

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**O EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO
DA ÁGUA SOBRE A INFILTRAÇÃO NUM SOLO
MEDITERRÂNEO REGADO POR RAMPA ROTATIVA**

LUIS LEOPOLDO DE SOUSA E SILVA

ÉVORA

2001

| | |
|---------------|------------|
| UE | 1562 |
| SERVIÇO | |
| ACADÊMICO | 22 06 / 01 |
| CLASSIFICAÇÃO | SECRET |

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**O EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO
DA ÁGUA SOBRE A INFILTRAÇÃO NUM SOLO
MEDITERRÂNEO REGADO POR RAMPA ROTATIVA**

Dissertação apresentada à Universidade de Évora para
satisfação parcial dos requisitos para a obtenção do grau
de Doutor em Engenharia Agrícola.

LUIS LEOPOLDO DE SOUSA E SILVA



122 621

ÉVORA

2001

AGRADECIMENTOS

A realização desta tese contou com a colaboração de algumas pessoas às quais eu gostaria de deixar o meu agradecimento.

Ao Professor Ricardo Serralheiro, que aceitou orientar a minha preparação para Doutoramento e sempre manifestou a sua confiança na minha capacidade para ultrapassar os obstáculos que surgiram. Mesmo no meio das suas muitas preocupações profissionais encontrou tempo para fazer uma revisão cuidadosa do texto, sugerindo muitas alterações e correcções que ajudaram a apresentar um trabalho mais claro e rigoroso.

Ao Professor Alfredo Gonçalves Ferreira, cuja iniciativa permitiu a aquisição da rampa rotativa utilizada neste trabalho, sem a qual ele não se poderia ter realizado. E ainda pelas várias críticas proferidas no início dos trabalhos de campo, que ajudaram bastante a melhorar alguns aspectos da metodologia utilizada nos mesmos.

Ao Dr. Dennis Kincaid, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em Kimberly, Idaho, pela cedência de software por ele desenvolvido.

Ao Dr. Ray Allmaras, do Departamento de Solos da Universidade do Minnesota, EUA, pela ajuda prestada na interpretação da metodologia por ele desenvolvida para calcular a rugosidade superficial do solo.

Ao Eng^o Jorge Teles Grilo pela preciosa ajuda na caracterização e classificação do solo do local de ensaios.

Aos colegas do pólo da Mitra e do Departamento de Engenharia Rural com quem durante este tempo tive oportunidade de trocar impressões sobre o meu trabalho, em especial os colegas Madalena Vasconcelos e José Rafael Silva.

Ao colega José Manuel Soares pela cedência de diverso material bibliográfico da sua própria investigação.

Aos funcionários do Laboratório de Hidrologia da Universidade de Évora pelo auxílio prestado nalguns trabalhos de campo.

A todos os alunos estagiários que ao longo destes anos realizaram os seus trabalhos de Fim de Curso sob a minha orientação e cujo interesse e capacidade de trabalho serviu de estímulo para que eu aprofundasse os meus conhecimentos na rega com rampas rotativas.

À minha irmã Lia Ana que leu parte deste texto sugerindo diversas alterações de redacção que ajudaram a melhorar bastante a sua leitura.

À minha mulher, quem mais teve de abdicar da minha companhia e atenção, pela paciência e incentivo que me deu, principalmente na fase final do trabalho.

Finalmente aos amigos e familiares o estímulo que sempre me dispensaram nos momentos de desânimo.

A todos o meu agradecimento

RESUMO

As rampas rotativas são um dos sistemas de rega preferencialmente escolhido pelos agricultores em Portugal. Porém, a reconversão destes sistemas para trabalharem com pressões reduzidas veio aumentar os problemas da sua adaptação a solos com reduzida infiltrabilidade, como é o caso dos solos Mediterrâneos.

Analisaram-se os diferentes factores que intervêm na rega e estudou-se o efeito da utilização de aspersores estáticos com pratos deflectores lisos e estriados, sobre o processo da infiltração e a qualidade da rega.

Simularam-se as condições de funcionamento da parte terminal de rampas rotativas com aproximadamente 200 e 400 m de comprimento e aspersores com baixa pressão (140 kPa), realizando-se ensaios de infiltração e de rega para avaliar as alterações na capacidade de infiltração do solo ao longo de sucessivas aplicações de água.

Utilizaram-se também os diagramas pluviométricos e as equações da infiltrabilidade, determinados no campo, para determinar o escoamento potencial e compararam-se os resultados obtidos com os valores do escoamento real verificado nos ensaios de rega.

Verificou-se que os deflectores estriados originam gotas de maior tamanho, que são menos afectadas pelo vento, diminuindo as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento, mas apresentam maior energia de impacto no solo, provocando maior compactação e originando mais facilmente a formação de uma crosta superficial, o que reduz a infiltrabilidade do solo.

Para valores de intensidade pluviométrica máxima entre os 53 e 68 mm/h, a diferença na utilização dos dois tipos de aspersores não é significativa, mas ao aumentar a intensidade para valores entre 99 e 125 mm/h verifica-se uma maior diminuição da infiltrabilidade e aumento do escoamento com a utilização dos deflectores estriados.

A utilização das equações da infiltrabilidade e dos diagramas pluviométricos determinados no campo mostrou que, se se dispuser de equações obtidas em condições antecedentes do solo semelhantes àquelas em que se irá realizar a rega, pode-se obter uma estimativa bastante rigorosa do escoamento.

Palavras chave: Rampas rotativas, solos Mediterrâneos, infiltração, escoamento, escoamento potencial, baixa pressão, aspersores estáticos, deflectores lisos e estriados.

ABSTRACT

In Portugal, center-pivot is one of the first options for farmers that want to buy an irrigation system. However, the modifications introduced to these systems in order to work with low pressure, has increased the problems of it's use in soils that have low infiltrability, like the Mediterraneans (Luvisol soils).

The different factors affecting the irrigation process were analysed and the effect of using spray head sprinklers with smooth flat and medium grooved plates on the infiltration process and irrigation quality was studied.

Working conditions of the last spans of a 200 and a 400 meters long center-pivots were simulated, and several infiltration and irrigation tests were made, in order to evaluate the changes in the infiltration capacity of the soil when using both flat and grooved plates in the low pressure spray heads (140 kPa).

Water application rate patterns and infiltrability equations determined in the field were used to calculate potential runoff, and the results were compared with the actual runoff from the irrigation tests.

The medium grooved plates, if compared to the smooth flat ones, produce larger water droplets, which are less affected by the wind, and thus leading to less evaporation and wind drift losses. However, those droplets have higher impact energy over the soil surface, increasing surface compaction and crust formation, which reduces soil infiltrability.

The use of either spray head plate does not present any different significant effect over the infiltration process and runoff for maximum application rates between 53 to 68 mm/h. But for higher application rates, 99 to 125 mm/h, the use of medium groove spray heads plates thus presents a higher reduction effect over the soil intake capacity, which leads to more runoff.

Runoff calculate with water application rate patterns and infiltrability equations determined in the field can give good results if there are available equations obtained with antecedent soil conditions similar to those that will be antecedent to the irrigation itself.

Keywords: Center-pivot, Mediterranean soils, infiltration, runoff, potential runoff, low pressure, spray head sprinklers, smooth and grooved plates.

ÍNDICES

ÍNDICE GERAL

| | Pág. |
|--|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | xv |
| ÍNDICE DE QUADROS | xix |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xxi |
| 1. INTRODUÇÃO | 3 |
| 1.1. Justificação do tema escolhido | 3 |
| 1.2. Objectivos do trabalho | 7 |
| 1.3. Organização do trabalho | 8 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 2.1. As rampas rotativas | 11 |
| 2.1.1. Características físicas das rampas rotativas | 12 |
| 2.1.2. O movimento da rampa rotativa | 13 |
| 2.1.3. Tipos de aspersores | 14 |
| 2.1.4. Disposição dos aspersores na rampa rotativa | 15 |
| 2.1.5. Variação da intensidade pluviométrica ao longo da rampa rotativa | 17 |
| 2.1.5.1. Diagramas pluviométricos | 18 |
| 2.2. O movimento da água no solo | 18 |
| 2.2.1. Potencial da água do solo | 18 |
| 2.2.2. A lei de Darcy | 20 |
| 2.2.3. Equações do movimento da água no solo | 21 |
| 2.2.4. Infiltração da água no solo | 23 |
| 2.2.4.1. Soluções simplificadas da infiltração com base em parâmetros físicos | 24 |
| 2.2.4.1.1. Equação de Philip | 24 |
| 2.2.4.1.2. Equação de Green-Ampt | 25 |
| 2.2.4.2. Soluções simplificadas da infiltração com base em parâmetros empíricos | 27 |
| 2.2.4.2.1. Equação de Kostiakov | 27 |
| 2.2.4.2.2. Equação de Horton | 28 |
| 2.2.5. Escorrimento | 29 |
| 2.2.5.1. Estimativa do escoamento | 29 |
| 2.3. Principais factores que afectam a infiltração e o escoamento | 31 |

| | |
|--|----|
| 2.3.1. Factores relativos às características da máquina | 31 |
| 2.3.1.1. A formação das gotas de água nos aspersores | 33 |
| 2.3.1.1.1. A energia cinética das gotas | 36 |
| 2.3.2. Factores climáticos | 40 |
| 2.3.2.1. Perdas de água por evaporação e arrastamento pelo vento | 40 |
| 2.3.3. Características do terreno | 42 |
| 2.3.3.1. O efeito da mobilização do solo | 43 |
| 2.3.3.2. A rugosidade superficial do solo | 44 |
| 2.3.3.2.1. Tipos de rugosidade e a sua quantificação | 46 |
| 2.3.3.2.2. Equipamento de medição da rugosidade superficial | 51 |
| 2.3.3.2.3. Alterações na rugosidade devido à precipitação | 52 |
| 2.3.3.3. Armazenamento superficial | 54 |
| 2.3.3.3.1. Técnicas de condicionamento do armazenamento superficial | 60 |
| 2.3.4. Factores associados ao solo | 62 |
| 2.3.4.1. O teor de água do solo | 62 |
| 2.3.4.2. A crosta superficial | 62 |
| 2.3.4.2.1. O impacto das gotas de água e o destacamento de partículas do solo | 64 |
| 2.3.4.2.2. Factores que influenciam a formação da crosta | 67 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 71 |
| 3.1. O campo de ensaios | 71 |
| 3.1.1. O clima | 71 |
| 3.1.2. O solo | 72 |
| 3.1.2.1. Identificação dos horizontes | 72 |
| 3.1.2.2. Caracterização hidropedológica | 72 |
| 3.1.3. A preparação do solo | 76 |
| 3.2. A rampa rotativa | 77 |
| 3.2.1. Condições gerais de funcionamento | 78 |
| 3.3. Ensaios de infiltração | 83 |
| 3.3.1. Método de Shockley | 83 |
| 3.3.2. Avaliação dos factores que influenciam a infiltrabilidade | 85 |
| 3.3.2.1. Factores da máquina | 87 |

| | |
|--|-----|
| 3.3.2.1.1. Energia cinética da precipitação | 87 |
| 3.3.2.2. Factores climáticos | 90 |
| 3.3.2.3. Factores do solo | 90 |
| 3.3.2.3.1. Teor de água do solo | 90 |
| 3.3.2.3.2. Compactação e formação de crosta superficial | 94 |
| 3.3.2.3.3. Condutividade hidráulica superficial | 95 |
| 3.3.2.4. Factores do terreno | 99 |
| 3.3.3. Sequência dos ensaios de infiltração | 100 |
| 3.4. Ensaios de rega | 100 |
| 3.4.1. Determinação do escoamento | 102 |
| 3.4.1.1. Avaliação de sedimentos arrastados | 103 |
| 3.4.2. Avaliação dos factores que afectam o escoamento | 103 |
| 3.4.2.1. Factores da máquina e do clima | 105 |
| 3.4.2.1.1. Dotação aplicada e recolhida | 105 |
| 3.4.2.1.2. Perdas por evaporação e arrastamento pelo vento | 107 |
| 3.4.2.1.3. Qualidade da rega | 108 |
| 3.4.2.1.4. Energia cinética da dotação de rega | 110 |
| 3.4.2.2. Factores do solo | 111 |
| 3.4.2.2.1. Teor de água do solo | 111 |
| 3.4.2.2.2. Compactação e formação de crosta superficial | 112 |
| 3.4.2.2.3. Condutividade hidráulica superficial | 112 |
| 3.4.2.3. Factores do terreno | 112 |
| 3.4.2.3.1. Rugosidade e armazenamento superficial do solo | 113 |
| 3.4.3. Sequência dos ensaios de rega | 115 |
| 3.5. Ensaios complementares | 117 |
| 3.5.1. Diagramas pluviométricos | 117 |
| 3.5.2. Determinação do escoamento potencial | 118 |
| 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 121 |
| 4.1. Ensaios de infiltração | 121 |
| 4.1.1. Escolha da equação tipo para representar a infiltrabilidade do solo | 121 |
| 4.1.2. A evolução da infiltrabilidade e o efeito dos diferentes factores | 123 |
| 4.1.2.1. Resultados do primeiro ano de ensaios | 124 |
| 4.1.2.2. Resultados do segundo ano de ensaios | 130 |

| | |
|--|-----|
| 4.1.3. Escolha da equação da infiltrabilidade a usar no dimensionamento e avaliação dos sistemas | 136 |
| 4.2. Ensaios de Rega | 138 |
| 4.2.1. Dotações de rega | 138 |
| 4.2.2. Uniformidade das regas | 143 |
| 4.2.3. O escoamento e a influência dos diversos factores | 145 |
| 4.2.3.1. Resultados do primeiro ano de ensaios | 145 |
| 4.2.3.2. Resultados do segundo ano de ensaios | 151 |
| 4.2.3.2.1. Sedimentos arrastados | 163 |
| 4.3. Resultados dos ensaios complementares | 166 |
| 4.3.1. Diagramas pluviométricos | 167 |
| 4.3.2. Determinação do escoamento potencial | 173 |
| 4.3.3. Comparação entre escoamentos potenciais e reais | 174 |
| 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS | 179 |
| 5.1. Conclusões | 179 |
| 5.2. Perspectivas futuras | 181 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 183 |
| ANEXOS | 197 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1.1 – Principais factores intervenientes no processo da rega | 5 |
| Figura 2.1 – Rampa rotativa e torre automotora (Tarjuelo, 1999) | 12 |
| Figura 2.2 – Esquema do movimento da rampa rotativa (Rolland, 1980) | 14 |
| Figura 2.3 – Aspensor rotativo (A) e aspensor estático (B) | 14 |
| Figura 2.4 – Modelos de distribuição da água por rampas rotativas (Addink <i>et al.</i> , 1983) | 15 |
| Figura 2.5 – Diagramas pluviométricos referentes a dois pontos da mesma rampa rotativa (Tarjuelo, 1999) | 17 |
| Figura 2.6 – Esquema da aproximação de Green-Ampt para resolver a equação da infiltração (Kutilek & Nielsen, 1994) | 25 |
| Figura 2.7 - Escorrimento potencial calculado com base na sobreposição entre o diagrama pluviométrico e a curva da infiltrabilidade do solo | 30 |
| Figura 2.8 - Variação da dotação aplicada num ponto do terreno em função da velocidade ($v_3 < v_1 < v_2$) e do tempo de passagem ($t_3 > t_1 > t_2$) da rampa rotativa (Tarjuelo, 1999) | 32 |
| Figura 2.9 – Tipos de pratos deflectores utilizados nos aspersores estáticos (Scherer <i>et al.</i> , 1999) | 35 |
| Figura 2.10 – Rotura de um jacto de água de um aspensor estático com um deflector liso (A) ou estriado (B) (Kohl & DeBoer, 1984) | 36 |
| Figura 2.11 – Alfaias de construção de microbacias (a) e pequenos reservatórios (b) (Kranz <i>et al.</i> , 1991) | 61 |
| Figura 2.12 – Diagrama esquemático do mecanismo do salpico em solos com alta (A) e baixa (B) resistência à deformação (Al-Durrah & Bradford, 1982a) | 66 |
| Figura 3.1 – Planta topográfica do local dos ensaios | 73 |
| Figura 3.2 – Curvas de humidade - tensão | 75 |
| Figura 3.3 – Rampa rotativa utilizada nos ensaios | 77 |
| Figura 3.4 – Aspersores estáticos de baixa pressão com dois tipos de pratos deflectores : A – lisos e B - estriados | 79 |
| Figura 3.5 – Distribuição dos diâmetros das gotas aplicadas pelos aspersores com deflectores lisos e estriados | 83 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.6 – Esquema da disposição dos pluviómetros nos ensaios de infiltração | 84 |
| Figura 3.7 – Principais factores que influenciam a infiltrabilidade do solo | 86 |
| Figura 3.8 – Sonda Theta probe ML2 | 91 |
| Figura 3.9 – Recta de calibração da sonda Theta probe ML2 | 92 |
| Figura 3.10 – Curva de calibração da sonda capacitiva | 94 |
| Figura 3.11 – Permeâmetro de disco (Perroux & White, 1988) | 96 |
| Figura 3.12 – Pormenor da posição dos raios onde se efectuou a recolha de dados (2º ano de ensaios). so – tubo de acesso da sonda de medição do teor de água no solo; A – anel de recolha de excedentes superficiais | 101 |
| Figura 3.13 – Anéis para recolha da água resultante do escoamento | 102 |
| Figura 3.14 – Principais factores que afectam o escoamento | 104 |
| Figura 3.15 – Perfilómetro de varetas utilizado | 113 |
| Figura 3.16 – Fluxograma para determinação do escoamento potencial | 118 |
| Figura 4.1 – Equações da infiltrabilidade no raio 2, no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores lisos | 124 |
| Figura 4.2 – Equações da infiltrabilidade no raio 4, no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores lisos | 125 |
| Figura 4.3 – Equações da infiltrabilidade no raio 2, no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores estriados | 125 |
| Figura 4.4 – Equações da infiltrabilidade no raio 4, no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores estriados | 126 |
| Figura 4.5 – Teores de água do solo antes dos ensaios de infiltração realizados em 98, com aspersores com deflectores estriados | 127 |
| Figura 4.6 – Teores de água do solo antes dos ensaios de infiltração realizados em 98, com aspersores com deflectores lisos | 127 |
| Figura 4.7 – Valores médios da densidade aparente nos primeiros 5 cm do solo, antes dos ensaios de infiltração do 1º ano | 128 |
| Figura 4.8 – Equações da infiltrabilidade no segundo ano de ensaios, utilizando deflectores lisos | 131 |
| Figura 4.9 – Equações da infiltrabilidade no segundo ano de ensaios, utilizando deflectores estriados | 131 |
| Figura 4.10 – Teores de água do solo antes dos ensaios de infiltração realizados em 99, com aspersores com deflectores lisos | 132 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.11 – Teores de água do solo antes dos ensaios de infiltração realizados em 99, com aspersores com deflectores estriados | 132 |
| Figura 4.12 – Valores médios da densidade aparente no primeiro cm do solo, antes dos ensaios de infiltração do 2º ano | 133 |
| Figura 4.13 - Comparação do efeito do salpico sobre os pluviómetros utilizados nos ensaios realizados com os dois tipos de deflectores: (a) – estriados e (b) lisos | 135 |
| Figura 4.14 - Condutividade hidráulica superficial antes dos ensaios de infiltração do 2º ano | 135 |
| Figura 4.15 – Equações da infiltrabilidade referentes ao 3º ensaio de infiltração | 137 |
| Figura 4.16 - Escorrimento médio medido no 1º ano de ensaios | 146 |
| Figura 4.17 - Teores de água no solo antes dos ensaios de rega realizados em 98, com os aspersores com deflectores estriados | 147 |
| Figura 4.18 – Teores de água no solo antes dos ensaios de rega realizados em 98, com os aspersores com deflectores lisos | 148 |
| Figura 4.19 - Valores médios da densidade aparente nos primeiros 5 cm do solo, antes de cada rega realizada no 1º ano | 150 |
| Figura 4.20 - Escorrimento médio medido nos ensaios do 2º ano | 153 |
| Figura 4.21 - Teores de água no solo antes dos ensaios de rega realizados em 99, com os aspersores com deflectores lisos | 154 |
| Figura 4.22 – Teores de água no solo antes dos ensaios de rega realizados em 99, com os aspersores com deflectores estriados | 155 |
| Figura 4.23 - Valores médios da densidade aparente no primeiro cm do solo, antes de cada rega realizada no 2º ano | 158 |
| Figura 4.24 - Condutividade hidráulica saturada superficial antes dos ensaios de rega de 99 | 159 |
| Figura 4.25 - Evolução do teor de água na camada superficial do solo ao longo das regas com os aspersores com deflectores estriados | 161 |
| Figura 4.26 - Comparação entre o escorrimento e a quantidade de sedimentos arrastados nas regas com os dois tipos de deflectores | 165 |
| Figura 4.27 - Diagramas pluviométricos, no 1º ano de ensaios, em duas posições da rampa rotativa equipada com aspersores com deflectores lisos (LS – lanço suspenso, 2º L – 2º lanço), a diferentes velocidades | 168 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.28 - Diagramas pluviométricos, no 1º ano de ensaios, em duas posições da rampa rotativa equipada com aspersores com deflectores estriados (LS – lanço suspenso, 2º L – 2º lanço), a diferentes velocidades | 169 |
| Figura 4.29 - Diagramas pluviométricos, no 2º ano de ensaios, em duas posições da rampa rotativa equipada com aspersores com deflectores lisos (LS – lanço suspenso, 2º L – 2º lanço), a diferentes velocidades | 170 |
| Figura 4.30 - Diagramas pluviométricos, no 1º ano de ensaios, em duas posições da rampa rotativa equipada com aspersores com deflectores estriados (LS – lanço suspenso, 2º L – 2º lanço), a diferentes velocidades | 171 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Quadro 3.1 - Dados físicos e químicos do solo | 74 |
| Quadro 3.2 - Velocidades de deslocamento da rampa rotativa | 78 |
| Quadro 3.3 - Parâmetros de funcionamento da rampa rotativa | 81 |
| Quadro 3.4 - Coeficientes para estimar o tamanho médio das gotas de aspersores estáticos (Kincaid <i>et al.</i> , 1996) | 82 |
| Quadro 3.5 - Sequência das regas no 1º ano de ensaios | 116 |
| Quadro 3.6 - Sequência das regas no 2º ano de ensaios | 116 |
| Quadro 4.1 - Características do grau de ajustamento dos valores observados às equações tipo da infiltrabilidade no 1º ano de ensaios | 122 |
| Quadro 4.2 - Características do grau de ajustamento dos valores observados às equações tipo da infiltrabilidade no 2º ano de ensaios | 122 |
| Quadro 4.3 - Valores da energia cinética das gotas de água aplicadas pelos aspersores com diferentes deflectores, durante os ensaios de infiltração do 1º ano | 130 |
| Quadro 4.4 - Valores da energia cinética das gotas de água aplicadas pelos aspersores com diferentes deflectores, durante os ensaios de infiltração do 2º ano | 134 |
| Quadro 4.5 - Pressões (kPa) registadas durante as regas | 139 |
| Quadro 4.6 - Dados relativos aos ensaios de rega do ano de 1998 | 141 |
| Quadro 4.7 - Dados relativos aos ensaios de rega do ano de 1999 | 142 |
| Quadro 4.8 - Uniformidade das regas | 144 |
| Quadro 4.9 - Escorrimento médio medido no 1º ano de ensaios | 145 |
| Quadro 4.10 - Energia de impacto das gotas de água no solo no 1º ano de ensaios .. | 149 |
| Quadro 4.11 - Valores médios da rugosidade aleatória (<i>RR</i>), armazenamento superficial (<i>AD_m</i>) e escoamento verificados no 1º ano de ensaios | 150 |
| Quadro 4.12 - Escorrimento médio medido no 2º ano de ensaios | 152 |
| Quadro 4.13 - Energia de impacto das gotas de água no solo no 2º ano de ensaios ... | 157 |
| Quadro 4.14 - Valores médios da rugosidade aleatória (<i>RR</i>), armazenamento superficial (<i>AD_m</i>) e escoamento verificados no 2º ano de ensaios | 162 |
| Quadro 4.15 - Valor médio dos sedimentos arrastados | 164 |

| | |
|--|-----|
| Quadro 4.16 - Valores da análise granulométrica dos sedimentos arrastados durante os ensaios de rega com deflectores estriados | 166 |
| Quadro 4.17 - Valores máximos da intensidade pluviométrica (mm/h) obtida nos diferentes ensaios | 172 |
| Quadro 4.18 - Valores do escoamento potencial (mm) | 173 |
| Quadro 4.19 - Escoamento potencial vs. Escoamento real, no 1º ano de ensaios .. | 175 |
| Quadro 4.20 - Escoamento potencial vs. Escoamento real, no 2º ano de ensaios .. | 175 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-----------|--|-------------|
| a | Parâmetro de ajustamento das eq. de Kostiakov e Kostiakov-Lewis | LT^{-b} |
| \vec{a} | Aceleração | LT^{-2} |
| a_1 | Parâmetro de ajustamento das eq. de Kostiakov e Kostiakov-Lewis | LT^{-b_1} |
| a_2 | Parâmetro de ajustamento da equação de Green-Ampt | LT^{-1} |
| a_3 | Parâmetro de ajustamento da eq. do armazenamento das depressões | $L^{(1-b)}$ |
| a_d | Parâmetro de ajustamento da eq. do diâmetro médio das gotas | L |
| a_L | Parâmetro de ajustamento da eq. de Linden & Van Doren | L^{-1} |
| a_n | Coefficiente de regressão | |
| A | Área | L^2 |
| A_I | Parâmetro da equação de Philip | LT^{-1} |
| A_{ap} | Armazenamento superficial do solo antes de uma precipitação | L |
| AC | Altura de água aplicada acumulada | L |
| A_d | Armazenamento das pequenas depressões do solo | L |
| AD | Armazenamento das depressões do solo | L |
| AD_m | Armazenamento máximo das depressões do solo | L |
| A_f | Armazenamento foliar | L |
| Alt | Altitude | L |
| A_{md} | Armazenamento das microdepressões do solo | L |
| A_{mp} | Armazenamento superficial máximo após uma precipitação | L |
| A_p | Área projectada de uma gota | L^2 |
| AS | Armazenamento superficial médio do solo | L |
| b | Parâmetro de ajustamento das eq. de Kostiakov e Kostiakov-Lewis | |
| b_1 | Parâmetro de ajustamento das eq. de Kostiakov e Kostiakov-Lewis | |
| b_2 | Parâmetro de ajustamento da equação de Green-Ampt | L |
| b_3 | Parâmetro de ajustamento da eq. do armazenamento das depressões | |
| b_d | Parâmetro de ajustamento da eq. do diâmetro médio das gotas | L |
| b_L | Parâmetro de ajustamento da eq. de Linden & Van Doren | |
| b_n | Coefficiente de regressão | |
| b_r | Parâmetro de ajustamento da eq. da rugosidade de Onstad <i>et al.</i> (1984) | L |
| c_1 | Parâmetro de ajustamento da equação de Horton | T^{-1} |
| $c(\psi)$ | Capacidade específica para a água | L^{-1} |
| C_2 | Coefficiente de arrastamento de Seginer | L^{-1} |
| C_D | Coefficiente de arrastamento | |

| | | |
|-----------|---|-------------|
| CU | Coeficiente de uniformidade | |
| CU_H | Coeficiente de uniformidade de Heermann & Hein | |
| CU_v | Coeficiente de uniformidade de variação de Bremond & Molle | |
| d | Diâmetro | L |
| d_{50} | Diâmetro médio das gotas de água | L |
| d_b | Diâmetro do bico do aspersor | L |
| div | divergente | |
| d_p | Diâmetro do prato deflector do aspersor | L |
| Da | Dotação média aplicada | L |
| Dap | Densidade aparente do solo | |
| D_i | Dotação ou altura de água recolhida num pluviómetro | L |
| D_{rec} | Dotação média recolhida | L |
| Ec_g | Energia cinética de uma gota de água por unidade de massa | L^2T^{-2} |
| Ec_T | Energia cinética total por unidade de massa | L^2T^{-2} |
| Ec_{Tv} | Energia cinética total por unidade de massa com o efeito do vento | L^2T^{-2} |
| ETp | Evapotranspiração potencial | LT^{-1} |
| f | Aceleração de arrastamento | LT^{-2} |
| \vec{F} | Força | MLT^{-2} |
| F_a | Frequência da resposta ao sinal emitido pela sonda capacitiva quando em contacto com a água | |
| F_{ar} | Frequência da resposta ao sinal emitido pela sonda capacitiva quando em contacto com o ar | |
| F_c | Factor de correcção | |
| F_D | Forças de atrito | MLT^{-2} |
| F_f | Factor do pico de frequência | L^{-1} |
| FN | Frequência normalizada da sonda capacitiva | |
| F_s | Frequência da resposta ao sinal emitido pela sonda capacitiva quando em contacto com o solo | |
| g | Aceleração da gravidade | LT^{-2} |
| h | Altura representativa da pressão | L |
| h_o | Pressão efectiva da água à superfície do solo | L |
| h_f | Pressão efectiva da água na frente de humedecimento da água do solo | L |
| H | Carga hidráulica | L |

| | | |
|-----------------------|--|----------------------------------|
| <i>I</i> | Infiltração acumulada | L |
| <i>IG</i> | Índice do tamanho das gotas de água | |
| <i>IM</i> | Índice do microrelevo | L |
| <i>IR</i> | Índice de rugosidade | L ^{1/2} |
| <i>i</i> | Infiltrabilidade | LT ⁻¹ |
| <i>i_i</i> | Infiltrabilidade inicial | LT ⁻¹ |
| <i>i_f</i> | Infiltrabilidade final ou estabilizada | LT ⁻¹ |
| <i>k</i> | Constante | |
| <i>K</i> | Condutividade hidráulica | LT ⁻¹ |
| <i>K_s</i> | Condutividade hidráulica saturada | LT ⁻¹ |
| <i>K(ψ)</i> | Condutividade hidráulica insaturada | LT ⁻¹ |
| <i>L</i> | Espaço ou comprimento | L |
| <i>L_D</i> | Parâmetro empírico da distância | L |
| <i>LD</i> | Diferença de elevações limitante | L |
| <i>LS</i> | Declive limitante | |
| <i>m</i> | Massa | M |
| <i>m_g</i> | Massa de uma gota de água | M |
| <i>MUD</i> | Índice de rugosidade | L |
| <i>n</i> | Número de pontos | |
| <i>n_o</i> | Expoente do modelo de distribuição do tamanho das gotas de água | |
| <i>n_s</i> | Número de segmentos de uma recta | |
| <i>p</i> | Porcentagem | |
| <i>p_j</i> | Porcentagem no intervalo j | |
| <i>P</i> | Pressão | ML ⁻¹ T ⁻² |
| <i>PD</i> | Profundidade das depressões do solo | L |
| <i>Pe</i> | Proporção efectiva da água aplicada que chega ao solo | |
| <i>P_{ev}</i> | Valor das perdas por evaporação e arrastamento pelo vento | L |
| <i>P_i</i> | Distância de cada pluviómetro ao pólo da rampa rotativa | L |
| <i>q</i> | Fluxo de água no solo | LT ⁻¹ |
| <i>Q</i> | Caudal da rampa rotativa | L ³ T ⁻¹ |
| <i>r</i> | Razão entre o diâmetro do bico e a pressão de funcionamento dos aspersores | |
| <i>r_o</i> | Raio da base do permeâmetro de disco | L |

Lista de símbolos

| | | |
|------------|---|-----------------|
| r_d | Coefficiente de regressão | |
| r_n | Coefficiente de regressão | |
| R | Rugosidade do solo | L |
| R_l | Rugosidade superficial do solo | |
| Re | Número de Reynolds | |
| RR | Rugosidade aleatória | L |
| RR_o | Rugosidade aleatória inicial | L |
| s | Declive | LL^{-1} |
| S | Sucção | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| S_l | Sorvidade | $LT^{-3/2}$ |
| t | Tempo | T |
| t_v | Tempo de uma volta completa da rampa rotativa | T |
| T_{ar} | Temperatura do ar | |
| UD | Uniformidade de distribuição | |
| v | Velocidade | LT^{-1} |
| v_i | Velocidade inicial | LT^{-1} |
| v_{ig} | Velocidade de impacto de uma gota de água no solo | LT^{-1} |
| v_j | Velocidade do jacto de água de um aspersor | LT^{-1} |
| v_r | Velocidade da gota relativa ao ar | LT^{-1} |
| v_v | Velocidade do vento | LT^{-1} |
| V | Valor da frequência do sinal registado pela sonda Theta probe ML2 | |
| V_g | Volume de uma gota de água | L^3 |
| z | Altura ou cota | L |
| z' | Altura ou cota transformada logaritmicamente | |
| \bar{z} | Altura ou cota média | L |
| z_i | Altura ou cota do ponto i | L |
| z_f | Profundidade da frente de humedecimento da água do solo | L |
| z_r | Altura ou cota de referência | L |
| α | Ângulo | |
| Δz | Diferença de cotas | L |
| ΔX | Intervalo de pontos | |
| ϵ | Constante dieléctrica | |
| ϕ_g | Potencial gravitacional | L |

| | | |
|-------------|---|--------------------------------|
| ϕ_o | Potencial osmótico | L |
| ϕ_p | Potencial de pressão | L |
| ϕ_t | Potencial total da água no solo | L |
| λ_c | Comprimento capilar dos macroporos | L |
| ν | Viscosidade cinemática do ar | L ² T ⁻¹ |
| θ | Teor volumétrico de água no solo | L ³ L ⁻³ |
| θ_o | Teor volumétrico inicial de água no solo | L ³ L ⁻³ |
| θ_s | Teor volumétrico de água no solo saturado | L ³ L ⁻³ |
| ρ_a | Massa volúmica da água | ML ⁻³ |
| ρ_{ar} | Massa específica ou volúmica do ar | ML ⁻³ |
| ρ_g | Massa volúmica de uma gota de água | ML ⁻³ |
| σ | Desvio padrão | L |
| σ_x | Erro padrão | |
| ψ | Tensão ou potencial matricial | L |
| ∇ | Operador diferencial vectorial | |
| ∇H | Gradiente da carga hidráulica | LL ⁻¹ |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificação do tema escolhido

As rampas rotativas são um dos sistemas de rega preferencialmente escolhido pelos agricultores em todo o mundo. A sua fácil automatização faz com que sejam equipamentos altamente atraentes, levando à sua grande expansão. De modo a torná-los ainda mais apetecíveis para os agricultores, tem-se observado, ao longo dos tempos, uma tentativa de encontrar sistemas que funcionem com pressões cada vez menores.

A diminuição da pressão de funcionamento tem como principal vantagem menores necessidades de bombagem e conseqüentemente menos gastos energéticos. No entanto, apresenta também alguns inconvenientes. O facto dos aspersores funcionarem com uma pressão mais reduzida implica uma diminuição do seu alcance, o que se traduz, em cada instante, na aplicação da água numa área menor. Deste modo, a aplicação da mesma quantidade de água, far-se-à com uma intensidade muito superior à dos sistemas de média/alta pressão e na maioria das vezes incompatível com a infiltrabilidade do solo. Isto conduz à ocorrência de significativas perdas de água por escoamento e conseqüente diminuição da eficiência.

Numa agricultura que tem privilegiado o aumento da produção não é de estranhar a apetência dos agricultores para ampliarem as suas áreas regadas recorrendo essencialmente a soluções que apresentem uma diminuição dos custos dos principais factores produtivos. Verifica-se assim uma opção clara pela aquisição de rampas rotativas de grandes dimensões, onde o problema das perdas de água por escoamento se agrava, pois, devido às suas características de funcionamento, a intensidade de aplicação das rampas rotativas aumenta com o comprimento.

E apesar da água poder ser considerada um bem escasso, nomeadamente em zonas como o Alentejo onde existe grande variabilidade na precipitação de uns anos para os outros, na verdade o seu custo é reduzido quando comparado com outros, como o da energia eléctrica. Torna-se assim difícil conseguir convencer os agricultores a abandonar os actuais sistemas de pressão reduzida, que em muitos casos apresentam claras desvantagens, em termos de eficiência, relativamente aos sistemas de média pressão. É certo que poderão apresentar mais perdas de água, mas a economia energética irá sempre sobrepor-se enquanto continuar a existir água disponível com menores custos.

Mas o problema do escoamento não é apenas um excessivo consumo de água, existem outros problemas ambientais associados. O escoamento dos excedentes da rega é, por um lado, um importante agente erosivo, cuja acção pode ocasionar grandes perdas de solo, diminuindo a capacidade produtiva dos terrenos, e por outro, é também um agente poluidor, uma vez que a água arrasta consigo muitos dos produtos fitossanitários e fertilizantes aplicados na própria rega.

Com a construção do Projecto de Alqueva será inevitável a expansão do regadio para terrenos que até aqui têm sido suporte de sistemas de agricultura de sequeiro, alguns deles com solos com algumas características menos favoráveis para a rega, como é o caso dos solos Mediterrâneos, uma das famílias mais representativa do Alentejo (cerca de 36 %). Estes solos apresentam limitações estruturais ao processo da infiltração, dificultando a realização de regas com eficiência e uniformidade elevadas.

O facto da maioria dos perímetros de rega a construir privilegiarem a rega por aspersão, irá certamente incrementar a expansão das rampas rotativas a funcionar nestes solos, tornando assim extremamente importante conhecer o seu comportamento quando sujeito a este sistema de rega. Este conhecimento permitirá uma melhor adaptação dos sistemas já instalados e dos que se irão instalar no futuro.

Como a gestão da rega será sempre condicionada pelas necessidades hídricas das culturas, a ciência terá que avançar no sentido de encontrar técnicas ou modificações dos equipamentos de modo a otimizar o seu funcionamento. Em muitos casos esta optimização passará pela diminuição do escoamento provocado pelo excesso de água aplicada, aumentando a eficiência do sistema e diminuindo os efeitos negativos do próprio escoamento.

O processo da rega, desde a aplicação da água por parte do sistema de rega até à sua infiltração ou não, originando neste último caso os excedentes que irão dar lugar ao escoamento, é muito complexo, intervindo nele, directa ou indirectamente, muitos factores (fig. 1.1).

Observando a figura seguinte verifica-se que os conjuntos de factores que mais directamente poderão influenciar o escoamento são os relativos à máquina, ao solo e às características do terreno.

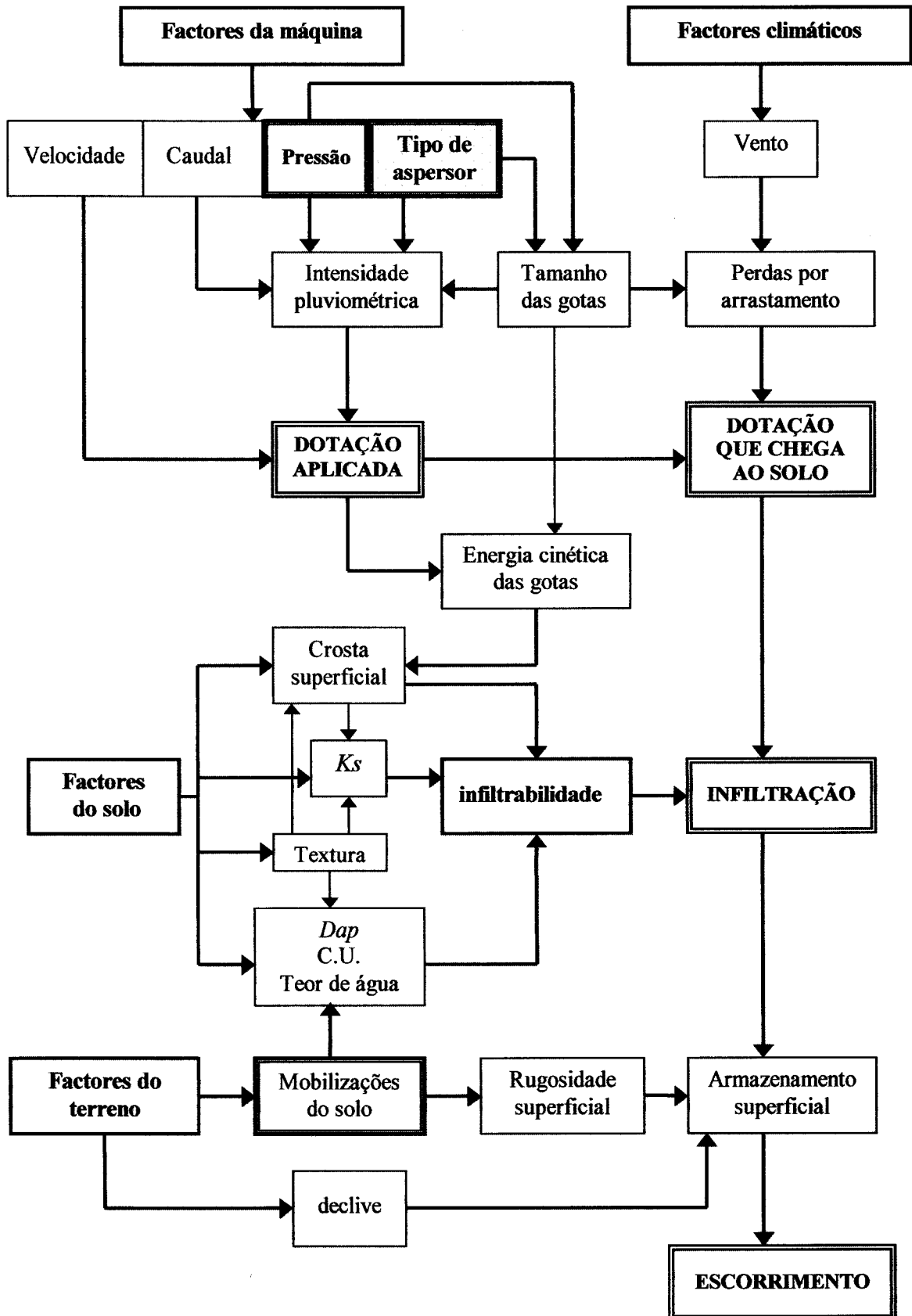


Figura 1.1 – Principais factores intervenientes no processo da rega.

Os factores relativos à máquina determinam a quantidade e a intensidade com que a água é aplicada, e que poderá ser incompatível com a capacidade de infiltração do solo. Por sua vez esta capacidade de infiltração do solo dependerá dos diferentes factores do solo apresentados e ainda das características do terreno a regar, que irão determinar a sua capacidade de armazenamento superficial.

Como se torna evidente, tentar modificar a qualidade da rega mexendo em todos os factores envolvidos no processo, de modo a encontrar a solução óptima para cada situação, originaria uma infinidade de possibilidades cujo estudo se tornaria impossível de realizar num trabalho desta natureza. Assim, foi necessário seleccionar um factor cuja influência sobre a qualidade da rega pudesse ser significativa, e estudá-lo em pormenor.

Numa primeira análise à figura 1.1, pode-se verificar que dentro dos conjuntos de factores referidos, existem alguns, que através das interacções que tem com outros factores podem ter uma influência mais significativa sobre todo o processo da rega. São eles as mobilizações do solo, a pressão de funcionamento da máquina e o tipo de aspersor.

A mobilização do solo altera significativamente, por um lado, a porosidade da camada perturbada influenciando as propriedades hidráulicas do solo, nomeadamente a sua infiltrabilidade, e por outro a rugosidade superficial, influenciando a capacidade de armazenamento de água à superfície.

Encontrar técnicas de mobilização do solo que melhor se adaptem à agricultura de regadio, principalmente quando se utilizam sistemas que aplicam a água com intensidades elevadas, como as rampas rotativas, é um campo de estudo promissor, conforme se verá nas referências apresentadas ao longo deste trabalho. No entanto, as soluções encontradas poderão exigir a aquisição de alfaias específicas para uma determinada mobilização, ou mesmo a realização de mais uma operação cultural, como é por exemplo a abertura de covachos para aumentar a capacidade de armazenamento superficial do solo.

A pressão de funcionamento e o tipo de aspersor irão afectar directamente quer a quantidade quer a intensidade com que a água é aplicada e, nalguns solos, poderão ainda influenciar a formação de crostas superficiais, por acção da energia cinética das gotas de água, o que vai diminuir a sua infiltrabilidade.

A alteração da pressão de funcionamento dos sistemas, que conjugada com o tipo de aspersor, pode conduzir a menores intensidades pluviométricas, mais compatíveis com as características de infiltração de alguns solos, encontra sempre uma grande limitação: a

económica. Sistemas com menores taxas de aplicação da água geralmente requerem maiores pressões de funcionamento, ou seja, um maior consumo de energia.

Finalmente resta o tipo de aspersor. Apesar da escolha de diferentes aspersores estar condicionada à sua pressão de funcionamento (como se verá no capítulo seguinte), é possível modificar alguns dos componentes do aspersor de modo a alterar as condições de aplicação da água. A alteração do tamanho do bico do aspersor ou do tipo de deflector terá um efeito directo sobre o tamanho de gotas emitidas por este, o que, como se pode observar na figura 1.1, poderá influenciar, directa ou indirectamente, quase todo o processo da rega.

Parece assim um factor cuja modificação, a ter um efeito positivo sobre a qualidade da rega num determinado solo, será fácil de fazer, sem grandes custos adicionais ou alterações para um qualquer sistema produtivo já implantado.

Por todas estas razões foi este o factor escolhido para objecto de estudo.

1.2. Objectivos do trabalho

Após o exposto no ponto anterior, optou-se por utilizar uma rampa rotativa com uma pressão de funcionamento reduzida e modificar os aspersores que a equipam. Os aspersores utilizados diferiam apenas no tipo de deflector (liso ou estriado), alteração essa suficiente para originar dois padrões de distribuição da água diferentes.

O objectivo principal do trabalho foi estudar o diferente efeito que esses dois tipos de aspersores têm sobre o processo da infiltração e a qualidade da rega num solo Mediterrâneo.

As variações produzidas no processo de infiltração do solo, sujeito a várias regas com um ou outro aspersor, foram estudadas com base na avaliação da variação da infiltrabilidade do solo e da avaliação da produção de escorrimentos resultantes da diminuição, ou não, da sua capacidade de infiltração.

Como objectivo secundário, e aproveitando a informação recolhida na caracterização e avaliação do funcionamento da rampa rotativa, testou-se a viabilidade de utilizar as equações da infiltrabilidade do solo e os diagramas pluviométricos obtidos sob a rampa rotativa, no campo, para estimar o escorrimento.

A bibliografia mais recente da especialidade continua a apresentar metodologias de cálculo do escorrimento potencial baseadas em diagramas pluviométricos elípticos (Serafim, 1994; Tarjuelo, 1999), que são aproximações aos diagramas reais dos aspersores das rampas

rotativas de baixa pressão, e equações da infiltração obtidas com infiltrómetros de duplo anel, depois modificadas para se aproximarem às condições da rega por aspersão (Kincaid *et al.*, 1969; Chu, 1987) ou equações obtidas com infiltrómetros de aspersão (Keller & Bliesner, 1990), que utilizam intensidades de aplicação muito inferiores às verificadas nas rampas rotativas de baixa pressão.

Por essa razão é interessante verificar o resultado da utilização de informação real, medida no campo, na estimativa do escoamento.

1.3. Organização do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos diferentes, a seguir apresentados.

No capítulo 1 são apresentadas as razões da escolha do tema do trabalho e enunciados os principais objectivos do mesmo.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica que permitiu identificar todos os factores envolvidos no processo da rega, avaliar a sua importância relativa e conhecer o estado da ciência sobre o seu estudo. Esta revisão está dividida em 3 pontos principais: no primeiro aborda-se a rampa rotativa e as suas características de funcionamento, no segundo o movimento da água no solo (infiltração e escoamento) e no terceiro os factores que afectam o processo da infiltração e o escoamento.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia e os equipamentos utilizados para estudar os diferentes factores. Dividiram-se os ensaios de campo em dois grupos principais: i) ensaios de infiltração, cujo objectivo principal foi o de avaliar as alterações da infiltrabilidade do solo após consecutivas aplicações de água; ii) ensaios de rega, onde se efectuaram regas segundo um determinado esquema (frequência e dotação), e foi avaliada a quantidade de escoamento existente. Em qualquer um destes grupos de ensaios foram ainda avaliados um conjunto de factores que influenciam quer o processo da infiltração quer a ocorrência de escoamento.

Os resultados são apresentados e discutidos no capítulo 4, em separado para cada grupo de ensaios, tentando relacioná-los sempre que possível. São ainda comparados, neste capítulo, os escoamentos estimados (ou potenciais) com os medidos (ou reais).

Finalmente no último capítulo, o 5, apresentam-se as conclusões que os resultados do trabalho permitiram retirar e algumas perspectivas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. As rampas rotativas

Desde a sua criação, nos anos 40, estes sistemas de rega têm tido uma divulgação e expansão que os torna um dos sistemas mais comercializado em todo o mundo.

A popularidade destas máquinas de rega, que no seu país de origem receberam o nome de “*center-pivot*”, deve-se fundamentalmente à sua grande adaptabilidade a uma diversidade de condições de rega (topográficas e culturais) e à sua automatização.

Segundo Raposo (1996), a introdução destes sistemas em Portugal terá ocorrido no ano de 1970, na zona de Vila Nova de Milfontes, existindo em 1996 mais de 650 sistemas instalados, que regavam mais de 20 mil hectares, números que terão aumentado significativamente dessa data para o presente.

O seu movimento de rotação em torno de um ponto (*pivot*), situado na parte central da área regada, esteve na origem do nome “*center-pivot*”. A tradução deste termo para a língua portuguesa não é consensual e verifica-se na literatura a existência de nomes como: *rampa rotativa* (Raposo, 1980), *rampa polar* (Serafim, 1994), *rampa pivotante* (adaptação da designação francesa, “*rampes pivotantes*”) ou *pivô-central*, designação do sistema no Brasil (Coelho, 1996). A falta de consenso na terminologia a utilizar para designar este sistema de rega deve-se também ao facto de o nome *center-pivot* ou simplesmente *pivot* estar muito difundido entre nós e, além de ser fácil de pronunciar, identificar sem grandes dúvidas o tipo de sistema. Os espanhóis resolveram o problema criando o termo “*pivote*”, para designar estas máquinas de rega.

No entanto, a utilização do termo *pivot*, como uma designação geral destes sistemas, leva por vezes à utilização indiscriminada do mesmo, sendo utilizado para designar tanto as rampas rotativas (“*center-pivot*”) como as rampas de translação linear ou rampas laterais (Raposo, 1996) (“*linear-moving systems*”), cuja estrutura física é muito semelhante à das rampas rotativas, mas que se distingue destas não só pelo tipo de movimento mas até pelas próprias características de funcionamento.

Uma vez que existe um nome em português para designar estes sistemas, optou-se pela utilização neste trabalho do nome mais antigo e talvez com maior aceitação: *rampa rotativa*.

2.1.1. Características físicas das rampas rotativas

A rampa rotativa não é mais do que um ramal de rega simplesmente apoiado, a alguns metros do solo, em estruturas automotoras, denominadas torres.

Este ramal apoiado apresenta uma extremidade fixa (*o pólo*), por onde recebe a água e a energia eléctrica necessárias para fazer funcionar o sistema, e outra móvel, que, em movimento, descreve um círculo rodando em torno da primeira. É formado por um conjunto de tubagens, normalmente de aço galvanizado, onde estão colocados os aspersores.

As torres, dotadas de um motor eléctrico, servem de sustentação ao ramal com os aspersores e ao mesmo tempo são elas que permitem o movimento do ramal ao longo da área a regar.

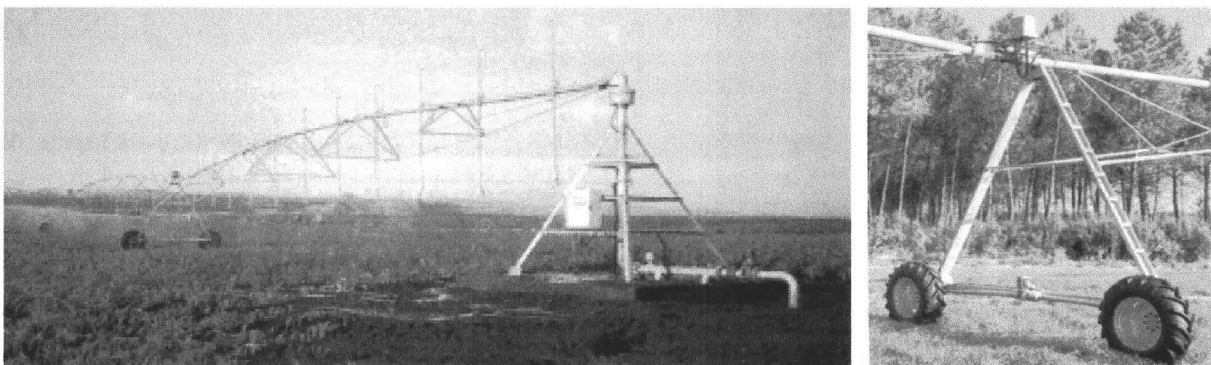


Figura 2.1 – Rampa rotativa e torre automotora (Tarjuelo, 1999).

A porção de ramal e restante estrutura de sustentação entre duas torres automotoras recebe o nome de *lanço*. Dois lanços adjacentes ligam-se por juntas flexíveis, junto à torre, o que permite que a rampa rotativa não tenha um movimento rígido, possibilitando a sua adaptação às condições topográficas dos diferentes terrenos.

O comprimento destes lanços varia entre 25 e 75 m, ainda que os mais frequentes sejam os de 38 m (lanço curto) ou 50 m (lanço comprido) (Tarjuelo, 1999). O último lanço da rampa, denominado *lanço suspenso*, e que está apoiado apenas na última torre ficando a outra extremidade suspensa da mesma torre, mediante um ou mais cabos, terá necessariamente um comprimento menor que os restantes lanços. O comprimento total da rampa pode ir até aos 800 m.

As rampas rotativas com lanços compridos são mais baratas e gastam menos energia, porque têm menos torres, mas adaptam-se pior às condições de terreno com topografias onduladas.

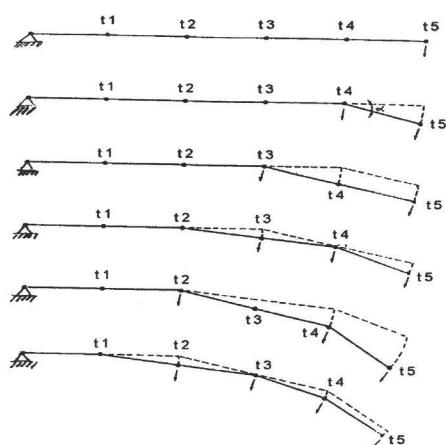
2.1.2. O movimento da rampa rotativa

Dadas as características da área a regar pela rampa rotativa, para que toda a parcela seja regada durante um determinado período de tempo, as diferentes torres terão que se deslocar a diferentes velocidades em função da sua distância ao pólo da rampa.

A velocidade de deslocamento é seleccionada numa caixa de comandos existente no pólo. Na realidade o que é seleccionado é apenas a velocidade de avanço da última torre, aquela que, por se encontrar mais afastada, se desloca mais rapidamente, sendo o movimento das torres adjacentes comandado pelo avanço da última torre.

Para garantir uma velocidade angular constante da rampa rotativa, será necessário que esta se mantenha alinhada do pólo para a extremidade mais afastada, durante o movimento. Para que isso aconteça, as torres cujo movimento é mais lento, por terem de percorrer uma distância menor, terão de efectuar paragens durante o seu andamento. Na maioria dos casos, cada torre é equipada com um motor eléctrico que lhe confere um movimento intermitente num ritmo de anda – pára – anda – pára... condicionado pela posição das torres adjacentes. Se se dividir cada período de tempo, num sub-tempo de andamento e noutro sub-tempo de paragem, então a velocidade máxima corresponderá a um sub-tempo de paragem igual a zero, enquanto que a velocidade mínima, corresponderá a um tempo de andamento nulo, ou seja, a rampa estará parada.

Para manter alinhada a rampa rotativa, esta dispõe de um sistema de alinhamento que arranca ou pára o avanço de cada torre, mediante um mecanismo de controlo que é accionado sempre que o ângulo formado por dois lanços adjacentes ultrapassa os 20°. Assim, o avanço da última torre produz uma reacção em cadeia à medida que se vai deslocando, permitindo o avanço das diferentes torres de um modo alinhado (fig. 2.2).



Uma torre avança quando $\alpha > \alpha_0$ e pára quando se alinha com as duas torres adjacentes.

t 3 – torre nº 3
 α - ângulo entre dois lanços

Figura 2.2 – Esquema do movimento da rampa rotativa (Rolland, 1980).

2.1.3. Tipos de aspersores

Os aspersores habitualmente utilizados nas rampas rotativas podem-se dividir em 2 tipos principais: os rotativos e os estáticos.

Os aspersores rotativos apresentam um movimento contínuo rodando em torno do seu eixo vertical, e são compostos por um martelo conjugado com um deflector de jacto ligado a uma mola helicoidal; têm um ou dois bicos, que podem ter diferentes inclinações (fig. 2.3).

Os aspersores estáticos, ou de cabeça estática (fig. 2.3) apresentam uma saída da água na vertical, que conduz o jacto de água ao encontro de um prato circular, o deflector. O impacto do jacto de água de encontro ao deflector faz com que a água se espalhe num leque circular.

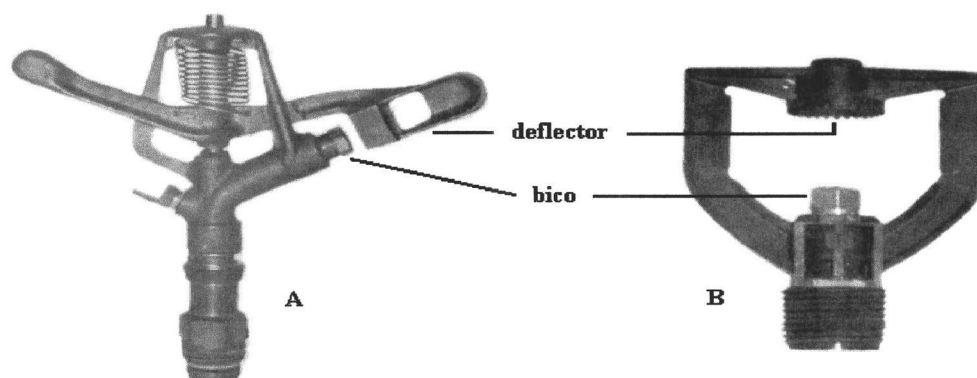


Figura 2.3 – Aspersor rotativo (A) e aspersor estático (B).

Vocacionados para funcionarem a baixa pressão, os aspersores estáticos são actualmente a primeira escolha para a instalação nas rampas rotativas a trabalhar em Portugal.

2.1.4. Disposição dos aspersores na rampa rotativa

A intensidade e uniformidade de aplicação da água por uma rampa rotativa depende: do tipo de aspersor, do seu espaçamento, da dimensão dos bicos e da pressão de funcionamento.

Addink *et al.* (1983) referem a existência de três modelos básicos (fig. 2.4).

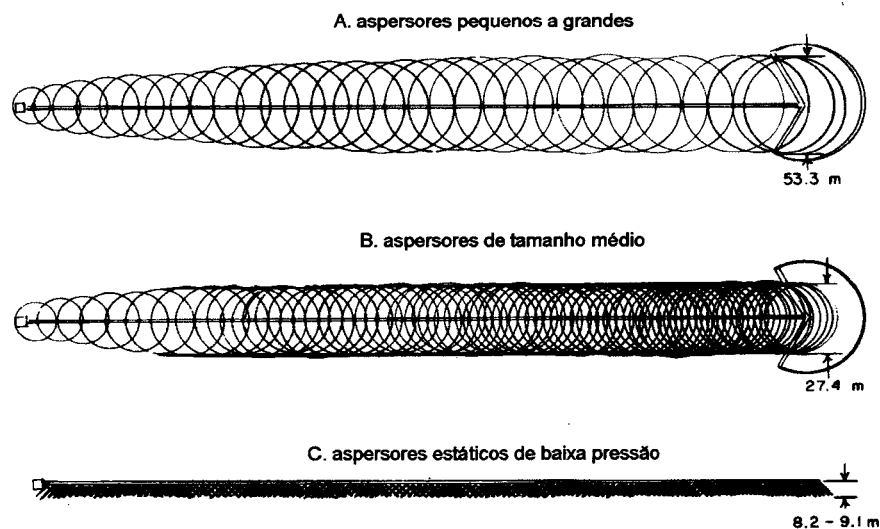


Figura 2.4 – Modelos de distribuição da água por rampas rotativas (Addink *et al.*, 1983).

A. Sistemas com aspersores rotativos de tamanho crescente do pólo para a extremidade livre da rampa, funcionando com pressão elevada (entre 415 e 690 kPa).

B. Sistemas com aspersores rotativos de tamanho médio constante, mas em que se vai diminuindo o espaçamento à medida que se avança para a extremidade livre da rampa. Estes aspersores funcionam com pressões entre os 310 e 520 kPa.

C. Sistemas com aspersores estáticos, de baixa pressão (140 a 275 kPa), com espaçamentos que diminuem na direcção da extremidade livre.

A tendência actual é para utilizar os sistemas de baixa pressão, o que implica que os sistemas tenham intensidades pluviométricas superiores (os aspersores aplicam a mesma água numa área menor), além de poder diminuir a uniformidade de rega em terrenos irregulares, pois, nestes sistemas, as variações topográficas têm um efeito maior na variação de pressão de funcionamento dos aspersores, da qual depende o caudal aplicado.

Addink *et al.* (1983) apresentam valores de intensidades máximas de aplicação, no fim de uma rampa rotativa de 400 m, de 25 a 40 mm/h, 50 a 80 mm/h e 150 a 300 mm/h, respectivamente para os modelos de distribuição A, B e C da figura 2.4.

Hoje em dia observa-se também com frequência, a colocação de aspersores fixos ou difusores na extremidade de tubos verticais descendentes. Esta solução apresenta como vantagem a diminuição da trajectória das gotas de água desde o aspersor até ao solo, o que diminui a evaporação e o potencial arrastamento das gotas de água pelo vento; como desvantagens pode-se referir o facto da água ser aplicada numa área ainda mais reduzida, o que aumenta a intensidade de precipitação e os problemas de escorrimento. Além disso, existe o problema dos tubos descendentes poderem interferir com as folhas das plantas em culturas de maior porte, como o milho.

Esta ideia de tornar o sistema mais eficiente, reduzindo as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento, esteve também na origem do aparecimento do sistema LEPA (Low Energy Precision Application) (Lyle & Bordvosky, 1981). Neste sistema, os aspersores situam-se a cerca de 30 cm do solo aplicando a água directamente sobre este, na entrelinha da cultura e sem molhar as plantas. A intensidade de aplicação da água é muito elevada, quase sempre ultrapassando a infiltrabilidade do solo, o que implica um condicionamento do relevo para impedir escorrimentos excessivos. A vantagem do sistema é a reduzida energia necessária para aplicar a água.

Keller & Bliesner (1990) apresentam valores de pressão de funcionamento, para os aspersores estáticos, mais baixos do que os de Heermann & Kohl (1983). Estes valores, que variam entre os 70 e 170 kPa, têm em conta não só o tipo de aspersor como também a sua disposição na rampa rotativa.

Na extremidade da rampa é ainda frequente a utilização de um aspersor de grandes dimensões, funcionando a pressões elevadas (300 a 500 kPa), sendo por vezes necessária uma pequena bomba de pressão nos casos em que no fim da rampa não exista pressão suficiente. A utilização deste aspersor de grandes dimensões tem como objectivo aumentar a área regada. Porém, o vento actua sobre o jacto provocando a dispersão da água, o que ocasiona

geralmente uma má uniformidade da rega. Actualmente, em zonas com vento é frequente prescindir-se deste aspersor, substituindo-o por um aspersor idêntico aos outros existentes no lanço suspenso.

2.1.5. Variação da intensidade pluviométrica ao longo da rampa rotativa

Para que a rampa rotativa se desloque alinhada ao longo do seu comprimento a velocidade das torres tem que ir aumentando do pólo para a extremidade livre. Este aumento da velocidade de deslocamento conduz a que, à medida que nos afastamos do pólo da rampa, cada ponto do terreno receba água durante menos tempo, e assim sendo para se conseguir aplicar a mesma quantidade de água em todo o terreno a intensidade de aplicação terá que aumentar ao longo da rampa.

Na figura 2.5 podem-se observar as intensidades pluviométricas e o tempo de aplicação para dois pontos situados sob a mesma rampa rotativa, mas a diferentes distâncias do pólo. A aplicação da água num tempo mais reduzido implica uma maior intensidade de aplicação, de modo a que no fim os dois pontos do terreno recebam a mesma quantidade de água (aqui correspondente ao valor das áreas limitadas pelas curvas que representam as intensidades pluviométricas).

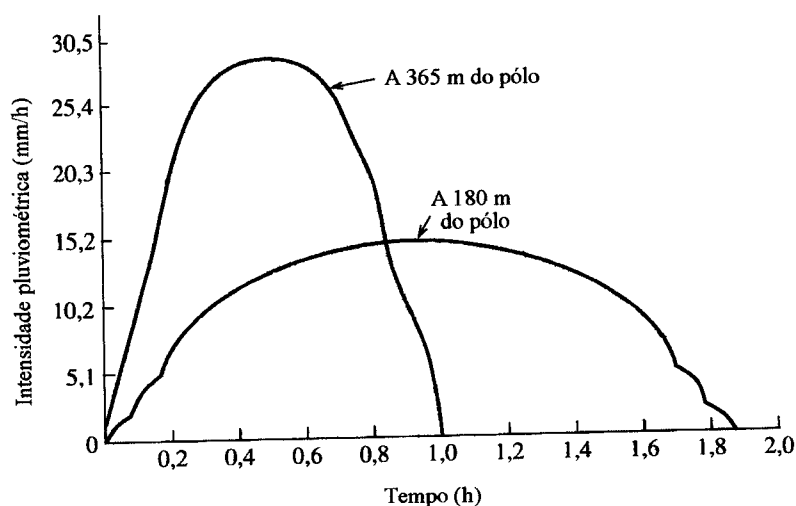


Figura 2.5 – Diagramas pluviométricos referentes a dois pontos da mesma rampa rotativa (Tarjuelo, 1999).

2.1.5.1. Diagramas pluviométricos

A forma do padrão de distribuição da água ou diagrama pluviométrico, sobre um ponto do terreno, depende das características e condições de funcionamento dos aspersores. Devido ao tipo de aspersor que normalmente lhes está associado, os sistemas que funcionam com pressão elevada geralmente originam diagramas pluviométricos de forma elíptica (Tarjuelo, 1999), enquanto que os sistemas de baixa pressão originam diagramas pluviométricos em forma de M (Thooyamani *et al.*, 1987; Serafim, 1994), principalmente para velocidades elevadas da rampa rotativa.

2.2. O movimento da água no solo

2.2.1. Potencial da água do solo

A água do solo, como qualquer sistema ou ponto material, contém duas formas principais de energia: cinética e potencial. Dado que o movimento da água no solo é muito lento, a sua energia cinética é geralmente desprezável. No entanto, a energia potencial é de primordial importância na determinação do estado e movimento da água no solo.

O conceito de potencial da água do solo expressa a energia potencial específica da água do solo em relação à da água num estado de referência padrão. Este estado padrão é geralmente considerado como sendo o de um reservatório de água pura, sujeito à pressão atmosférica, à mesma temperatura que a água do solo e a uma dada altura constante.

A água do solo é sujeita a um certo número de campos de forças, que fazem com que o seu potencial seja diferente do da água pura livre. Estes campos de forças resultam da atracção da matriz sólida para a água, assim como da presença de solutos, da acção de pressão gasosa externa e da acção da gravidade. De acordo com isto, o potencial total da água do solo pode ser considerado como o somatório das contribuições separadas destes vários factores:

$$\phi_t = \phi_g + \phi_p + \phi_o + \dots \quad (2.1)$$

onde ϕ_t é o potencial total, ϕ_g o potencial gravitacional, ϕ_p o potencial de pressão (ou matricial), ϕ_o o potencial osmótico, e as reticências significam que termos adicionais são teoricamente possíveis.

A energia correspondente ao potencial total da água no solo (ϕ) pode ser expressa como energia por unidade de massa, volume ou peso. A energia por unidade de peso também denominada carga hidráulica (H), possui dimensões de comprimento, correspondendo à altura de uma coluna líquida, unidade esta que muitas vezes facilita a resolução dos problemas.

O potencial gravitacional representa a energia gasta para vencer a força da gravidade no movimento de um corpo relativamente a um nível de referência. Se o nível de referência escolhido for a superfície do solo, o potencial gravitacional de todos os pontos abaixo da superfície é negativo. O potencial gravitacional, em termos de energia potencial por unidade de peso, a uma profundidade z , abaixo do nível de referência será:

$$\phi_g = \frac{-\rho_a g z}{\rho_a g} = -z \quad (2.2)$$

sendo g a aceleração da gravidade e ρ_a a massa volúmica da água.

Quando o solo se encontra a uma pressão hidrostática maior que a atmosférica, o potencial de pressão é considerado positivo. Quando está a uma pressão menor que a atmosférica (uma subpressão, usualmente conhecida como tensão ou sucção) o potencial de pressão é considerado negativo. Assim, a água sob uma superfície de água livre está a um potencial de pressão positivo, enquanto que a água nessa superfície terá um potencial de pressão igual a zero e a água que se eleva num tubo capilar acima dessa superfície é caracterizada por um potencial de pressão negativo.

