



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

IX-013 - MONITORIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO NO CONTROLO NA ORIGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

Rui Marreiros⁽¹⁾

Engenheiro dos Recursos Hídricos pela Universidade de Évora, Pós-Graduado em Administração Autárquica e Desenvolvimento Regional pela Universidade Moderna e Mestrando em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Bolseiro de Investigação Científica do Instituto Politécnico de Beja em prestação de serviços para a Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo

Maria Madalena Moreira

Engenheira Civil pela Universidade de Coimbra, Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos pelo Instituto Superior Técnico e Doutorada em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico. Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora.

Endereço⁽¹⁾: Av. Drº César Batista, nº 14 2º Dto, Bairro do Granito 7000 Évora, tlm 964752111,

e-mail: rui.marreiros.profissional@netvisao.pt

RESUMO

O acentuado e rápido crescimento dos centros urbanos, característico dos últimos anos, é responsável pelo surgimento de problemas ao nível da drenagem de águas pluviais. Por um lado, gera taxas de impermeabilização bastante acima dos níveis estimados aquando do dimensionamento das redes de drenagem de águas pluviais que se encontram, ainda hoje, em funcionamento em grande parte das nossas cidades. Por outro lado, o elevado crescimento demográfico associado ao facto de os sistemas de drenagem mais antigos serem na sua maioria unitários, acarreta graves consequências devido à necessidade de transportar volumes cada vez maiores de águas residuais domésticas.

O acréscimo nos volumes de escoamento superficial resultam muitas vezes em episódios de inundação com consequências mais ou menos graves para pessoas, bens e para as próprias estruturas de drenagem, que com o aumento de caudais a transportar e a sucessiva degradação vêem a sua capacidade de resposta progressivamente diminuída.

Na presente comunicação apresentam-se os resultados obtidos na avaliação do desempenho de Trincheiras de Infiltração que, inseridas no contexto das Técnicas de Controlo na Origem de Águas Pluviais, constituem uma das formas de diminuir os caudais que, gerados por episódios de precipitação em áreas bastante impermeabilizadas, afluem aos sistemas de drenagem ou escoam directamente aos cursos de água.

Para tal, foram monitorizadas duas Trincheiras de Infiltração, construídas à escala real, de forma a poder estudar as diferentes variáveis e parâmetros envolvidos no processo.

Complementarmente, foi desenvolvido um modelo de simulação numérica, COAP/InfilTrex, que permitirá, depois de devidamente calibrado com os resultados obtidos no trabalho experimental, simular o comportamento das trincheiras de infiltração, permitindo definir condições de dimensionamento.

PALAVRAS-CHAVE: hidráulica urbana; controlo origem águas pluviais; trincheiras de infiltração; modelação numérica

INTRODUÇÃO

Face à velocidade a que têm surgido os mais diversos desenvolvimentos em áreas que vão desde a Gestão dos Recursos Hídricos, numa perspectiva de qualidade e quantidade, o Ordenamento do Território e crescente pressão urbanística sobre o meio ambiente, os compromissos assumidos pelo nosso país relativos às novas directrizes comunitárias em matéria de ambiente, até à necessidade de desenvolver novos procedimentos e implementar novas tecnologias por forma a resolver os problemas existentes e minorar aqueles que se prevê que venham a surgir futuramente na área do ambiente e dos recursos hídricos, considera-se importante estudar processos que contribuam para a melhoria das condições de escoamento de águas pluviais em meio urbano, conciliando o crescente urbanístico com o necessário encaminhamento de águas pluviais e evitando simultaneamente que se coloquem em risco pessoas e bens.

Segundo a Scottish Environmental Protection Agency, as Técnicas de Controlo na Origem de Águas Pluviais compreendem aquelas cuja aplicação permite diminuir os caudais pluviais que se geram em zonas muito urbanizadas, que se implementam tão próximo quanto possível do ponto de formação destes caudais e que, desta forma, diminuem o fluxo de escoamento para as linhas de águas. Resulta daqui uma contribuição para a diminuição de riscos de inundação, quer nas próprias áreas urbanas, quer a jusante destas, quando os dispositivos de drenagem não tenham capacidade de resposta para escoar o caudal acumulado nas zonas impermeáveis (SEPA, 2001).

Perante esta perspectiva, as referidas técnicas são soluções a implementar preferencialmente a montante das redes de colectores e com o objectivo de promover a infiltração ou a retenção do escoamento superficial, gerado essencialmente pela precipitação, por forma a minimizar os volumes de escoamento para jusante. No caso de sistemas de drenagem de águas residuais unitários pode-se evitar a sua sobrecarga ou, em situações extremas, o seu próprio colapso.

Pretende-se com a presente comunicação apresentar o trabalho de investigação, a decorrer na Universidade de Évora, realizado no âmbito da utilização de Trincheiras de Infiltração no Controlo na Origem de Águas Pluviais. O trabalho tem como objectivos fundamentais: a monitorização do desempenho de uma trincheira de infiltração no que diz respeito à sua eficiência na diminuição de caudais afluentes a um determinado ponto, para o grupo de solos mais representativos da região Alentejo; o estudo da modelação matemática do fenómeno hidráulico que ocorre numa trincheira de infiltração; o desenvolvimento e calibração de um modelo de simulação numérica em linguagem Fortran (COAP/InfilTrex) e a exploração do modelo numérico de modo a contribuir para a definição de critérios de dimensionamento das trincheiras de infiltração. Pretende-se, ainda, estudar o comportamento da trincheira do ponto de vista da qualidade da água.

TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO – VANTAGENS E RESTRIÇÕES

Em Matos (2000), as Trincheiras de Infiltração são definidas como dispositivos pouco profundos, em geral até um metro, de desenvolvimento longitudinal e que se destinam a drenar as águas pluviais, recolhidas perpendicularmente ao seu desenvolvimento, através de infiltração ou de detenção e transporte até um ponto de destino final.

