos)

t – duração da precipitação (minutos)

Após a determinação da intensidade da chuva, é necessário calcular o coeficiente de escoamento superficial. Como o coeficiente de escoamento superficial varia em função da superfície do solo, as bacias de contribuição precisam ser analisadas e verificadas a proporção de cada uso do solo, possibilitando o cálculo do escoamento superficial ponderado.

Com a determinação da vazão, é preciso avaliar a capacidade hidráulica da rede de drenagem de águas pluviais urbanas por meio da aferição da vazão, velocidade, cota de energia e cota piezométrica de cada trecho da rede. Com estes dados é possível verificar se a rede existente está hidráulicamente adequada.

RESULTADOS PRELIMINARES

A Cidade Universitária “Zeferino Vaz possui três rede de drenagem de águas pluviais principais com as respectivas ramificações. Os trabalhos foram iniciados pela rede indicada na figura 02.

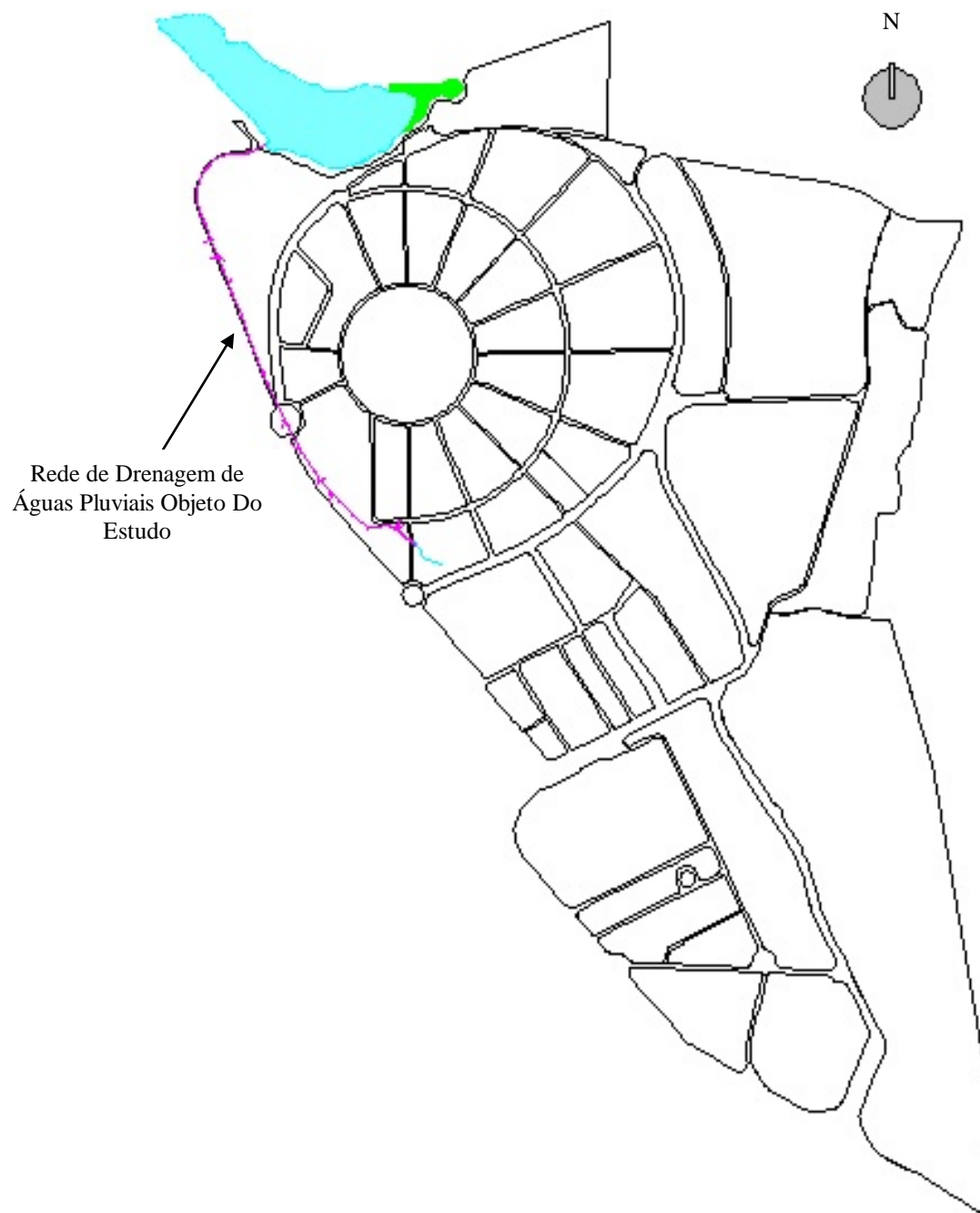


Figura 2: Rede de Drenagem de Águas Pluviais Objeto do Estudo

Tabela 1: Análise Hidráulica da Rede de Drenagem de Águas Pluviais

Conduto	PV Saída	Cota Piez. Saída (mca)	PV Entrada	Cota Piez. Entrada (mca)	Comp.(m)	Declividade (%)	Diâmetro (m)	Vazão (m³/s)	Regime
2.20	O-1	576,20	24	inundado	44,52	11,34%	1,2	17,67	forçado
2.19	24	inundado	23	inundado	101,78	6,90%	1,2	17,67	forçado
2.18	23	inundado	22	inundado	70,23	0,91%	1,2	17,67	forçado
2.17	22	inundado	21	inundado	42,12	1,83%	1,2	17,67	forçado
2.16	21	inundado	20	inundado	9,61	1,04%	1,2	17,62	forçado
2.15	20	inundado	19	inundado	45,72	1,09%	1,2	17,46	forçado
2.14	19	inundado	18	inundado	38,29	0,37%	1,2	17,25	forçado
2.13	18	inundado	16	inundado	65,81	1,32%	1,2	16,76	forçado
2.12	16	inundado	15	inundado	17,44	21,10%	0,4	0,08	forçado
2.11	16	590,81	12	inundado	75,14	1,98%	1,2	13,98	forçado
2.10	12	inundado	11	inundado	48,81	1,58%	1,2	13,98	forçado
2.9	11	inundado	10	inundado	84,97	0,87%	1,2	13,98	forçado
2.8	10	inundado	9	inundado	114,44	1,17%	1,2	13,98	forçado
2.7	9	inundado	7	inundado	155,53	0,93%	1,2	12,13	forçado
2.6	7	inundado	6	inundado	26,41	2,61%	1,2	11,27	forçado