O potencial de pressão, por unidade de peso, será:

$$\phi_p = \frac{\rho_a g h}{\rho_a g} = h \quad (2.3)$$

onde h representa a altura da água desde o nível de referência até à superfície livre do líquido.

Um potencial de pressão negativo tem sido frequentemente denominado potencial capilar ou matricial (ψ), mas dado que este potencial resulta da acção combinada dos fenómenos de capilaridade e das forças de adsorção da matriz do solo, o segundo termo (potencial matricial) é mais adequado (Hillel, 1980a).

A soma das duas parcelas do potencial já referidas, denomina-se carga hidráulica, H , e representa-se por:

$$H = h - z . \quad (2.4)$$

O potencial osmótico é devido à presença de solutos na água do solo que afectam as suas propriedades termodinâmicas e baixam a sua energia potencial. Porém este fenómeno não afecta de um modo significativo o escoamento dos líquidos no solo pelo que em condições normais pode ser desprezado.

São as diferenças de energia potencial da água entre um ponto e outro do solo que dão lugar ao seu movimento, efectuando-se este na direcção decrescente da energia potencial. De um modo grosseiro pode-se dizer que o movimento da água no interior do solo se faz das zonas mais húmidas (onde o potencial total é maior) para as zonas mais secas (onde o potencial total é menor).

2.2.2. A lei de Darcy

Darcy (1856) foi o primeiro autor a estabelecer uma equação que permitiu quantificar o movimento da água num meio saturado. A lei de Darcy diz que a densidade de fluxo ou simplesmente o fluxo de água no solo (q), é proporcional ao gradiente da sua carga hidráulica ($\Delta H/L$) através de um factor de proporcionalidade, K , geralmente denominado condutividade hidráulica:

$$q = K \frac{\Delta H}{L} \quad (2.5)$$

Segundo Hillel (1980a), a lei de Darcy foi generalizada por Slichter (1899) para o caso dos meios porosos saturados, numa equação diferencial tridimensional:

$$\vec{q} = -K \nabla H \quad (2.6)$$

em que \vec{q} é a densidade de fluxo (LT^{-1}), ∇H é o gradiente tridimensional da carga hidráulica (LL^{-1}), que também se pode representar por $grad H$, e K a condutividade hidráulica do solo (LT^{-1}).

A condutividade hidráulica traduz a maior ou menor facilidade com que a água se escoia num determinado solo, e depende das características do fluido (massa específica), do

meio poroso (textura e estrutura do solo) e da humidade do solo. O seu valor aumenta com a humidade do solo.

Richards (1931) modificou a lei de Darcy de modo a poder utilizá-la no caso de escoamentos insaturados, tendo em conta o facto da condutividade hidráulica ser neste caso função do potencial, $K = K(\psi)$:

$$\vec{q} = -K(\psi)\nabla H \quad (2.7)$$

ou

$$\vec{q} = -K(\psi) \text{grad } H \quad (2.8)$$

2.2.3. Equações do movimento da água no solo

A equação da continuidade traduz a conservação da massa de água no volume elementar de solo, e pode-se escrever:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} \quad (2.9)$$

onde ∇ é o operador diferencial vectorial, que representa o gradiente tridimensional no espaço (neste caso é o gradiente espacial do fluxo q), e θ o teor de água volumétrico.

O produto escalar do operador ∇ por uma função vectorial é denominado divergente e representado por *div*, o que permite escrever a equação anterior na forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div } \vec{q} \quad (2.10)$$

A equação geral do escoamento resulta da combinação da equação da continuidade com a lei de Darcy (eq. 2.8), obtendo-se a expressão:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div} [K(\psi) \text{grad } H]. \quad (2.11)$$

Como a carga hidráulica (H) não é mais do que a soma do potencial de pressão (ou do potencial matricial) e o potencial gravitacional então a equação anterior pode voltar a ser escrita:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \text{div} [K(\psi) \text{grad}(\psi - z)]. \quad (2.12)$$

No caso concreto da rega com rampas rotativas, o movimento da água no solo pode ser considerado unidimensional vertical pelo que a equação (2.12) toma a forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \text{div} \left[K(\psi) \frac{\partial}{\partial z} (\psi - z) \right]. \quad (2.13)$$

Ainda considerando o movimento unidimensional vertical, pode-se voltar a escrever a equação anterior como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} - K(\psi) \right). \quad (2.14)$$

Esta equação não pode ser resolvida na forma apresentada, pois contém duas variáveis desconhecidas θ e ψ . Para ultrapassar esta dificuldade recorre-se à função denominada *capacidade específica para a água* (Hillel, 1980a):

$$c(\psi) = d\theta / d\psi, \quad (2.15)$$

que representa o declive da curva característica de humidade do solo para um determinado valor de θ .

O primeiro membro da equação (2.14) pode ser decomposto em:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.16)$$

e combinando com a equação (2.15) pode-se escrever:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = c(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.17)$$

Substituindo depois esta expressão na equação (2.14) fica:

$$c(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} - K(\psi) \right) \quad (2.18)$$

que é a equação de Richards para escoamentos verticais.

A resolução desta equação diferencial de 2ª ordem, não linear, apenas se pode fazer através de métodos numéricos, como os apresentados por Kunze & Nielsen (1982) ou Ross (1990), ou ainda recorrendo a aproximações que permitem obter soluções quase analíticas, como a apresentada por Philip (1957a).

2.2.4. Infiltração da água no solo

A *infiltração* é o processo de entrada de água no solo, através da sua superfície. A *taxa de infiltração* é definida como o fluxo de água que se escoia no perfil de solo por unidade de área. Este fluxo, também referido muitas vezes como *velocidade de infiltração*, tem como dimensões (LT^{-1}).

A taxa de infiltração depende de factores externos ao solo (taxa de fornecimento de água ao solo, quer através da precipitação natural ou da rega) e de factores internos, próprios do solo, que definem a *infiltrabilidade* do solo (Santos Júnior, 1987).

O termo *infiltrabilidade* designa o fluxo de água que se infiltra no solo como resultado da aplicação de água (sujeita à pressão atmosférica), livremente sobre a superfície do solo (Hillel, 1980b). Enquanto a taxa de aplicação de água à superfície for menor que a infiltrabilidade do solo, a água infiltra-se com uma velocidade idêntica àquela com que é aplicada, e a taxa de aplicação determina a taxa de infiltração. No entanto, uma vez que a taxa de aplicação exceda a infiltrabilidade do solo, é esta última que determina a taxa de infiltração.

A infiltrabilidade do solo e a sua variação com o tempo dependem do teor de água inicial do solo e da sucção matricial, assim como da textura, estrutura e uniformidade (ou sequência de camadas) do perfil do solo. Geralmente, a infiltrabilidade é elevada no início do processo de infiltração, mas tende a decrescer monotonicamente e eventualmente a aproximar-se assintoticamente de uma taxa constante, que é frequentemente denominada *infiltrabilidade estabilizada* (Hillel, 1980b).

2.2.4.1. Soluções simplificadas da infiltração com base em parâmetros físicos

2.2.4.1.1. Equação de Philip

Philip (1957a) apresenta uma solução quase analítica da equação de Richards, expressa em função de θ , para superfícies saturadas e solos homogêneos.

Recorrendo à transformação de Boltzmann, Philip apresenta a solução da equação de Richards como um desenvolvimento em série, que depois simplifica (Philip, 1957b), obtendo a equação da infiltração vertical num solo:

$$I = S_1 t^{1/2} + A_1 t \quad (2.19)$$

onde I , é a infiltração acumulada (L); t , o tempo (T); S_1 , um parâmetro que Philip denominou “*sorptivity*” e Mello (1984) traduziu para português como *sorvidade* ($LT^{-3/2}$), e A_1 um segundo parâmetro dependente do teor de água no solo (LT^{-1}).

Esta equação, fisicamente baseada, produz bons resultados para tempos não muito longos e perfis homogêneos (Philip, 1957b).

O parâmetro S_1 representa a capacidade de um solo absorver água por acção da capilaridade, e depende das condições iniciais e dos limites para cada tipo de solo. Para a sua determinação é necessário o conhecimento das relações $h(\theta)$ e $K(\theta)$ (Philip, 1957a), que normalmente são desconhecidas, além de variarem ao longo do perfil do solo, no caso de solos estratificados ou da formação de crosta superficial.

O parâmetro A_1 , segundo a análise de Philip, seria igual à condutividade hidráulica do solo em saturação.

Na prática, ao utilizar-se esta equação, tanto S_1 como A_1 , terão que ser substituídos por parâmetros de ajustamento, obtidos em ensaios de infiltração (Tabuada, 1989), que variam

com as condições iniciais e de fronteira e com a duração do ensaio de infiltração. Isto provocará a introdução de erros aquando da sua utilização em condições diferentes das experimentais.

Derivando a equação (2.19) em ordem ao tempo, obtém-se:

$$i = \frac{1}{2} S_1 t^{-1/2} + A_1 \quad (2.20)$$

em que i representa a infiltrabilidade do solo (LT^{-1}).

2.2.4.1.2. Equação de Green-Ampt

Green & Ampt (1911) apresentaram uma das primeiras aproximações da solução da infiltração fisicamente baseadas. Estes autores simplificaram o perfil de infiltração da água no solo para um perfil por passos (fig. 2.6). No seu modelo, a água infiltra-se no solo como se fosse um êmbolo, que desce em profundidade com o tempo.

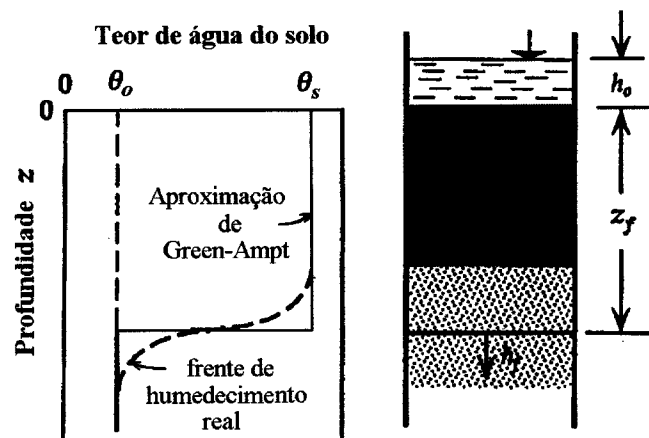


Figura 2.6 – Esquema da aproximação de Green-Ampt para resolver a equação da infiltração (Kutilek & Nielsen, 1994).



Abaixo da frente de humedecimento horizontal e abrupta, o solo permanece seco com um teor de água igual ao seu valor inicial. Na parte saturada do solo, o movimento da água é descrito pela equação de Darcy. Se num tempo t a posição da frente de humedecimento for z_f , a infiltração será:

$$i = K_s \left(1 + \frac{h_o - h_f}{z_f} \right) \quad (2.21)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado, h_o é a pressão efectiva da água à superfície do solo, e h_f é a pressão efectiva na frente de humedecimento devida à condição insaturada do solo abaixo de z .

Uma vez que, atrás da frente de humedecimento, o perfil do solo é considerado uniformemente humedecido até à saturação, a água infiltrada será traduzida pela expressão:

$$I = (\theta_s - \theta_o) z_f = \Delta\theta z_f \quad . \quad (2.22)$$

Da conjugação das equações (2.21) e (2.22) obtém-se:

$$i = K_s \left(1 + \frac{\Delta\theta (h_o - h_f)}{I} \right) \quad . \quad (2.23)$$

Admitindo que não há água à superfície do solo e que $h_f < 0$, por não haver encharcamento, a equação anterior pode voltar a ser escrita:

$$i = K_s \left(1 + \frac{\Delta\theta h_f}{I} \right) \quad (2.24)$$

e integrando em ordem ao tempo, considerando que para $t = 0$ se terá $I = 0$, obtém-se a forma implícita da equação de Green-Ampt:

$$I = K_s t + \Delta\theta h_f \ln \left(1 + \frac{I}{\Delta\theta h_f} \right) \quad (2.25)$$

Se não forem conhecidas as características hidrodinâmicas do solo, a equação (2.24) pode ser escrita sob a forma:

$$i = a_2 \left(1 + \frac{b_2}{I} \right) \quad (2.26)$$

em que $b_2 = \Delta\theta h_f$ e onde a condutividade hidráulica saturada (K_s) é substituída pelo parâmetro de ajustamento a_2 . Estes parâmetros podem ser obtidos através de ensaios de infiltração.

2.2.4.2. Soluções simplificadas da infiltração com base em parâmetros empíricos

2.2.4.2.1. Equação de Kostiakov

Uma das expressões empíricas mais utilizada é a de Kostiakov (1932), formulada para uma situação de saturação superficial permanente, e que permite calcular a infiltração acumulada, I , em função do tempo de infiltração t através de uma equação tipo potência,

$$I = a_1 t^{b_1} \quad (2.27)$$

onde a_1 e b_1 são parâmetros empíricos, com os seguintes domínios: $a_1 > 0$ e $0 < b_1 < 1$.

A derivada da equação anterior será:

$$i = a t^b \quad (2.28)$$

em que i , representa a infiltrabilidade do solo; t , o tempo de infiltração, $a = a_1 b_1$ e $b = b_1 - 1$.

O principal inconveniente que se tem apontado a esta equação é, para além de ignorar as condições hidrodinâmicas antecedentes, o facto de i tender para zero à medida que t tende para infinito, quando a maior parte dos solos apresenta, após algum tempo de infiltração, tendência para estabilizar i num valor constante, maior que zero.

Por este motivo, alguns autores preferem utilizar uma equação de Kostiakov “modificada”, também conhecida por equação de Kostiakov-Lewis,

$$I = a_1 t^{b_1} + i_f t \quad (2.29)$$

onde, para além dos termos da equação (2.27), aparece a constante i_f que representa a infiltrabilidade final ou estabilizada.

Fazendo variar o valor de i_f entre zero e o valor da condutividade hidráulica saturada (K_s), esta equação permite enquadrar todos os ensaios de infiltração seja qual for o seu tempo de duração (Tabuada, 1989). Convém, no entanto, salientar o carácter, de certo modo pouco consistente do valor calculado de i_f ; de facto, não é fácil definir, para cada teste de infiltração, em que momento a taxa se encontra já estabilizada (Serralheiro, 1988).

Na sua forma derivada a equação (2.29) pode-se escrever como

$$i = at^b + i_f \quad (2.30)$$

No caso de solos regados com rampas rotativas a introdução de mais um parâmetro na equação de Kostiakov não trará grandes vantagens, uma vez que o tempo de aplicação da água durante a rega é pequeno, não sendo pois de esperar que a infiltrabilidade desça até ao valor estabilizado i_f .

2.2.4.2.2. Equação de Horton

A equação de Horton (1940) é outra equação muito utilizada, também ela formulada para uma situação de saturação superficial, e que apresenta a infiltração acumulada como,

$$I = i_f t - \frac{1}{c_1} (i_i - i_f) (e^{-c_1 t} - 1) \quad (2.31)$$

onde,

i_i – infiltrabilidade inicial (LT^{-1});

i_f – infiltrabilidade final (LT^{-1});

c_1 – parâmetro de ajustamento (T^{-1}).

A infiltrabilidade pode ser calculada através da forma derivada da equação anterior,

$$i = i_f + (i_i - i_f) e^{-c_1 t} . \quad (2.32)$$

Na prática, os valores de i_f e $(i_i - i_f)$, poderão ser substituídos por dois parâmetros de ajustamento, obtidos a partir de dados de ensaios de infiltração.

2.2.5. Escorrimento

A água que chega ao solo infiltra-se a uma taxa dependente da infiltrabilidade do solo nesse momento. Se a intensidade de aplicação da água excede a infiltrabilidade do solo então as depressões superficiais do solo enchem-se. Quando se atinge o valor máximo do armazenamento superficial e continua a chegar ao solo mais água, o nível de água nas depressões superficiais aumenta, dá-se o seu transbordamento e inicia-se o escoamento livre sobre a superfície do terreno, designado *escorrimento*.

Iniciado o escoamento num ponto, a água em excesso desloca-se para outros pontos do terreno de cota inferior. Este fenómeno desenvolve-se a diferentes escalas em função da precipitação, da infiltrabilidade do solo e do microrelevo.

Por exemplo, se a precipitação diminui para uma taxa suficientemente baixa, a infiltrabilidade do solo pode ser superior e a água armazenada nas depressões pode ser drenada interrompendo-se o escoamento nesse ponto (Mitchell & Jones, 1978).

2.2.5.1. Estimativa do escoamento

A metodologia mais comum para estimar o escoamento é a apresentada por Kincaid *et al.* (1969) que calculam o escoamento potencial pela integração da área entre o diagrama pluviométrico e a curva de infiltrabilidade do solo durante o tempo em que a taxa de aplicação excede a infiltrabilidade do solo (fig. 2.7).

Estes autores, tal como Gilley (1984) ou Chu (1987), representam a distribuição da água através de diagramas de forma elíptica e a infiltrabilidade do solo através de equações do

tipo Kostiakov. De referir que no caso de Chu (1987) o modelo apresentado é de resolução gráfica.

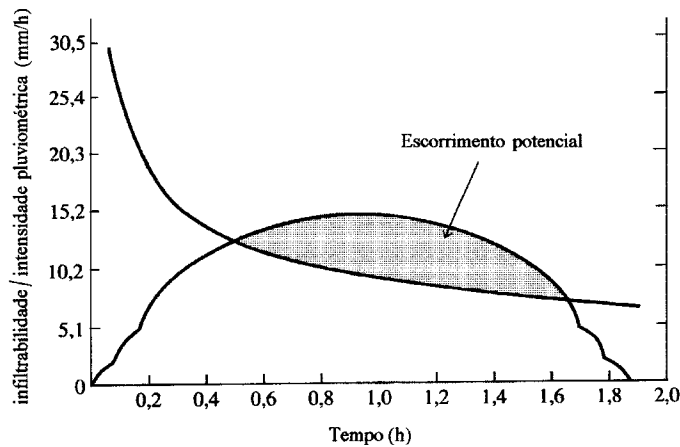


Figura 2.7 – Escoamento potencial calculado com base na sobreposição entre o diagrama pluviométrico e a curva da infiltrabilidade do solo.

Outros autores como Von Bernuth & Gilley (1985) recorrem a equações do tipo de Green-Ampt, mais complexas, mas que conduzem nalguns casos a bons resultados entre valores estimados e observados.

Apesar de, no caso das rampas rotativas funcionando a baixa pressão, o padrão de distribuição elíptico não ser representativo, como já foi referido anteriormente, quer os autores citados anteriormente, quer a maioria dos mais recentes livros de rega por aspersão (Keller & Bliesner, 1990; Tarjuelo, 1999, Scherer *et al.*, 1999), continuam a utilizar este tipo de padrão de distribuição para estimar o escoamento potencial devido à rega com qualquer tipo de rampa rotativa.

DeBoer & Chu (1994) calcularam o escoamento potencial utilizando padrões de distribuição elípticos e aproximações trapezoidais e verificaram, como seria de esperar, que a forma do diagrama influencia o escoamento calculado. No seu caso o diagrama elíptico originou valores de escoamento superiores para rampas rotativas com intensidades de aplicação elevadas (200 mm/h), e valores inferiores para rampas rotativas com taxas de aplicação menores (60 mm/h).

O cálculo do escoamento potencial com base no diagrama pluviométrico e na equação de infiltrabilidade do solo é um método simples para verificar a variação do

escorrimento provocada pela variação do tempo e/ou da taxa de aplicação das rampas rotativas com diferentes tipos de aspersores, caudais ou pressões de funcionamento. É também uma ferramenta que pode ter grande utilidade em termos de dimensionamento e gestão destes sistemas, e a maioria dos trabalhos utiliza-a para realizar estudos teóricos, sendo poucos os trabalhos onde são comparados os valores estimados com os observados em regas reais.

A limitação deste cálculo prende-se com o facto do mesmo ser geralmente feito apenas com uma equação da infiltrabilidade do solo, e como as características da infiltrabilidade variam ao longo da época de rega, os valores estimados dificilmente serão iguais aos observados durante as regas.

2.3. Principais factores que afectam a infiltração e o escoamento

2.3.1. Factores relativos às características da máquina

O dimensionamento e a gestão da rampa rotativa passam pela escolha de uma série de parâmetros e opções de funcionamento que irão directa ou indirectamente influenciar a infiltração da água aplicada e conseqüentemente a ocorrência ou não de escoamento.

A execução de um dimensionamento adequado, tendo em conta as características da cultura (períodos de ponta, necessidades hídricas ao longo do ciclo cultural) e do clima (probabilidade de ocorrência de precipitações durante o período de rega), pode conduzir a uma redução do caudal necessário no sistema e deste modo a uma redução da quantidade total de água aplicada, facilitando a sua infiltração.

A gestão da rampa rotativa deve ter em consideração as características da infiltração do solo, sendo por vezes necessário escolher velocidades de deslocamento mais elevadas, aplicando dotações de rega menores, e principalmente durante um tempo menor. Nesses casos, apesar do valor máximo da taxa de aplicação não se alterar, menos quantidade de água é aplicada a uma taxa superior à infiltrabilidade do solo, facilitando a sua infiltração (fig. 2.8).

Na figura 2.8 podem-se observar os diagramas pluviométricos para diferentes velocidades da rampa rotativa e a curva de infiltrabilidade do solo, ao longo do tempo. A partir do momento em que a intensidade de aplicação de água ultrapassa o valor da infiltrabilidade do solo, inicia-se o escoamento.

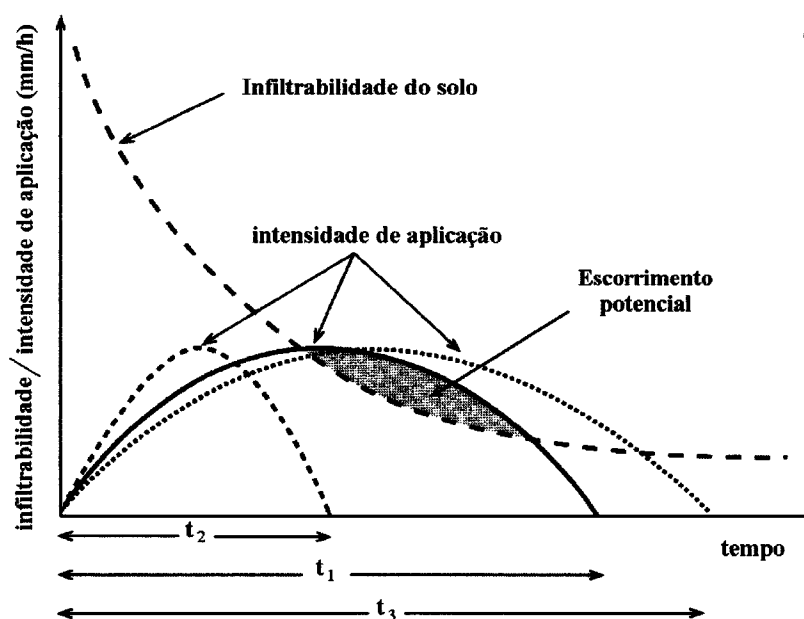


Figura 2.8 – Variação da dotação aplicada num ponto do terreno em função da velocidade ($v_3 < v_1 < v_2$) e do tempo de passagem ($t_3 > t_1 > t_2$) da rampa rotativa (Tarjuelo, 1999).

Este escoamento representado na figura 2.8 é denominado escoamento potencial, uma vez que não considera a possibilidade de armazenamento superficial do solo, que poderá diminuir ou mesmo evitar o escoamento.

Menores quantidades de água aplicada permitem uma maior percentagem de armazenamento, por parte do microrelevo do solo, da água que não é imediatamente infiltrada, diminuindo o escoamento. No entanto, dotações de rega menores implicam maior número de regas por época, o que poderá aumentar as perdas totais por evaporação e arrastamento pelo vento, diminuindo a eficiência global da rega. Além de acarretar maiores custos de funcionamento.

É assim necessário um compromisso entre a quantidade de água aplicada em cada rega (minimizando o escoamento) e o número total de regas (minimizando as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento e os custos de funcionamento da rampa rotativa).

Outro factor que exerce uma influência significativa é a pressão de funcionamento da rampa rotativa, que conjugada com o tipo de aspersor irá influenciar a intensidade pluviométrica dos aspersores, que pode ser ou não compatível com a infiltrabilidade do solo.

Diversos autores (Undersander *et al.*, 1985; DeBoer *et al.*, 1992) verificaram uma diminuição da infiltração e aumento de escoamento com a diminuição da pressão de funcionamento dos aspersores. Os menores valores de pressão dos sistemas de baixa pressão fazem com que o alcance das gotas de água seja menor, o que implica uma aplicação da mesma quantidade de água numa área mais reduzida, ou seja, uma intensidade de aplicação maior.

Deste modo, a utilização de sistemas de rega de baixa pressão veio agravar substancialmente os problemas de escoamento, principalmente quando a rega se faz em terrenos inclinados.

Esta diminuição da infiltração é também devida a um efeito indirecto da pressão de funcionamento e do tipo de aspersor que é a formação de crosta superficial no solo pelo impacto das gotas de água. Diferentes pressões de funcionamento, e aspersores, originam gotas de diferentes tamanhos, aplicadas com intensidades diferentes, cuja energia cinética pode causar maior ou menor compactação superficial do solo, causando alterações na sua infiltrabilidade, conforme se verá mais à frente.

2.3.1.1. A formação das gotas de água nos aspersores

A distribuição de tamanhos das gotas dos jactos dos aspersores é de grande importância fundamentalmente por duas razões (Heermann & Kohl, 1983): i) as gotas pequenas estão mais sujeitas à evaporação e arrastamento pelo vento, o que provoca a distorção do padrão de distribuição; ii) as gotas grandes possuem maior energia cinética que é transferida para a superfície do solo, provocando a quebra dos agregados e o destacamento de partículas do solo, o que pode resultar na compactação e formação de crosta superficial.

A selecção de um aspersor para um determinado tipo de solo, declive, cultura e condições climáticas beneficiará de um bom conhecimento dos tamanhos das gotas (Kincaid *et al.*, 1996).

A dimensão e quantidade de gotas de água que se formam à saída dos aspersores depende de diferentes características do aspersor e das suas condições de funcionamento. Entre as características do aspersor que influenciam a formação de diferentes tipos de gotas estão o tamanho e forma do bico e o tipo de deflector. As condições de funcionamento estão relacionadas com o caudal e a pressão de serviço.

Geralmente o tamanho das gotas aumenta com bicos maiores e/ou pressões menores, não sendo fácil dissociar a influência destes dois factores na formação dos diferentes tamanhos de gotas.

Kohl (1974), estudando aspersores rotativos de tamanho médio, verificou uma diminuição no tamanho das gotas com a diminuição do tamanho do bico do aspersor, mas que era bastante inferior à diminuição provocada pelo aumento de pressão.

No caso dos aspersores rotativos de impacto (fig. 2.3) as duas fontes de formação de gotas são (Von Bernuth & Gilley, 1984): i) o próprio jacto pressurizado e ii) a acção do braço deflector do aspersor ao interromper o jacto.

O jacto de água que sai por um orifício para a atmosfera acabará por se dividir em gotas devido à perturbação da sua forma inicial. A turbulência própria da coluna de água, que deixa de ter uma fronteira rígida após a saída do orifício, faz com que a superfície do jacto se separe do seu núcleo. Após esta separação, a superfície do jacto começa então a sofrer a acção do ar, que provoca a sua quebra em gotas. À medida que maior turbulência arrasta a água lateralmente a partir do centro do jacto, a acção do ar impede o avanço da água longitudinalmente, mas esta continua a espalhar-se lateralmente (Kohl, 1974).

Merrington & Richardson (1947), citados por Kohl (1974), verificaram que o diâmetro médio das gotas formadas pela rotura dos jactos é inversamente dependente da velocidade do jacto relativamente ao ar circundante. Assim sendo, a água junto à periferia do jacto originará gotas pequenas enquanto que a água junto ao núcleo do jacto, com velocidade *relativa* mais baixa, produzirá as gotas mais grossas.

Nos aspersores estáticos existem as mesmas duas fontes de formação de gotas, o jacto e o deflector, sendo a diferença apenas no facto de que neste caso não existe uma interrupção do jacto pelo deflector do aspersor, que é estático. Será fundamentalmente a forma do prato deflector (fig. 2.9) que influenciará o tamanho das gotas que se formam.

Kohl & DeBoer (1984) realizaram vários testes com aspersores estáticos, utilizando diversos diâmetros de bicos, pressões de funcionamento e pratos deflectores lisos e estriados convexos. Concluíram que a distribuição de gotas é mais sensível a mudanças no diâmetro do orifício do que a alterações na pressão de funcionamento. Esta conclusão, diferente da verificada por Kohl (1974), que referia a pressão como principal factor da alteração do tamanho das gotas, deve-se a que, no caso dos aspersores estáticos, a pressão de funcionamento é geralmente baixa, pelo que a sua variação é muito menor que no caso dos aspersores rotativos.

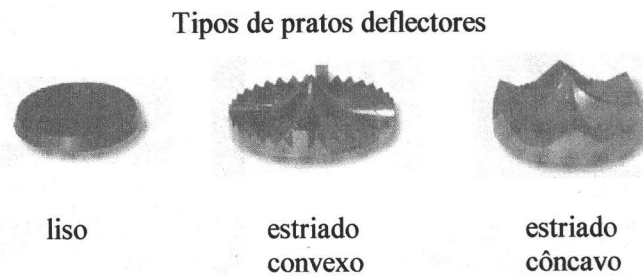
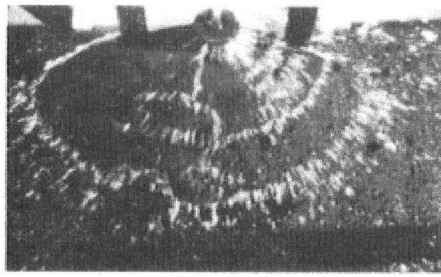


Figura 2.9 – Tipos de pratos deflectores utilizados nos aspersores estáticos (Scherer *et al.*, 1999).

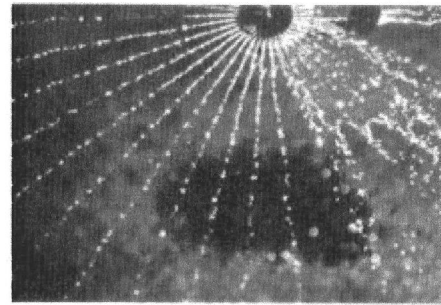
O tipo de pratos deflectores apresenta também um efeito maior na formação de gotas do que as variações de pressão (entre 50 e 200 kPa).

Segundo Prasuhn (1980), citado por Kohl & DeBoer (1984), um jacto de água cilíndrico saindo verticalmente por um orifício e embatendo num prato liso manterá a sua velocidade inicial à medida que se espalha na forma de um disco. A turbulência intrínseca ao jacto origina pequenas ondas na superfície desse disco, iniciando-se a sua rotura ao longo do arco de uma dessas ondas. Forma-se então uma teia circular de água que se espalha rapidamente, formando um corpo em forma de anilha. A acção da tensão superficial e de pequenas perturbações, estendendo-se radialmente a partir do centro do disco e que provocam diferenças na sua espessura, dá origem a linhas ao longo das quais se formam gotas de água durante o colapso deste corpo em forma de anilha. Quanto mais elevada for a velocidade da água mais pequenas serão as gotas resultantes.

O impacto do jacto de água num prato deflector estriado com ranhuras suficientemente fundas, divide o disco de água resultante em pequenos jactos individuais, produzindo um padrão de rotura diferente do deflector liso. Agora, cada pequeno jacto pode ser considerado um jacto cilíndrico. Uma vez que os jactos resultantes são muito menores em diâmetro e se deslocam a uma velocidade menor que o jacto de um aspersor de impacto, a rotura parece ser controlada em grande medida pela tensão superficial e menos pelo atrito com o ar. Os pequenos jactos tendem a dividir-se numa cadeia de gotas. À medida que o tamanho do bico do aspersor aumenta, os pequenos jactos de água também aumentam em diâmetro e a sua rotura resulta num espectro maior de tamanhos de gotas.



A



B

Figura 2.10 – Rotura de um jacto de água de um aspersor estático com um deflector liso (A) ou estriado (B) (Kohl & DeBoer, 1984).

À medida que o caudal aumenta, excedendo a capacidade do prato deflector estriado, a divisão do jacto em jactos individuais torna-se incompleta originando um padrão de rotura mais complexo (lado direito da figura 2.10 B). Nesses casos, o disco de água que emana do prato varia em espessura, iniciando-se a rotura numa direcção radial. São produzidas algumas gotas pequenas, semelhantes às dos deflectores lisos, enquanto que roturas típicas dos deflectores estriados ocorrem ao longo do raio de ranhuras.

2.3.1.1.1. A energia cinética das gotas

A energia cinética por unidade de massa de uma gota de água que embate no solo depende da sua velocidade de impacto e pode ser determinada por:

$$Ec_g = \frac{v_{ig}^2}{2} \quad (2.33)$$

sendo, Ec_g , a energia cinética por unidade de massa (J/kg); e v_{ig} , a velocidade de impacto das gotas de água no solo (m/s).

Para a determinação da velocidade de impacto da gota de água no solo, pode-se utilizar a teoria da balística aplicada a uma gota de água (Vories *et al.*, 1987).

O movimento de uma gota de água é influenciado pela sua velocidade inicial, pela acção da gravidade e pelas forças de atrito entre o ar e a água.

Aplicando a equação fundamental da dinâmica a uma gota em movimento:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.34)$$

e, sendo as forças que actuam sobre o volume definido pela gota o peso próprio e as forças de superfície, obtém-se uma equação diferencial que descreve o movimento da gota:

$$m_g \vec{g} + V_g \rho_{ar} \vec{g} + \vec{F}_D = m_g \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.35)$$

sendo, m_g – massa da gota (kg);

\vec{g} – aceleração da gravidade (m/s^2);

ρ_{ar} – massa específica do ar (kg/m^3);

V_g – volume da gota (m^3);

\vec{F}_D – forças de atrito (N);

\vec{v} – velocidade da gota (m/s)

Decompondo a equação anterior segundo as direcções horizontal e vertical, e tomando como positivo o sentido da gravidade, obtém-se as seguintes equações:

$$-F_{D_x} = m_g \frac{dv_x}{dt} \quad (2.36)$$

$$m_g g - V_g \rho_{ar} g - F_{D_z} = m_g \frac{dv_z}{dt} \quad (2.37)$$

com as variáveis já definidas e os índices x e z indicando respectivamente a componente horizontal e vertical.

Seginer (1965) refere que a aceleração de arrastamento do ar, que influencia uma gota poderá ser aproximada por:

$$\vec{f} = C_2 \vec{v}_r^2 \quad (2.38)$$

onde, \vec{f} – aceleração de arrastamento (m/s^2);

\vec{v}_r – velocidade da gota relativa ao ar (m/s);

C_2 – coeficiente de arrastamento (m^{-1}).

As forças de atrito que afectam a gota, \vec{F}_D , podem então ser escritas como:

$$\vec{F}_D = m_g C_2 \vec{v}_r^2 \quad (2.39)$$

sendo o valor de C_2 , definido por Seginer (1965):

$$C_2 = \frac{C_D \rho_{ar} A_p}{2 m_g} \quad (2.40)$$

em que, C_2 – coeficiente de arrastamento de Seginer (m^{-1});

C_D – coeficiente de arrastamento de uma gota (adimensional);

A_p – área projectada da gota (m^2);

ρ_{ar} – massa específica do ar (kg/m^3);

m_g – massa da gota (kg).

A substituição das equações (2.39) e (2.40) nas equações (2.36) e (2.37) permite voltar a escreve-las como:

$$-m_g \frac{C_D \rho_{ar} A_p}{2 m_g} v_{rx}^2 = m_g \frac{dv_x}{dt} \quad (2.41)$$

$$m_g g - V_g \rho_{ar} g - m_g \frac{C_D \rho_{ar} A_p}{2 m_g} v_{rz}^2 = m_g \frac{dv_z}{dt} \quad (2.42)$$

Se se considerar que a gota de água tem uma forma esférica, então as equações anteriores podem voltar a ser escritas na forma:

$$-\frac{3}{4}C_D \rho_{ar} d^2 v_{rx}^2 = \rho_g d^3 \frac{dv_x}{dt} \quad (2.43)$$

$$\rho_g g d^3 - \rho_{ar} g d^3 - \frac{3}{4}C_D \rho_{ar} d^2 v_{rz}^2 = d^3 \rho_g \frac{dv_z}{dt} \quad (2.44)$$

onde d é o diâmetro da gota (m) e ρ_g a massa volúmica da gota (kg/m^3).

Simplificando podem ainda ser escritas como:

$$-\frac{3}{4}C_D \rho_{ar} v_{rx}^2 = \rho_g d \frac{dv_x}{dt} \quad (2.45)$$

$$g d (\rho_g - \rho_{ar}) - \frac{3}{4}C_D \rho_{ar} v_{rz}^2 = d \rho_g \frac{dv_z}{dt} \quad (2.46)$$

Finalmente, para resolver estas equações diferenciais é ainda necessário determinar o coeficiente de arrastamento, C_D .

Este parâmetro está relacionado com o número de Reynolds de uma gota, Re :

$$Re = \frac{d v_r}{\nu} \quad (2.47)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do ar (m^2/s), v_r a velocidade da gota relativa ao ar (m/s) e d o diâmetro da gota (m).

A descrição da relação entre o coeficiente de arrastamento e o número de Reynolds é feita por Park *et al.* (1982), que baseados na análise de dados recolhidos em outros trabalhos, verificaram que o coeficiente de arrastamento diminui à medida que Re aumenta até cerca de 1000, e depois aumenta devido à deformação das gotas de água maiores. Assim sendo, pode-se determinar o valor de C_D através de:

$$C_D = (24 / Re) (1 + 0,15 Re^{0,687}) \quad \text{para } Re \leq 1000 \quad (2.48)$$

e

$$C_D = 0,438 \left[1 + 0,21 \left(\frac{Re}{1000} - 1 \right)^{1,25} \right] \quad \text{para } Re > 1000 \quad (2.49)$$

As equações (2.45) e (2.46) podem então ser resolvidas através de métodos numéricos, obtendo-se o valor da velocidade de impacto da gota de água no solo.

2.3.2. Factores climáticos

Sendo a rega por aspersão um método em que a água antes de chegar ao solo entra em contacto com a atmosfera, é fácil deduzir que as condições climatéricas poderão afectar a quantidade de água que chega ao solo, influenciando indirectamente a infiltração e o escoamento.

O efeito do vento arrastando a água aplicada pela máquina numa zona do terreno para outra já regada, além de afectar a uniformidade da rega, poderá dificultar a sua infiltração e dar origem ao escoamento.

Os factores climáticos irão também provocar perdas de água por evaporação e arrastamento pelo vento, diminuindo a qualidade da rega.

2.3.2.1. Perdas de água por evaporação e arrastamento pelo vento

As perdas por evaporação e arrastamento pelo vento dependem não só dos factores climáticos (humidade relativa e temperatura do ar, velocidade do vento) como também de alguns factores da máquina (tamanho das gotas formadas nos aspersores e altura do aspersor ao solo).

Encontram-se na literatura diversos trabalhos sobre as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento em sistemas de rega por aspersão, que apresentam valores com diferentes ordens de grandeza. Estas diferenças devem-se ao rigor das técnicas experimentais utilizadas na medição das perdas e a diferenças nos conceitos de evaporação e perdas por arrastamento pelo vento (Kohl *et al.*, 1987).

Solomon (1979) apresenta uma lista de factores que podem contribuir para os diferentes valores de uniformidade apresentados nos vários trabalhos encontrados na

literatura. Este autor divide os factores em dois tipos: i) as incertezas devidas ao método experimental, nomeadamente as imprecisões nas diferentes medições (água recolhida nos pluviómetros, pressão, velocidade do vento, etc) executadas durante o teste de uniformidade; e ii) o que chama “a razão pela qual condições *idênticas* podem não ser realmente idênticas”. Por exemplo, o facto de dois aspersores serem do mesmo modelo não implica que não sejam unidades físicas diferentes, podendo apresentar pequenas diferenças, na passagem da água, no deflector, que podem influenciar significativamente a água após a sua saída do aspersor. No entanto, a maior parte das razões pelas quais condições “idênticas” não são na realidade idênticas, envolvem as condições climáticas. A mesma velocidade do vento pode provocar efeitos diferentes sobre a água que sai de um aspersor, se se considerarem a direcção do vento e a sua variabilidade.

Kohl *et al.* (1987) apresentam um resumo de diferentes estudos sobre perdas, desde 1942 até 1984. Nos trabalhos experimentais verificam-se valores entre 2 a 40 %, com grande parte dos valores entre os 10 e 20 %, enquanto que nos trabalhos analíticos e de laboratório os valores variam entre 1 e 2 %.

Os mesmos autores realizaram ensaios experimentais utilizando uma rampa de translação linear, equipada com aspersores estáticos com deflectores lisos e estriados, e uma pressão de funcionamento de 100 kPa. Utilizaram um marcador químico e através da diferença de concentração do marcador na água aplicada e na água recolhida, determinaram as perdas por evaporação. Verificaram que os valores de perdas por evaporação eram sempre inferiores a 1,5 %, com valores maiores no caso dos aspersores com deflectores lisos, para velocidades do vento entre 4,7 e 9,7 m/s, humidades relativas entre 54 e 72 % e temperaturas do ar entre 21 e 30 ° C. De notar, no entanto, que estes valores dizem respeito apenas às perdas por evaporação e não consideram as perdas por arrastamento pelo vento.

Heerman & Kohl (1983) verificaram que as perdas por evaporação aumentavam com a temperatura da água, apesar de que para os valores de temperatura normalmente encontrados na água de rega, o potencial de evaporação será inferior a 1 % na rega por aspersão em zonas semi-áridas. Referem ainda que as perdas por evaporação do aspersor são pequenas quando comparadas com as outras perdas, como a evaporação nos pluviómetros utilizados nos testes de uniformidade ou as perdas por arrastamento pelo vento. Também Seginer (1971b), citado por Edling (1985), verificou, em aspersores estáticos, que a evaporação é muito pequena quando comparada com as perdas por arrastamento pelo vento.

Keller & Bliesner (1990) apontam valores entre os 5 e 10 % para as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento, em condições climatéricas normais, podendo aumentar no caso de condições climatéricas adversas.

Mueller & Kidder (1972), citados por Livingston *et al.* (1985), estudaram as perdas em pluviómetros colocados num túnel de vento e utilizaram um modelo de computador para determinar essas perdas. Estes autores demonstraram que o tamanho da gota é um factor muito importante, tendo determinado perdas desde os 0 % (para gotas de 5 mm de diâmetro) até 95 % (para gotas de 1 mm de diâmetro), com velocidades de vento até 15 m/s.

Tarjuelo *et al.* (1998) estudaram o efeito da altura do aspersor em relação ao solo, em rampas rotativas em zonas semi-áridas, no sul de Espanha. Executaram cerca de 60 avaliações em regas realizadas tanto de noite como de dia, com diferentes condições climatéricas. Os seus resultados mostram que durante as regas no período nocturno os melhores valores de uniformidade (91 %) foram conseguidos com o aspersor no topo da rampa, a 4 m do solo, diminuindo com a aproximação do aspersor ao solo, sendo de apenas 78 % com o aspersor a 1 m do solo. Estas diferenças são devidas, no caso dos aspersores estáticos utilizados, ao facto de que, à medida que o aspersor está mais perto do solo deixa de haver uma altura suficiente para se completar a rotura do jacto de água emitido. Isto faz com que determinados pontos do terreno recebam mais água que outros, diminuindo a uniformidade da rega.

Durante o dia, a uniformidade dos aspersores colocados a 1 m do solo aumenta, pois o vento tem um forte efeito sobre o processo de rotura do jacto de água do aspersor, resultando numa distribuição da água mais uniforme. A 4 metros do solo a uniformidade durante o dia varia pouco relativamente aos valores nocturnos.

Tarjuelo *et al.* (1998) aconselham uma altura do solo de cerca de 2 m, o que permitirá beneficiar de uma diminuição das perdas por evaporação e arrastamento pelo vento e continuar a ter uma altura suficiente para o padrão de distribuição da água ser uniforme.

2.3.3. Características do terreno

O sistema de mobilização do solo utilizado e o declive do terreno afectam muito directamente o processo da infiltração da água no solo e o escoamento. O primeiro vai influenciar, por um lado, alguns dos factores do solo (estrutura, teor de água, condutividade hidráulica, formação da crosta) dos quais depende a sua infiltrabilidade, e por outro, a

rugosidade superficial e a capacidade de armazenamento de água à superfície do solo. O segundo irá facilitar o escoamento da água aplicada em excesso.

2.3.3.1. O efeito da mobilização do solo

Encontram-se na literatura trabalhos sobre a influência da mobilização na infiltração da água no solo e o escoamento realizados nos anos sessenta, geralmente associados aos estudos sobre a rugosidade superficial do solo (Burwell *et al.*, 1963; Burwell & Larson, 1969) e a erosão.

Burwell & Larson (1969) ao estudarem os efeitos de diferentes tipos de mobilizações num solo franco e num solo franco-argilo-arenoso, verificaram que era necessária maior quantidade e energia de precipitação acumulada para se iniciar o escoamento nas superfícies mobilizadas com charrua relativamente a outros tipos de mobilizações que utilizavam grades de discos, escarificadores ou alfaias rotativas, ou ainda a solos não mobilizados. Isto devia-se a que a charrua deixava a superfície do terreno com mais rugosidade e porosidade.

Antes de se iniciar o escoamento, as diferenças na rugosidade superficial devidas ao tipo de mobilização eram as responsáveis por grande parte da variação na infiltração. Durante o período de escoamento a infiltração apresentou valores idênticos em todos os tratamentos. O aparecimento de compactação e crosta superficial, que se forma como consequência da precipitação e do escoamento, muitas vezes acaba por mascarar os efeitos da rugosidade superficial e do tipo de porosidade produzidos pelos diferentes tipos de mobilização do terreno (Burwell & Larson, 1969).

Steichen (1984) também refere a existência de menos escoamento num solo argiloso mobilizado com charrua em relação à sementeira directa no mesmo solo.

Segundo DeBoer & Beck (1991), em 1976 a Sociedade Americana de Conservação do Solo define a mobilização conservativa como “qualquer tipo de sistema de mobilização que reduza a perda de solo e água comparada com a mobilização sem sulcos ou limpa”. Estes autores referem uma série de trabalhos dos anos setenta segundo os quais a mobilização conservativa aumenta a infiltração da água no solo e diminui o escoamento quando comparada com a mobilização convencional.

Undersander *et al.* (1985) verificaram a diminuição de escoamentos em solos regados por rampas rotativas onde se utilizou mobilização mínima ou subsolagem profunda, quando

comparados com os sistemas de mobilização convencional. Em relação à mobilização mínima referem a existência de menor compactação superficial devido a um menor número de passagens das máquinas relativamente à mobilização tradicional.

No entanto, algumas práticas conservativas, como a sementeira directa, não se têm mostrado consistentes na redução do escoamento. A literatura refere trabalhos como os de Mickelson *et al.* (1983) que verificaram que alguma mobilização era benéfica na redução do escoamento e que a sementeira directa produzia a maior quantidade de escoamento num solo arenoso-franco. À mesma conclusão chegaram outros autores citados por DeBoer *et al.* (1987).

Basch & Carvalho (1998) verificaram a existência de menos escoamento, num solo Mediterrâneo regado com uma rampa rotativa, quando se utilizou a sementeira directa relativamente à mobilização convencional (charrua ou grade de discos). Apesar disso as diferenças não foram estatisticamente significativas. Significativas foram no entanto as diferenças entre o pico do caudal de escoamento da mobilização convencional (62 l/s m^2) e o da sementeira directa (46 l/s m^2). Esta diferença explica o facto de existir maior quantidade de sedimentos arrastados na mobilização convencional.

À medida que aumenta a taxa de escoamento a sua velocidade também aumenta. Isto provoca o aumento da capacidade de transporte, e nalguns casos, o destacamento de mais partículas como resultado das forças de corte entre a água escoada e a superfície do solo (Basahi *et al.*, 1998).

Um dos principais benefícios apontados à mobilização mínima e/ou à sementeira directa é a presença de maior quantidade de resíduos à superfície do solo após a mobilização. Os resíduos protegem o solo da energia de impacto das gotas de água, havendo menos destruição dos agregados do solo e menor tendência para a formação de crosta superficial e erosão do solo. Gilley *et al.* (1986) verificaram que o escoamento aumentava com a diminuição dos resíduos à superfície num solo franco-limoso.

Kranz *et al.* (1991) também referem o efeito protector da superfície do solo que têm os resíduos. Além de proteger o solo da energia de impacto das gotas de água, eles aumentam a rugosidade superficial, o que ajuda a dissipar a energia do escoamento, reduzindo a erosão. Este efeito dos resíduos também influencia a infiltração, pois aumenta a capacidade do solo para reter água na sua superfície, proporcionando-lhe mais tempo para ela se poder infiltrar.

Em sistemas de mobilização em que o solo fica sem resíduos à superfície, a utilização de palhas ou restos aplicados superficialmente, antes da rega, pode conduzir a uma diminuição do escoamento e a um aumento da infiltração (Oliveira *et al.*, 1987).

DeBoer *et al.* (1987) estudaram vários sistemas de mobilização com duas operações diferentes em cada técnica de mobilização, em solos regados por aspersão. Chegaram à conclusão de que a interação entre a mobilização primária (antes da sementeira) e a secundária (após a emergência) tinha um efeito significativo sobre o escoamento. O menor valor de escoamento foi encontrado no sistema de mobilização resultante da combinação entre uma gradagem (antes da sementeira) e uma escarificação na entrelinha (após a emergência). A gradagem produziu menos 40 % de escoamento do que a lavoura ou a sementeira directa, que não apresentaram diferenças entre elas. A mobilização na entrelinha reduziu o escoamento em cerca de 2/3 quando comparada com a testemunha.

Beck & DeBoer (1992) citam diversos autores para referir que mobilizações profundas ou mobilizações abaixo da mobilização primária (ou principal) são uma das técnicas utilizadas para aumentar a infiltração e o armazenamento de água no solo. Esta mobilização profunda pode ser uma prática efectiva quando existe uma camada compacta no perfil do solo. Nos seus trabalhos, verificaram uma redução do escoamento de cerca de 75% quando utilizaram uma prática de mobilização na entrelinha da cultura, a uma profundidade de 25-30 cm, imediatamente após uma mobilização superficial (5 cm) do terreno. Esta operação foi altamente eficaz no início, apesar de ter perdido parte da sua eficácia durante a época de rega.

2.3.3.2. A rugosidade superficial do solo

A maioria dos terrenos, mesmo aqueles que parecem planos, apresentam na sua superfície pequenas depressões ou rugosidade, frequentemente referida como micro relevo do solo. No caso dos solos agrícolas, este micro relevo é o resultado das operações de mobilização.

A rugosidade superficial do solo controla muitos processos de transferência na, e através da fronteira da superfície do solo, como por exemplo a infiltração, o escoamento, o destacamento do solo pela água e pelo vento, a evaporação e o fluxo de calor do solo (Huang & Bradford, 1992).

2.3.3.2.1. Tipos de rugosidade e a sua quantificação

Allmaras *et al.* (1966) foram talvez os primeiros a distinguir dois tipos diferentes de rugosidade superficial provocada pela operação das máquinas agrícolas: a rugosidade *orientada* e a *aleatória*.

A *rugosidade orientada* é caracterizada pelos sulcos e camalhões formados pelos rodados dos tractores e pela acção das alfaias agrícolas. A *rugosidade aleatória* caracteriza-se pela variação de cotas que ocorre aleatoriamente na superfície do solo, sendo impossível distinguir a direcção em que ocorreram as operações culturais.

Römken & Wang (1986) dividem a rugosidade superficial em 4 tipos diferentes, em função da sua magnitude, mas que acabam por englobar-se nos dois conceitos anteriores.

Kuipers (1957) foi um dos primeiros investigadores a dedicar-se ao estudo da rugosidade do solo descrevendo um aparelho simples para a medição do perfil da superfície do solo e um método para a determinação da rugosidade superficial do solo. Admitiu que a distribuição das alturas das elevações do solo, depois de corrigidas com o seu valor médio e obtido um conjunto de alturas relativas a um determinado nível, era uma distribuição normal, e definiu a rugosidade do solo através da seguinte expressão:

$$R = 100 \log_{10} \sigma \quad (2.50)$$

em que R é a rugosidade em centímetros, e σ o desvio padrão das observações realizadas.

Se o desvio padrão fosse expresso em cm, o seu logaritmo iria variar entre 0,01 e 1,00. Para evitar valores decimais a rugosidade foi definida como 100 vezes o logaritmo decimal do desvio padrão das alturas em cm. A introdução do logaritmo das alturas em vez das próprias alturas teve como objectivo tornar a rugosidade independente da magnitude do desvio padrão, uma vez que a exactidão da medida da rugosidade era diferente para valores altos e baixos das medições (Kuipers, 1957).

A principal crítica apontada a este parâmetro é o facto de ele não contar com a rugosidade provocada pelas máquinas e alfaias agrícolas (Lehrsch *et al.*, 1988).

Burwell *et al.* (1963) foram os primeiros autores a introduzir a expressão *rugosidade aleatória* (“random roughness”), RR , para descrever a variação de cotas que ocorre no solo de forma aleatória. Apesar de terem utilizado o mesmo tipo de aparelho para medir a rugosidade superficial do solo, o método de cálculo que propuseram diferia em alguns aspectos do

utilizado por Kuipers (1957). Definiram a expressão rugosidade aleatória como sendo o erro padrão do logaritmo natural das alturas medidas, em relação a um plano de referência. Tendo também demonstrado que a distribuição do logaritmo das alturas era uma distribuição normal. A componente “aleatória” das medições das alturas foi obtida removendo matematicamente a variação devida à “orientação” das alfaias.

Allmaras *et al.* (1966) descreveram um método similar ao de Burwell *et al.* (1963) para determinar a rugosidade aleatória, diferindo do anterior porque os efeitos do declive e das marcas orientadas provocadas pelas alfaias eram removidos matematicamente como componentes da variação entre os logaritmos das alturas. Adicionalmente os valores extremos das medições (os 10 % mais altos e os 10 % mais baixos) eram eliminados de modo a reduzir o efeito do erro nas medições.

O índice da rugosidade aleatória, RR , era estimado como:

$$RR \cong \sigma_x \bar{z} \quad (2.51)$$

onde σ_x é o erro padrão entre os logaritmos das alturas e \bar{z} é a altura média.

Currence & Lovely (1970) apresentam 5 índices diferentes para a determinação da rugosidade superficial:

- o primeiro é semelhante ao utilizado por Luttrell (1963), sendo calculado como a soma das diferenças absolutas do declive entre as alturas extremas medidas perpendicularmente à direcção da mobilização;

- o segundo segue a metodologia de Allmaras *et al.* (1966);

- no terceiro consideram o desvio padrão das alturas não corrigidas e utilizam-no como base de comparação dos métodos em que se procedia à correcção do efeito do declive;

- para a determinação do quarto índice foi calculado um plano de regressão utilizando o processo de regressão linear múltipla. As diferenças entre as alturas medidas e o plano de regressão são então determinadas, e o desvio padrão desses valores residuais é calculado como um índice de rugosidade.

- No quinto índice o declive é removido através da correcção de cada altura para os valores médios da linha e da coluna respectiva. O valor do índice corresponde ao desvio padrão das alturas corrigidas.

Depois de compararem estatisticamente os resultados obtidos por todos os índices recomendam a utilização do quarto índice. Este índice difere do proposto por Burwell *et al.*

(1963), por se utilizar o desvio padrão em vez do erro padrão, e não se proceder à transformação logarítmica das alturas, e difere do índice proposto por Allmaras *et al.* (1966) por, além das diferenças anteriores, também não se proceder à eliminação dos 10 % de valores extremos. Deste modo, Currence & Lovely (1970) colocam em causa a necessidade da transformação logarítmica dos valores das alturas, apenas considerando a correcção do efeito do declive.

Apesar de durante os anos oitenta diferentes autores (Römkens & Wang, 1986; Linden & Van Doren, 1986; Lehrs *et al.*, 1988) apresentarem outros índices para medir a rugosidade superficial, a maioria dos estudos continuou a utilizar a metodologia de Allmaras *et al.* (1966) como procedimento padrão para a quantificação da rugosidade superficial.

No entanto, em muitos trabalhos, que citam Allmaras *et al.* (1966) ou Burwell *et al.* (1963) como fonte, é difícil ter a certeza se efectivamente se seguiu na íntegra a metodologia proposta por aqueles autores. Muitas vezes é referida a utilização do desvio padrão dos valores medidos em vez do erro padrão; as alturas podem ou não ter sido convertidas em logaritmos naturais ou ainda os ajustamentos referentes ao declive, aos valores extremos e às marcas das alfaias poderão ou não ter sido realizados (Zobeck & Onstad, 1987).

Linden & Van Doren (1986) apresentam várias críticas aos métodos de cálculo da rugosidade superficial já referidos. Para estes autores, os índices baseados no desvio padrão das alturas medidas apresentam limitações. Não são geralmente relacionáveis com uma descrição física da superfície (ou seja, área da superfície ou relevo *versus* a distância horizontal). Referem ainda que os índices estatísticos dependem da função de distribuição escolhida, do espaçamento entre as elevações, da dimensão da amostra, e de aspectos característicos como as marcas dos rodados dos tractores e o declive do terreno. São úteis, no entanto, porque são simples de calcular e podem servir para caracterizar os diferentes sistemas de mobilização (Linden & Van Doren, 1986).

Do resultado do seu trabalho surgiram dois parâmetros de configuração da superfície, o declive limitante (*LS*) e a diferença de elevações limitante (*LD*), baseados no declive ou inclinação da superfície dos torrões do solo e no relevo médio (diferença de cotas). O cálculo destes parâmetros baseia-se num processo de análise da variabilidade espacial denominado análise da média absoluta da diferença de cotas. Esta média absoluta da diferença de cotas, Δz_j , é definida como:

$$\Delta z_j = \sum_{i=1}^n \frac{|z_i - z_{i+j}|}{n} \quad (2.52)$$

onde z_i é a cota de um ponto e z_{i+j} a cota de um ponto com um intervalo j do ponto z_i , e n o número de pontos. A relação entre Δz_j , e a distância do intervalo, ΔX_j , é obtida a partir de uma regressão linear dos seus recíprocos:

$$1/\Delta z_j = b_L (1/\Delta X_j) + a_L \quad (2.53)$$

onde a_L e b_L são constantes de ajustamento. Os parâmetros LD e LS correspondem aos valores recíprocos de a_L e b_L , respectivamente:

$$LD = 1 / a_L, \quad (2.54)$$

$$LS = 1 / b_L. \quad (2.55)$$

Estes parâmetros têm significado físico e não apresentam limitações no que respeita à sua distribuição estatística.

Entre as conclusões mais importantes apresentadas por Linden & Van Doren (1986) está o facto da hipótese da distribuição de alturas seguir uma distribuição normal, como sugerido por Allmaras *et al.* (1966), ter sido inválida para uma série de amostras, mesmo depois da transformação logarítmica.

Römkens & Wang (1986) definiram a rugosidade superficial através de um parâmetro adimensional, R_I , calculado pelo produto:

$$R_I = IM F_f \quad (2.56)$$

onde IM é um índice do microrelevo, mm, e F_f é o factor do pico de frequência, mm^{-1} . O índice do microrelevo é a área por unidade de comprimento entre a superfície medida do perfil e a linha de regressão dos mínimos quadrados obtida a partir de todas as cotas medidas num transepto. O pico de frequência é o número da cota máxima por unidade de comprimento do transepto.

Deste modo, R_l representa o efeito integrado do pico de frequência e a magnitude da cota da superfície relativa a um plano de referência liso. IM e F_f podem ser vistos, respectivamente, como medições do tamanho e frequência dos agregados do solo (Römkens & Wang, 1987).

Actualmente continua a não existir um consenso sobre o melhor índice a utilizar, continuando a realizar-se trabalhos como os de Bertuzzi *et al.* (1990b) ou Hansen *et al.* (1999) onde são analisados os diferentes índices já referidos e mais alguns, sem se chegar a uma resposta conclusiva.

Segundo Huang & Bradford (1992) uma questão adicional que tem sido ignorada ao quantificar a rugosidade da superfície do solo é a dimensionalidade. O termo rugosidade aleatória tem sido largamente utilizado para descrever a microtopografia do solo sem referência a uma escala espacial específica. Este tipo de utilização do conceito da rugosidade aleatória pode ser enganador porque a rugosidade superficial pode parecer aleatória a uma escala mas de um modo ordenado a outra escala. Qualitativamente, pode-se esperar uma maior variação na topografia da superfície à medida que aumenta a área analisada. Assim, um modelo descritivo da rugosidade do solo deverá ter características dependentes da escala.

Muitos dos conjuntos de dados existentes e referidos na literatura, foram recolhidos por perfilómetros ao longo de um transepto e, em muitos casos, apenas um pequeno número de transeptos foi medido. Análises baseadas apenas num perfil produzem valores pouco fiáveis da superfície do solo (Huang & Bradford, 1992). Quando os dados do perfil são examinados, um pico existente num perfil de solo é geralmente não o local mais elevado mas uma saliência. A mesma analogia aplica-se a vales e depressões locais. Para quantificar a rugosidade superficial, é importante incluir estes picos e depressões porque, para muitos processos físicos, os maiores efeitos da superfície advém destes extremos da elevação. Assim, um termo relacionado com a variância, tal como a rugosidade aleatória, calculado a partir de um perfil simples subestimar a rugosidade da superfície.

O desenvolvimento da tecnologia de medição da superfície do solo, conduziu à possibilidade de se obter grandes conjuntos de dados, normalmente em grelhas milimétricas. Isto permitiu, por exemplo, a Huang & Bradford (1992) quantificar a rugosidade superficial do terreno utilizando uma combinação de modelos fractais e Markov-Gaussianos a diferentes escalas. A utilização destes modelos implica a recolha de modelos digitais do terreno, possível com o recurso a aparelhos laser que executam medições com espaçamentos de 1 mm.

Um dos mais recentes índices de rugosidade referidos na literatura é o índice *MUD*, proposto por Hansen *et al.* (1999). Este índice baseia-se na diferença de cota ($z_r - z_i$) entre um ponto de referência (z_r) e outros pontos (z_i) numa mesma linha recta com uma direcção de baixo para cima em relação ao ponto de referência. Em cada segmento de recta, o processo de cálculo é iterativo, tomando de cada vez um novo ponto numa posição mais acima como ponto de referência:

$$MUD = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \left(\sum_{j=1}^n \Delta z / n \right)}{n_s} \quad (2.57)$$

onde $\Delta z = z_r - z_i$ para $z_i < z_r$; $\Delta z = 0$ para $z_i \geq z_r$; n é o número de pontos num segmento de recta e n_s é o número de segmentos da recta.

Deste modo a diferença de cota entre o ponto de referência e pontos com uma cota mais baixa (depressões do terreno em relação ao ponto de referência) num segmento de recta é somada e dividida pelo número de pontos, ou seja, o índice expressa o valor médio das depressões no sentido ascendente do declive. O índice *MUD* reflecte tanto a rugosidade como o declive do terreno.

De acordo com Hansen *et al.* (1999) este índice apresenta melhores resultados que o índice de rugosidade aleatória, *RR*, proposto por Allmaras *et al.* (1966) ou mesmo os geoestatisticamente baseados *LS* e *LD* (Linden & Van Doren, 1986), quando se pretende estimar o armazenamento superficial do terreno. No entanto para o calcular são necessárias pelo menos 5 linhas de pontos com 120 cm de comprimento ou 12 linhas com 60 cm de comprimento para conseguir explicar mais de 70 % dos valores de armazenamento obtidos (Hansen *et al.*, 1999).

2.3.3.2.2. Equipamento de medição da rugosidade superficial

A evolução nos sistemas utilizados para medir a rugosidade do solo tem sido muito grande, correspondendo à evolução tecnológica que tem ocorrido nos últimos anos.

O perfilómetro de Kuipers (1957), constituído por uma tábua com uma escala na qual era preso um conjunto de 20 varetas metálicas distanciadas 10 cm umas das outras, apresentava um ponto desfavorável que era o facto de ser um aparelho que entrava em

contacto com a superfície do solo durante a execução das medições. Este contacto entre o instrumento de medição e a superfície do solo provoca alterações da superfície que são muito dependentes do rigor da medição e da perícia do utilizador.

Assim, começaram a desenvolver-se uma série de aparelhos que realizavam a medição das irregularidades superficiais sem contactar com a superfície do solo. Estes aparelhos baseavam-se em técnicas de detecção remota utilizando um sensor óptico para medir o nível da radiação infravermelha reflectida da superfície (Römkens *et al.*, 1986;), métodos ópticos com a utilização de raios laser (Huang *et al.*, 1988; Römkens *et al.*, 1988; Bertuzzi *et al.*, 1990a), ou técnicas com recurso a sensores de ultra-sons (Robichaud & Molnau, 1990). Qualquer um destes aparelhos executa um número de medições muito mais elevado do que os perfilómetros de contacto, permitindo recolher um conjunto de dados muito mais completo e rigoroso; no entanto são equipamentos mais dispendiosos e de difícil aquisição.

Segundo Huang & Bradford (1992) as superfícies analisadas com equipamento laser conseguem detectar diferenças no relevo que são totalmente inexistentes quando se utiliza um qualquer perfilómetro de varetas, mesmo com grelhas de 10 ou 20 mm.

2.3.3.2.3. Alterações na rugosidade devido à precipitação

O efeito da precipitação sobre o microrelevo do solo foi estudado por diversos autores ao longo dos anos.

Dexter (1977) concluiu que o índice de rugosidade de Kuipers (1957) diminuía linearmente como função da energia cinética acumulada da precipitação. Apesar de que os seus dados foram recolhidos apenas em perfis transversais do terreno, posicionados em diferentes locais escolhidos após cada chuvada, o que os torna algo circunstanciais (Römkens & Wang, 1987).

Segundo Onstad *et al.* (1984) factores como a energia da precipitação sobre a superfície do solo, as alterações das forças do solo com a variação do teor de água do solo à medida que a água se move na camada mobilizada e as variações da superfície do solo à medida que a energia da precipitação redistribui as partículas do solo, conduzem a superfícies mais compactas e suaves. Estes autores demonstraram que o simples escoamento da água sobre a superfície do solo, sem a força de impacto, pode reduzir a rugosidade aleatória.

Determinaram ainda uma expressão para calcular a variação da rugosidade aleatória em função da água aplicada:

$$RR = RR_o + b_r (AC / (1 + AC)) \quad (2.58)$$

em que,

RR - rugosidade aleatória, cm;

RR_o - valor inicial de RR , cm

b_r - coeficiente de regressão;

AC - altura de água aplicada acumulada, cm.

Römken & Wang (1987) estudaram as variações na rugosidade superficial com a quantidade acumulada de precipitação. Utilizaram o índice por eles definido (eq. 2.56), e apesar de terem tido alguns problemas na medição rigorosa dos perfis transversais, no geral consideram existir uma boa consistência entre os perfis medidos e indicam a existência de uma redução gradual nas alturas mais elevadas ao longo das sucessivas chuvadas. Neste estudo foram utilizados três sistemas de mobilização diferentes (chisel, chisel + grade e chisel + grade + charrua), num solo limoso, referindo a maior variabilidade no sistema com chisel e a menor no sistema de chisel mais grade mais charrua.

Segundo Potter (1990) a precipitação sobre a superfície do solo altera a rugosidade aleatória em diversos graus, de acordo com a estabilidade superficial do solo e a energia cinética das precipitações. A estabilidade superficial aumenta com o teor de argila até este atingir um valor de cerca de 31 % e depois diminui com o aumento do teor de argila. O teor de carbono orgânico é outro factor que aumenta a estabilidade. A diminuição da rugosidade em função da precipitação ocorre de um modo exponencial.

Ao contrário de outros autores, Huang & Bradford (1992) consideram que a rugosidade do solo pode tanto aumentar como diminuir com a acção da precipitação, dependendo não só das condições da superfície mas também dos processos que aí ocorrem (destruição de agregados, formação de crosta, erosão). Dados recolhidos nos seus ensaios mostram que a mesma quantidade de precipitação produz pequenas alterações na topografia da superfície em casos em que o solo tinha sido humedecido antes da chuvada e alterações drásticas quando o solo estava seco no início chuvada.

2.3.3.3. Armazenamento superficial

O armazenamento de água na superfície do solo e das folhas das plantas, apesar de pequeno, tem um papel importante na minimização do escoamento. Quando se praticam regas com dotações reduzidas, na maioria dos casos porque o solo apresenta uma baixa infiltrabilidade, a retenção da água na superfície quer do solo quer das plantas pode representar temporariamente um terço ou mais da água aplicada em cada rega (Keller & Bliesner, 1990).

O armazenamento temporário da água na superfície do solo pode fazer-se em depressões do solo criadas pelas operações de mobilização. A amplitude deste armazenamento superficial depende do tipo de rugosidade superficial ou da configuração do terreno, e é influenciado pela orientação das depressões relativamente ao declive natural do terreno (Burwell *et al.*, 1963). Geralmente, quanto mais irregular for a superfície de solo maior o armazenamento superficial e vice-versa (Mitchell & Jones, 1976; Seginer, 1971a). As variações do declive, nos declives mais acentuados, também afectam a quantidade de armazenamento superficial. Declives acentuados geralmente retêm menos água superficial para uma dada rugosidade do que declives suaves (Onstad, 1984).