Os princípios de funcionamento, principalmente do ponto de vista hidráulico, variam consoante as condições de aplicabilidade, no entanto, existem três factores principais a ter em conta: (alimentação) condições de recolha do escoamento superficial; detenção ou armazenamento temporário no interior da trincheira; condições de evacuação do caudal em excesso.

Relativamente às vantagens no uso de Trincheira de Infiltração, Matos (2000) destaca: integração no tecido urbano – já que se considera tratar-se de uma técnica cuja aplicabilidade se insere essencialmente num contexto de drenagem urbana, é por isso essencial que o seu contributo, para além dos objectivos específicos das Trincheiras de Infiltração, se revistam de uma integração paisagística no espaço urbano contribuindo para a valorização adequada do espaço onde se pretende que venham a ser instaladas; facilidade de execução – a construção de trincheiras de infiltração não apresenta dificuldades adicionais de execução relativamente aos trabalhos clássicos de construção civil de espaços públicos e equipamentos colectivos o que é relevante na sensibilização dos cidadãos, de forma individual e das entidades públicas com responsabilidades no planeamento e gestão e dos espaços públicos urbanos, para a sua aplicação; custo acessível – a não exigência de equipamento específico na fase de construção e de manutenção da estrutura e o facto de os materiais utilizados na sua construção serem comuns a muitos outros tipos de construções, facilmente adquiridos no mercado, torna a utilização de Trincheiras de Infiltração pouco onerosa quando comparada com outras hipóteses disponíveis para cumprir os mesmos objectivos; no caso de elevada capacidade de absorção – pode conduzir à dispensa de colector a jusante; solução alternativa interessante – para situações em que não existe meio receptor próximo, as Trincheiras de Infiltração podem representar uma mais valia muito significativa.

Em EPA (1999b) são referidas ainda: a capacidade de remoção – nomeadamente de partículas poluentes, bactérias coliformes, compostos orgânicos, nutrientes e metais dissolvidos, presentes no escoamento e a recarga de aquíferos e

manutenção do escoamento de base – o volume de água ao infiltra-se nos solos adjacentes ao corpo da trincheira contribui para a recarga de aquíferos e consequentemente para a manutenção do escoamento de base em linhas de água próximas.

Adicionalmente SMRC (2000) reforça com o seguinte: função de amortecimento – as trincheiras podem proporcionar retenção do escoamento gerado por episódios de precipitação excepcionais contribuindo para a diminuição da ocorrência de cheias.

Relativamente às restrições no uso de Trincheiras de Infiltração existem essencialmente duas situações a realçar mas que podem facilmente ser ultrapassadas desde que sejam tidas em atenção as recomendações em termos de avaliação do local, construção e manutenção da estrutura.

A primeira prende-se com o facto de existir a possibilidade de contaminação dos níveis freáticos. Como qualquer outra técnica que recorra a processos de infiltração o risco de contaminação das águas subterrâneas deve ser cuidadosamente estudado EPA (1999b). A segunda com a possibilidade de colmatação da trincheira.

DIMENSIONAMENTO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

No dimensionamento devem ser consideradas algumas condições prévias: restrições em termos de localização; restrições na localização do nível freático; características de permeabilidade do solo; características geológicas e aptidão para a infiltração e garantia de não contaminação das águas subterrâneas (Matos, 2000).

Em Matos (2000), as Trincheiras de Infiltração são definidas como dispositivos pouco profundos, em geral até um metro,

EPA (1999b) apresenta algumas variações em termos de profundidades aconselhadas, resultantes da vasta experiência de aplicação desta técnica em diferentes estados Norte Americanos, indicando um intervalo entre 0,9 e 3,7 metros de profundidade para as trincheiras, dependendo dos outros parâmetros envolvidos no dimensionamento.

Apresentam-se alguns critérios orientadores, referidos em bibliografia internacional, relativamente ao dimensionamento de trincheiras de infiltração.

Em Metropolitan Council (2000) a determinação da volumetria da trincheira de infiltração e a sua configuração baseia-se no volume de água que entra na trincheira, na área drenante contributiva e na permeabilidade do solo onde está instalado o dispositivo. Adicionalmente, dado que a estrutura é preenchida com um determinado material de enchimento, é tida em conta a sua porosidade efectiva.

É apresentada uma metodologia de dimensionamento que assume que toda a infiltração ocorre apenas pelo fundo da trincheira e determina a área mais adequada para a trincheira com base nos seguintes parâmetros: volume de escoamento a ser infiltrado, taxa de infiltração do solo, fracção de vazios do material de enchimento e no tempo de retenção máximo.

O comprimento e a largura da trincheira são determinados consoante as características do local em questão (topografia, área disponível). As dimensões vão depender igualmente do modo como se vai processar a entrada da água no corpo da trincheira. Se este afluir ao longo de um troço longitudinal, o comprimento da trincheira perpendicular à entrada do fluxo deve ser maximizado. Se, pelo contrário, o fluxo de abastecimento for concentrado, transportado por um canal ou estrutura similar, então a dimensão da trincheira, paralela à direcção de entrada do escoamento, deve ser maximizada.

Também em SMRC (2000a) é descrita uma metodologia para dimensionar trincheiras de infiltração baseada no cálculo da profundidade máxima necessária e na área superficial da trincheira por recurso aos parâmetros: taxa de infiltração, tempo máximo de armazenamento disponível e porosidade do material de enchimento.