2.5	6	inundado	5	inundado	80,77	1,08%	1,2	7,59	forçado
2.4	5	inundado	4	inundado	31,77	0,06%	1,2	7,59	forçado
2.3	4	inundado	3	inundado	23,87	1,72%	1,2	7,59	forçado
2.2	3	inundado	2	inundado	13,06	1,00%	1,2	7,59	forçado
2.1	2	inundado	1	inundado	27,34	0,80%	1,0	7,59	forçado

Através da distribuição probabilística de Gumbel foi obtida a precipitação de 1 dia para um período de retorno de 10 anos. Para o cálculo da intensidade da precipitação utilizou-se o método de cálculo proposto por Uehara para o Estado de São Paulo. Já o tempo de concentração foi calculado pelo método das velocidades. Assim com estes cálculos efetuados foi possível aferir a vazão através do método racional.

Após os cálculos hidrológicos foi realizado o cálculo da velocidade, velocidade plena, carga manométrica, altura piezométrica, perda de energia e o regime de escoamento. Na tabela 1 foram inseridas as informações acerca da análise hidráulica da rede de drenagem de águas pluviais em estudo. Com os cálculos hidráulicos foi possível elaborar a matriz de sobrecarga da rede de drenagem de águas pluviais estudada, a qual é apresentada na tabela 2. A matriz de sobrecarga desta rede foi construída a partir das equações 2 e 4. Inicialmente foi calculado, por meio da equação 2, o efeito da sobrecarga que cada conduto causa dentro de si mesmo. Estas informações foram inseridas nas células da tabela 2 identificadas pela cor laranja. Contudo, somente esta informação não é suficiente para avaliar o desempenho hidráulico do sistema, é necessário avaliar também o efeito que a sobrecarga no conduto a jusante causa no conduto a montante. Esta informação é calculada pela equação 4 e plotada na tabela 2, nas células identificadas pela cor verde. Por exemplo, a sobrecarga que o conduto 2.17 causa no conduto 2.7 é de 81%.

Ao analisar a tabela 1 foi possível verificar que a rede de drenagem de águas pluviais está operando afogada, visto que a carga manométrica supera a cota do terreno na maioria dos trechos da rede de drenagem em estudo. Esta situação pode ser ocasionada pelo fato do diâmetro dos condutos não serem suficientes para transportar a vazão a ser escoada.