Diversos autores desenvolveram métodos para quantificar o armazenamento nas depressões superficiais do solo a partir de dados de microrelevo.

Mitchell & Jones (1976) compararam 5 métodos de calcular o armazenamento e seis espaçamentos nas grelhas de pontos, recomendando um método que utiliza uma grelha de pontos espaçados 1 polegada. Os dados utilizados no seu trabalho foram recolhidos em 258 superfícies de 5 solos e 3 superfícies artificiais. Todas as superfícies utilizadas neste estudo eram ou foram niveladas. As superfícies com um ligeiro declive foram ajustadas a uma condição de nível, utilizando uma técnica de regressão múltipla para fazer o ajustamento da altura.

Apenas um dos 5 métodos de cálculo estudados não descrevia adequadamente a relação entre a profundidade das depressões e o armazenamento. Verificaram também que não se obtinham melhores resultados utilizando grelhas de pontos com espaçamentos de 0,01 polegadas em relação às grelhas com espaçamentos de 0,1 polegadas, valor considerado como mínimo para obter uma relação profundidade - armazenamento rigorosa.

Segundo os autores referidos a função de armazenamento das depressões superficiais é melhor descrita pelo modelo:

$$AD = a_3 PD^{b_3} \quad (2.59)$$

que relaciona o armazenamento das depressões superficiais (AD) com a sua profundidade (PD) através de 2 coeficientes de ajustamento (a_3 , b_3), determinados através de uma série de equações desenvolvidas por estes autores.

Gayle & Skaggs (1978) caracterizaram o armazenamento superficial do solo dividindo-o nas suas macro e micro componentes, que foram medidas ao longo do ano. O micro armazenamento foi medido utilizando anéis cilíndricos de 0,4 m de diâmetro, enterrados até uma profundidade de 0,1 m e cuja superfície era aspergida cuidadosamente, de modo a não destruir a micro estrutura do solo, com uma solução resinosa e outra endurecedora que após secarem tornavam a superfície do solo impermeável. Após esta operação, uma quantidade de água previamente medida era aplicada cuidadosamente sobre o solo, até se iniciar o escoamento. O volume do micro armazenamento do solo era então determinado através da diferença entre a quantidade de água aplicada e o escoamento medido. O macro armazenamento era calculado através de levantamentos topográficos realizados em 5 linhas de 122 m de comprimento. As medições efectuadas tinham espaçamentos de 7,6 m na linha e 0,25 m na entrelinha. O volume do armazenamento superficial era calculado a partir dos perfis transversais às linhas utilizando o método da área média final (Gayle & Skaggs, 1978).

Ullah & Dickinson (1979a,b) desenvolveram uma técnica digital para determinar as propriedades geométricas de depressões individuais em talhões experimentais. O método utiliza modelos digitais da superfície e identifica pontos característicos das depressões (pontos de cota inferior, pontos de trasbordo, etc). A informação obtida é utilizada para calcular as propriedades geométricas das depressões, profundidade, área da superfície e volume. O volume total de armazenamento das depressões numa qualquer superfície resulta da soma dos valores de numerosas depressões individuais.

Moore & Larson (1979) descrevem o que chamam “um modelo distribuído utilizando uma aproximação hidráulica, uma vez que representa o armazenamento em depressões individuais e o fluxo de/e para o talhão”. Este modelo utiliza uma grelha de pontos para o cálculo do armazenamento e do escoamento de um talhão, e baseia-se no modelo mais simples apresentado por Mitchell & Jones (1976), que considera o ponto medido como o centro de uma superfície quadrada nivelada. Foi introduzida uma modificação no modelo de Mitchell & Jones (1976) para que ele tivesse também em conta a possibilidade das depressões

dos talhões armazenarem água a diferentes cotas e de existir trasbordo também a diferentes cotas. Segundo os seus autores, o novo modelo é independente tanto da intensidade de precipitação como da infiltração, lidando apenas com os volumes da precipitação em excesso (água aplicada que excede a infiltrabilidade do solo) e ignorando as taxas de acumulação da água e o escoamento.

Linsley *et al.* (1949), citados por Moore & Larson (1979), referem que as depressões de vários tamanhos que formam o microrelevo do solo estão tanto sobrepostas como interligadas umas com as outras, tendo cada depressão a sua própria área de drenagem finita. Isto faz com que o processo de armazenamento do microrelevo e o escoamento associado seja bastante complexo.

Segundo Moore & Larson (1979) a perda de armazenamento parece não estar relacionada com a duração e portanto com a quantidade de precipitação. Isto sugere que a maior parte da variação do microrelevo ocorre nos primeiros minutos da chuvada, antes de que a água empoçada possa interferir através de maior deterioração da superfície do solo. Estes autores apresentam ainda uma expressão, determinada por regressão matemática, que calcula o armazenamento máximo após a precipitação (A_{mp} , mm), apenas em função do armazenamento anterior à precipitação (A_{ap} , mm):

$$A_{mp} = -0,523 + 0,627 A_{ap} \quad \text{para } A_{ap} > 2,0 \quad (2.60)$$

mas que só consegue explicar 77 % dos valores determinados.

Onstad (1984) refere que o armazenamento do microrelevo pode ser melhorado através de vários métodos de mobilizações que tenham em conta a conservação do solo e da água. O processo é dinâmico porque a rugosidade aleatória, a densidade aparente e a condutividade hidráulica mudam com a aplicação de água nas superfícies mobilizadas (Onstad *et al.*, 1984).

Onstad (1984) recolheu dados do microrelevo em talhões experimentais com 0,9 x 1,5 m usando um perfilómetro como o utilizado por Burwell *et al.* (1963) e uma técnica fotográfica em conjunto com um digitalizador que permitiu obter os valores reais das elevações da superfície do solo. Determinou a rugosidade aleatória segundo o método de Allmaras *et al.* (1966), e desenvolveu um modelo para determinar o armazenamento das depressões que se baseia no modelo mais simples de Mitchell & Jones (1976) e nas modificações efectuadas nesse modelo por Moore & Larson (1979).

No entanto, o modelo apresenta duas diferenças em relação ao de Moore & Larson (1979). A primeira tem a ver com a forma da área representada por cada ponto que neste caso é um rectângulo com 1,25 x 15 cm e não um quadrado como no anterior. A segunda é a de ser considerada a possibilidade de drenagem na direcção não só dos quatro lados de cada área elementar mas também de qualquer um dos cantos por eles formados. Isto permite oito possíveis direcções de drenagem em vez de quatro. Segundo o próprio autor, este modelo de armazenamento nas depressões é complexo e não muito prático para uma utilização no campo.

Utilizando um dos valores calculados pelo modelo, o volume máximo das depressões, Onstad (1984) determinou, por regressão matemática, a seguinte expressão:

$$AD_m = 0,112 RR + 0,031 RR^2 - 0,012 RR s \quad (2.61)$$

que relaciona o armazenamento máximo das depressões (AD_m , cm) com a rugosidade aleatória (RR , cm) e o declive do terreno (s , %). Esta expressão explicou 82 % dos valores obtidos.

Em geral, o armazenamento nas depressões decresce com a diminuição da rugosidade aleatória e o aumento do declive (Onstad, 1984).

Linden *et al.* (1988) referem que o melhor índice de rugosidade para prever o armazenamento máximo das depressões é uma combinação dos parâmetros de rugosidade LD (eq. 2.54) e LS (eq. 2.55), e definem o respectivo índice, IR , por:

$$IR = (LD LS)^{1/2}. \quad (2.62)$$

A expressão mais ajustada ao limite superior do armazenamento das depressões, encontrada por estes autores, foi:

$$AD_m = 0,382 IR - 0,017 IR s \quad r^2 = 0,79 \quad (2.63)$$

sendo AD_m , o limite superior do armazenamento das depressões (cm), IR o índice de rugosidade ($\text{cm}^{1/2}$) e s o declive do terreno (%).

Huang & Bradford (1990) calcularam o armazenamento nas depressões utilizando uma técnica Markov-Gaussiana aleatória. Através de uma simulação do tipo Monte-Carlo

determinaram as características médias de empocamento de superfícies simuladas pelo método Markov-Gaussiano. Este processo requer repetidas gerações de superfícies com grande número de pontos.

A utilização de um processo Markov-Gaussiano implica que as variáveis tenham uma distribuição de probabilidade do tipo Gaussiano e uma relação de vizinhança do tipo Markov (Huang & Bradford, 1990). Este processo é parametrizado através de duas escalas de comprimento, a variância e a correlação da escala de comprimento.

A técnica utilizada para calcular o armazenamento das depressões através de um conjunto de dados de alturas numa grelha quadrada é similar à utilizada por Ullah & Dickinson (1979a), mas com uma modificação. Huang & Bradford (1990) utilizaram um esquema de vizinhança dos pontos com oito pontos adjacentes, quatro perpendiculares e quatro diagonais, em vez do esquema de quatro pontos de vizinhança. Verificaram que o armazenamento nas depressões era função dos parâmetros do processo Markov-Gaussiano (a variância global e a correlação de escala de comprimento), dos parâmetros da grelha de pontos (número e espaçamento) e do declive. O resultado mais importante do seu trabalho foi mostrar que o armazenamento das depressões é claramente dependente do factor de escala.

A falta de um conceito de escala no passado poderá ter resultado das fracas técnicas de medição que não permitiam obter conjuntos de dados com a resolução necessária para explorar esta hipótese. Os armazenamentos calculados a partir de conjuntos de dados topográficos digitalizados utilizando processos estatísticos do tipo Markov-Gaussianos apresentaram resultados que se ajustaram bem aos obtidos com superfícies simuladas.

Mwendera & Feyen (1992) apresentam uma expressão para calcular o armazenamento da água nas depressões em função da rugosidade aleatória, idêntica à de Onstad (1984) (eq. 2.61), variando apenas as constantes obtidas por regressão que neste caso explicam 99 % dos valores encontrados:

$$AD_m = 0,294 RR + 0,036 RR^2 - 0,012 RR \ s \quad (2.64)$$

com as mesmas variáveis já definidas.

Os resultados mostram que o parâmetro *RR* oferece um método satisfatório para se chegar a uma descrição quantitativa da rugosidade do solo produzida pelas mobilizações. De particular interesse é a utilidade deste parâmetro na estimativa do armazenamento nas

depressões, na quantificação da resistência hidráulica ao escoamento e na descrição da erosão do solo pela precipitação (Mwendera & Feyen, 1992).

Keller & Bliesner (1990) apresentam uma expressão, baseada na sua observação pessoal e na literatura, que permite estimar o valor médio do armazenamento superficial de um modo mais prático e que pode ser utilizada para fins de projecto. Nesta expressão, as depressões superficiais do terreno são divididas em microdepressões e pequenas depressões, calculando-se o armazenamento superficial médio por:

$$AS \approx A_{md} + A_f + k \cdot A_d \quad (2.65)$$

sendo:

AS - armazenamento superficial médio (mm);

A_{md} - armazenamento das microdepressões (mm);

A_f - armazenamento foliar (mm);

A_d - armazenamento das pequenas depressões (mm);

k - constante = 0,5 para terrenos com sulcos e 1,0 para terrenos planos.

Ainda segundo os mesmos autores, o armazenamento superficial das depressões (A_d , mm) pode ser relacionado com o declive do terreno (s , %) por:

$$A_d = \frac{(6 - s) \cdot (12 - s)^2}{144} \quad (2.66)$$

Esta expressão baseia-se na premissa de que a componente principal do armazenamento superficial é retida em depressões em forma de pirâmide invertida, com dimensões que permitiriam um armazenamento de 6 mm de água num solo plano. Tal como é apresentada, a expressão (2.66) mostra que os autores consideram que para declives superiores a 6 % o armazenamento das depressões é nulo.

O valor do armazenamento das microdepressões (A_{md}) depende fundamentalmente das características da superfície do terreno sendo independente do seu declive. Segundo Keller & Bliesner (1990) valores razoáveis para a soma do $A_{md} + A_f$ são da ordem de:

1 mm para superfícies arejadas e com uma cobertura vegetal pouco densa;

2 a 3 mm para terrenos recentemente mobilizados;

3 mm para pastagens e relvados;

2 mm para terrenos com coberturas vegetais densas, como a luzerna ou pequenas gramíneas.

Os valores sugeridos na literatura para o armazenamento superficial médio são geralmente bastante mais elevados que os determinados pela equação (2.65). Shockley (1968), citado por Coelho (1996), apresenta valores de 12,7 mm para declives de 0 a 1 %, 7,62 mm para declives de 1 a 3 % e 2,54 mm para declives de 3 a 5 %.

2.3.3.3.1. Técnicas de condicionamento do armazenamento superficial

A necessidade de encontrar soluções para contrariar a, muitas vezes, fraca capacidade de armazenamento superficial da água em excesso, resultante de taxas de aplicação de água que ultrapassam a infiltrabilidade dos solos, tem levado os investigadores a experimentar diferentes técnicas para tentar aumentar a capacidade de armazenamento superficial do solo.

Lyle & Bordovsky (1981) referem que a preocupação de controlar ou reter a água da precipitação natural em culturas de sequeiro nos Estados Unidos é muito antiga e a maior parte do equipamento utilizado para abertura de pequenas bacias na entrelinha das culturas foi desenvolvido com base em tecnologias dos anos 30.

Aarstad & Miller (1973), citados por Lyle & Bordovsky (1981), são dos primeiros autores a utilizar a técnica de abertura de pequenas bacias entre as linhas de culturas regadas. Esta utilização numa cultura regada por uma rampa rotativa permitiu-lhes reduzir o escoamento de 40 para 1 %.

Kincaid *et al.* (1990) tentam diferenciar dois tipos de técnicas de condicionamento do microrelevo: a utilização de microbacias e a utilização de pequenos reservatórios.

A utilização de microbacias baseia-se na construção de pequenos diques em sulcos situados nas entrelinhas da cultura, enquanto que a utilização de pequenos reservatórios, uma técnica mais recente, consiste na utilização de um subsolador ou uma haste de ripper, com uma profundidade de cerca de 30 cm, seguida de uma roda com pás que penetram à mesma profundidade formando pequenas covas.

Na figura 2.11 pode-se observar a diferença entre estas duas técnicas, não só no tipo de alfaia utilizada para a sua construção, como também na forma das estruturas de armazenamento.

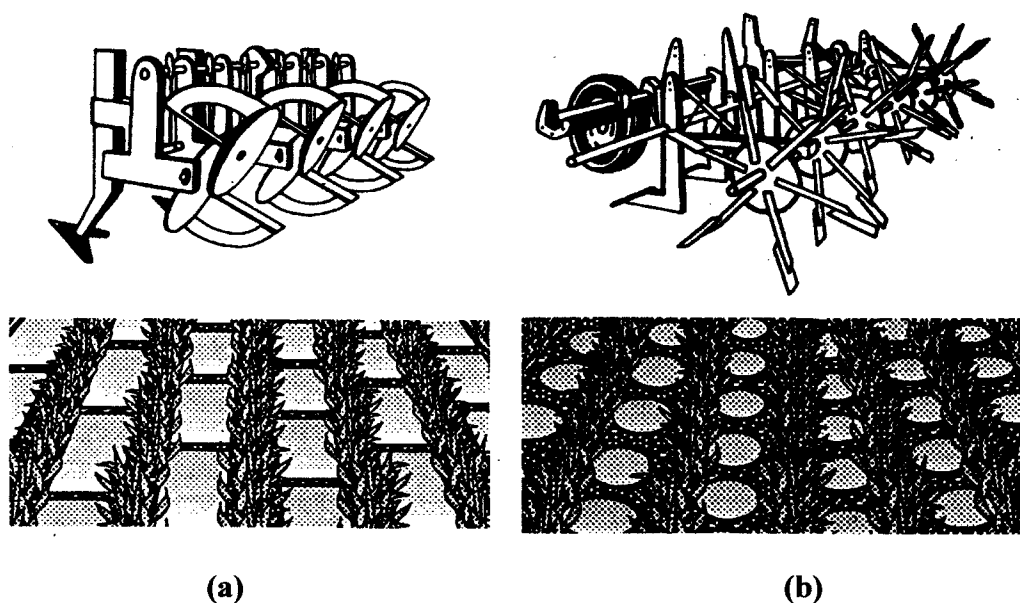


Figura 2.11 – Alfaias de construção de microbacias (a) e pequenos reservatórios (b) (Kranz *et al.*, 1991).

Coelho (1996), citando Longley (1984), refere que a vantagem dos microreservatórios advém do facto de que o armazenamento superficial é criado abaixo da superfície natural do terreno e desse modo está menos sujeito ao processo de degradação natural quando comparado ao sistema das microbacias.

As propriedades físicas do solo no interior destes reservatórios podem alterar-se com o tempo devido ao processo de sedimentação no fundo do reservatório.

Ainda segundo Coelho (1996) é possível observar na literatura experiências positivas e negativas no que respeita ao condicionamento do microrelevo. As características específicas do solo e da precipitação sobre o terreno contribuem para este facto.

Nos seus ensaios realizados num solo limoso, com três diferentes configurações do equipamento de abertura dos reservatórios e 5 taxas de aplicação da água com um sistema LEPA, verificou que o processo de degradação alterou a geometria dos reservatórios mas não a sua capacidade de armazenamento.

Em Portugal existem poucos trabalhos científicos onde sejam abordadas estas técnicas, e geralmente não existe distinção entre elas, sendo englobadas na denominada técnica dos *covachos*. Num desses trabalhos (Valadas, 1997) o autor observou, num solo argiloso regado com uma rampa rotativa, que ao longo da época de rega existia uma diminuição significativa

da capacidade de armazenamento dos covachos. No caso em questão, os covachos eram microbacias, e devido à elevada frequência de rega e intensidade de aplicação da água, apresentavam rápida deterioração, principalmente nas zonas mais declivosas, onde se observou a sua destruição em cadeia devido à acção do escorrimento. Em terrenos declivosos a deterioração das paredes dos covachos, devido ao excesso de água aplicada, provoca um escorrimento preferencial no sentido dos covachos adjacentes, agravando o problema do escorrimento.

Verifica-se assim que, além dos custos adicionais de mais uma operação cultural, a técnica dos covachos apresenta também limitações na sua utilização. Será no entanto, nalguns casos de solos e culturas, uma solução a considerar na rega com rampas rotativas.

2.3.4. Factores associados ao solo

2.3.4.1. O teor de água do solo

Quanto maior o teor de água do solo, menor será a sua infiltrabilidade inicial (uma vez que os gradientes de sucção matricial serão menores) e mais rapidamente se atingirá a infiltrabilidade estabilizada.

Uma das causas para o elevado teor de água que por vezes se verifica, principalmente nas camadas superficiais do perfil do solo, é a elevada frequência de rega. Nesses casos, existe uma redução substancial da infiltrabilidade do solo, o que origina um aumento do escorrimento.

2.3.4.2. A crosta superficial

A redução da condutividade hidráulica e/ou da infiltrabilidade em solos sujeitos à formação de crosta tem sido observada por diversos autores ao longo dos anos.

Um dos primeiros a estudar este efeito foi Duley (1939), que é citado em muitos dos trabalhos feitos sobre a infiltração em solos sujeitos a precipitação natural ou artificial. Von Bernuth & Gilley (1985) referem que Duley (1939) apresenta dados referentes a nove solos onde observou uma redução substancial da taxa de infiltração devida à formação de uma fina crosta superficial após a aplicação de água por aspersão sobre a superfície nua do solo.

Também McIntyre (1958) aplicando chuva simulada em pequenos talhões experimentais, identificou uma compactação superficial do solo provocada pelas gotas da chuva e pela lavagem das partículas finas para a matriz do solo.

As suas observações levaram às seguintes conclusões: i) os agregados húmidos do solo são quebrados pelo impacto da precipitação; ii) os poros superficiais são entupidos pelas partículas de solo; iii) o solo é compactado pelo impacto das gotas de água, produzindo uma camada superficial compacta e iv) as partículas suspensas de argila ou limo podem depositar-se na superfície após o fim da precipitação. A camada superficial mais compacta podia-se dividir numa película fina superficial (0,1 mm) formada pela compactação devida ao impacto das gotas de água e numa região iluviada de porosidade decrescente com cerca de 2 mm. A permeabilidade desta camada era assim bastante inferior à do solo adjacente. Apesar da camada superficial modificada poder ser muito fina, talvez apenas uns milímetros de espessura, o seu efeito nas propriedades hidráulicas que influenciam a infiltração pode ser acentuado.

Epstein & Grant (1973), citados por Helalia *et al.* (1988), referem que o maior efeito do impacto das gotas de água no solo é a compactação física da superfície; o movimento descendente das partículas de solo parece ser um efeito menor na formação de crosta.

Esta redução da infiltração, devido ao efeito da crosta superficial, tem sido observada por diversos autores (Moore, 1981; Morin *et al.*, 1981; Mohammed & Kohl, 1987; Bradford *et al.*, 1987; Ben-Hur & Letey, 1989; Basahi *et al.*, 1998), em diferentes condições e tipos de solos.

Chang & Hills (1993) apresentam mesmo uma descrição detalhada sobre o efeito do impacto das gotas de água na formação da compactação superficial e a sua influência sobre a infiltração, baseada em ensaios experimentais. Dividem o processo em quatro fases: i) antes do empoçamento, as gotas embatem no solo nú, as partículas do solo são desagregadas, e a água infiltra-se rapidamente no solo; ii) à medida que continua o impacto das gotas, a superfície do solo começa a sofrer compactação, a condutividade superficial do solo diminui, inicia-se o empoçamento, e continua o destacamento de partículas do solo; iii) o empoçamento excede uma altura de água de 6 mm e começa a dar-se o escoamento. Algumas partículas de solo desagregadas seguem a água infiltrada para o interior da camada superficial do solo e provocam o entupimento dos poros do solo; enquanto outras depositam-se na superfície do solo originando uma fina crosta. Parte desta crosta é perturbada e volta a fazer parte da suspensão do solo devido ao efeito do impacto das gotas de água que continuam

a cair. E iv) aproximadamente 20 minutos depois do teste começar, a taxa de infiltração atinge um valor estabilizado.

A partir do momento em que o solo apresenta uma camada superficial compacta a infiltração em eventos sequentes torna-se mais reduzida, em grande parte devido à redução da condutividade hidráulica superficial que ocorre com a formação de crosta (Morin *et al.*, 1981; Bosch & Onstad, 1988).

Mas este efeito redutor da infiltração por parte da crosta nem sempre acontece. Fattah & Upadhyaya (1996) verificaram que crostas superficiais muito finas (cerca de 6 mm de espessura) tanto húmidas como secas não pareciam reduzir a taxa de infiltração. Isto é devido, muito provavelmente, à presença de fendas que se desenvolvem na crosta imediatamente após o humedecimento da superfície.

Também Shainberg & Singer (1985) já tinham assinalado o facto de crostas secas não impedirem a infiltração da água, devido à formação de fendas e a uma reposição do valor da condutividade hidráulica superficial para valores idênticos

A estabilidade da crosta entre dois eventos de precipitação irá influenciar a condutividade hidráulica da crosta durante o segundo evento, e deste modo a infiltração do solo. Esta estabilidade depende do processo de formação da crosta, da sua morfologia, do número de ciclos de secagem e humedecimento e da duração e intensidade dos eventos de precipitação individuais (Fohrer *et al.*, 1999).

2.3.4.2.1. O impacto das gotas de água e o destacamento de partículas do solo

A maioria dos autores já citados é unânime em apontar o destacamento de solo como o primeiro passo para a formação de uma crosta superficial. Ao mesmo tempo, este destacamento de partículas do solo produz o material que é depois arrastado juntamente com a água em excesso, provocando a erosão do solo.

O efeito do impacto da gota de água sobre o solo, vulgarmente chamado *salpico*, tem sido observado pelos investigadores há mais de um século, como o prova o trabalho de Wollny (1877), citado por Von Bernuth & Gilley (1985).

Nos anos 40 e 50 surgem diversos trabalhos, citados por McIntyre (1958) e Von Bernuth & Gilley (1985), sobre o papel do impacto das gotas de água relativamente à compactação superficial, à erosão e à variação da taxa de infiltração do solo.

O impacto da gota de água no solo tem dois efeitos imediatos: a quebra dos agregados e o destacamento de partículas do solo. Estes dois fenómenos estão geralmente associados ao tamanho e à energia cinética das gotas.

Levine (1952), citado por Heermann & Kohl (1983), verificou um aumento na quebra dos agregados do solo com o aumento do tamanho das gotas, especialmente em solos não arenosos. Uma vez que as gotas mais grossas têm maiores velocidades ao nível do solo e como a energia cinética é um produto da massa da gota e o quadrado da sua velocidade, os tamanhos maiores de gota transferem mais energia cinética para a superfície do solo do que as gotas mais pequenas.

Bubbenzer & Jones (1971) mostraram que o impacto no solo de gotas pequenas produz menos salpico que o de gotas grandes, mesmo que a energia cinética e quantidade total de precipitação sejam quase iguais.

Alguns autores (Cruse & Larson, 1977; Al-Durrah & Bradford, 1981, 1982b) relacionam o salpico não só com a energia cinética das gotas mas também com a resistência do solo à deformação.

Al-Durrah & Bradford (1982a) apresentam um diagrama esquemático do processo envolvido no destacamento de solo, em solos com alta e baixa resistência à penetração (fig. 2.12). No momento do impacto, a distribuição das forças perpendiculares (compressão) e tangenciais (cisalhamento) são simétricas sobre o centro do impacto. Normalmente, à medida que a força de resistência do solo à deformação aumenta, a profundidade e o volume total da cavidade diminuem.

Cruse & Larson (1977) verificaram que uma combinação de densidade aparente do solo elevada e um baixo potencial matricial aumentam a resistência do solo à deformação, enquanto que densidade aparente do solo baixa e potenciais matriciais elevados resultam em menor resistência do solo à deformação.

A água proveniente de uma gota actua como uma fonte de energia provocando o destacamento de partículas de solo, e como uma fonte de humedecimento, alterando o potencial matricial do solo à volta do ponto de impacto da gota.

Após o impacto as forças de compressão transformam-se em forças de cisalhamento, ao longo da região de contacto entre as partículas sólidas e líquidas, devido ao efeito de jacto lateral da água (fig. 2.12). Nesta fase o destacamento das partículas de solo é provocado pelas forças de cisalhamento devidas ao fluxo radial que actua sobre o fundo e os lados da cavidade.

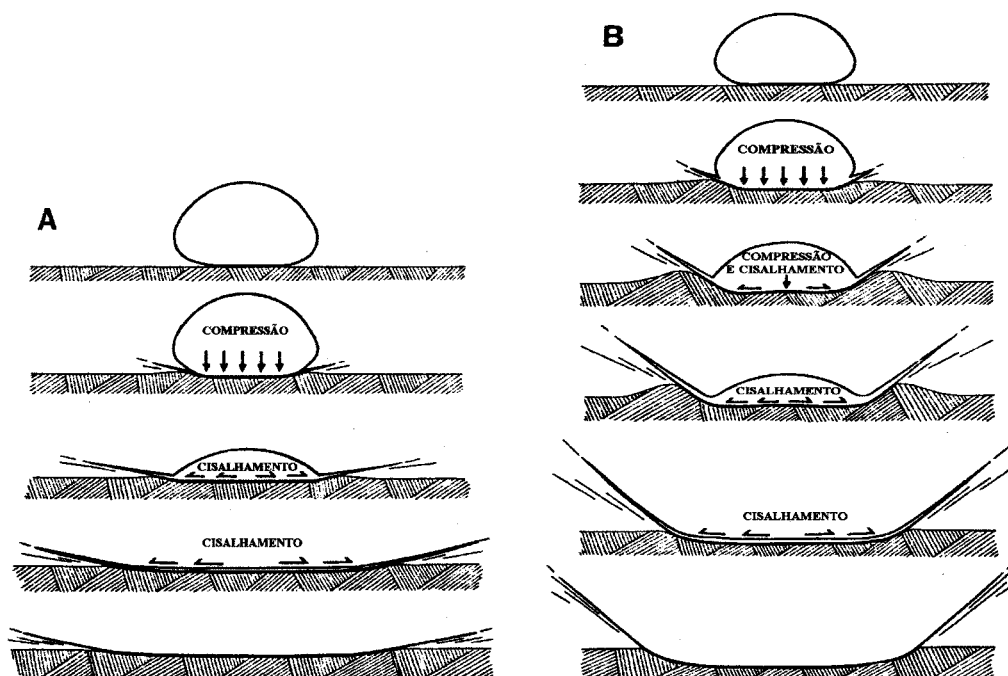


Figura 2.12 – Diagrama esquemático do mecanismo do salpico em solos com alta (A) e baixa (B) resistência à deformação (Al-Durrah & Bradford, 1982a).

Uma consequência deste conceito de descrever o mecanismo do destacamento de solo é que as gotas de água não compactam nem tornam mais densa a superfície do solo pela acção exclusiva das forças de compressão da gota (Al-Durrah & Bradford, 1982a).

Outros estudos sobre a causa do destacamento das partículas de solo devido ao impacto da gota de água (Huang *et al.*, 1982; Ghadiri & Payne, 1986), concluíram também que o fenómeno das forças de cisalhamento devidas ao jacto transversal formado durante o impacto é mais importante que o conceito tradicional da energia cinética.

De acordo com Ghadiri & Payne (1986) as forças de cisalhamento devidas ao impacto das gotas são sempre maiores que a resistência do solo; assim, o destacamento de partículas de solo é inevitável quando o impacto das gotas se dá em solo nú.

A existência de uma lâmina de água à superfície do solo, durante o processo do impacto da gota de água, torna mais eficaz a acção do jacto lateral provocado pelo dito impacto, aumentando a quantidade de sedimentos destacados e o seu transporte (Ferreira & Singer, 1985).

2.3.4.2.2. Factores que influenciam a formação da crosta

A formação de compactação e crosta superficial é geralmente associada ao impacto e à energia cinética das gotas de água (Thompson & James, 1985; Mohammed & Kohl, 1987; Ben-Hur & Letey, 1989; Kincaid, 1996), mas depende também de parâmetros do solo como a textura, estabilidade dos agregados (que é claramente afectada pelo teor de matéria orgânica), práticas culturais, historial de culturas e método de cultivo (Moore, 1981).

Bradford *et al.* (1987) ao estudarem 20 solos diferentes, em ensaios com simuladores de chuva em laboratório, verificaram que a redução das taxas de infiltração devidas à compactação superficial era maior em solos arenosos, com fraca estrutura.

Bosch & Onstad (1988) observaram que solos com grau de agregação fraco formavam crosta mais rapidamente. Em solos com agregação fraca toda a energia da precipitação é conduzida para o desenvolvimento da crosta porque é requerida pouca energia para a quebra dos agregados.

A quantidade de energia necessária para quebrar os agregados do solo depende da sua estabilidade, que por sua vez está dependente de uma série de parâmetros, entre os quais a humidade. Diversos autores (Al-Durrah & Bradford, 1982b; Francis & Cruse, 1983; Basahi *et al.*, 1998) afirmam que os agregados secos são mais fortes e resistentes ao impacto das gotas do que os agregados húmidos, o que diminui o efeito do salpico e consequente o destacamento de solo. Deste modo, a erosão em solos saturados será superior à dos solos secos.

Diferenças no teor de matéria orgânica e no teor de argila podem explicar parcialmente as diferenças na estabilidade dos agregados entre os diferentes solos. Para valores elevados de matéria orgânica, a taxa de humedecimento dos agregados do solo diminui.

Truman *et al.* (1990), no entanto, referem que agregados com alguma humidade no início da precipitação podem ser mais estáveis do que os agregados secos ao ar. O humedecimento inicial pode reduzir a velocidade de humedecimento do agregado e aumentar as forças de ligação ou coesão. A destruição dos agregados é mais lenta e menos material de solo é libertado. Este mesmo efeito foi verificado por Fohrer *et al.* (1999).

Segundo Le Bissonnais & Singer (1992), a diferença de resultados encontrada nos diversos trabalhos pode ser explicada, em parte, pelo facto de que o teor de água do agregado muda rapidamente durante a precipitação, e que a quebra do agregado pode ocorrer durante o

humedecimento. A resistência à deformação dos agregados húmidos é menor do que a dos agregados secos, o que pode levar a concluir que os agregados secos são mais resistentes ao impacto das gotas de água. Porém muitas vezes é esquecida a quebra por implosão que os agregados sofrem durante o processo de humedecimento, pela compressão do ar preso. Este mecanismo pode ser muito mais eficiente na quebra dos agregados do que o impacto da gota. Uma explicação detalha destes fenómenos é dada por Le Bissonnais (1990).

De acordo com Thompson & James (1985), no caso de solos nús, à medida que a duração da precipitação aumenta, a maioria dos factores que influenciam a formação da crosta perde importância relativamente à própria duração da precipitação.

CAPÍTULO 3
MATERIAL E MÉTODOS

3. MATERIAL E MÉTODOS

Definidos os objectivos do trabalho e identificados os factores que influenciam o processo da infiltração, foi necessário encontrar um terreno com um solo Mediterrâneo, para realizar os ensaios que permitissem recolher a informação suficiente para alcançar os objectivos propostos.

A escolha do local de ensaios recaiu sobre uma parcela de terreno situada no Centro de Estudos e Experimentação da Mitra, pertencente à Universidade de Évora, e que se situa 10 km a sudoeste da cidade de Évora. Nesta parcela realizaram-se, em dois anos consecutivos, os diferentes ensaios aqui apresentados.

3.1. O campo de ensaios

3.1.1. O Clima

Para a caracterização climática utilizaram-se os dados referentes ao período de 1951-80, publicados pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (1991). Estes dados referem-se a uma estação meteorológica com latitude de 38° 32' N, longitude de 8° 01' W, e altitude de 200 m.

De acordo com os dados publicados pode-se dizer que estamos na presença de um clima temperado (temperatura média anual = 15,4 °C), seco (humidade relativa média anual = 70 %) e moderadamente chuvoso (precipitação anual média = 664,6 mm).

Segundo a classificação de Thornthwaite é um clima sub-húmido chuvoso, mesotérmico, com grande deficiência de água no Verão e pequena concentração estival da eficiência térmica. De salientar o período chuvoso de Outubro a Maio que contribui com 90,9 % da precipitação anual, existindo quatro meses (Junho a Setembro) com uma precipitação escassa (9,1 % da precipitação anual). A velocidade do vento, um dos parâmetros que tem grande efeito sobre as perdas de água nos sistemas de rega por aspersão, apresenta um valor médio anual de 2,3 m/s.

3.1.2. O solo

Através da carta de solos (Aguiar & Grilo, 1975) foi possível localizar uma mancha correspondente a um complexo de solos Litólicos e solos Mediterrâneos. Identificada esta mancha no terreno, foi depois escolhida uma zona correspondente aos solos Mediterrâneos para a realização dos ensaios.

Para garantir a natureza do solo onde foi implantado o ensaio foram abertos três buracos rectangulares com um comprimento de cerca de 1,5 m, uma largura de 70 cm e uma profundidade de 75 cm. Nos perfis correspondentes às suas paredes laterais foram depois recolhidas amostras que permitiram quantificar todos os parâmetros do solo apresentados no quadro 3.1.

A topografia do terreno é ligeiramente ondulada (fig. 3.1), apresentando na zona dos ensaios declives longitudinais, da periferia para o pólo da rampa rotativa, entre os 5,2 e 10,2 %. A existência de algum declive no terreno é importante pois, ao facilitar o escoamento, permitirá mais facilmente avaliar a influência das características de aplicação da água sobre a ocorrência deste último.

3.1.2.1. Identificação dos horizontes

A primeira tarefa na caracterização do solo foi a identificação dos diferentes horizontes que o constituíam. Recorreu-se à observação visual dos perfis, alguns dias após a sua abertura, tendo-se recolhido a informação apresentada em anexo.

Através desta primeira observação foi clara a existência de três horizontes distintos, no que se referia à sua estrutura e cor, depois comprovada também pelos dados relativos à textura (quadro 3.1).

3.1.2.2. Caracterização hidropedológica

Para a caracterização hidropedológica recolheram-se em cada horizonte de cada perfil amostras de solo perturbadas e não perturbadas, estas últimas com anéis metálicos com um volume de 100 cm³.

Escala 1: 500

P – perfis do solo

R – raios de recolha dos dados

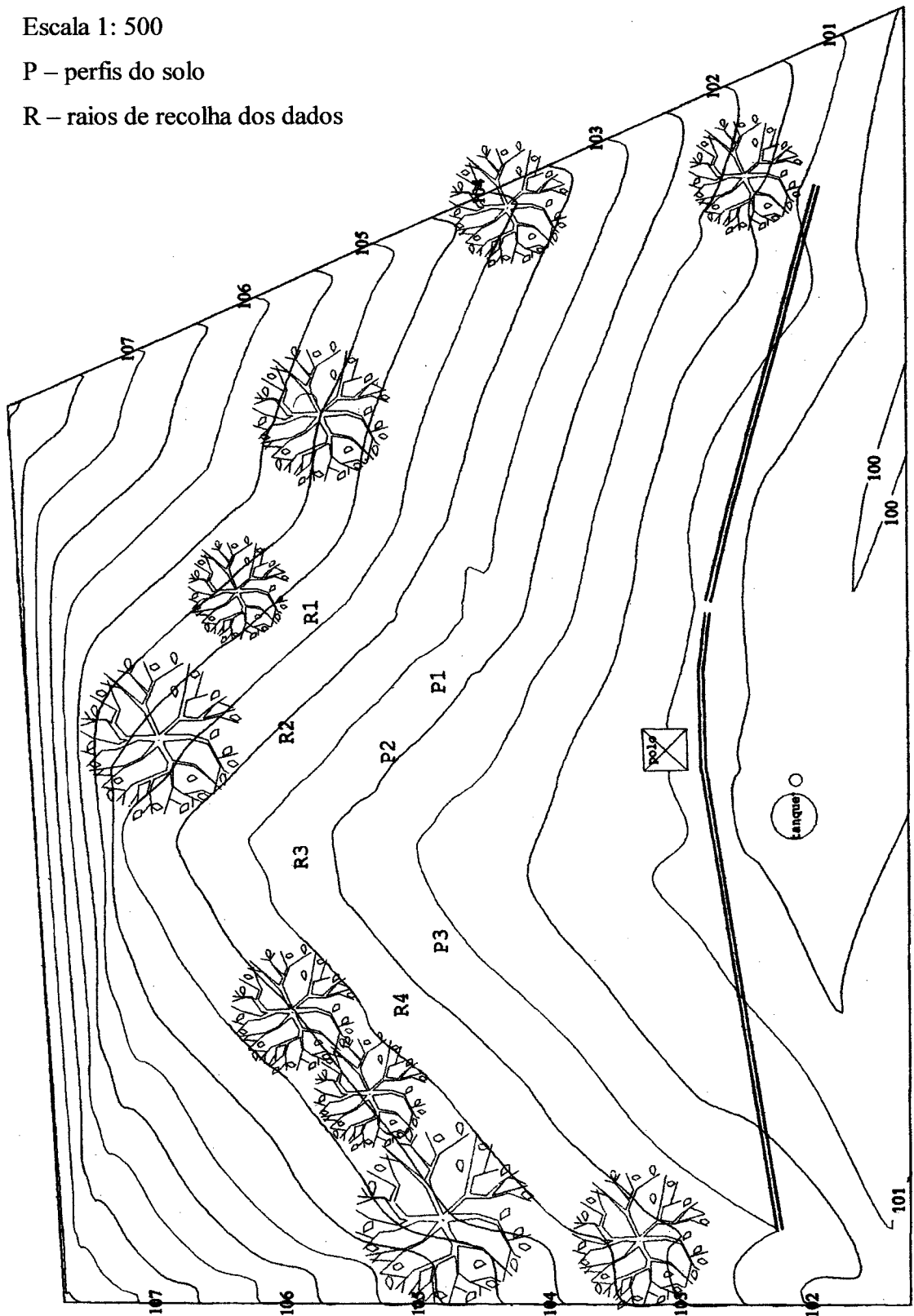


Figura 3.1 – Planta topográfica do local dos ensaios.

As amostras não perturbadas foram utilizadas para a determinação da densidade aparente do solo, *Dap*, (3 por horizonte/perfil) e para a determinação dos valores de retenção da água no solo (1 amostra por horizonte/perfil para cada valor de pressão extractiva aplicada, neste caso 1 - 3,16 - 10 - 34,6 - 100 e 316 kPa).

As amostras perturbadas foram utilizadas para a determinação da textura do solo, do teor em carbono orgânico, matéria orgânica e ainda do valor de retenção de água no solo correspondente a uma pressão extractiva de 1500 kPa.

Com base na carta de solos, na observação visual (anexo A) e nos dados apresentados no quadro 3.1 pode-se classificar este solo como um solo Mediterrâneo Pardo Normal de xistos anfibólicos.

Quadro 3.1 – Dados físicos e químicos do solo

| Perfil | Horiz. | Espessura (cm) | Areia Grossa (%) | Areia fina (%) | Limo (%) | Argila (%) | Classe Textural | <i>Dap</i> | Carbono orgânico (%) | M.O. (%) |
|--------|--------|-------------------|------------------------|----------------------|-------------|---------------|--------------------|------------|----------------------------|-------------|
| | | | | | | | | | | |
| 1 | A | 0 – 30 | 20,0 | 36,5 | 15,0 | 28,5 | Fr-Arg-Arenosa | 1,36 | 1,03 | 1,77 |
| | B | 30 – 60 | 19,7 | 30,3 | 16,6 | 33,4 | Franco-Argilosa | 1,40 | 0,51 | 0,88 |
| | C | 60 - ... | 28,9 | 42,9 | 12,4 | 15,8 | Franco-Arenosa | 1,54 | 0,23 | 0,40 |
| | | | | | | | | | | |
| 2 | A | 0 – 30 | 21,3 | 39,8 | 12,9 | 26,0 | Fr-Arg-Arenosa | 1,38 | 0,72 | 1,23 |
| | B | 30 - 65 | 12,2 | 19,3 | 13,0 | 55,5 | Argilosa | 1,41 | 0,36 | 0,62 |
| | C * | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | | | | | | | |
| 3 | A | 0 – 40 | 23,4 | 30,7 | 13,4 | 32,5 | Fr-Arg-Arenosa | 1,42 | 0,77 | 1,33 |
| | B | 40 – 67 | 18,3 | 25,0 | 15,2 | 41,5 | Fr-Arg. a Argilosa | 1,49 | 0,28 | 0,48 |
| | C | 67 - ... | 18,8 | 47,3 | 9,6 | 24,3 | Fr-Arg-Arenosa | 1,62 | 0,15 | 0,25 |
| | | | | | | | | | | |

* Devido à diminuta espessura deste horizonte neste perfil, não foi possível recolher amostras em boas condições.

Os valores de retenção da água no solo, obtidos a partir das amostras recolhidas nos três perfis (Anexo B) permitiram determinar uma curva de humidade-tensão para cada horizonte do solo (fig. 3.2).

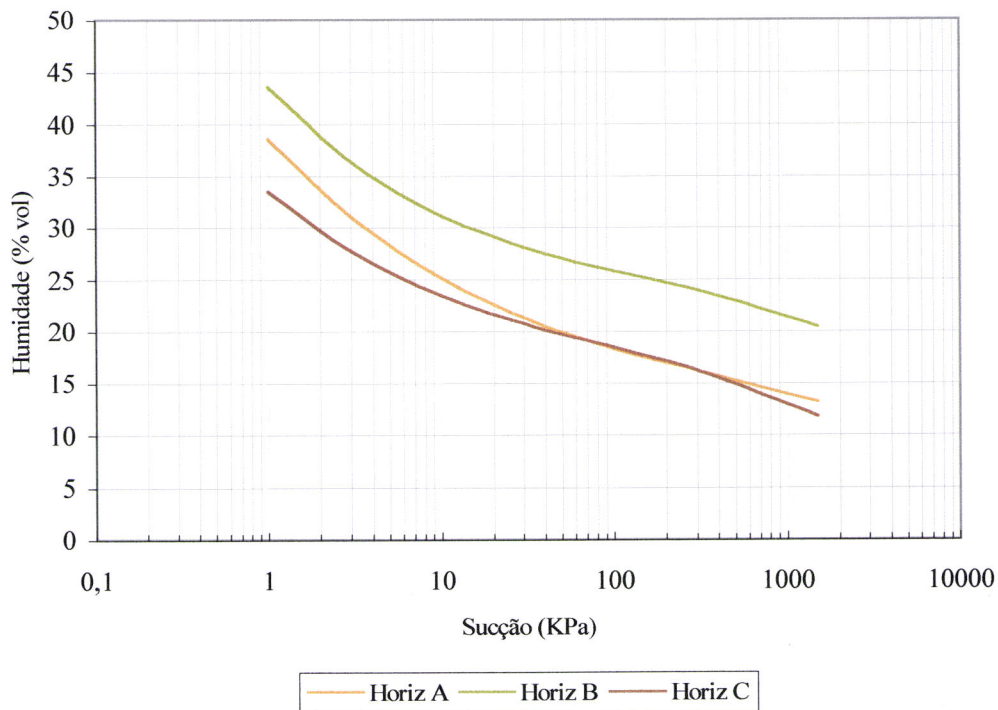


Figura 3.2 – Curvas de humidade – tensão.

As expressões matemáticas que permitiram representar as curvas de humidade-tensão do solo (equações 3.1 a 3.3), apresentam elevados valores de correlação ($r > 0,96$), assim como níveis de significância também elevados ($p < 0,01$).

$$\text{Horiz. A: } \theta = 38,575 - 7,922 \ln S + 1,033 (\ln S)^2 - 0,058 (\ln S)^3 \quad r^2 = 0,96 \quad (3.1)$$

$$\text{Horiz. B: } \theta = 43,588 - 7,833 \ln S + 1,238 (\ln S)^2 - 0,082 (\ln S)^3 \quad r^2 = 0,92 \quad (3.2)$$

$$\text{Horiz. C: } \theta = 33,434 - 6,165 \ln S + 0,958 (\ln S)^2 - 0,071 (\ln S)^3 \quad r^2 = 0,93 \quad (3.3)$$

sendo θ o teor volumétrico de água do solo (%) para cada valor de sucção, S (kPa), aplicada.

3.1.3. A preparação do solo

Para a realização dos diferentes ensaios foi necessária a execução de algumas operações culturais, nomeadamente algumas mobilizações do solo, para o deixar em condições idênticas às que ocorrem normalmente numa situação real de rega.

A alteração da infiltração e a ocorrência de escoamento será mais evidente quando o solo se encontra desprotegido, sem vegetação, e está assim mais exposto à acção da água aplicada. Esta situação ocorre normalmente quando a planta pelo seu pequeno porte deixa grandes áreas de terreno sem cobertura, que recebem directamente a água aplicada; ou na situação de regas com uma frequência elevada, em que muitas vezes a água é aplicada quando o solo apresenta teores de água na camada superficial demasiado elevados para permitir uma boa infiltração.

A introdução de uma qualquer cultura no terreno traria dois problemas diferentes. Por um lado, o crescimento variável da cultura era mais um factor de difícil controlo e que poderia dificultar a análise dos resultados; por outro lado, a repetição de alguns ensaios no mesmo ano tornava-se impossível devido ao curto espaço de tempo disponível para a sua realização. Por este motivo optou-se por realizar os ensaios com o solo nú e sem a presença de qualquer cultura.

Esta escolha permite a simulação de regas de pré-emergência da cultura, com dotações e teores de água do solo diferentes, e ainda a simulação do efeito da rega em situações em que, apesar de existir uma cultura no terreno, esta não cobre toda a área regada, deixando manchas de solo desprotegido, mais susceptíveis ao aparecimento de escoamento e consequente erosão do solo.

As técnicas de preparação do solo hoje em dia são muito diversificadas, existindo várias opções consoante o tipo de solo e a cultura a instalar. Uma vez que não era possível, nem era objectivo deste trabalho, experimentar diferentes sistemas de preparação do solo, teve que se escolher um que fosse utilizado entre nós com alguma frequência e que não alterasse muito as características do perfil do solo, permitindo ter o solo em condições idênticas para as diferentes repetições dos ensaios.

Como o solo, durante o Inverno, esteve em pousio, verificou-se o crescimento de vegetação natural que tinha de ser eliminada. Para este efeito, fez-se, cerca de três semanas antes dos primeiros ensaios de cada ano, a aplicação de um herbicida total. Depois de deixar

actuar o produto durante alguns dias foi feita uma gradagem, com uma grade de discos, a uma profundidade de cerca de 20 cm. A superfície do solo ficou assim praticamente limpa.

Antes do início de cada série de ensaios, 3 ou 4 dias antes, foi ainda realizada uma escarificação até 10-15 cm de profundidade, utilizando um escarificador ao qual foi acoplado um rojão, com o objectivo de deixar a superfície do solo o mais regular possível.

Como se pode verificar todas estas mobilizações ocorrem ao nível do primeiro horizonte do solo, não havendo por isso mistura de horizontes.

3.2. A rampa rotativa

A rampa rotativa utilizada (fig. 3.3) tinha duas torres que suportavam dois lanços com 12 m de comprimento cada um e um lanço suspenso de 6 m, num comprimento total de 30 m. Os lanços eram constituídos por tubos com um diâmetro de 140 mm.



Figura 3.3 – Rampa rotativa utilizada nos ensaios.

Como já se referiu, o movimento da rampa rotativa é intermitente e regulado pelo avanço da última torre. No caso em questão o sistema vinha equipado com um selector de velocidade, com valores entre 3 e 60, correspondendo estes ao número de segundos que em cada minuto a última torre está em movimento.

As velocidades da rampa rotativa para cada um dos valores do selector de velocidade são as apresentadas no quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Velocidades de deslocamento da rampa rotativa

| Escala do selector | Tempo de uma volta completa (h) | Velocidade (m/h) |
|--------------------|---------------------------------|------------------|
| 60 | 1,75 | 86,2 |
| 50 | 2,04 | 73,9 |
| 40 | 2,33 | 64,7 |
| 30 | 2,62 | 57,6 |
| 20 | 2,91 | 51,8 |

A fonte de alimentação de água do sistema era um reservatório com uma capacidade de 21 m³, de onde a água era posteriormente bombeada. Antes de entrar na rampa rotativa a água passava por uma válvula reguladora de pressão e um contador volumétrico, o que permitiu controlar a pressão e o caudal de entrada.

O primeiro lança das rampas rotativas, por mover-se mais lentamente e receber a totalidade do caudal, geralmente apresenta um funcionamento deficiente, com uma má distribuição da água aplicada. Por esta razão, não foi considerado, tendo-se desenvolvido o ensaio sob os dois últimos lanços.

Como o primeiro lança não era objecto de estudo, e também para reduzir o caudal de alimentação necessário, foi retirado o primeiro aspersor tapando-se a respectiva saída de água. Diminuiu-se assim o número total de aspersores, o que obrigou a um ajustamento no valor da área regada.

3.2.1. Condições gerais de funcionamento

As condições de funcionamento da rampa rotativa foram modificadas de modo a ser possível simular a parte final de um sistema de maiores dimensões, funcionando com baixa pressão. À medida que aumenta o tamanho da rampa rotativa irá aumentar a intensidade

pluviométrica da mesma dificultando a sua compatibilização com as características de infiltração do solo. Os valores mais elevados de intensidade de aplicação irão ocorrer na extremidade da rampa, razão pela qual se tentaram simular estas condições de funcionamento.

A intensidade pluviométrica aplicada depende fundamentalmente de três factores: tipo de aspersor, caudal e pressão de funcionamento.

O aspersor escolhido foi o mais comum nas rampas rotativas de baixa pressão, ou seja, um aspersor estático. Nestes aspersores foram utilizados dois tipos de pratos deflectores diferentes (fig. 3.4), o que foi suficiente para originar dois aspersores com características de funcionamento e padrões de distribuição da água também diferentes. Isto permitiu estudar a influência do tipo de aspersor sobre as características da infiltração e do escoamento.

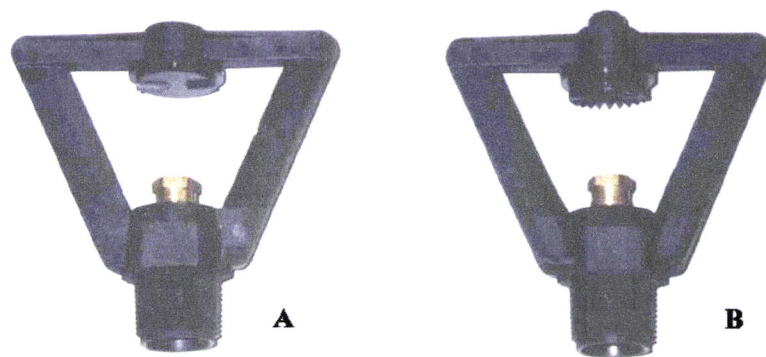


Figura 3.4 – Aspersores estáticos de baixa pressão com dois tipos de pratos deflectores:
A – lisos e B – estriados.

Os aspersores, cuja distância ao solo era de 3,9 m, estavam equipados com um regulador de pressão, garantindo uma pressão de funcionamento máxima de 140 kPa, e eliminando assim o possível efeito da topografia sobre a pressão individual de cada aspersor.

A intensidade pluviométrica vai depender do espaçamento dos aspersores e do caudal aplicado por cada um deles, que é função do diâmetro do bico e das características do sistema de bombagem.

A variação da pressão ao longo da rampa rotativa foi controlada através de manómetros ligados por um tubo à base dos aspersores.

No primeiro ano de ensaios os aspersores tinham um espaçamento de 3 m, num total de 9 aspersores ao longo de toda a rampa rotativa, situando-se o primeiro a 4,5 m do pólo. Os diâmetros dos bicos utilizados foram respectivamente, do pólo para a extremidade da rampa rotativa: 2,75 – 3,0 – 4,0 – 4,5 – 4,5 – 5,0 – 5,5 – 5,75 e 6,0 mm.

Nestas condições obteve-se uma intensidade pluviométrica máxima de cerca de 55 a 67,5 mm/h. Estes valores de intensidade pluviométrica serão aproximados aos aplicados na parte final de uma máquina com cerca de 200 m de comprimento, funcionando com esta pressão.

No segundo ano de ensaios, executaram-se algumas alterações no equipamento, nomeadamente no sistema de bombagem e no espaçamento dos aspersores. A alteração em termos de espaçamento dos aspersores, foi a redução do espaçamento para metade (1,5 m), o que conduziu a um total de 17 aspersores, com os seguintes diâmetros, do pólo para a extremidade da rampa rotativa: 2,75 - 3,0 - 3,0 - 3,5 - 4,0 - 4,25 - 4,25 - 4,5 - 4,5 - 4,75 - 5,0 - 5,25 - 5,5 - 5,5 - 5,75 - 5,75 e 6,0 mm.

A diminuição do espaçamento e aumento do número de aspersores permitiu aumentar a intensidade pluviométrica máxima para valores da ordem dos 100-125 mm/h, que corresponderão a intensidades de aplicação máxima da parte final de uma rampa rotativa com cerca de 400 m de comprimento. Gamito (1998) observou valores de intensidade pluviométrica máxima da ordem dos 120 mm/h a uma distância do pólo entre os 350 e 400 m, numa rampa rotativa de 472 m de comprimento, com pressões de funcionamento dos aspersores (estáticos com deflectores estriados) de 150 kPa, ou seja em condições idênticas às utilizadas nestes ensaios.

Foi assim possível, em dois anos, estudar o efeito da aplicação da água por rampas rotativas com diferentes tamanhos e que por isso aplicam a água com diferentes intensidades pluviométricas. Ao mesmo tempo, o aumento da intensidade pluviométrica permite acentuar o efeito das características de aplicação da água com os aspersores com os dois tipos de pratos deflectores.

No quadro 3.3 estão resumidos os principais parâmetros que caracterizaram o funcionamento da rampa rotativa nos dois anos de ensaios. A conjugação de diferentes valores de pressão, caudal, diâmetro dos bicos e forma do prato deflector, conduziu à formação de padrões de distribuição da água com diferentes tamanhos de gotas, o que foi suficiente para originar diferenças nos diâmetros molhados dos aspersores e nos valores de intensidade pluviométrica.

Quadro 3.3 – Parâmetros de funcionamento da rampa rotativa

| Ano de ensaio | Caudal da rampa rotativa (m ³ /h) | Pressão no pólo (kPa) | Espaçamento dos aspersores (m) | Intensidade pluviométrica máxima (mm/h) | | Diâmetro molhado (m) | |
|---------------|--|-----------------------|--------------------------------|---|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | | | | Aspersores c/ def. lisos | Aspersores c/ def. estriados | Aspersores c/ def. lisos | Aspersores c/ def. estriados |
| 1° | 9,03 | 230 | 3 | 63 - 68 | 53 - 63 | 10 - 12 | 14 - 16 |
| 2° | 14,50 | 265 | 1,5 | 111 - 125 | 99 - 116 | 11 - 12,8 | 14 - 16 |

A determinação da distribuição dos diâmetros das gotas aplicadas pelos aspersores utilizados, foi feita segundo o modelo proposto por Kincaid *et al.* (1996):

$$p = \left(1 - e^{-0,693 (d/d_{50})^{n_o}} \right) 100 \quad (3.4)$$

em que,

p - percentagem de gotas de diâmetro inferior a d , em relação ao volume total emitido;

d - diâmetro da gota (mm);

d_{50} - diâmetro médio das gotas (mm);

n_o - expoente adimensional.

O diâmetro médio das gotas (d_{50}) e o expoente adimensional (n_o), podem-se determinar, em função da razão entre o diâmetro do bico e a pressão de funcionamento (r), através das seguintes expressões:

$$d_{50} = a_d + b_d r \quad (3.5)$$

e

$$n_o = a_n + b_n r \quad (3.6)$$

onde a_d , b_d , a_n e b_n são coeficientes de regressão.

Segundo Kincaid *et al.* (1996), no caso dos aspersores estáticos, o tamanho das gotas é mais influenciado pelo tamanho do bico do aspersor do que pela pressão de funcionamento. Estes autores realizaram ensaios que lhes permitiram determinar coeficientes de regressão

para diferentes tipos de aspersores, de entre os quais se escolheram aqueles referentes ao tipo de aspersor e condições de funcionamento mais próximas às ensaiadas neste trabalho (quadro 3.4).

Como os valores de r variam de acordo com o diâmetro do bico, Kincaid *et al.* (1996) estimaram um valor r_d e outro r_n para utilizar em vez de r , respectivamente nas equações (3.5) e (3.6). Este valor foi determinado por regressão matemática com base em valores de d_{50} , medidos em ensaios realizados com aspersores estáticos com bicos entre os 2,98 e os 9,15 mm, intervalo que abrange os diâmetros dos bicos dos aspersores utilizados neste trabalho.

Quadro 3.4 – Coeficientes para estimar o tamanho médio das gotas de aspersores estáticos (Kincaid *et al.*, 1996)

| Tipo de deflector | a_d | b_d | r_d | a_n | b_n | r_n |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Liso | 0,66 | 680 | 0,77 | 2,74 | -920 | 0,59 |
| Estriado | 0,82 | 620 | 0,74 | 2,68 | -750 | 0,46 |

A partir dos valores do quadro anterior calcularam-se os diâmetros médios (d_{50}) das gotas aplicadas pelos aspersores com deflectores estriados e lisos, obtendo-se valores de 1,28 e 1,18 mm, respectivamente.

A distribuição das gotas de diferentes tamanhos, calculada de acordo com a expressão (3.4) é apresentada na figura 3.5, onde se observa que os aspersores com deflectores estriados aplicam água com gotas de maior tamanho, o que ocasiona um maior diâmetro molhado e uma menor intensidade pluviométrica (quadro 3.3).

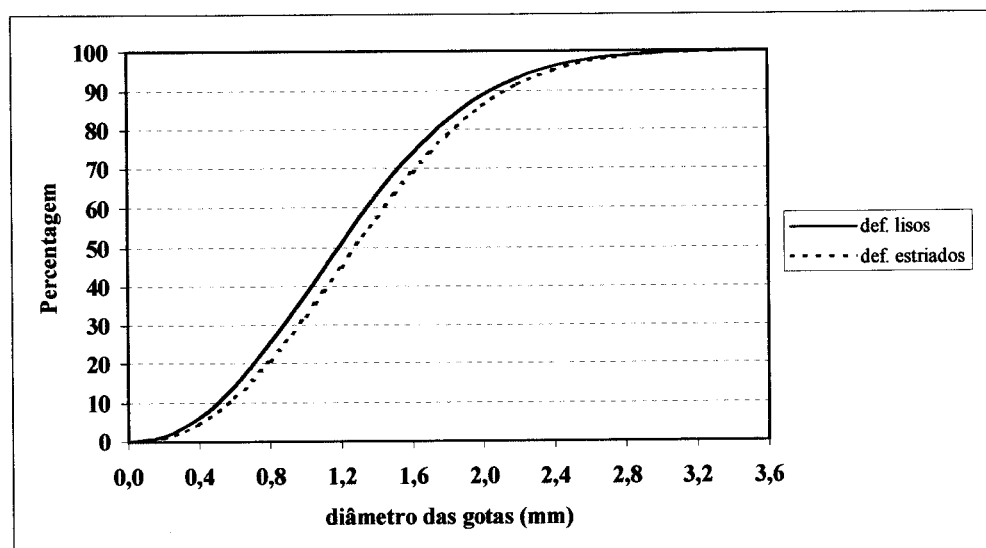


Figura 3.5 – Distribuição dos diâmetros das gotas aplicadas pelos aspersores com deflectores lisos e estriados.

3.3. Ensaios de infiltração

Os ensaios de infiltração permitiram avaliar o efeito da precipitação aplicada pelos aspersores com os dois tipos de deflectores sobre a capacidade de infiltração do solo.

O método utilizado para a realização destes ensaios foi o de Shockley (Serafim, 1994), a seguir descrito.

3.3.1. Método de Shockley

Este método apresenta a particularidade de utilizar o próprio equipamento de rega para aplicar a água sobre o terreno, permitindo realizar o ensaio de infiltração em condições idênticas às da própria rega.

Antes de iniciar o ensaio, a rampa rotativa é imobilizada numa determinada posição do terreno e são colocados no solo, sob a rampa e perpendiculares a esta, recipientes (pluviómetros), espaçados 1 metro uns dos outros, até uma distância, para cada lado da rampa rotativa, igual ou superior ao alcance dos aspersores (fig. 3.6). Estes pluviómetros recolhem a quantidade de água que chega ao solo, durante o ensaio.

Para obter mais dados foram colocadas 3 linhas de pluviômetros, que devido à sua proximidade podem ser consideradas repetições umas das outras.

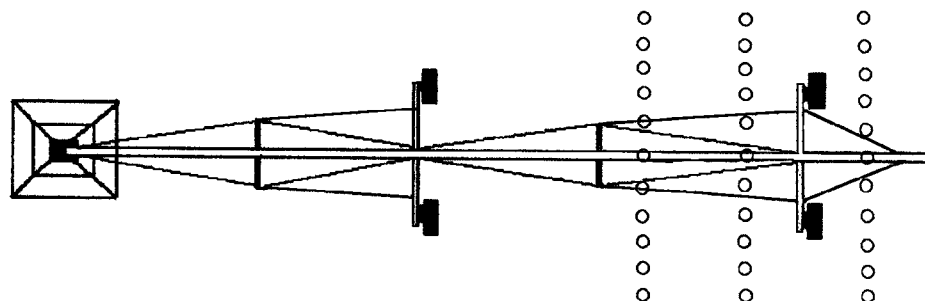


Figura 3.6 – Esquema da disposição dos pluviômetros nos ensaios de infiltração.

O ensaio inicia-se com a aplicação da água, pela rampa rotativa imobilizada, e termina em cada ponto do terreno no momento em que junto ao respectivo pluviômetro se verifica o empoçamento da água. Este momento, que representa a transição de uma taxa de infiltração da água no solo superior à taxa de aplicação (situação em que predomina a infiltração) para uma taxa de infiltração da água inferior à sua taxa de aplicação (início do armazenamento superficial e posterior escoamento), é atingido nos vários pontos em tempos diferentes, uma vez que a intensidade de aplicação vai variar com a distância a que o pluviômetro se situa da rampa rotativa.

No momento em que se verifica o empoçamento junto a um determinado pluviômetro, este é retirado do terreno e é então medido o volume de água recolhido. A divisão deste volume (que é igual ao volume infiltrado) pelo tempo que o originou corresponde ao valor da intensidade de aplicação da água nesse ponto, que se considera constante ao longo do tempo. Como, até esse momento, não se tinha verificado nem acumulação de água à superfície nem escoamento, isso indica que a água aplicada com uma determinada intensidade ou taxa se infiltrou a essa mesma taxa, que será a taxa de infiltração do solo.

Havendo uma série de pontos que recebem e infiltram água a diferentes taxas durante diferentes tempos, no fim de cada ensaio existe um conjunto de pontos, cada um deles constituído por um par de valores (taxa aplicação/infiltração, tempo) que por regressão

matemática permitem a determinação de uma curva da infiltrabilidade do solo em função do tempo. A regressão matemática foi feita utilizando um processo numérico iterativo não-linear combinado com o método dos mínimos quadrados, tendo-se efectuado também uma análise estatística da significância do ajustamento das curvas obtidas, relativamente aos dados observados, através do teste F (Davis, 1986).

Os dados dos vários ensaios foram ajustados às equações tipo da infiltrabilidade referidas no capítulo 2, nomeadamente as apresentadas por: Philip (eq. 2.20), Green-Ampt (eq. 2.26), Kostiakov (eq. 2.28), Kostiakov-Lewis (eq. 2.30) e Horton (eq. 2.32), de modo a verificar se existia um melhor ajustamento a algum destes tipos de equações em particular. Na resolução da equação de Green-Ampt, considerou-se a condição de que, para uma taxa de aplicação/infiltração constante, o volume infiltrado será igual ao produto da taxa de infiltração pelo tempo ($I = i t$).

Após a realização das várias regressões escolheu-se uma equação representativa de cada ensaio, utilizando-se como critério de selecção a eliminação: i) das equações não significativas, ii) das equações determinadas com base em valores de intensidade de aplicação com intervalo pequeno e iii) de coeficientes de determinação (r^2) pequenos. Em caso de ainda ser necessário escolhia-se a equação que apresentava valores de infiltrabilidade intermédios relativamente às outras.

3.3.2. Avaliação dos factores que influenciam a infiltrabilidade

Dada a diversidade de factores que, directa ou indirectamente, influenciam a infiltrabilidade do solo, foi necessário fixar todos os que era possível e avaliar os restantes, para se poder afirmar com segurança se a simples troca de deflector no aspersor ocasiona diferenças na infiltrabilidade do solo, ou se elas são devidas à influência de outros factores.

Na figura 3.7 apresentam-se os diversos factores, com a indicação do modo como foram considerados (fixos, medidos ou calculados).

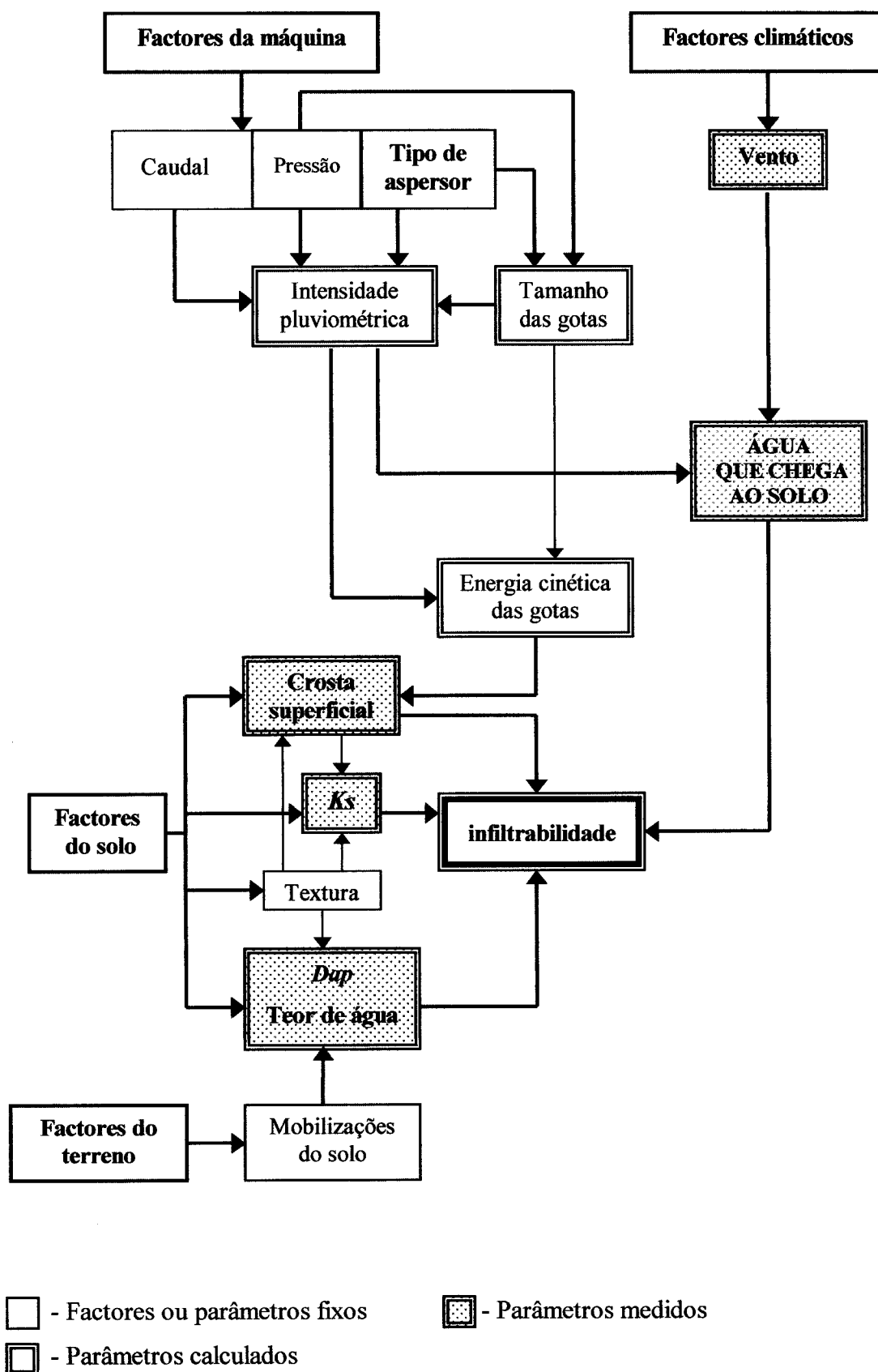


Figura 3.7 – Principais factores que influenciam a infiltrabilidade do solo.