Paralelamente MDNR (1984) apresenta uma metodologia baseada na determinação da área superficial da trincheira e do seu comprimento máximo, assumindo que desde que as condições do local o permitam a estrutura pode ter uma largura máxima de 7,5 metros. Neste caso são tidos em conta no dimensionamento: caudal de entrada, porosidade do material de enchimento, profundidade da trincheira, taxa de infiltração e tempo de enchimento.

Em FHA (1996) e CCV (2000) é apresentada uma metodologia de dimensionamento de trincheiras de infiltração semelhante às já referidas baseada na determinação das profundidades máxima e mínima da trincheira e da área superficial necessária recorrendo aos parâmetros: taxa de infiltração, tempo de drenagem máximo, tempo de drenagem

mínimo, porosidade do material de enchimento e volume de armazenamento necessário

Conclui-se que os parâmetros a ter em conta no dimensionamento de Trincheiras de Infiltração devem ser:

- relativamente ao corpo da trincheira: o comprimento, a largura, a profundidade, a inclinação e a distância ao nível freático;
- relativamente ao material de enchimento: a porosidade e a condutividade hidráulica saturada;
- relativamente ao tipo de solo adjacente: a condutividade hidráulica saturada, o teor em água inicial e a porosidade.

TRABALHO EXPERIMENTAL

Introdução

Neste capítulo procede-se à descrição do campo experimental construído no âmbito do estudo das Trincheiras de Infiltração, sua monitorização e avaliação do seu desempenho como técnica de Controlo na Origem de Águas Pluviais destinada a reduzir, à cabeça, os volumes de escoamento superficial gerados principalmente em zonas urbanas altamente impermeabilizadas.

O campo de ensaios para estudo do controlo na origem de águas pluviais (CECOAP) onde foi realizado o trabalho experimental localiza-se na Universidade de Évora, Núcleo da Mitra, e foram utilizados os recursos do Departamento de Engenharia Rural, nomeadamente, do Laboratório de Hidráulica da mesma Universidade para a realização de todos os ensaios laboratoriais necessários para o desenvolvimentos dos trabalhos.

Foram construídas duas Trincheiras de Infiltração com o objectivo de dispor de um modelo à escala real que permitisse simular o seu funcionamento e avaliar a sua resposta às alterações das condições de funcionamento como sejam: diferentes condições de alimentação, diferentes caudais de abastecimento, diferente material de enchimento e diferente cobertura das trincheiras. Foram previstos os dispositivos necessários à recolha de dados para o estudo do seu funcionamento.

Superfície freática

A observação do nível piezométrico e a sua localização a uma distância adequada da base da trincheira é essencial para o correcto funcionamento das Trincheiras de Infiltração. Desta forma foram monitorizados os níveis piezométricos em toda a área adjacente à zona onde foi realizado o trabalho experimental, recorrendo para tal a uma bateria de 15 piezómetros que permitiram determinar a localização da superfície freática durante os ensaios. Estas leituras iniciaram-se antes do início do trabalho experimental, acompanharam toda a sua realização e prolongaram-se até depois do final dos mesmos com o fim de assegurar que os níveis piezométricos não atingiram cotas capazes de impedir o correcto funcionamento das Trincheiras de Infiltração. Dado que, a bibliografia sobre trabalhos desta natureza apontava para níveis de segurança entre 1,0 e 1,2 metros, optou-se por estabelecer o nível de correcto funcionamento, designado por nível de segurança, aos 1,5 metros.

Descrição da instalação

Na Figura 1 é apresentado o perfil de uma das trincheiras de infiltração com as dimensões e a localização das diferentes camadas, bem como os diferentes matérias de enchimento (leca e burgau) utilizados no corpo das trincheiras.



Figura 1 – Trincheira de Infiltração – A (Material de enchimento: Burgau)

As dimensões escolhidas para as trincheiras de infiltração tiveram como objectivo cumprir os seguintes pressupostos: a largura de 0,6 metros foi considerada de modo a poder operacionalizar a sua construção em termos da utilização de máquinas facilmente disponíveis, já que é a medida da largura do balde da retroscavadora; a profundidade de 1,0 metros resultou do facto de ser a dimensão média/padrão recomendada na bibliografia internacional e da necessidade de estabelecer uma distância de segurança aos níveis freáticos de Inverno; o perfil longitudinal de 3 metros considerou-se ser uma medida adequada para estudar os diferentes fenómenos envolvidos no processo de infiltração e retenção que ocorrem no corpo da trincheira minimizando perturbações do exterior; todas as dimensões utilizadas na construção foram definidas para adicionalmente serem considerados no processo de simulação numérica diminuindo eventuais problemas associados ao efeito de escala, utilizando para tal um modelo à escala real. O declive do fundo das trincheiras é igual a 5%.

Quer para a avaliação do desempenho das duas Trincheiras de Infiltração quer para a posterior utilização no modelo de simulação numérica, COAP - InfilTrex, foram medidos os seguintes parâmetros de campo: condutividade hidráulica saturada, teor em água e porosidade dos solos adjacentes às trincheiras e a porosidade do material de enchimento.

A condutividade hidráulica saturada foi medida com recurso ao Permeâmetro de Guelf (modelo 2800K1), sendo que os resultados obtidos permitiram considerar um valor médio para o solo adjacente às trincheiras de infiltração de $K_s = 18,1 \text{E} - 5 \text{ cm/s}$

Antes de qualquer ensaio realizado foi feita a determinação do teor em água do solo a uma profundidade de 1m. Foi utilizado o método de medição clássico directo do teor em água de uma amostra de solo por simples pesagem.

No processo de experimentação foram utilizados dois materiais de enchimento diferentes, burgau e leca, para as trincheiras de infiltração A e B, Figura 2.