Tabela 2: Matriz de Sobrecarga da Rede de Drenagem de Águas Pluviais em Estudo

Conduto	2.17	2.16	2.15	2.14	2.13	2.8	2.7	2.6	2.1
2.20	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2.19	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2.18	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2.17	100	100	100	100	100	100	81	100	100
2.16		100	100	100	100	100	100	46	100
2.15			100	100	100	100	100	100	100
2.14				100	100	100	100	100	100
2.13					100	100	100	100	100
2.12						100	100	100	100
2.11						100	100	100	100
2.10						100	100	100	100
2.9						100	100	100	100
2.8						100	100	100	100
2.7							100	100	100
2.6								100	100
2.5									100
2.4									100
2.3									100
2.2									100
2.1									100

Por meio das informações contidas na matriz de sobrecarga da rede de drenagem estudada (tabela 2) foi possível identificar a origem das sobrecargas. Sendo que estas sobrecargas podem ser causadas por cada conduto sobre si mesmo e sobre os tubos localizados a jusante, ilustrando que a rede como um todo está sobrecarregada e as inundações acontecem sempre que a precipitação calculada ocorre. Vale salientar que somente o conduto 2.20 não sobrecarrega o conduto 2.11, isto ocorre, pois não há sobrecarga a jusante destes condutos.

Assim, com os resultados apresentados nas tabelas 2 e 3 é possível identificar os locais em que ocorrem a sobrecarga e os poços de visita que são inundados durante a precipitação calculada, permitindo assim a avaliação do desempenho hidráulico da rede de drenagem de águas pluviais em estudo.

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados preliminares da tabela 1 que apresentou a análise hidráulica da rede de drenagem de águas pluviais em estudo e da tabela 2 que apresentou a matriz de sobrecarga da rede de drenagem de águas pluviais em estudo foi possível avaliar o desempenho da rede de drenagem de águas pluviais e identificar os locais que ocorrem as sobrecargas bem como a sua origem. Assim, foi possível concluir que as sobrecargas ao longo da rede ocasionaram o transbordamento da maioria dos poços de visita.

É possível concluir também que os diâmetros dos condutos da rede de drenagem de águas pluviais em questão estão subdimensionados, pois não são comportam transportar a vazão calculada.

Assim, a avaliação do desempenho do sistema de drenagem de águas pluviais em operação proposta permite identificar o cerne do problema e estabelecer as prioridades nas ações a serem executadas para minimizar ou eliminar os transbordamentos e as conseqüentes inundações que a rede de drenagem de águas pluviais em questão apresenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARTINA, S.; BECCIU, G.; MAGLIONICO, M.; PAOLETTI, A.; SANFILIPPO, U. "Performance indicators for the efficiency analysis of urban drainage systems", Water Science Technology, v. 51, n. 02, 2005, p. 109-118.
2. AISSE, M., "Drenagem Urbana" In: Drenagem e Controle de Erosão Urbana, Editora Universitária de Campagnat, 1984.
3. BAPTISTA, M.; BARRAUD, S.; ALFAKIH, E.; NASCIMENTO, N.; FERNANDES, W.; MOURA, P.; CASTRO, L.; "Performance-costs evaluation for urban storm drainage", Water Science Technology, vol.51, nº 02, 2005, p. 99-107.
4. BENNIS, S; BENGASSEM, J.; LAMARRE, P., "Hydraulic Performance Index of Sewer Network", Journal of Hydraulic Engineering, v. 129, n. 7, 2003.
5. BRASIL, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, TUCCI, E. M., "Gestão de Águas Pluviais Urbanas", Brasília, Ministério das Cidades, v. 4, 2006, 194 p.
6. CETESB, "Drenagem Urbana: Manual de Projeto", ASCETESB, 3ª edição, 1986.
7. MENDONÇA, E. C; "Metodologia para Avaliação de Desempenho de Sistemas de Drenagem Urbana", Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng. Civil, UNB, Brasília, 2009, 179 p.
8. MOURA, P. M.; "Contribuição para a Avaliação Global de Sistemas de Drenagem Urbana, Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng. Sanitária e Ambiental, Dep. de Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, 2004, 146 p.
9. PINTO, N.L.S., HOLTZ, A.C.T., MARTINS, J. A., GOMIDE, F. L. S., Hidrologia Básica, Editora Edgard Blucher Ltda, 1976.
10. TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.L.; BARROS, M.T.; "Drenagem Urbana", Editora Universidade/UFRGS, 1ª edição, 1995.
11. TUCCI, C. E. M.; "Águas Urbanas" In: Inundações Urbanas na América do Sul, ABRH, 1ª edição, 2003.
12. TUCCI, C. E. M., MONTENEGRO, M.H.; "Saneamento Ambiental e Águas Pluviais" In: Gestão do Território e Manejo Integrado das Águas Urbanas, Escola Internacional de Água para o Desenvolvimento – Hydroid, Programa de Modernização do Setor de Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, Brasília, 2005.
13. KOLSKY, P.; BUTLER, D. "Performance indicators for urban storm drainage in developing countries", Urban Water, nº 4, 2002, p. 137-144.