3.3.2.1. Factores da máquina

As condições de funcionamento da máquina, nomeadamente o caudal, a pressão e o espaçamento entre aspersores, foram fixadas, em cada um dos anos, de acordo com os valores apresentados no quadro 3.3. Nestas condições, as variações que ocorrem nas características de precipitação, em cada ano, serão apenas função do tipo de deflector utilizado nos aspersores. A dimensão das gotas emitidas pelos aspersores, e a sua correspondente energia cinética, irão influenciar a formação da crosta superficial (fig. 3.7), e afectar a infiltrabilidade do solo.

3.3.2.1.1. Energia cinética da precipitação

Para estimar a energia cinética das gotas emitidas pelos aspersores durante os ensaios de infiltração recorreu-se a uma versão do programa DRIFT, gentilmente cedida pelo seu autor, o Dr. Dennis Kincaid.

Este programa (Kincaid, 1996) calcula a energia cinética total por unidade de massa de um determinado padrão de distribuição, em função das velocidades de impacto das gotas de diferentes tamanhos:

$$Ec_T = \frac{\sum_{j=1}^n p_j (v_{ig})_j^2}{2} \quad (3.7)$$

sendo:

Ec_T - energia cinética total por unidade de massa, (J/kg);

p_j - percentagem de gotas com um diâmetro correspondente ao intervalo j ;

v_{ig} - velocidade de impacto das gotas de água no solo (m/s);

n - nº total de intervalos de diâmetros de gotas.

A distribuição dos tamanhos de gotas pode ser medida, recorrendo a equipamentos laser (Kincaid *et al.*, 1996) ou estimada de acordo com a metodologia apresentada no ponto 3.2.1 e que foi a utilizada neste trabalho.

A velocidade de impacto das gotas de água no solo é calculada resolvendo as equações (2.45) e (2.46) determinadas com base na teoria da balística aplicada a uma gota de água:

$$-\frac{3}{4} C_D \rho_{ar} v_{rx}^2 = \rho_g d \frac{dv_x}{dt} \quad (2.45)$$

$$g d (\rho_g - \rho_{ar}) - \frac{3}{4} C_D \rho_{ar} v_{rz}^2 = d \rho_g \frac{dv_z}{dt} \quad (2.46)$$

O coeficiente de arrastamento, C_D , é calculado através das equações (2.48) e (2.49).

A massa volúmica média do ar é determinada por:

$$\rho_{ar} = 16,019 e^{\left(-\frac{724,3+T_{ar}}{287,8}\right)} \left(1 - 2,257 \cdot 10^{-5} Alt\right)^{4,2553} \quad (3.8)$$

onde Alt é a altitude (m) e T_{ar} , a temperatura do ar ($^{\circ}C$).

A viscosidade cinemática do ar é dada por:

$$\nu = \frac{1,087 \cdot 10^{-6} (1,8 T_{ar} + 491,67)^{1,5}}{\rho_a (1,8 T_{ar} + 690,27)} \quad (3.9)$$

A velocidade com que a água é emitida pelos bicos dos aspersores pode ser calculada em função da sua pressão de funcionamento por:

$$v_j = (2P)^{0,5} \quad (3.10)$$

em que v_j é a velocidade do jacto (m/s) e P a pressão do bico do aspersor (kPa).

Kincaid (1996) avaliou o modelo, composto por todas estas equações, utilizando dados de medições das velocidades de queda de gotas de água, tendo encontrado uma correlação muito elevada ($r = 0,999$) entre as velocidades calculadas e medidas, o que valida o modelo para estas condições.

À medida que as gotas de água viajam pelo ar, a velocidade vertical relativa aproxima-se da velocidade terminal de queda, e a velocidade horizontal aproxima-se da velocidade do ar. Imediatamente após a saída do bico, as gotas viajam como uma massa (na realidade as gotas formam-se à medida que esta massa se rompe), e por isso estão sujeitas a um menor

arrastamento pelo vento. De modo a calcular o arrastamento, a velocidade relativa foi multiplicada pelo factor F_c :

$$F_c = \left(0,1 + 0,9 \frac{L}{L_D} \right) \quad \text{para } L < L_D \quad \text{e} \quad F_c = 1,0 \quad \text{para } L \geq L_D \quad (3.11)$$

onde L é a distância a partir do bico (mm) e L_D é um parâmetro empírico da distância (m), que no caso dos aspersores estáticos corresponde a cerca de 5 % do raio molhado.

A existência de um prato deflector no aspersor estático irá provocar uma redução da velocidade da água, e a velocidade inicial real da trajectória, v_i , será menor que a velocidade do jacto ao sair do bico.

Segundo Kincaid (1996), para os aspersores com um prato deflector liso, a razão v_i/v_j , pode-se relacionar com a razão do diâmetro do bico em relação ao diâmetro do prato deflector, d_b/d_p , através de:

$$\frac{v_i}{v_j} = \frac{d_b / d_p}{0,3} , \quad \text{para } d_b/d_p < 0,3 \quad (3.12)$$

ou

$$v_i/v_j = 0,97 , \quad \text{para } d_b/d_p > 0,3 . \quad (3.13)$$

Para aspersores com pratos deflectores estriados, $v_i/v_j = 0,97$, para qualquer relação d_b/d_p . Como se verifica a redução inicial da velocidade tem um efeito muito pequeno na velocidade final da gota e pode ser ignorada.

Finalmente, após ter verificado que o aumento da velocidade do vento aumentava a componente horizontal da velocidade das gotas, conduzindo a um aumento significativo da energia de impacto, propôs a seguinte aproximação para estimar esse efeito:

$$Ec_{Tv} = Ec_T + v_v^{1,5} \quad (3.14)$$

em que Ec_{Tv} e Ec_T representam, respectivamente, a energia cinética total por unidade de massa com e sem vento (J/kg), e v_v a velocidade do vento (m/s).

3.3.2.2. Factores climáticos

O factor climático mais influente na rega por aspersão é sem dúvida o vento. A ocorrência de vento com velocidades elevadas pode afectar a realização dos ensaios de infiltração, pois desvia a água aplicada num ponto para outros, modificando a taxa de aplicação da água sobre cada ponto do terreno.

A velocidade do vento foi medida antes de cada ensaio utilizando um anemómetro portátil, o que permitiu iniciar todos os ensaios na ausência de vento, ou com velocidades inferiores a 0,1 m/s.

3.3.2.3. Factores do solo

A capacidade do solo em infiltrar a água aplicada está directamente dependente do seu teor de água antes dessa mesma aplicação, e de condições especiais da camada superficial, como a existência de compactação e crosta superficial, que irá diminuir a condutividade hidráulica do solo e, conseqüentemente a sua infiltrabilidade.

3.3.2.3.1. Teor de água do solo

A medição do teor de água do solo, antes de cada ensaio, foi condicionada pelas características de funcionamento dos diferentes equipamentos utilizados, o que provocou a necessidade de utilizar mais do que um equipamento e método.

Nos primeiros centímetros de solo foi feita no primeiro ano recorrendo ao método gravimétrico. Recolheram-se amostras utilizando anéis metálicos de 100 cm³ de volume e uma altura de 5 cm, o que permitiu determinar o teor de água médio dos primeiros 5 cm do solo. No segundo ano já foi possível dispor de uma sonda Theta probe ML2 (fig. 3.8) que possibilita a obtenção do teor de água do solo em tempo real.

Esta sonda mede o teor volumétrico de água do solo, θ , através do método da resposta a alterações na constante dielétrica aparente (Whalley *et al.*, 1992; Paltineau & Starr, 1997). O método baseia-se no facto da constante dielétrica da água ($\epsilon = 80$) ser consideravelmente superior à do ar ($\epsilon = 1$) e à das partículas sólidas do solo ($3 < \epsilon < 7$). Assim, a constante

dielétrica global de um material composto, neste caso o solo, é altamente dependente da proporção de água presente e a sua medição pode ser utilizada para determinar esta proporção de um modo rigoroso.



Figura 3.8 – Sonda Theta probe ML2.

As alterações na constante dielétrica, medidas através da inserção no solo das 4 varetas metálicas da sonda, são convertidas em valores de voltagem, proporcionais ao teor de água do solo, apresentando no mostrador do aparelho registador valores de 0 a 1 volts. A conversão dos valores em volts para teor volumétrico de água no solo é feita através de uma expressão matemática, que para aumentar o rigor da medição deverá ser específica para cada tipo de solo. Fez-se por isso a calibração da sonda para o solo estudado, recolhendo 15 amostras de solo, com diferentes teores de água, que foram determinados gravimetricamente. Estes valores e as respectivas leituras da sonda recolhidas nos mesmos locais permitiram determinar a sua relação através de uma regressão linear, baseada no método dos mínimos quadrados (fig. 3.9).

A expressão obtida na calibração da sonda foi:

$$\theta = 33,596 V - 0,257 \quad (3.15)$$

sendo θ o teor volumétrico de água do solo e V o valor do sinal registado pela sonda (volts). A expressão apresenta um ajustamento aos valores medidos elevado ($r^2 = 0,97$) e é altamente significativa ($p < 0,001$).

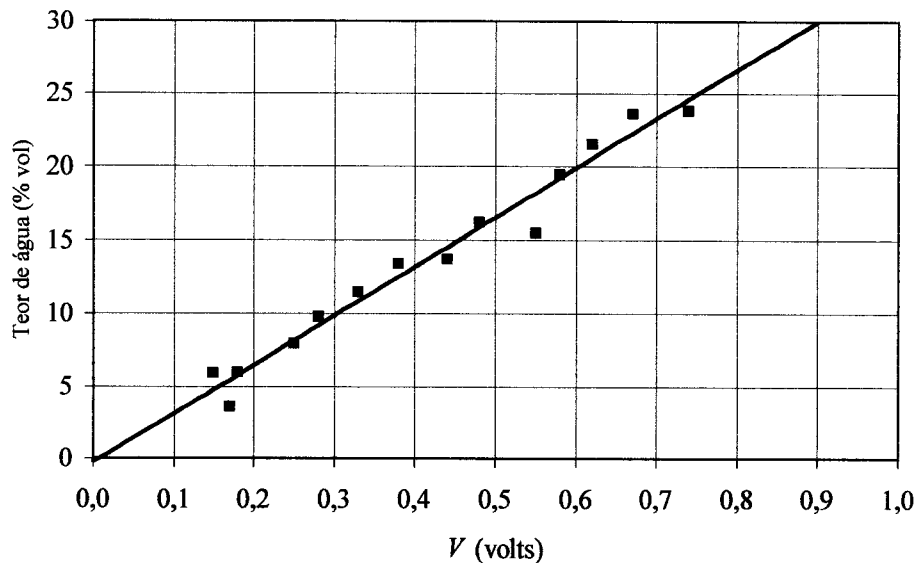


Figura 3.9 – Recta de calibração da sonda Theta probe ML2.

Em qualquer dos dois anos, a avaliação do teor de água na camada superficial do solo foi feita, antes de se realizar cada ensaio, com três medições ao longo de cada posição onde se colocou uma linha de pluviómetros.

Mas, não é apenas o teor de água na camada superficial que afecta a infiltrabilidade do solo. O armazenamento de água ao longo do perfil do solo limita a infiltração de mais água, originando uma saturação do solo mais rápida.

A determinação do teor de água no perfil vertical do solo, ao longo dos vários ensaios, foi feita recorrendo a uma sonda capacitiva, que utiliza o método da capacitância (Kutilek & Nielsen, 1994; Paltineau & Starr, 1997), também baseado na resposta às variações da constante dieléctrica do solo.

Este equipamento/método já é utilizado no Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora há vários anos, para avaliar o teor de água do solo, nomeadamente em solos Mediterrâneos (Santos, 1995; Baptista, 1997; Gamito, 1998). Santos (1995) comparou os resultados obtidos com este equipamento e com uma sonda de neutrões e concluiu que eles eram tão bons ou até melhores que os apresentados pela sonda de neutrões.

O acesso da sonda capacitiva ao perfil vertical do solo é feito através de tubos de PVC enterrados verticalmente até uma profundidade correspondente ao início do horizonte C do solo, ou seja 60-70 cm. Em cada posição escolhida para realizar os ensaios de infiltração

foram colocados 2 tubos de acesso da sonda junto às linhas de pluviómetros, realizando-se medições do teor de água imediatamente antes de cada ensaio de infiltração, de 10 em 10 cm de profundidade e até à profundidade máxima possível. Como o primeiro valor medido é aos 10 cm de profundidade, utilizaram-se os valores medidos gravimetricamente ou com a sonda Theta probe à superfície, para completar os valores do teor de água ao longo do perfil do solo.

A frequência da resposta ao sinal emitido pelo oscilador electrónico, que faz parte do sensor da sonda capacitiva, é registada em cada profundidade escolhida, e depois utilizada numa fórmula que permite convertê-la em teor de água do solo. Para aplicar a referida fórmula, fornecida no manual da sonda, é necessário ter uma leitura da frequência do sensor na água, no ar (a média das leituras no início e no fim da utilização da sonda) e à profundidade de solo desejada.

Se F_a for a frequência na água, F_{ar} a frequência no ar e F_s qualquer frequência obtida nos tubos de acesso ao solo, pode-se então definir uma frequência normalizada, FN , definida por:

$$FN = \frac{F_{ar}^{7,692} - F_s^{7,692}}{F_{ar}^{7,692} - F_a^{7,692}} \quad (3.16)$$

Esta frequência normalizada é depois utilizada numa expressão do tipo: $\theta = f(FN)$, em que θ , é o teor volumétrico de água do solo.

Na utilização da sonda num perfil vertical do solo a constante dieléctrica pode modificar-se com a profundidade devido a alterações na estrutura e constituição do solo. Este efeito, contudo, não provoca diferenças superiores a 2 % do teor de água do solo (DIDCOT, 1994).

O rigor dos valores determinados com a sonda, aumentará se esta for calibrada para cada solo. Esta calibração é feita ao mesmo tempo que a instalação dos tubos de acesso, recolhendo-se amostras de solo a diferentes profundidades, para posterior determinação gravimétrica do seu teor de água. Os valores obtidos pelo método gravimétrico são depois confrontados com as frequências medidas às mesmas profundidades e é determinada a sua relação através de uma regressão matemática não linear, baseada no método dos mínimos quadrados.

Neste caso foram recolhidas cerca de 30 amostras de solo (fig. 3.10), mais uma vez com diferentes humidades, e que permitiram obter a seguinte expressão:

$$\theta = 5,939 + 19,676 FN^{4,949} \quad (3.17)$$

sendo θ , o teor volumétrico de água e FN a frequência normalizada. A expressão obtida apresenta um ajustamento aos dados observados elevado ($r^2 = 0,95$) e é altamente significativa ($p < 0,001$).

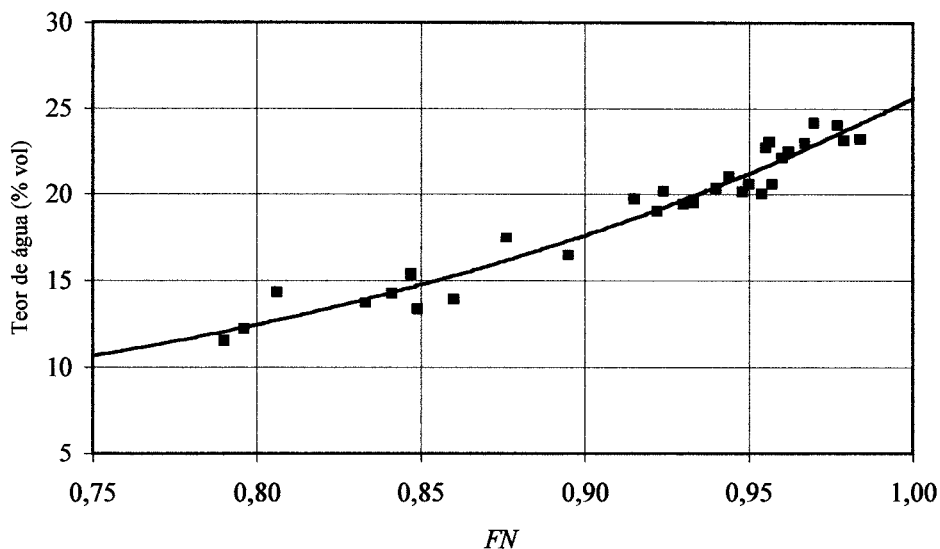


Figura 3.10 – Curva de calibração da sonda capacitiva.

3.3.2.3.2. Compactação e formação de crosta superficial

O impacto no solo de gotas de água de diferente tamanho e por isso, com energias cinéticas diferentes, provoca como já foi referido anteriormente, a compactação superficial e possibilita a formação de uma crosta, que irá influenciar a condutividade hidráulica do solo, e consequentemente a sua infiltrabilidade.

A avaliação do aumento da compactação superficial ao longo dos ensaios e com a aplicação da água com as duas configurações dos aspersores foi feita através da determinação da densidade aparente do solo, com base em amostras não perturbadas, recolhidas nos primeiros centímetros de solo antes de cada ensaio de infiltração.

No primeiro ano recorreu-se a anéis metálicos com 5 cm de altura e um volume de 100 cm³, tendo-se recolhido três amostras junto a cada linha de pluviómetros. Após os ensaios do primeiro ano verificou-se que a variação da densidade aparente não era muito notória. Assim, no segundo ano utilizaram-se anéis com uma altura apenas de 1,5 cm, tentando recolher apenas a camada de solo mais afectada pela eventual compactação devida ao impacto das gotas de água. O número de amostras recolhidas, a altura e locais de recolha foram iguais aos do ano anterior.

Para medir a espessura da crosta superficial, eventualmente formada, foram recolhidas antes de cada rega algumas amostras de solo, utilizando uma espátula, o que permitiu nalguns casos efectuar a referida medição.

3.3.2.3.3. Condutividade hidráulica superficial

Existem diversos métodos referidos na literatura para determinar a condutividade hidráulica do solo, entre processos laboratoriais e processos com determinações de campo. E apesar das limitações físicas e teóricas, muitos investigadores recorrem a práticas laboratoriais (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980), que são menos trabalhosas e mais expeditas.

Por outro lado, segundo Castanheira (1998) vários autores referem que os valores de condutividade hidráulica saturada obtidos em laboratório são mais elevados do que os obtidos em ensaios de campo. Em relação aos métodos de campo, o mesmo autor, citando a literatura da especialidade, refere que as determinações da condutividade hidráulica saturada, utilizando o permeâmetro de Guelph, conduzem a maiores variações e a valores mais baixos que outros métodos de campo como o permeâmetro de disco ou o infiltrómetro de duplo anel. Os seus ensaios efectuados em solos Mediterrâneos confirmaram essa mesma conclusão, com o permeâmetro de disco a obter o menor intervalo de variação nas observações efectuadas.

Assim, escolheu-se o permeâmetro de disco (Perroux & White, 1988), também denominado infiltrómetro de tensão (Ankeny *et al.*, 1991; Hussien & Warwick, 1995), para determinar a condutividade hidráulica do solo. Este aparelho (fig. 3.11) é constituído por um tubo vertical que serve de reservatório e cuja base é um disco, coberto de um dos lados por uma membrana porosa. Ligado a este tubo vertical existe um outro tubo também vertical que não é mais do que um dispositivo Mariotte, com uma entrada de ar. A membrana porosa é

constituída por uma rede de nylon com malha de 63 micras, que foi esticada e ajustada à parte exterior da cabeça do permeâmetro com um anel de borracha, antes de cada ensaio.

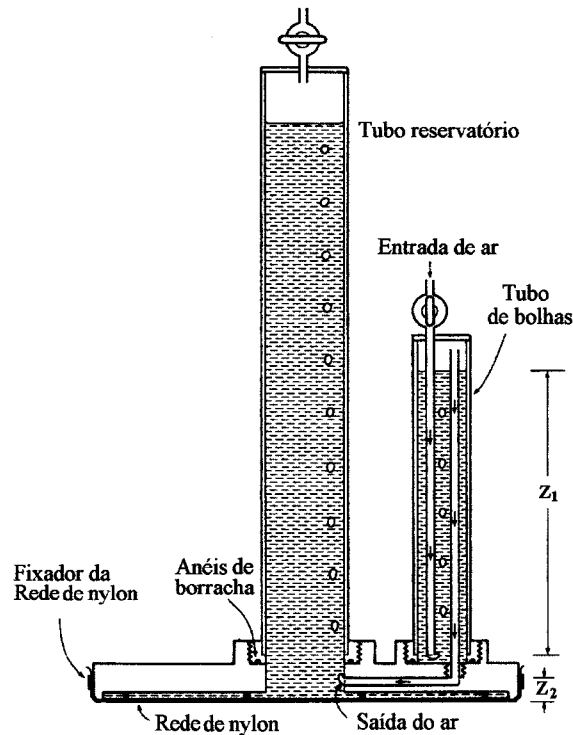


Figura 3.11 – Permeâmetro de disco (Perroux & White, 1988).

O permeâmetro cede água ao solo sob uma tensão (daí ser chamado por alguns autores infiltrômetro de tensão), $\psi < 0$, que é uniforme em toda a superfície do disco em contacto com o solo. A altura de água existente no segundo tubo vertical é utilizada para seleccionar e controlar o valor da tensão a utilizar no ensaio. A tensão (ψ) utilizada pode-se determinar pela diferença entre a distância a partir do tubo de saída do ar até à membrana, z_2 , e a altura de água no tubo de bolhas acima do ponto de entrada de ar, z_1 , (fig. 3.11), tal que:

$$\psi = z_2 - z_1 \quad . \quad (3.18)$$

Deste modo durante o processo de infiltração desenvolve-se uma zona de transmissão insaturada onde o potencial da água é negativo.

A água proveniente do permeâmetro infiltra-se de um modo tridimensional e é o resultado da acção da gravidade, das forças de capilaridade e da geometria da superfície. Nestas condições, inicialmente o fluxo de água é praticamente unidimensional. Para tempos mais longos, Wooding (1968), citado por Hussen & Warrick (1995), apresenta uma solução para um fluxo estabilizado por unidade de área, q :

$$q = K(\psi) \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_o} \right] \quad (3.19)$$

em que r_o é o raio da base do permeâmetro (L), $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica insaturada (LT^{-1}) correspondente à tensão de fornecimento da água (ψ) e λ_c é o comprimento capilar dos macroporos (L).

Ainda segundo Hussen & Warrick (1995), Gardner (1958) determina a condutividade hidráulica insaturada através da seguinte expressão:

$$K(\psi) = K_s e^{\left(\frac{\psi}{\lambda_c}\right)} \quad (3.20)$$

sendo $K(\psi)$ a condutividade hidráulica insaturada (LT^{-1}), para um potencial matricial ou tensão, ψ (L), e K_s a condutividade hidráulica saturada (LT^{-1}).

Hussen & Warrick (1995) descrevem uma série de métodos para a utilização deste aparelho. De entre os diferentes métodos apresentados foi escolhido o método de tensões múltiplas. Segundo os mesmos autores a vantagem deste método sobre os outros é de que não é comum originar valores negativos para a condutividade hidráulica e os resultados podem ser logo conhecidos porque todos os parâmetros são medidos directamente. As medições a várias tensões obtêm-se sem mover o permeâmetro, o que diminui as diferenças devidas à variabilidade espacial.

A utilização deste método permite chegar a vários valores de caudais estabilizados consoante o número de tensões utilizadas.

De acordo com Ankeny *et al.* (1991) pode-se substituir a relação de Gardner (eq. 3.20) na equação de Wooding (eq. 3.19) ficando:

$$q = K_s e^{\left(\frac{\psi}{\lambda_c}\right)} \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_o} \right]. \quad (3.21)$$

A obtenção de dois ou mais caudais estabilizados conduz a n equações, cada uma delas com dois valores desconhecidos de K_s e λ_c . Dividindo duas dessas equações, obtidas com tensões diferentes, e colocando λ_c em evidência obtém-se:

$$\lambda_c = \frac{|\psi_2 - \psi_1|}{|\ln(q_2/q_1)|} \quad (3.22)$$

onde q_1 e q_2 são os caudais estabilizados para duas tensões diferentes (ψ_1 e ψ_2). O valor de K_s pode-se determinar substituindo λ_c na equação (3.21).

A preparação do ensaio propriamente dito passa pelas seguintes fases:

1. Coloca-se o permeâmetro dentro de um balde com água.
2. Com a menor perturbação da superfície do solo, prepara-se uma área pouco irregular e nivelada com cerca de 30 x 30 cm, para colocar o permeâmetro.
3. Coloca-se um anel metálico (0,2 cm de espessura, 1,5 cm de altura e um diâmetro idêntico ao da base do permeâmetro) no centro da área preparada pressionando contra o solo. A superfície do solo deve estar nivelada de modo a assegurar um contacto total entre o anel e o solo.
4. Preenche-se a área interior do anel metálico com areia molhada até ao nível superior do anel, utilizando uma régua para nivelar a superfície.
5. Retira-se o permeâmetro do balde com água. Sopra-se suavemente para o interior do tubo de entrada de ar do tubo de bolhas, fechando-o em seguida, enquanto está a borbulhar, para eliminar a água do interior do tubo de entrada de ar. A carga de funcionamento será igual a $z_2 - z_1$.
6. Coloca-se o permeâmetro de novo no balde com água e enche-se o tubo reservatório com água utilizando uma bomba de sucção para remover o ar deste tubo.
7. Lê-se e regista-se a altura inicial de água no tubo reservatório numa folha de papel.
8. Destapa-se a entrada do tubo do ar para a tensão maior do tubo de bolhas. Coloca-se suavemente o permeâmetro sobre o anel com areia.

9. Inicia-se a contagem logo que as bolhas de ar se comecem a formar no tubo de bolhas. Registam-se as alturas do menisco em intervalos de tempo escolhidos, até se registar a estabilização do caudal, ou seja, que o menisco desça a mesma altura em intervalos de tempo iguais.
10. Sem mover o permeâmetro, destapa-se a entrada do tubo de ar para o valor de tensão imediatamente a seguir. Inicia-se então a contagem e prossegue-se como no ponto anterior.

O permeâmetro utilizado nas medições possuía um disco com um diâmetro de 11 cm, o tubo reservatório estava graduado numa escala de milímetros e o seu diâmetro era de 2 cm. As tensões aplicadas nas medições foram uma primeira de $-0,40$ m e outra de $-0,10$ m muito perto do potencial zero, ou seja da saturação. A escolha destes valores baseou-se nos dados de Castanheira (1998).

De salientar, no que se refere ao ponto 3 dos passos de preparação deste ensaio, ou seja a colocação do anel metálico no solo, que alguns autores defendem que o anel deve ser colocado no solo enterrando-o um pouco, e assim facilitando o fluxo vertical da água, enquanto outros defendem que o anel deve ser colocado na superfície do solo com o mínimo de perturbação possível. Nestes ensaios optou-se pela primeira solução, aquela recomendada por Hussen & Warrick (1995), uma vez que foi essa metodologia que se seguiu para a determinação da condutividade hidráulica.

Devido à duração de cada medição e à elevada frequência com que foram realizados os ensaios de infiltração, apenas foi possível efectuar duas medições antes de cada ensaio, geralmente na véspera do mesmo.

3.3.2.4. Factores do terreno

A característica do terreno que pode influenciar a infiltrabilidade é essencialmente o tipo de preparação do solo antes dos ensaios. Este factor foi fixado, tendo sido escolhido um sistema de mobilizações do solo, já descrito no ponto 3.1.3., que se manteve igual para todos os ensaios.

3.3.3. Sequência dos ensaios de infiltração

No primeiro ano de ensaios foram escolhidas duas posições do terreno (R2 e R4, fig. 3.1), para permitir observar diferenças devidas à eventual heterogeneidade do solo na zona de ensaios. Verificando-se que os valores da infiltração obtidos nas duas posições eram idênticos, no segundo ano os ensaios foram realizados apenas numa posição do terreno (R4, fig. 3.12).

A variação da infiltrabilidade do solo não depende só do efeito do tipo de aspersor utilizado, mas também de outros factores, que podem acentuar ou minimizar esse efeito. Assim, foi necessário realizar ensaios com diferentes teores de água do solo e níveis de compactação superficial devida à aplicação da água dos ensaios anteriores, tentando no fundo simular as condições de solo antecedentes de diferentes regas ao longo de uma campanha.

Realizou-se um primeiro ensaio com o solo seco e recém mobilizado (situação correspondente a uma primeira rega), um segundo ensaio numa situação de solo com um teor de água elevado (2 dias depois do 1º ensaio) e finalmente um terceiro ensaio depois do solo estar 4 ou 5 dias sem receber água, de modo a permitir a diminuição do seu teor de água e o endurecimento da camada superficial, com formação ou não de crosta superficial. No segundo ano realizou-se ainda um quarto ensaio, 48 horas depois do terceiro, ou seja, novamente com um teor de água elevado.

Em cada ano, após a primeira série de ensaios, com a rampa rotativa equipada com um tipo de aspersor, o terreno esteve algum tempo sem receber água, permitindo a diminuição do teor de água no seu perfil, por evaporação e drenagem, sendo depois novamente mobilizado. Deste modo a segunda série de ensaios, com o outro tipo de aspersor realizou-se, no mesmo local, em condições de solo idênticas às da primeira série.

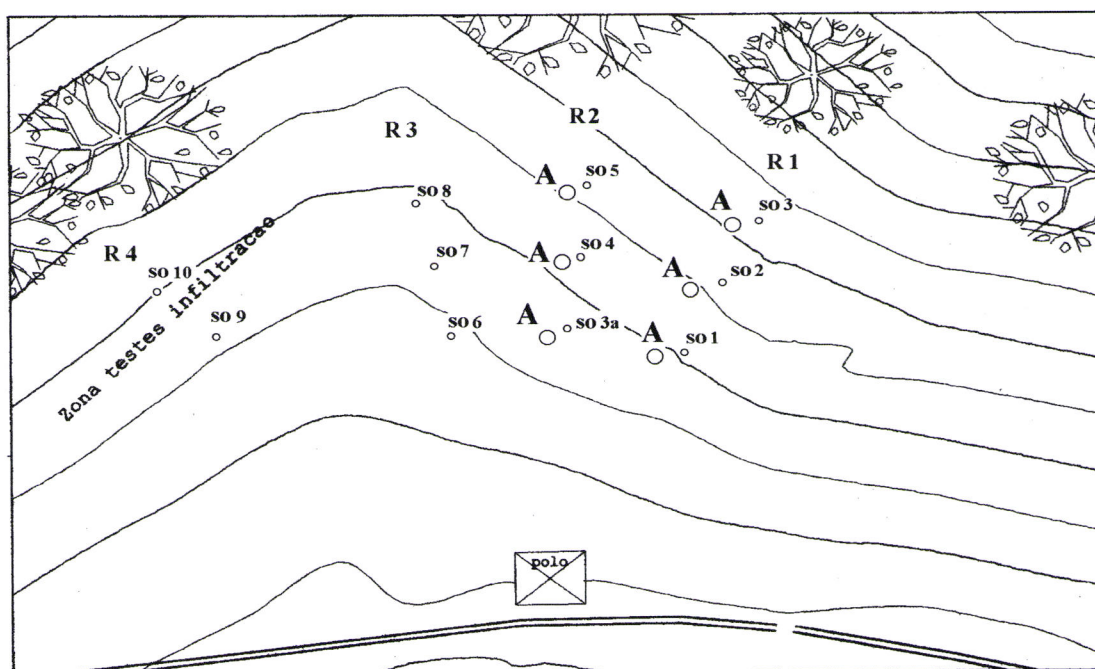
No total realizaram-se 12 ensaios no primeiro ano e 8 no segundo, recolhendo-se em cada um deles dados para a determinação de 3 equações da infiltrabilidade.

3.4. Ensaio de rega

O efeito da aplicação de água com os diferentes aspersores, intervalos de rega e intensidades pluviométricas, sobre a infiltração e o escoamento, foi também avaliado através da realização de várias regas.

Para esta avaliação recorreu-se à determinação do escoamento existente após as diferentes regas efectuadas em 2 anos, tendo-se variado de um ano para o outro algumas condições de funcionamento da máquina (quadro 3.3), de modo a obter diferentes valores de intensidade pluviométrica e dotações de rega.

A recolha de dados foi feita, em cada ano, em duas posições do terreno, correspondentes a dois raios da rampa rotativa. No primeiro ano nos raios 1 e 3, e no segundo nos raios 1 e 2 (fig. 3.12). O raio 1 apresenta um declive longitudinal de aproximadamente 10,2 %, o raio 2 de 7,5 % e o raio 3 de 5,2 %, o que permitiu também verificar o efeito do declive sobre o escoamento.



ESC. 1: 250

Figura 3.12 – Pormenor da posição dos raios onde se efectuou a recolha de dados (2º ano de ensaios). so – tubo de acesso da sonda de medição do teor de água no solo; A – anel de recolha de excedentes superficiais.

Tarjuelo (1999) refere que o declive longitudinal máximo aconselhado para o bom funcionamento das rampas rotativas varia entre 10 % (nas rampas com lanços compridos – 50 m) e os 15 % (nas rampas com lanços curtos – 38 m).

3.4.1. Determinação do escoamento

A determinação do escoamento verificado em cada rega foi feita através da recolha da quantidade de água que não se infiltrou no solo, escoando sobre a sua superfície.

Para fazer uma amostragem do escoamento, foram colocados 6 anéis metálicos, com um diâmetro de 50 cm, divididos em dois conjuntos de três, distribuídos ao longo de dois raios da rampa rotativa (fig. 3.12). Estes anéis ficaram situados sob o 2º lanço e o lanço suspenso, aproximadamente a 18, 22 e 26 m do pólo da rampa rotativa. Cada anel delimita uma área que se mantém constante ao longo das várias regas e que não sofre intervenção alguma.

Os anéis, com uma altura de 25 cm, tinham um orifício na sua parede lateral a 5 cm da base. Como o terreno apresenta algum declive, ao colocar o anel no solo, era escolhida uma orientação tal que deixasse o orifício à cota mais baixa, de modo a que toda a água em excesso escoasse nessa direcção. O anel é enterrado no solo até o orifício de saída ficar ao nível deste, garantindo que o excesso de água aplicada sai para o exterior.

Na parte exterior do orifício existe um troço de tubo metálico ao qual se liga um tubo de plástico flexível que conduz a água até um recipiente de plástico com capacidade para 10 litros. O recipiente de plástico é colocado num buraco aberto a jusante do anel, e a uma cota mais baixa, garantindo o escoamento de toda a água em excesso para o seu interior (fig. 3.13).

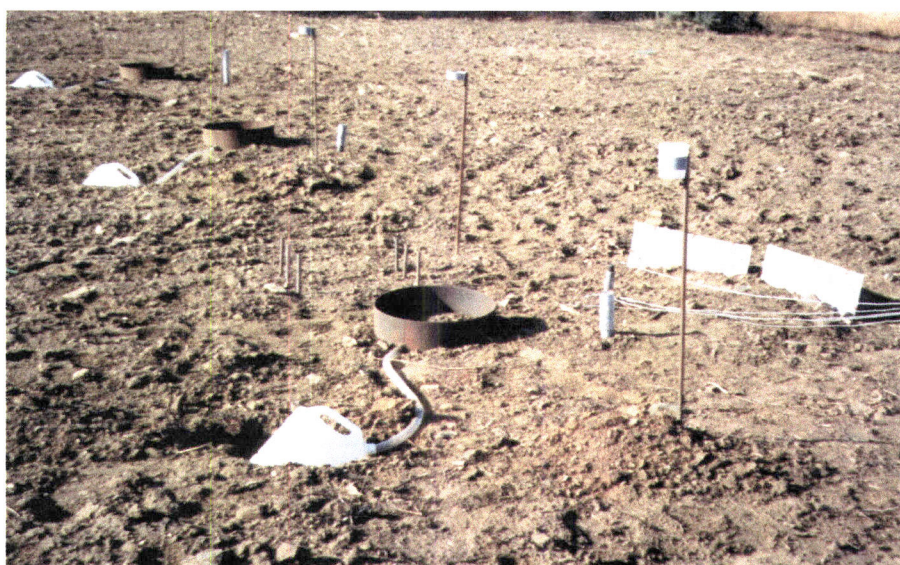


Figura 3.13 – Anéis para recolha da água resultante do escoamento.

O facto de parte do anel ser enterrada privilegia a infiltração vertical da água que cai na zona por ele delimitada, condição necessária para se ter a certeza de que a água em excesso corresponde efectivamente à fracção de água que chegou àquela área de solo e que este não teve capacidade de infiltrar ou armazenar na sua superfície.

A água recolhida em cada recipiente foi medida no fim de cada rega utilizando uma proveta. A percentagem da água que se perde por escoamento é determinada pela razão entre o valor médio da água recolhida nos recipientes dos anéis de cada raio e o valor da dotação média aplicada ou da dotação média recolhida.

3.4.1.1. Avaliação de sedimentos arrastados

Como é lógico a água em excesso vai arrastar consigo partículas de solo dando origem ao fenómeno da erosão. Apesar de não ser objectivo deste trabalho o estudo da erosão do solo, uma vez que se recolhia toda a água que escorria das áreas amostradas, aproveitou-se para quantificar os sedimentos que eram arrastados. O volume de água recolhida nos recipientes de plástico, referidos no ponto anterior, foi despejado para frascos de vidro que depois foram colocados numa estufa, em laboratório, de modo a evaporar toda a água. Depois de evaporada a água os frascos foram pesados e por diferença com a sua tara foi calculado o peso dos sedimentos.

Nos casos em que a quantidade de sedimentos recolhidos era suficiente foi ainda feita a sua análise granulométrica, para se ter uma ideia não só da quantidade de partículas de solo arrastadas pela água, mas também da sua dimensão.

A informação sobre a quantidade e qualidade dos sedimentos arrastados poderá ajudar a explicar a maior ou menor formação de crosta superficial, uma vez que esta depende também do destacamento de partículas do solo.

3.4.2. Avaliação dos factores que afectam o escoamento

Como já foi referido, a forma como a água é aplicada pelo aspersor vai influenciar directa e indirectamente a infiltração e o escoamento, através da sua interacção com todos os outros factores que intervêm no processo da rega (fig. 3.14).

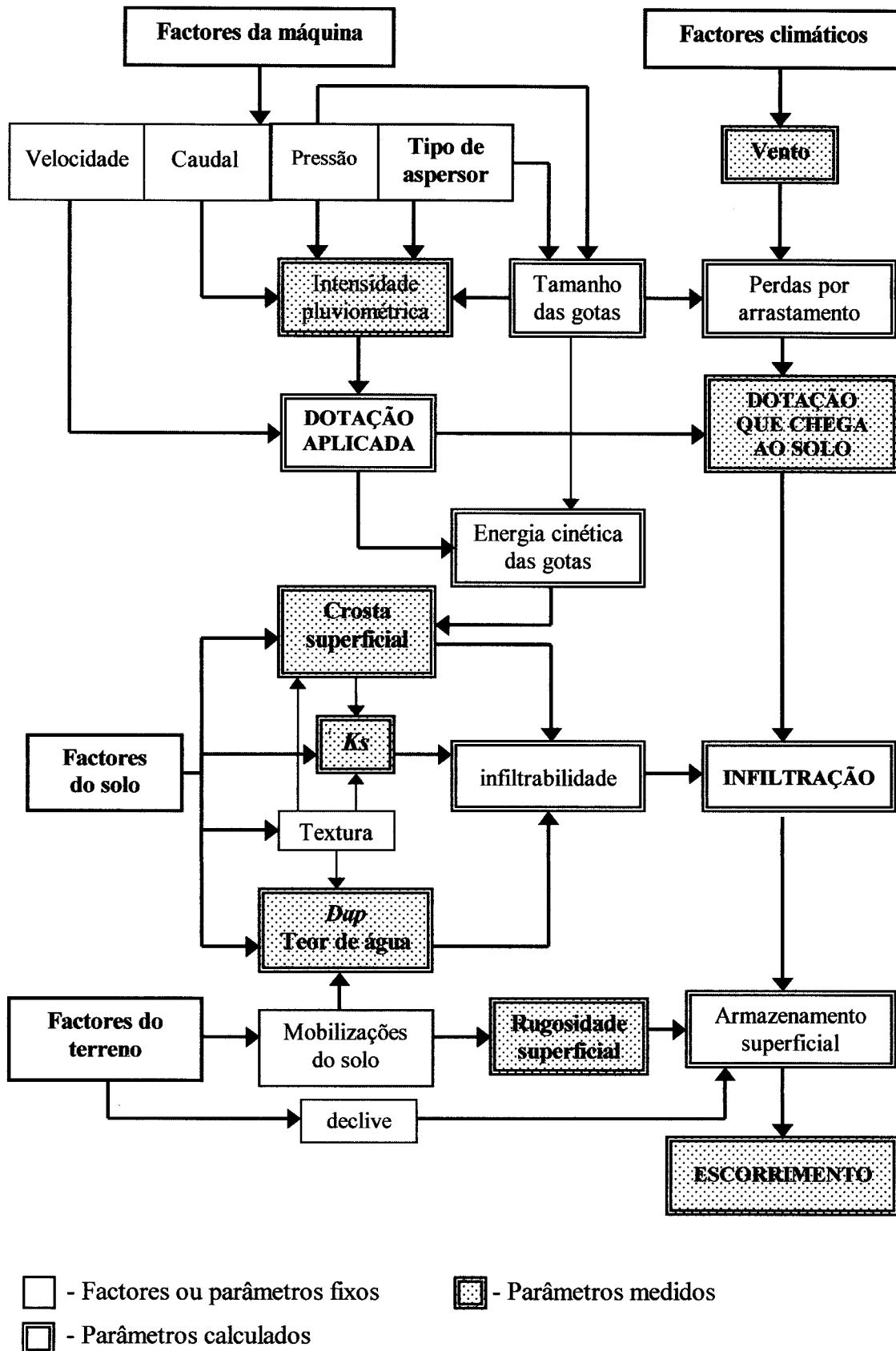


Figura 3.14 – Principais factores que afectam o escoamento.

Na figura 3.14 apresentam-se os diversos factores considerados mais importantes. Fixou-se o maior número de factores que foi possível, nomeadamente os da máquina e do terreno, sendo os outros medidos ou calculados, de modo a estudar a sua influência sobre o escorrimento.

3.4.2.1. Factores da máquina e do clima

As condições gerais de funcionamento da máquina, nomeadamente o caudal, a pressão de funcionamento e os tipos de aspersores, foram fixados, em cada um dos anos, sendo os seus valores os apresentados no quadro 3.3.

A velocidade de deslocamento variou ao longo da série de ensaios permitindo a obtenção de dotações também elas diferentes. As velocidade utilizadas são as referidas no ponto 3.4.3, onde se apresenta a sequência de regas realizadas.

À medida que aumenta a dotação aplicada a probabilidade de existirem excedentes também aumenta e o escorrimento irá depender dos factores do solo que condicionam o seu armazenamento superficial e a infiltração.

Relativamente aos factores climáticos, é fundamentalmente o vento que tem um efeito significativo sobre a qualidade da rega e por estar directamente associado às características da precipitação aplicada pela máquina é também aqui abordado.

3.4.2.1.1. Dotação aplicada e recolhida

A dotação média aplicada (Da) em cada passagem da rampa rotativa depende fundamentalmente do caudal utilizado e do tempo que esta demora a dar uma volta completa, podendo ser determinada através da seguinte expressão:

$$Da = \frac{Q \cdot t_v}{A} \quad (3.23)$$

Da - dotação média aplicada (mm);

Q - caudal de funcionamento da rampa rotativa (l/h);

t_v - tempo de uma volta completa (h);

A - área regada (m^2).

Tentou-se manter uma pressão de funcionamento da rampa rotativa igual e constante para todas as regas, em cada ano, o que conduz inevitavelmente a um caudal também constante. Deste modo, a dotação aplicada irá depender da velocidade de deslocamento. Para os cálculos da dotação média aplicada utilizaram-se os valores do tempo de uma volta completa apresentados no quadro 3.2.

O efeito do vento sobre esta água aplicada faz com que, em cada ponto do terreno regado, alguma dela não chegue ao solo. Assim existirá uma diferença entre a dotação aplicada pela máquina e a dotação recolhida, durante a sua passagem, em recipientes (pluviómetros) colocados junto ao solo, que será tanto maior quanto for o efeito do vento.

A dotação média recolhida (D_{rec}) foi determinada através da expressão:

$$D_{rec} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i D_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3.24)$$

D_{rec} – dotação média recolhida (mm);

D_i - altura de água recolhida em cada pluviómetro (mm);

P_i – distância de cada pluviómetro ao pólo da rampa rotativa (m);

n – número total de pluviómetros.

Devido às características próprias deste sistema de rega, a área regada por cada aspersor aumenta do pólo para a periferia. Por esse motivo, cada pluviómetro representa a quantidade de água aplicada numa área diferente, o que leva à necessidade de fazer uma média ponderada dos valores de água recolhidos nos diferentes pluviómetros. A expressão anterior é, assim, a média ponderada dos valores de água recolhidos em cada pluviómetro, em função da sua distância ao pólo.

Foram colocados 6 pluviómetros em cada um dos raios onde se avaliou o escorrimento, sob o 2º lanço e o lanço suspenso, pois interessavam apenas os valores referentes à aplicação de água feita pelas partes média e final da rampa rotativa. O

espaçamento entre pluviómetros foi de 3 m, ficando o primeiro a 10 m do pólo. Os pluviómetros utilizados tinham uma altura de 10 cm e um diâmetro de 9 cm e foram colocados em suportes a 1 m de altura do solo (fig. 3.13), cumprindo assim as normas da Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas (ASAE, 1995) para este tipo de ensaios.

3.4.2.1.2. Perdas por evaporação e arrastamento pelo vento

As perdas por evaporação e arrastamento pelo vento representam a maior fracção das perdas totais de água de um sistema de rega por aspersão bem dimensionado, podendo diminuir significativamente a quantidade de água aplicada que chega ao solo.

A sua estimativa foi feita utilizando dois métodos diferentes.

O primeiro, e mais simples, resulta da diferença entre a quantidade média de água aplicada e a quantidade média de água recolhida nos pluviómetros:

$$P_{ev} = Da - D_{rec} \quad (3.25)$$

sendo P_{ev} , as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento (mm) e as outras variáveis já definidas.

O segundo, mais complexo, utiliza a fórmula apresentada por Keller & Bliesner (1990) para estimar a proporção efectiva da água aplicada pelos aspersores que chega ao solo (Pe), em função da evapotranspiração potencial (ETp , mm/dia), do índice do tamanho da gota de água (IG) e da velocidade do vento (v_v , km/h):

$$Pe = 0,976 + 0,005 ETp - 0,00017 ETp^2 + 0,0012 v_v - IG (0,00043 ETp + 0,00018 v_v + 0,000016 ETp v_v) \quad (3.26)$$

expressão válida para $7 < IG < 17$, sendo este definido por:

$$IG = \frac{0,032 P^{1,3}}{d_b} \quad (3.27)$$

em que P , representa a pressão de funcionamento do aspersor (kPa) e d_b , o diâmetro do bico do aspersor (mm). Ainda segundo estes autores, se $IG < 7$ (gota grossa), deve-se tomar $IG = 7$ e se $IG > 17$ (gota fina), deve-se tomar $IG = 17$.

No caso de rampas rotativas, Keller & Bliesner (1990) aconselham a utilização dos seguintes valores de IG para sistemas equipados com aspersores estáticos com diferentes tipos de pratos deflectores: $IG = 17$ para aspersores com pratos deflectores lisos, $IG = 12$ para aspersores com pratos deflectores com estrias estreitas e $IG = 7$ para aspersores com pratos deflectores com estrias largas.

A determinação da evapotranspiração potencial, que se considerou igual à evapotranspiração de referência, foi feita utilizando a equação de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1994) e os dados climáticos da estação meteorológica da Mitra.

3.4.2.1.3. Qualidade da rega

Pretendia-se com estes ensaios de rega verificar as condições de infiltração do solo quando sujeitos a regas com boa qualidade, o que obrigou a uma avaliação das várias regas.

A primeira dificuldade foi a de encontrar os melhores parâmetros para realizar esta análise qualitativa, visto a literatura apresentar diversas possibilidades para o efeito. A escolha destes parâmetros depende essencialmente do objectivo e das condições em que é realizada a rega. Apesar de tudo, verifica-se várias vezes que o mesmo parâmetro é definido de maneiras diferentes segundo o autor que o usa, o que torna ainda mais difícil dizer se uma rega tem boa ou má qualidade em função do valor de um dado parâmetro.

Os indicadores da qualidade da rega (i.e. os parâmetros da avaliação) são geralmente divididos em duas categorias: as eficiências e a uniformidade. Apesar de relacionados, estes parâmetros, ou indicadores, têm significados independentes.

A discussão destes conceitos é muito actual (Burt *et al.*, 1997) e continua a não existir um consenso sobre a melhor definição para os tradicionais parâmetros de eficiência e uniformidade da rega (Merriam, 1999).

As diferentes eficiências são geralmente determinadas com base no cumprimento de um objectivo que é a aplicação de uma determinada dotação de rega (Burt *et al.*, 1997). Não era o caso dos ensaios realizados, uma vez que não havendo uma cultura implantada não

houve a preocupação de atingir uma determinada dotação. Isso levou à não utilização de nenhum parâmetro de eficiência para analisar a qualidade das regas efectuadas.

Considerou-se mais importante estimar a uniformidade, que reflecte a necessidade de fazer chegar a todas as plantas (pontos do terreno) a mesma quantidade de água (Burt *et al.*, 1997). Só uma rega com elevada uniformidade pode garantir que o volume de água infiltrada, ou não, em cada ponto do terreno, teve origem num volume idêntico de água aplicada.

Entre os parâmetros de uniformidade mais utilizados estão a uniformidade de distribuição e os coeficientes de uniformidade.

A uniformidade de distribuição (*UD*), é talvez um dos parâmetros que apresenta mais controvérsia. A definição mais antiga deste parâmetro expressa *UD* em função do volume de água infiltrada após a rega. No entanto, Burt *et al.* (1997) referem que o cálculo da *UD* deve ter em conta o método de rega utilizado, e no caso dos sistemas de rega por aspersão que aplicam dotações ligeiras deve-se incorporar o valor da água interceptada pelas plantas e o da evaporação que reduz a transpiração das plantas. Merriam (1999), discorda dizendo que deste modo se estaria a aumentar o valor das *UD* da rega por aspersão em relação às de outros métodos de rega.

Já os coeficientes de uniformidades (*CU*), que são representações estatísticas da uniformidade, baseadas no coeficiente de uniformidade de Christiansen ou no coeficiente de variação, são bem aceites, desde que correctamente identificados. Assim, optou-se por utilizar os seguintes coeficientes de uniformidade para a determinação da uniformidade da rega:

- coeficiente de uniformidade de Heermann & Hein (1968),

$$CU_H (\%) = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_i \left[D_i - \frac{\sum_{i=1}^n P_i D_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \right]}{\sum_{i=1}^n P_i D_i} \right] \cdot 100 \quad (3.28)$$

- coeficiente de uniformidade de variação de Bremond & Molle (1995),

$$CU_v(\%) = \left[1 - \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^n P_i D_i}{\sum_{i=1}^n P_i}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(D_i - \frac{\sum_{i=1}^n P_i D_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \right)^2 \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}} \right] \cdot 100 \quad (3.29)$$

sendo:

- D_i - altura de água recolhida em cada pluviómetro (mm);
- P_i - distância de cada pluviómetro ao pólo da rampa rotativa (m);
- n - número total de pluviómetros.

O primeiro coeficiente é uma modificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen feita por Heermann & Hein (1968), adaptando-o às rampas rotativas; onde cada pluviómetro, à medida que se afasta do pólo, representa uma coroa circular de área crescente.

O segundo coeficiente, baseia-se no coeficiente de variação, e segundo os seus autores, é mais sensível às variações extremas da água recolhida nos pluviómetros do que o parâmetro anterior.

3.4.2.1.4. Energia cinética da dotação de rega

A realização de cada uma das regas teve como consequência o impacto das gotas de água no solo, causando a redução da rugosidade superficial do solo além da sua compactação. O efeito deste impacto será tanto maior quanto a energia cinética das gotas de água que chegam ao solo.

A estimativa dos valores da energia cinética das gotas de cada rega, foi feita seguindo a metodologia apresentada no ponto 3.3.2.1.1., que permite calcular o valor da energia cinética total de uma determinada precipitação, em J/kg. Como 1 kg de água aplicada é igual

a 1 mm m^2 , a energia cinética total por unidade de área (J/m^2), aplicada em cada rega, determina-se multiplicando o seu valor em J/kg pela dotação de rega (mm) recolhida ao nível do solo.

3.4.2.2. Factores do solo

O teor de água do solo e a existência de crosta superficial vão condicionar a condutividade hidráulica do solo e, conseqüentemente, a infiltração da água aplicada, originando os excedentes superficiais. Caso o solo não tenha capacidade de armazenamento superficial estes excedentes irão originar o escoamento.

Por este motivo foi necessário avaliar estes factores ao longo dos ensaios de rega para os poder relacionar com o escoamento observado.

3.4.2.2.1. Teor de água do solo

A avaliação do teor de água no solo foi feita com base nos equipamentos e métodos já descritos no ponto 3.3.2.3.1. Junto a cada um dos anéis metálicos para avaliação do escoamento foi instalado um tubo de acesso para a sonda capacitiva (figs. 3.12 e 3.13) e as medições foram feitas imediatamente antes de cada ensaio. Para completar esta informação, no primeiro ano foram recolhidas amostras gravimétricas e no segundo utilizou-se uma sonda Theta Probe ML2, para medir a humidade do solo na camada superficial. Tanto a recolha de amostras como a medição com a sonda foram feitas em triplicado junto a cada um dos tubos de acesso da sonda capacitiva, fazendo-se depois a média dos 3 valores obtidos.

Dada a importância que o teor de água na camada superficial do solo tem sobre a ocorrência de escoamentos, no segundo ano de ensaios foram instaladas no terreno 5 sondas Theta probe ML2 ligadas a um *datalogger* que registava os sinais das sondas em intervalos de 1 minuto. As sondas foram colocadas junto a um dos anéis de recolha de excedentes, uma à superfície do solo e as restantes enterradas horizontalmente às seguintes profundidades médias: 7,5; 12,5; 17,5 e 22,5 cm.

Com estas sondas pretendeu-se ter um registo mais detalhado das variações no tempo do teor de água do solo na camada superficial, imediatamente antes, durante e após as diferentes regas.

3.4.2.2.2. Compactação e formação de crosta superficial

A compactação superficial foi avaliada através da determinação da densidade aparente do solo, utilizando a metodologia já apresentada nos ensaios de infiltração, tendo-se recolhido 3 amostras junto a cada um dos anéis de avaliação do escoamento, antes de cada rega.

Nos casos em que se verificou a existência de crosta superficial foram recolhidas amostras que nalguns casos permitiram medir a sua espessura.

3.4.2.2.3. Condutividade hidráulica superficial

A medição deste parâmetro foi feita de acordo com o exposto no ponto 3.3.2.3.3., tendo-se obtido dois valores antes de cada rega. Como já foi referido anteriormente a duração destas determinações e a elevada frequência dos ensaios de rega não permitiu a obtenção de mais valores. No entanto, nalguns casos, nomeadamente antes da 1ª rega de cada série de ensaios, foi possível juntar os valores obtidos na zona dos ensaios de infiltração com os obtidos nos ensaios de rega, uma vez que as condições do terreno eram iguais, obtendo-se 4 medições por ensaio.

3.4.2.3. Factores do terreno

O escoamento está muito dependente de algumas das características do terreno, como a rugosidade superficial do solo e o declive. A primeira influencia a capacidade de armazenamento superficial, que pode reter parte da água em excesso. Já o declive facilita o escoamento, o que por sua vez vai provocar uma diminuição da rugosidade superficial e da capacidade de armazenamento do solo. Aproveitou-se o declive natural do terreno e

escolheram-se duas posições diferentes para verificar o seu efeito durante as regas, conforme foi referido no ponto 3.4.

3.4.2.3.1. Rugosidade e armazenamento superficial do solo

A quantificação do armazenamento superficial do solo passou, em primeiro lugar, pela determinação da sua rugosidade superficial utilizando um perfilómetro de varetas (fig. 3.15). O perfilómetro permite medir a microtopografia do terreno através do registo da diferença de cotas relativas entre vários pontos ao longo de uma linha.

Utilizou-se um perfilómetro com varetas metálicas espaçadas 2,5 cm, numa largura total de 50 cm. Para a realização das leituras da altura dos pontos do terreno foram colocados no solo, em cada zona do terreno, 3 pares de tubos metálicos, que serviam de apoio ao próprio perfilómetro (conforme se observa na figura 3.15). Os tubos foram nivelados entre si, ficando o seu topo a aproximadamente 25 cm do solo, e cada par a uma distância de 20 cm do par adjacente. Com o perfilómetro apoiado em cada par de tubos, e com as varetas em contacto com o solo, era registado num papel o valor das alturas das diferentes varetas em relação ao solo. Conseguia-se em cada zona três medições das cotas relativas dos pontos, com uma distância de 20 cm umas das outras, o que representa uma malha de pontos de 2,5 x 20 cm, numa área total de 0,2 m².

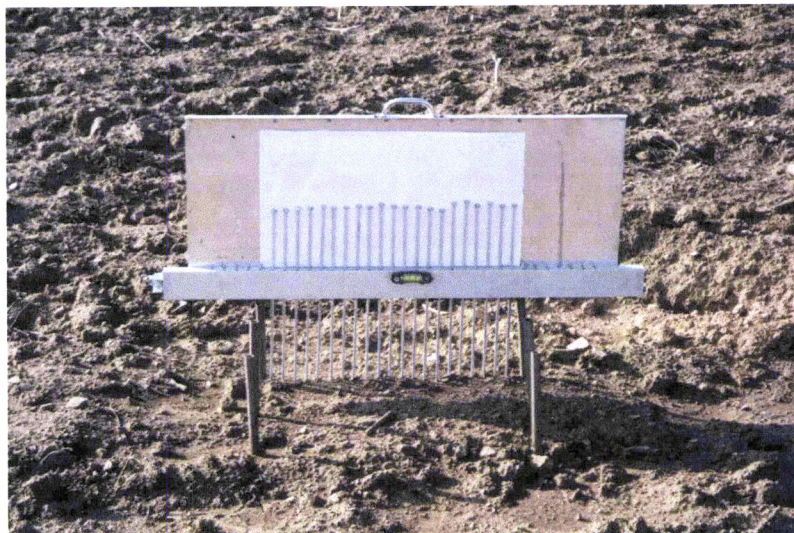


Figura 3.15 – Perfilómetro de varetas utilizado.

Estas medições foram efectuadas antes de cada ensaio de rega em três zonas diferentes do terreno, escolhidas aleatoriamente em cada série de ensaios, de modo a ficarem distribuídas pelos 2 raios observados e pelas três distâncias ao pólo onde eram colocados os anéis de avaliação do escorrimento. O facto dos tubos de apoio do perfilómetro ficarem na mesma posição durante os vários ensaios de uma mesma série permite recolher os valores das cotas relativas dos pontos sempre no mesmo local, conseguindo-se assim acompanhar a variação da rugosidade ao longo de cada série de ensaios.

De salientar que para diminuir o efeito perturbador da superfície do solo resultante do contacto entre este e as varetas do perfilómetro, após se apoiar o perfilómetro nos tubos metálicos, cada vareta era descida individualmente até estar em contacto com o solo. Este processo tem inconvenientes em termos de duração das medições, mas aumenta consideravelmente o rigor das mesmas.

A rugosidade aleatória foi determinada utilizando a metodologia descrita por Allmaras *et al.* (1966). O valor das alturas registadas pelo perfilómetro é transformado logaritmicamente e ajustado de modo a ser retirado o efeito do declive e da rugosidade orientada. Para realizar este ajustamento recorreu-se à expressão:

$$z'_{ij} = \ln z_{ij} - \left(\overline{\ln z_{.j}} - \overline{\ln z_{..}} \right) - \left(\overline{\ln z_{i.}} - \overline{\ln z_{..}} \right) \quad (3.30)$$

sendo,

i e j – respectivamente o número da coluna e da linha de cada ponto;

z_{ij} – a altura medida no ponto situado na coluna i e linha j ;

z'_{ij} – o valor da altura transformada;

$\overline{\ln z_{.j}}$ - o valor médio das alturas logaritmizadas da linha j ;

$\overline{\ln z_{i.}}$ - o valor médio das alturas logaritmizadas da coluna i ;

$\overline{\ln z_{..}}$ - o valor médio de todas as alturas logaritmizadas.

Após esta transformação todos os valores das alturas logaritmizadas são ordenados numericamente e são eliminados os valores extremos correspondentes aos 10 % mais altos e 10 % mais baixos. A eliminação destes valores é, segundo os autores, uma tentativa de diminuir os possíveis erros na medição das alturas.

A rugosidade aleatória (RR) é então calculada como o produto da altura média (\bar{z}) e do erro padrão das alturas transformadas (σ_x):

$$RR = \sigma_x \bar{z} \quad . \quad (2.51)$$

O armazenamento superficial do solo foi calculado a partir dos valores da rugosidade aleatória utilizando a equação (2.64), apresentada por Mwendera & Feyen (1992). Esta equação permite determinar o armazenamento máximo das depressões em função da rugosidade aleatória e do declive do terreno.

3.4.3. Sequência dos ensaios de rega

Em cada um dos anos realizou-se uma sequência de regas experimentando diferentes condições de humidade do solo, compactação superficial, quantidade de água aplicada e tipo de aspersor utilizado.

As velocidades de deslocamento da rampa rotativa foram escolhidas de modo a aplicarem dotações entre os 5 e os 15 mm, valores comuns na rega com estes sistemas.

Nos quadros 3.5 e 3.6 apresenta-se a sequência de regas realizadas em cada um dos anos, assim como a condição superficial do solo que antecedeu cada uma delas. Cada série de regas iniciou-se com o solo seco e recém mobilizado, aplicando uma dotação maior, correspondente a uma velocidade mais lenta da rampa rotativa. Esta primeira rega teve como objectivo deixar o solo com um teor de água mais elevado, proporcionando às regas seguintes condições de difícil infiltração, permitindo assim verificar os limites da capacidade de infiltração do solo. Após uma rega com o solo húmido aumentou-se o intervalo de rega, de modo a permitir por um lado a diminuição do teor de água do solo e por outro a formação ou não de crosta superficial durante o período de secagem da superfície do solo, à semelhança do que aconteceu nos ensaios de infiltração.

Quadro 3.5 – Sequência das regas no 1º ano de ensaios

| Deflector | Rega n° | Vel. rampa | Intervalo (dias) | Condição superficial do solo |
|-----------------|---------|------------|------------------|------------------------------|
| Estriado | 1 | 20 | - | seco |
| | 2 | 40 | 2 | húmido |
| | 3 | 40 | 4 | seco |
| Liso | 1 | 20 | - | seco |
| | 2 | 40 | 2 | húmido |
| | 3 | 40 | 4 | seco |

No segundo ano de ensaios aumentou-se o número de regas em cada série para obter uma informação mais detalhada. A última rega (5ª) teve como finalidade verificar se o possível efeito da formação de crosta superficial nas condições de solo superficialmente seco, da rega anterior, se mantinha após a realização dessa rega.

Quadro 3.6 – Sequência das regas no 2º ano de ensaios

| Deflector | Rega n° | Vel. rampa | Intervalo (dias) | Condição superficial do solo |
|-----------------|---------|------------|------------------|------------------------------|
| Liso | 1 | 30 | - | seco |
| | 2 | 40 | 2 | húmido |
| | 3 | 40 | 2 | húmido |
| | 4 | 40 | 4 | seco |
| | 5 | 40 | 2 | húmido |
| Estriado | 1 | 30 | - | seco |
| | 2 | 40 | 2 | húmido |
| | 3 | 40 | 2 | húmido |
| | 4 | 40 | 4 | seco |
| | 5 | 40 | 2 | Húmido |

De modo a não introduzir outra variável, em cada ano, e com exceção da 1ª rega, todas as outras foram realizadas com a mesma velocidade de deslocamento.

Para dar mais aleatoriedade aos ensaios foi alternada de um ano para o outro a sequência de ensaios com aspersores com diferentes pratos deflectores. No primeiro ano

iniciaram-se os ensaios com os deflectores estriados e no segundo com os deflectores lisos (quadros 3.5 e 3.6).

3.5. Ensaio complementares

Para completar a caracterização da máquina foram ainda determinados alguns diagramas pluviométricos, a diferentes velocidades. Isto permitiu verificar a forma do diagrama e a intensidade máxima de aplicação com a rampa rotativa equipada com os dois tipos de aspersores utilizados. Os diagramas pluviométricos, conjugados com as equações da infiltrabilidade do solo, permitem ainda determinar os escorrimentos potenciais, para diferentes quantidades de água aplicada e teores de água no solo.

3.5.1. Diagramas pluviométricos

Foram determinados os diagramas pluviométricos em duas posições diferentes da rampa rotativa (sob o lança suspenso e a meio do segundo lança), e para três velocidades diferentes de deslocamento (20, 40 e 60 no primeiro ano e 30, 40 e 60 no segundo ano).

Para a determinação dos diagramas utilizou-se um pluviómetro, uma proveta e um cronómetro. O pluviómetro foi colocado num determinado local do terreno, esperando a passagem da rampa rotativa, e assim que começou a receber água, foi-se registando o volume recolhido minuto a minuto. Para evitar erros na medição dos volumes de água recolhida fez-se uso de dois pluviómetros, utilizados alternadamente, ou seja, no fim de cada minuto substituíam-se um pluviómetro pelo outro, colocado na mesma posição, dando tempo suficiente para medir o volume recolhido antes da próxima troca. O ensaio dava-se por terminado após a passagem da rampa rotativa, quando o volume recolhido no pluviómetro fosse nulo.

A partir dos dados dos volumes recolhidos calcula-se depois a intensidade pluviométrica em cada minuto, ao longo do tempo de aplicação da água sob um ponto do terreno. A representação gráfica destes valores dá origem ao respectivo diagrama pluviométrico.

3.5.2. Determinação do escoamento potencial

A determinação dos escoamentos potenciais, é feita através da sobreposição entre o diagrama pluviométrico, numa dada condição de funcionamento (distância ao pólo, velocidade de deslocamento, pressão de funcionamento, etc.), e a curva da infiltrabilidade. A área do diagrama pluviométrico acima da curva de infiltrabilidade do solo ao longo do tempo, representa o excesso de água aplicada que o solo não terá capacidade de infiltrar.

Elaborou-se uma rotina de computador (fig. 3.16) que, para intervalos de 1 minuto, compara os valores da infiltrabilidade do solo com a taxa de aplicação da água obtida no diagrama pluviométrico. Caso a taxa de aplicação exceda a infiltrabilidade do solo, é contabilizada a diferença entre as duas e convertida em volume de água. O somatório desses volumes em excesso será o valor do escoamento potencial.

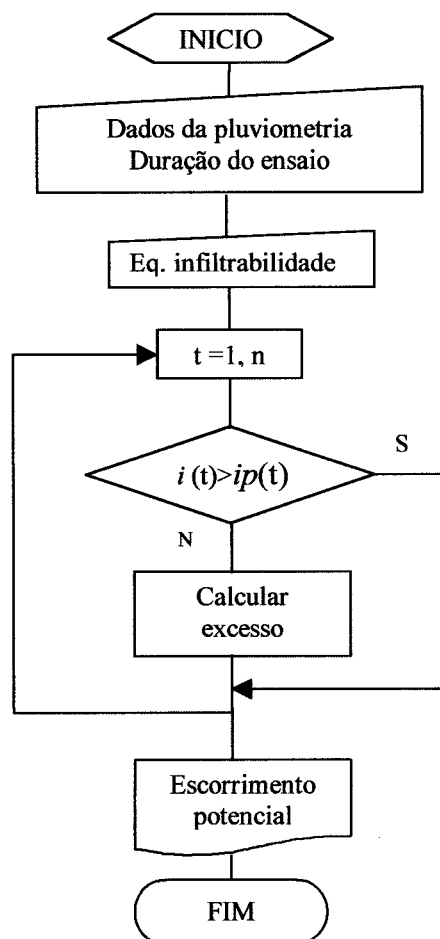


Figura 3.16 – Fluxograma para determinação do escoamento potencial.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos diferentes ensaios, divididos em dois grupos: i) os ensaios de infiltração e ii) os ensaios de rega. Estes dois conjuntos de ensaios permitiram observar as relações entre algumas características hidráulicas do equipamento de rega e o comportamento do solo, com as sucessivas aplicações de água, nomeadamente através da avaliação das alterações na infiltrabilidade (ensaios de infiltração) e da avaliação do escoamento (ensaios de rega). São também apresentados os resultados da utilização das equações da infiltrabilidade e dos diagramas pluviométricos, obtidos no campo, para a determinação do escoamento potencial, sendo feita a sua comparação com os valores medidos nos ensaios de rega.