A escolha deste tipo de materiais prendeu-se com as seguintes razões: produtos comerciais facilmente disponíveis no mercado; facilidade no manuseamento de grandes quantidades e na colocação em obra; ambos possuem elevada porosidade efectiva contribuindo para a função de armazenamento. Pretende-se que facilitem o processo de infiltração no solo.

A fim de aferir a percentagem de vazios dos dois materiais de enchimento utilizados foram realizados ensaios volumétricos em laboratório a partir dos quais foi possível concluir que o burgau e a leca utilizados possuem uma porosidade efectiva de 43.5% e 44.3% respectivamente.



Figura 2 a) Trincheira (A) com enchimento de burgau; b) Trincheira (B) com enchimento de Leca

Adicionalmente aos materiais utilizados no corpo principal da trincheira de infiltração foram ainda colocadas duas camadas em ambas as trincheiras: um filtro de areia na base, para retenção de partículas de pequenas dimensões; uma camada superficial de brita com o objectivo de uniformizar a distribuição do escoamento e de reter sólidos de maiores dimensões.

A colocação de geotextil envolveu duas fases, Figura 3: inicialmente antes do processo de enchimento com o objectivo de revestir totalmente a estrutura; entre o corpo principal da trincheira (material de enchimento) e a camada superficial de brita de modo a reforçar o factor de segurança relativamente ao arrastamento de pequenas partículas sólidas em suspensão para o interior da estrutura.



Figura 3 - Colocação do geotextil

Para a monitorização dos níveis da água dentro das trincheiras e determinação dos tempos de enchimento e esvaziamento das trincheiras foram instalados dois piezómetros de observação em cada dispositivo. Os piezómetros estão afastados de 1 m entre si e relativamente às extremidades das trincheiras.

A entrada do caudal nas Trincheiras de Infiltração faz-se, ao longo do comprimento da trincheira, mediante descarregadores laterais. Os descarregadores laterais de abastecimento às trincheiras de infiltração (Figura 4) são estruturas especialmente construídas para o efeito. Foram construídos em material metálico galvanizado para evitar a corrosão e possuem um perfil longitudinal de 3 metros, acompanhando toda a extensão das trincheiras.

A estrutura foi nivelada de modo a que a lâmina de água descesse a rampa de alimentação de forma uniforme com uma altura constante.



Figura 4 – Descarregador lateral de abastecimento do caudal em funcionamento

O abastecimento dos descarregadores laterais é composto por três níveis: reservatório base, reservatórios intermédios e reservatórios de abastecimento, Figura 5. Desta forma foi possível garantir, no processo de alimentação das trincheiras, uma carga hidráulica constante de modo a garantir o caudal constante durante a realização dos ensaios.

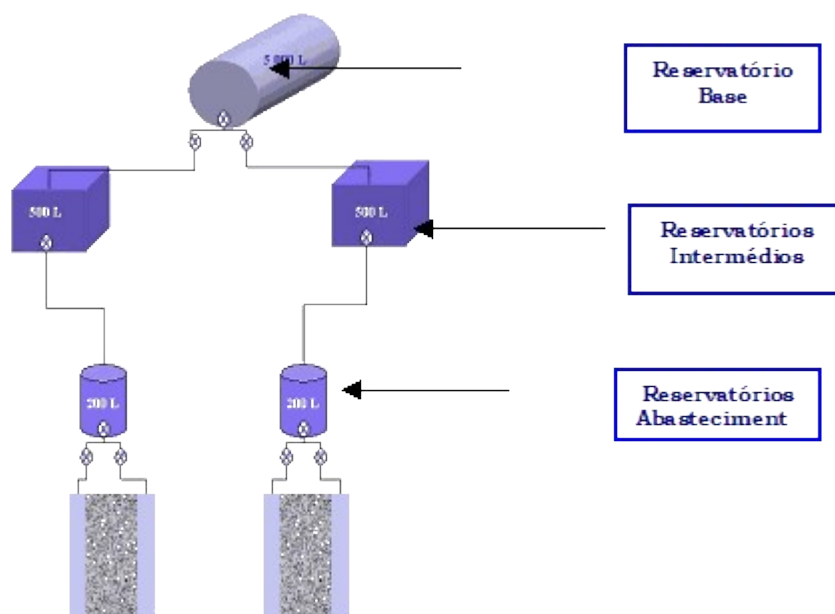


Figura 5 – Esquema do dispositivo de alimentação dos descarregadores laterais

Não tendo sido possível, por limitações construtivas, fazer a descarga das trincheiras pela base, ou seja à cota do fundo da trincheira, foi construído um descarregador frontal na extremidade das trincheiras de modo a que aconteça a descarga quando a altura de água na secção de jusante atingir 0,98 m.

Para a realização dos ensaios experimentais e com o objectivo de simular o escoamento superficial afluyente às Trincheiras de Infiltração foram ensaiados três valores para o caudais, caudal máximo (1,0 l/s), caudal intermédio (0,7 l/s), caudal mínimo (0,5 l/s). O abastecimento do caudal pode ser feito pelos dois descarregadores laterais ou através da utilização de apenas um descarregador.

Apresentação e análise dos resultados

Apresenta-se de seguida os valores medidos de altura de água nos dois piezómetros para o caso particular do ensaio em que o caudal de abastecimento é de $Q=1,0$ l/s e o teor em água médio inicial do solo de 8,8%. Está representada quer a fase de enchimento, quer a fase de esvaziamento da trincheira. Entre as duas fases referidas está representado um intervalo de tempo em que existe descarga.

Tendo em conta que a condutividade hidráulica do burgau apresenta valores muito elevados, a trincheira apresenta um

comportamento hidráulico muito equivalente ao comportamento de um reservatório. Em fase de enchimento, a diferença entre as leituras feitas nos dois piezómetros para o intervalo de tempo entre o início de ensaio e os 10mn é de 4 cm e a partir desse instante é de 5 cm (Figura 6), correspondente à diferença das cotas topográficas do fundo da trincheira nas secções em medição. A superfície livre dentro da trincheira apresenta-se praticamente horizontal a partir do instante 10mn. Com base nos níveis medidos nos dois piezómetros e do volume de água abastecido, foi determinado o volume infiltrado, representado na Figura 7.

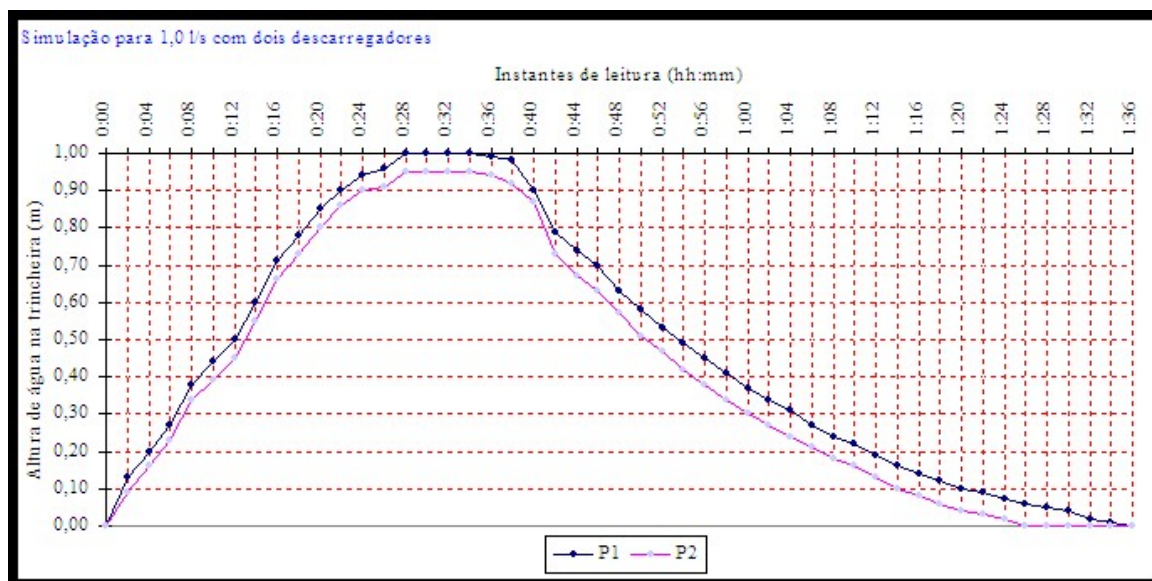


Figura 6 – Variação da altura de água nos piezómetros da Trincheira A. Ensaio A1

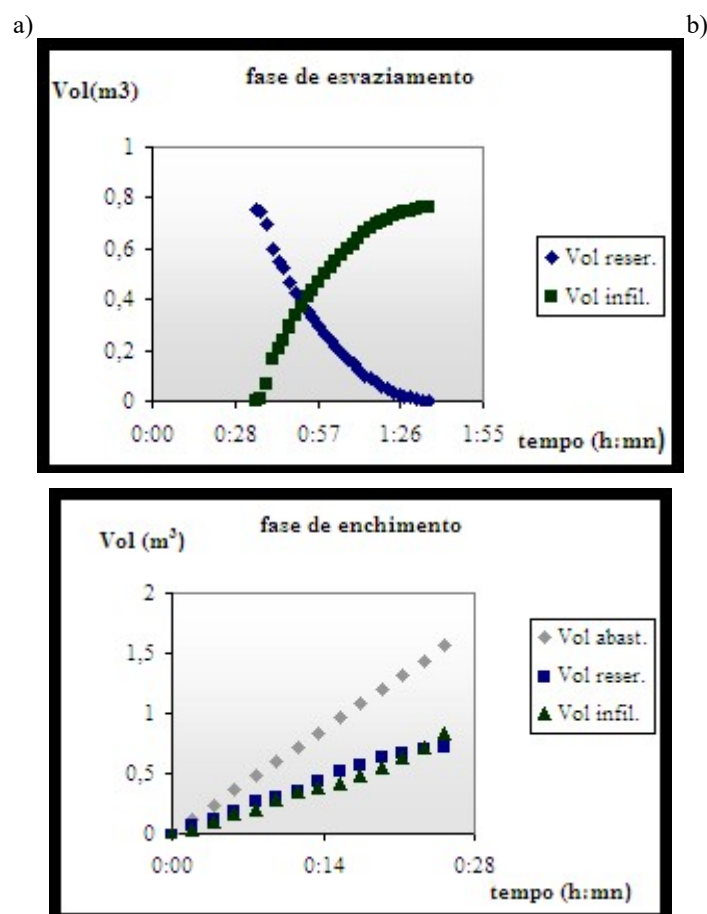


Figura 7 – Volumes acumulados a) em fase de enchimento b) em fase de esvaziamento

MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA - COAP/InfiltTrex

Apresentação do modelo numérico

O modelo numérico desenvolvido pretende simular o comportamento hidráulico da trincheira de infiltração e do solo envolvente. Embora se trate de escoamento em meio poroso, a textura do material de enchimento e a textura do solo são de uma ordem de grandeza muito diferente, apresentando comportamentos também muito diferentes.

Modelação do escoamento no material de enchimento da trincheira, meio poroso saturado

Tratando-se de um meio com elevada porosidade e apresentando a trincheira comprimento muito superior às dimensões da secção transversal, é considerado um modelo unidimensional.