Os diferentes dados foram tratados estatisticamente através de análises de variância e do teste LSD (Statsoft, 1995), o que permitiu verificar se as diferenças encontradas eram ou não significativas.

4.1. Ensaios de infiltração

4.1.1. Escolha da equação tipo para representar a infiltrabilidade do solo

A existência de diferentes equações tipo para representar a infiltrabilidade do solo colocou desde logo a questão de qual delas seria a mais indicada, pelo que se fez o ajustamento dos dados de campo às diferentes equações referidas no ponto 3.3.1.

Nos quadros 4.1 e 4.2, apresenta-se um resumo da análise estatística referente ao ajustamento dos valores observados às diferentes equações tipo, em cada um dos anos, que poderá ser vista com mais pormenor no Anexo E.

De entre as escolhidas para a realização desta análise, apenas para as equações do tipo Kostiakov, Green-Ampt e Philip foi possível encontrar constantes de ajustamento para os valores de todos os ensaios.

As equações do tipo Kostiakov-Lewis e Horton, além de apresentarem o inconveniente de nem sempre se conseguirem encontrar constantes de ajustamento aos dados de campo, também apresentam nalguns casos valores negativos para o parâmetro de ajustamento correspondente à infiltrabilidade final ou estabilizada. A equação do tipo Kostiakov-Lewis foi a que mostrou piores resultados de ajustamento, obtendo-se algumas

vezes valores inferiores a -1 para o parâmetro de ajustamento correspondente ao expoente do tempo. Isto significaria valores negativos do expoente do tempo da equação da infiltração acumulada, o que não é possível.

A obtenção destes valores, sem consistência física, para parâmetros destes dois tipos de equações deve-se à dificuldade ou mesmo impossibilidade de determinar um valor correcto da infiltrabilidade final, requerida por estas equações. Esta situação, que é frequente nos solos Argiluvitados (Serralheiro, 1988), acontece aqui com mais razão uma vez que a aplicação da água é feita num tempo reduzido, parando quando se iniciam as condições de saturação superficial, o que impossibilita a obtenção de uma infiltrabilidade final ou estabilizada.

Quadro 4.1 – Características do grau de ajustamento dos valores observados às equações tipo da infiltrabilidade no 1º ano de ensaios

| Tipo de Equação | nº total observações | Nº equações ajustadas | Nº equações p < 0,05 | nº equações p < 0,01 | r ² médio | Erro padrão médio do ajustamento |
|-----------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| Kostiakov | 34 | 34 | 32 | 25 | 0,79 | 5,724 |
| Kostiakov-Lewis | 34 | 31 | 22 | 11 | 0,74 | 6,206 |
| Philip | 34 | 34 | 32 | 23 | 0,78 | 5,855 |
| Green-Ampt | 34 | 34 | 32 | 30 | 0,84 | 5,688 |
| Horton | 34 | 34 | 26 | 16 | 0,83 | 5,481 |

Quadro 4.2 – Características do grau de ajustamento dos valores observados às equações tipo da infiltrabilidade no 2º ano de ensaios

| Tipo de Equação | nº total observações | Nº equações ajustadas | Nº equações p < 0,05 | nº equações p < 0,01 | r ² médio | Erro padrão médio do ajustamento |
|-----------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| Kostiakov | 22 | 22 | 19 | 12 | 0,76 | 11,105 |
| Kostiakov-Lewis | 22 | 18 | 14 | 8 | 0,66 | 12,167 |
| Philip | 22 | 22 | 19 | 13 | 0,76 | 11,046 |
| Green-Ampt | 22 | 22 | 21 | 16 | 0,80 | 10,715 |
| Horton | 22 | 21 | 14 | 10 | 0,76 | 11,158 |

Das equações que permitiram sempre a obtenção de parâmetros de ajustamento foi a de Green-Ampt que apresentou melhores valores quer do coeficiente de determinação (r^2), quer do número de equações estatisticamente muito significativas ($p < 0,01$). No entanto, verifica-se que esta equação apresenta algumas vezes valores muito pequenos para o segundo parâmetro de ajustamento, o que se traduziria numa infiltrabilidade do solo praticamente constante ao longo do tempo, situação que não corresponde à realidade.

Tal como nas equações anteriores, aos parâmetros de ajustamento encontrados para esta equação falta consistência física. A curta duração dos ensaios não permite que se atinjam condições necessárias para a determinação da condutividade hidráulica saturada, representada pelo primeiro parâmetro de ajustamento, verificando-se que, em muitos casos, quer este quer o segundo parâmetro de ajustamento (que está relacionado com a diferença de teor de água do solo antes e depois do ensaio) apresentam valores que dificilmente poderiam corresponder a uma situação real.

Das outras duas equações é a de Kostiakov que, no conjunto dos dois anos, apresenta melhores resultados médios de ajustamento, muito próximos dos da equação de Green-Ampt, tendo por isso sido a equação tipo escolhida para representar a infiltrabilidade. De salientar que, devido à reduzida duração destes ensaios, o inconveniente apontado a esta equação, de os valores da infiltrabilidade tenderem para zero à medida que o tempo tende para infinito, pode ser aqui desprezado.

Serralheiro (1988) ao fazer uma análise deste género, utilizando dados de campo obtidos em ensaios com um infiltrómetro de sulco com retorno num solo Mediterrâneo, também tinha conseguido melhores resultados para a equação do tipo Kostiakov. Uma das possíveis razões para este facto será a maior elasticidade que esta equação, do tipo potência, apresenta no processo de optimização matemática para diferentes conjuntos de dados, relativamente às outras, algo mais complexas, e portanto com mais restrições matemáticas.

4.1.2. A evolução da infiltrabilidade e o efeito dos diferentes factores

As equações da infiltrabilidade apresentadas foram escolhidas em cada ensaio de acordo com os critérios apresentados no ponto 3.3.1., e expressam o valor da infiltrabilidade em mm/h, com os valores do tempo em horas. Todas elas são estatisticamente significativas ($p < 0,05$), sendo a grande maioria muito significativas ($p < 0,01$).

4.1.2.1. Resultados do primeiro ano de ensaios

Nas figuras 4.1 a 4.4 são apresentadas as equações escolhidas em cada ensaio e que dizem respeito às diferentes condições do solo antes do ensaio: solo seco (recém mobilizado – 1º ensaio), solo húmido (2º ensaio) e solo seco com alguma compactação superficial provocada pela energia cinética das precipitações dos ensaios anteriores (3º ensaio). Junto à identificação da condição de solo antecedente ao ensaio é apresentado também o respectivo teor de água na camada superficial.

Neste primeiro ano os ensaios foram realizados em duas posições diferentes do terreno (R2 e R4), o que teve como objectivo confirmar que na zona de ensaios o solo era homogéneo, e que as pequenas diferenças encontradas na espessura e estrutura dos horizontes dos diferentes perfis (Anexo A) não tinham efeito significativo sobre as características de infiltração do solo.

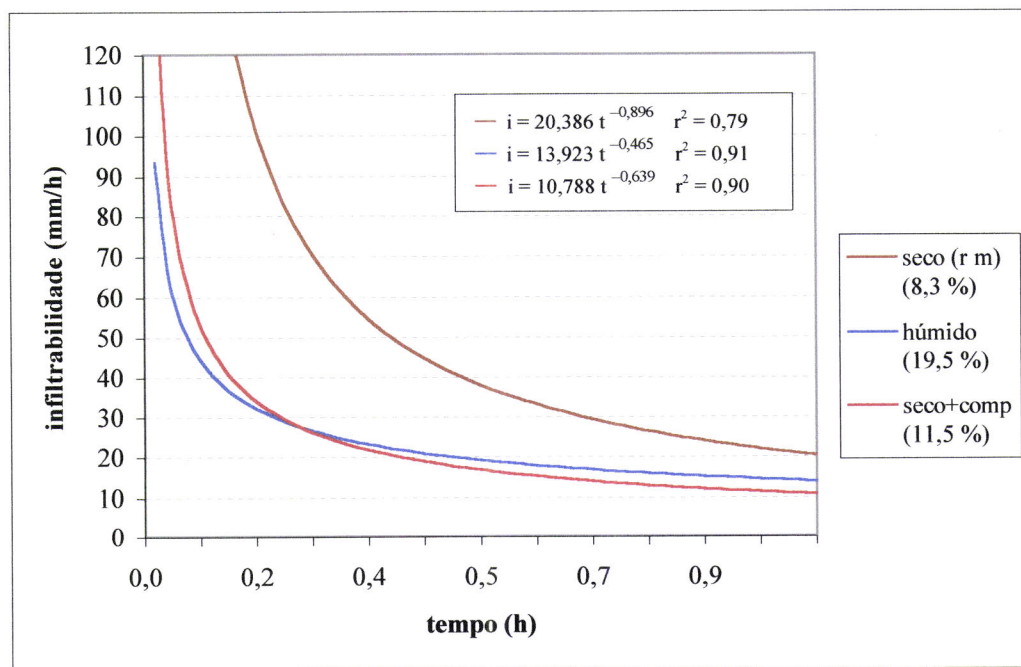


Figura 4.1 – Equações da infiltração no raio 2, no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores lisos.

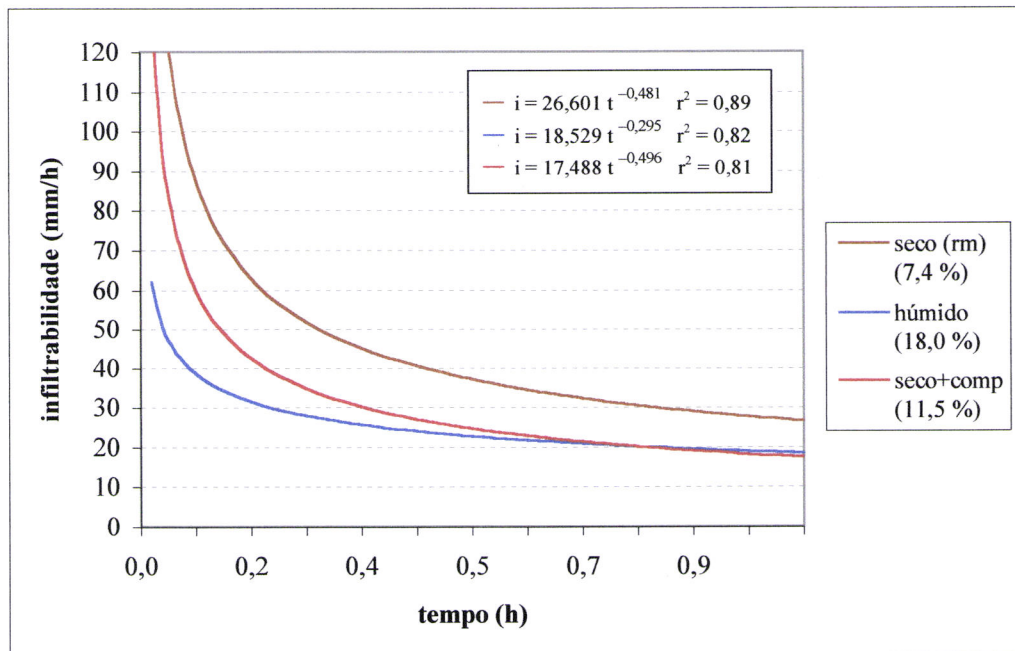


Figura 4.2 – Equações da infiltrabilidade no raio 4, no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores lisos.

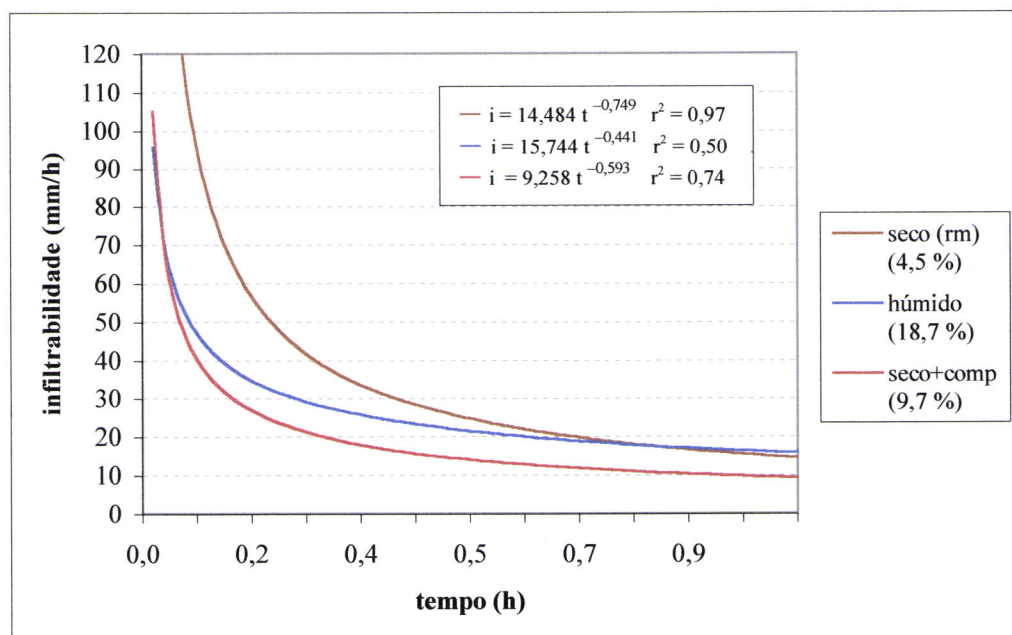


Figura 4.3 – Equações da infiltrabilidade no raio 2, no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores estriados.

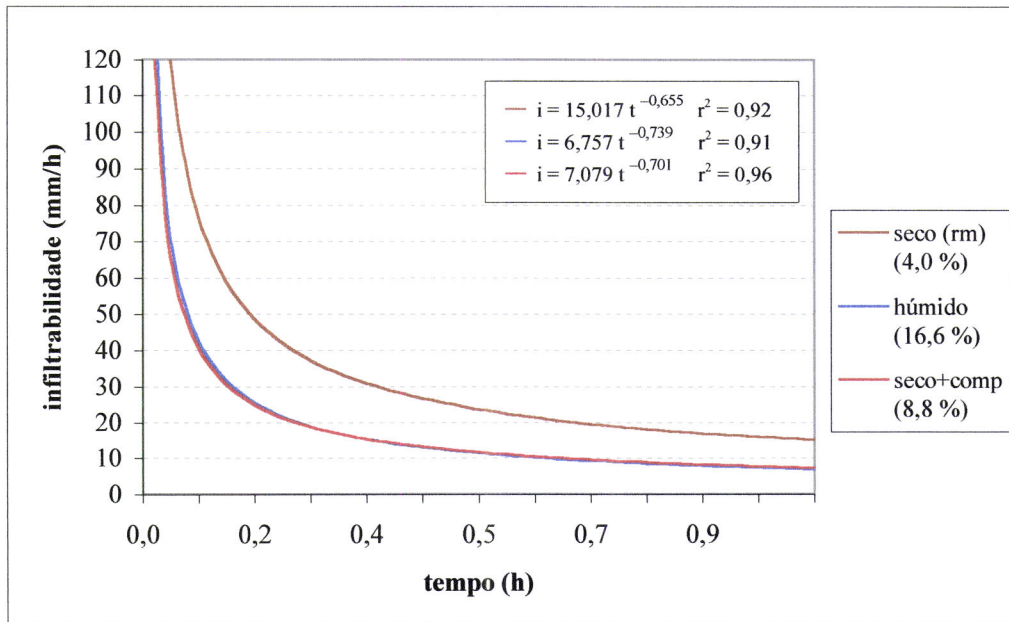


Figura 4.4 – Equações da infiltrabilidade no raio 4, no primeiro ano de ensaios, utilizando deflectores estriados.

Da observação das figuras anteriores pode-se verificar uma diferença grande da infiltrabilidade do solo seco e recém mobilizado (1º ensaio) relativamente à infiltrabilidade dos ensaios com o solo húmido (2º ensaio) e com o solo seco mas com alguma compactação superficial (3º ensaio). Este efeito foi igual nos ensaios efectuados nas duas posições do terreno, o que indica homogeneidade das características de infiltração do solo, e nos ensaios com os dois tipos de pratos deflectores.

Relativamente à infiltrabilidade com o solo húmido e seco com compactação observa-se, em geral, que esta apresenta valores muito próximos. A excepção é a dos ensaios apresentados na figura 4.3, onde o ensaio com o solo húmido apresenta, para valores de tempo superiores a 30 minutos, uma infiltrabilidade próxima da do solo seco e recém mobilizado. Este facto é no entanto explicado por ter havido muito vento durante o ensaio, o que prejudicou a sua execução. O vento desvia a água aplicada, e neste caso concentrou-a numa zona de terreno mais reduzida, aumentando aí a taxa de aplicação. Enquanto não excederem a capacidade de infiltração do solo, taxas de aplicação da água mais elevadas irão proporcionar a chegada de mais água ao solo originando maior quantidade de água infiltrada por unidade de tempo, ou seja maiores taxa de infiltração. Como as equações da infiltrabilidade foram determinadas com base nestes valores, também elas irão apresentar valores mais elevados.

Este efeito do aumento da taxa de infiltração com o aumento da taxa de aplicação já foi observado por outros autores. Chu *et al.* (1987), em testes de infiltração realizados num solo nú mobilizado, encontraram um aumento de 100 % na taxa de infiltração do solo fazendo variar a taxa de aplicação de 25 para 125 mm/h.

Como se observa nas figuras 4.1 a 4.4, existiu uma diferença acentuada entre o teor de água do solo na camada superficial que antecedeu os diferentes ensaios. Esta diferença existiu sempre nos primeiros 10 cm de solo, atenuando-se com a profundidade no perfil do solo (figs. 4.5 e 4.6).

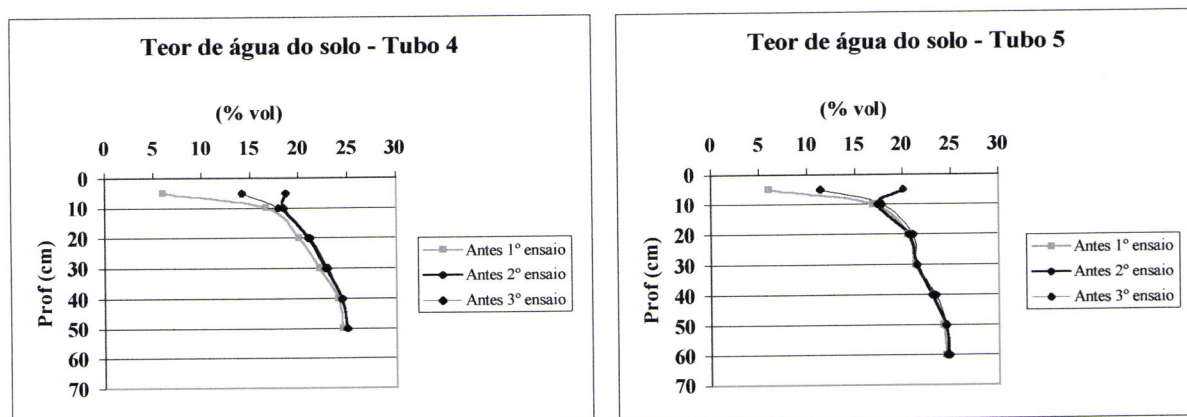


Figura 4.5 – Teores de água do solo antes dos ensaios de infiltração realizados em 98, com aspersores com deflectores estriados.

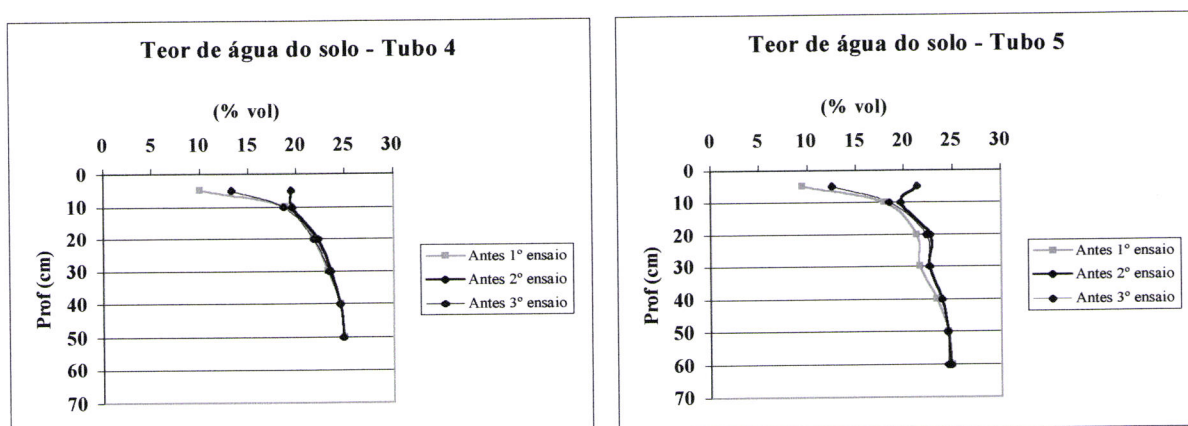


Figura 4.6 – Teores de água do solo antes dos ensaios de infiltração realizados em 98, com aspersores com deflectores lisos.

A explicação para os teores de água idênticos a maiores profundidades está relacionada com o facto da não existência de extracção da água aplicada (nomeadamente pelas raízes de plantas) o que fez com que o teor de água apresentasse pequenas variações ao longo do perfil, variando apenas à superfície devido às perdas por evaporação. No entanto, como a duração dos ensaios foi relativamente curta, terminando com a saturação superficial, foi fundamentalmente o teor de água na camada superficial que influenciou os resultados dos ensaios de infiltração.

Se é fácil de explicar a redução na infiltrabilidade entre o 1º e o 2º ensaios de cada série, devido ao efeito de um maior teor de água no 2º ensaio, o mesmo já não acontece entre o 2º e o 3º, onde existiu uma diminuição do teor de água superficial e a infiltrabilidade do solo manteve valores semelhantes. Isto só pode ser explicado pela existência de alguma compactação superficial ou formação de crosta que tenha influenciado a infiltração da água no último ensaio.

A possível compactação superficial foi avaliada através da determinação da densidade aparente do solo antes dos diferentes ensaios (fig. 4.7).

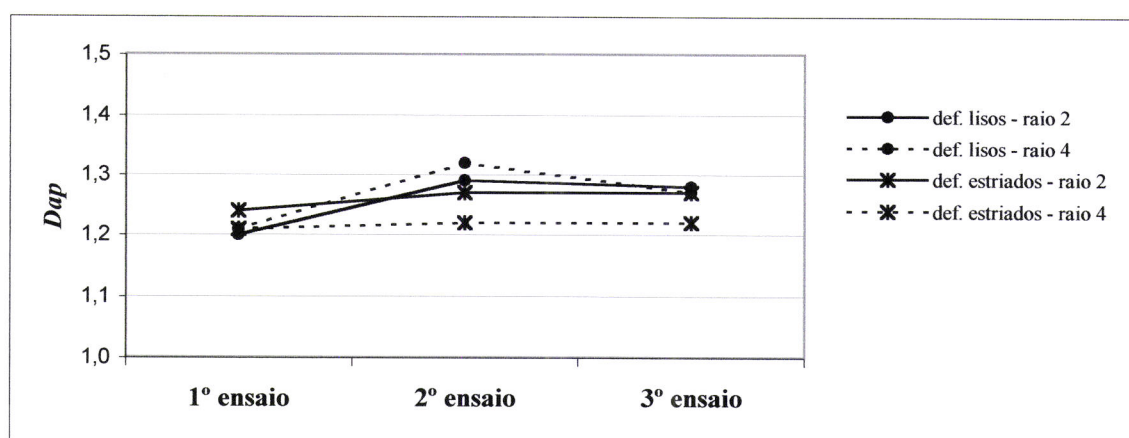


Figura 4.7 – Valores médios da densidade aparente nos primeiros 5 cm do solo, antes dos ensaios de infiltração do 1º ano.

Nota-se, em geral, um aumento da densidade aparente da camada superficial do solo a partir do 1º ensaio, devido à compactação da camada superficial provocada pelo impacto das gotas de água. Apesar disso, a análise estatística dos dados revela que não existem diferenças

significativas ($p > 0,05$) entre os valores obtidos antes dos diferentes ensaios realizados com cada tipo de aspersor.

O facto das amostras para determinação da densidade aparente do solo terem sido recolhidas, neste ano, com a utilização de anéis metálicos com uma altura de 5 cm, colocou a hipótese de não existirem diferenças significativas por se terem recolhido amostras numa espessura de solo muito grande. Com as intensidades de aplicação da máquina verificadas e a pequena duração destes ensaios, não será de prever uma compactação do solo muito grande, pelo que a recolha de amostras até uma profundidade de 5 cm irá certamente mascarar esse efeito.

Também não foi possível verificar indícios da formação de uma crosta superficial com espessura visível a olho nú, o que não significa que ela não exista. Alguns autores citados no capítulo 2, entre os quais McIntyre (1958), referem, como resultado dos seus trabalhos, a observação de uma película de solo mais compacta, com uma espessura da ordem dos 0,1 mm, impossível de observar a olho nú, mas cujo efeito sobre a redução da infiltrabilidade do solo era evidente.

Ainda observando as figuras 4.1 a 4.4, é possível verificar que as equações da infiltrabilidade obtidas com os aspersores equipados com deflectores estriados apresentam valores ligeiramente inferiores, o que indica que o tipo de deflector utilizado no aspersor terá algum efeito na redução da infiltrabilidade do solo. Apesar desta diferença não ser significativa, a sua explicação residirá no facto destes aspersores aplicarem a água com gotas de maior diâmetro, o que conduzirá a maiores energias de impacto, maior compactação superficial e conseqüentemente maior redução da infiltrabilidade do solo.

No quadro 4.3 podem-se observar alguns dos valores da energia cinética por unidade de massa das gotas de água aplicadas pelos dois tipos de aspersores durante os ensaios.

Mesmo não sendo uma diferença muito grande, é evidente o aumento da energia cinética das gotas nos ensaios em que se utilizaram aspersores com deflectores estriados, para valores da velocidade do vento semelhantes. Quando a velocidade do vento é elevada, o seu efeito sobre a energia cinética aplicada é mais importante do que o tipo de aspersor utilizado.

Quadro 4.3 – Valores da energia cinética das gotas de água aplicadas pelos aspersores com diferentes deflectores, durante os ensaios de infiltração do 1º ano

| Data do ensaio | T ^a do ar (°C) | Humidade Relativa (%) | Vel. vento (m/s)* | d ₅₀ (mm) | Ec _{Tv} (J/kg) |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| Aspersores com deflectores lisos | | | | | |
| 08/09/98 | 25,5 | 29,3 | 0,2 | 1,18 | 11,4 |
| 10/09/98 | - | - | - | 1,18 | - |
| 15/09/98 | 26,6 | 30,4 | 3,0 | 1,18 | 15,7 |
| Aspersores com deflectores estriados | | | | | |
| 25/08/98 | 29,3 | 30,4 | 0,3 | 1,28 | 12,5 |
| 27/08/98 | 19,6 | 61,6 | 0,1 | 1,28 | 12,3 |
| 01/09/98 | 27,9 | 29,3 | 0,5 | 1,28 | 12,6 |

* velocidade do vento medida a 2 m acima do solo.

Após a análise dos resultados verifica-se que para estes valores de intensidade pluviométrica a influência do tipo de aspersor utilizado na redução da infiltrabilidade do solo não é significativa. Assim, no segundo ano de ensaios, utilizaram-se intensidades pluviométricas mais elevadas, o que permitiu aumentar o efeito sobre as características de infiltração do solo, da diferente aplicação de água pelos aspersores equipados com os dois tipos de deflectores.

4.1.2.2. Resultados do segundo ano de ensaios

Tendo-se verificado a homogeneidade do solo existente no local de ensaios, no segundo ano utilizou-se apenas uma posição do terreno para realizar os ensaios de infiltração. Aumentou-se sim o número de ensaios, efectuando mais um em cada série. Os resultados são apresentados nas figuras 4.8 e 4.9.

Tal como no ano anterior, foi evidente uma maior infiltrabilidade do solo obtida no 1º ensaio relativamente a todos os outros, que apresentam valores muito idênticos.

Comparando as figuras 4.8 e 4.9 com as figuras 4.1 a 4.4, é visível o aumento dos valores da infiltrabilidade obtidos no 2º ano, principalmente para tempos curtos e nos ensaios

com o solo recém mobilizado. Como já foi referido, uma das causas para este fenómeno é o facto de taxas de aplicação mais elevadas conduzirem geralmente a maiores taxas de infiltração da água no solo.

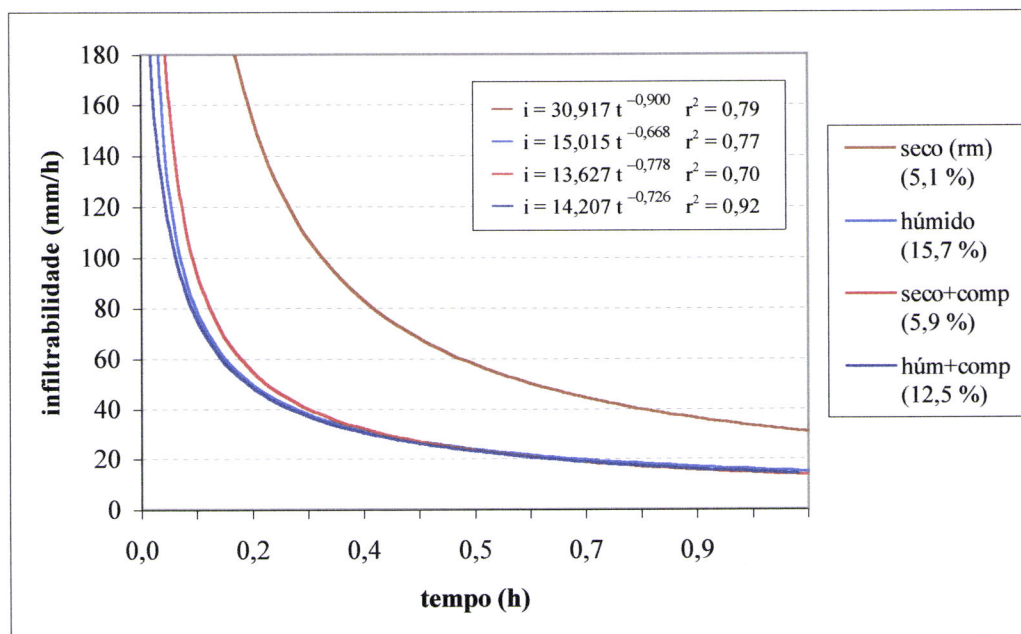


Figura 4.8 – Equações da infiltração no 2º ano de ensaios, utilizando deflectores lisos.

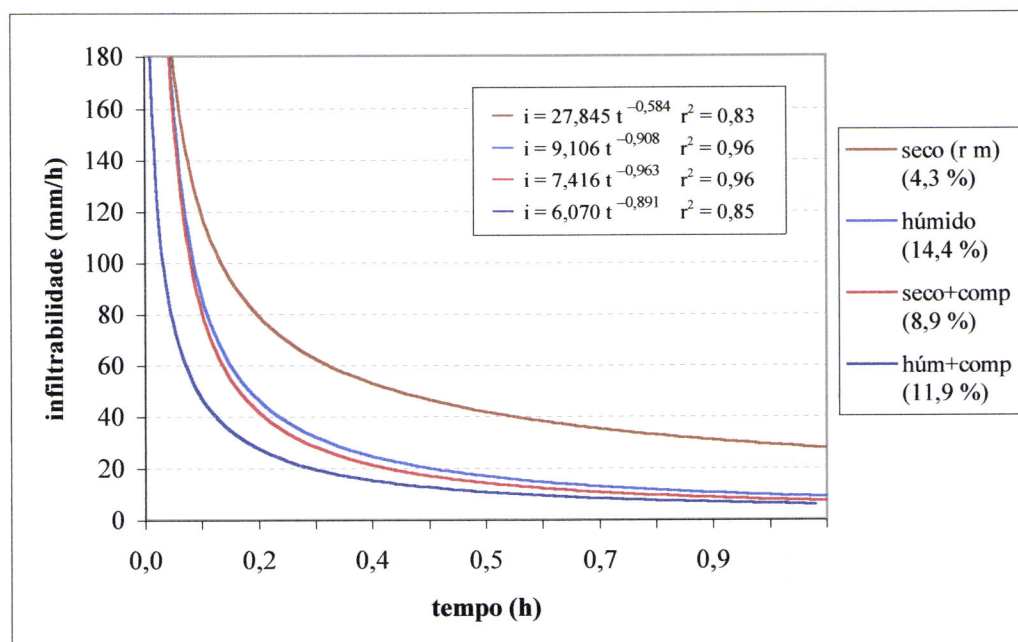


Figura 4.9 – Equações da infiltração no 2º ano de ensaios, utilizando deflectores estriados.

O teor de água do solo poderia ter tido alguma influência sobre este aumento da infiltrabilidade, mas a proximidade de valores para a mesma condição de solo antecedente ao ensaio, de um ano para o outro, na maioria dos casos indica que outros factores, nomeadamente a taxa de aplicação da água, terão contribuído mais para esta diferença.

Voltou-se também a verificar, como no primeiro ano, diferenças no teor de água do solo fundamentalmente nos primeiros 10 cm, mantendo-se depois no resto do perfil um valor muito idêntico ao longo dos ensaios (figs. 4.10 e 4.11).

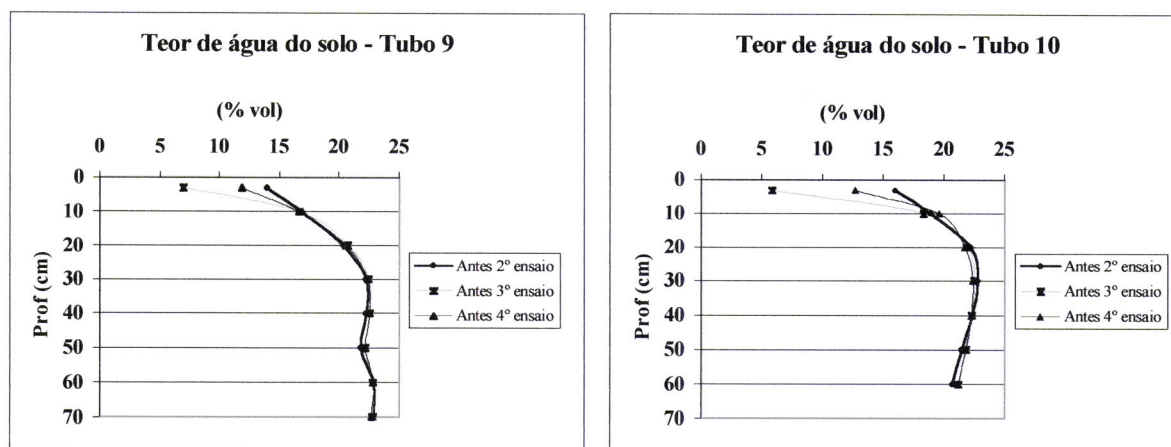


Figura 4.10 – Teores de água do solo antes dos ensaios de infiltração realizados em 99, com aspersores com deflectores lisos.

Na figura anterior verifica-se a inexistência dos valores referentes ao teor de água do solo antes do 1º ensaio devido a uma avaria da sonda capacitiva.

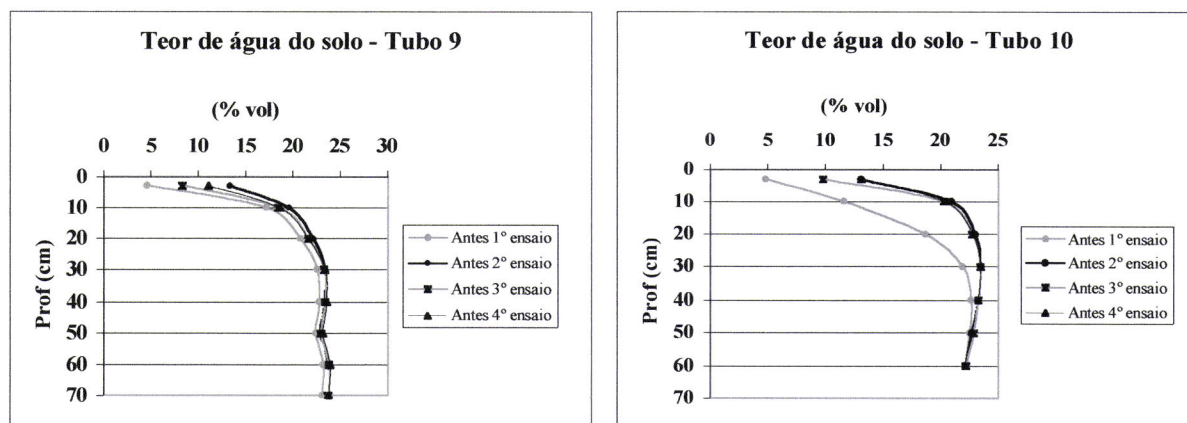


Figura 4.11 – Teores de água do solo antes dos ensaios de infiltração realizados em 99, com aspersores com deflectores estriados.

A semelhança entre as curvas da infiltrabilidade obtidas com diferentes teores de água na camada superficial, volta a colocar a questão do efeito da energia cinética da precipitação sobre a redução da infiltrabilidade do solo devido à compactação superficial.

Na figura 4.12 apresentam-se os valores da densidade aparente determinada antes dos diferentes ensaios.

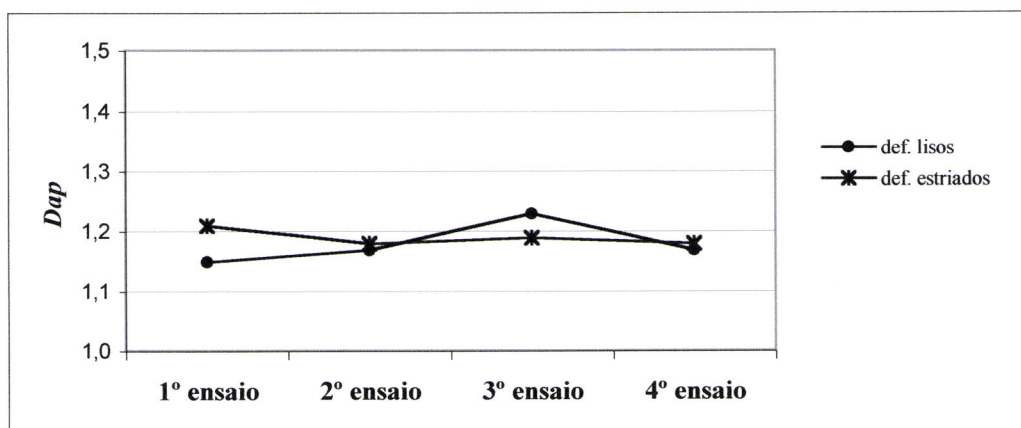


Figura 4.12 - Valores médios da densidade aparente no primeiro cm do solo, antes dos ensaios de infiltração do 2º ano.

A análise estatística dos dados revela mais uma vez a inexistência de diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os valores obtidos. No entanto, exceptuando os valores que antecederam o primeiro ensaio com a utilização de deflectores estriados, nota-se uma tendência para o aumento da densidade aparente ao longo das sucessivas aplicações, decrescendo ligeiramente no último ensaio.

De referir que estes valores de densidade aparente não são comparáveis com os obtidos no 1º ano, uma vez que se referem apenas à camada superficial até 1 cm de profundidade e não 5 cm como aconteceu no ano anterior.

Apesar de não existirem diferenças significativas na densidade aparente do solo, nestes ensaios já foi possível identificar uma camada superficial mais compacta, à qual se poderia chamar crosta, nalgumas zonas do terreno, após a realização do 2º ensaio de infiltração com os aspersores com deflectores estriados. Esta camada superficial mais compacta ou crosta, apresentava antes do 3º ensaio de infiltração uma espessura de cerca de 0,5 cm e uma consistência muito ligeira, quebrando-se facilmente; antes do 4º ensaio a sua

espessura era um pouco superior, chegando a valores de cerca de 1 cm, já com maior consistência.

Esta crosta superficial teve um efeito significativo na redução da infiltrabilidade do solo que se verificou no último ensaio com os aspersores com deflectores estriados (fig. 4.9) e que não tinha acontecido nos ensaios com deflectores lisos.

A camada compacta ou crosta foi mais evidente nos ensaios com os aspersores com deflectores estriados pelo facto destes aspersores originarem gotas maiores e por isso também com maior energia de impacto (quadro 4.4).

Quadro 4.4 – Valores da energia cinética das gotas de água aplicadas pelos aspersores com diferentes deflectores, durante os ensaios de infiltração do 2º ano

| Data do ensaio | T ^a do ar (°C) | Humidade Relativa (%) | Vel. vento (m/s)* | d ₅₀ (mm) | Ec _{Tv} (J/kg) |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| Aspersores com deflectores lisos | | | | | |
| 22/06/99 | 25,9 | 38,7 | 0,3 | 1,18 | 11,5 |
| 24/06/99 | 14,9 | 84,8 | 0,4 | 1,18 | 11,3 |
| 30/06/99 | 23,2 | 45,6 | 0,5 | 1,18 | 11,5 |
| 02/07/99 | 19,0 | 61,1 | 0,2 | 1,18 | 11,3 |
| Aspersores com deflectores estriados | | | | | |
| 19/07/99 | 21,2 | 59,0 | 2,8 | 1,28 | 16,0 |
| 21/07/99 | 21,5 | 59,8 | 0,5 | 1,28 | 12,5 |
| 27/07/99 | 19,1 | 69,0 | 0,1 | 1,28 | 12,3 |
| 29/07/99 | - | - | - | 1,28 | - |

* velocidade do vento medida a 2 m acima do solo.

Como os vários pontos do terreno receberam água com maior ou menor intensidade, a quantidade total de água aplicada foi diferente, influenciando o valor da energia cinética aplicada em cada ponto (J/m²), o que resultou numa maior compactação superficial e formação de crosta nuns pontos relativamente a outros.

A maior dimensão das gotas aplicadas com os aspersores com deflectores estriados não implica só maiores energias de impacto mas também um maior efeito de salpico, com o conseqüente destacamento de partículas de solo, conforme foi possível verificar durante os ensaios realizados (fig. 4.13).

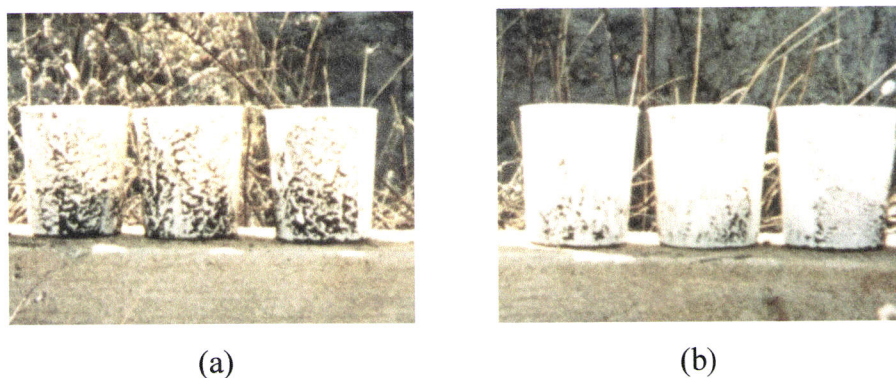


Figura 4.13 – Comparação do efeito de salpico sobre os pluviômetros utilizados nos ensaios realizados com os dois tipos de deflectores: (a) – estriados e (b) - lisos.

Este maior efeito de salpico provocado por gotas de maiores dimensões relativamente ao de gotas mais pequenas foi também observado por Bubbenzer & Jones (1971) nos seus trabalhos.

Além da energia de impacto, o maior destacamento de partículas de solo, peça fundamental do mecanismo de formação da crosta, terá influenciado a existência de uma crosta de maior espessura. A camada de solo constituída por esta crosta superficial terá menor porosidade, o que irá afectar a condutividade hidráulica superficial do solo (fig. 4.14), que apresentará menores valores com a diminuição da porosidade.

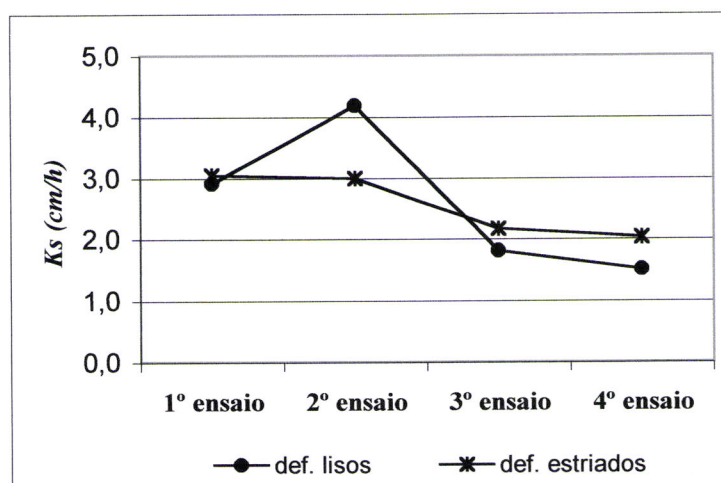


Figura 4.14 – Condutividade hidráulica superficial antes dos ensaios de infiltração do 2º ano.

Apesar de alguma heterogeneidade dos valores determinados no campo (Anexo D), os valores médios mostram que para ambas as modalidades (tipo de deflector) existiu uma diminuição do valor da condutividade hidráulica ao longo dos ensaios que, apesar de não ser estatisticamente significativa, terá influenciado a infiltrabilidade do solo.

Como conclusão deste ponto, pode-se dizer que a infiltrabilidade é influenciada pelo tipo de deflector utilizado no aspersor. Os aspersores com deflectores estriados originam, com as sucessivas aplicações de água, maior compactação e formação de crosta superficial do solo, diminuindo a sua condutividade hidráulica e deste modo a infiltrabilidade. Esta influência é tanto mais evidente quanto maior for a intensidade pluviométrica da máquina.

4.1.3. Escolha da equação da infiltrabilidade a usar no dimensionamento e avaliação dos sistemas

As características de infiltração do solo, representadas pelas equações da infiltrabilidade, são uma ferramenta fundamental para o correcto dimensionamento dos sistemas de rega e para a avaliação daqueles que já estão em funcionamento.

O objectivo mais comum, quer na fase de dimensionamento quer na de avaliação, é conseguir um sistema que funcione sem a ocorrência de escorrimento. Como as equações da infiltrabilidade foram todas elas determinadas com base nos valores da água infiltrada até à saturação superficial do solo, à partida qualquer uma delas cumpriria esse objectivo.

No entanto, verifica-se que as equações apresentam diferentes valores consoante a condição do solo em que foram determinadas e, na dificuldade prática de efectuar diversos ensaios para diferentes condições de solo, torna-se necessário escolher uma situação que dê mais segurança ao processo de cálculo.

Após a discussão dos resultados obtidos durante este trabalho, parece evidente que a condição mais fiável será a de solo seco mas que já tenha sofrido aplicações de água anteriores. As equações obtidas nestes ensaios apresentam valores idênticos aos obtidos em situações de maior humidade do solo, e a probabilidade da rega se efectuar nestas mesmas condições de solo será certamente maior do que qualquer uma das outras ensaiadas.

Na figura 4.15 apresentam-se as equações determinadas nestas condições nos dois anos de ensaios. Comparando as diferentes curvas apresentadas pode-se observar mais uma vez que a infiltrabilidade do solo apresenta sempre valores inferiores nos ensaios com

deflectores estriados relativamente aos mesmos ensaios com deflectores lisos, principalmente no início do processo. Esta variação é ainda mais nítida com o aumento da intensidade de aplicação da água.

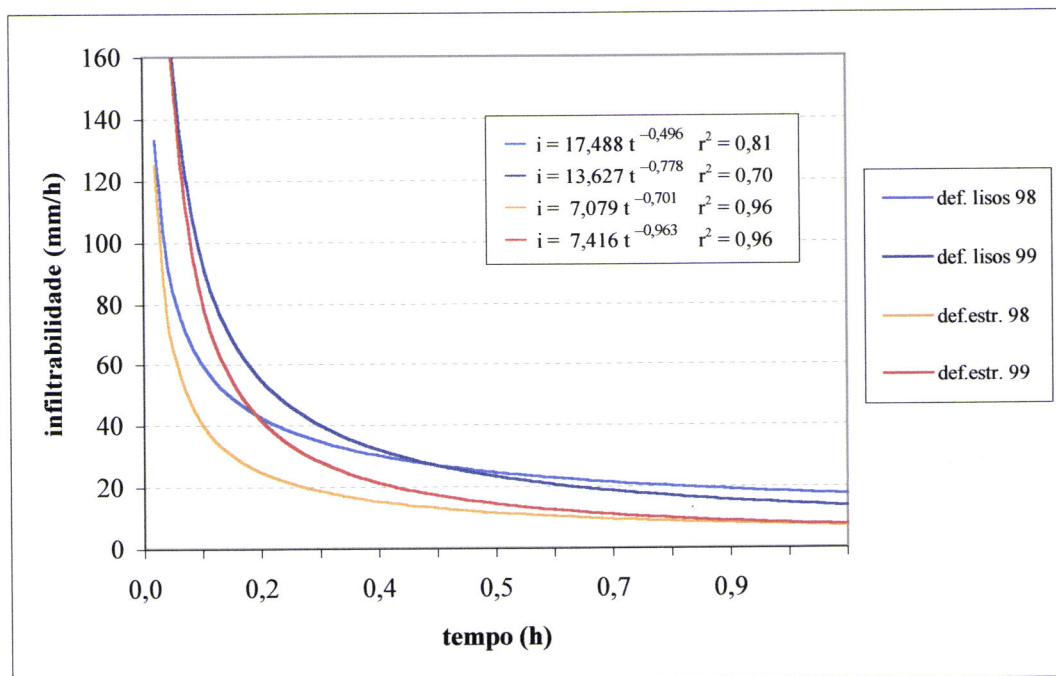


Figura 4.15 – Equações da infiltrabilidade referentes ao 3º ensaio de infiltração.

Também se observa nesta figura que o aumento da intensidade pluviométrica, que ocorreu no segundo ano de ensaios, provocou um aumento dos valores determinados para a infiltrabilidade do solo para tempos até aos 25-30 min, valor idêntico à duração da maior parte dos ensaios de infiltração. Esta diferença indica que a utilização de curvas da infiltrabilidade para avaliação da rega exige que a sua obtenção tenha sido baseada em ensaios realizados com a mesma taxa de aplicação de água que se prevê utilizar na rega; caso contrário, os resultados obtidos poderão ser enganadores. A esta mesma conclusão já tinham chegado outros autores, como por exemplo DeBoer & Chu (1994).

4.2. Ensaios de Rega

Com estes ensaios pretendeu-se verificar o efeito do tipo de aspersor sobre a infiltração e o escorrimento. São vários os factores que intervêm neste processo, além do tipo de aspersor, pelo que foi necessário avaliá-los também. Nalguns casos, esta avaliação permitiu verificar que eles se mantinham constantes ao longo dos ensaios, eliminando-os como possível causa das diferenças encontradas nos resultados obtidos, noutras casos ajudou a explicar essas mesmas diferenças.

4.2.1. Dotações de rega

Um dos factores que pode influenciar a quantidade de água aplicada e deste modo o processo de infiltração é a pressão de funcionamento dos aspersores. O caudal aplicado por cada aspersor varia com a sua pressão de funcionamento, pelo que a aplicação de uma dotação uniforme sobre todo o terreno vai depender da manutenção de uma pressão constante. A avaliação da pressão foi feita através da colocação de manómetros na base de vários aspersores ao longo da rampa rotativa. No quadro 4.5 apresentam-se os valores observados durante as diferentes regas realizadas.

A medição da pressão foi realizada no ponto de maior declive do terreno (raio 1), onde o efeito da topografia poderia afectar mais o sistema, provocando uma diminuição da uniformidade da pressão de funcionamento e da dotação aplicada. Pequenas variações nos valores observados são devidas ao facto de nem sempre se ter conseguido medir a pressão exactamente na mesma posição do terreno.

Observa-se ao longo de toda a rampa rotativa que a pressão da água à entrada do regulador de pressão apresenta sempre valores iguais ou superiores a 140 kPa (pressão máxima no regulador). Isso indica que todos os aspersores estarão a funcionar em condições idênticas, pressão máxima permitida pelo regulador, o que elimina o efeito da topografia sobre a pressão de funcionamento dos aspersores e conseqüente quantidade de água aplicada.

Quadro 4.5 – Pressões (kPa) registadas durante as regas

| Rega | Manómetros | | | | | | |
|----------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Pólo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 25-08-98 | 230 | - | - | 150 | - | - | 145 |
| 27-08-98 | 230 | - | - | 155 | - | - | 150 |
| 01-09-98 | 230 | - | - | 155 | - | - | 150 |
| 08-09-98 | 230 | - | - | 155 | - | - | 150 |
| 10-09-98 | 230 | - | - | 150 | - | - | 145 |
| 15-09-98 | 230 | - | - | 155 | - | - | 150 |
| 22-06-99 | 265 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 140 |
| 24-06-99 | 265 | 150 | 150 | 150 | 150 | 140 | 140 |
| 26-06-99 | 265 | 150 | 150 | 150 | 155 | 145 | 140 |
| 30-06-99 | 265 | 150 | 155 | 155 | 155 | 145 | 140 |
| 02-07-99 | 265 | 155 | 155 | 150 | 155 | 145 | 140 |
| 19-07-99 | 265* | 155 | 160 | 160 | 160 | 145 | 145 |
| 21-07-99 | 265 | 155 | 155 | 155 | 155 | 145 | 140 |
| 23-07-99 | 265 | 150 | 155 | 155 | 160 | 145 | 140 |
| 27-07-99 | 265 | 150 | 155 | 155 | 160 | 145 | 140 |
| 29-07-99 | 265 | 145 | 150 | 150 | 150 | 145 | 140 |

* - valor duvidoso, devido ao maior valor do caudal medido.

Existindo uma pressão de funcionamento dos aspersores constante (140 kPa) ao longo da rampa rotativa e nos vários ensaios, a dotação aplicada será função do caudal à entrada da máquina que se utilizou em cada ano e da velocidade de deslocamento da rampa rotativa em cada rega.

A quantidade de água que chega ao solo (D_{rec}) e que se poderá infiltrar irá por sua vez depender da dotação aplicada (Da) e das perdas por evaporação e arrastamento pelo vento, que por sua vez serão influenciadas pelo tamanho das gotas emitidas por cada aspersor.

Nos quadros 4.6 e 4.7 apresentam-se os valores das dotações das várias regas, assim como os principais factores climáticos que influenciaram essas mesmas dotações e ainda uma estimativa das perdas por evaporação e arrastamento pelo vento.

A falta de alguns dados climáticos é devida a problemas que existiram com a estação meteorológica da Herdade da Mitra. Os dados apresentados correspondem aos valores dos diferentes parâmetros climáticos ocorridos durante o período de realização dos ensaios, e que

no caso da velocidade do vento corresponde à variação que existiu durante a realização de cada ensaio.

Os valores de ET_p , necessários para a fórmula utilizada por Keller & Bliesner (1990) (eq. 3.27) para estimar as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento, foram calculados utilizando o valor mais elevado da velocidade do vento ocorrido durante cada ensaio.

Da observação relativa aos dados do ano de 1998 (quadro 4.6) pode-se verificar que as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento determinadas através desta fórmula, mesmo utilizando os valores máximos de velocidade do vento, apresentam sempre valores bastante inferiores aos calculados através da diferença entre a dotação aplicada e dotação recolhida.

As perdas calculadas por diferença entre dotação aplicada e recolhida, expressas em percentagem da dotação aplicada, apresentaram um intervalo muito semelhante para os dois tipos de aspersores utilizados (9,3 a 36,0 % com deflectores lisos e 13,3 a 36,0 % com deflectores estriados). Com a velocidade de deslocamento da rampa rotativa mais baixa verificaram-se alguns valores de dotação recolhida superiores aos da dotação aplicada, o que pode ser explicado pelo efeito do vento que terá desviado a água aplicada sobre outras zonas do terreno para o local de recolha da dotação.

No segundo ano de ensaios (quadro 4.7) as perdas com os aspersores com deflectores lisos continuaram a apresentar valores semelhantes aos do 1º ano (entre 9,1 e 36,4 %), mas com os aspersores com deflectores estriados já foram menores (5,8 a 23,1 %), mesmo com valores da velocidade do vento muito semelhantes.

Em termos médios, e não considerando os valores negativos, verifica-se que nas regas com aspersores com deflectores estriados as perdas foram menores (12,8 %) relativamente às regas com aspersores com deflectores lisos (20,6 %).

Estes valores continuam a ser superiores aos estimados pela fórmula sugerida por Keller & Bliesner (1990), o que indica que esta fórmula terá algumas limitações na sua utilização, não fornecendo resultados adequados para condições idênticas às ensaiadas.

Os valores de perdas por evaporação e arrastamento apresentados nos quadros anteriores encontram-se dentro do intervalo de valores referido por Kohl *et al.* (1987), 2 a 40 %, determinado a partir de um grande número de ensaios realizados entre 1942 e 1984.

Quadro 4.6 – Dados relativos aos ensaios de rega do ano de 1998

| Deflector | Data | T ^a ar (° C) | Vento (m/s) | HR (%) | Veloc. seleccio- nada | Da (mm) | Posição | D _{rec} (mm) | Perdas (Da-D _{rec} , mm) | Perdas (%) | ETp (mm/dia) | Perdas (Keller & Bliesner, 1990) (%) |
|-----------|----------|----------------------------|----------------|-----------|-----------------------------|------------|---------|--------------------------|---|---------------|-----------------|---|
| Estriado | 25-08-98 | 32,0 | 0 – 1,4 | 26,1 | 20 | 9,4 | raio 3 | 10,7 | - 1,3 | - 13,8 | 6,4 | 4,3 |
| | | | | | | | raio 1 | 10,5 | - 1,1 | - 11,7 | | |
| | 27-08-98 | 22,4 | 0 – 1,5 | 48,1 | 40 | 7,5 | raio 3 | 5,7 | 1,8 | 24,0 | 6,6 | 4,5 |
| | | | | | | | raio 1 | 4,8 | 2,7 | 36,0 | | |
| | 01-09-98 | 29,8 | 0,5 – 2,2 | 25,2 | 40 | 7,5 | raio 3 | 5,7 | 1,8 | 24,0 | 7,3 | 5,1 |
| | | | | | | | raio 1 | 6,5 | 1,0 | 13,3 | | |
| Liso | 08-09-98 | 27,0 | 0 – 1,7 | 25,1 | 20 | 9,4 | raio 3 | 11,6 | - 2,2 | - 23,4 | 6,9 | 7,1 |
| | | | | | | | raio 1 | 9,3 | 0,1 | 1,1 | | |
| | 10-09-98 | - | > 2 | - | 40 | 7,5 | raio 3 | 6,5 | 0,9 | 13,3 | - | - |
| | | | | | | | raio 1 | 4,8 | 2,7 | 36,0 | | |
| | 15-09-98 | 28,2 | 0 – 2,6 | 28,4 | 40 | 7,5 | raio 3 | 6,8 | 0,7 | 9,3 | 6,6 | 8,1 |
| | | | | | | | raio 1 | 5,2 | 2,3 | 30,7 | | |

Quadro 4.7 – Dados relativos aos ensaios de rega do ano de 1999

| Deflector | Data | T ^a ar (°C) | Vento (m/s) | HR (%) | Veloc. Seleccionada | Da (mm) | Posição | D _{rec} (mm) | Perdas (Da-D _{rec} , mm) | Perdas (%) | ETp (mm/dia) | Perdas (Keller & Bliesner, 1990) (%) |
|-----------|----------|------------------------|-------------|--------|---------------------|---------|---------|-----------------------|-----------------------------------|------------|--------------|--------------------------------------|
| Liso | 22-06-99 | 27,7 | 0 – 1,6 | 33,3 | 30 | 13,6 | raio 2 | 12,1 | 1,5 | 11,0 | 9,2 | 8,5 |
| | | | | | | | raio 1 | 15,2 | -1,6 | -11,8 | | |
| | 24-06-99 | 16,6 | 0,5 – 2,2 | 66,1 | 40 | 12,1 | raio 2 | 11,0 | 1,1 | 9,1 | 2,2 | 4,9 |
| | | | | | | | raio 1 | 7,8 | 4,3 | 35,5 | | |
| | 26-06-99 | 17,0 | 0,5 – 2,6 | 57,0 | 40 | 12,1 | raio 2 | 12,3 | -0,2 | -1,7 | 4,3 | 6,5 |
| | | | | | | | raio 1 | 8,6 | 3,5 | 28,9 | | |
| 30-06-99 | 27,9 | 0,5 – 2,2 | 31,7 | 40 | 12,1 | raio 2 | 10,5 | 1,6 | 13,2 | 6,9 | 7,7 | |
| | | | | | | raio 1 | 10,9 | 1,2 | 9,9 | | | |
| 02-07-99 | 22,6 | 0,1 – 1,0 | 46,3 | 40 | 12,1 | raio 2 | 9,6 | 2,5 | 20,7 | 7,2 | 6,3 | |
| | | | | | | raio 1 | 7,7 | 4,4 | 36,4 | | | |
| Estriado | 19-07-99 | 22,7 | 0 – 3,2 | 51,9 | 30* | 17,2 | raio 2 | 17,3 | -0,1 | -0,6 | 6,5 | 5,8 |
| | | | | | | | raio 1 | 15,1 | 2,1 | 12,2 | | |
| | 21-07-99 | 28,9 | 0,2 – 1,3 | 43,6 | 40 | 12,1 | raio 2 | 9,7 | 2,4 | 19,8 | 6,7 | 4,3 |
| | | | | | | | raio 1 | 11,4 | 0,7 | 5,8 | | |
| | 23-07-99 | 21,2 | 0 – 3,3 | 70,7 | 40 | 12,1 | raio 2 | 11,4 | 0,7 | 5,8 | 3,5 | 4,6 |
| | | | | | | | raio 1 | 10,8 | 1,3 | 10,7 | | |
| 27-07-99 | 21,7 | 0 – 1,3 | 50,1 | 40 | 12,1 | raio 2 | 9,3 | 2,8 | 23,1 | 6,4 | 4,2 | |
| | | | | | | raio 1 | 11,1 | 1,0 | 8,3 | | | |
| 29-07-99 | - | 0,2 – 0,5 | - | - | 40 | 12,1 | raio 2 | 9,8 | 2,3 | 19,0 | - | - |
| | | | | | | | raio 1 | 10,8 | 1,3 | 10,7 | | |

*- Rega realizada com um caudal de 18,4 m³/h, devido a problemas na estabilização da pressão na rampa rotativa

A comparação entre o valor das perdas por evaporação e arrastamento pelo vento fica sempre condicionada ao facto das condições climatéricas dos vários ensaios terem sido diferentes umas das outras, principalmente no que respeita à velocidade do vento, que será o factor que mais afecta este tipo de perdas. Por isso mesmo, as diferenças entre os valores determinados com a utilização dos diferentes deflectores não foram significativas ($p > 0,05$).

No entanto, com o aumento da intensidade pluviométrica é nítida a redução média das perdas por evaporação e arrastamento pelo vento quando a água é aplicada com aspersores com deflectores estriados, que emitem gotas de maior tamanho e por isso mesmo mais resistentes ao efeito do vento.

4.2.2. Uniformidade das regas

As diferenças nos valores da água infiltrada ou escoada em cada ponto do terreno serão também função da uniformidade da rega. No quadro 4.8 são apresentados os valores dos coeficientes de uniformidade determinados para as diferentes regas.

Após a análise dos valores do coeficiente de uniformidade de Heermann & Hein pode-se dizer que as diferenças entre os valores obtidos nas regas realizadas com aspersores com deflectores lisos e estriados são, em qualquer dos anos, significativas ($p < 0,05$) (Anexo I), tendo os primeiros originado regas mais uniformes.

Estas diferenças foram mais evidentes no 1º ano de ensaios (valores médios de 92,5 % com os deflectores lisos e 76,2 % com deflectores estriados), do que no segundo ano (valores médios de 90,6 % com os deflectores lisos e 83,3 % com os deflectores estriados).

A diferente divisão do jacto de água emitido pelo aspersor, consoante o tipo de prato deflector utilizado, será uma das principais causas para esta diferença nos valores da uniformidade. O deflector liso provoca uma rotura mais homogénea do jacto (fig. 2.10), enquanto que o deflector estriado divide-o em pequenos jactos individuais que conduzirão a uma aplicação menos uniforme da água sobre o terreno.

No segundo ano de ensaios, a diminuição do espaçamento entre aspersores provocou maior sobreposição da água aplicada, o que aumentou bastante a uniformidade das regas realizadas com aspersores com deflectores estriados.

Quadro 4.8 – Uniformidade das regas

| Deflector | Data | vento (m/s) | veloc. rampa | Posição | CU_H (%) | CU_v (%) |
|-----------|----------|----------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|
| Estriado | 25-08-98 | 0 – 1,4 | 20 | raio 3 raio 1 | 71 70 | 70 69 |
| | 27-08-98 | 0 – 1,5 | 40 | raio 3 raio 1 | 80 79 | 78 76 |
| | 01-09-98 | 0,5 – 2,2 | 40 | raio 3 raio 1 | 81 76 | 78 73 |
| Liso | 08-09-98 | 0 – 1,7 | 20 | raio 3 raio 1 | 92 95 | 91 94 |
| | 10-09-98 | > 2 | 40 | raio 3 raio 1 | 91 92 | 90 91 |
| | 15-09-98 | 0 – 2,6 | 40 | raio 3 raio 1 | 93 92 | 91 90 |
| Liso | 22-06-99 | 0 – 1,6 | 30 | raio 2 raio 1 | 88 85 | 87 82 |
| | 24-06-99 | 0,5 – 2,2 | 40 | raio 2 raio 1 | 93 89 | 92 87 |
| | 26-06-99 | 0,5 – 2,6 | 40 | raio 2 raio 1 | 94 86 | 94 84 |
| | 30-06-99 | 0,5 – 2,2 | 40 | raio 2 raio 1 | 95 91 | 94 89 |
| | 02-07-99 | 0,1 – 1,0 | 40 | raio 2 raio 1 | 96 89 | 96 86 |
| Estriado | 19-07-99 | 0 – 3,2 | 30 | raio 2 raio 1 | 93 90 | 92 89 |
| | 21-07-99 | 0,2 – 1,3 | 40 | raio 2 raio 1 | 77 82 | 73 79 |
| | 23-07-99 | 0 – 3,3 | 40 | raio 2 raio 1 | 85 90 | 82 86 |
| | 27-07-99 | 0 – 1,3 | 40 | raio 2 raio 1 | 71 68 | 69 64 |
| | 29-07-99 | 0,2 – 0,5 | 40 | raio 2 raio 1 | 90 87 | 86 82 |

Comparando os valores do coeficiente de uniformidade de variação (CU_v) com os valores do coeficiente de uniformidade de Heermann & Hein (CU_H), verifica-se que são praticamente iguais. Ou seja, mesmo recorrendo a um coeficiente supostamente mais eficaz na detecção de anomalias com aspersores individuais (conforme opinião dos seus autores), se verifica que as regas tiveram, de um modo geral, boa uniformidade.

4.2.3. O escoamento e a influência dos diversos factores

A água aplicada que o solo não conseguiu infiltrar deu origem ao escoamento observado nalgumas regas. Existindo um aumento do escoamento ao longo de sucessivas regas em que se aplicou a mesma dotação, isso indicará uma diminuição da capacidade de infiltração do solo. Esta variação da infiltrabilidade do solo é devida ao efeito de diversos factores, como se poderá verificar a seguir.

4.2.3.1. Resultados do primeiro ano de ensaios

No primeiro ano de ensaios, com dotações aplicadas de 7,5 e 9,4 mm, verifica-se que os aspersores com deflectores estriados originaram mais escoamento do que os aspersores com deflectores lisos, onde este foi praticamente nulo (quadro 4.9 e fig. 4.16).

Contudo, a análise estatística utilizando todos os valores observados revela que não existem diferenças significativas ($p > 0,05$) quando se comparam em cada rega: i) os valores do escoamento obtidos com a utilização dos dois tipos de deflectores; ii) os valores do escoamento medidos nas duas posições do terreno, o que elimina o possível efeito que o declive poderia ter sobre este parâmetro.