As equações de base aplicadas ao estudo do movimento da água no meio poroso, material de enchimento da trincheira, são:

Equação da continuidade na sua forma global, aplicada a um dado tubo de fluxo:

$$\frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial nA}{\partial t} = -Q_{\text{inf}} + Q_{\text{abast}} \quad \text{equação (1)}$$

em que:

y – direcção longitudinal da trincheira (m)

t – tempo (s)

Q - caudal numa secção transversal da trincheira (m^3s^{-1})

n - porosidade efectiva da trincheira (-)

A - secção transversal da trincheira (m^2)

Q_{inf} - caudal infiltrado por metro linear de comprimento da trincheira ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$)

Q_{abast} - caudal de abastecimento por metro linear de comprimento da trincheira ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$)

Equação do equilíbrio dinâmico, Equação de Darcy:

$$\bar{q} = -K_s \text{grad}H \quad \text{equação (2)}$$

em que:

$\bar{q}$ – a velocidade aparente de filtração na secção transversal da trincheira ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$)

K_s – condutividade hidráulica saturada do material de enchimento (ms^{-1})

H - carga numa secção transversal da trincheira (m c.a.)

Considerando que:

$$H = h + Z \quad \text{equação (3)}$$

a substituição da equação do equilíbrio dinâmico (2) na equação da continuidade (1) permite obter a equação do escoamento (4), para o caso particular de porosidade e condutividade hidráulica saturada constantes no tempo.

Equação do escoamento:

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{K}{2n} \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} - \frac{K_i}{n} \frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{Q_{inf}}{nb} + \frac{Q_{abast}}{nb} \quad \text{equação (4)}$$

A resolução numérica da equação do escoamento unidimensional (4), através da aplicação do método das diferenças finitas com um esquema explícito, permite calcular a altura de água nas secções de cálculo a considerar ao longo da trincheira, para diferentes instantes de cálculo.

Para integração da equação (4) é necessário definir:

- as condições iniciais, em que são introduzidas as alturas de água em cada secção de cálculo no instante inicial; e
- as condições de fronteira, em que se assume que a carga nas secções fronteira é igual à carga na secção de cálculo adjacente.

Modelação do escoamento no solo, meio poroso não saturado

Em cada secção de cálculo da trincheira de infiltração é determinado o caudal infiltrado através da modelação numérica bidimensional do movimento de água no solo envolvente. O domínio do solo a aplicar está representado na Figura 8. Considera-se que o volume de água infiltrado na secção transversal é constante ao longo do comprimento do troço de cálculo na trincheira.

As equações de base aplicadas ao estudo do movimento da água no solo não saturado, são:

Equação da continuidade, na sua forma local:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{q}) = 0 \quad \text{equação (5)}$$

em que:

θ – teor em água (-)

ρ - massa volúmica da água (kgm⁻³)

Equação do equilíbrio dinâmico, Equação de Darcy generalizada:

$$\bar{q} = -K \text{grad}H \quad \text{equação (6)}$$

em que:

K – condutividade hidráulica do material de enchimento (ms⁻¹)

Assumindo que o eixo dos z tem o sentido positivo para baixo, vem:

$$H = h - Z \quad \text{equação (7)}$$

A substituição da equação do equilíbrio dinâmico na equação da continuidade permite obter a seguinte equação do escoamento para o caso particular de porosidade e condutividade saturada constantes no tempo.

Equação do escoamento, Equação de Richards:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(K \text{grad}(h - Z)) \quad \text{equação (8)}$$

em que:

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad \text{equação (9)}$$

A resolução numérica da equação (9), através da aplicação do Método das Diferenças Finitas com um esquema implícito (Tabuada, 1989), permite calcular o valor da pressão efectiva e o teor em água nos diferentes pontos da malha de cálculo.

Por ser simétrico o domínio de aplicação, representado na Figura 8, apenas será calculado o volume infiltrado em metade desse domínio (Tabuada, 1989). Os limites do domínio são determinados de modo a incluir o solo envolvente em que poderá ocorrer a variação do teor em água, durante um acontecimento.

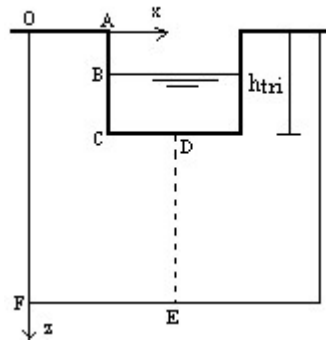


Figura 8 – Domínio de aplicação da equação de Richards na forma bidimensional

Para integração da equação (8) é necessário definir:

- as condições iniciais, em que são introduzidas as cargas nos pontos da grelha de cálculo definida no domínio em estudo (OABCDEF da Figura 8), a carga relaciona-se com o teor em água de acordo com a equação (10)
- as condições de fronteira, em que é assumido que a carga é constante nas fronteiras OF e DE; o fluxo de água é nulo nas fronteiras AO, AB e FE; a carga é constante e igual à altura de água na trincheira nas fronteiras BC e CD, Figura 8.

Modelação da chuvada e caudal de cheia

No modelo numérico é aplicado o Método Racional para determinação do caudal afluente à trincheira. É assumido que o abastecimento é feito segundo a direcção perpendicular à direcção longitudinal da trincheira.

Caracterização do solo

Para calcular o volume de água infiltrado é necessária uma boa caracterização do solo. A caracterização física através de uma análise textural do perfil do solo e a caracterização hidrodinâmica do solo não saturado que será feita através da determinação das relações entre a pressão efectiva, h e o teor em água, θ e entre a condutividade hidráulica, K e o teor em água, θ .

No modelo numérico foi aplicado o modelo empírico de Brooks e Corey com as expressões, (Santos, 2003) e (Tabuada, 1989):

$$\begin{cases} \theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h_e}{h} \right)^\lambda + \theta_r & \text{para } h < h_e \\ \theta = \theta_s & \text{para } h \geq h_e \end{cases} \quad \text{equação (10)}$$

$$K = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3 + \frac{2}{\lambda}} \quad \text{equação (11)}$$

em que:

θ_r - teor em água residual

θ_s - teor em água à saturação natural

λ - parâmetro de ajustamento característico da porosidade do solo

h – pressão efectiva (cm c.a.)

h_e – pressão de entrada de ar (cm c.a.)

O volume de água infiltrado em cada intervalo de tempo de cálculo é determinado com base na variação do teor em água nos diferentes pontos de cálculo do solo, (Tabuada,1989).

Aplicação do modelo numérico

Foi aplicado o modelo numérico para as condições do ensaio de campo apresentado. Os valores dos parâmetros necessários para a simulação através do modelo são:

- comprimento da trincheira – 3m;
- largura da trincheira – 0,6 m;
- porosidade do material de enchimento – 43,5%;
- condutividade hidráulica saturada do material de enchimento – 0,02 ms⁻¹;
- declive da trincheira – 5%;
- intensidade de precipitação – 36mmh⁻¹;
- duração da chuvada – 28mn;
- área a drenar – 100 m²
- coeficiente de escoamento da fórmula racional – 1;
- número de troços de cálculo na trincheira – 18;
- passo de cálculo no tempo – 3s;
- número de linhas da grelha de cálculo no solo – 10;
- número total de colunas da grelha de cálculo no solo – 10;
- passo de cálculo no espaço segundo a direcção horizontal, no solo – 6 cm;
- passo de cálculo no espaço segundo a direcção vertical, no solo – 10 cm;
- teor em água saturado no solo – 0,3138;
- parâmetro λ das equações (10) e (11) – 0,393;
- condutividade hidráulica saturada do solo – 2,588 cmh⁻¹;
- pressão de entrada de ar – 53 cm c.a.;
- teor em água para o instante inicial do ensaio – 8,8%

A chuvada foi caracterizada de modo a calcular um caudal de cheia igual ao caudal de abastecimento em ensaio. Os parâmetros relativos ao solo que não estavam disponíveis foram estimados.

A aplicação do modelo numérico ao ensaio apresentado permitiu concluir que a condutividade hidráulica saturada do solo é muito superior ao valor medido, o que está de acordo com o verificado em campo. O perfil do solo apresentava o horizonte C muito fracturado.

Tendo em conta o elevado número de secções de cálculo na trincheira e de pontos de cálculo no solo foi limitado o tempo máximo de cálculo.

Na Figura 9 apresenta-se a variação dos caudais infiltrado, na Figura 10 a variação da altura de água nas secções onde estão instalados os tubos piezométricos e na figura 11 são apresentados os valores do teor em água para os diferentes pontos de cálculo da grelha no solo relativa à secção de um piezómetro para o instante inicial de cálculo e para o instante $t=115s$.

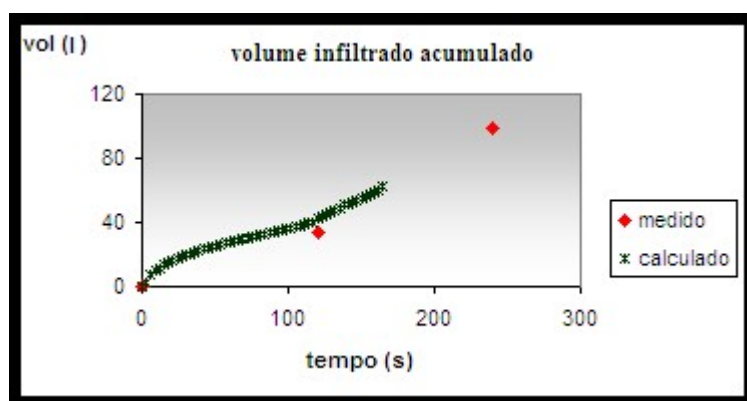


Figura 9 – Volume infiltrado acumulado em fase de enchimento

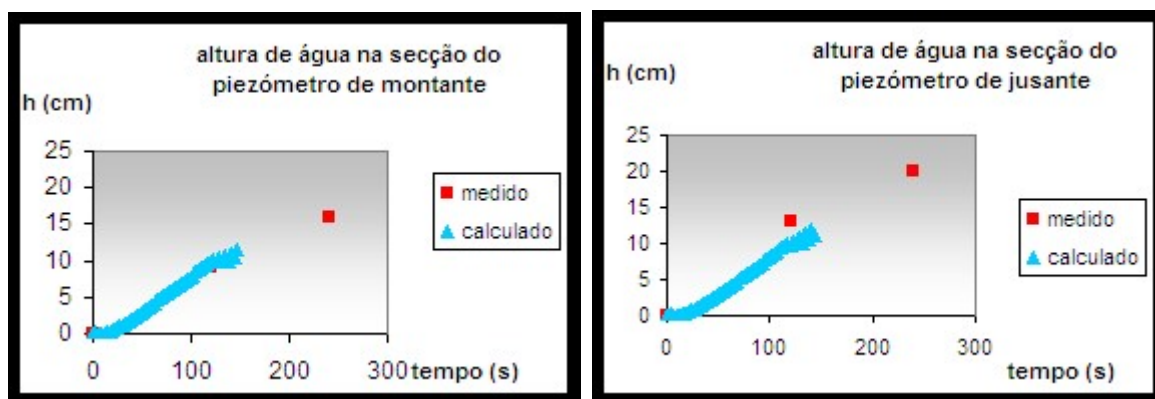


Figura 10 – Altura de água nas secções dos piezómetros em fase de enchimento

Superfície do solo

0,0856	0,0856	0,0856	0,0856	0,0856					
0,0858	0,0858	0,0858	0,0858	0,0858					
0,0860	0,0860	0,0860	0,0860	0,0860					
0,0862	0,0862	0,0862	0,0862	0,0862					
0,0865	0,0865	0,0865	0,0865	0,0865					
0,0867	0,0867	0,0867	0,0867	0,0867	0,0867	Fundo da	trincheira		
0,0869	0,0869	0,0869	0,0869	0,0869	0,0869	0,0869	0,0869	0,0869	0,0869
0,0872	0,0872	0,0872	0,0872	0,0872	0,0872	0,0872	0,0872	0,0872	0,0872
0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874
0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877