Quadro 4.9 – Escoamento médio medido no 1º ano de ensaios

| Deflector | Data | veloc. rampa | Da (mm) | Posição | D _{rec} (mm) | Esc. (mm) | σ (mm) | Esc. * (%) | Esc. ** (%) |
|-----------|----------|--------------|---------|---------|-----------------------|-----------|--------|------------|-------------|
| Estriado | 25-08-98 | 20 | 9,4 | raio 3 | 10,7 | 0,88 | 1,21 | 9,3 | 8,2 |
| | | | | raio 1 | 10,5 | 0,07 | 0,13 | 0,8 | 0,7 |
| | 27-08-98 | 40 | 7,5 | raio 3 | 5,7 | 0,50 | 0,58 | 6,6 | 8,7 |
| | | | | raio 1 | 4,8 | 0,15 | 0,27 | 2,0 | 3,2 |
| | 01-09-98 | 40 | 7,5 | raio 3 | 5,7 | 0,34 | 0,47 | 4,5 | 5,9 |
| | | | | raio 1 | 6,5 | 0,08 | 0,14 | 1,1 | 1,3 |
| Liso | 08-09-98 | 20 | 9,4 | raio 3 | 11,6 | - | - | - | - |
| | | | | raio 1 | 9,3 | 0,02 | 0,03 | 0,2 | 0,2 |
| | 10-09-98 | 40 | 7,5 | raio 3 | 6,5 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | raio 1 | 4,8 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |
| | 15-09-98 | 40 | 7,5 | raio 3 | 6,8 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | raio 1 | 5,2 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |

* - Percentagem da Da; ** - Percentagem da D_{rec}; σ - desvio padrão.

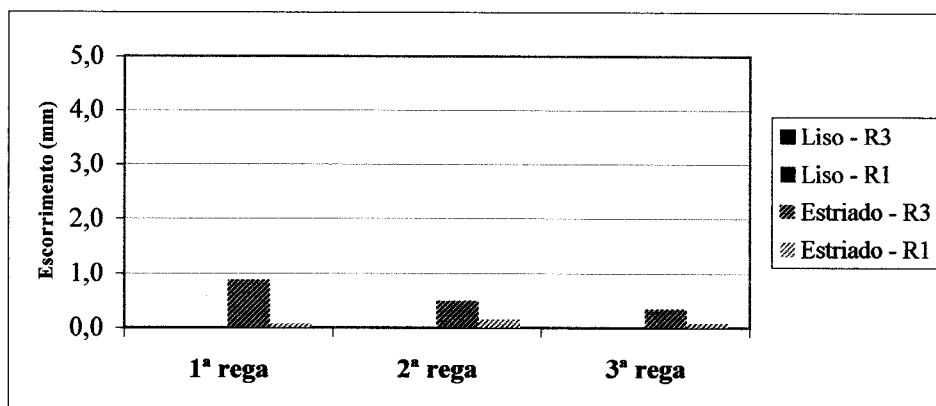


Figura 4.16 - Escorrimento médio medido no 1º ano de ensaios.

Esta tendência para um maior escoamento com a utilização dos aspersores com deflectores estriados e que depois não apresenta diferenças significativas poderá ser explicada pela influência de outros factores para além do tipo de deflector utilizado.

O primeiro factor considerado foi o teor de água do solo (figs. 4.17 e 4.18). Um teor de água do solo mais elevado limitará a infiltração, levando a um maior escoamento. Verifica-se, pela observação das figuras, que o teor de água do solo nas duas séries de ensaios apresentou valores muito semelhantes. A maior diferença regista-se no teor de água à superfície do solo que antecedeu a primeira rega com os aspersores com deflectores estriados (geralmente perto dos 5 %), relativamente ao da primeira rega com os aspersores com deflectores lisos (entre 8,6 e 15,0 %). No entanto, a partir dos 10 cm de profundidade já os teores de água foram sempre idênticos.

Isto indica que, existindo mais escoamento nas regas com deflectores estriados e havendo um teor de água do solo antes da primeira rega inferior nesta modalidade, serão outros os factores responsáveis por um maior escoamento.

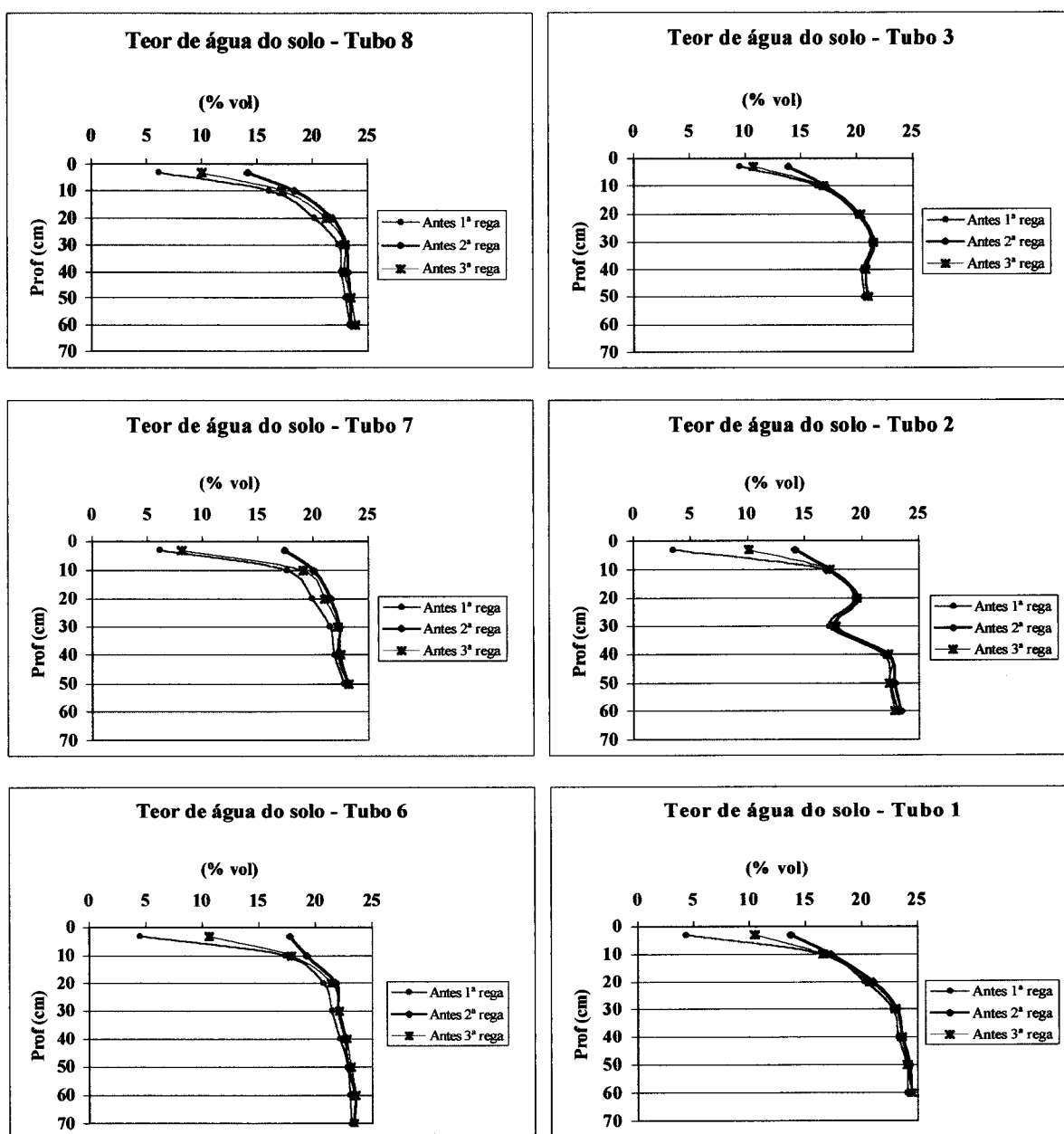


Figura 4.17 – Teores de água no solo antes dos ensaios de rega realizados em 98, com os aspersores com deflectores estriados.

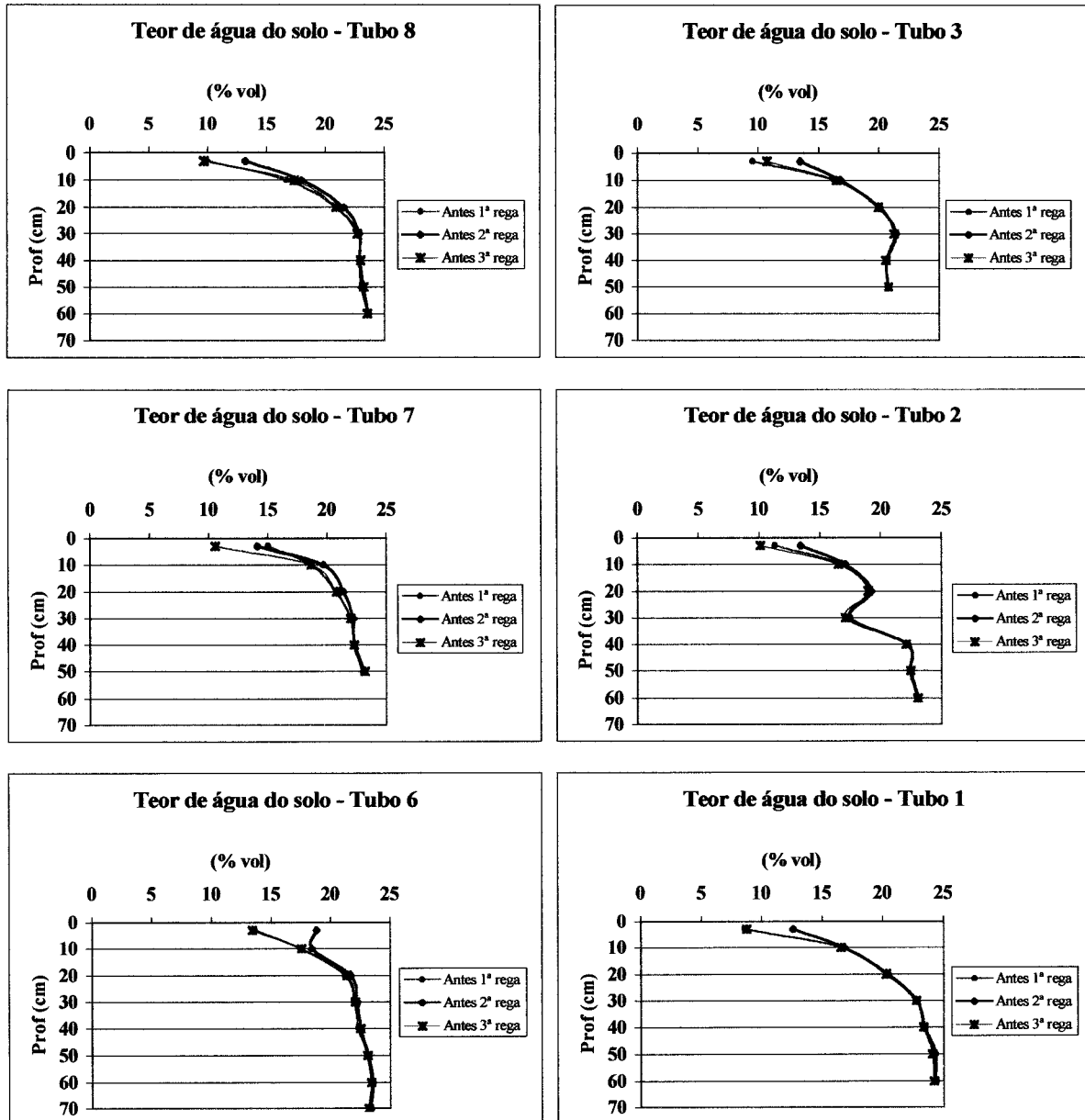


Figura 4.18 – Teores de água do solo antes dos ensaios de rega realizados em 98, com os aspersores com deflectores lisos.

A ocorrência de maior escorrimento no raio da rampa rotativa com menor declive (raio 3), indica que também este factor não tem um efeito significativo. Resta assim, como explicação para as diferenças de escorrimento o efeito que a mobilização do terreno possa ter sobre a rugosidade e capacidade de armazenamento superficial do solo e a alteração destes parâmetros devido ao impacto das gotas de água emitidas pelos dois tipos de aspersores.

Tal como aconteceu nos ensaios de infiltração, seria de prever uma redução da infiltração nas regas em que se utilizaram os aspersores com deflectores estriados, devido a maior compactação superficial provocada pela aplicação da água com gotas de maior tamanho e por isso mesmo maior energia de impacto. Ao mesmo tempo, essas gotas maiores provocam uma maior quebra dos agregados do solo, diminuindo a rugosidade e a capacidade de armazenamento superficial e favorecendo o escoamento da água não infiltrada.

Verificou-se no entanto que a energia cinética total aplicada, que depende não só do tamanho das gotas mas também da velocidade do vento e da dotação de rega, apresentou valores muito idênticos nas regas com os dois tipos de deflectores (quadro 4.10).

Quadro 4.10 – Energia de impacto das gotas de água no solo no 1º ano de ensaios

| Deflector | Data | E_{cTv} (J/kg) | Posição | D_{rec} (mm) | E_{cTv} (kJ/m ²) |
|-----------|----------|---------------------|---------|-------------------|-----------------------------------|
| Estriado | 25-08-98 | 12,8 | raio 3 | 10,7 | 0,137 |
| | | | raio 1 | 10,5 | 0,134 |
| | 27-08-98 | 12,6 | raio 3 | 5,7 | 0,072 |
| | | | raio 1 | 4,8 | 0,060 |
| | 01-09-98 | 13,4 | raio 3 | 5,7 | 0,076 |
| | | | raio 1 | 6,5 | 0,087 |
| Liso | 08-09-98 | 11,8 | raio 3 | 11,6 | 0,137 |
| | | | raio 1 | 9,3 | 0,110 |
| | 10-09-98 | - | raio 3 | 6,5 | - |
| | | | raio 1 | 4,8 | - |
| | 15-09-98 | 12,3 | raio 3 | 6,8 | 0,084 |
| | | | raio 1 | 5,2 | 0,064 |

Por esta razão, também a compactação superficial do solo, avaliada através dos valores da densidade aparente (fig. 4.19), não apresentou diferenças significativas ($p > 0,05$), quer ao longo dos ensaios com o mesmo tipo de deflector, quer entre ensaios com diferentes deflectores.

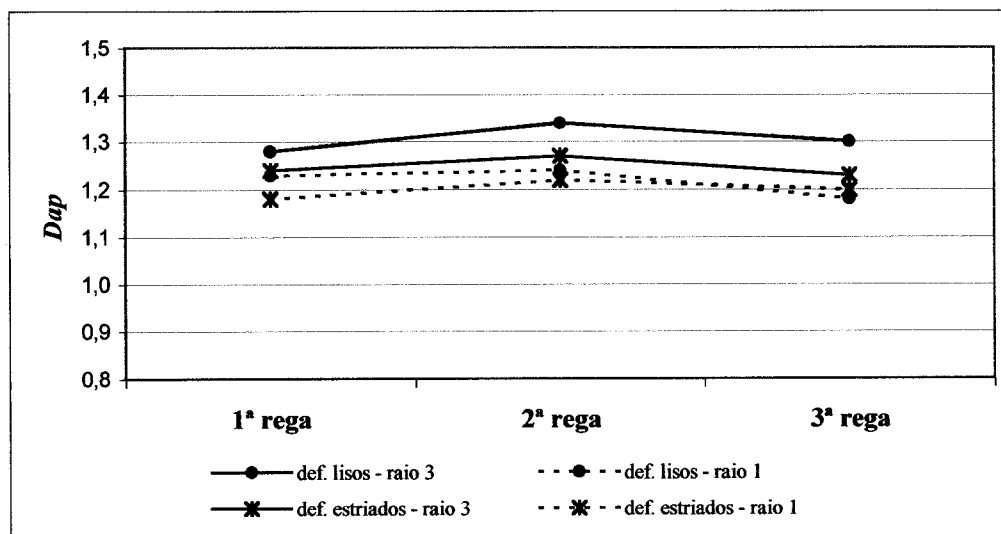


Figura 4.19 – Valores médios da densidade aparente nos primeiros 5 cm do solo, antes de cada rega realizada no 1º ano.

No que se refere ao efeito do impacto das gotas de água sobre a rugosidade e armazenamento superficial do solo, pode-se observar no quadro 4.11 que a rugosidade apresenta valores médios praticamente iguais entre os ensaios efectuados com os dois tipos de deflectores, e que também não variam significativamente ao longo das regas. Mais uma vez a análise dos dados indica que não existem diferenças significativas ($p > 0,05$).

Quadro 4.11 – Valores médios da rugosidade aleatória (RR), armazenamento superficial (AD_m) e escorrimento verificados no 1º ano de ensaios

| Deflector | Rega | RR (cm) | Posição | AD_m (mm) | Esc. (mm) |
|-----------|------|-----------|---------|-------------|-----------|
| Estriado | 1ª | 0,054 | raio 3 | 0,13 | 0,88 |
| | | | raio 1 | 0,09 | 0,07 |
| | 2ª | 0,056 | raio 3 | 0,13 | 0,50 |
| | | | raio 1 | 0,10 | 0,15 |
| | 3ª | 0,056 | raio 3 | 0,13 | 0,34 |
| | | | raio 1 | 0,10 | 0,08 |
| Liso | 1ª | 0,057 | raio 3 | 0,13 | - |
| | | | raio 1 | 0,10 | 0,02 |
| | 2ª | 0,053 | raio 3 | 0,12 | 0,00 |
| | | | raio 1 | 0,09 | 0,00 |
| | 3ª | 0,046 | raio 3 | 0,11 | 0,00 |
| | | | raio 1 | 0,08 | 0,00 |

Isto significa que as operações culturais que antecederam cada série de ensaios deixaram a superfície do solo em condições de rugosidade idênticas. Assim sendo, pode-se afirmar que a mobilização do solo não teve um efeito significativo sobre o escoamento medido em cada série de ensaios.

Também não existem grandes alterações da rugosidade superficial ao longo das diferentes regas. Isto deve-se ao facto da superfície do solo ter ficado bastante regular no fim das operações de preparação do terreno e, nem a energia de impacto das gotas de água nem o pequeno escoamento existente foram suficientes para alterar significativamente este parâmetro.

O aumento de rugosidade do solo verificado nalguns casos, de uma rega para a seguinte, é um fenómeno que já foi observado também por outros investigadores. Huang & Bradford (1992) apontam as diferenças no teor de água do solo antes de cada precipitação como uma das causas para que isso aconteça, pois irá influenciar a quebra dos agregados e o destacamento de partículas do solo, como foi referido no ponto 2.3.4.2.2.

Não havendo diferenças significativas no valor da rugosidade superficial, e como a capacidade de armazenamento superficial foi calculada em função desta (ponto 3.4.2.3.1), verificou-se também a inexistência de diferenças significativas no armazenamento superficial.

Após esta análise dos principais factores intervenientes no processo da rega, apenas se pode concluir que as diferenças existentes no escoamento serão devidas à acção conjunta de todos eles, não havendo nenhum em particular cujo efeito possa ser considerado dominante.

A tendência observada para existirem maiores valores de escoamento com a utilização dos aspersores com deflectores estriados poderá ser explicada pelo valor ligeiramente superior de alguns parâmetros associados a este tipo de deflector (tamanho das gotas, energia cinética) que pode ter mais efeito sobre a infiltração da água no solo. Não apresentando estes parâmetros diferenças significativas o mesmo se verifica com o volume de água escoada.

4.2.3.2. Resultados no segundo ano de ensaios

Os indícios de maior probabilidade de ocorrência de escoamento nas regas com aspersores com deflectores estriados relativamente às regas com aspersores com deflectores lisos, que se verificou no primeiro ano de ensaios, justificaram a sua repetição em condições

que acentuassem o efeito da diferente aplicação da água com os dois tipos de deflectores, ou seja, utilizando maiores intensidades pluviométricas e dotações de rega.

Considerando os valores médios medidos do escoamento (quadro 4.12 e fig. 4.20), é evidente o aumento do escoamento relativamente ao primeiro ano de ensaios, devido essencialmente à aplicação da água com maior intensidade e em maior quantidade. Isto não exclui o efeito que outros factores poderão exercer sobre o fenómeno, o que foi também avaliado.

Quadro 4.12 – Escoamento médio medido no 2º ano de ensaios

| Deflector | Data | veloc. rampa | D_a (mm) | Posição | D_{rec} (mm) | Esc. Sup. (mm) | σ (mm) | Esc. * (%) | Esc. ** (%) |
|-----------|----------|--------------|------------|---------|----------------|----------------|---------------|------------|-------------|
| Liso | 22-06-99 | 30 | 13,6 | raio 2 | 12,1 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | raio 1 | 15,2 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |
| | 24-06-99 | 40 | 12,1 | raio 2 | 11,0 | 0,34 | 0,54 | 2,8 | 3,1 |
| | | | | raio 1 | 7,8 | 0,00 | 0,01 | 0,0 | 0,0 |
| | 26-06-99 | 40 | 12,1 | raio 2 | 12,3 | 0,94 | 1,59 | 7,8 | 7,7 |
| | | | | raio 1 | 8,6 | 0,28 | 0,39 | 2,3 | 3,3 |
| | 30-06-99 | 40 | 12,1 | raio 2 | 10,5 | 0,43 | 0,75 | 3,6 | 4,1 |
| | | | | raio 1 | 10,9 | 0,36 | 0,58 | 3,0 | 3,3 |
| | 02-07-99 | 40 | 12,1 | raio 2 | 9,6 | 0,67 | 1,06 | 5,5 | 7,0 |
| | | | | raio 1 | 7,7 | 0,76 | 1,02 | 6,3 | 9,8 |
| Estriado | 19-07-99 | 30 | 17,2 | raio 2 | 17,3 | 0,04 | 0,04 | 0,2 | 0,2 |
| | | | | raio 1 | 15,1 | 0,20 | 0,34 | 1,1 | 1,3 |
| | 21-07-99 | 40 | 12,1 | raio 2 | 9,7 | 1,05 | 1,00 | 8,7 | 10,8 |
| | | | | raio 1 | 11,4 | 0,43 | 0,69 | 3,5 | 3,7 |
| | 23-07-99 | 40 | 12,1 | raio 2 | 11,4 | 2,24 | 0,51 | 18,5 | 19,6 |
| | | | | raio 1 | 10,8 | 0,85 | 0,71 | 7,1 | 7,9 |
| 27-07-99 | 40 | 12,1 | raio 2 | 9,3 | 3,80 | 0,67 | 31,4 | 40,8 | |
| | | | raio 1 | 11,1 | 1,76 | 0,73 | 14,5 | 15,8 | |
| 29-07-99 | 40 | 12,1 | raio 2 | 9,8 | 2,94 | 1,10 | 24,3 | 30,0 | |
| | | | raio 1 | 10,8 | 3,19 | 1,12 | 26,4 | 29,6 | |

* - Percentagem da D_a ; ** - Percentagem da D_{rec} ; σ - desvio padrão.

A análise dos dados revela que no caso das regas com aspersores com deflectores lisos os valores do escoamento ao longo das várias regas e nas diferentes posições do terreno não apresentam diferenças significativas ($p > 0,05$). A ocorrência de maior escoamento nas 3ª e 5ª regas é devida fundamentalmente a um maior teor de água do solo nestas regas (fig. 4.21), que terá diminuído a sua capacidade de infiltração.

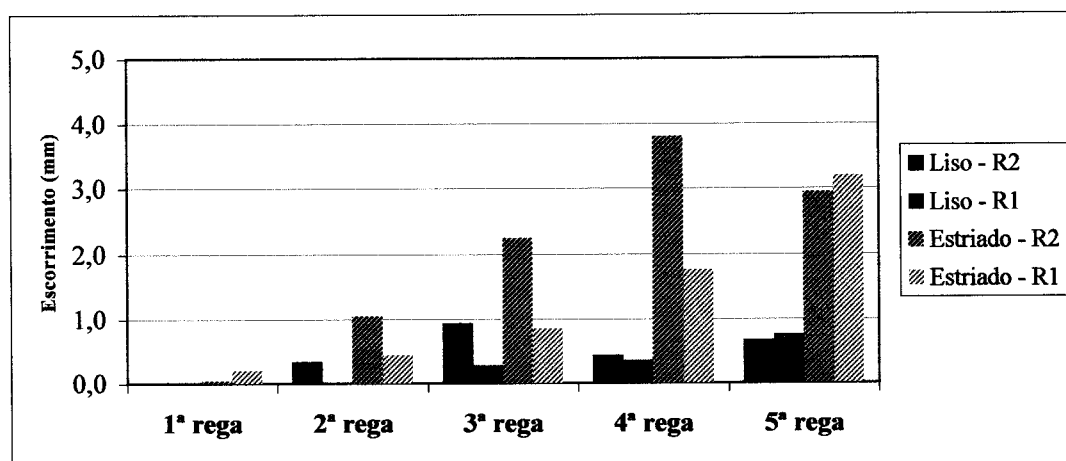


Figura 4.20 – Escorrimento médio medido nos ensaios do 2º ano.

No caso das regas com aspersores com deflectores estriados já existem diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os valores do escoamento medidos nas várias regas (Anexo I). Analisando com mais pormenor, verifica-se que, na mesma posição do terreno, o escoamento das duas primeiras regas não apresenta diferenças significativas entre si, mas que já o são relativamente às outras. A partir da 3ª rega a maioria dos valores apresentam diferenças significativas entre si.

Comparando os valores correspondentes à mesma rega obtidos com os dois tipos de deflectores, para a mesma posição do terreno, verifica-se que nas duas últimas regas as diferenças já são todas significativas ($p < 0,05$). Isto indica que, directa e/ou indirectamente, o tipo de aspersor utilizado na rega irá influenciar o escoamento.

A alternância de valores máximos de escoamento entre as duas posições (raios) do terreno indica que o declive não teve uma influencia significativa sobre este parâmetro, o que já se tinha verificado no 1º ano de ensaios.

O teor de água do solo que antecedeu as regas pode também condicionar o escoamento, diminuindo ou aumentando o efeito do aspersor. Nas figuras seguintes apresenta-se o valor deste parâmetro medido nas várias regas.

A falta de dados na primeira série de ensaios (fig. 4.21), deveu-se a uma avaria da sonda capacitiva quando da medição do teor de água antes da 1ª rega, e a um problema no tubo de acesso da sonda nº 3a, que nas primeiras regas forneceu valores pouco fiáveis, o que exigiu a instalação de um novo tubo para medir este parâmetro nas regas seguintes.

Observa-se nas figuras 4.21 e 4.22 que a variação do teor de água do solo que

antecedente as várias regas deu-se fundamentalmente na camada superficial, pelas razões já apontadas nos ensaios do 1º ano. No caso dos aspersores com deflectores lisos (fig. 4.21) foram as regas com maior teor de água do solo antecedente (3ª e 5ª) que conduziram aos maiores valores de escoamento, realçando a influência deste parâmetro sobre a redução da infiltração, apesar das diferenças não terem sido significativas.

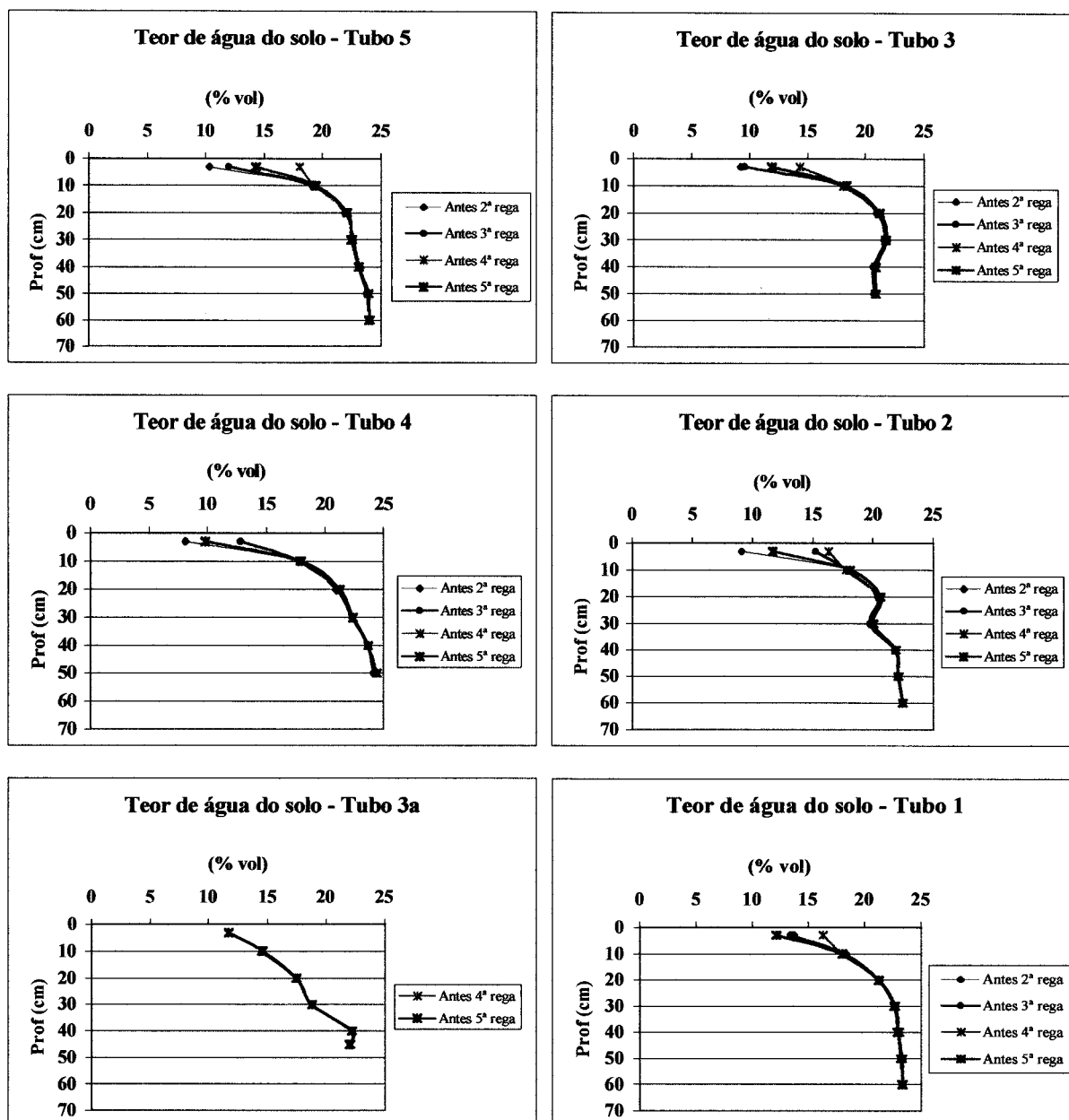


Figura 4.21 – Teores de água no solo antes dos ensaios de rega realizados em 99, com os aspersores com deflectores lisos.

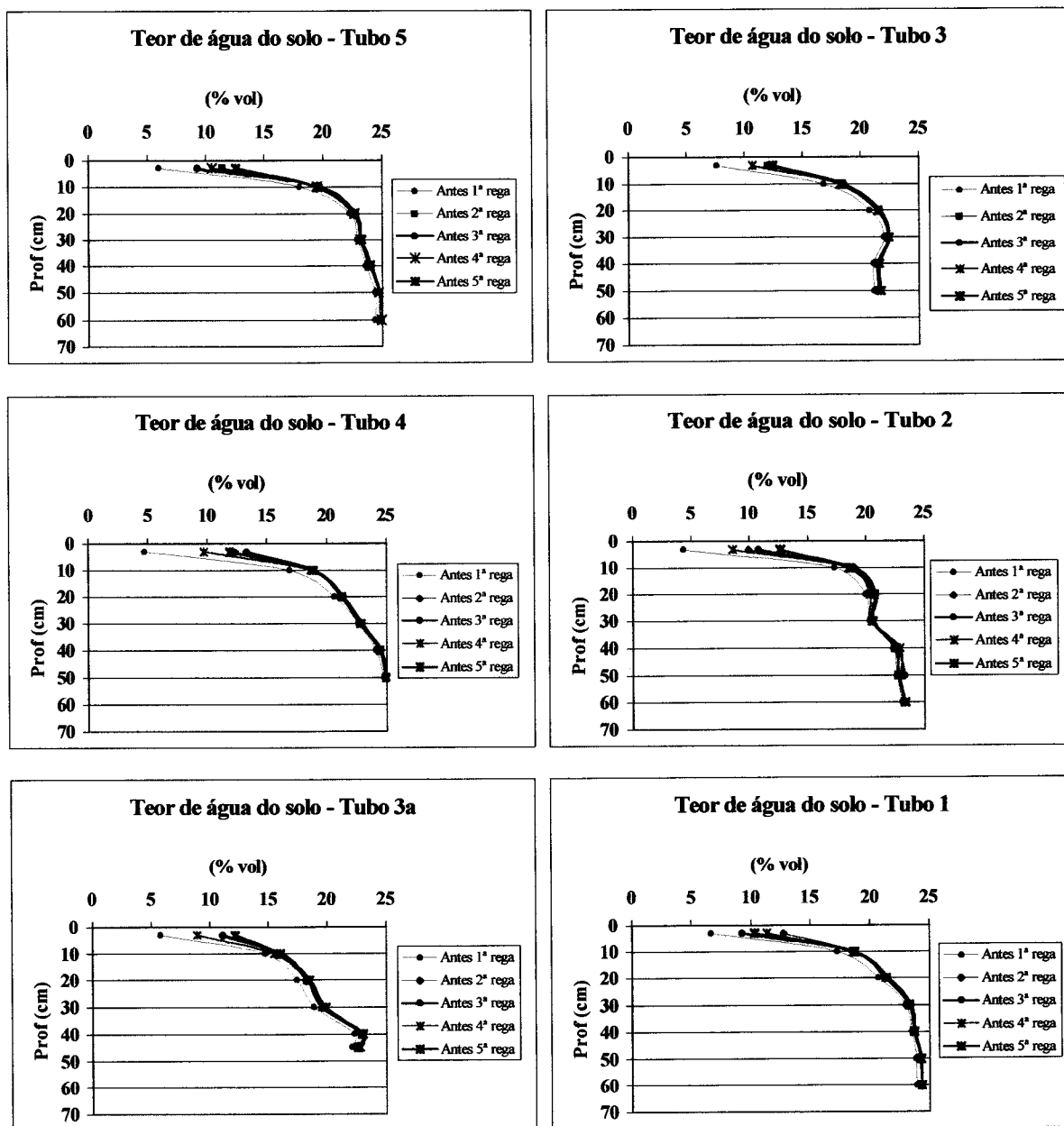


Figura 4.22 – Teores de água no solo antes dos ensaios de rega realizados em 99, com os aspersores com deflectores estriados.

No caso dos ensaios com aspersores com deflectores estriados (fig. 4.22) já se verificou um valor do teor de água na camada superficial mais baixo nas regas com o solo seco e compactado (4ª rega), do que com o solo húmido (3ª e 5ª regas). Assim sendo, pode-se afirmar com segurança que o aumento do escorrimento é influenciado não só pelo aumento do

teor de água do solo mas também por outros factores, tais como a compactação superficial, que podem conduzir a escorrimentos superiores mesmo com o solo mais seco.

Isso mesmo se verifica comparando os valores do teor de água entre os ensaios de rega realizados com os dois tipos de deflectores e que apresentam valores muito idênticos. Salientando mais uma vez a importância da humidade do solo nos primeiros 10 cm, e observando este valor antes da 4ª e 5ª rega (aquelas que produziram mais escorrimento) verifica-se que, apesar do teor de água do solo que antecedeu a 4ª rega ser maior no caso da rega com aspersores com deflectores lisos (variando entre 14,3 e 18,0 %) relativamente ao medido na rega com aspersores com deflectores estriados (entre 8,6 e 11,3 %) foi esta última que originou mais escorrimento. Antes da 5ª rega o teor de água superficial é muito idêntico nas duas posições do terreno em cada uma das séries de ensaios (entre 10,3 e 12,2 % no caso da rega com aspersores com deflectores lisos e entre 9,8 e 12,2 % no caso da rega com aspersores com deflectores estriados) e volta a existir um aumento significativo do escorrimento no segundo caso.

Este maior escorrimento nas regas em que se utilizaram aspersores com deflectores estriados é devido ao efeito que as gotas de maior dimensão emitidas por estes aspersores têm sobre a superfície do solo provocando mais compactação e a formação de uma crosta superficial, como se verá mais à frente, e que irá condicionar a infiltração da água no solo.

O tamanho das gotas influencia também a sua resistência ao efeito do vento, podendo aumentar a quantidade de água aplicada que chega ao solo. Como se referiu no ponto 4.2.1. as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, e observando o quadro 4.12 verifica-se que, com excepção da primeira rega que foi realizada com maior dotação, todas as outras apresentam valores de dotação recolhida ao nível do solo (D_{rec}) muito semelhantes.

A energia cinética total das gotas de água emitidas pelos dois tipos de aspersores (quadro 4.13) apresenta valores muito semelhantes, apesar de, na maioria das vezes serem ligeiramente superiores no caso das regas com aspersores com deflectores estriados. A razão destes valores não apresentarem diferenças maiores deve-se ao facto da velocidade do vento influenciar significativamente a sua determinação.

Quadro 4.13 – Energia de impacto das gotas de água no solo no 2º ano de ensaios

| Deflector | Data | E_{Tv} (J/Kg) | Posição | D_{rec} (mm) | E_{Tv} (kJ/m ²) |
|-----------|----------|--------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| Liso | 22-06-99 | 11,8 | raio 2 raio 1 | 12,1 15,2 | 0,143 0,179 |
| | 24-06-99 | 12,1 | raio 2 raio 1 | 11,0 7,8 | 0,133 0,094 |
| | 26-06-99 | 12,4 | raio 2 raio 1 | 12,3 8,6 | 0,153 0,107 |
| | 30-06-99 | 12,3 | raio 2 raio 1 | 10,5 10,9 | 0,129 0,134 |
| | 02-07-99 | 11,5 | raio 2 raio 1 | 9,6 7,7 | 0,110 0,089 |
| Estriado | 19-07-99 | 13,6 | raio 2 raio 1 | 17,3 15,1 | 0,235 0,205 |
| | 21-07-99 | 12,7 | raio 2 raio 1 | 9,7 11,4 | 0,123 0,145 |
| | 23-07-99 | 13,6 | raio 2 raio 1 | 11,4 10,8 | 0,155 0,147 |
| | 27-07-99 | 12,5 | raio 2 raio 1 | 9,3 11,1 | 0,116 0,139 |
| | 29-07-99 | - | raio 2 raio 1 | 9,8 10,8 | - - |

Mais significativas são as diferenças encontradas nos valores da densidade aparente do solo (fig. 4.23) que indicam a existência de alguma compactação superficial.

É nítido o aumento da densidade aparente ao longo das diferentes séries. A análise estatística dos valores que antecederam as várias regas realizadas com os dois tipos de deflectores mostra que, na mesma posição do terreno, os valores das 3 primeiras regas não apresentam diferenças significativas ($p > 0,05$) entre si, o que já acontece após a 3ª rega. Os valores determinados antes da 4ª rega são significativamente diferentes no raio 1 e antes da 5ª rega em ambos os raios. Em qualquer um destes casos os valores obtidos nos ensaios com deflectores estriados são superiores.

Este maior aumento da densidade aparente do solo que antecedeu as regas, no caso dos ensaios com os aspersores com deflectores estriados, estará directamente associado com o facto da energia de impacto total acumulada das gotas aplicadas pelo aspersor com este tipo de deflector ter apresentado valores superiores (0,629 kJ/m² no raio 1 e 0,636 kJ/m² no raio 2, até à 5ª rega) aos dos aspersores com deflectores lisos (0,514 kJ/m² no raio 1 e 0,558 kJ/m² no raio 2, também até à 5ª rega).

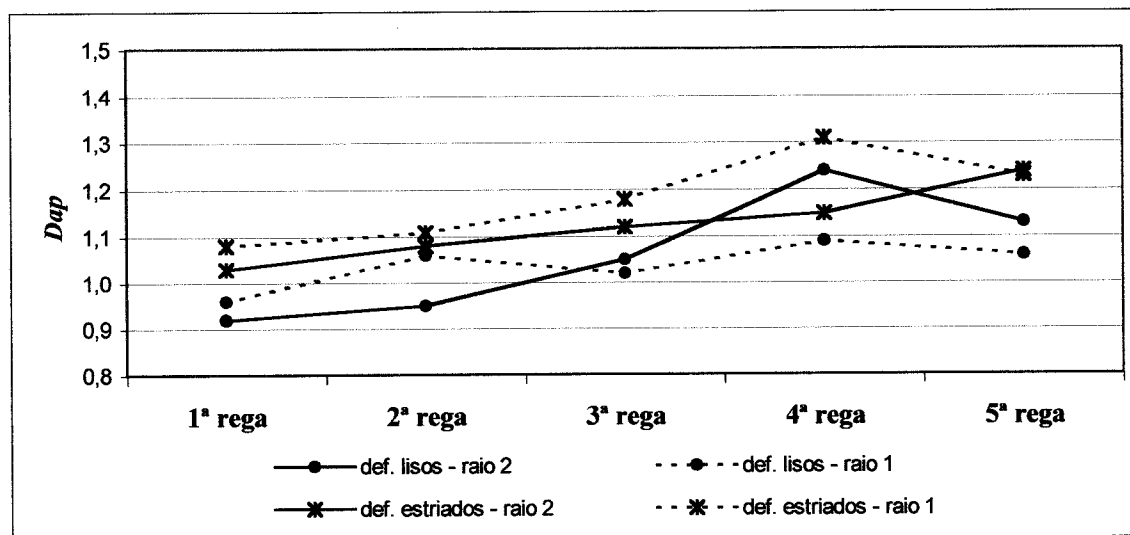


Figura 4.23 – Valores médios da densidade aparente no primeiro cm do solo, antes de cada rega realizada no 2º ano.

A observação visual realizada antes de cada rega vem de algum modo confirmar o maior efeito do impacto das gotas de água sobre o solo quando a rega se realiza com os deflectores estriados.

Isto porque durante as regas com os aspersores com deflectores lisos não se observou qualquer evidência de formação de uma crosta superficial no solo, enquanto que no caso das regas com aspersores com deflectores estriados, a partir da 3ª rega foi evidente nalgumas zonas do terreno uma camada superficial com uma estrutura diferente. Esta camada apresenta uma consistência branda, desfazendo-se com pressões ligeiras, sendo muito difícil medir a sua espessura. Antes da 4ª e 5ª regas, foi possível nalgumas zonas separá-la do resto do solo verificando-se que media entre 0,5 e 1 cm. Apresentava nesta altura uma consistência ligeiramente dura, quebrando-se com alguma facilidade.

Além da energia de impacto também o maior destacamento de partículas que se observa com a utilização dos aspersores com deflectores estriados, já referido no ponto 4.1.2. (fig. 4.13), contribui para a formação da crosta superficial.

A ocorrência de um maior escorrimento quando a rega é realizada com estes aspersores estará assim relacionada, com uma redução da infiltrabilidade do solo devido à compactação e formação de crosta superficial.

Um dos parâmetros medidos que pode dar uma indicação sobre esta redução da infiltrabilidade é a condutividade hidráulica (fig. 4.24).

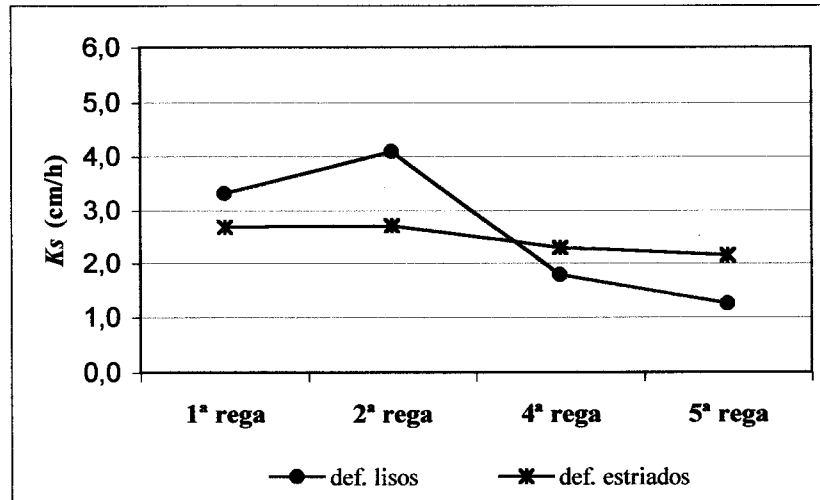


Figura 4.24 – Condutividade hidráulica saturada superficial antes dos ensaios de rega de 99.

Dada a morosidade dos ensaios e ao pouco tempo disponível entre regas, este parâmetro não foi medido entre a 2ª e a 3ª rega, razão de não constar na figura 4.24.

Tal como nos ensaios de infiltração voltou a verificar-se uma certa variabilidade nos valores determinados. No entanto, exceptuando a 2ª rega, os valores tendem a descer com as sucessivas regas, indicação de alguma redução da porosidade na camada superficial do solo devido ao efeito da precipitação aplicada.

A análise estatística dos dados (Anexo I) revela que a única diferença significativa ($p < 0,05$) é entre o valor médio antes da 2ª e 5ª rega, no caso dos aspersores com deflectores lisos. Pode-se portanto considerar que apesar de existir uma tendência para um decréscimo da condutividade hidráulica saturada ao longo das regas ela não é significativa, o mesmo acontecendo entre os valores observados nas duas séries de regas com diferentes deflectores. Apesar de tudo este decréscimo da condutividade hidráulica média irá contribuir, junto com os outros factores, para uma menor infiltração e conseqüentemente a existência de maior escorrimento.

Na figura 4.25 pode-se observar com mais pormenor a evolução do teor de água na camada superficial nas regas com deflectores estriados. Os dados apresentados resultam da medição do teor de água utilizando 5 sondas ligadas a um *datalogger* com registos em intervalos de 1 minuto ao longo de todo o ensaio.

Como a informação disponível era muita optou-se por apresentar os valores do teor de água do solo considerados mais importantes. Assim, a figura mostra os valores medidos com

intervalos de 1 minuto durante a 1ª hora após o início da rega, com intervalos de 10 minutos durante a 2ª hora e depois com intervalos de 1 hora até à rega seguinte. Para intervalos de rega superiores a 2 dias, a partir do 2º dia apenas se apresenta um valor diário.

A falta de dados referentes à primeira rega deveu-se a uma indisponibilidade do equipamento que só permitiu a sua utilização após esta rega.

Observa-se na figura que, apesar de todas as regas apresentadas terem sido realizadas com a mesma dotação, a rapidez e a quantidade de água infiltrada na camada superficial foi diferente ao longo do ensaio. Durante a 2ª rega a infiltração é rápida e o teor de água nos primeiros centímetros de solo aumenta rapidamente. Com o aumento do teor de água antecedente, da 2ª para a 3ª rega verifica-se que a infiltração diminui, o solo nos primeiros centímetros não atingiu um teor de água tão elevado como na 2ª rega, e a água em excesso escorreu sobre o terreno.

Caso o teor de água do solo fosse o único factor a influenciar a infiltração seria de esperar que, descendo o seu valor da 3ª para a 4ª rega houvesse um aumento da infiltração nos primeiros centímetros de solo. Mas isso não se verifica. Pelo contrário, comparativamente à rega anterior observa-se que, durante e após a 4ª rega, o teor de água apresenta valores mais baixos nos primeiros centímetros de solo, indicação de menor infiltração e mais escorrimento.

Neste caso, a diminuição da infiltração só pode ser explicada pelo aumento da densidade aparente (fig. 4.23) e a formação de crosta, que resultaram numa diminuição da condutividade hidráulica superficial (fig. 4.24) e conseqüentemente da infiltração. Foi nesta rega que se observaram os maiores valores de escorrimento.

Pode-se também observar na figura 4.25 que a partir da 3ª rega o teor de água do solo para profundidades superiores a 12,5 cm é praticamente constante ao longo de todo o período, tal como se tinha verificado nas medições feitas com a sonda capacitiva, atingindo valores muito próximos da capacidade de campo do horizonte A do solo.

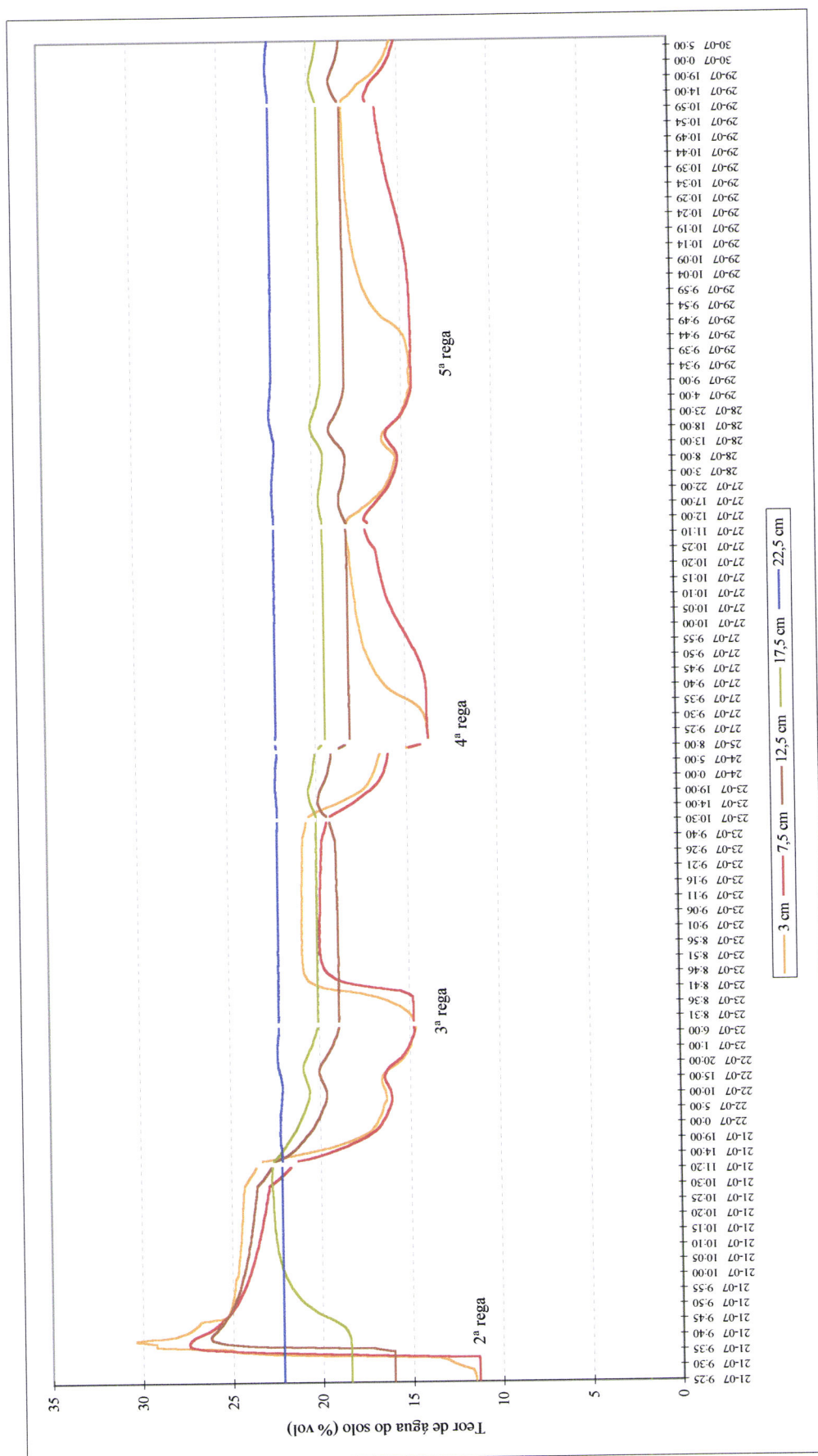


Figura 4.25 - Evolução do teor de água na camada superficial do solo ao longo das regas com os aspersores com deflectores estriados.

Mas, o maior escoamento medido nalgumas regas não depende apenas do facto da capacidade de infiltração da água no solo ter diminuído devido à compactação e formação de crosta superficial. A energia cinética das gotas de água altera também a rugosidade da superfície do solo, reduzindo a sua capacidade de armazenamento.

No quadro 4.14 são apresentados os valores referentes à rugosidade e ao armazenamento superficial determinados nestes ensaios.

Quadro 4.14 – Valores médios da rugosidade aleatória (RR), armazenamento superficial (AD_m) e escoamento verificados no 2º ano de ensaios

| Deflector | Rega | RR (cm) | Posição | AD_m (mm) | Esc. (mm) |
|-----------|------|--------------|---------|----------------|--------------|
| Liso | 1ª | 0,071 | raio 2 | 0,15 | 0,00 |
| | | | raio 1 | 0,12 | 0,00 |
| | 2ª | 0,070 | raio 2 | 0,14 | 0,34 |
| | | | raio 1 | 0,12 | 0,00 |
| | 3ª | 0,069 | raio 2 | 0,14 | 0,94 |
| | | | raio 1 | 0,12 | 0,28 |
| | 4ª | 0,067 | raio 2 | 0,14 | 0,43 |
| | | | raio 1 | 0,12 | 0,36 |
| | 5ª | 0,068 | raio 2 | 0,14 | 0,67 |
| | | | raio 1 | 0,12 | 0,76 |
| Estriado | 1ª | 0,048 | raio 2 | 0,10 | 0,04 |
| | | | raio 1 | 0,08 | 0,20 |
| | 2ª | 0,047 | raio 2 | 0,10 | 1,05 |
| | | | raio 1 | 0,08 | 0,43 |
| | 3ª | 0,038 | raio 2 | 0,08 | 2,24 |
| | | | raio 1 | 0,07 | 0,85 |
| | 4ª | 0,038 | raio 2 | 0,08 | 3,80 |
| | | | raio 1 | 0,07 | 1,76 |
| | 5ª | 0,038 | raio 2 | 0,08 | 2,94 |
| | | | raio 1 | 0,07 | 3,19 |

A análise estatística dos valores da rugosidade aleatória calculados a partir das medições realizadas antes da 1ª rega de cada série de ensaios (Anexo H), mostra que a rugosidade aleatória inicial das duas séries não apresenta diferenças significativas ($p > 0,05$), o que permite eliminar o efeito da preparação do terreno como causa das diferenças nos valores do escoamento medido. Tal como no primeiro ano de ensaios, também no segundo a superfície do solo ficou bastante regular e não se verificaram alterações significativas, quer na rugosidade, quer na capacidade de armazenamento superficial do solo, ao longo das diferentes regas.

De facto, ao analisar os valores da rugosidade aleatória que antecederam todas as séries de ensaios realizadas nos dois anos, verifica-se que não existem diferenças significativas ($p > 0,05$), pelo que as diferenças no escoamento, quer entre ensaios com diferentes aspersores, quer de um ano para o outro, serão fundamentalmente devidas à acção dos outros factores intervenientes no processo.

Como curiosidade, pode-se referir que os valores do armazenamento máximo das depressões (AD_m) calculado são bastante inferiores aos sugeridos por Shockley (1968). Relativamente aos valores calculados utilizando a metodologia apresentada por Keller & Bliesner (1990), se se comparar apenas com os valores do armazenamento das depressões, calculado pela expressão (2.66), para o declive do raio 2, 5,2 %, esta expressão apresenta um armazenamento superior (0,26 mm), mas para os declives dos outros raios apresenta valores inferiores aos aqui determinados.

Não existindo diferenças significativas na capacidade de armazenamento superficial do solo então o aumento do escoamento será fundamentalmente influenciado pelas alterações na superfície do solo (compactação superficial, formação de crosta) devidas ao impacto das gotas de água, e que são mais importantes no caso da rega com aspersores com deflectores estriados.

Este segundo ano de ensaios permitiu não só confirmar a tendência observada no primeiro ano, mas também mostrar que as diferenças na infiltração e no escoamento devidas à utilização dos aspersores com os dois tipos de deflectores aumentam com a intensidade pluviométrica, ao ponto de se tornarem significativas.

4.2.3.2.1. Sedimentos arrastados

A existência de escoamento origina não só a perda de água como também a perda de solo que é arrastado pela acção da água em excesso. Não foi objectivo do trabalho estudar a perda de solo, mas tentou-se quantificar os sedimentos que foram arrastados junto com a água do escoamento.

A quantidade de sedimentos arrastados (quadro 4.15) depende também do maior efeito que as gotas de água tenham tido sobre a quebra dos agregados e o destacamento de partículas do solo, pelo que pode dar também alguma informação sobre esse mesmo efeito.

Observa-se no quadro 4.15 e na figura 4.26 que as regas com aspersores com deflectores estriados apresentam sempre mais sedimentos arrastados do que as regas com deflectores lisos. Isto evidencia não só o maior escoamento verificado nas regas com estes aspersores, mas também o maior efeito que as suas gotas, de maior tamanho, têm sobre o destacamento de partículas do solo, como já foi referido.

Quadro 4.15 – Valor médio dos sedimentos arrastados

| Deflector | Data | Posição | D_{rec} (mm) | Escoarim. (mm) | Sedimentos (g) | Sedimentos (ton/ha) |
|-----------|----------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| Liso | 22-06-99 | raio 2 | 12,1 | 0,00 | 0,00 | 0,000 |
| | | raio 1 | 15,2 | 0,00 | 0,00 | 0,000 |
| | 24-06-99 | raio 2 | 11,0 | 0,34 | 0,00 | 0,000 |
| | | raio 1 | 7,8 | 0,00 | 0,00 | 0,000 |
| | 26-06-99 | raio 2 | 12,3 | 0,94 | 1,70 | 0,088 |
| | | raio 1 | 8,6 | 0,28 | 0,26 | 0,013 |
| | 30-06-99 | raio 2 | 10,5 | 0,43 | 0,80 | 0,042 |
| | | raio 1 | 10,9 | 0,36 | 0,74 | 0,038 |
| | 02-07-99 | raio 2 | 9,6 | 0,67 | 1,89 | 0,098 |
| | | raio 1 | 7,7 | 0,76 | 4,10 | 0,213 |
| Estriado | 19-07-99 | raio 2 | 17,3 | 0,04 | 0,14 | 0,007 |
| | | raio 1 | 15,1 | 0,20 | 0,33 | 0,017 |
| | 21-07-99 | raio 2 | 9,7 | 1,05 | 2,86 | 0,149 |
| | | raio 1 | 11,4 | 0,43 | 1,71 | 0,089 |
| | 23-07-99 | raio 2 | 11,4 | 2,24 | 7,02 | 0,368 |
| | | raio 1 | 10,8 | 0,85 | 2,28 | 0,119 |
| | 27-07-99 | raio 2 | 9,3 | 3,80 | 19,86 | 1,032 |
| | | raio 1 | 11,1 | 1,76 | 11,00 | 0,571 |
| | 29-07-99 | raio 2 | 9,8 | 2,94 | 5,90 | 0,307 |
| | | raio 1 | 10,8 | 3,19 | 44,04 | 2,288 |

Na figura 4.26 apresenta-se a relação entre o escoamento medido e a quantidade de sedimentos arrastados. Em cada gráfico estão os valores medidos em todos os anéis, durante os ensaios (Anexo G). Da observação desta figura pode-se concluir que para a mesma quantidade de escoamento, a rega com aspersores com deflectores estriados conduz a um arrastamento de sedimentos cuja tendência é para apresentar valores bastante superiores, apesar da quantidade de sedimentos arrastados ser muito mais variável no caso das regas com aspersores com deflectores estriados, verificando-se uma baixa correlação entre escoamento e sedimentos arrastados.

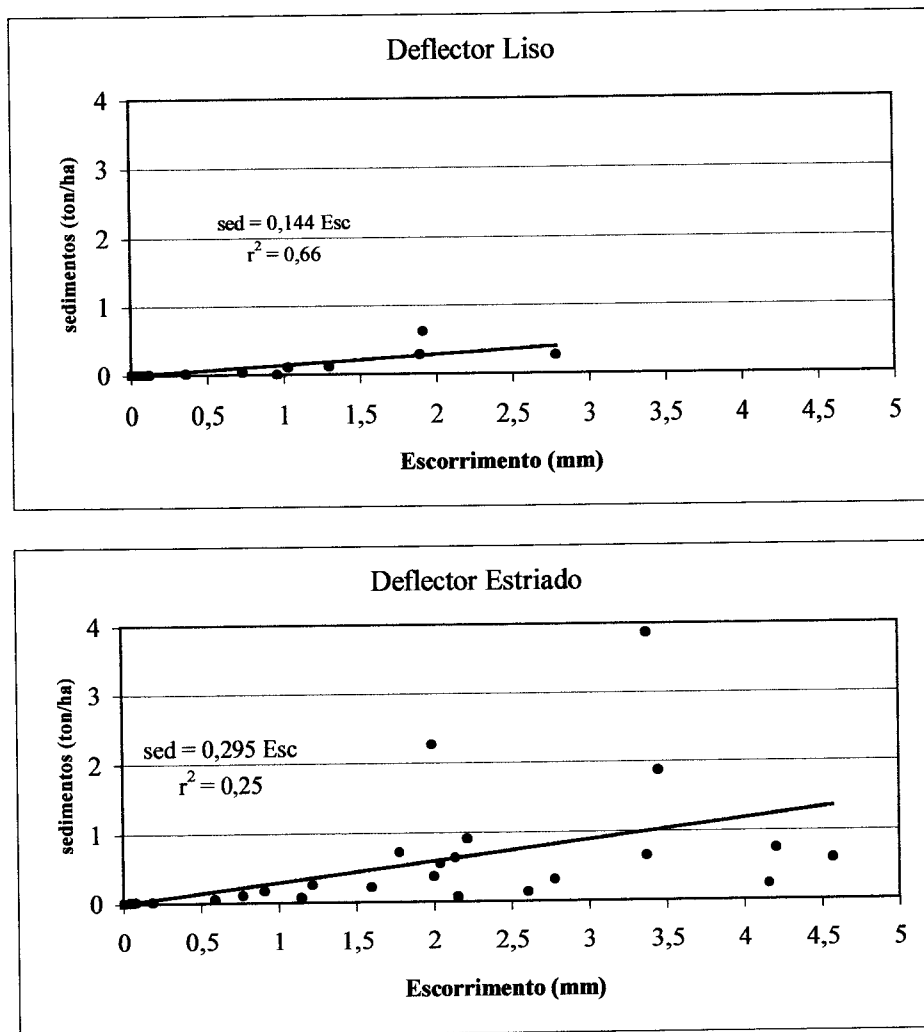


Figura 4.26 – Comparação entre o escoamento e a quantidade de sedimentos arrastados nas regas com os dois tipos de deflectores.

Os sedimentos obtidos na série de ensaios com os deflectores estriados foram ainda analisados granulometricamente, apresentando-se os resultados no quadro 4.16. Apenas se analisaram os sedimentos desta série de ensaios, pois foi a única que apresentou quantidade suficiente para tal.

Pela observação do quadro, é fácil de verificar que nas primeiras regas os sedimentos são na sua maioria partículas de argila, mas com o decorrer das regas e com o aumento do escoamento existe um aumento de partículas de limo e principalmente de areia. A maior percentagem de areia arrastada da primeira para a última rega é devida ao aumento da energia do escoamento, que consegue arrastar partículas de maior dimensão.

Quadro 4.16 – Valores da análise granulométrica dos sedimentos arrastados durante os ensaios de rega com deflectores estriados

| Rega | Posição | Esc. (mm) | Sedimentos (ton/ha) | Areia Grossa (%) | Areia Fina (%) | Areia (%) | Limo (%) | Argila (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---------|--------------|------------------------|------------------------|----------------------|--------------|-------------|---------------|----|--------|------|-------|------|------|------|------|------|--------|------|-------|----|--------|------|-------|------|------|------|------|------|--------|------|-------|----|--------|------|-------|------|------|------|------|------|--------|------|-------|----|--------|------|-------|------|------|
| 1ª | raio 2 | 0,04 | 0,007 | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | raio 1 | 0,20 | 0,017 | | | | | | 2ª | raio 2 | 1,05 | 0,149 | 0,9 | 3,2 | 4,1 | 11,4 | 84,5 | raio 1 | 0,43 | 0,089 | 3ª | raio 2 | 2,24 | 0,368 | 11,3 | 10,1 | 21,4 | 21,1 | 57,5 | raio 1 | 0,85 | 0,119 | 4ª | raio 2 | 3,80 | 1,032 | 12,2 | 15,3 | 27,5 | 21,7 | 50,9 | raio 1 | 1,76 | 0,571 | 5ª | raio 2 | 2,94 | 0,307 | 19,0 | 17,4 |
| 2ª | raio 2 | 1,05 | 0,149 | 0,9 | 3,2 | 4,1 | 11,4 | 84,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | raio 1 | 0,43 | 0,089 | | | | | | 3ª | raio 2 | 2,24 | 0,368 | 11,3 | 10,1 | 21,4 | 21,1 | 57,5 | raio 1 | 0,85 | 0,119 | 4ª | raio 2 | 3,80 | 1,032 | 12,2 | 15,3 | 27,5 | 21,7 | 50,9 | raio 1 | 1,76 | 0,571 | 5ª | raio 2 | 2,94 | 0,307 | 19,0 | 17,4 | 36,4 | 16,1 | 47,5 | raio 1 | 3,19 | 2,288 | | | | | | |
| 3ª | raio 2 | 2,24 | 0,368 | 11,3 | 10,1 | 21,4 | 21,1 | 57,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | raio 1 | 0,85 | 0,119 | | | | | | 4ª | raio 2 | 3,80 | 1,032 | 12,2 | 15,3 | 27,5 | 21,7 | 50,9 | raio 1 | 1,76 | 0,571 | 5ª | raio 2 | 2,94 | 0,307 | 19,0 | 17,4 | 36,4 | 16,1 | 47,5 | raio 1 | 3,19 | 2,288 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4ª | raio 2 | 3,80 | 1,032 | 12,2 | 15,3 | 27,5 | 21,7 | 50,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | raio 1 | 1,76 | 0,571 | | | | | | 5ª | raio 2 | 2,94 | 0,307 | 19,0 | 17,4 | 36,4 | 16,1 | 47,5 | raio 1 | 3,19 | 2,288 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5ª | raio 2 | 2,94 | 0,307 | 19,0 | 17,4 | 36,4 | 16,1 | 47,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | raio 1 | 3,19 | 2,288 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4.3. Resultados dos ensaios complementares

A determinação do escoamento potencial, com base nos diagramas pluviométricos e nas equações de infiltrabilidade do solo, é outro método que pode ajudar a verificar o efeito, neste caso potencial, que a rega com diferentes aspersores pode ter sobre a infiltração e o escoamento.

Ao mesmo tempo pretendeu-se verificar se esses valores calculados se aproximavam ou não dos medidos durante as regas, em cujo caso indicariam a possibilidade da utilização desta metodologia para avaliar o funcionamento de uma rampa rotativa já instalada.

4.3.1. Diagramas pluviométricos

A forma do diagrama pluviométrico irá depender fundamentalmente do tempo de aplicação da água sobre um ponto do terreno e do efeito que o vento possa ter na dispersão das gotas de água aplicadas. As figuras 4.27 a 4.30 mostram alguns diagramas pluviométricos obtidos, nos dois anos de ensaios, utilizando a metodologia referida no ponto 3.5.1.

Todos os ensaios foram iniciados com velocidade do vento nula. Porém, na maioria deles verificou-se durante o ensaio o aparecimento de ligeiras brisas, nalguns casos mesmo rajadas de vento, que alteraram a condição inicial durante parte do ensaio.

Da observação das figuras seguintes podem-se retirar diversas conclusões. Devido à proximidade das duas posições estudadas, verifica-se, em qualquer dos anos, que a intensidade pluviométrica máxima, dos ensaios com cada tipo de deflector, apresenta na maioria dos casos valores praticamente iguais.

Como os diagramas pluviométricos foram todos determinados em ensaios individuais, as diferenças pontuais observadas, em cada ano, são devidas ao diferente efeito do vento em cada ensaio. Este efeito diferenciado do vento explica que nalguns casos se tenha verificado uma intensidade pluviométrica máxima maior no segundo lanço da rampa rotativa, relativamente ao lanço suspenso.

Tal como sugerido por outros autores, a maioria dos diagramas pluviométricos apresenta uma forma em M, característica dos sistemas equipados com aspersores estáticos de baixa pressão (Thooyamani *et al.*, 1987; Serafim, 1994), sendo essa forma mais evidente nas velocidades mais rápidas. Nas velocidades mais lentas (20 e 30) o vento tem um maior efeito sobre o diagrama pluviométrico, uma vez que cada ponto recebe água durante mais tempo e por isso a quantidade de água e o modo como ela chega ao solo é mais afectado pelo vento.

Em ensaios onde a acção do vento foi mais significativa observam-se alterações na forma dos diagramas pluviométricos, por vezes completamente distorcidos, como os apresentados para a velocidade 20 na figura 4.28.