Superfície do solo

0,0856	0,0856	0,0856	0,0856	0,0856					
0,0858	0,0858	0,0858	0,0858	0,0858					
0,0860	0,0860	0,0860	0,0860	0,0860					
0,0862	0,0862	0,0862	0,0874	0,0874					
0,0865	0,0865	0,0898	0,2029	0,3183					
0,0874	0,0874	0,1497	0,2595	0,3183	0,3183	Fundo da	trincheira		
0,0869	0,0869	0,0875	0,1357	0,2228	0,2329	0,2335	0,2335	0,2335	0,2335
0,0872	0,0872	0,0872	0,0873	0,1001	0,1033	0,1034	0,1034	0,1034	0,1034
0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874	0,0874
0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877	0,0877

Figura 11 – Teor em água do perfil do solo em dois instantes de cálculo na secção de um piezómetro em fase de enchimento

Na Figura 11 destacou-se, através de zonas sombreadas, a tendência da variação do teor em água no solo.

Da análise das três figuras anteriores constata-se que os resultados calculados verificam a tendência dos valores medidos. A representação do teor em água no solo permite detectar a frente de humedecimento do solo, indicação importante para o estudo da distância necessária entre o fundo da trincheira e o nível freático.

Exploração do modelo

Após afinação da calibração do modelo numérico que se pretende fazer com base na determinação experimental de todos os parâmetros envolvidos, a exploração do modelo permitirá contribuir para a definição de critérios de dimensionamento.

No caso de um problema prático de implementação de trincheiras de infiltração, determinadas em campo as características dinâmicas do solo envolvente e determinados os parâmetros relativos ao caudal de dimensionamento é possível simular o comportamento da trincheira de infiltração para diferentes alternativas em projecto.

CONCLUSÕES

A possibilidade de utilizar um modelo numérico avançado para modelar o comportamento hidráulico da trincheira de infiltração e do solo envolvente, com base nos parâmetros característicos do solo, contribui para o seu dimensionamento económico. É possível calcular as dimensões da trincheira de modo a otimizar o rendimento da trincheira, ou seja a relação entre o caudal infiltrado e o caudal afluente à trincheira, minimizando o investimento no sistema de drenagem das águas pluviais.

Para apoio ao projecto, através da exploração do modelo numérico, seria interessante a determinação de relações entre

as características do material de enchimento a escolher, as características do solo, regime pluviométrico e níveis freáticos da região.

O modelo numérico apresenta, no entanto, um tempo de cálculo muito elevado impossibilitando um estudo sistemático de sensibilidade dos parâmetros. Será, por isso necessário estudar a possibilidade de minimizar o número de operações executadas e aumentar a convergência do Método de Gauss-Seidel aplicado na resolução do sistema de equações.

A Leca apresenta uma porosidade efectiva muito próxima do valor medido para o burgau, sendo por isso uma boa alternativa a estudar. Não perdendo capacidade de armazenamento pode ter vantagens do ponto de vista da qualidade da água infiltrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CKPW (2000) – "City of Kent Infiltration Criteria", Development Assistance Brochure, City of Kent Public Works, Kent, Washington, USA.
2. EPA (1999b) – "Stormwater, Technology Fact Sheet, Infiltration Trenches". United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, USA.
3. FHA (1996) – "Evaluation and Management of Highway Runoff Water Quality", North Central Texas Council of Governments, Federal Highway Administration, Texas, USA.
4. HI (2001) – "Case Studies – Rickmansworth", Hydro International, Clevedon, UK.
5. MARREIROS, RUI (em desenvolvimento) – "Monitorização e Avaliação do Desempenho de Trincheiras de Infiltração". Tese de Mestrado em preparação, FCTUC, Coimbra.
6. MATOS, M. R. S. (2000) – "Gestão Integrada de Águas Pluviais em Meio Urbano - Visão Estratégica e Soluções para o Futuro". Programa de Investigação apresentado a concurso para provimento na categoria de Investigador-Coordenador, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
7. METROPOLITAN COUNCIL (2000) – "Infiltration Trenches", Minnesota Urban Small Sites Best Management Practices Manual, Minnesota, USA.
8. MDND (1984) – "Maryland Standards and Specifications for Stormwater Management Infiltration Practices", Maryland Department of Natural Resources, Maryland, USA.
9. SANTOS, F.L. (2003) – "Transferência de água e solutos no solo". Publicações Universidade de Évora, Évora.
10. SEPA (2001) – "Sustainable Urban Drainage Systems". Scottish Environmental Protection Agency, UK.
11. SEWRPC (1991) – Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission, USA.
12. SMRC (2000) – "Design Information for Infiltration Systems Manual", Stormwater Manager's Resource Center, Center for Watershed Protection, Ellicott City, Maryland, USA.
13. TABUADA, M.A. (1989) – "Modelação bidimensional e tridimensional da rega por sulcos". Dissertação de doutoramento UTL, Lisboa.
14. TELES, EDUARDO (em desenvolvimento) – "Caracterização do solo e avaliação do nível freático do CECOAP". Trabalho de fim de curso em preparação, UE, Évora.