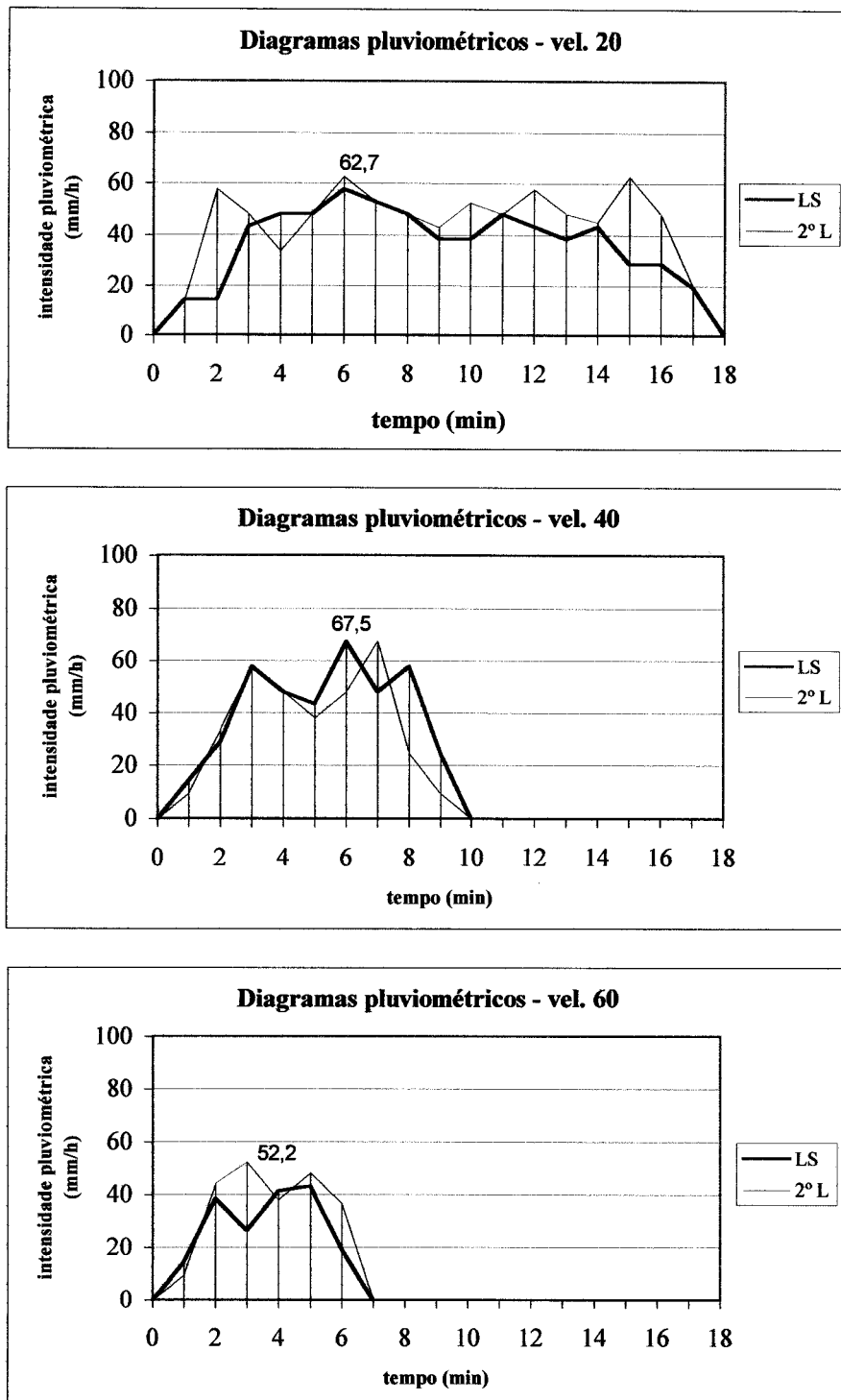


Figura 4.27 – Diagramas pluviométricos, no 1º ano de ensaios, em duas posições da rampa rotativa equipada com aspersores com defletores lisos (LS – lanço suspenso, 2° L – 2º lanço), a diferentes velocidades.

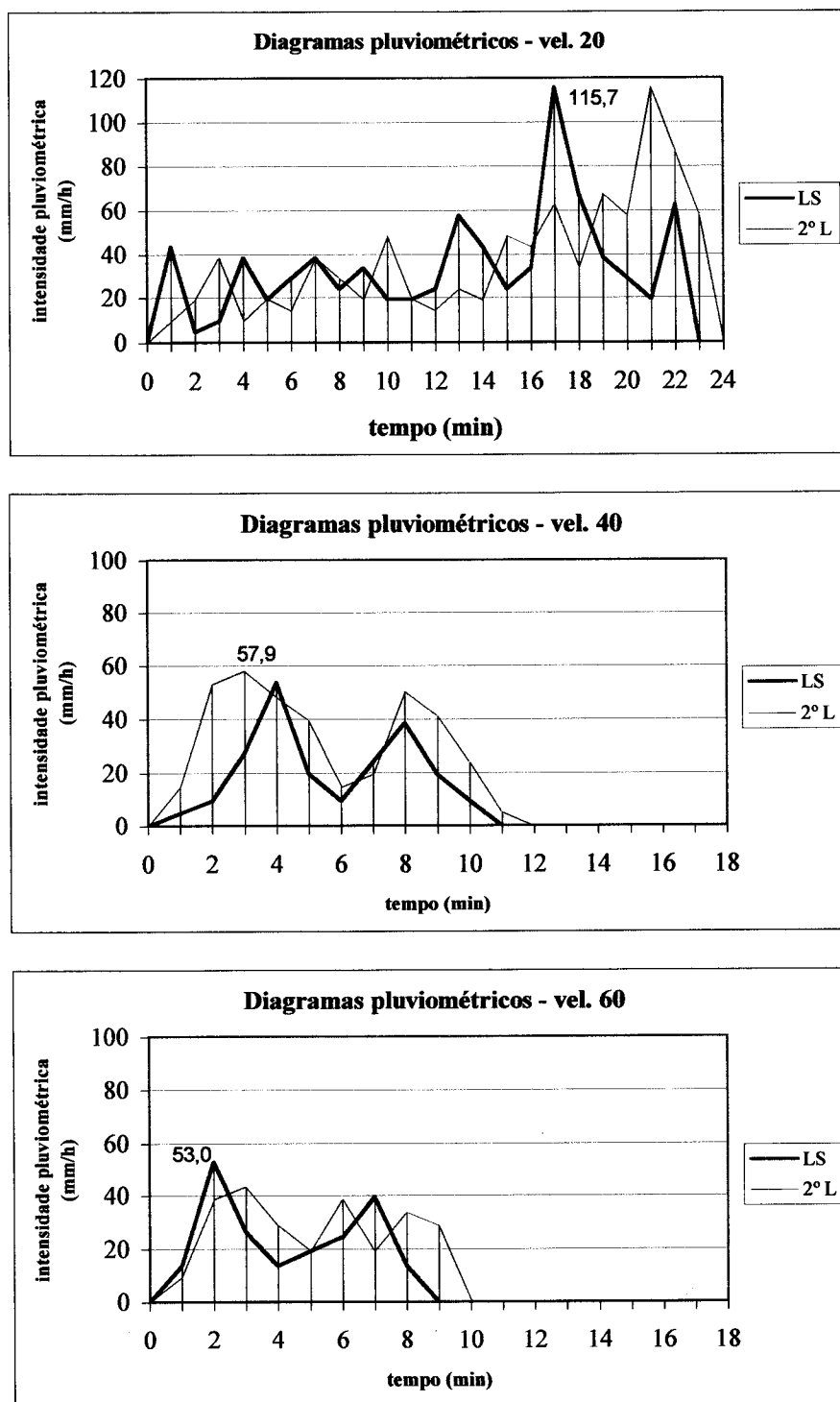


Figura 4.28 – Diagramas pluviométricos, no 1º ano de ensaios, em duas posições da rampa rotativa equipada com aspersores com deflectores estriados (LS – lanço suspenso, 2º L – 2º lanço), a diferentes velocidades.

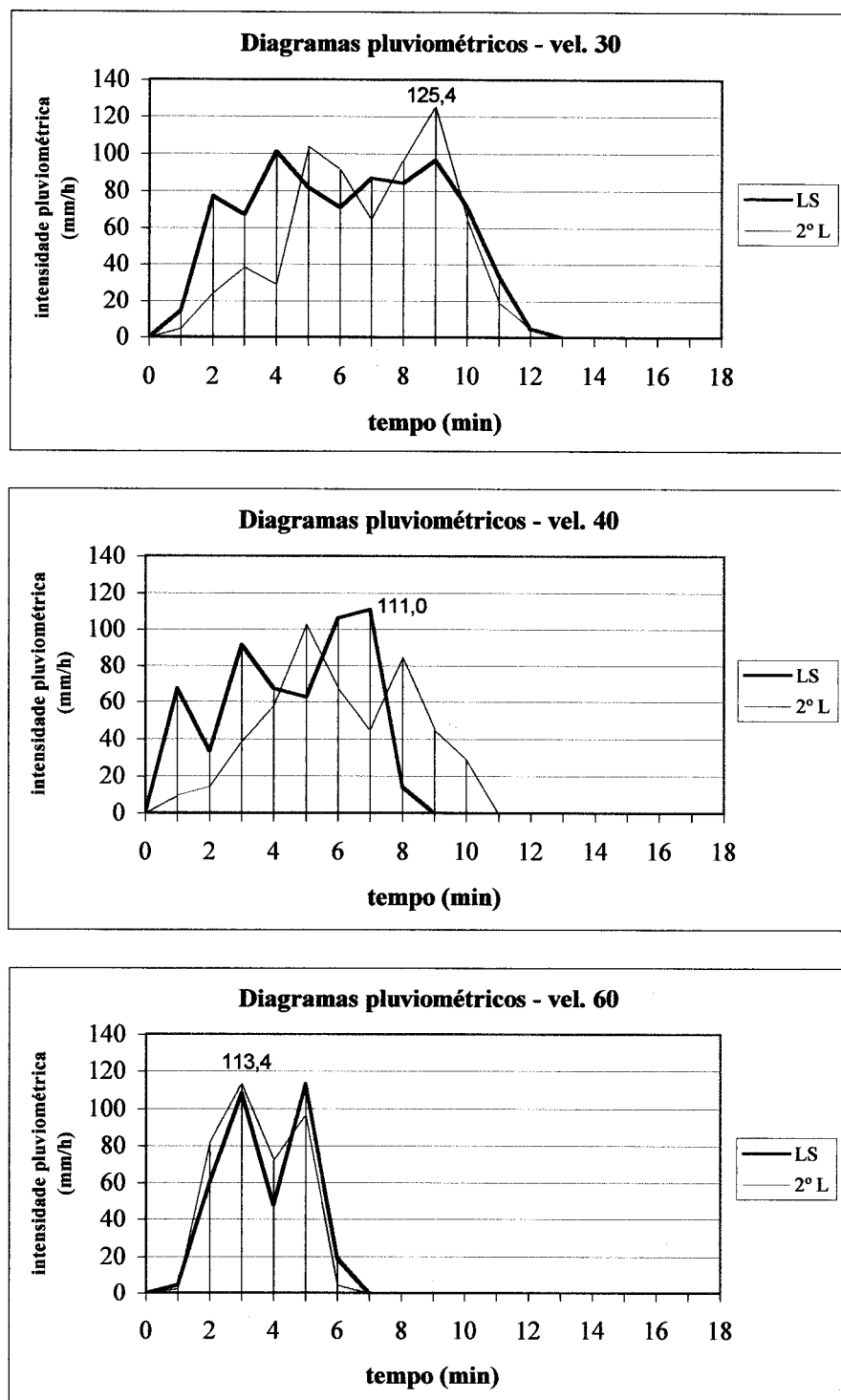


Figura 4.29 – Diagramas pluviométricos, no 2º ano de ensaios, em duas posições da rampa rotativa equipada com aspersores com deflectores lisos (LS – lança suspenso, 2º L – 2º lança), a diferentes velocidades.

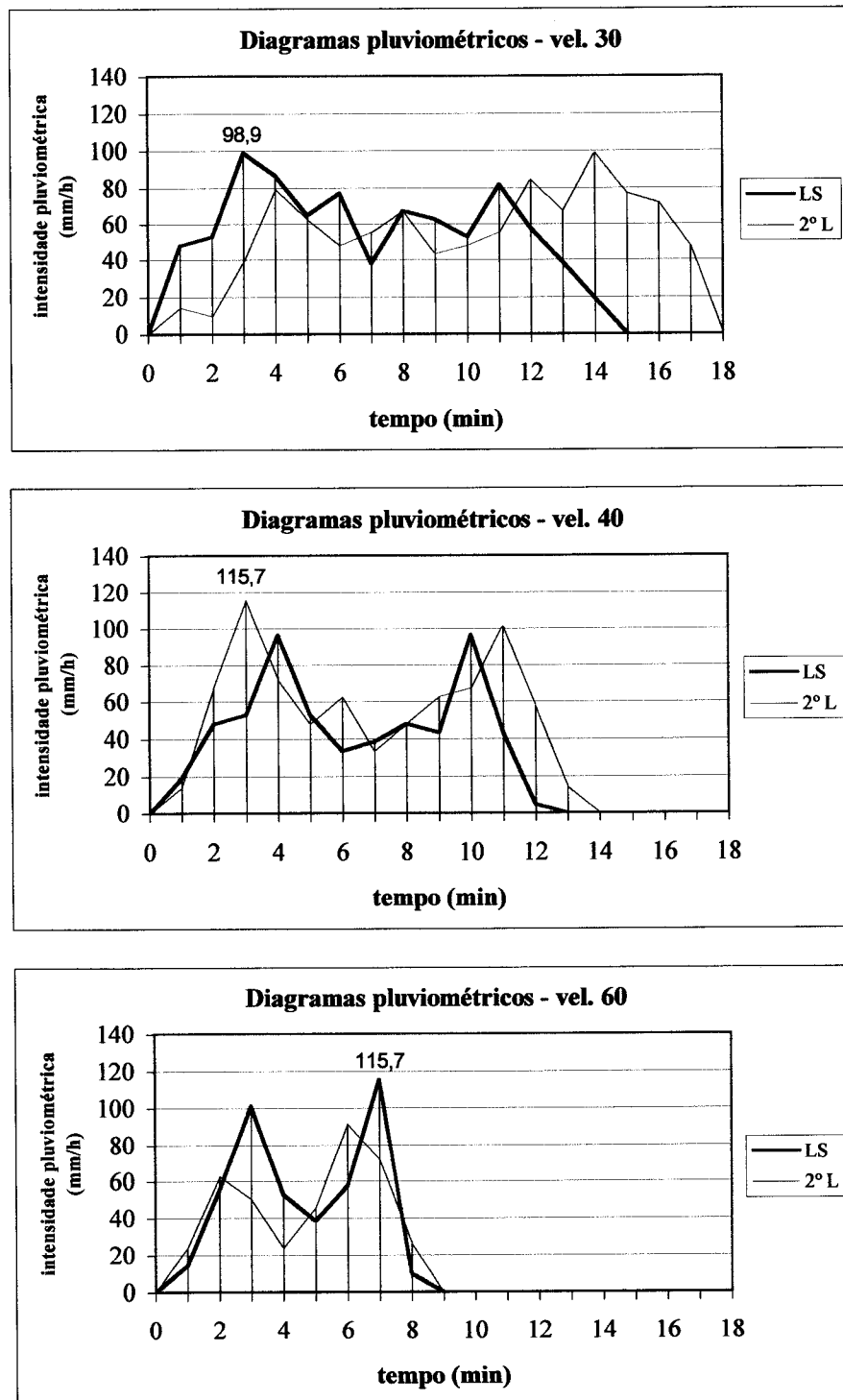


Figura 4.30 – Diagramas pluviométricos, no 2º ano de ensaios, em duas posições da rampa rotativa estando a rampa equipada com aspersores com deflectores estriados (LS – lanço suspenso, 2º L – 2º lanço), a diferentes velocidades.

No quadro 4.17 podem observar-se os valores máximos de intensidade pluviométrica obtidos nestes ensaios, apresentando-se a negrito os valores relativos aos ensaios que foram muito influenciados pelo vento, e que por esse motivo não deverão ser considerados fiáveis.

Quadro 4.17 – Valores máximos da intensidade pluviométrica (mm/h) obtida nos diferentes ensaios

| Ano do ensaio | Velocidade seleccionada | Tipo de deflector | |
|---------------|-------------------------|-------------------|--------------|
| | | Liso | Estriado |
| 1º | 20 | 62,7 | 115,7 |
| | 40 | 67,5 | 57,9 |
| | 60 | 52,2 | 53,0 |
| 2º | 30 | 125,4 | 98,9 |
| | 40 | 111,0 | 115,7 |
| | 60 | 113,4 | 115,7 |

As diferenças de intensidade pluviométrica máxima observadas, no mesmo ano e para o mesmo aspersor nas diferentes velocidades da máquina, são devidas apenas ao efeito do vento durante os respectivos ensaios.

Não considerando os valores já indicados como pouco fiáveis, no primeiro ano os valores máximos de intensidade pluviométrica variaram entre os 62,7 e os 67,5 mm/h nos ensaios com os aspersores com deflectores lisos, e entre os 53,0 e 57,9 mm/h nos ensaios com aspersores com deflectores estriados. No segundo ano variaram entre os 111,0 e os 125,4 mm/h e entre os 98,9 e os 115,7 mm/h respectivamente para os ensaios com aspersores com deflectores lisos e estriados.

Verifica-se que os aspersores com deflectores estriados apresentam sempre intensidades máximas de aplicação ligeiramente inferiores às dos aspersores com deflectores lisos, consequência da aplicação da água com gotas de maior dimensão e que por isso se distanciam mais do aspersor, aplicando a mesma quantidade de água numa área maior.

4.3.2. Determinação do escoamento potencial

A determinação do escoamento potencial foi feita através da comparação entre os diagramas pluviométricos e as curvas da infiltrabilidade. Para cada velocidade da rampa rotativa utilizou-se o respectivo diagrama pluviométrico e as curvas da infiltrabilidade obtidas nas diferentes situações de teor de água e compactação superficial do solo. O escoamento potencial (quadro 4.18) foi determinado utilizando a metodologia referida no ponto 3.5.2.

Quadro 4.18 – Valores do escoamento potencial (mm)

| Ano | Tipo de deflector | Condição do solo | Velocidade | | | | | | | | |
|-----|-------------------|------------------|------------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|
| | | | 60 | | | 40 | | | 20 | | |
| | | | 2° L | LS | média | 2° L | LS | média | 2° L | LS | média |
| 1° | Liso | Seco | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,18 | 0,00 | 0,09 |
| | | Húm. | 0,29 | 0,08 | 0,19 | 1,07 | 1,56 | 1,32 | 4,14 | 2,37 | 3,26 |
| | | Seco+comp | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,28 | 0,38 | 0,33 | 1,83 | 0,45 | 1,14 |
| | Estriado | Seco | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4,73 | 2,96 | 3,85 |
| | | Húm. | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,57 | 0,21 | 0,39 | 7,69 | 5,58 | 6,64 |
| | | Seco+comp | 0,17 | 0,13 | 0,15 | 0,61 | 0,27 | 0,44 | 7,72 | 5,62 | 6,67 |
| | | | 60 | | | 40 | | | 30 | | |
| | | | 2° L | LS | média | 2° L | LS | média | 2° L | LS | média |
| 2° | Liso | Seco | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | | Húm. | 0,33 | 0,57 | 0,45 | 0,85 | 1,40 | 1,13 | 2,91 | 2,16 | 2,54 |
| | | Seco+comp | 0,04 | 0,32 | 0,18 | 0,47 | 1,05 | 0,76 | 2,11 | 1,45 | 1,78 |
| | | Húm+comp | 0,17 | 0,45 | 0,31 | 0,67 | 1,23 | 0,95 | 2,51 | 1,70 | 2,11 |
| | Estriado | Seco | 0,00 | 0,30 | 0,15 | 0,44 | 0,29 | 0,37 | 1,23 | 0,12 | 0,68 |
| | | Húm. | 0,44 | 0,86 | 0,65 | 1,84 | 0,85 | 1,35 | 4,56 | 1,55 | 3,06 |
| | | Seco+comp | 0,62 | 0,95 | 0,79 | 2,15 | 1,00 | 1,58 | 5,19 | 2,10 | 3,65 |
| | | Húm+comp | 1,26 | 1,65 | 1,46 | 3,89 | 2,22 | 3,06 | 7,33 | 4,26 | 5,80 |

Os dados referentes ao ensaio realizado no 1º ano na velocidade mais baixa com aspersores com deflectores estriados, apresentam, como seria de esperar, valores muito elevados de escoamento potencial devido ao efeito do vento que influenciou muito a determinação do diagrama pluviométrico neste ensaio (fig. 4.28).

Observa-se também um aumento do escoamento potencial à medida que diminui a velocidade da máquina, ou seja com o aumento da dotação aplicada. Este aumento é quase sempre superior nas regas com deflectores estriados. Para a mesma velocidade da rampa rotativa, os valores do escoamento vão também aumentando com o teor de água do solo e/ou a compactação superficial.

Relativamente ao 2º ano de ensaios, pode-se verificar que, tal como já tinha acontecido nos ensaios de rega, com os dados referentes aos aspersores com deflectores lisos, o escoamento potencial calculado apresenta maiores valores nas situações respeitantes a um maior teor de água do solo. Mas, no caso dos aspersores com deflectores estriados, os valores do escoamento vão sempre aumentando, mesmo com a diminuição do teor de água do solo.

Fica assim comprovado, mais uma vez, que no caso da utilização de aspersores com deflectores estriados a compactação superficial do solo influencia significativamente a infiltração, o que já não acontece com a utilização dos aspersores com deflectores lisos.

4.3.3. Comparação entre escoamentos potenciais e reais

Para esta comparação foram utilizados os valores médios do escoamento das duas posições de terreno onde este parâmetro foi medido e os valores do quadro 4.18 determinados para a mesma velocidade da rampa rotativa e na condição do solo (teor de água e compactação) mais próxima daquela em que se realizou a rega. Analisou-se também a influência que o armazenamento superficial do solo (quadros 4.11 e 4.14) poderia ter nesta comparação (quadros 4.19 e 4.20).

No caso dos aspersores com deflectores lisos, verifica-se que os valores do escoamento potencial são sempre superiores aos do escoamento medido, mas com diferenças que, exceptuando um ensaio, não ultrapassam os 0,5 mm, não se podendo por isso considerar importantes.

Quadro 4.19 – Escorrimento potencial vs. Escorrimento real, no 1º ano de ensaios

| Deflector | Rega | vel. | Esc. Pot. médio (mm) | Esc. Pot. - AD_m (mm) | Esc. médio (mm) |
|-----------|------|------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| Estriado | 1ª | 20 | - * | - | 0,48 |
| | 2ª | 40 | 0,39 | 0,27 | 0,33 |
| | 3ª | 40 | 0,44 | 0,32 | 0,21 |
| Liso | 1ª | 20 | 0,09 | -0,03 | 0,02 |
| | 2ª | 40 | 1,32 | 1,21 | 0,00 |
| | 3ª | 40 | 0,33 | 0,23 | 0,00 |

* valor não considerado por falta de fiabilidade.

Quadro 4.20 – Escorrimento potencial vs. Escorrimento real, no 2º ano de ensaios

| Deflector | Rega | vel. | Esc. Pot. médio (mm) | Esc. Pot. - AD_m (mm) | Esc. médio (mm) |
|-----------|------|------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| Liso | 1ª | 30 | 0,00 | -0,14 | 0,00 |
| | 2ª | 40 | 1,13 | 1,00 | 0,17 |
| | 3ª | 40 | 1,13 | 1,00 | 0,61 |
| | 4ª | 40 | 0,76 | 0,63 | 0,40 |
| | 5ª | 40 | 0,95 | 0,82 | 0,72 |
| Estriado | 1ª | 30 | 0,37 | 0,28 | 0,12 |
| | 2ª | 40 | 1,35 | 1,26 | 0,74 |
| | 3ª | 40 | 1,35 | 1,27 | 1,55 |
| | 4ª | 40 | 1,58 | 1,50 | 2,78 |
| | 5ª | 40 | 3,06 | 2,98 | 3,07 |

Para os aspersores com deflectores estriados continua a observar-se valores de escorrimento potencial superiores aos do escorrimento real com os dados relativos ao 1º ano de ensaios. Porém, com os dados do 2º ano verifica-se, nas últimas regas, que o escorrimento real foi ligeiramente superior ao potencial. As diferenças continuam a não ser importantes, sendo a maior delas de 1,2 mm, que representa um valor de cerca de 10 % da água aplicada ($Da = 12,1$ mm).

A diferença entre os valores potenciais (calculados) e os reais (medidos) pode ser explicada pela influência de vários factores: i) o efeito do vento durante os ensaios vai influenciar a quantidade de água que chega ao solo (D_{rec}), que pode ser diferente em ensaios realizados com a mesma velocidade da rampa rotativa; ii) o teor de água do solo com que foi determinada a equação da infiltrabilidade não foi exactamente igual ao verificado nos vários pontos do terreno durante a rega, e isso também irá contribuir para as diferenças encontradas; finalmente, iii) a rugosidade superficial do solo, que não foi considerada nos ensaios de infiltração, armazenará alguma da água aplicada em excesso, diminuindo o escoamento real relativamente ao potencial.

Observando os quadros 4.19 e 4.20 verifica-se, na maioria dos casos, que se se considerar a capacidade de armazenamento superficial do solo as diferenças entre o escoamento potencial e o escoamento real são atenuadas.

Com base nestes resultados, pode-se concluir que a utilização do diagrama pluviométrico obtido no campo e uma equação da infiltrabilidade determinada em condições de solo idênticas àquelas em que se irá realizar a rega, permitem obter estimativas do escoamento bastante rigorosas, e que podem ainda ser um pouco melhores se se considerar a capacidade de armazenamento superficial do solo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1. Conclusões

Este trabalho permitiu verificar que o bom funcionamento de uma rampa rotativa, num determinado solo, pode estar dependente de algo tão simples como a escolha adequada do tipo de deflector a utilizar nos seus aspersores. A utilização de dois tipos diferentes de deflectores (lisos e estriados) nos aspersores de uma rampa rotativa de baixa pressão (pressão de funcionamento dos aspersores igual a 140 kPa) mostrou que eles podem exercer um efeito diferente sobre o processo de infiltração, que se torna mais evidente e significativo à medida que aumenta a intensidade pluviométrica.

A diferença fundamental entre os aspersores com os dois tipos de deflectores resulta do facto do jacto de água que sai do aspersor apresentar um padrão de rotura diferente após o contacto com cada um dos deflectores. Os deflectores estriados originam um padrão de rotura menos uniforme e com gotas de maior dimensão. Este padrão de distribuição da água origina regas menos uniformes que as obtidas com os deflectores lisos; diferença que se atenua com o aumento da sobreposição dos aspersores e a intensidade pluviométrica.

Por outro lado, as gotas maiores, dos aspersores com deflectores estriados, são menos afectadas pelo vento, o que faz diminuir as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento, aumentando a eficiência de aplicação. No entanto, têm maior energia de impacto sobre o solo, o que tem como efeitos: i) maior quebra dos agregados do solo, destruindo a rugosidade superficial e diminuindo a sua capacidade de armazenamento superficial; ii) maior destacamento de partículas de solo; iii) maior compactação da superfície do solo e iv) maior facilidade em formar crosta superficial. O conjunto de todos estes factores condiciona a infiltrabilidade do solo, dificultando a infiltração e originando o escoamento da água em excesso.

As alterações nas características de infiltração do solo puderam ser observadas tanto nos ensaios de infiltração como nos ensaios de rega realizados. Nos ensaios de infiltração verificou-se que a infiltrabilidade do solo diminui bastante com o aumento do teor de água na camada superficial, mas também com a maior compactação superficial do solo. Para a mesma intensidade de aplicação observa-se que a utilização de deflectores estriados conduz a uma infiltrabilidade mais reduzida (fig. 4.15) devido essencialmente a uma maior compactação da superfície do solo.

Esta diminuição da infiltrabilidade foi mais evidente nos ensaios de rega, onde se verificou um aumento significativo do escoamento à medida que aumentaram quer o teor de água na camada superficial do solo, quer a compactação superficial. Enquanto os resultados do 1º ano de ensaios, em que se utilizaram intensidades de aplicação máximas entre os 53 e 68 mm/h e dotações de rega entre os 7,5 e 9,4 mm, apenas mostram uma pequena diferença na utilização dos dois tipos de deflectores, já os resultados do 2º ano, com intensidades de aplicação máximas entre os 99 e 125 mm/h e dotações aplicadas entre os 12,1 e 13,6 mm, permitem verificar que a utilização de um ou outro tipo de deflector apresenta diferenças significativas.

Em terrenos onde as operações de mobilização do solo, antes da rega, deixem a superfície com uma rugosidade baixa, como foi o caso estudado, o efeito do impacto das gotas de água sobre a rugosidade e o armazenamento superficial não é importante, sendo fundamentalmente a compactação superficial, e nalguns casos a formação de crosta no solo, que exercem um efeito redutor na infiltrabilidade. Este efeito é maior com a utilização dos aspersores com deflectores estriados, verificando-se por isso mais escoamento com este tipo de aspersores (fig. 4.20).

O maior impacto das gotas de água dos aspersores com deflectores estriados produz ao mesmo tempo maior destacamento de partículas do solo que, juntamente com uma maior quantidade de água escoada superficialmente vai provocar maior erosão do solo. Verificou-se que, para a mesma quantidade de escoamento, os ensaios com aspersores com deflectores estriados produzem maior quantidade de sedimentos arrastados do que os aspersores com deflectores lisos (fig. 4.26).

A utilização das curvas da infiltrabilidade e dos diagramas pluviométricos determinados no campo mostrou que, se se possuírem equações da infiltrabilidade obtidas em condições antecedentes do solo (teor de água, nível de compactação superficial) semelhantes às aquelas em que se irá realizar a rega, pode-se obter uma estimativa bastante rigorosa do escoamento, e que ainda pode ser mais precisa caso se considere a capacidade de armazenamento superficial do solo.

Verificou-se também que, das várias equações tipo da infiltrabilidade ensaiadas, foi a equação do tipo Kostiakov aquela que melhor se ajustou aos valores obtidos nos vários ensaios de infiltração. Este melhor ajustamento deve-se por um lado às características particulares dos ensaios de infiltração (que têm curta duração e terminam com o início da saturação superficial do solo) e por outro à maior elasticidade que esta equação apresenta nos

processos de otimização matemática, para diferentes conjuntos de dados, relativamente a outras expressões mais complexas.

Como conclusão final, pode-se dizer que, neste solo será possível conseguir regas com melhor eficiência (menos perdas por escorrimento) utilizando rampas rotativas com intensidades pluviométricas máximas da ordem dos 70 mm/h, nas quais será indiferente o tipo de deflector a utilizar no aspersor. Se se quiser utilizar rampas rotativas de maior dimensão, e por conseguinte com maior intensidade pluviométrica, então a utilização de deflectores lisos nos aspersores será vantajosa, pelo menos na parte final da rampa, onde a intensidade de aplicação é maior.

A excepção ao que já foi dito será a utilização das rampas rotativas em zonas muito ventosas, onde aspersores com deflectores estriados poderão ter vantagens, devido à redução das perdas por evaporação e arrastamento pelo vento.

5.2. Perspectivas futuras

No que respeita à investigação futura sobre este tema, surgem de imediato várias linhas que poderão ser interessantes e aumentar o conhecimento sobre esta matéria.

Em primeiro lugar um estudo em condições idênticas às agora realizadas mas utilizando aspersores rotativos e pressões de funcionamento diferentes. Os aspersores rotativos têm menores intensidades de aplicação, portanto são mais compatíveis com a baixa infiltrabilidade destes solos. Por outro lado, o seu funcionamento é mais exigente em termos energéticos. O estudo do binómio consumo de energia *versus* consumo de água, é cada vez mais importante, na medida em que a água é um bem escasso e o seu custo irá aumentar no futuro.

Outra linha de trabalho interessante será o estudo da melhor posição para o aspersor, no topo da rampa rotativa ou a diferentes alturas do solo, de modo a minimizar as perdas por evaporação e arrastamento pelo vento, sem aumentar excessivamente a intensidade de aplicação da água.

O estudo do melhor sistema de mobilização a utilizar nestes solos para evitar ou diminuir o escorrimento pode também trazer informações muito proveitosas para uma boa gestão das rampas rotativas. A mobilização do solo influencia: i) a porosidade da camada mobilizada, ii) o processo de formação da crosta superficial e iii) a rugosidade e capacidade

de armazenamento superficial do solo. Os dois primeiros efeitos reflectem-se numa alteração da infiltrabilidade do solo e o terceiro na possibilidade de poder contar com um armazenamento superficial que permita aplicar dotações de rega maiores, sem a ocorrência de escorrimento.

A realização de qualquer um destes trabalhos noutros tipos de solos existentes no Alentejo, como por exemplo os Barros, fornecerá um conjunto de informação extremamente valiosa e que permitirá dar aos futuros beneficiários do Empreendimento do Alqueva indicações de como podem ter rampas rotativas a funcionar em boas condições nos seus solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARSTAD, J.S. & D.E. MILLER (1973) Soil management to reduce runoff under center-pivot sprinkler systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, nº 28 (4), p. 171-173.
- ADDINK, J.W., J. KELLER, C.H. PAIR, R.E. SNEED & J.W. WOLFE (1983) Design and operation of sprinkler systems, in JENSEN, M.E. (ed.) *Design and operation of farm irrigation systems*, cap. 15, ASAE, St. Joseph, MI.
- AGUIAR, F.Q.B. & J.T.T. GRILO (1975) *Memória descritiva da carta de solos da Herdade da Mitra*. Universidade de Évora, Évora.
- AL-DURRAH, M.M. & J.M. BRADFORD (1981) New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 45 (5), p.949-953.
- AL-DURRAH, M.M. & J.M. BRADFORD (1982a) The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 46 (5), p.1086-1090.
- AL-DURRAH, M.M. & J.M. BRADFORD (1982b) Parameters for describing soil detachment due to single waterdrop impact. *Soil Science Society of America Journal*, vol.46 (4), p. 836-840.
- ALLEN, R.G., M. SMITH, L.S. PEREIRA & A. PERRIER (1994) An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, vol. 43, nº 2.
- ALLMARAS, R.R., R.E. BURWELL, W.E. LARSON & R.F. HOLT (1966) Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *Conservation Research Report nº 7*. USDA.
- ANKENY, M.D., M. AHMED, T. KASPAR & R. HORTON (1991) Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 55, p. 467-470.
- ASAE (1995) Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot, corner pivot, and moving lateral irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles, ANSI/ASAE S436 SEP92, in *ASAE Standards 1995*, p. 750-751, ASAE, St. Joseph, MI.
- BAPTISTA, A.J.V. (1997) *Avaliação da rega com uma rampa rotativa numa cultura de milho em solos mediterrâneos*. Trabalho de Fim de Curso da Licenciatura de Engenharia Agrícola. Universidade de Évora, Évora.
- BASAHI, J.M., A.L. KENIMER, G. FIPPS & G.J. SABBAGH (1998) The effect of droplet impact energy produced by sprinkler system on soil erosion, runoff and infiltration rate. *ASAE Paper nº 98-2060*.
- BASCH, G. & M.J.G.P.R. CARVALHO (1998) Effect of soil tillage on runoff and erosion under dryland and irrigated conditions on mediterranean soils. *Geoökodynamik*, vol. 19, p. 257-268.

- BECK, D.L. & D.W. DEBOER (1992) Post-emergence, inter-row tillage to enhance infiltration under sprinkler irrigation. *Soil & Tillage Research*, nº 23, p. 111-123.
- BEN-HUR, M., & J. LETEY (1989) Effect of polysaccharides, clay dispersion, and impact energy on water infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, vol.53, nº 1, p. 233-238.
- BERTUZZI, P., J.M. CAUSSIGNAC, P. STENGEL, G. MOREL, J.Y. LORENDEAU & G. PELLOUX (1990a) An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ. *Soil Science*, vol. 149, nº 3, p. 169-178.
- BERTUZZI, P., G. RAUWS & D. COURAULT (1990b) Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*, nº 17, p. 87-99.
- BOSCH, D.D. & C.A. ONSTAD (1988) Surface seal hydraulic conductivity as affected by rainfall. *Transactions of the ASAE*, vol. 31 (4), p.1120-1127.
- BRADFORD, J.M., J.E. FERRIS & P.A. REMLEY (1987) Interrill soil erosion processes: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff and soil splash detachment. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 51, p. 1566-1571.
- BREMOND, B. & B. MOLLE (1995) Characterization of rainfall under center-pivot: influence of measuring procedure. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol.121, nº 5, p.347-353.
- BUBENZER, G.D. & B.A. JONES (1971) Drop size and impact velocity effects on the detachment of soil under simulated rainfall. *Transactions of the ASAE*, vol. 14 (4), p. 625-628.
- BURT, C.M., A.J. CLEMMENS, T.S. STRELKOFF, K.H. SOLOMON, R.D. BLIESNER, L.A. HARDY, T.A. HOWELL & D.E. EISENHAUER (1997) Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 123, nº 6, p.423-442.
- BURWELL, R.E. & W.E. LARSON (1969) Infiltration as influenced by tillage-induced random roughness and pore space. *Soil Science Society of America Proceedings*, nº 33 (3), p. 449-452.
- BURWELL, R.E., R.R. ALLMARAS & M. AMEMIYA (1963) A field measurement of total porosity and surface microrelief of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, nº 27 (6), p.697-700.
- CASTANHEIRA, P.J.N. (1998) *Determinação da condutividade hidráulica saturada na ausência da toalha freática*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Solo e da Água. Universidade de Évora, Évora.
- CHANG, W.J. & D.J. HILLS (1993) Sprinkler droplet effects on infiltration. II: Laboratory study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 119, nº 1, p.157-169.

- CHU, S.T. (1987) Generalized Mein-Larson infiltration model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 113, nº 2, p. 155-162.
- CHU, S.T., C.A. ONSTAD & W.J. RAWLS (1987) Macropores in the soil infiltration process. *ASAE Paper nº 87-2532*.
- COELHO, R.D. (1996) *Caracterização do sistema pivô central (LEPA), operando em condições de microrelevo condicionado*. Dissertação de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- CRUSE, R.M. & W.E. LARSON (1977) Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 41, p. 777-781.
- CURRENCE, H.D. & W.G. LOVELY (1970) The analysis of soil surface roughness. *Transactions of the ASAE*, vol. 13, p. 710-714.
- DARCY, H. (1856) *Les Fontaines Publique de la Ville de Dijon*. Dalmont, Paris.
- DAVIS, J.C. (1986) *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, New York.
- DEBOER, D.W., B.M. KETELHUT & D.L. BECK (1987) Primary and secondary tillage for surface runoff control under sprinkler irrigation. *ASAE Paper nº 87-2015*.
- DEBOER, D.W. & D.L. BECK (1991) Conservation tillage on a silt loam soil with reduced pressure sprinkler irrigation. *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 7, nº 5, p. 557-562.
- DEBOER, D.W., D.L. BECK & A.R. BENDER (1992) A field evaluation of low, medium and high pressure sprinklers. *Transactions of the ASAE*, vol. 35 (4), p.1185 - 1189.
- DEBOER, D.W. & S.T. CHU (1994) Application-rate-dependent soil infiltration and center-pivot irrigation runoff. *Report N.94-A-015*. AGENG-94, Milano.
- DEXTER, A.R. (1977) Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *Journal of Terramechanics*, vol. 14, nº 1, p.11-22.
- DIDCOT (1994) *Capacitance soil moisture probe. User manual*.
- DULEY, F.L. (1939) Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Science Society America Proceedings*, nº 4, p. 60-64.
- EDLING, R.J. (1985) Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles. *Transactions of the ASAE*, vol. 28 (5), p. 1543-1550.
- EPSTEIN, E. & W.J. GRANT (1973) Soil crust formation as affected by raindrop impact, in HADAS, A. (ed.) *Ecological studies*, vol. 4, *Physical aspects of soil water and salts in ecosystems*, p. 195-201. Springer-Verlag, New York.

- FATTAH, H.A. & UPADHYAYA (1996) Effect of soil crust and soil compaction on infiltration in a Yolo loam soil. *Transactions of the ASAE*, vol. 39 (1), p.79-84.
- FERREIRA, A.G. & M.J. SINGER (1985) Energy dissipation for water drop impact into shallow pools. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 49, p. 1537-1542.
- FOHRER, N., J. BERKENHAGEN, J.M. HECKER & A. RUDOLPH (1999) Changing soil and surface conditions during rainfall single storm/ subsequent rainstorms. *Catena*, nº 37, p. 355-375.
- FRANCIS, P.B. & R.M. CRUSE (1983) Soil water matric potential effects on aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 47, p. 578-581.
- GAMITO, L.F.G.G.M. (1998) *Caracterização e avaliação do funcionamento de uma rampa rotativa em solos mediterrâneos*. Trabalho de Fim de Curso da Licenciatura de Engenharia Agrícola. Universidade de Évora, Évora.
- GARDNER, W.R. (1958) Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, nº 85, p. 228-232.
- GAYLE, G.A. & R.W. SKAGGS (1978) Surface storage on bedded cultivated lands. *Transactions of the ASAE*, vol. 21 (1), p.101-104,109.
- GHADIRI, H. & D. PAYNE (1986) The risk of leaving the soil surface unprotected against falling rain. *Soil & Tillage Research*, nº 8 (1), p. 119-130.
- GILLEY, J.R. (1984) Suitability of reduced pressure center-pivots. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 110, nº 1, p.22-34.
- GILLEY, J.E., S.C. FINKER, R.G. SPOMER & L.N. MIELKE (1986) Runoff and erosion as affected by corn residue: part I. Total losses. *Transactions of the ASAE*, vol. 29 (1), p. 157-160.
- GREEN, W.H. & G.A. AMPT (1911) Studies of soil physics. 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, vol. 4, Part 1, p. 1-24.
- HANSEN, B., P. SCHJONNING & E. SIBBESEN (1999) Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. *Soil & Tillage Research*, nº 52, p. 103-111.
- HEERMANN, D.F. & P.R. HEIN (1968) Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. *Transactions of the ASAE*, vol. 11 (1), p. 11-15.
- HEERMANN, D.F. & R.A. KOHL (1983) Fluid dynamics of sprinkler systems, in JENSEN, M.E. (ed.), *Design and operation of farm irrigation systems*, cap. 14. ASAE.

- HELALIA, A.M., J. LETEY & R.C. GRAHAM (1988) Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. *Soil Science Society of America Journal*, vol.52, p. 251-255.
- HILLEL, D. (1980a) *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, New York.
- HILLEL, D. (1980b) *Applications of soil physics*. Academic Press, New York.
- HORTON, R.E. (1940) An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, nº 5, p. 399-419.
- HUANG, C. & J.M. BRADFORD (1990) Depressional storage for Markov-Gaussian surfaces. *Water Resources Research*, vol. 26, nº 9, p. 2235-2242.
- HUANG, C. & J.M. BRADFORD (1992) Applications of a laser scanner to quantify soil microtopography. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 56, 14-21.
- HUANG, C., J.M. BRADFORD & J.H. CRUSHMAN (1982) A numerical study of raindrop impact phenomena: the rigid case. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 46, nº 1, p. 14-19.
- HUANG, C.H., I. WHITE, E.G. THWAITE & A. BENDELI (1988) A non-contact laser system for measuring soil surface topography. *Soil Science Society of America Journal*, vol.52, p. 350-355.
- HUSSEN, A.A. & A. W. WARRICK (1995) Tension infiltrometers for the measurement of vadose zone hydraulic properties, in WILSON *et al.* (eds.) *Handbook of vadose zone characterization and monitoring*, cap. 13, p. 177-187. Lewis Publishers
- I.N.M.G. (1991) *O clima de Portugal. Normais climatológicas da região "Alentejo e Algarve" correspondentes a 1951-1980*. Fascículo XLIX, vol. 4. Lisboa.
- KELLER, J. & R. BLIESNER (1990) *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- KINCAID, D.C. (1996) Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers. *Transactions of the ASAE*, vol. 39 (3), p.847-853.
- KINCAID, D.C., D.F. HEERMANN & E.G. KRUSE (1969) Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation. *Transactions of the ASAE*, vol. 12 (6), p.790-794, 797.
- KINCAID, D.C., I. McCANN, J.R. BUSCH & M. HASHEMINIA (1990) Low pressure center pivot irrigation and reservoir tillage, in *Visions of the Future*, Proceedings of the Third National Irrigation Symposium, p. 54-60, ASAE.
- KINCAID, D.C., K.H. SOLOMON & J.C. OLIPHANT (1996) Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Transactions of the ASAE*, vol. 39 (3), p.839-845.

- KOHL, K.D.; R.A. KOHL & D.W. DEBOER (1987) Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss. *Transactions of the ASAE*, vol. 30 (4), p. 1071-1074.
- KOHL, R.A. (1974) Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers.. *Transactions of the ASAE*, vol. 17 (4), p. 690-693.
- KOHL, R.A. & D.W. DEBOER (1984) Drop size distributions for a low pressure spray type agricultural sprinkler. *Transactions of the ASAE*, vol. 27(6), p.1836-1840.
- KOSTIAKOV, A.N. (1932) On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from a dynamic point. *Trans. Com. Int. Coc. Soil Science 6th*, Moscow, Part A, p. 17-21.
- KRANZ, W.L., D.P. SHELTON, E.C. DICKEY & J.A. SMITH (1991) Water runoff control practices for sprinkler irrigation systems. *NebGuide G91-1043-A*. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska, Lincoln.
- KUIPERS, H. (1957) A reliefmeter for soil cultivation studies. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 5(4), p.255-262.
- KUNZE, R.J. & D.R. NIELSEN (1982) Finite-difference solutions of the infiltration equation. *Soil Science*, vol. 134, n° 2, p.81-88.
- KUTILEK, M. & D.R. NIELSEN (1994) *Soil Hydrology*. GeoEcology textbook. Catena Verlag.
- LE BISSONNAIS, Y. (1990) Experimental study and modeling of soil surface crusting processes, in BRYAN, R.B. (ed.) *Soil Erosion. Catena Supplement 17*, p. 13-28.
- LE BISSONNAIS, Y. & M.J. SINGER (1992) Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 56, p. 1898-1903.
- LEHRSCHE, G.A., F.D. WHISLER & M.J.M. RÖMKENS (1988) Selection of a parameter describing soil surface roughness. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 52, p. 1439-1445.
- LEVINE, G. (1952) Effect of irrigation droplet size on infiltration and aggregate breakdown. *Agricultural Engineering*, vol. 33, n° 9, p. 559-560.
- LINDEN, D.R. & D.M. VAN DOREN JR. (1986) Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Science Society of America Journal*, vol 50, n° 6, p.1560-1565.
- LINDEN, D.R., D.M. VAN DOREN & R.R. ALLMARAS (1988) A model of the effects of tillage-induced soil surface roughness on erosion, *11th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization, "Tillage and Traffic in Crop Production"*, Edinburgh, Scotland.

- LINSLEY, R.K., M.A. KOHLER & J.L. PAULUS (1949) *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Inc., New York, p. 269.
- LIVINGSTON, P., J.C. LOFTIS & H.R. DUKE (1985) A wind tunnel study of sprinkler catch-can performance. *Transactions of the ASAE*, vol. 28(6), p. 1961-1965.
- LONGLEY, T.S. (1984) Reservoir tillage for center pivot irrigation. *ASAE Paper n° 84-209*.
- LUTTRELL, D.H. (1963) *The effect of tillage operations on bulk density and other physical properties of the soil*. Unpublished Ph.D. dissertation. Iowa State University.
- LYLE, W.M. & J.P. BORDOVSKY (1981) Low energy precision application (LEPA) irrigation system. *Transactions of the ASAE*, vol. 24 (5), p.1241-1245.
- McINTYRE, D.S. (1958) Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, vol.85, n° 5, p. 261-266.
- MELLO, F.C.M. (1984) A infiltração em condições de submersão: uma aproximação numérica ao método de Philip. *Revista da Assoc. Portuguesa de Recursos Hídricos*, n° 5 (1), p. 79-93.
- MERRIAM, J.L. (1999) Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. Discussion. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol.125, n° 2, p. 97 -98.
- MERRINGTON, A.C. & E.G. RICHARDSON (1947) The breakup of liquid jets. *Proceedings of Physics Society (London)*, n° 59 (2), p. 1-13.
- MICKELSON, S.K., J.L. BAKER & J.M. LAFLEN (1983) Managing corn residue to control soil and nutrient losses. *ASAE Paper n° 83-2161*.
- MITCHELL, J.K. & B.A. JONES JR. (1976) Micro-relief surface depression storage: analysis of models to describe the depth-storage function. *Water Resources Bulletin*, vol. 12, n° 6, p. 1205-1222.
- MITCHELL, J.K. & B.A. JONES JR. (1978) Micro-relief depression storage: changes during rainfall events and their application to rainfall-runoff models. *Water Resources Bulletin*, vol. 14, n° 4, p. 777 - 802.
- MOHAMMED, D. & R.A. KOHL (1987) Infiltration response to kinetic energy. *Transactions of the ASAE*, vol. 30 (1), p.108-111.
- MOORE, I.D. (1981) Effect of surface sealing on infiltration. *Transactions of the ASAE*, vol. 24 (6), p.1546-1552, 1561.
- MOORE, I.D. & C.L. LARSON (1979) Estimating micro-relief surface storage from point data. *Transactions of the ASAE*, vol. 22 (5), p. 1073-1077.

- MORIN, J., Y. BENYAMINI & A. MICHAELI (1981) The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. *Journal of Hydrology*, vol. 52, p. 321-335.
- MUALEM, Y. (1976) A new method for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, nº 12, p. 513-522.
- MULLER, C.C. & E.H. KIDDER (1972) Rain gauge catch variation due to airflow disturbances around a standard rain gauge. *Water Resources Research*, nº 8 (4), p. 1077-1082.
- MWENDERA, E.J. & J. FEYEN (1992) Estimation of depression storage and Manning's resistance coefficient from random roughness measurements. *Geoderma*, nº 52, p. 235-250.
- OLIVEIRA, C.A.S., R.J. HANKS & U. SHANI (1987) Infiltration and runoff as affected by pitting, mulching and sprinkler irrigation. *Irrigation Science*, nº 8, p.49-63.
- ONSTAD, C.A. (1984) Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the ASAE*, vol. 27 (3), p.729-732.
- ONSTAD, C.A., M.L. WOLFE, C.L. LARSON & D.C. SLACK (1984) Tilled soil subsidence during repeated wetting. *Transactions of the ASAE*, vol. 27 (3), p.733-736.
- PALTINEAU, I.C. & J.L. STARR (1997) Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 61, p. 1576-1585.
- PARK, S.W., J.K. MITCHELL & G.D. BUBENZER (1982) Splash erosion modeling: Physical analysis. *Transactions of the ASAE*, vol. 25 (2), p. 357-361.
- PERROUX, K.M. & I. WHITE (1988) Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, vol.52 (5), p.1205-1214.
- PHILIP, J.R. (1957a) The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, nº 83, p. 345-357.
- PHILIP, J.R. (1957b) The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Science*, nº 84, p. 257-264.
- POTTER, K.N. (1990) Soil properties effect on random roughness decay by rainfall. *Transactions of the ASAE*, vol. 33 (6), p. 1889-1892.
- PRASUHN, A.L. (1980) *Fundamentals of fluid mechanics*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- RAPOSO, J.R. (1980) *A rega por aspersão*. Coleção Técnica Agrária. Clássica Editora, Lisboa.

- RAPOSO, J.R. (1996) *A rega. Dos primitivos regadios às modernas técnicas de rega*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- RICHARDS, L.A. (1931) Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, nº 1, p. 318-333.
- ROBICHAUD, P.R. & M. MOLNAU (1990) Measuring soil roughness changes with an ultrasonic profiler. *Transactions of the ASAE*, vol. 33 (6), p. 1851-1858.
- ROLLAND, L. (1980) *La mécanisation de l'irrigation par aspersion*. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage nº 35. FAO, Rome.
- RÖMKENS, M.J.M., S. SINGARAYAR & C.J. GANTZER (1986) An automated non-contact surface profile meter. *Soil & Tillage Research*, nº 6, p. 193-202.
- RÖMKENS, M.J.M. & J.Y. WANG (1986) Effect of tillage on surface roughness. *Transactions of the ASAE*, vol. 29 (2), p.429-433.
- RÖMKENS, M.J.M. & J.Y. WANG (1987) Soil roughness changes from rainfall. *Transactions of the ASAE*, vol. 30 (1), p. 101-107.
- RÖMKENS, M.J.M., J.Y. WANG & R.W. DARDEN (1988) A laser microreliefmeter. *Transactions of the ASAE*, vol. 31 (2), p. 408-413.
- ROSS, P.J. (1990) Efficient numerical methods for infiltration using Richard's equation. *Water Resources Research*, vol. 26 (2), p.279-290.
- SANTOS, C.A.S.M. (1995) *Estudo da influência da subsolagem e drenagem toupeira nas condições hidropedológicas dum solo argiluiado regado por sulcos*. Trabalho de Fim de Curso da Licenciatura de Engenharia Agrícola. Universidade de Évora, Évora.
- SANTOS JÚNIOR, A.G. (1987) *Movimento da água no solo*. Universidade de Évora, Évora.
- SCHERER, T.F., W. KRANZ, D. PFOST, H. WERNER, J.A. WRIGHT & C.D. YONTS (1999) *Sprinkler Irrigation systems*. MidWest Plan Service, Iowa State University, Iowa.
- SEGINER, I. (1965) Tangential velocity of sprinkler drops. *Transactions of the ASAE*, vol. 8 (1), p. 90-93.
- SEGINER, I. (1971a) A model for surface drainage of cultivated fields. *Journal of Hidrology*, nº 13, p. 139-152.
- SEGINER, I. (1971b) Water loss during sprinkling. *Transactions of the ASAE*, vol. 14 (4), p. 656-659, 664.

- SERAFIM, A.M.P.B. (1994) *Sobre a implantação de rampas polares; alguns aspectos em análise e síntese*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agronómica. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- SERRALHEIRO, R.P. (1988) *Um estudo da rega por sulcos num solo argiluiado*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola. Universidade de Évora, Évora.
- SHAINBERG, I. & M.J. SINGER (1985) Effect of electrolytic concentration on the hydraulic properties of depositional crust. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 49 (5), p. 1260-1263.
- SHOCKLEY, D. (1968) *Mimeograph report*. Soil Conservation Service, Portland, Oregon.
- SLICHTER, C.S. (1899) *U.S. Geol. Survey Annual Report*, nº 19-II, p. 295-384.
- SOLOMON, K. (1979) Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. *Transactions of the ASAE*, vol. 22, p.1078-1080,1086.
- STATSOFT (1995) *Statistica for Windows. Vol I: General conventions and Statistics I*. Statsoft.
- STEICHEN, J.M. (1984) Infiltration and random roughness of a tilled and untilled claypan soil. *Soil & Tillage Research*, vol. 4, p.251-262.
- TABUADA, M.A. (1989) *Modelação bidimensional e tridimensional da rega por sulcos*. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Doutor. ISA-UTL, Lisboa.
- TARJUELO, J.M. (1999) *El riego por aspersión y su tecnologia*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- TARJUELO, J.M., J. MONTERO, F.T. HONRUBIA, J.J. ORTIZ & M.A. CALVO (1998) Design and management of sprinkle irrigation on semi-arid areas. (*a aguardar publicação*).
- THOMPSON, A.L. & L.G. JAMES (1985) Water droplet impact and its effect on infiltration. *Transactions of the ASAE*, vol. 28 (5), p. 1506 - 1510.
- THOYAMANI, K.P., D.I. NORUM & S. DUBETZ (1987) Application rates and uniformity under center-pivot sprinkler irrigation systems using spray nozzles. *Canadian Agricultural Engineering*, vol. 29, nº 2, p. 149-154.
- TRUMAN, C.C., J.M. BRADFORD & J.E. FERRIS (1990) Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Science Society of America Journal*, vol.54, p. 1385-1392.
- ULLAH, W. & W.T. DICKINSON (1979a) Quantitative description of depression storage using a digital surface model. I. Determination of depression storage. *Journal of Hydrology*, nº 42, p.63-75.

- ULLAH, W. & W.T. DICKINSON (1979b) Quantitative description of depression storage using a digital surface model. II. Characteristics of surface depressions. *Journal of Hydrology*, nº 42, p. 77-90.
- UNDERSANDER, D.J., T.H. MAREK & R.N. CLARK (1985) Effect of nozzle type on runoff and yield of corn and sorghum under center pivot sprinkler systems. *Irrigation Science*, nº 6, 107-116.
- VALADAS, J.M.F. (1997) *Avaliação da rega com uma rampa rotativa numa cultura de milho em solos argilosos*. Trabalho de Fim de Curso da Licenciatura de Engenharia Agrícola. Universidade de Évora, Évora.
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, nº 5, p. 892-898.
- VON BERNUTH, R.D. & J.R. GILLEY (1984) Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data. *Transactions of the ASAE*, vol. 27 (5), p.1435-1441.
- VON BERNUTH, R.D. & J.R. GILLEY (1985) Evaluation of center pivot application packages considering droplet induced infiltration reduction. *Transactions of the ASAE*, vol. 28 (6), p.1940-1946.
- VORIES, E.D., S.M. ASCE & R.D. VON BERNUTH (1987) Simulating sprinkler performance in wind. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol.113, nº 1, p. 119-129.
- WHALLEY, W.R., T.Y. DEAN & P. IZZARD (1992) Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content. *Journal of Agricultural Research*, nº 52, p. 147-155.
- WOLLNY, E. (1877) *Der einfluss der pflanzendcke and beschattung auf die physikalischeu eigenshafter und die frachbarkeit des bodens*. Berlin, p. 171-174.
- WOODING, R.A. (1968) Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*, nº 4, p. 1259-1273.
- ZOBECK, T.M. & C.A. ONSTAD (1987) Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. *Soil & Tillage Research*, nº 9, p.1-20.

ANEXOS

Anexo A – Descrição do perfil do solo

Solo Mediterrâneo Pardo Normal de xistos anfibólicos

Perfil n° 1

Horizonte A – 25 a 30 cm; pardo amarelado (10YR 3-4), textura franco-argilo-arenosa, estrutura granulosa fina e média moderada, com alguns elementos grosseiros; friável;

Transição gradual para

Horizonte B – 20 a 25 cm; castanho (7.5YR 4-4) com manchas cinzentas e pequenas concreções ferruginosas, textura franco-argilosa, estrutura anisoforme angular média; bastante poroso, com poros finos; bastantes fendas finas e com diferentes orientações; firme;

Transição gradual para

Horizonte C - material originário de cor castanho esverdeada (2.5YR 5-6) com manchas cinzentas; textura franco-arenosa.

Perfil n° 2

Horizonte A – 25 a 30 cm; pardo amarelado (10YR 3-4), textura franco-argilo-arenosa, estrutura granulosa fina fraca, com alguns elementos grosseiros; friável;

Transição gradual para

Horizonte B - 25 a 35 cm; esverdeado (5Y 4-4), textura argilosa, estrutura anisoforme angular grosseira moderada a forte por vezes com tendência para prismática; poroso, com poros finos a médios; algumas fendas médias verticais; firme;

Transição abrupta para

Horizonte C – material originário.

Perfil n° 3

Horizonte A – 35 a 40 cm; pardo amarelado (10YR 3-6), textura franco-argilo-arenosa, estrutura granulosa fina e média fraca, com bastantes elementos grosseiros; friável;

Transição gradual para

Horizonte B – 20 a 25 cm; pardo-amarelado (10YR 4-6) a castanho escuro (7.5YR 3-4), textura franco-argilosa a argilosa, estrutura anisoforme angular média a grosseira; firme;

Transição nítida a gradual para

Horizonte C - material originário de cor castanho escuro esverdeado (5Y 2.5-2); textura franco-arenosa.

Anexo B - Valores da retenção da água no solo (% vol) para diferentes sucções (kPa)

| Perfil | Horiz. | Teor de água do solo (% vol) a diferentes sucções (kPa) | | | | | | |
|--------|--------|---|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 3,16 | 10 | 34,6 | 100 | 316 | 1500 |
| 1 | | | | | | | | |
| | A | 34,1 | 30,5 | 26,0 | 23,3 | 19,0 | 16,6 | 12,1 |
| | B | 44,8 | 42,1 | 28,8 | 28,5 | 27,1 | 26,8 | 20,2 |
| | C | 34,0 | 31,0 | 23,4 | 21,9 | 19,1 | 17,4 | 10,9 |
| Perfil | Horiz. | Teor de água do solo (% vol) a diferentes sucções (kPa) | | | | | | |
| | | 1 | 3,16 | 10 | 34,6 | 100 | 316 | 1500 |
| 2 | | | | | | | | |
| | A | 42,3 | 36,3 | 22,1 | 21,9 | 19,7 | 16,5 | 13,5 |
| | B | 46,5 | 43,2 | 31,9 | 30,3 | 27,5 | 26,8 | 21,3 |
| Perfil | Horiz. | Teor de água do solo (% vol) a diferentes sucções (kPa) | | | | | | |
| | | 1 | 3,16 | 10 | 34,6 | 100 | 316 | 1500 |
| 3 | | | | | | | | |
| | A | 39,4 | 33,9 | 23,6 | 19,4 | 16,4 | 15,6 | 13,7 |
| | B | 35,6 | 31,6 | 24,9 | 24,7 | 22,8 | 19,9 | 19,7 |
| | C | 31,1 | 29,2 | 19,4 | 18,7 | 17,9 | 16,1 | 11,9 |

Anexo C – Densidade aparente do solo**C 1.1 - antes dos ensaios de infiltração - 1998**

| Data | Deflectores estriados | |
|--------------|-----------------------|-------------|
| | Raio 2 | Raio 4 |
| 25-08-1998 | 1,25 | 1,18 |
| | 1,20 | 1,23 |
| | 1,25 | 1,25 |
| | 1,22 | 1,21 |
| | 1,27 | 1,19 |
| | 1,24 | 1,22 |
| | 1,24 | 1,24 |
| | 1,24 | 1,21 |
| | 1,25 | 1,20 |
| Média | 1,24 | 1,21 |
| 27-08-1998 | 1,20 | 1,24 |
| | 1,34 | 1,17 |
| | 1,26 | 1,26 |
| | 1,27 | 1,25 |
| | 1,29 | 1,18 |
| | 1,31 | 1,20 |
| | 1,25 | 1,27 |
| | 1,29 | 1,21 |
| | 1,24 | 1,23 |
| Média | 1,27 | 1,22 |
| 01-09-1998 | 1,25 | 1,28 |
| | 1,15 | 1,21 |
| | 1,21 | 1,23 |
| | 1,22 | 1,17 |
| | 1,38 | 1,19 |
| | 1,43 | 1,15 |
| | 1,22 | 1,28 |
| | 1,32 | 1,22 |
| | 1,25 | 1,27 |
| Média | 1,27 | 1,22 |

| Data | Deflectores lisos | |
|--------------|-------------------|-------------|
| | Raio 2 | Raio 4 |
| 08-09-1998 | 1,32 | 1,16 |
| | 1,13 | 1,14 |
| | 1,24 | 1,24 |
| | 1,16 | 1,19 |
| | 1,16 | 1,15 |
| | 1,11 | 1,22 |
| | 1,23 | 1,28 |
| | 1,24 | 1,17 |
| | 1,22 | 1,30 |
| Média | 1,20 | 1,21 |
| 10-09-1998 | 1,60 | 1,30 |
| | 1,05 | 1,38 |
| | 1,14 | 1,34 |
| | 1,28 | 1,26 |
| | 1,36 | 1,35 |
| | 1,29 | 1,23 |
| | 1,28 | 1,39 |
| | 1,33 | 1,28 |
| | 1,28 | 1,31 |
| Média | 1,29 | 1,32 |
| 15-09-1998 | 1,20 | 1,20 |
| | 1,07 | 1,19 |
| | 1,06 | 1,44 |
| | 1,32 | 1,23 |
| | 1,38 | 1,25 |
| | 1,38 | 1,32 |
| | 1,34 | 1,23 |
| | 1,37 | 1,32 |
| | 1,40 | 1,24 |
| Média | 1,28 | 1,27 |

C 1.2 – antes dos ensaios de infiltração - 1999

| Data | Deflectores lisos | Data | Deflectores estriados |
|--------------|-------------------|--------------|-----------------------|
| 22-06-1999 | 1,13 | 19-07-1999 | 1,25 |
| | 1,18 | | 1,23 |
| | 1,19 | | 1,17 |
| | 1,06 | | 1,20 |
| | 1,18 | | 1,28 |
| | 1,16 | | 1,19 |
| | 1,13 | | 1,28 |
| | 1,17 | | 1,13 |
| | 1,19 | | 1,20 |
| Média | 1,15 | Média | 1,21 |
| 24-06-1999 | 1,15 | 21-07-1999 | 1,26 |
| | 1,21 | | 1,14 |
| | 1,00 | | 1,19 |
| | 1,25 | | 1,22 |
| | 1,15 | | 1,13 |
| | 1,19 | | 1,16 |
| | 1,20 | | 1,16 |
| | 1,30 | | 1,16 |
| | 1,09 | | 1,20 |
| Média | 1,17 | Média | 1,18 |
| 30-06-1999 | 1,26 | 27-07-1999 | 1,24 |
| | 1,25 | | 1,17 |
| | 1,27 | | 1,14 |
| | 1,25 | | 1,24 |
| | 1,26 | | 1,21 |
| | 1,21 | | 1,11 |
| | 1,23 | | 1,17 |
| | 1,22 | | 1,27 |
| | 1,08 | | 1,16 |
| Média | 1,23 | Média | 1,19 |
| 02-07-1999 | 1,18 | 29-07-1999 | 1,17 |
| | 1,18 | | 1,12 |
| | 1,13 | | 1,17 |
| | 1,09 | | 1,14 |
| | 1,15 | | 1,20 |
| | 1,21 | | 1,14 |
| | 1,27 | | 1,30 |
| | 1,09 | | 1,22 |
| | 1,25 | | 1,13 |
| Média | 1,17 | Média | 1,18 |

C 2 – antes dos ensaios de rega

| Data | Deflectores estriados | |
|--------------|-----------------------|-------------|
| | Raio 3 | Raio 1 |
| 25-08-1998 | 1,25 | 1,17 |
| | 1,23 | 1,14 |
| | 1,24 | 1,24 |
| Média | 1,24 | 1,18 |
| 27-08-1998 | 1,20 | 1,24 |
| | 1,34 | 1,17 |
| | 1,26 | 1,26 |
| Média | 1,27 | 1,22 |
| 01-09-1998 | 1,28 | 1,22 |
| | 1,11 | 1,21 |
| | 1,30 | 1,17 |
| Média | 1,23 | 1,20 |

| Data | Deflectores lisos | |
|--------------|-------------------|-------------|
| | Raio 3 | Raio 1 |
| 08-09-1998 | 1,27 | 1,13 |
| | 1,24 | 1,30 |
| | 1,33 | 1,26 |
| Média | 1,28 | 1,23 |
| 10-09-1998 | 1,29 | 1,24 |
| | 1,36 | 1,19 |
| | 1,37 | 1,29 |
| Média | 1,34 | 1,24 |
| 15-09-1998 | 1,37 | 1,17 |
| | 1,23 | 1,20 |
| | 1,29 | 1,16 |
| Média | 1,30 | 1,21 |

| Data | Deflectores lisos | |
|--------------|-------------------|-------------|
| | Raio 2 | Raio 1 |
| 22-06-1999 | 0,96 | 0,94 |
| | 0,92 | 0,95 |
| | 0,88 | 1,00 |
| Média | 0,92 | 0,96 |
| 24-06-1999 | 1,01 | 0,99 |
| | 1,06 | 1,00 |
| | 0,78 | 1,20 |
| Média | 0,95 | 1,06 |
| 26-06-1999 | 1,08 | 0,89 |
| | 0,99 | 1,04 |
| | 1,08 | 1,12 |
| Média | 1,05 | 1,02 |
| 30-06-1999 | 1,16 | 1,15 |
| | 1,27 | 1,07 |
| | 1,30 | 1,04 |
| Média | 1,24 | 1,09 |
| 02-07-1999 | 1,16 | 1,03 |
| | 1,12 | 1,12 |
| | 1,11 | 1,04 |
| Média | 1,13 | 1,06 |

| Data | Deflectores estriados | |
|--------------|-----------------------|-------------|
| | Raio 2 | Raio 1 |
| 19-07-1999 | 0,93 | 1,11 |
| | 1,09 | 1,02 |
| | 1,06 | 1,11 |
| Média | 1,03 | 1,08 |
| 21-07-1999 | 1,17 | 1,11 |
| | 0,99 | 1,06 |
| | 1,07 | 1,15 |
| Média | 1,08 | 1,11 |
| 23-07-1999 | 1,05 | 1,28 |
| | 1,16 | 1,09 |
| | 1,14 | 1,16 |
| Média | 1,12 | 1,18 |
| 27-07-1999 | 1,20 | 1,40 |
| | 1,05 | 1,16 |
| | 1,21 | 1,38 |
| Média | 1,15 | 1,31 |
| 29-07-1999 | 1,18 | 1,29 |
| | 1,31 | 1,23 |
| | 1,24 | 1,16 |
| Média | 1,24 | 1,23 |

Anexo D – Valores da determinação da condutividade hidráulica saturada utilizando o permeâmetro de disco

| Data | Posição | Caudais estabilizados (cm/s) | | λc (cm) | K_s (cm/h) | $K(-4)$ (cm/h) | $K(-1)$ (cm/h) |
|----------|---------|------------------------------|---------|---------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | | q_1 | q_2 | | | | |
| 21-06-99 | 1 | 0,00167 | 0,00226 | 9,92 | 2,73 | 1,82 | 2,47 |
| | 2 | 0,00147 | 0,00215 | 7,89 | 3,11 | 1,87 | 2,74 |
| | 3 | 0,00237 | 0,00309 | 11,31 | 3,36 | 2,36 | 3,07 |
| | 4 | 0,00143 | 0,00215 | 7,36 | 3,28 | 1,90 | 2,86 |
| 23-06-99 | 1 | 0,00066 | 0,00143 | 3,88 | 3,51 | 1,25 | 2,71 |
| | 2 | 0,00061 | 0,00165 | 3,01 | 4,87 | 1,29 | 3,50 |
| | 3 | 0,00061 | 0,00176 | 2,83 | 5,45 | 1,33 | 3,83 |
| | 4 | 0,00138 | 0,00198 | 8,31 | 2,75 | 1,70 | 2,44 |
| 29-06-99 | 1 | 0,00080 | 0,00142 | 5,23 | 2,80 | 1,30 | 2,31 |
| | 2 | 0,00088 | 0,00105 | 16,99 | 0,81 | 0,64 | 0,77 |
| | 3 | 0,00099 | 0,00127 | 12,04 | 1,31 | 0,94 | 1,21 |
| | 4 | 0,00066 | 0,00116 | 5,32 | 2,26 | 1,06 | 1,87 |
| 01-07-99 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| | 2 | 0,00072 | 0,00105 | 7,95 | 1,51 | 0,91 | 1,33 |
| | 3 | 0,00061 | 0,00088 | 8,19 | 1,24 | 0,76 | 1,09 |
| | 4 | 0,00083 | 0,00110 | 10,65 | 1,26 | 0,86 | 1,14 |
| 16-07-99 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| | 2 | 0,00187 | 0,00253 | 9,92 | 3,05 | 2,04 | 2,76 |
| | 3 | 0,00215 | 0,00281 | 11,21 | 3,08 | 2,15 | 2,81 |
| | 4 | 0,00110 | 0,00160 | 8,01 | 2,29 | 1,39 | 2,02 |
| 20-07-99 | 1 | 0,00044 | 0,00066 | 7,40 | 1,00 | 0,58 | 0,88 |
| | 2 | 0,00050 | 0,00154 | 2,67 | 4,99 | 1,11 | 3,43 |
| | 3 | 0,00072 | 0,00121 | 5,78 | 2,22 | 1,11 | 1,86 |
| | 4 | 0,00072 | 0,00143 | 4,37 | 3,22 | 1,29 | 2,56 |
| 26-07-99 | 1 | 0,00088 | 0,00138 | 6,67 | 2,27 | 1,25 | 1,95 |
| | 2 | 0,00165 | 0,00209 | 12,69 | 2,07 | 1,51 | 1,91 |
| | 3 | 0,00088 | 0,00132 | 7,40 | 2,01 | 1,17 | 1,75 |
| | 4 | 0,00077 | 0,00134 | 5,41 | 2,57 | 1,23 | 2,14 |
| 28-07-99 | 1 | 0,00066 | 0,00094 | 8,48 | 1,28 | 0,80 | 1,14 |
| | 2 | 0,00110 | 0,00171 | 6,80 | 2,77 | 1,54 | 2,39 |
| | 3 | 0,00072 | 0,00083 | 21,10 | 0,53 | 0,44 | 0,51 |
| | 4 | 0,00061 | 0,00143 | 3,52 | 3,77 | 1,21 | 2,84 |

Anexo E – Valores do ajustamento das equações da infiltrabilidade

Ensaio nº 1 - aspersores com deflectores estriados - 25-08-1998

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|---------|--------|---------|---------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 1* | 2,1 | 10 | 128,6 | 16 | 0,05 | 0,8833 | 3,1 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,880 | 0,810 | 5,090 | 22,060 | 18,019 | 58,895 | 4,148 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,873 | 0,831 | 4,846 | 48,294 | 18,491 | -0,494 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,879 | 0,806 | 5,124 | 21,727 | 45,648 | -0,274 | -28,869 | p<0,01 |
| Philip | 0,873 | 0,831 | 4,849 | 48,228 | 36,637 | 0,040 | - | p<0,01 |
| G-Ampt | 0,894 | 0,859 | 4,434 | 59,035 | 9,041 | 27,420 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 1* | 2,2 | 8 | 65,4 | 13 | 0,15 | 0,8667 | 4,7 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,773 | 0,603 | 8,759 | 8,512 | 20,048 | 159,591 | 8,769 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,793 | 0,710 | 7,631 | 23,012 | 11,609 | -0,877 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,755 | 0,572 | 9,091 | 7,721 | 0,0004 | -6,009 | 26,423 | p<0,05 |
| Philip | 0,764 | 0,670 | 8,143 | 19,477 | 61,754 | -21,754 | - | p<0,01 |
| G-Ampt | 0,734 | 0,628 | 8,653 | 16,561 | 36,671 | 0,001 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 1* | 2,3 | 7 | 113,3 | 13,3 | 0,3 | 1,0167 | 4,5 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,979 | 0,963 | 5,995 | 114,265 | 14,720 | 155,579 | 6,758 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,971 | 0,959 | 6,382 | 200,091 | 14,484 | -0,762 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,971 | 0,949 | 6,989 | 83,424 | 15,052 | -0,749 | -0,711 | p<0,01 |
| Philip | 0,962 | 0,947 | 7,302 | 151,435 | 68,199 | -21,589 | - | p<0,01 |
| G-Ampt | 0,853 | 0,794 | 14,351 | 34,759 | 0,578 | 998,562 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 1* | 4,1 | - | - | - | - | - | - | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kostiakov | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kost-Lewis | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Philip | - | - | - | - | - | - | - | - |
| G-Ampt | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 1* | 4,2 | 6 | 48,2 | 11,4 | 0,05 | 1,283 | 3,8 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,962 | 0,905 | 3,477 | 37,894 | 15,040 | 223,597 | 38,170 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,846 | 0,744 | 6,047 | 22,054 | 12,743 | -0,434 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,000 | 0,000 | - | - | - | - | - | ns |
| Philip | 0,862 | 0,771 | 5,719 | 25,123 | 18,865 | 4,084 | - | p<0,01 |
| G-Ampt | 0,924 | 0,874 | 4,244 | 48,884 | 9,794 | 8,186 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 1* | 4,3 | 8 | 112,5 | 14,1 | 0,05 | 1,1833 | 4,0 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,928 | 0,875 | 10,330 | 32,374 | 22,559 | 264,569 | 21,609 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,919 | 0,886 | 10,045 | 67,765 | 15,017 | -0,655 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,947 | 0,907 | 8,871 | 44,791 | 1,826 | -1,313 | 18,298 | p<0,01 |
| Philip | 0,902 | 0,863 | 10,999 | 55,523 | 50,329 | -9,740 | - | p<0,01 |
| G-Ampt | 0,873 | 0,822 | 12,567 | 41,129 | 0,454 | 994,735 | - | p<0,01 |

Ensaio nº 2 - aspersores com deflectores estriados - 27-08-1998

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|----------|---------|----------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 2* | 2,1 | 12 | 48,2 | 19,3 | 0,0333 | 0,1833 | | 17,9 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,450 | 0,244 | 6,926 | 3,685 | 24,448 | 33,473 | 11,962 | ns |
| Kostiakov | 0,451 | 0,329 | 6,568 | 8,204 | 16,989 | -0,306 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,452 | 0,247 | 6,912 | 3,717 | 57,712 | -0,138 | -44,789 | ns |
| Philip | 0,446 | 0,323 | 6,595 | 8,052 | 12,639 | 14,164 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,793 | 0,747 | 4,032 | 38,293 | 30,411 | 0,598 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 2* | 2,2 | - | - | - | - | - | | - |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kostiakov | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kost-Lewis | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Philip | - | - | - | - | - | - | - | - |
| G_Ampt | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 2* | 2,3 | 9 | 53 | 23,7 | 0,05 | 0,25 | | 18,7 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,578 | 0,420 | 10,295 | 6,161 | -530,127 | 592,310 | 0,264 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,503 | 0,393 | 10,597 | 10,125 | 15,744 | -0,441 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,535 | 0,361 | 10,805 | 5,179 | 334,139 | -0,052 | -331,726 | p<0,05 |
| Philip | 0,499 | 0,387 | 10,646 | 9,941 | 25,179 | 3,533 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,780 | 0,755 | 6,728 | 39,920 | 42,244 | 0,115 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 2* | 4,1 | 9 | 27 | 10,1 | 0,0833 | 0,3833 | | 19,7 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,804 | 0,687 | 2,982 | 12,335 | -339,631 | 372,129 | 0,142 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,669 | 0,559 | 3,589 | 14,175 | 10,259 | -0,425 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,722 | 0,555 | 3,556 | 7,785 | 288,502 | -0,032 | -283,057 | p<0,05 |
| Philip | 0,660 | 0,547 | 3,640 | 13,588 | 15,770 | 2,583 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,821 | 0,761 | 2,644 | 32,005 | 14,396 | 1,796 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 2* | 4,2 | 5 | 28,9 | 12,2 | 0,0167 | 0,4 | | 18,0 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,953 | 0,811 | 2,070 | 20,139 | 11,489 | 19,267 | 5,749 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,899 | 0,798 | 2,471 | 26,680 | 11,807 | -0,225 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,927 | 0,707 | 2,576 | 12,654 | 375,541 | -0,013 | -366,095 | ns |
| Philip | 0,854 | 0,707 | 2,974 | 17,481 | 4,801 | 11,225 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,941 | 0,882 | 1,884 | 48,001 | 14,917 | 0,472 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 2* | 4,3 | 11 | 86,8 | 8,1 | 0,0333 | 0,3167 | | 16,6 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,892 | 0,845 | 7,981 | 32,970 | 22,397 | 160,367 | 28,316 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,910 | 0,888 | 6,844 | 91,535 | 6,757 | -0,739 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,915 | 0,879 | 7,065 | 43,186 | 2,046 | -1,055 | 11,542 | p<0,01 |
| Philip | 0,900 | 0,875 | 7,235 | 80,986 | 35,962 | -17,829 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,805 | 0,757 | 10,092 | 37,246 | 2,416 | 61,384 | - | p<0,01 |

Ensaio nº 3 - aspersores com deflectores estriados - 01-09-1998

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|-----------------|-------------|-------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| Ensaio 3* | Posição 2,1 | n 10 | ipmáx 32,8 | ipmin 18,9 | tmin 0,05 | tmáx 0,45 | 3 cm 7,9 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,875 | 0,813 | 1,860 | 24,530 | 14,395 | 21,941 | 3,328 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,821 | 0,769 | 2,086 | 36,575 | 17,321 | -0,228 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,846 | 0,769 | 2,065 | 19,244 | 230,395 | -0,026 | -215,103 | p<0,01 |
| Philip | 0,775 | 0,711 | 2,334 | 27,616 | 8,967 | 14,682 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,903 | 0,876 | 1,531 | 74,741 | 20,138 | 1,169 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio 3* | Posição 2,2 | n 9 | ipmáx 61,1 | ipmin 10,4 | tmin 0,0333 | tmáx 0,4167 | 3 cm 11,2 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,782 | 0,651 | 8,722 | 10,738 | 16,375 | 52,797 | 8,662 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,735 | 0,646 | 8,903 | 19,371 | 13,729 | -0,424 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,762 | 0,619 | 9,113 | 9,586 | 198,829 | -0,067 | -193,473 | p<0,05 |
| Philip | 0,726 | 0,634 | 9,053 | 18,508 | 20,193 | 4,015 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,833 | 0,777 | 7,062 | 34,910 | 23,952 | 2,132 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio 3* | Posição 2,3 | n 9 | ipmáx 106,1 | ipmin 15,4 | tmin 0,0167 | tmáx 0,7000 | 3 cm 9,7 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,996 | 0,993 | 2,270 | 679,231 | 17,659 | 132,742 | 24,370 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,981 | 0,975 | 4,353 | 364,049 | 9,258 | -0,593 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,846 | 0,753 | 13,436 | 16,471 | -5081,137 | 0,005 | -5081,137 | p<0,01 |
| Philip | 0,973 | 0,963 | 5,245 | 248,608 | 27,967 | -5,600 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,958 | 0,944 | 6,522 | 158,309 | 0,149 | 1066,949 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio 3* | Posição 4,1 | n 11 | ipmáx 96,4 | ipmin 11 | tmin 0,0167 | tmáx 0,5000 | 3 cm 8,0 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,946 | 0,923 | 7,186 | 70,396 | 15,599 | 108,772 | 18,424 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,936 | 0,920 | 7,385 | 131,862 | 8,940 | -0,589 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,940 | 0,915 | 7,576 | 62,929 | 16,779 | -0,459 | -11,784 | p<0,01 |
| Philip | 0,940 | 0,925 | 7,166 | 140,663 | 27,532 | -7,692 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,915 | 0,893 | 8,536 | 96,456 | 0,234 | 600,690 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio 3* | Posição 4,2 | n 7 | ipmáx 34,7 | ipmin 9,6 | tmin 0,0833 | tmáx 0,5167 | 3 cm 8,9 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,837 | 0,675 | 4,085 | 10,296 | 12,138 | 136,178 | 23,199 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,768 | 0,652 | 4,361 | 16,581 | 5,705 | -0,651 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,861 | 0,722 | 3,779 | 12,366 | 0,042 | -2,503 | 11,706 | p<0,05 |
| Philip | 0,754 | 0,630 | 4,497 | 15,290 | 18,081 | -3,359 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,771 | 0,656 | 4,337 | 16,819 | 10,441 | 2,944 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio 3* | Posição 4,3 | n 10 | ipmáx 77,2 | ipmin 5,5 | tmin 0,7 | tmáx 0,0333 | 3 cm 8,8 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,965 | 0,947 | 4,322 | 95,869 | 12,400 | 100,364 | 13,064 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,956 | 0,944 | 4,502 | 175,090 | 7,079 | -0,701 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,960 | 0,939 | 4,634 | 82,935 | 4,117 | -0,842 | 5,146 | p<0,01 |
| Philip | 0,939 | 0,922 | 5,302 | 124,049 | 31,033 | -10,982 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,865 | 0,826 | 7,925 | 51,093 | 0,123 | 1105,835 | - | p<0,01 |

Ensaio nº 4 - aspersores com deflectores lisos - 08-09-1998

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|----------|----------|-----------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 4 | 2,1 | 9 | 56,7 | 14,2 | 0,15 | 0,8167 | | 9,0 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,807 | 0,663 | 7,526 | 10,466 | -999,378 | 1064,546 | 0,059 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,524 | 0,334 | 10,794 | 6,607 | 23,936 | -0,450 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,637 | 0,365 | 10,328 | 4,385 | 2935,374 | -0,007 | -2918,018 | ns |
| Philip | 0,517 | 0,324 | 10,873 | 6,424 | 44,495 | 0,600 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,786 | 0,700 | 7,244 | 21,988 | 39,795 | 0,140 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 4 | 2,2 | 7 | 56,3 | 23,4 | 0,3167 | 0,7 | | 8,3 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,841 | 0,681 | 6,180 | 10,544 | -235,028 | 319,787 | 0,302 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,791 | 0,687 | 6,324 | 18,956 | 20,386 | -0,896 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,822 | 0,643 | 6,538 | 9,207 | 315,593 | -0,113 | -302,654 | p<0,05 |
| Philip | 0,808 | 0,712 | 6,063 | 21,069 | 104,380 | -35,625 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,768 | 0,653 | 6,663 | 16,585 | 44,001 | 0,002 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 4 | 2,3 | 9 | 62,7 | 18,1 | 0,2667 | 0,8167 | | 8,7 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,828 | 0,725 | 6,749 | 14,479 | -867,381 | 954,393 | 0,087 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,670 | 0,560 | 8,661 | 14,225 | 26,824 | -0,702 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,749 | 0,599 | 8,160 | 8,957 | 1170,663 | -0,031 | -1151,656 | p<0,05 |
| Philip | 0,697 | 0,596 | 8,304 | 16,095 | 96,565 | -24,593 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,796 | 0,728 | 6,816 | 27,275 | 47,687 | 0,001 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 4 | 4,1 | 5 | 51,2 | 35,0 | 0,2667 | 0,500 | | 7,4 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,887 | 0,548 | 2,862 | 7,847 | 29,445 | 64,214 | 4,226 | ns |
| Kostiakov | 0,890 | 0,780 | 2,306 | 24,254 | 26,601 | -0,481 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,890 | 0,561 | 2,819 | 8,116 | 10,788 | -0,830 | 18,102 | ns |
| Philip | 0,890 | 0,780 | 2,305 | 24,263 | 50,240 | 1,625 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,910 | 0,820 | 2,087 | 30,254 | 11,623 | 43,003 | - | p<0,05 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 4 | 4,2 | 8 | 50,5 | 22,6 | 0,2833 | 0,6333 | | 8,5 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,669 | 0,421 | 6,522 | 5,055 | 22,351 | 102,959 | 4,850 | ns |
| Kostiakov | 0,665 | 0,531 | 5,992 | 11,901 | 19,149 | -0,731 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,666 | 0,415 | 6,552 | 4,983 | 10,544 | -1,019 | 10,288 | ns |
| Philip | 0,662 | 0,527 | 6,013 | 11,773 | 68,246 | -16,320 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,765 | 0,670 | 5,022 | 19,481 | 37,977 | 0,001 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | | 3 cm |
| 4 | 4,3 | 7 | 63,9 | 37,1 | 0,2667 | 0,65 | | 8,6 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,856 | 0,713 | 4,425 | 11,922 | 37,660 | 139,606 | 6,310 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,841 | 0,761 | 4,165 | 26,439 | 30,880 | -0,531 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,856 | 0,711 | 4,435 | 11,863 | 4,024 | -1,563 | 31,955 | p<0,05 |
| Philip | 0,840 | 0,760 | 4,175 | 26,276 | 66,769 | -2,532 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,857 | 0,786 | 3,948 | 29,978 | 14,000 | 51,377 | - | p<0,01 |

Ensaio nº 5 - aspersores com deflectores lisos - 10-09-1998

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|---------|---------|----------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 2,1 | 6 | 38,6 | 22,5 | 0,05 | 0,3 | 23,1 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,768 | 0,421 | 3,670 | 4,972 | 24,030 | 27,757 | 13,054 | ns |
| Kostiakov | 0,776 | 0,627 | 3,123 | 13,872 | 17,086 | -0,269 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,780 | 0,449 | 3,580 | 5,304 | 4,693 | -0,536 | 15,175 | ns |
| Philip | 0,779 | 0,632 | 3,100 | 14,138 | 10,928 | 14,083 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,912 | 0,853 | 1,963 | 41,231 | 20,595 | 1,601 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 2,2 | 8 | 45 | 18,3 | 0,05 | 0,3 | 21,4 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,914 | 0,849 | 3,449 | 26,559 | 13,814 | 43,851 | 6,215 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,873 | 0,822 | 3,828 | 41,167 | 13,303 | -0,429 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,901 | 0,827 | 3,698 | 22,778 | 206,649 | -0,061 | -201,376 | p<0,01 |
| Philip | 0,865 | 0,811 | 3,939 | 38,536 | 20,035 | 3,877 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,908 | 0,871 | 3,256 | 59,179 | 13,580 | 5,687 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 2,3 | 9 | 96,4 | 23,1 | 0,0167 | 0,2667 | 19,5 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,887 | 0,819 | 8,273 | 23,479 | 33,059 | 104,573 | 31,713 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,906 | 0,875 | 6,959 | 67,847 | 13,923 | -0,465 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,918 | 0,869 | 7,046 | 33,508 | 2,985 | -0,786 | 21,179 | p<0,01 |
| Philip | 0,909 | 0,879 | 6,857 | 70,081 | 22,976 | 4,346 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,932 | 0,909 | 5,943 | 95,619 | 14,099 | 8,180 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 4,1 | 5 | 36,6 | 22,9 | 0,0833 | 0,1667 | 16,7 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,734 | 0,000 | 5,034 | 2,763 | 18,878 | 85,018 | 17,657 | ns |
| Kostiakov | 0,725 | 0,451 | 4,179 | 7,922 | 6,356 | -0,722 | - | ns |
| Kost-Lewis | 0,722 | 0,000 | 5,145 | 2,603 | 0,791 | -1,379 | 14,237 | ns |
| Philip | 0,724 | 0,448 | 4,189 | 7,870 | 29,506 | -13,085 | - | ns |
| G_Ampt | 0,762 | 0,523 | 3,893 | 9,581 | 31,979 | 0,001 | - | ns |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 4,2 | 5 | 35 | 26,6 | 0,1167 | 0,175 | 15,3 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,615 | 0,000 | 2,866 | 1,595 | -91,807 | 139,733 | 0,833 | ns |
| Kostiakov | 0,559 | 0,117 | 2,504 | 3,799 | 13,560 | -0,442 | - | ns |
| Kost-Lewis | 0,000 | 0,000 | - | - | - | - | - | ns |
| Philip | 0,556 | 0,113 | 2,511 | 3,762 | 21,729 | 3,273 | - | ns |
| G_Ampt | 0,773 | 0,545 | 1,797 | 10,018 | 27,049 | 0,876 | - | ns |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 4,3 | 6 | 41 | 25 | 0,0667 | 0,2833 | 18,0 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,830 | 0,574 | 2,866 | 7,307 | 9,795 | 36,552 | 2,970 | ns |
| Kostiakov | 0,819 | 0,698 | 2,562 | 18,042 | 18,529 | -0,295 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,825 | 0,563 | 2,902 | 7,089 | 46,561 | -0,157 | -30,164 | ns |
| Philip | 0,806 | 0,676 | 2,650 | 16,596 | 14,352 | 13,701 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,910 | 0,851 | 1,800 | 40,639 | 22,009 | 2,332 | - | p<0,01 |

Ensaio nº 6 - aspersores com deflectores lisos - 15-09-1998

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|---------|----------|---------|----------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 2,1 | 6 | 40 | 16,8 | 0,1167 | 0,3833 | 11,5 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,985 | 0,964 | 1,399 | 101,564 | -184,549 | 236,334 | 0,426 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,897 | 0,829 | 3,218 | 34,954 | 10,788 | -0,639 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,945 | 0,872 | 2,621 | 27,864 | 232,002 | -0,077 | -231,702 | p<0,05 |
| Philip | 0,913 | 0,855 | 2,965 | 41,888 | 36,145 | -10,067 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,856 | 0,759 | 3,816 | 23,704 | 1,770 | 99,019 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 2,2 | 7 | 54 | 36,5 | 0,0833 | 0,2333 | 10,4 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,605 | 0,210 | 5,690 | 3,063 | 28,162 | 49,324 | 7,370 | ns |
| Kostiakov | 0,598 | 0,397 | 5,132 | 7,448 | 21,699 | -0,375 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,600 | 0,199 | 5,729 | 2,995 | 32,358 | -0,296 | -12,489 | ns |
| Philip | 0,596 | 0,394 | 5,148 | 7,372 | 25,395 | 11,351 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,798 | 0,697 | 3,640 | 19,749 | 32,135 | 2,604 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 2,3 | 9 | 57,9 | 20,8 | 0,0833 | 0,6333 | 10,2 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,839 | 0,743 | 5,788 | 15,665 | 7,175 | 59,380 | 2,303 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,787 | 0,716 | 6,167 | 25,885 | 21,815 | -0,408 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,825 | 0,719 | 6,047 | 14,101 | 443,685 | -0,037 | -428,476 | p<0,01 |
| Philip | 0,776 | 0,701 | 6,327 | 24,243 | 31,480 | 6,488 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,860 | 0,814 | 4,999 | 43,056 | 24,437 | 6,392 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 4,1 | 7 | 60,6 | 23,1 | 0,0833 | 0,3333 | 9,6 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,918 | 0,836 | 4,731 | 22,399 | -569,358 | 638,542 | 0,222 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,813 | 0,719 | 5,907 | 21,712 | 17,488 | -0,496 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,857 | 0,714 | 5,772 | 11,989 | 312,000 | -0,065 | -307,345 | p<0,05 |
| Philip | 0,813 | 0,720 | 5,899 | 21,790 | 35,655 | -1,231 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,850 | 0,775 | 5,283 | 28,396 | 19,294 | 9,093 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 4,2 | 7 | 79,6 | 32,1 | 0,06667 | 0,3 | 8,8 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,854 | 0,708 | 9,195 | 11,693 | 22,043 | 126,261 | 10,745 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,823 | 0,734 | 9,055 | 23,238 | 11,951 | -0,719 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,827 | 0,655 | 9,999 | 9,580 | 31,526 | -0,469 | -29,362 | p<0,05 |
| Philip | 0,827 | 0,741 | 8,945 | 23,939 | 55,525 | -24,332 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,759 | 0,638 | 10,568 | 15,732 | 26,764 | 6,712 | - | p<0,05 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 4,3 | 8 | 69,4 | 29,5 | 0,0667 | 0,2833 | 9,6 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,861 | 0,757 | 6,763 | 15,489 | 0,236 | 88,118 | 3,816 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,814 | 0,739 | 7,145 | 26,239 | 17,858 | -0,508 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,000 | 0,000 | - | - | - | - | - | ns |
| Philip | 0,815 | 0,741 | 7,125 | 26,422 | 37,778 | -2,010 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,844 | 0,782 | 6,535 | 32,533 | 19,136 | 10,796 | - | p<0,01 |

Anexos

Ensaio nº 1 - aspersores com deflectores lisos - 22/06/1999

| | Ensaio 1 | Posição 4,1 | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | Hum (% vol) 3 cm |
|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|------------------|
| | | | - | - | - | - | - | - |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kostiakov | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kost-Lewis | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Philip | - | - | - | - | - | - | - | - |
| G_Ampt | - | - | - | - | - | - | - | - |

| | Ensaio 1 | Posição 4,2 | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | Hum (% vol) 3 cm |
|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|------------------|
| | | | 9 | 132,5 | 34 | 0,1917 | 0,5917 | 9,2 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,817 | 0,708 | 16,248 | 13,411 | -0,120 | 210,726 | 2,909 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,811 | 0,748 | 15,308 | 29,979 | 26,811 | -0,939 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,822 | 0,715 | 16,047 | 13,826 | 249,027 | -0,232 | -242,882 | p<0,01 |
| Philip | 0,820 | 0,759 | 14,944 | 31,801 | 171,323 | -71,189 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,781 | 0,707 | 16,482 | 24,897 | 88,787 | 0,001 | - | p<0,01 |

| | Ensaio 1 | Posição 4,3 | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | Hum (% vol) 3 cm |
|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|----------|-----------|----------|----------|------------------|
| | | | 8 | 135 | 34,3 | 0,2 | 0,525 | 5,1 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,878 | 0,787 | 14,011 | 18,067 | -1246,675 | 1429,304 | 0,198 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,793 | 0,711 | 16,682 | 23,018 | 30,917 | -0,900 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,841 | 0,721 | 16,038 | 13,198 | 840,158 | -0,091 | -842,597 | p<0,05 |
| Philip | 0,819 | 0,746 | 15,615 | 27,117 | 189,160 | -79,394 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,794 | 0,712 | 16,643 | 23,152 | 95,715 | 0,001 | - | p<0,01 |

Ensaio nº 2 - aspersores com deflectores lisos - 24/06/1999

| | Ensaio 2 | Posição 4,1 | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | Hum (% vol) 3 cm |
|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|------------------|
| | | | 9 | 87,9 | 48,2 | 0,075 | 0,167 | 15,7 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,761 | 0,618 | 7,875 | 9,549 | 32,550 | 128,869 | 12,229 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,765 | 0,686 | 7,235 | 22,734 | 15,015 | -0,668 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,761 | 0,617 | 7,882 | 9,527 | 1,339 | -1,410 | 34,424 | p<0,05 |
| Philip | 0,765 | 0,686 | 7,236 | 22,727 | 58,370 | -22,102 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,761 | 0,681 | 7,290 | 22,293 | 43,805 | 3,752 | - | p<0,01 |

| | Ensaio 2 | Posição 4,2 | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | Hum (% vol) 3 cm |
|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|------------------|
| | | | 6 | 137,8 | 49,8 | 0,05 | 0,2 | 11,6 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,712 | 0,279 | 21,293 | 3,702 | 25,993 | 133,928 | 7,547 | ns |
| Kostiakov | 0,706 | 0,511 | 18,605 | 9,625 | 25,969 | -0,513 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,000 | 0,000 | - | - | - | - | - | ns |
| Philip | 0,707 | 0,511 | 18,595 | 9,641 | 55,397 | -3,084 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,795 | 0,658 | 15,553 | 15,500 | 63,841 | 4,072 | - | p<0,05 |

| | Ensaio 2 | Posição 4,3 | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | Hum (% vol) 3 cm |
|-----------------|-----------|-------------------|--------------------|----------|-----------|----------|-----------|------------------|
| | | | 5 | 96,4 | 31,2 | 0,033 | 0,217 | 15,0 |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,842 | 0,366 | 16,862 | 5,310 | -1711,914 | 1830,759 | 0,226 | ns |
| Kostiakov | 0,572 | 0,144 | 22,628 | 4,009 | 28,618 | -0,387 | - | ns |
| Kost-Lewis | 0,668 | 0,000 | 24,399 | 2,014 | 1372,270 | -0,024 | -1379,386 | ns |
| Philip | 0,548 | 0,095 | 23,263 | 3,631 | 34,786 | 13,570 | - | ns |
| G_Ampt | 0,819 | 0,639 | 14,703 | 13,600 | 69,034 | 0,969 | - | p<0,05 |

Ensaio nº 3 - aspersores com deflectores lisos - 30/06/1999

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|-----------|----------|----------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 3 | 4,1 | 5 | 90,9 | 65,6 | 0,0583 | 0,1667 | 7,5 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,606 | 0,016 | 17,647 | 2,311 | -1435,454 | 1569,524 | 0,249 | ns |
| Kostiakov | 0,531 | 0,063 | 8,954 | 3,403 | 43,542 | -0,243 | - | ns |
| Kost-Lewis | 0,467 | 0,000 | 20,545 | 1,312 | 677,483 | -0,047 | -663,580 | ns |
| Philip | 0,544 | 0,088 | 8,834 | 3,578 | 23,241 | 39,028 | - | ns |
| G_Ampt | 0,819 | 0,639 | 5,559 | 13,614 | 58,474 | 2,230 | - | p<0,05 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 3 | 4,2 | 7 | 107,2 | 42 | 0,05 | 0,1417 | 5,9 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,722 | 0,305 | 14,957 | 3,892 | -359,182 | 512,564 | 1,423 | ns |
| Kostiakov | 0,695 | 0,491 | 13,568 | 9,107 | 13,627 | -0,778 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,000 | 0,000 | - | - | - | - | - | ns |
| Philip | 0,701 | 0,502 | 13,422 | 9,392 | 82,060 | -47,363 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,792 | 0,654 | 11,195 | 15,250 | 83,975 | 0,001 | - | p<0,05 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 3 | 4,3 | 7 | 101,3 | 42,1 | 0,0667 | 0,1833 | 8,2 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,631 | 0,262 | 17,495 | 3,423 | 32,123 | 142,046 | 11,096 | ns |
| Kostiakov | 0,631 | 0,446 | 15,657 | 8,541 | 16,683 | -0,667 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,632 | 0,264 | 17,479 | 3,432 | 33,425 | -0,493 | -26,095 | ns |
| Philip | 0,632 | 0,448 | 15,635 | 8,580 | 65,033 | -24,848 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,773 | 0,661 | 12,255 | 17,001 | 76,567 | 0,001 | - | p<0,01 |

Ensaio nº 4 - aspersores com deflectores lisos - 02/07/1999

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|--------|---------|--------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 4 | 4,1 | - | - | - | - | - | - | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kostiakov | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Kost-Lewis | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Philip | - | - | - | - | - | - | - | - |
| G_Ampt | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 4 | 4,2 | 5 | 128,6 | 62,7 | 0,05 | 0,1333 | 12,5 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,971 | 0,883 | 6,852 | 33,154 | 63,402 | 619,691 | 44,675 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,918 | 0,835 | 9,377 | 33,469 | 14,207 | -0,726 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,961 | 0,845 | 7,875 | 24,855 | 0,114 | -2,162 | 55,521 | p<0,05 |
| Philip | 0,905 | 0,809 | 10,084 | 28,538 | 70,991 | -35,532 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,827 | 0,655 | 13,579 | 14,391 | 6,045 | 99,948 | - | p<0,05 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 4 | 4,3 | 3 | 67,5 | 41,5 | 0,1 | 0,2167 | 12,9 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,000 | 0,000 | - | - | - | - | - | ns |
| Kostiakov | 0,899 | 0,799 | 7,052 | 17,895 | 19,823 | -0,538 | - | ns |
| Kost-Lewis | 0,000 | 0,000 | - | - | - | - | - | ns |
| Philip | 0,901 | 0,803 | 5,776 | 18,278 | 46,627 | -5,145 | - | ns |
| G_Ampt | 0,899 | 0,797 | 5,858 | 17,713 | 7,897 | 49,736 | - | ns |

Ensaio nº 5 - aspersores com deflectores estriados - 19/07/1999

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|--------|---------|--------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 4,1 | 11 | 81,0 | 41,3 | 0,1667 | 0,4167 | 7,2 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,770 | 0,671 | 6,858 | 13,356 | 44,483 | 132,214 | 7,939 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,761 | 0,701 | 6,590 | 28,592 | 30,130 | -0,538 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,765 | 0,664 | 6,930 | 12,994 | 7,502 | -1,051 | 30,301 | p<0,01 |
| Philip | 0,760 | 0,700 | 6,598 | 28,497 | 67,940 | -4,357 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,810 | 0,762 | 5,874 | 38,312 | 29,574 | 17,645 | - | p<0,01 |

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|--------|---------|--------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 4,2 | 10 | 77,2 | 46,7 | 0,1667 | 0,4167 | 4,3 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,834 | 0,741 | 5,442 | 15,511 | 42,442 | 137,195 | 7,778 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,826 | 0,768 | 5,218 | 33,263 | 27,845 | -0,584 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,828 | 0,725 | 5,600 | 14,483 | 11,005 | -0,920 | 22,471 | p<0,01 |
| Philip | 0,825 | 0,767 | 5,237 | 32,918 | 72,778 | -10,047 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,829 | 0,772 | 5,180 | 33,864 | 21,835 | 30,012 | - | p<0,01 |

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|---------|---------|--------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 5 | 4,3 | 13 | 139,7 | 48,9 | 0,0806 | 0,2931 | 5,0 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,898 | 0,864 | 9,370 | 44,161 | 48,074 | 221,325 | 10,864 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,897 | 0,876 | 9,012 | 95,289 | 23,447 | -0,715 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,897 | 0,862 | 9,449 | 43,335 | 26,606 | -0,678 | -5,116 | p<0,01 |
| Philip | 0,895 | 0,875 | 9,057 | 94,220 | 102,019 | -39,729 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,812 | 0,774 | 12,158 | 47,396 | 3,849 | 317,123 | - | p<0,01 |

Ensaio nº 6 - aspersores com deflectores estriados - 21/07/1999

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 4,1 | 9 | 92,6 | 45,6 | 0,0417 | 0,1833 | 14,8 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,730 | 0,528 | 8,848 | 6,768 | 40,707 | 87,108 | 14,417 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,743 | 0,640 | 7,883 | 17,356 | 22,372 | -0,437 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,000 | 0,000 | - | - | - | - | - | ns |
| Philip | 0,743 | 0,640 | 7,884 | 17,350 | 33,308 | 8,428 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,828 | 0,759 | 6,449 | 28,894 | 34,470 | 5,078 | - | p<0,01 |

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|---------|--------|---------|--------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 4,2 | 8 | 88,7 | 33 | 0,0833 | 0,2000 | 14,4 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,969 | 0,938 | 4,355 | 62,278 | 11,065 | 156,392 | 8,909 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,963 | 0,944 | 4,252 | 129,877 | 9,106 | -0,908 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,963 | 0,927 | 4,720 | 52,721 | 11,184 | -0,844 | -4,852 | p<0,01 |
| Philip | 0,968 | 0,953 | 3,920 | 153,665 | 78,734 | -50,006 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,779 | 0,669 | 10,378 | 17,640 | 12,253 | 32,662 | - | p<0,01 |

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|-----------|----------|----------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 6 | 4,3 | 11 | 108,5 | 35,1 | 0,0333 | 0,2000 | 14,4 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,793 | 0,705 | 12,443 | 15,362 | -2059,389 | 2193,625 | 0,199 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,533 | 0,416 | 17,641 | 10,266 | 36,429 | -0,356 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,607 | 0,439 | 17,153 | 6,189 | 962,950 | -0,035 | -958,037 | p<0,05 |
| Philip | 0,503 | 0,379 | 18,193 | 9,114 | 37,084 | 23,203 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,824 | 0,780 | 10,830 | 42,114 | 73,490 | 1,322 | - | p<0,01 |

Ensaio n° 7 - aspersores com deflectores estriados - 27/07/1999

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|---------|----------|---------|----------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 7 | 4,1 | 8 | 79,3 | 40,4 | 0,0750 | 0,2000 | 11,5 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,692 | 0,460 | 10,529 | 5,608 | 7,397 | 100,482 | 5,789 | ns |
| Kostiakov | 0,675 | 0,545 | 9,865 | 12,475 | 16,308 | -0,579 | - | p<0,05 |
| Kost-Lewis | 0,680 | 0,440 | 10,726 | 5,314 | 36,234 | -0,394 | -27,672 | ns |
| Phillip | 0,677 | 0,548 | 9,830 | 12,604 | 45,570 | -10,012 | - | p<0,05 |
| G_Ampt | 0,770 | 0,678 | 8,304 | 20,073 | 52,356 | 1,229 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 7 | 4,2 | 9 | 94,3 | 43,2 | 0,0750 | 0,1750 | 8,9 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,985 | 0,977 | 2,888 | 201,410 | 40,892 | 560,749 | 31,870 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,964 | 0,952 | 4,168 | 189,285 | 7,416 | -0,963 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,984 | 0,974 | 3,021 | 183,753 | 0,121 | -2,380 | 34,950 | p<0,01 |
| Phillip | 0,949 | 0,932 | 4,970 | 131,044 | 77,768 | -53,587 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,753 | 0,670 | 10,977 | 21,292 | 34,772 | 6,196 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 7 | 4,3 | 11 | 123,5 | 21,1 | 0,0333 | 0,1750 | 10,7 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,814 | 0,735 | 14,023 | 17,544 | -825,162 | 948,190 | 0,635 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,717 | 0,646 | 16,329 | 22,778 | 13,972 | -0,619 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,772 | 0,674 | 15,536 | 13,554 | 382,900 | -0,097 | -419,694 | p<0,01 |
| Phillip | 0,732 | 0,666 | 15,872 | 24,637 | 50,580 | -22,338 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,790 | 0,737 | 14,069 | 33,809 | 66,694 | 0,692 | - | p<0,01 |

Ensaio n° 8 - aspersores com deflectores estriados - 29/07/1999

| | | | | | | | | Hum (% vol) |
|------------|---------|------------|-------------|--------|--------|---------|---------|-------------|
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 8 | 4,1 | 11 | 102,9 | 48,2 | 0,0500 | 0,1500 | 14,6 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,633 | 0,450 | 11,341 | 6,026 | 51,583 | 140,884 | 25,650 | p<0,05 |
| Kostiakov | 0,624 | 0,517 | 10,726 | 13,301 | 20,334 | -0,495 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,629 | 0,444 | 11,394 | 5,939 | 2,194 | -1,065 | 37,322 | p<0,05 |
| Phillip | 0,625 | 0,517 | 10,724 | 13,307 | 39,552 | 1,098 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,754 | 0,684 | 8,679 | 24,532 | 49,225 | 2,439 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 8 | 4,2 | 7 | 80,4 | 32,1 | 0,0500 | 0,1667 | 10,2 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,770 | 0,540 | 7,196 | 6,693 | 47,221 | 142,375 | 30,197 | ns |
| Kostiakov | 0,781 | 0,671 | 6,283 | 17,805 | 19,860 | -0,452 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,794 | 0,589 | 6,802 | 7,729 | 0,396 | -1,521 | 41,338 | p<0,05 |
| Phillip | 0,782 | 0,673 | 6,264 | 17,944 | 31,652 | 6,081 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,853 | 0,779 | 5,145 | 29,003 | 27,073 | 6,215 | - | p<0,01 |
| | | | | | | | | Hum (% vol) |
| Ensaio | Posição | n | ipmáx | ipmin | tmin | tmáx | 3 cm | |
| 8 | 4,3 | 8 | 100,3 | 21,3 | 0,0417 | 0,1583 | 11,9 | |
| equações | r2 | r2ajustado | Fit Std Err | F | a | b | c | Signf. |
| Horton | 0,855 | 0,746 | 12,094 | 14,721 | 19,768 | 172,541 | 18,208 | p<0,01 |
| Kostiakov | 0,849 | 0,788 | 11,276 | 33,620 | 6,070 | -0,891 | - | p<0,01 |
| Kost-Lewis | 0,854 | 0,745 | 12,113 | 14,665 | 34,701 | -0,472 | -54,465 | p<0,01 |
| Phillip | 0,854 | 0,796 | 11,059 | 35,189 | 60,982 | -48,088 | - | p<0,01 |
| G_Ampt | 0,776 | 0,686 | 13,714 | 20,784 | 61,773 | 0,100 | - | p<0,01 |

Anexo F – Escorrimento medido (mm)

| Data | Deflectores estriados | |
|------------|-----------------------|-------------|
| | Raio 3 | Raio 1 |
| 25-08-1998 | 0,02 | 0,00 |
| | 1,73 | 0,00 |
| | - | 0,22 |
| Média | 0,88 | 0,07 |
| 27-08-1998 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,36 | 0,00 |
| | 1,13 | 0,46 |
| Média | 0,50 | 0,15 |
| 01-09-1998 | - | 0,00 |
| | 0,67 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,25 |
| Média | 0,34 | 0,08 |

| Data | Deflectores lisos | |
|------------|-------------------|-------------|
| | Raio 3 | Raio 1 |
| 08-09-1998 | - | 0,00 |
| | - | 0,00 |
| | - | 0,05 |
| Média | - | 0,02 |
| 10-09-1998 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,00 |
| Média | 0,00 | 0,00 |
| 15-09-1998 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,00 |
| Média | 0,00 | 0,00 |

| Data | Deflectores lisos | |
|------------|-------------------|-------------|
| | Raio 2 | Raio 1 |
| 22-06-1999 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,00 |
| Média | 0,00 | 0,00 |
| 24-06-1999 | 0,00 | 0,01 |
| | 0,07 | 0,00 |
| | 0,96 | 0,00 |
| Média | 0,34 | 0,00 |
| 26-06-1999 | 0,03 | 0,02 |
| | 0,02 | 0,10 |
| | 2,78 | 0,73 |
| Média | 0,94 | 0,28 |
| 30-06-1999 | 0,00 | 0,06 |
| | 0,00 | 0,00 |
| | 1,30 | 1,03 |
| Média | 0,43 | 0,36 |
| 02-07-1999 | 0,12 | 0,36 |
| | 0,00 | 0,00 |
| | 1,89 | 1,91 |
| Média | 0,67 | 0,76 |

| Data | Def. estriados | |
|------------|----------------|-------------|
| | Raio 2 | Raio 1 |
| 19-07-1999 | 0,08 | 0,59 |
| | 0,00 | 0,00 |
| | 0,04 | 0,00 |
| Média | 0,04 | 0,20 |
| 21-07-1999 | 0,00 | 0,06 |
| | 2,00 | 1,22 |
| | 1,15 | 0,00 |
| Média | 1,05 | 0,43 |
| 23-07-1999 | 1,78 | 0,19 |
| | 2,78 | 1,60 |
| | 2,16 | 0,77 |
| Média | 2,24 | 0,85 |
| 27-07-1999 | 3,37 | 0,91 |
| | 3,45 | 2,22 |
| | 4,57 | 2,14 |
| Média | 3,80 | 1,76 |
| 29-07-1999 | 2,04 | 1,99 |
| | 4,16 | 4,21 |
| | 2,61 | 3,38 |
| Média | 2,94 | 3,19 |

Anexo G – Sedimentos recolhidos (g)

| Data | Deflectores lisos | | Data | Def. estriados | |
|------------|-------------------|-------------|------------|----------------|--------------|
| | Raio 2 | Raio 1 | | Raio 2 | Raio 1 |
| 22-06-1999 | 0,00 | 0,00 | 19-07-1999 | 0,31 | 0,99 |
| | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 |
| | 0,00 | 0,00 | | 0,11 | 0,00 |
| Média | 0,00 | 0,00 | Média | 0,14 | 0,33 |
| 24-06-1999 | 0,00 | 0,00 | 21-07-1999 | 0,00 | 0,18 |
| | 0,00 | 0,00 | | 7,16 | 4,96 |
| | 0,00 | 0,00 | | 1,42 | 0,00 |
| Média | 0,00 | 0,00 | Média | 2,86 | 1,71 |
| 26-06-1999 | 0,00 | 0,00 | 23-07-1999 | 13,82 | 0,43 |
| | 0,00 | 0,00 | | 6,03 | 4,29 |
| | 5,10 | 0,77 | | 1,40 | 2,13 |
| Média | 1,70 | 0,26 | Média | 7,08 | 2,28 |
| 30-06-1999 | 0,00 | 0,06 | 27-07-1999 | 12,34 | 3,43 |
| | 0,00 | 0,00 | | 35,93 | 17,40 |
| | 2,40 | 2,16 | | 11,30 | 12,16 |
| Média | 0,80 | 0,74 | Média | 19,86 | 11,00 |
| 02-07-1999 | 0,14 | 0,31 | 29-07-1999 | 10,56 | 43,59 |
| | 0,00 | 0,00 | | 4,49 | 14,12 |
| | 5,52 | 11,99 | | 2,66 | 74,41 |
| Média | 1,89 | 4,10 | Média | 5,90 | 44,04 |

Anexo H – Rugosidade Aleatória (RR, mm)

| Data | Deflectores estriados |
|------------|-----------------------|
| 24-08-1998 | 0,054 |
| | 0,045 |
| | 0,064 |
| Média | 0,054 |
| 27-08-1998 | 0,061 |
| | 0,045 |
| | 0,063 |
| Média | 0,056 |
| 31-08-1998 | 0,064 |
| | 0,044 |
| | 0,06 |
| Média | 0,056 |

| Data | Deflectores lisos |
|------------|-------------------|
| 07-09-1998 | 0,042 |
| | 0,086 |
| | 0,044 |
| Média | 0,057 |
| 09-09-1998 | 0,039 |
| | 0,079 |
| | 0,041 |
| Média | 0,053 |
| 14-09-1998 | 0,032 |
| | 0,074 |
| | 0,033 |
| Média | 0,046 |

| Data | Deflectores lisos |
|------------|-------------------|
| 21-06-1999 | 0,079 |
| | 0,081 |
| | 0,054 |
| Média | 0,071 |
| 23-06-1999 | 0,077 |
| | 0,079 |
| | 0,053 |
| Média | 0,070 |
| 25-06-1999 | 0,076 |
| | 0,076 |
| | 0,054 |
| Média | 0,069 |
| 29-06-1999 | 0,073 |
| | 0,074 |
| | 0,054 |
| Média | 0,067 |
| 01-07-1999 | 0,079 |
| | 0,077 |
| | 0,047 |
| Média | 0,068 |

| Data | Deflectores estriados |
|------------|-----------------------|
| 17-07-1999 | 0,040 |
| | 0,050 |
| | 0,054 |
| Média | 0,048 |
| 20-07-1999 | 0,037 |
| | 0,057 |
| | 0,047 |
| Média | 0,047 |
| 23-07-1999 | 0,028 |
| | 0,046 |
| | 0,039 |
| Média | 0,038 |
| 27-07-1999 | 0,028 |
| | 0,048 |
| | 0,039 |
| Média | 0,038 |
| 29-07-1999 | 0,033 |
| | 0,050 |
| | 0,032 |
| Média | 0,038 |

Anexo I - Análises estatísticas com diferenças significativas

* - Indica a existência de diferenças significativas ($p < 0,05$);

N – nº observações, M – média, σ - desvio padrão.

I.1 – Análise dos coeficientes de uniformidade da rega (teste LSD)

| DEF | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|------------|----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | M = 92,5 $\sigma = 1,378$ | M = 90,6 $\sigma = 3,806$ | M = 76,2 $\sigma = 4,708$ | M = 83,3 $\sigma = 8,642$ |
| Liso98 (1) | 6 | | 0,506 | 0,000* | 0,003* |
| Liso99 (2) | 10 | 0,506 | | 0,000* | 0,005* |
| Est98 (4) | 6 | 0,000* | 0,000* | | 0,016* |
| Est99 (5) | 10 | 0,003* | 0,005* | 0,016* | |

I.2 – Análise dos valores do escoamento durante o ano de 1998 (teste LSD)

I.2.1 – Valores da 1ª rega

| DEF | RAIO | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|--------|---|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 0,88 $\sigma = 1,209$ | M = 0,07 $\sigma = 0,127$ | M = 0,00 $\sigma = \text{---}$ | M = 0,02 $\sigma = 0,027$ |
| Est_98 | R3 (1) | 2 | | 0,169 | --- | 0,146 |
| Est_98 | R1 (2) | 3 | 0,169 | | --- | 0,904 |
| Liso_98 | R3 (3) | 0 | --- | --- | | --- |
| Liso_98 | R1 (4) | 3 | 0,146 | 0,904 | --- | |

I.2.2 – Valores da 2ª rega

| DEF | RAIO | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|--------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 0,50 $\sigma = 0,577$ | M = 0,15 $\sigma = 0,266$ | M = 0,00 $\sigma = 0,000$ | M = 0,00 $\sigma = 0,000$ |
| Est_98 | R3 (1) | 3 | | 0,222 | 0,092 | 0,092 |
| Est_98 | R1 (2) | 3 | 0,222 | | 0,571 | 0,571 |
| Liso_98 | R3 (3) | 3 | 0,092 | 0,571 | | 1,000 |
| Liso_98 | R1 (4) | 3 | 0,092 | 0,571 | 1,000 | |

I.2.3. – Valores da 3ª rega

| DEF | RAIO | | N | (1) M = 0,34 $\sigma = 0,474$ | (2) M = 0,08 $\sigma = 0,144$ | (3) M = 0,00 $\sigma = 0,000$ | (4) M = 0,00 $\sigma = 0,000$ |
|---------|------|-----|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Est_98 | R3 | (1) | 2 | | 0,200 | 0,102 | 0,102 |
| Est_98 | R1 | (2) | 3 | 0,200 | | 0,617 | 0,617 |
| Liso_98 | R3 | (3) | 3 | 0,102 | 0,617 | | 1,000 |
| Liso_98 | R1 | (4) | 3 | 0,102 | 0,617 | 1,000 | |

I.2.4. – Valores obtidos no raio 1

| DEF | REGA | | N | (1) M = 0,15 $\sigma = 0,266$ | (2) M = 0,07 $\sigma = 0,127$ | (3) M = 0,08 $\sigma = 0,144$ | (4) M = 0,00 $\sigma = 0,000$ | (5) M = 0,02 $\sigma = 0,029$ | (6) M = 0,00 $\sigma = 0,000$ |
|---------|-------|-----|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Est_98 | Rega2 | (1) | 3 | | 0,480 | 0,535 | 0,188 | 0,237 | 0,188 |
| Est_98 | Rega1 | (2) | 3 | 0,480 | | 0,929 | 0,517 | 0,615 | 0,517 |
| Est_98 | Rega3 | (3) | 3 | 0,535 | 0,929 | | 0,462 | 0,555 | 0,462 |
| Liso_98 | Rega2 | (4) | 3 | 0,188 | 0,517 | 0,462 | | 0,882 | 1,000 |
| Liso_98 | Rega1 | (5) | 3 | 0,237 | 0,615 | 0,555 | 0,882 | | 0,882 |
| Liso_98 | Rega3 | (6) | 3 | 0,188 | 0,517 | 0,462 | 1,000 | 0,882 | |

I.2.5 – Valores obtidos no raio 3

| DEF | REGA | | N | (1) M = 0,50 $\sigma = 0,577$ | (2) M = 0,88 $\sigma = 1,209$ | (3) M = 0,34 $\sigma = 0,474$ | (4) M = 0,00 $\sigma = 0,000$ | (5) M = 0,00 $\sigma = \text{---}$ | (6) M = 0,00 $\sigma = 0,000$ |
|---------|-------|-----|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Est_98 | Rega2 | (1) | 3 | | 0,467 | 0,752 | 0,295 | --- | 0,295 |
| Est_98 | Rega1 | (2) | 2 | 0,467 | | 0,349 | 0,115 | --- | 0,115 |
| Est_98 | Rega3 | (3) | 2 | 0,752 | 0,349 | | 0,518 | --- | 0,518 |
| Liso_98 | Rega2 | (4) | 3 | 0,295 | 0,115 | 0,518 | | --- | 1,000 |
| Liso_98 | Rega1 | (5) | 0 | --- | --- | --- | --- | | --- |
| Liso_98 | Rega3 | (6) | 3 | 0,295 | 0,115 | 0,518 | 1,000 | --- | |

I.3 – Análise dos valores do escoamento durante o ano de 1999 (teste LSD)

I.3.1 – Valores obtidos na 1ª rega

| DEF | RAIO | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 0,00 $\sigma = 0,000$ | M = 0,00 $\sigma = 0,000$ | M = 0,04 $\sigma = 0,040$ | M = 0,20 $\sigma = 0,341$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | 1,000 | 0,732 | 0,111 |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 1,000 | 0,732 | 0,111 |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,732 | 0,732 | 0,196 |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,111 | 0,111 | 0,196 |

I.3.2 – Valores obtidos na 2ª rega

| DEF | RAIO | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 0,34 $\sigma = 0,535$ | M = 0,00 $\sigma = 0,006$ | M = 1,05 $\sigma = 1,004$ | M = 0,43 $\sigma = 0,688$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | 0,458 | 0,137 | 0,854 |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 0,458 | 0,036* | 0,358 |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,137 | 0,036* | 0,185 |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,854 | 0,358 | 0,185 |

I.3.3 – Valores obtidos na 3ª rega

| DEF | RAIO | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 0,94 $\sigma = 1,591$ | M = 0,28 $\sigma = 0,389$ | M = 2,24 $\sigma = 0,505$ | M = 0,85 $\sigma = 0,709$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | 0,314 | 0,061 | 0,888 |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 0,314 | 0,009* | 0,382 |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,061 | 0,009* | 0,047* |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,888 | 0,382 | 0,047* |

I.3.4 – Valores obtidos na 4ª rega

| DEF | RAIO | | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | M = 0,43 $\sigma = 0,751$ | M = 0,36 $\sigma = 0,578$ | M = 3,80 $\sigma = 0,671$ | M = 1,76 $\sigma = 0,734$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | | 0,902 | 0,000* | 0,035* |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 0,902 | | 0,000* | 0,028* |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,000* | 0,000* | | 0,003* |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,035* | 0,028* | 0,003* | |

I.3.5 – Valores obtidos na 5ª rega

| DEF | RAIO | | N | (1) | (2) | (5) | (4) |
|---------|------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | M = 0,67 $\sigma = 1,058$ | M = 0,76 $\sigma = 1,015$ | M = 2,94 $\sigma = 1,097$ | M = 3,19 $\sigma = 1,122$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | | 0,924 | 0,032* | 0,021* |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 0,924 | | 0,038* | 0,024* |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,032* | 0,038* | | 0,777 |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,021* | 0,024* | 0,777 | |

I.3.6 – Valores obtidos no raio 1 com aspersores com deflectores lisos

| REGA | | N | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
|-------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 0,00 $\sigma = 0,000$ | M = 0,00 $\sigma = 0,006$ | M = 0,28 $\sigma = 0,389$ | M = 0,36 $\sigma = 0,578$ | M = 0,76 $\sigma = 1,015$ |
| rega1 | (1) | 3 | | 0,994 | 0,543 | 0,438 | 0,123 |
| rega2 | (2) | 3 | 0,994 | | 0,547 | 0,442 | 0,125 |
| rega3 | (3) | 3 | 0,543 | 0,547 | | 0,862 | 0,317 |
| rega4 | (4) | 3 | 0,438 | 0,442 | 0,862 | | 0,402 |
| rega5 | (5) | 3 | 0,123 | 0,125 | 0,317 | 0,402 | |

I.3.7 – Valores obtidos no raio 2 com aspersores com deflectores lisos

| REGA | N | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
|-----------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | M = 0,00 $\sigma = 0,000$ | M = 0,34 $\sigma = 0,535$ | M = 0,94 $\sigma = 1,591$ | M = 0,43 $\sigma = 0,751$ | M = 0,67 $\sigma = 1,058$ |
| rega1 (1) | 3 | | 0,667 | 0,251 | 0,588 | 0,407 |
| rega2 (2) | 3 | 0,667 | | 0,456 | 0,910 | 0,682 |
| rega3 (3) | 3 | 0,251 | 0,456 | | 0,525 | 0,732 |
| rega4 (4) | 3 | 0,588 | 0,910 | 0,525 | | 0,766 |
| rega5 (5) | 3 | 0,407 | 0,682 | 0,732 | 0,766 | |

I.3.8 – Valores obtidos no raio 1 com aspersores com deflectores estriados

| REGA | N | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
|-----------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | M = 0,20 $\sigma = 0,341$ | M = 0,43 $\sigma = 0,688$ | M = 0,85 $\sigma = 0,709$ | M = 1,76 $\sigma = 0,734$ | M = 3,19 $\sigma = 1,122$ |
| rega1 (1) | 3 | | 0,719 | 0,315 | 0,031* | 0,001* |
| rega2 (2) | 3 | 0,719 | | 0,507 | 0,058 | 0,001* |
| rega3 (3) | 3 | 0,315 | 0,507 | | 0,176 | 0,004* |
| rega4 (4) | 3 | 0,031* | 0,058 | 0,176 | | 0,043* |
| rega5 (5) | 3 | 0,001* | 0,001* | 0,004* | 0,043* | |

I.3.9 – Valores obtidos no raio 2 com aspersores com deflectores estriados

| REGA | N | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
|-----------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | M = 0,04 $\sigma = 0,040$ | M = 1,05 $\sigma = 1,004$ | M = 2,24 $\sigma = 0,505$ | M = 3,80 $\sigma = 0,671$ | M = 2,94 $\sigma = 1,097$ |
| rega1 (1) | 3 | | 0,136 | 0,005* | 0,000* | 0,001* |
| rega2 (2) | 3 | 0,136 | | 0,085 | 0,001* | 0,013* |
| rega3 (3) | 3 | 0,005* | 0,085 | | 0,032* | 0,290 |
| rega4 (4) | 3 | 0,000* | 0,001* | 0,032* | | 0,198 |
| rega5 (5) | 3 | 0,001* | 0,013* | 0,290 | 0,198 | |

I.4 – Análise dos valores de rugosidade aleatória (teste LSD)

| DEF | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|-----------|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | M = 0,048 $\sigma = 0,007$ | M = 0,054 $\sigma = 0,010$ | M = 0,071 $\sigma = 0,015$ | M = 0,057 $\sigma = 0,025$ |
| DE_99 (1) | 3 | | 0,599 | 0,074 | 0,443 |
| DE_98 (2) | 3 | 0,599 | | 0,176 | 0,802 |
| DL_99 (3) | 3 | 0,074 | 0,176 | | 0,258 |
| DL_98 (4) | 3 | 0,443 | 0,802 | 0,258 | |

I.5 – Análise dos valores de *Dap* recolhidos antes dos ensaios de rega (teste LSD)

I.5.1 – antes da 1ª rega, 1998

| DEF | RAIO | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|--------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 1,24 $\sigma = 0,010$ | M = 1,18 $\sigma = 0,051$ | M = 1,28 $\sigma = 0,046$ | M = 1,23 $\sigma = 0,089$ |
| Est_98 | R3 (1) | 3 | | 0,254 | 0,411 | 0,834 |
| Est_98 | R1 (2) | 3 | 0,254 | | 0,069 | 0,341 |
| Liso_98 | R3 (3) | 3 | 0,411 | 0,069 | | 0,309 |
| Liso_98 | R1 (4) | 3 | 0,834 | 0,341 | 0,309 | |

I.5.2 – antes da 2ª rega, 1998

| DEF | RAIO | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|--------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 1,27 $\sigma = 0,070$ | M = 1,22 $\sigma = 0,047$ | M = 1,34 $\sigma = 0,044$ | M = 1,24 $\sigma = 0,050$ |
| Est_98 | R3 (1) | 3 | | 0,353 | 0,133 | 0,560 |
| Est_98 | R1 (2) | 3 | 0,353 | | 0,029* | 0,714 |
| Liso_98 | R3 (3) | 3 | 0,133 | 0,029* | | 0,052 |
| Liso_98 | R1 (4) | 3 | 0,560 | 0,714 | 0,052 | |

I.5.3 – antes da 3ª rega, 1998

| DEF | RAIO | | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | M = 1,23 $\sigma = 0,104$ | M = 1,20 $\sigma = 0,026$ | M = 1,30 $\sigma = 0,070$ | M = 1,18 $\sigma = 0,021$ |
| Est_98 | R3 | (1) | 3 | | 0,588 | 0,245 | 0,345 |
| Est_98 | R1 | (2) | 3 | 0,588 | | 0,107 | 0,672 |
| Liso_98 | R3 | (3) | 3 | 0,245 | 0,107 | | 0,054 |
| Liso_98 | R1 | (4) | 3 | 0,345 | 0,672 | 0,054 | |

I.5.4 – antes da 1ª rega, 1999

| DEF | RAIO | | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | M = 0,92 $\sigma = 0,040$ | M = 0,96 $\sigma = 0,032$ | M = 1,03 $\sigma = 0,085$ | M = 1,08 $\sigma = 0,052$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | | 0,487 | 0,103 | 0,021* |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 0,487 | | 0,315 | 0,077 |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,103 | 0,315 | | 0,394 |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,021* | 0,077 | 0,394 | |

I.5.5 – antes da 2ª rega, 1999

| DEF | RAIO | | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | M = 0,95 $\sigma = 0,149$ | M = 1,06 $\sigma = 0,118$ | M = 1,08 $\sigma = 0,090$ | M = 1,11 $\sigma = 0,045$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | | 0,231 | 0,184 | 0,106 |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 0,231 | | 0,884 | 0,638 |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,184 | 0,884 | | 0,744 |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,106 | 0,638 | 0,744 | |

I.5.6 – antes da 3ª rega, 1999

| DEF | RAIO | | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | M = 1,05 $\sigma = 0,052$ | M = 1,02 $\sigma = 0,117$ | M = 1,12 $\sigma = 0,059$ | M = 1,18 $\sigma = 0,096$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | | 0,667 | 0,396 | 0,120 |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 0,667 | | 0,211 | 0,056 |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,396 | 0,211 | | 0,443 |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,120 | 0,056 | 0,443 | |

I.5.7. – antes da 4ª rega, 1999

| DEF | RAIO | | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | M = 1,24 $\sigma = 0,074$ | M = 1,09 $\sigma = 0,057$ | M = 1,15 $\sigma = 0,090$ | M = 1,31 $\sigma = 0,133$ |
| Liso_99 | R2 | (1) | 3 | | 0,048* | 0,230 | 0,345 |
| Liso_99 | R1 | (2) | 3 | 0,048* | | 0,368 | 0,008* |
| Est_99 | R2 | (3) | 3 | 0,230 | 0,368 | | 0,044* |
| Est_99 | R1 | (4) | 3 | 0,345 | 0,008* | 0,044* | |

I.5.8 – antes da 5ª rega, 1999

| DEF | RAIO | | N | (1) | (2) | (3) | (4) |
|---------|------|-----|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | M = 1,13 $\sigma = 0,026$ | M = 1,06 $\sigma = 0,049$ | M = 1,24 $\sigma = 0,065$ | M = 1,23 $\sigma = 0,065$ |
| Est_99 | R2 | (1) | 3 | | 0,168 | 0,032* | 0,059 |
| Est_99 | R1 | (2) | 3 | 0,168 | | 0,003* | 0,006* |
| Liso_99 | R2 | (3) | 3 | 0,033* | 0,003* | | 0,715 |
| Liso_99 | R1 | (4) | 3 | 0,059 | 0,006* | 0,715 | |

I.6. – Análise dos valores de K_s antes dos ensaios de rega (teste LSD)

| DEF | ENSAIO | N | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
|----------|--------|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | M = 3,32 $\sigma = 0,057$ | M = 4,10 $\sigma = 1,909$ | M = 1,79 $\sigma = 0,671$ | M = 1,25 $\sigma = 0,014$ | M = 2,69 $\sigma = 0,559$ | M = 2,72 $\sigma = 0,707$ | M = 2,29 $\sigma = 0,396$ | M = 2,15 $\sigma = 2,291$ |
| Liso | 1° | (1) | 2 | 0,512 | 0,213 | 0,106 | 0,591 | 0,612 | 0,391 | 0,333 |
| Liso | 2° | (2) | 2 | 0,512 | 0,076 | 0,036* | 0,248 | 0,259 | 0,150 | 0,124 |
| Liso | 4° | (3) | 2 | 0,213 | 0,076 | 0,650 | 0,451 | 0,434 | 0,668 | 0,756 |
| Liso | 5° | (4) | 2 | 0,106 | 0,036* | 0,650 | 0,242 | 0,232 | 0,387 | 0,451 |
| Estriado | 1° | (5) | 2 | 0,591 | 0,248 | 0,451 | 0,242 | 0,976 | 0,737 | 0,650 |
| Estriado | 2° | (6) | 2 | 0,612 | 0,259 | 0,434 | 0,232 | 0,976 | 0,715 | 0,629 |
| Estriado | 4° | (7) | 2 | 0,391 | 0,150 | 0,668 | 0,387 | 0,737 | 0,715 | 0,905 |
| Estriado | 5° | (8) | 2 | 0,333 | 0,124 | 0,756 | 0,451 | 0,650 | 0,629 | 0,905 |

J.2. – Ensaio de 1999**Ensaio com aspersores com deflectores lisos**

| Vel. 60 | Intensidade de aplicação (mm/h) | |
|-------------|---------------------------------|-------|
| | LS | 2° L |
| Tempo (min) | | |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 4,8 | 2,4 |
| 2 | 60,3 | 82,0 |
| 3 | 108,6 | 113,4 |
| 4 | 48,2 | 72,4 |
| 5 | 113,4 | 96,5 |
| 6 | 19,3 | 4,8 |
| 7 | 0 | 0 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

| Vel. 40 | Intensidade de aplicação (mm/h) | |
|-------------|---------------------------------|-------|
| | LS | 2° L |
| Tempo (min) | | |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 67,5 | 9,6 |
| 2 | 33,8 | 14,5 |
| 3 | 91,7 | 38,6 |
| 4 | 67,5 | 57,9 |
| 5 | 62,7 | 102,8 |
| 6 | 106,1 | 67,5 |
| 7 | 111,0 | 45,0 |
| 8 | 14,5 | 85,0 |
| 9 | 0 | 45,0 |
| 10 | | 29,0 |
| 11 | | 0 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

| Vel. 30 | Intensidade de aplicação (mm/h) | |
|-------------|---------------------------------|-------|
| | LS | 2° L |
| Tempo (min) | | |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 14,5 | 4,8 |
| 2 | 77,2 | 24,1 |
| 3 | 67,5 | 38,6 |
| 4 | 101,3 | 28,9 |
| 5 | 82,0 | 103,7 |
| 6 | 71,2 | 91,7 |
| 7 | 86,8 | 65,1 |
| 8 | 84,4 | 96,5 |
| 9 | 96,5 | 125,4 |
| 10 | 71,7 | 65,1 |
| 11 | 33,8 | 19,3 |
| 12 | 4,8 | 4,8 |
| 13 | 0 | 0 |

Ensaio com aspersores com deflectores estriados

| Vel. 60 | Intensidade de aplicação (mm/h) | |
|-------------|---------------------------------|------|
| | LS | 2° L |
| Tempo (min) | | |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 14,5 | 24,1 |
| 2 | 55,5 | 62,7 |
| 3 | 101,3 | 50,6 |
| 4 | 53,0 | 24,1 |
| 5 | 38,6 | 45,8 |
| 6 | 57,9 | 91,6 |
| 7 | 115,7 | 72,3 |
| 8 | 9,6 | 26,5 |
| 9 | 0 | 0 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

| Vel. 40 | Intensidade de aplicação (mm/h) | |
|-------------|---------------------------------|-------|
| | LS | 2° L |
| Tempo (min) | | |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 19,3 | 14,5 |
| 2 | 48,2 | 67,5 |
| 3 | 53,0 | 115,7 |
| 4 | 96,4 | 72,3 |
| 5 | 53,0 | 48,2 |
| 6 | 33,8 | 62,7 |
| 7 | 38,6 | 33,8 |
| 8 | 48,2 | 48,2 |
| 9 | 43,4 | 62,7 |
| 10 | 96,4 | 67,5 |
| 11 | 43,4 | 101,3 |
| 12 | 4,8 | 57,9 |
| 13 | 0 | 14,5 |
| 14 | | 0 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

| Vel. 30 | Intensidade de aplicação (mm/h) | |
|-------------|---------------------------------|------|
| | LS | 2° L |
| Tempo (min) | | |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 48,2 | 14,5 |
| 2 | 53,0 | 9,6 |
| 3 | 98,9 | 38,6 |
| 4 | 86,8 | 79,6 |
| 5 | 65,1 | 62,7 |
| 6 | 77,2 | 48,2 |
| 7 | 38,2 | 55,5 |
| 8 | 67,5 | 67,5 |
| 9 | 62,7 | 43,4 |
| 10 | 53,0 | 48,2 |
| 11 | 82,0 | 55,5 |
| 12 | 57,9 | 84,4 |
| 13 | 38,6 | 67,5 |
| 14 | 19,3 | 98,9 |
| 15 | 0 | 77,2 |
| 16 | | 72,3 |
| 17 | | 48,2 |
| 18 | | 0 |